

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPERASYONEL İLETİM YOLU ANALİZİ VE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sancar Tuna KOÇOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustiği Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPERASYONEL İLETİM YOLU ANALİZİ VE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sancar Tuna KOÇOĞLU
(503091413)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustiği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503091413 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Sancar Tuna KOÇOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**OPERASYONEL İLETİM YOLU ANALİZİ VE UYGULAMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Vahit Mermertaş**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi: **04 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten değerli hocam Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK'e verdiği tavsiyeler, yaptığı olumlu eleştiriler ve sabrı için teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılması için olanak sağlayan ve desteğini esirgemeyen Ford OTOSAN PT CAD CAE müdürüm Sn. Tolga SENOĞUZ, müdür yardımcım Sn.Alper TEKELİ ve Sn.Semih ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezin çeşitli aşamalarında desteklerini esirgemeyen Sn. Mehmet Volkan KAZANCI'ya, Sn Selçuk ÇELİKEL'e ve Sn. Murat Can TÜZEL'e teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca elde ettiğim başarılarımı borçlu olduğum, her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili AİLEME teşekkürlerimi borç bilirim.

Haziran 2012

Sancar Tuna KOÇOĞLU
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımı	1
1.2 Literatür Araştırması.....	1
1.3 Amaç ve Kapsam.....	12
2. TEORİ.....	15
2.1 Klasik İletim Yolu Analizi Metodu	15
2.1.1 Operasyonel yüklerin hesabı.....	17
2.1.1.1 Yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabı.....	17
2.1.1.2 Akustik operasyonel yüklerin hesabı	19
2.1.2 Gürültü transfer fonksiyonlarının hesabı	24
2.1.3 Orta ve yüksek frekansların incelenmesinde klasik iletim yolu analizi.....	25
2.2 Operasyonel İletim Yolu Analizi Metodu.....	27
2.2.1 Geçirgenlik yaklaşımı	28
2.2.1.1 Geçirgenlik matrisinin elde edilmesi	29
2.2.2 Operasyonel iletim yolu analizi uygulamaları	30
2.3 Klasik Metot ile Operasyonel İletim Yolu Analizi Metodunun Karşılaştırılması	33
3. DENEYSEL UYGULAMALAR.....	37
3.1 Giriş	37
3.2 Serbest-Serbest Sınır Koşulları İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar	38
3.2.1 Modal parametrelerin belirlenmesi	39
3.2.2 Klasik iletim yolu analizi	42
3.2.3 Operasyonel iletim yolu analizi	45
3.3 Elastik Takozlar Üzerine Yerleştirilen Test Düzenğinde Yapılan Deneysel Çalışmalar	48
3.3.1 Modal parametrelerin belirlenmesi	48
3.3.2 Klasik iletim yolu analizi	50
3.3.3 Operasyonel iletim yolu analizi	52
4. İLETİM YOLU ANALİZLERİ UYGULAMALARI İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ	55
4.1 Klasik İletim Yolu Analizi İçin Sayısal Çözücünün Programlanması.....	55
4.2 Operasyonel İletim Yolu Analizi İçin Sayısal Çözücünün Programlanması	57
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	61
5.1 Klasik İletim Yolu Analizi Uygulaması İle Elde Edilen Sonuçlar	61
5.1.1 Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için elde edilen sonuçlar ..	61
5.1.2 Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için elde edilen sonuçlar	64
5.2 Operasyonel İletim Yolu Analizi Uygulaması İle Elde Edilen Sonuçlar.....	66

5.2.1 Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için elde edilen sonuçlar ..	66
5.2.2 Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için elde edilen sonuçlar	69
5.3 Klasik ve Operasyonel İletim Yolu Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması	70
5.4 Farklı Sinyaller İçin Operasyonel İletim Yolu Analizi Uygulaması	74
5.4.1 Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için yapılan çalışmalar	74
5.4.2 Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için yapılan çalışmalar	77
5.5 Yapay Sinyaller İçin OİY Analizi Uygulaması.....	79
6. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEKTE YAPILABİLECEK	
ÇALIŞMALAR.....	81
6.1 Genel Değerlendirme	81
6.2 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	87

KISALTMALAR

AMM	: Advanced Measuring Method
ÇGÇÇ	: Çok Giriş Çok Çıkış
FCF	: Frekans Cevap Fonksiyonu
İYA	: İletim Yolu Analizi
GTF	: Gürültü Transfer Fonksiyonu
KİYA	: Klasik İletim Yolu Analizi
MTD	: Matris Ters Döndürme Metodu
OİYA	: Operasyonel İletim Yolu Analizi
OPA	: Operational Path Analysis
OTPA	: Operational Transfer Path Analysis
RPM	: Revolutions Per Minute
TPA	: Transfer Path Analysis
TF	: Transfer Fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemin 500Hz'e kadar sahip olduğu doğal frekansları.	41
Çizelge 3. 2 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemi sabit genlikte azalarak değişen frekanslarda sistemi tahrik eden sinyaller.	46
Çizelge 3. 3 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemi azalarak değişen genliklerde sistemi tahrik eden sinyaller.	47
Çizelge 3. 4 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneğinin 500 Hz'e kadar sahip olduğu doğal frekansları.....	50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 : Bir otomobilde temel iletim yolları.	2
Şekil 1. 2 : Bir yapısal iletim yolu şeması.	3
Şekil 1. 3 : Matris ters döndürme metodu uygulaması şematik gösterimi.	4
Şekil 1. 4 : İki serbestlik dereceli sistem ve bu sistemde incelenen alt sistem.....	6
Şekil 1. 5 : İzole alt sistemin FTF'si ile sisteme F_2 operasyonel kuvveti etkileden OİYA ile elde edilmiş FTF'nin karşılaştırması.....	7
Şekil 1. 6 : İzole alt sistemin FTF'si ile sisteme F_1 kuvveti ile bağıdıık olmayan F_2 operasyonel kuvveti etkirken OİYA ile elde edilmiş FTF'nin karşılaştırması....	7
Şekil 1. 7 : OİYA ile hesaplanmış olan toplam ses basıncı değerlerinin, ölçüm sonucu elde edilen toplam ses basıncı değerleri ile karşılaştırılması.....	9
Şekil 1. 8 : OİYA ile hesaplanarak elde edilen Campell diyagramı ve iletim yollarının dağılımı.	9
Şekil 1. 9 : Yol gürültüsü için yapısal ve hava yollu iletim yolları.	10
Şekil 1. 10: İncelenen sabit order sayısına karşın iletim yolu sayısındaki artışın analiz sonucunun hata değeri üzerine etkisi	12
Şekil 2. 1 : Sistemde ki aktif ve pasif bölgenin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2. 2 : Kuvvet Ölçer	17
Şekil 2. 3 : Bölünmüş yüzey alanları ve yüzey normalleri	20
Şekil 2. 4 : MTD metodu için operasyonel anda yapılan ses basıncı ölçümleri.....	22
Şekil 2. 5 : MTd metodu için ses kaynağı ile basınç ölçüm noktaları arasındaki transfer fonksiyonunun ters şekilde elde edilmesi	22
Şekil 2. 6 : Tersinir metot ile yapısal iletim yollarının transfer fonksiyonlarının elde edilmesi	24
Şekil 2. 7 : Motor kompartımanı ile alıcı noktası arasındaki gürültü transfer fonksiyonunun tersinir olarak elde edilmesi	25
Şekil 2. 8 : İki serbestlik dereceli sistem ve bu sistemde incelenen alt sistem.....	30
Şekil 2. 9 : Hesaba katılmayan iletim yolunun olması halinde ölçülen toplam cevap fonksiyonunun analiz ile elde edilen cevap fonksiyonu ile karşılaştırılması	36
Şekil 3. 1 : İletim yolu analizlerinde kullanılan test düzeneği.....	37
Şekil 3. 2 : LMS Scadas 310 Analizörü.....	38
Şekil 3. 3 : Serbest-Serbest sınır koşulları altında test düzeneği	39
Şekil 3. 4 : Modal analiz esnasında ivmeölçerlerin yerleştirildiği noktalar	39
Şekil 3. 5 : Serbest-serbest sınır koşullarındaki test düzeneği için tüm noktalardan alınan FTF grafikleri.	40
Şekil 3. 6 : Serbest-serbest sınır koşullarındaki test düzeneğinde tüm noktalardan alınan FTF grafiklerinin tek bir grafikte toplanmış hali.....	40
Şekil 3. 7 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneğinin 0-500Hz aralığında mod şekilleri.....	41
Şekil 3. 8 : Klasik iletim yolu analizi için deneysel uygulamada yapılan adımlar ...	42

Şekil 3. 9 : MTD metodunda iletim yollarında kuvvet tahrikine bağlı olarak ölçülen FTF matrisinin bulunması.	43
Şekil 3. 10 : MTD metodunu için kullanılan ve test düzeneği üzerine yerleştirilen dört adet ivmeölçerin lokasyonları.....	44
Şekil 3.11 : Test düzeneği üzerinde operasyonel yükleri oluşturan sarsıcıların yerleşimleri.	45
Şekil 3. 12 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilip elektrik motorları ile tahrik edilen test düzeneği.....	48
Şekil 3. 13 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için tüm noktalardan alınan FTF grafikleri.	49
Şekil 3. 14 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için tüm noktalardan alınan FTF grafiklerinin tek bir grafikte toplanmış hali.	49
Şekil 3. 15 : Takozlar üzerine yerleştirilmiş test düzeneğinin 0-500Hz aralığında sahip olduğu mod şekilleri.	50
Şekil 3. 16 : MTD metodu için iletim yollarında kuvvet tahrikine bağlı olarak ölçülen FTF matrisinin bulunması.	51
Şekil 3. 17 : Operasyonel ivme verilerinin ölçümü için kullanılan ivmeölçerlerin test düzeneği üzerindeki yerleşimi	52
Şekil 4. 1 : Klasik iletim yolu analizi için oluşturulan sayısal çözücü programın akış şeması.....	56
Şekil 4. 2 : Operasyonel iletim yolu analizi için oluşturulan sayısal çözücü programın akış şeması.....	58
Şekil 5. 1 : Durum 4 operasyonel çalışma koşulları için KİY analizi ile elde edilen sonuçlarının, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	61
Şekil 5. 2 : Durum 4 operasyonel koşulu için KİY analizi ile ölçüm sonuçlarının tahrik frekansı çevresinde karşılaştırılması.	62
Şekil 5. 3 : Durum 4 operasyonel koşulu için incelenen 300Hz tahrik frekansında iletim yollarının katkısı.	62
Şekil 5. 4 : Çizelge 3.3’de belirtilen durum 6 operasyonel çalışma koşulu için KİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması. ..	63
Şekil 5. 5 : İncelenen operasyonel koşul için iletim yollarının katkısı.	64
Şekil 5. 6 : Elastik takozlar üzerindeki sistemin incelenen operasyonel çalışma koşullarında KİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile karşılaştırılması.....	65
Şekil 5. 7 : Elastik takozlar üzerindeki sistemin 312 Hz’de KİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.	65
Şekil 5. 8 : Elastik takozlar üzerindeki sistemin KİY analizi ile elde edilen, incelenen operasyonel koşulda toplam referans sinyali üzerinde iletim yollarının etkisinin dağılımı.	66
Şekil 5. 9 : Çizelge 3.2’de gösterilen durum 4 operasyonel çalışma koşulu için OİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması. ..	66
Şekil 5. 10 : 300 Hz tahrik frekansında OİY analizi ile elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.	67
Şekil 5. 11 : Durum 4 operasyonel koşulu için OİY analizi ile elde edilen iletim yollarının toplam referans sinyali üzerinde katkısının dağılımı.	67
Şekil 5. 12 : Çizelge 3.3’de belirtilen durum 6 operasyonel çalışma koşulları için OİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.	68
Şekil 5. 13 : İncelenen operasyonel koşulu için OİY ile elde edilen, iletim yollarının katkısının dağılımı grafiği.....	69

Şekil 5. 14 :	Elestik takozlar üzerindeki sistemde incelenen operasyonel çalışma koşullarında OİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçülen referans sinyali ile karşılaştırılması.....	69
Şekil 5. 15 :	Elastik takozlar üzerindeki sistem için, OİY analizi ile elde edilen, incelenen operasyonel koşulda referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımı.....	70
Şekil 5. 16 :	Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemde KİY ve OİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile karşılaştırılması.....	71
Şekil 5. 17 :	Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemde incelenen operasyonel koşullar için KİY analizi ve OİY analizi metotları ile elde edilen iletim yolları katkısının grafiğinin logaritmik ölçekte gösterimi.	72
Şekil 5. 18 :	Elastik takozlar üzerinde elektrik motorları ile tahrik edilen sistemde incelenen operasyonel koşul için KİY analizi sonuçları ile OİY analizi sonuçlarının karşılaştırılması.....	73
Şekil 5. 19 :	Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde baskın tahrik frekansında KİY analizi sonuçları ile OİY analizi sonuçlarının karşılaştırılması. ...	73
Şekil 5. 20 :	Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde incelenen operasyonel koşullarda baskın tahrik frekansında KİY analizi ve OİY analizi ile elde edilen iletim yolu katkısının dağılımı grafiği.	74
Şekil 5. 21 :	Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için birinci operasyonel koşullar altında OİY analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması.	75
Şekil 5. 22 :	Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için incelenen birinci operasyonel koşulda hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını.	76
Şekil 5. 23 :	Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için ikinci operasyonel koşullar altında OİY analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması.	76
Şekil 5. 24 :	Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için incelenen ikinci operasyonel koşulda hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını.....	77
Şekil 5. 25 :	Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, birinci operasyonel çalışma koşulu için OİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin ve ölçüm sonuçları ile elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması. ...	77
Şekil 5. 26 :	Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, incelenen birinci operasyonel koşul için en baskın frekanslarda hesaplanan referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını.	78
Şekil 5. 27 :	Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, ikinci operasyonel çalışma koşulu için OİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin ve ölçüm sonuçları ile elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması. ...	78
Şekil 5. 28 :	Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, incelenen ikinci operasyonel koşul için en baskın frekanslarında hesaplanan referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını.	79
Şekil 5. 29 :	Sanal Operasyonel koşul için OİY analizi kullanılarak elde edilen referans sinyali ve iletim yollarının bu sinyal üzerindeki etkilerinin katkıları.	80

OPERASYONEL İLETİM YOLU ANALİZİ VE UYGULAMASI

ÖZET

Özellikle sürüş kalitesi ve seyahat konforu açısından, araç içi titreşim ve gürültünün optimize edilmesi otomotiv sektörü için en önemli konulardan bir tanesidir. Birçok parametreye bağlı olarak ortaya çıkan araç içi titreşim ve gürültü problemi, üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, gürültü ve titreşimlerin oluşmasına neden olan kaynak, bu titreşim ve gürültünün alıcıya ulaşmasını sağlayan iletim yolu ve bu sinyallerine maruz kalan alıcıdır. İletim yolu analizleri bu üç temel bileşenden iletim yolları ile ilgilenmektedir. Araç içi gürültü ve titreşim sorunlarına yol açan iletim yollarının tespiti ve hangi iletim yolunun toplam gürültü ve titreşim problemine daha çok katkı yaptığının bulunması için kullanılan metotlara, iletim yolu analizi metotları denilmektedir. Klasik iletim yolu analizi metodu günümüzde otomotiv sektöründe sıkça kullanılan bir tekniktir ancak birtakım dezavantajlara sahiptir. İletim yolu analizlerinde bu dezavantajların giderilmesi amacıyla bazı yeni analiz metotları geliştirilmiştir, bunlardan bir tanesi operasyonel iletim yolu analizi metodudur.

Bu tezin amacı klasik ve operasyonel iletim yolu analizlerinin incelenmesi, klasik ve operasyonel iletim yolu analizlerinde kullanılacak sayısal çözümleme yapan bir programın oluşturulması ve her iki metotla da iletim yolu analizinin bir uygulamasının gerçekleştirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, tez kapsamında yapılan çalışmalara, klasik ve operasyonel iletim yolu analizi hakkında literatürde bulunan teorik bilgilerin derlenmesi ile başlanılmıştır. Sonrasında, tasarlanan bir test düzeneği üzerinde klasik ve operasyonel iletim yolu analizi uygulaması yapılmıştır. Bunun yanı sıra, klasik iletim yolu ve operasyonel iletim yolu analizlerinde kullanılacak olan sayısal çözücü program MATLAB programı kullanılarak oluşturulmuştur. Son aşamada klasik ve operasyonel metotlar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İletim yolu analizi metotlarında, vibroakustik yükler nedeniyle oluşan toplam cevap fonksiyonu, birbirinden bağımsız iletim yollarından gelen titreşim ve akustik yüklerin toplamı olarak ifade edilir. Bu yaklaşım için tüm sistem, sistemi etkileyen yükleri oluşturan aktif bölge ve bu yüklerden etkilenen pasif bölge olmak üzere iki ayrı alt bölgede incelenmektedir. Klasik iletim yolu analizi metodunda, toplam cevap fonksiyonu iki temel bileşenden oluşmaktadır. Birincisi, sistemin iletim yolları ile referans noktaları arasında ki transfer fonksiyonları. İkinci bileşen ise, sistemin pasif tarafına etki eden operasyonel yüklerdir. Klasik iletim yolu analizi, bu bileşenleri elde edebilmek için iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, incelenen iletim yolları için modal çekiç ya da sarsıcı yardımı ile frekans cevap fonksiyonlarının elde edilir. İkinci aşama ise, operasyonel yapısal ve akustik yüklerin bulunması için yapılan testler gerçekleştirilmesidir. Tez kapsamında, tasarlanan test düzeneği üzerinde bir birinden farklı iki sınır ve tahrik koşulları altında testler gerçekleştirilmiştir. Birinci durumda test düzeneği, elastik ipler ile bir test rigine asılmış, sarsıcılar kullanılarak sistem üzerine etkileyen

operasyonel koşullar oluşturulmuş ve testler gerçekleştirilmiştir. İkinci durumda ise, aynı test düzeneği elastik takozlar üzerine yerleştirilmiş ve elektrik motorları ile tahrik edilerek oluşturulan farklı operasyonel koşullarda testler gerçekleştirilmiştir. Klasik iletim yolu analizinin ilk aşaması olan transfer fonksiyonlarının elde edilmesi esnasında, iletim yollarının birbirleri arasında ki etkileşimini kaldırmak amacıyla, incelenen her bir iletim yolu için ayrı ayrı tekrarlanarak, sistemin kaynak bölgesi ile alıcı bölgesi arasındaki fiziksel bağlantılar kaldırılmalıdır. Klasik iletim yolu analizinin ikinci aşamasında incelenen sistemin pasif tarafında etkiyen operasyonel yükler elde edilmelidir. Operasyonel yüklerin bulunmasında kullanılan metotlar, kuvvet sensörü kullanılarak doğrudan ölçüm, dinamik katılık metodu ve matris ters döndürme metodudur. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda matris ters döndürme metodu kullanılarak incelenen sistemin pasif tarafına etkiyen operasyonel yükler elde edilmiştir.

Günümüzde klasik iletim yolu analizi metodu özellikle otomotiv sektöründe sıkça kullanılan bir metot olmasına karşın yukarıda bahsedildiği gibi transfer fonksiyonlarının elde edilmesi esnasında, incelenen iletim yolunda sistemin kaynak bölgesi ile alıcı bölgesi arasındaki fiziksel bağlantılar kaldırılması işlemi, klasik iletim yolu analizinin iki önemli dezavantaja sahip olmasına neden olmaktadır. Birincisi, klasik iletim yolu analizi uzun zaman alan testler gerektirmektedir. İkincisi ayrıma işlemleri, iletim yolu analizi esnasında sistemin sahip olduğu sınır koşullarının, sistemin geçek sınır koşullarından farklı olmasına neden olmaktadır.

Son yıllarda iletim yolu analizlerin de, klasik yöntemlerin dezavantajlarını gidermek amacıyla, geçirgenlik yaklaşımını kullanarak, yeni bir iletim yolu analizi metodu ortaya çıkarılmıştır. Bu metot, analizin gerçekleşebilmesi için sadece operasyonel verilere ihtiyaç duymasından ötürü, operasyonel iletim yolu analizi olarak ifade edilir. Klasik iletim yolu analizi metodu ile operasyonel iletim yolu analizinde kullanılan matematiksel ifadeler yapısal anlamda birbirine benzemekle beraber, iki temel farklılık içermektedir. Bunlardan birincisi, operasyonel iletim yolu analizinde klasik metottan farklı olarak, hesaplanarak bulunan operasyonel yükler yerine, test esnasında ölçülen operasyonel cevap sinyalleri kullanılır. İkinci farklılık ise operasyonel iletim yolu analizinde klasik metotta olduğu gibi transfer fonksiyonları değil, iletim yolunun giriş sinyali ile sistemin cevap sinyali arasında ki geçirgenlik fonksiyonları kullanılır. Geçirgenlik fonksiyonu incelenen sistemin, iki cevap fonksiyonu arasında ki karakteristik ilişkiyi ifade eden fonksiyondur. Tez kapsamında, test düzeneğinin tüm sınır ve tahrik koşulları için klasik ve operasyonel iletim yolu analizleri uygulanmış ve bu metotlar ile elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca tez kapsamında farklı operasyonel koşullar için operasyonel iletim yolu analizi uygulamaları gerçekleştirilmiş, bu sayede operasyonel iletim yolu analizlerinde kullanılan sayısal çözücü programın sağlamlığı test edilmiştir.

Deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali, ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile örtüşmemektedir. Buna karşın, operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali, ölçüm sonuçları ile iyi bir biçimde örtüşmektedir. Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlardan yola çıkarak söylenilebilir ki, klasik iletim yolu analizi metodunda, iletim yollarının ile referans noktaları arasında ki transfer fonksiyonlarının bulunması esnasında gerçekleştirilen ayırma

işlemleri nedeniyle elde edilen sonuçlar incelenen sistemin gerçek dinamik yapısını yansıtamamaktadır. Buna karşın, operasyonel iletim yolu analizinde sistemin gerçek sınır koşullarına sahip olduğu operasyonel koşullarda alınana operasyonel veriler kullanılmasından ötürü, operasyonel iletim yolu analizi incelenen sistemin dinamik yapısını doğru bir biçimde sonuçlara yansıtabilmektedir. Buna ek olarak operasyonel iletim yolu analizinde, elde edilen geçirgenlik fonksiyonları kullanılarak sanal operasyonel koşullar için sistemin oluşturacağı çıkış sinyalleri testler gerçekleştirilmeden hesap edilebilir.

OPERATIONAL TRANSFER PATH ANALYSIS AND APPLICATION ON TEST RIG

SUMMARY

The vibration and noise performance especially on drive quality and travel comfort has become one of the most important issues in automotive sector. Vehicle vibration and noise problems depending on various parameters consist of three main components which are; (i) noise or vibration source, (ii) transfer path which provides these noise and vibration signals reach to the receiver and (iii) the receiver exposed to these vibration and noise. In general, there are two main approaches to solve vibration and noise problems. The first approach focuses on identification of the noise and vibration sources and entails modifications on these sources. The second approach focuses identification and improvement of noise and vibration transfer paths of the system. The purpose of a transfer path analysis is to determine which paths are dominant in transmitting vibrations or noise from one or several sources to one or more receivers. Transfer path analysis has evolved into a widely used tool for noise and vibration troubleshooting in industry. But methods which are used in classical transfer path analysis have some limitations. Several new approaches, such as operational transfer path analysis, have appeared over the last few years attempting to circumvent these limitations.

The purposes of this thesis are examination of theoretical aspects of classical and operational transfer path analysis, building a numerical program to be used in numerical simulations of classical and operational transfer path analysis and performing transfer path analysis with both classical and operational methods.

In order to achieve objectives of this thesis, theoretical information about operational and classical transfer path analysis in literature is compiled first. Then, classical and operational transfer path analyses are performed on a test system developed for testing and validation purposes. In addition, for both classical and operational transfer path analysis, numerical solver programs are created by using MATLAB program. In the last stage, classical and operational transfer path analysis methods are compared by considering analysis results.

In classical transfer path analysis, the acoustic and vibration responses at the target locations are expressed as a sum of path contributions each associated with an individual path and load. Classical transfer path analysis approach allows expressing individual path contributions as a result of multiplying two terms. These terms are operational loads acting on the passive side of system and the frequency response function of each transfer path between the load location and the receiver point. In order to obtain these two terms, classical transfer path analysis has two main steps. The first step is measuring the frequency response function of each transfer path. The second step of transfer path analysis is

identification of the operational loads for both structural and acoustic transfer paths during operational tests. Transfer functions for structural transfer paths can be measured by hammer or shaker excitation techniques. Within the scope of this thesis, tests for classical and operational transfer path analysis were performed using a test rig which can be utilised in two different test configurations. In first test configuration, the test system is hanged to a test rig and operational conditions acting on the system created by using shakers. In the second test configuration, the test rig is supported on elastic wedges and excited by electric motor. In both of these two different boundary and excitation conditions, classical transfer path analysis is performed for each operational condition. In first stage of classical transfer path analysis tests, in order to prevent interaction between transfer paths, the FRFs between transfer paths and receivers are measured by excitation of modal hammer with the source side disconnected from the target side for each examined transfer paths individually. The second step of tests for classical transfer path analysis is the identification of operational loads acting on passive side of system. Under the scope of this thesis, discussions are limited to only to structural transfer paths. For structural operational loads, there are three main techniques to obtain operational forces; direct measurement, complex stiffness method and matrix inversion method. In direct measurement method, operational forces can be obtained from direct measurement using special load cells. The second approach is the so-called complex stiffness method which can be used when the active and passive system components are connected with flexible mounts. For transfer paths which have rigid connections or where the mount stiffness is very large compared to the body impedance, using minimum relative displacement over the mount is not possible. At this point another technique called matrix inversion method can be used, which is based on using inversion of acceleration-force matrix between structural responses on receiver side due to force excitation at all transfer paths. In this method acceleration values obtained from operational test is multiplied by inverse of acceleration-force matrix to find operational forces of examined operational conditions. Within the scope of this thesis matrix inversion method is used to obtain operational forces acting on passive subsystem because of the fact that the active and passive sides of test rig have rigid connections.

Today classic transfer path analysis method is well-known and commonly used technique to improve noise and vibration performance of a vehicle. On the other hand, the classical transfer path analysis technique as mentioned above, identify the transfer functions for transfer path under examination when the passive side of system is disassembled from active side of system to eliminate flanking transfer paths. But this situation leads to two major disadvantages. The first disadvantage is that this disassembling procedure results in long measurement times. Other disadvantage of this procedure is that the boundary conditions are not the same as those under operational conditions due to disassembling procedure.

In recent years, new methods have been developed to resolve the shortcomings of classical transfer path analysis. One of these methods is called operational transfer path analysis which is designed to achieve the objectives by using only operational data with the application of transmissibility concept. There are two main differences between classical transfer path analysis and operational path analysis. In contrary to the classical transfer path analysis, operational transfer path analysis uses only operational responses that are collected under operational

conditions instead of computed operational loads. The second difference is that, the operational transfer path analysis uses transmissibility functions instead of noise transfer functions in classical approach. Transmissibility function represents the characteristic relation between two response functions of system. In this thesis, for all boundary and excitation conditions of test system, classical and operational transfer path analyses are performed to compare classical and operational transfer path analysis with each other in terms of their performances. Additionally, extra tests are performed for different operational conditions on test rigs so as to assess the robustness of the numerical program developed by Author of this thesis for operational transfer path analysis. In practice, operational transfer path analysis could suffer from bad conditioning problems. The operational transfer path analysis usually employs the singular value decomposition algorithm in order to prevent such bad conditioning problems while describing the transfer functions. Using SVD technique is an essential step for transfer function estimation in order to prevent from measurement noise and other external disturbances. As recommended in literature, SVD algorithm is also used in the numerical solver program which was generated for this thesis in operational transfer path analysis study.

The results of experimental studies reveal that, the reference signal obtained by classical transfer path analysis do not correlate well with the measured reference signal. On the other hand, the reference signal obtained by operational transfer path analysis agrees very well with the measured reference signal. As a result of analyses carried out with the scope of this thesis, it can be said that due to the separation of the active and passive sides of individual transfer paths, classical transfer path analysis does not express the actual dynamic behaviour of the real system. For this reason, it is difficult to obtain a good correlation between the measured and the computed reference signal by using classical transfer path analysis. On the other hand, in operational transfer path analysis, because measurements are carried when the system is operating under actual boundary conditions, operational transfer path analysis is capable of expressing the true dynamic behaviour of the system and gives correct contributions of transfer paths on reference signal. Furthermore, the transmissibility functions obtained from tests performed in operational transfer path analysis can be used with artificial input signals. Therefore, reference signal and contribution of transfer paths on this reference signal can be estimated using possible excitation scenarios or operating conditions without performing additional measurements.

1. GİRİŞ

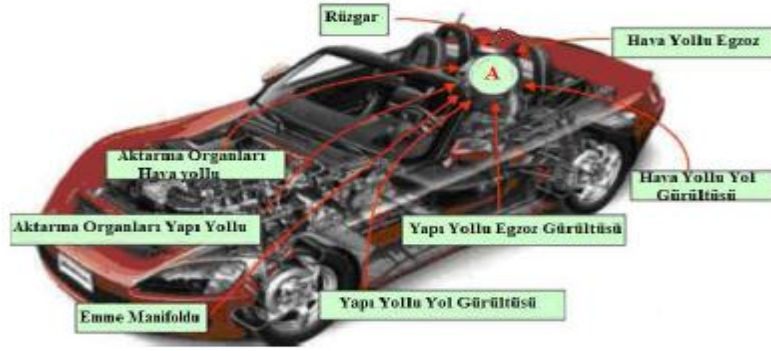
1.1 Problemin Tanımı

Pek çok diğer sektörde olduğu gibi otomotiv sektöründe de titreşim ve gürültü kontrolü önem arz etmektedir. Birçok farklı parametreye bağlı olarak ortaya çıkan araç içi titreşim ve gürültünün, özellikle sürüş kalitesi ve seyahat konforu açısından optimize edilmesi, otomotiv sektöründe gün geçtikçe önemi artan bir konudur. Gürültü ve titreşim kavramını üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar gürültü ve titreşimlerin oluşmasına neden olan kaynak, bu titreşim ve gürültünün alıcıya ulaşmasını sağlayan iletim yolu ve titreşim ve gürültü sinyallerine maruz kalan alıcıdır.

Bir aracın titreşim ve akustik özelliklerini geliştirme aşamasında, araç içi gürültü ve titreşim sorunlarına yol açan iletim yollarının tespiti için kullanılan metotlara iletim yolu analizi metotları denilmektedir. Klasik iletim yolu analizi metodu, günümüzde otomotiv sektöründe aracın titreşim ve akustik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan önemli bir metodudur. Ancak sahip olduğu dezavantajlar sebebiyle, daha gelişmiş metotların bulunması için yapılan çalışmalar devam etmektedir.

1.2 Literatür Araştırması

İletim yolu analizi, titreşimin veya gürültünün bir ya da daha fazla alıcıya iletimi esnasında, hangi iletim yolunun toplam gürültü ve titreşime daha çok katkı yaptığının bulunması için kullanılan bir analiz metodudur. İletim yolu analizi metodu, özellikle otomotiv sektöründe yaygın şekilde kullanılmaktadır. Literatür araştırması esnasında fark edilmiştir ki, iletim yolu analizi konusunu ele alan tez ve makalelerin büyük çoğunluğu otomobil ve benzeri tekerlekli taşıtlar üzerine yoğunlaşmıştır. Bir otomobil için temel titreşim ve gürültü kaynakları motor, şanzıman, hava emme girişi, egzoz çıkışı, tekerlekler ve yol gürültüsü olarak belirtilebilir. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi temel iletim yolları ise motor-şanzıman, egzoz bağlantıları, tekerlek-süspansiyon bağlantıları ve hava yollu iletim yolları olarak ifade edilebilir[1].



Şekil 1. 1: Bir otomobilde temel iletim yolları[2].

Literatürde iletim yolu analizi problemini inceleyen çalışmalar iki gruba ayrılmaktadır. Klasik İletim yolu analizi metotlarını inceleyen çalışmalar ve operasyonel iletim yolu analizi metotlarını inceleyen çalışmalar[3]. Klasik iletim yolu analizinde, sistemin referans noktaları ile iletim yollarına etkiyen giriş sinyalleri arasında ki ilişkiyi veren transfer fonksiyonları, incelenen iletim yolunda sistemin aktif ile pasif tarafları ayrıldıktan sonra hesap edilir. Operasyonel iletim yolu analizi ise, incelenen sistem normal çalışma koşulları altında iken yapılan iletim yolu analizi metodudur. Bu yöntemler bir sonraki bölümde daha detaylı olarak açıklanacaktır. Operasyonel iletim yolu analizi için literatürde OTPA, OPA, AMM ve TPA FORM isimleri de kullanılmaktadır[4].

Klasik iletim yolu analizinde kullanılan temel denklemler literatürde bulunan pek çok çalışmada ifade edilmiştir. İncelenen sisteme etkiyen kaynağın tutarlı olduğu ve sadece yapısal iletim yollarının incelendiği bir sistemde, tek bir alıcıdaki ses basıncını klasik iletim yolu analizinde ifade eden denklem aşağıda denklem 1.1 de belirtilmektedir[1].

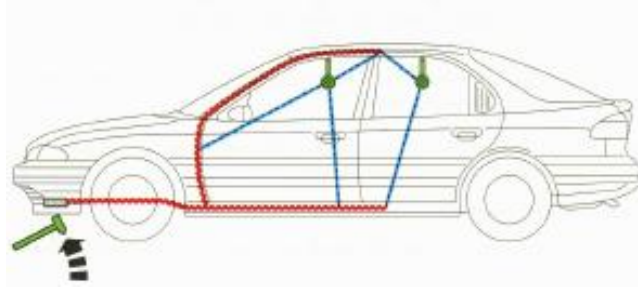
$$pt_j(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{p_{ij}(\omega)}{F_i(\omega)} f_i(\omega) \quad (1.1)$$

Bu denklemde, $pt_j(\omega)$ j alıcısında ki toplam ses basıncını, $f_i(\omega)$ i. iletim yoluna etkiyen operasyonel kuvveti, $\frac{p_{ij}(\omega)}{F_i(\omega)}$ j alıcı noktası ile i. iletim yolu arasında ki transfer fonksiyonunu ifade etmektedir.

İncelenen sistemde alıcı noktasındaki toplam ses basıncına, yapısal iletim yollarının etkisinin yanı sıra hava yollu iletim yollarının etkisi de dahil edilerek, lineer ve zamandan bağımsız bir sistem için iletim yolu analizinde kullanılacak temel denklem aşağıda denklem 1.2’de gösterildiği gibi belirtilmektedir[4].

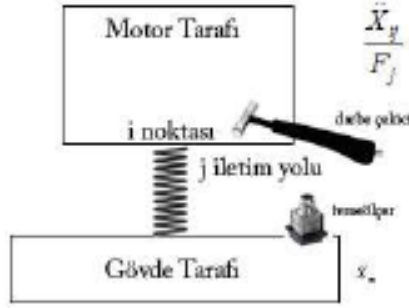
$$y_k(\omega) = \sum_{i=1}^n H_{ki}(\omega)F_i(\omega) + \sum_{j=1}^p H_{kj}(\omega)Q_j(\omega) \quad (1.2)$$

Bu denklemde $F_i(\omega)$ i. yapısal iletim yoluna etkiyen operasyonel yük ya da kuvvet, $Q_j(\omega)$ j. iletim yoluna etkiyen akustik yük, genellikle hacimsel hız, $H_{kj}(\omega)$ ve $H_{ki}(\omega)$ ise j ve i iletim yolları ile k alıcısı arasındaki transfer fonksiyonları ifade etmektedir. Şekil1.2’de araç üzerinde bir yapısal iletim yolu şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. 2 : Bir yapısal iletim yolu şeması[5].

Denklemlerden anlaşıldığı gibi klasik iletim yolu analizi iki temel aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama operasyonel kuvvetlerin ve hacimsel hızların elde edilmesi, ikinci aşama ise alıcı ile iletim yolları arasındaki transfer fonksiyonlarının hesabıdır [1,4,5]. Literatürde operasyonel kuvvetlerin elde edilmesi için kullanılan metotlar kapsamlı bir biçimde anlatılmıştır. Operasyonel kuvvetler, kuvvetölçer yardımıyla doğrudan iletim yollarının bağlantı noktalarından ölçülebilindiği gibi, dolaylı yöntemlerle de hesaplanabilir. Operasyonel kuvvetlerin doğrudan ölçümü pek tercih edilmeyen bir yöntemdir çünkü genellikle motor kompartımanında özellikle motor ve şanzıman kulaklarında, kuvvetölçerlerin doğru şekilde yerleştirilmesi için yeterli alan bulunmamaktadır[4]. Operasyonel kuvvetlerin dolaylı olarak hesaplanmasını sağlayan yöntemler ise kompleks dinamik katılık metodu ve matris ters döndürme metodudur. İletim yolu analizlerinde, iletim yolu ile titreşim kaynağının bağlantı noktalarında, bağlantının kaynak tarafına kalan bölümüne bağlantının aktif tarafı, diğer tarafına pasif tarafı denilmektedir. Dinamik katılık metodu, incelenen sistemin aktif ve pasif tarafları, birbirlerine elastik ara malzemeler ile bağlı olduğu koşullarda uygulanması tavsiye edilen bir metottur[4]. İncelenen sistemde aktif ile pasif taraflar arası bağlantı rijit yada yüksek katılık oranına sahip, diğer bir deyişle sistemin aktif ile pasif tarafları arasındaki göreceli deplasman değeri çok düşük olduğu durumlarda matris ters döndürme metodu önerilmektedir [6,7]. Şekil1.3’de matris ters döndürme uygulaması şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 1.3 : Matris ters döndürme metodu uygulaması şematik gösterimi [5].

Literatürde operasyonel kuvvetlerin hesap yöntemlerinin yanı sıra operasyonel hacimsel hızların hesap yöntemlerinden de bahsedilmektedir. Operasyonel hacimsel hızların en yaygın dolaylı hesaplama yöntemleri noktadan noktaya yüzey örnekleme, ses şiddetinin ölçümü ve matris ters dönüşüm metodudur[10].

İletim yolları için yapısal ve hava yollu transfer fonksiyonları, literatürdeki pek çok çalışmada doğrudan ve dolaylı olarak adlandırılan iki farklı metot ile hesaplanabildiği ifade edilmiştir. Transfer fonksiyonlarının doğrudan ölçüldüğü metotta, yapısal iletim yolları modal çekiç veya sarsıcı ile tahrik edilirken, hava yollu iletim yolları için hacimsel hız kaynağı kullanılarak, iletim yolları ile toplam ses basıncının ölçüldüğü referans noktası arasında ki transfer fonksiyonları elde edilir. Dolaylı metotta ise, bu sefer toplam gürültünün ölçüldüğü referans noktasına hacimsel hız kaynağı, iletim yollarına ise ivmeölçerler ya da hava yollu iletim yolları için mikrofonlar yerleştirilerek tersinir bir biçimde transfer fonksiyonları elde edilir. Eğer iletim yolu sayısı alıcı sayısından fazla ise, transfer fonksiyonlarının doğrudan hesaplama metodu kullanılarak elde edilmesi, dolaylı yöntemle göre tercih edilmelidir[1]. İletim yollarının transfer fonksiyonlarının hesaplanma metotları ile ilgili daha detaylı açıklamalar teori bölümünde yapılacaktır. Literatürde klasik iletim yolu analizi metodunun eksik yönlerini geliştiren çalışmalara rastlanılmaktadır. Sistemin yüksek order ve frekansları incelenmek istendiğinde, klasik iletim yolu analizi yetersiz kalmaktadır. Çünkü yüksek orderlar da, incelenen sistemde ki modların faz ve genlik değerlerinde ki küçük detaylara hassasiyeti daha yüksektir. Modal örtüşme değeri bir den büyük olan yüksek modlarda, incelenen iletim yolunun transfer fonksiyonunun faz ve genlik değerleri kararsızlaşmaktadır. Transfer fonksiyonunun faz ve genlik değeri belirli bir kararlılık durumunu aştığı zaman klasik iletim yolu analizi uygulamaları artık pratik anlamda kullanışsız hale gelir[11].

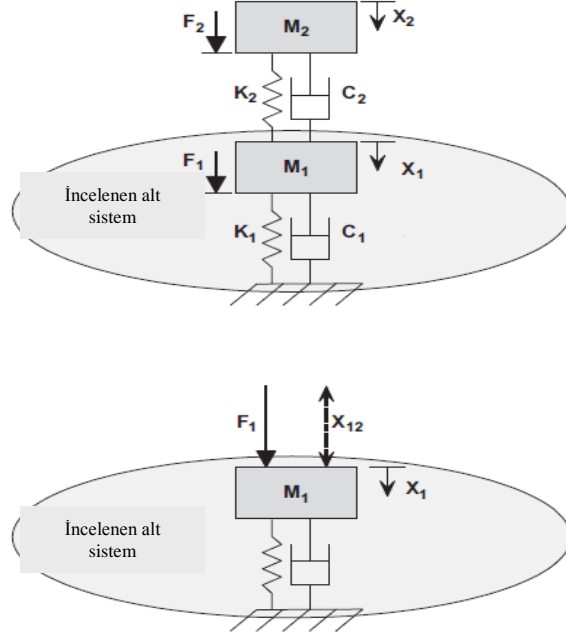
Bu problemi aşmak için klasik iletim yolu analizi orta ve yüksek frekans aralığı için geliştirilmiştir[6,7]. Bu yeni metoda göre, incelenen iletim yolunda sadece genlik değerleri kullanılmalıdır, faz bilgileri iletim yolu transfer fonksiyonundan çıkarılır[12]. Bir sonraki aşamada ise, iletim yolu analizinde daha kararlı sonuçlar elde edilmesi için transfer fonksiyonu 'm' alıcı noktası etrafında bulunan L noktalarından alınan basınç değerlerinin ortalaması kullanılarak elde edilir.

Klasik iletim yolu analizi literatürde en çok yer alan iletim yolu analizidir. Ancak klasik iletim yolu iki önemli dezavantaja sahiptir. Birinci dezavantaj, klasik iletim yolu analizi uzun zaman alan bir testler gerektirmektedir. Bir araca tam bir iletim yolu analizi uygulamasında işlemler birkaç hafta sürebilmektedir[13]. İkinci dezavantaj ise, iletim yolları ile referans noktaları arasındaki transfer fonksiyonları bulunurken, incelenen iletim yolunda, sistemin aktif ve pasif taraflarının birbirinden ayrılması işlemi, aracın dinamik sisteminin etkilenmesine, diğer bir deyişle iletim yolu analizi esnasında sistemin sahip olduğu sınır koşullarının, sistemin geçek sınır koşullarından farklı olmasına neden olmaktadır [1,3,9].

İletim yolu analizlerin de, klasik yöntemlerin dezavantajlarını engellemek için yeni iletim yolu analizi yöntemleri geliştirilmiştir. Bu noktada geçirgenlik yaklaşımı, iletim yolu analizlerinde bu dezavantajların giderilmesi noktasında yeni fırsatlar yaratmaktadır. Sadece operasyonel yüklere ihtiyaç duyduğu için, geçirgenlik yaklaşımı ile iletim yolu analizini uygulayan metotlara genel olarak, operasyonel iletim yolu analizleri adı verilir[15].

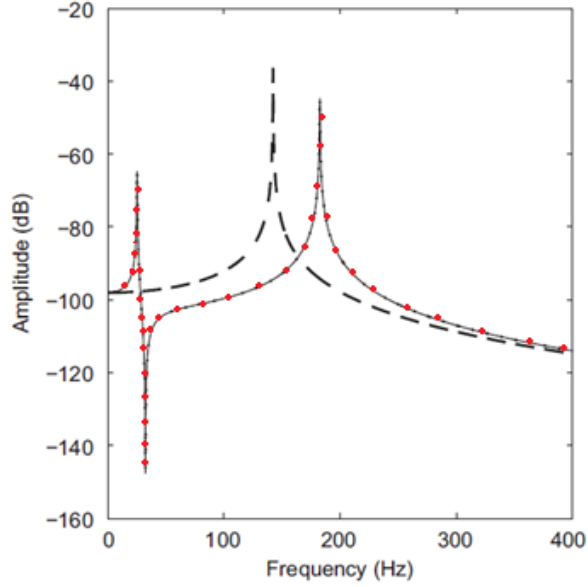
Operasyonel iletim yolu analizi ile ilgili teorik çalışmaları içeren kaynaklarda, geçirgenlik yaklaşımının operasyonel iletim yolu analizlerinde nasıl kullanıldığı literatürde iki ya da daha çok serbestlik derecesine sahip basit sistemler üzerinden anlatılmaktadır. İki serbestlik derecesine sahip olan sistem, şekil 1.4'de ki gibi incelenen alt sistem ve bağlantı alt sistemi olarak iki sisteme ayrılmıştır.

Tüm sistemin, incelenen ve bağlantı isimli iki alt sistem olarak ayrılmasında ki amaç, incelenen alt sistemin frekans cevap fonksiyonunu, tüm sistemden izole etmeden bulabilmektir[3]. İki serbestlik dereceli bir sisteme nümerik olarak operasyonel iletim yolu analizi uygulaması ile elde edilen sonuçlar şekil 1.5 ve 1.6 da gösterildiği gibidir.



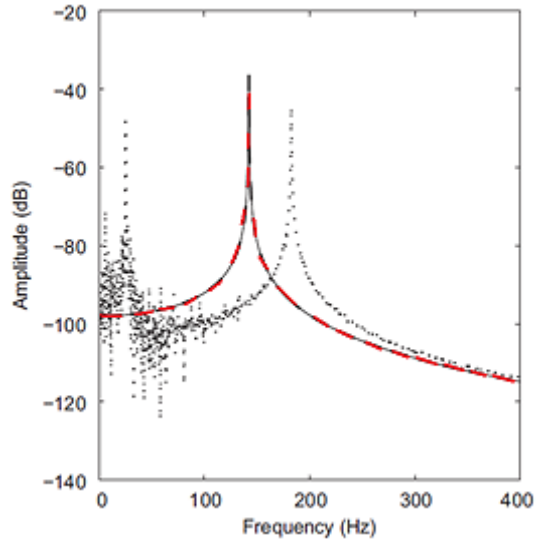
Şekil 1.4 : İki serbestlik dereceli sistem ve bu sistemde incelenen alt sistem[3].

Burada kesikli çizgi ile gösterilen eğri, incelenen alt sistemin, diğer sistemden izole edilmiş koşullar altında sahip olduğu, H_{11} frekans cevap fonksiyonudur. H_{11} frekans cevap fonksiyonunun operasyonel iletim yolu analizi ile hesaplanarak bulunabilmesi için incelenen alt sisteme etki eden F_1 kuvvetinin ve incelenen alt sistem ile bağlantı sistemi arasındaki deplasman farkının biliniyor olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra H_{11} frekans cevap fonksiyonunun doğru bir biçimde bulunabilmesi için, incelenen alt sistem ve bağlantı sistemleri arasındaki deplasman farkı ile F_1 kuvvetinin arasında ki korelasyon değerinin 0.9'dan az olması gerekmektedir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için M_2 kütlesine etkiyen ve F_1 kuvvetinden bağımsız bir F_2 kuvveti var olmalıdır[3]. Şekil 1.5 ve 1.6 da noktalar ile ifade edilen eğri ise ölçüm ile elde edilmiş tüm sistemin frekans cevap fonksiyonu ifade etmektedir. Düz çizgi ile ifade edilen eğri, operasyonel iletim yolu ile hesaplanarak bulunan incelenilen alt sistemin frekans cevap fonksiyonu H_{11}^* 'i göstermektedir. Şekil 1.5 de bağlantı sistemine F_2 operasyonel kuvveti etkileden, şekil 1.6 da ise bağlantı sistemine F_2 operasyonel kuvveti etkidiği koşullar altında yapılan operasyonel iletim yolu analizi sonuçları gösterilmiştir. Şekil 1.5 de gösterildiği üzere bağlantı sistemine F_2 operasyonel yükünün etkilediği durumda, operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen frekans tepki fonksiyonu H_{11}^* , incelenen alt sistemin H_{11} frekans tepki fonksiyonu ile örtüşmemektedir[3].



Şekil 1. 5 : (---) incelenen alt sistemin tüm sistemden izole edilmiş bir biçimde elde edilen H_{11} frekans tepki fonksiyonu, (—) sisteme F_2 operasyonel kuvveti etkileden OİYA ile elde edilmiş H_{11}^* frekans tepki fonksiyonu, (···) M_2 kütle sine etkiye bir F_2 kuvveti olmadığı durumda tüm sistemin frekans cevap fonksiyonu[3].

Şekil 1.6 da ise M_2 kütle sine F_1 kuvveti ile bağdaşık olmayan bir F_2 kütle sine etkimesi durumunda operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen incelenen alt sistemin frekans tepki fonksiyonu H_{11}^* , incelenen alt sistemin H_{11} frekans tepki fonksiyonu ile örtüştüğü gösterilmiştir[3].



Şekil 1. 6 : (---) İncelenen alt sistemin tüm sistemden izole edilmiş bir biçimde elde edilen H_{11} frekans tepki fonksiyonu, (—) sisteme F_2 kuvveti etkileyerek OİYA ile elde edilmiş H_{11}^* frekans tepki fonksiyonu, (···) M_2 kütle sine etkiye bir F_2 kuvveti olmadığı durumda tüm sistemin frekans cevap fonksiyonu [3].

Literatürde operasyonel iletim yolu analizinin endüstriyel uygulamalarını içeren araştırmalar da mevcuttur. Operasyonel iletim yolu analizi, tekil değer analizi metodu kullanarak, operasyonel anda ölçülen giriş ve çıkış sinyalleri ile lineerleştirilmiş transfer fonksiyonlarını elde etmeye yarayan bir sinyal işleme metodu olarak tanımlanabilir[16]. Operasyonel iletim yolu analizinde, tekil değer analizi algoritması, transfer fonksiyonunun bağımsız bileşenlerini bulmak için kullanılır. Operasyonel iletim yolu analizleri uygulamalarında kullanılan ve giriş-çıkış sinyalleri arasında ki bağlantıyı veren formül, denklem 1.7 da ki gibidir[11,12].

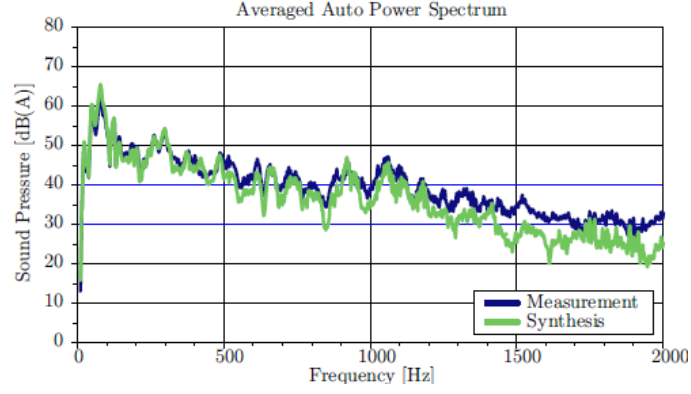
$$H(j\omega)x(j\omega) = y(j\omega) \quad (1.3)$$

Bu denklemde $H(j\omega)$ transfer fonksiyonu matrisi, $x(j\omega)$ giriş sinyalleri vektörü ve $y(j\omega)$ çıkış sinyalleri vektörünü temsil etmektedir. Sistemin frekansa bağıllığı ($j\omega$) ile gösterilmektedir.

Klasik iletim yolu analizinde transfer fonksiyonun girişleri sadece kuvvet ya da hacimsel hız, çıkışları ise sadece basınç değerlerinden oluşmaktadır. Operasyonel iletim yolu analizi bu noktada bir serbestlik getirmekte olup, giriş ve çıkış sinyalleri için hareket (ivme, hız, deplasman), basınç ve kuvvet değerleri kullanılabilir.

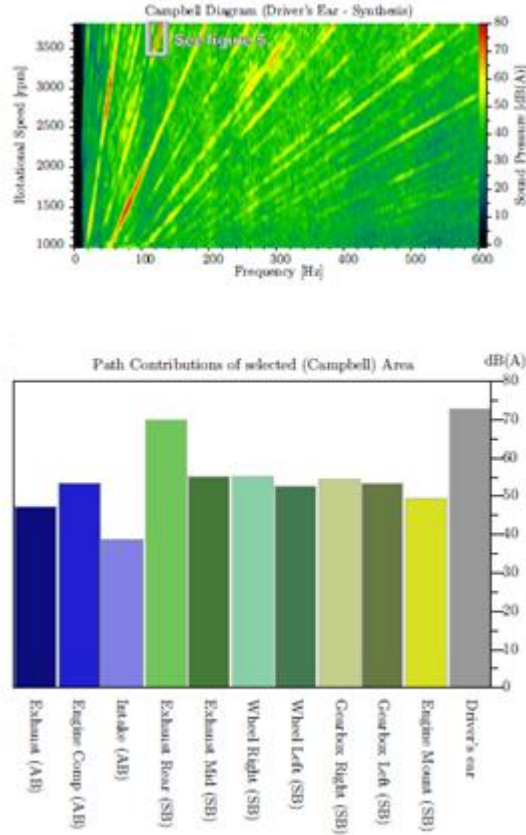
Operasyonel iletim yolu analizinde kullanılan giriş sinyalleri arası etkileşim ve bu durumun yattığı bozucu etkiler yüksektir. Bu sebepten $H(j\omega)$ transfer fonksiyonu matrisinin, doğrudan giriş ve çıkış sinyalleri ile bulunması hatalı sonuçlar elde edilmesine neden olabilir. Bu problemi aşmak için, tekil değer analizi tekniği kullanılarak $H(j\omega)$ transfer fonksiyonu bulunmalıdır[16].

Literatürde ki pek çok çalışmada operasyonel iletim yolu analizinin bir araç üzerinde yapılan uygulamaları ve operasyonel iletim yolu analizinin hangi aşamalara sahip olduğu anlatılmıştır. Operasyonel iletim yolu analizinin ilk aşaması, ölçülen değerler ile operasyonel iletim yolu analizi yardımıyla hesaplanan değeri kıyaslamak ve analiz sonuçları ile test sonuçları arasında doğru bir bağdaşımın varlığını göstermektir. Operasyonel iletim yolu analizi için gerekli olan farklı operasyonel koşulların sağlanması için genellikle incelenen araç üçüncü vites, tam yük testine tabii tutulur ve operasyonel iletim yolu analizinin ilk aşamasında referans noktasından ölçülen ses basıncı değerleri ile operasyonel iletim yolu analizi ile hesaplanarak elde edilen değerler karşılaştırılır[9].



Şekil 1. 7 : OİYA sonuçları ile hesaplanmış olan toplam ses basıncı değerlerinin, ölçüm sonucu elde edilen toplam ses basıncı değerleri ile karşılaştırılması[9].

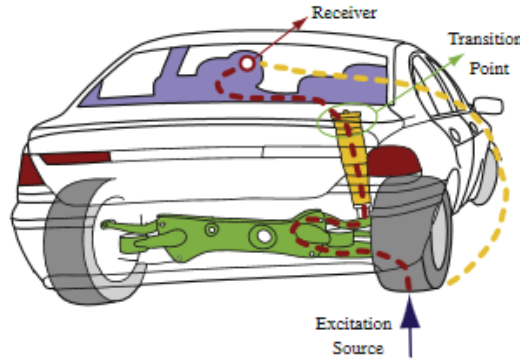
İkinci aşamada belirli bir order ve frekans aralığında hangi iletim yollarının daha baskın oluşu incelenmektedir[11,12]. D.de Klark ve diğ.(2009), yaptıkları çalışmada operasyonel iletim yolu analizi ile hesaplanarak elde edilmiş sürücü kulak hizasında ki ses basıncının Campell diyagramını ve belirli bir order ve frekans aralığında iletim yollarının toplam ses basıncına katkılarının dağılımını aşağıda şekil 1.8 de gösterildiği gibi ifade etmişlerdir.



Şekil 1. 8 : OİYA ile hesaplanarak elde edilen Campell diyagramı ve iletim yollarının dağılımı[9].

Son aşama, bir önceki aşamada bulunan baskın iletim yolu sistemden çıkarılarak ya da sistem üzerindeki etkisi yalıtılarak ölçümler tekrarlanır. Benzer şekilde baskın iletim yolunun etkisi iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonu matrisinden çıkarılarak, analiz tekrardan hesaplanır. Baskın iletim yolu olmadan ölçüm sonucu ve analiz sonucunun örtüşmesi beklenir[11,12].

Operasyonel iletim yolu analizi sayesinde, araçta bulunan tüm iletim yolları incelenebileceği gibi, daha ayrıntılı bir şekilde, sadece belli bir iletim yolu ve bu iletim yolu üzerindeki iyileştirmeler de incelenebilir. D de Klark ve A. Assipov'un, 2010 yılında yaptıkları çalışmada, sadece yol gürültüsünün tekerler-süspansiyonlar üzerinden ilerleyen yapısal ve hava yollu iletim yolları için operasyonel iletim yolu analizi uygulanmıştır. Bu çalışmada aracın güç aktarılan her bir sağ ve sol tekeri için yapı yollu ve hava yollu iletim yolları üzerine çalışılmış, 6 farklı lastik çeşidi ile test yapılarak, farklı lastik türünün iletim yolları üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 1. 9 : Yol gürültüsü için yapısal ve hava yollu iletim yolları[16].

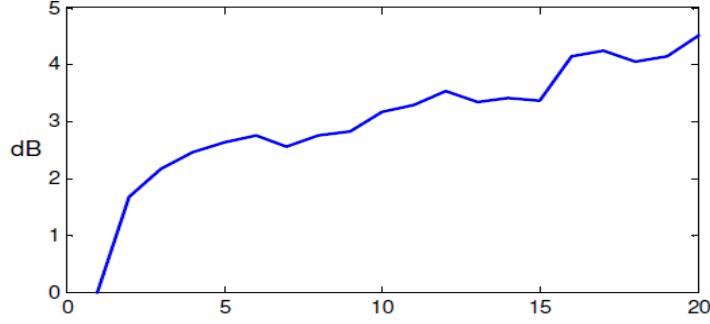
Operasyonel iletim yolu analizini kullanan, literatürde ki pek çok çalışma operasyonel iletim yolu analizi ile klasik iletim yolu analizini karşılaştırmakta, operasyonel iletim yolu analizinin avantajlarını anlatmaktadır[3,9-12]. Klasik iletim yolu uygulamasının dezavantajlarından bir tanesi, klasik iletim yolu analizi uygulamalarında, iletim yolları ile referans noktaları arasında ki transfer fonksiyonları model çekil, sarsıcı ya da hacimsel hız kaynağı vasatıyla, yapay giriş sinyalleri kullanılarak elde edilir. Bu yüzden klasik yöntemler karmaşık yapılarda farklı yük koşullarının transfer fonksiyonları ile etkileşimini hesaba katamazlar[17]. Operasyonel iletim yolu analizi klasik metotlardan farklı olarak, transfer fonksiyonların hesabında operasyonel veriler kullandığı için böyle bir kısıtlamaya maruz kalmaz. Buna ek olarak, operasyonel iletim yolu analizinde iletim yollarının transfer fonksiyonları elde edilirken klasik metotta olduğu gibi her bir iletim yolu

için ayırma işlemleri gerçekleşmeden sadece operasyonel koşullar altında alınan veriler kullanıldığı için, sistemin sahip olduğu gerçek sınır koşulları altında transfer fonksiyonları elde edilir.

Literatürde operasyonel iletim yolu analizinin klasik iletim yolu analizine göre avantajlarından bahsedildiği gibi, operasyonel iletim yolu analizinde dikkat edilmesi gereken hususlardan da bahsedilmektedir. Klasik iletim yolu analizi ile operasyonel iletim yolu analizi benzer metotlar gibi görünmesine karşın temelde önemli farklar içermektedir. Klasik iletim yolu analizinde yük-cevap arası transfer fonksiyonu ilişkisi varken, operasyonel iletim yolu analizi cevap-cevap arası transfer fonksiyonu ilişkisine dayanmaktadır[8]. Bunun yanı sıra klasik iletim yolu analizinde transfer fonksiyonu hesabında, sisteme etkiyen yüklerden bağımsız olarak gürültü transfer fonksiyonları hesaplanırken, operasyonel iletim yolu analizinde sisteme etkiyen yüklerin sahip olduğu koşullara bağlı olan geçirgenlik yaklaşımı ile transfer fonksiyonları elde edilir[8]. Operasyonel iletim yolu analizinde dikkat edilmesi gereken hususlar ve metodun zayıf noktaları, üç temel başlık altında toplanabilir.

Operasyonel iletim yolu analizinde birinci dikkat edilmesi gereken husus, geçirgenlik matrisi hesabı esnasında nümerik koşullandırma hatasıdır. Transfer fonksiyonlarının bulunması amacıyla kullanılan farklı koşulların sayısı az olursa sistemin gerçek özelliklerini yansıtmayan transfer fonksiyonları elde edilir[8]. Giriş sinyallerinde incelenen order sayısı, incelenen iletim yolu sayısının en az iki katı olmalıdır. Şekil 1.10 de incelenen belirli bir order sayısına karşın artan iletim yolu sayısı ile operasyonel iletim yolu analizi kullanılarak elde edilen sonuçlardaki hata artışını göstermektedir.

İkinci dikkat edilmesi gereken husus ise, giriş sinyalleri arasında çapraz bağlaşım etkisi olduğu söylenilebilir. Çapraz bağlaşım etkisi, sistemin pasif tarafında belirli bir noktada ölçülen ivme verisinde o noktaya etkiyen operasyonel kuvvetin yanı sıra diğer kuvvetlerinde etkimesi durumudur[8]. Üçüncü dikkat edilmesi gereken husus ise, operasyonel iletim yolu analizi esnasında hesaba katılmayan iletim yolları hatalı sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir[8]. Sistemde bulunan aktif bir iletim yolunun hesaba katılmaması, bir iletim yoluna operasyonel yük etkimesine rağmen o iletim yolundan herhangi bir giriş sinyali ölçülmemesi durumudur.



Şekil 1. 10 : İncelenen sabit order sayısına karşın iletim yolu sayısındaki artışın analiz sonucunun hata değeri üzerine etkisi [8].

Bu durum toplam cevap fonksiyonu üzerinde bahsi geçen iletim yolunun etkisi olmasına rağmen bu etkinin hesaba katılmamasına, toplam cevap fonksiyonunun ve iletim yollarının toplam cevap fonksiyonu üzerindeki dağılımı yanlış olarak hesaplanmasına neden olmaktadır.

1.3 Amaç ve Kapsam

Bu tezin temel amacı operasyonel iletim yolu analizinin incelenmesi, operasyonel iletim yolu analizinde kullanılacak sayısal çözümlere yapan bir programın oluşturulması ve operasyonel iletim yolu analizinin uygulamalarının gerçekleştirilmesidir.

Bu çalışma beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada tez konusunu içeren problemin tanımı yapılmaktadır ve konu ile ilgili yapılan literatür araştırması sunulmaktadır. Literatür araştırması kısmında hem klasik hem de operasyonel iletim yolu analizinin teorik alt yapısını ve uygulamalarını içeren çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca klasik yöntem ile operasyonel iletim yolu analizinin güçlü ve zayıf yönlerini ifade eden çalışmalarda literatür araştırması kapsamında incelenmektedir.

İkinci aşamada klasik ve operasyonel iletim yolu analizinin teorik altyapısı incelenmektedir. İlk olarak klasik iletim yolu analizi ve aşamaları sunulmaktadır. Daha sonrasında klasik iletim yolu metodunda, orta ve yüksek frekanslarda daha doğru sonuçlar elde etmek için geliştirilen klasik iletim yolu metodu incelenmektedir. Bu bölümde son olarak geçirgenlik yaklaşımı ile birlikte operasyonel iletim yolu analizi metodunun teorik altyapısı anlatılmıştır.

Üçüncü aşamada operasyonel ve klasik iletim yolu analizi çalışmaları için kullanılan test düzenekleri ve incelenen test düzenekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar

anlatılmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında, incelenen sistemlerin öncelikle modal analiz uygulaması ile modal parametreleri bulunmuştur. Sonrasında klasik ve operasyonel iletim yolu analizi uygulaması için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar anlatılmaktadır.

Dördüncü aşamada klasik iletim yolu analizi ve operasyonel iletim yolu analizinde kullanılan, tez kapsamında oluşturulmuş olan sayısal çözücü programların aşamaları ve bu aşamaların altyapısını oluşturan teorik bilgiler anlatılmaktadır.

Beşinci aşamada iki farklı sınır koşuluna sahip test düzenekleri için klasik ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar gösterilmekte ve birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Daha sonrasında sistem üzerinde etkiyen herhangi bir operasyonel koşul için, referans noktalarında oluşacak cevap fonksiyonları, operasyonel koşulda alınan veriler ve operasyonel iletim yolu analizi kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonları kullanılarak oluşturulmaktadır. Hesaplanarak elde edilen bu referans sinyali ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak, elde edilen transfer fonksiyonunun sistemi ne kadar doğru yansıttığı incelenmektedir. Bir sonraki aşamada incelenen sisteme sanal giriş sinyalleri uygulanarak ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonları kullanılarak referans sinyalinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Burada ki amaç operasyonel iletim yolu analizi sayesinde sistem üzerine etkiyebilecek olası operasyonel koşul senaryoları deney yapmadan simule edebilmenin mümkün olduğunu göstermektir.

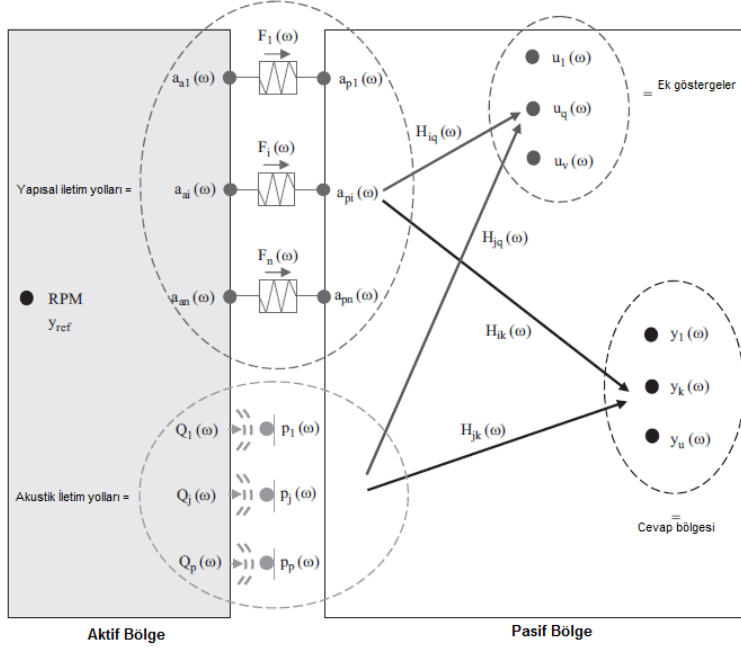
Son aşamada tezin genel değerlendirmesi yapılmakta ve operasyonel iletim yolu analizi uygulamaları için gelecekte yapılabilecek çalışmalar anlatılmaktadır.

2. TEORİ

İletim yolu analizi kaynaklar ile alıcılar arasında ki yapısal ve hava yollu enerji iletim yollarını belirlemek ve bu iletim yollarından hangilerinin daha baskın olduklarını ortaya çıkarmak için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntem sayesinde, bir araçta arzu edilen titreşim ve gürültü karakteristiğini elde etmek için, iletim yolları üzerinde optimizasyon çalışmaları daha hızlı bir biçimde uygulanabilir.

2.1 Klasik İletim Yolu Analizi Metodu

İncelenen sisteme etki eden akustik ve titreşim yükleri, sistemdeki çeşitli kaynaklar tarafından üretildikten sonra yapısal ve hava yollu iletim yolları vasıtası ile sistemin alıcı noktalarına ulaşır. Alıcı noktalarında ki toplam cevap fonksiyonu, birbirinden bağımsız iletim yollarından gelen titreşim ve akustik yüklerin toplamı olarak ifade edilebilir[4]. Bu yaklaşımda genel olarak tüm sistem, sistemi etkileyen yükleri oluşturan aktif bölge ve bu yüklerden etkilenen pasif bölge olmak üzere iki ayrı bölgede incelenmektedir. Şekil 2.1 de şematik olarak bir sistemdeki yüklerin oluştuğu aktif bölge ve bu yüklerden etkilenen pasif bölge ifade edilmiştir. Burada $F_i(\omega)$ sistemin pasif tarafına etkileyen yapısal yükleri ifade ederken, $Q_j(\omega)$ sistemin pasif tarafına etkileyen akustik yükleri ifade etmektedir. Bu aktif-pasif bölge ayrımını bir araçta yapmak gerekirse motor, şanzıman ve aktarma organları araç sistemin aktif kısmını oluştururken, şasi ve yolcu koptmanı sistemim pasif tarafını ifade etmektedir[4]. Yapısal iletim yolları için aktif ve pasif bölge ayrımı, motor kulakları ve egzoz bağlantı askıları gibi fiziksel bağlantı noktalarından başlamaktadır. Akustik iletim yolları için aktif ve pasif bölge ayrımı daha sübjektiftir kriterlere bağlıdır. Akustik iletim yolları için, iletim yolunun pasif bölgesinin başladığı nokta, titreşim hareketi yapan yüzeylerden veya egzoz çıkışı ya da hava emişi girişi bölgelerinden sağlıklı ölçüm alınabilececek en kısa mesafe olarak kabul edilebilir[5]. Bu yaklaşım sayesinde lineer ve zamandan bağımsız bir sistemde toplam cevap fonksiyonu iki temel etmen ile ifade edilebilir.



Şekil 2. 1 : Sisteme etkiyen akustik ve yapısal yükleri oluşturan aktif bölge ile bu yüklerden etkilenen pasif bölgenin şematik gösterimi[4].

Birincisi, iletim yolları ile referans sinyallerinin ölçüldüğü noktalar arasındaki frekans cevap fonksiyonu. İkinci etmen ise sistemin pasif tarafına etki eden operasyonel yüklerdir. Bu ifadenin matematiksel karşılığı denklem 2.1 de gösterilmiştir.

$$y_k(\omega) = \sum_{i=1}^n H_{ki}(\omega)F_i(\omega) + \sum_{j=1}^p H_{kj}(\omega)Q_j(\omega) \quad (2.1)$$

Bu denklemde

ω : frekans.

n : Yapısal iletim yolu sayısı.

p : Akustik iletim yolu sayısı.

$y_k(\omega)$: k noktasında ki toplam cevap fonksiyonu.

$F_i(\omega)$: i (i=1,...,n) yapısal iletim yoluna etki eden operasyonel yük.

$Q_j(\omega)$: j (j=1,...,p) akustik iletim yoluna etki eden operasyonel yük.

$H_{ki}(\omega)$: i yapısal iletim yolunda cevap sinyali ile giriş sinyali arasında ki frekans cevap fonksiyonu.

$H_{kj}(\omega)$: j akustik iletim yolunda cevap sinyali ile giriş sinyali arasında ki frekans cevap fonksiyonudur.

Klasik iletim yolu analizi metodu temelde iki ana adımdan oluşmaktadır. Birinci adım, istenilen operasyonel test koşullarında yol ya da şasi dinamometresinde yapılan testler ile operasyonel yüklerin elde edilmesi. İkinci adım ise incelenen iletim yolları için frekans cevap fonksiyonlarının elde edilmesidir.

Yapısal ve akustik operasyonel yüklerin hesabı için pek çok farklı metot geliştirilmiştir. Öncelikle yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabı incelenecektir.

2.1.1 Operasyonel yüklerin hesabı

2.1.1.1 Yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabı

Yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabında üç ana yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar doğrudan operasyonel kuvvet ölçümü, dinamik katılık metodu ve matris ters çevirme metodudur[1]. Operasyonel kuvvetleri istenilen operasyonel koşullar altında doğrudan ölçmek mümkündür. Ancak genellikle doğrudan ölçüm metodu pek pratik olmayan hatta bazı durumlarda imkânsız olan bir metottur[4]. Şekil2.2’de bir kuvvet ölçer örneği gösterilmektedir.



Şekil 2. 2 : Kuvvet Ölçer[21].

Kuvvetölçerlerin boyutları ve özellikle motor kulaklarının pasif taraflarında yeterli yapışma yüzeyini sağlayacak kadar geniş alanların bulunmaması nedeniyle, kuvvetölçerler için gerekli yapışma yüzeyi sağlanamaz. Bu durum kuvvetölçerlerin sisteme düzgün bağlanamamasına ve dolayısıyla doğru ölçüm sonuçlarının elde edilememesine neden olabilir. Doğrudan ölçümün aksine diğer metotlarda operasyonel kuvvetler, istenilen operasyonel koşullar altında elde edilen test verileri ile matematiksel denklemler kullanılarak, dolaylı yöntemler ile hesap edilerek bulunur. Bu metotlara dolaylı ölçüm metotları da denilmektedir.

Yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabında kullanılan dolaylı ölçüm metotlarından birincisi kompleks dinamik katılık metodudur. Kompleks dinamik katılık metodu, incelenen iletim yolunda, sistemin aktif ve pasif bileşenleri arasında ki bağlantısı,

esnek bir bağlantı türüne sahip olduğu zaman kullanılan bir metottur[4]. Bu metodun uygulanabilmesi için, elastik bağlantının frekansa bağlı olarak dinamik katılık değerine ihtiyaç vardır. Bağlantıların dinamik katılıkları belirlenirken, incelenen operasyonel çalışma koşullarını temsil edecek şekilde ön yükleme yapılmalıdır. Benzer şekilde kullanılacak katılık değerinin elde edildiği testlerde, elastik malzemenin sıcaklık seviyesi operasyonel çalışma koşullarında olmalıdır[10].

Kompleks dinamik katılık metodunu uygulamak için, incelenen bağlantının dinamik katılık değerinin yanı sıra, aktif ve pasif bölgeler arası, operasyonel koşullar için dinamik deplasman değerlerinin de elde edilmesi gerekmektedir. Dinamik deplasman değerlerinin elde edilmesi için, bağlantı bölgesinin aktif ve pasif taraflarına üç eksenli ivme ölçerler yerleştirilir. İvmeölçerler mümkün oldukça bağlantı noktalarına yakın yerleştirilmelidir. Eğer ivmeölçerler gerektiği gibi yakına yerleştirilemez ise, özellikle yüksek frekanslarda ivmeölçerlerden alınan veriler gerçek değerlerden uzaklaşacaktır[10]. Bağlantının aktif ve pasif taraflarından elde edilen ivme verileri iki defa integre edildikten sonra, aktif ve pasif tarafta ki veriler birbirlerinden çıkarılarak istenilen operasyonel koşullar altında dinamik deplasman değerleri elde edilir. Son olarak elde edilen dinamik deplasman değeri ile dinamik katılık değeri birbirleriyle çarpılarak operasyonel dinamik kuvvet elde edilir. Kompleks dinamik katılık metodunun matematiksel ifadesi denklem 2.2 de aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$f_i(\omega) = K(\omega) \cdot (x_{ip}(\omega) - x_{ia}(\omega)) \quad (2.2)$$

Bu denklemde

$f_i(\omega)$: i iletim yolundaki operasyonel kuvvet

$K(\omega)$: Frekans fonksiyonu cinsinden kompleks dinamik katılık

$x_{ip}(\omega)$: Bağlantının pasif tarafında ki operasyonel dinamik deplasman

$x_{ia}(\omega)$: Bağlantının aktif tarafındaki operasyonel dinamik deplasman

Yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabında kullanılan dolaylı ölçüm metotlarından ikincisi Matris ters dönüşüm metodudur. Bu metot iletim yolunda sistemin aktif ve pasif tarafları arasında, rijit ya da yüksek katılık değerine sahip bir bağlantı olduğu zaman operasyonel kuvvetlerin hesabında kullanılan bir metottur. Bu tür bağlantılarda dinamik katılık metodu kullanılamaz çünkü rijit bağlantıya sahip olan

ya da katılık değerleri gövde empedansına göre çok büyük olan iletim yollarında, bağlantı bölgesinin pasif tarafından doğru deplasman ölçümü mümkün değildir.

Matris ters döndürme metodunda operasyonel kuvvet, operasyonel anda iletim yolunun bağlantı bölgesinin pasif tarafından ölçülen ivme verisi ile iletim yolunun pasif tarafı ile ivme ölçerler arasında ki ivme-kuvvet FTF matrisin pseudo tersinin çarpımı sonucu bulunur. Bu işlem tüm iletim yolları için tüm yönlerde uygulanarak ivme-kuvvet FTF matrisi elde edilir. MTD metodunun matematiksel ifadesi denklem 2.3 ve denklem 2.4 de aşağıda ki gibi ifade edilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\ddot{x}_1/F_1} & H_{\ddot{x}_1/F_2} & \dots & H_{\ddot{x}_1/F_n} \\ H_{\ddot{x}_2/F_1} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{\ddot{x}_m/F_1} & \dots & \dots & H_{\ddot{x}_m/F_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\ddot{x}_1/F_1} & H_{\ddot{x}_1/F_2} & \dots & H_{\ddot{x}_1/F_n} \\ H_{\ddot{x}_2/F_1} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{\ddot{x}_m/F_1} & \dots & \dots & H_{\ddot{x}_m/F_n} \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Bu denklemde

$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix}$: sistemin pasif tarafındaki operasyonel ivme vektörleri

$H_{\ddot{x}_j/F_i}$: i iletim yoluna etkiyen tahrik kuvveti ile j alıcısı arasında ki frekans cevap fonksiyonudur.

MTD metodunda dikkat edilmesi gereken en önemli husus yetersiz koşullandırma problemidir. İvme-kuvvet FTF matrisinde, cevap noktalarının sayısı tahrik noktalarının sayısının iki katından fazla değildir ki bu sayede ivme- kuvvet matrisi, pseudo tersi uygulanırken yetersiz koşullandırma probleminden etkilenmesin[4]. Buna ek olarak, tekil değer analizi metodu da, ivme-kuvvet matrisinin tersi elde edilmesinde yararlanılabilecek yöntemlerden bir tanesidir.

2.1.1.2 Akustik operasyonel yüklerin hesabı

İletim yolu analizinde akustik yükler hacimsel hız terimi ile ifade edilir. Hava yollu iletim yollarının toplam cevap fonksiyonuna etkisini bulmak için, yapısal iletim yollarında olduğu gibi operasyonel akustik yüklerin de bulunması gerekmektedir. Operasyonel hacimsel hızlar, operasyonel kuvvetlere benzer şekilde dolaylı

yöntemler ile hesaplanırlar. Bu metotlardan ilki noktadan noktaya yüzey örnekleme metodudur.

Noktadan noktaya yüzey örnekleme metodu, titreşim hareketi yapan yüzeylerden eşdeğer hacimsel hız kaynağının elde edilmesini sağlayan bir metottur[10]. Bu metotta incelenecek yüzey önce bölümlere ayrılmalıdır. Şekil 2.3 de S alanlarına haiz alt yüzeylere bölünmüş örnek bir yüzey gösterilmektedir. Her bir yüzey bölümünde, o bölüme ait yüzey normali doğrultusunda ivme verisi toplanır ve toplanan bu ivme verisi ile her bir yüzeyin alanları ile çarpılarak incelenen yüzeyler için hacimsel ivmeler bulunur. Hacimsel ivme verisi integre edilerek hacimsel hızı elde etmek mümkündür[10]. Bu metottun matematiksel ifadesi denklem 2.5 gösterilmektedir.

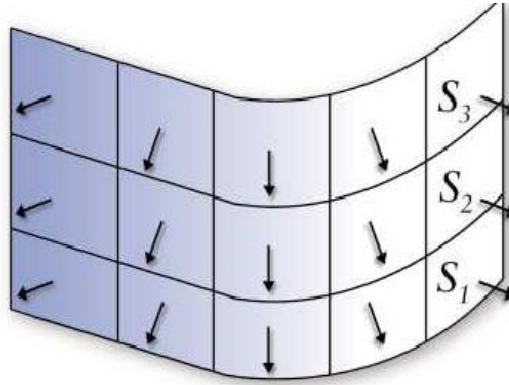
$$\dot{Q}_j = S_j \cdot \ddot{x}_{jn} \quad (2.5)$$

Bu denklemde

S_j : j yüzey bölümünün yüzey alanı

\ddot{x}_{jn} : j yüzeyinin normal doğrultusundan ölçülen ivme değerleri

\dot{Q}_j : j yüzeyi için hacimsel ivme verisi.



Şekil 2.3 : Bölünmüş yüzey alanları ve yüzey normalleri[10].

Bu metodun amacı, gürültü kaynağı olan, bütün haldeki panelleri ayırık alt parçalara bölerek incelemektir. İncelenen yüzeyde bölünecek parçaların boyutları frekansa bağlı olarak belirlenir. Bölünen yüzeylerin boyutları ilgilenilen frekans aralığında, en küçük dalga boyunun yarısından daha küçük olmalıdır[10]. Bu metot aynı zamanda panel dağılım analizi olarak da bilinmektedir, genellikle titreşim hareketi yapan yüzeylerde gürültü dağılımının bulunması için kullanılan bir metottur[19].

Operasyonel akustik yükleri bulmak için kullanılan ikinci metot ise, ses şiddeti ölçümleri metodudur. Bu metot durağan koşullar altında gürültü kaynağına yakın alanda ve yankısız odada yapılan ölçümlerden oluşmaktadır. Ortalama ses şiddeti denklem 2.6 da gösterildiği gibi, ses basıncının ve parçacık hızının çarpımının, belirli bir T zaman aralığında ortalaması olarak ifade edilir[10].

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot \vec{v}(t) dt \quad (2.6)$$

Bu denklemde

\vec{I} : T zaman aralığında ortalama ses şiddeti

$p(t)$: Ses basıncı değeri

$\vec{v}(t)$: Parçacık hızı

Gürültü kaynağının tüm yüzeyinin, her biri ayrı bir gürültü kaynağı olduğu varsayılan S_j alt yüzeylerinden oluştuğu kabulünden yola çıkarak, S_j alt yüzeyi için ses gücü değeri denklem 2.7 de belirtildiği gibi, ortalama ses şiddeti değeri ile S_j alt yüzeyinin normal vektörünün skaler çarpımının, S_j alt yüzey alanına göre integre edilmesiyle bulunur.

$$Pow_j = \int_{S_j} \vec{I} \cdot \vec{n} dS \quad (2.7)$$

Bu denklemde

\vec{n} : S_j yüzeyi için normal vektörü

S_j yüzeyinin tek kutuplu gürültü kaynağı olduğu varsayımından yola çıkarak, S_j yüzeyi için hacimsel hız kaynağı denklemi, denklem 2.8 de ifade edilmiştir.

$$Q_j^2 = Pow_j \frac{4\pi c}{\rho \omega^2 c} \quad (2.8)$$

Bu denklemde

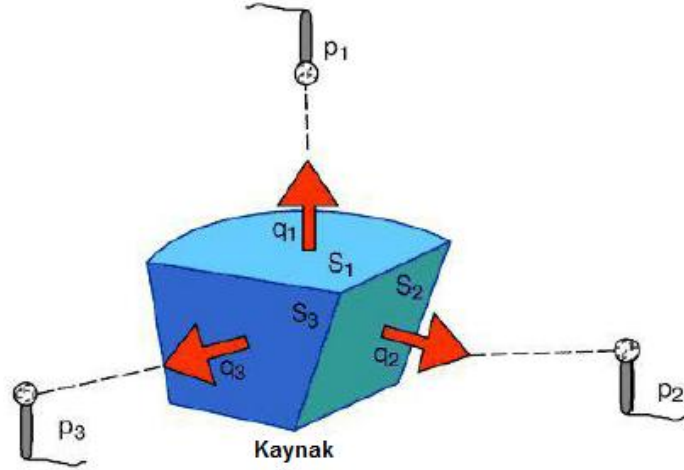
c : Ses hızı

ρ : Havanın yoğunluğu

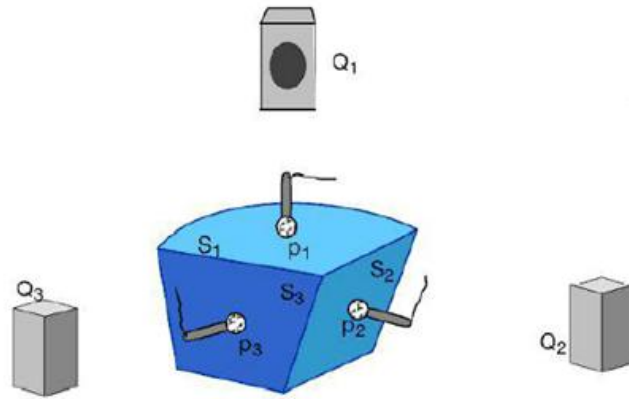
C : katsayı, ses kaynağının tek kutuplu olduğu varsayımı ile değeri iki olarak seçilir.

Ses şiddeti ölçümü metodu ile hesaplanan hacimsel hız değerinde faz bilgisi bulunmamaktadır. Bu nedenle düşük frekanslarda bu metot pek tercih edilmemelidir[10].

Operasyonel akustik yüklerin hesabında kullanılan dolaylı ölçüm metotlarından üçüncüsü ise matris ters dönüştürme metottur. Akustik yükler için kullanılan MTD metodu, yapısal operasyonel yükler için kullanılan MTD metoduyla aynı aşamalara sahiptir. Bu aşamalar aşağıda şekil 2.4 ve 2.5 de gösterilmiştir.



Şekil 2. 4: Matris ters dönüştürme metodunun ilk aşaması. Operasyonel anda yapılan ses basıncı ölçümleri[20].



Şekil 2. 5 : Matris ters dönüştürme metodunun ikinci aşaması. Ses kaynağı ile basınç ölçüm noktaları arasındaki transfer fonksiyonunun ters şekilde elde edilmesi[20].

Bu metodun ilk aşamasında, operasyonel koşullar altında, doğru ölçüm alınabilecek kadar ses kaynağına yakın noktalardan ses basıncı ölçümleri alınır. İkinci aşamada ses kaynağı ile basınç ölçüm noktaları arasında ki transfer fonksiyonu hesap edilir. Transfer fonksiyonun bulunması için bir önceki aşamada operasyonel basınçların ölçüldüğü noktalara hoparlörler yerleştirilir ve ölçüm alacak mikrofonlarda ses kaynağına çok yakın olacak şekilde yerleştirilir. Her bir hoparlör ile mikrofonlar arasındaki transfer fonksiyonları bulunur ve bu işlem tüm hoparlörler için

tekrarlanarak, transfer fonksiyonu matrisi tamamlanır. Son aşamada, yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabında kullanılan metotla aynı şekilde, elde edilen transfer fonksiyonun pseudo tersi ile operasyonel basınç değerleri çarpılarak hacimsel hız verisi elde edilir[10]. MTD metodunun daha doğru sonuçlar vermesi için, transfer matrisinin aşırı tanımlı olması sağlanmalıdır. Yapısal operasyonel kuvvetlerin bulunmasında kullanılan MTD metoduyla aynı şekilde, alıcı noktalarının sayısı tahrik noktalarının sayısından fazla olmalıdır[10]. Akustik yüklerin dolaylı olarak hesabında kullanılan MTD metodunun matematiksel ifadesi denklem 2.9 ve 2.10'da aşağıda belirtilmiştir.

$$P_r^{oper} = \sum_{i=1}^n \frac{P_r}{Q_i} Q_i^{oper} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1^{oper} \\ \dots \\ Q_n^{oper} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_1}{Q_1} & \dots & \frac{P_1}{Q_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{P_m}{Q_1} & \dots & \frac{P_m}{Q_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1^{oper} \\ \dots \\ P_m^{oper} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Bu denklemde

Q_i^{oper} : i. (i=1,...,n) iletim yolu için operasyonel koşullarda hacimsel hız değeri

P_j^{oper} : J. (j=1,...,m) mikrofondan operasyonel koşullarda ölçülen ses basıncı değeri.

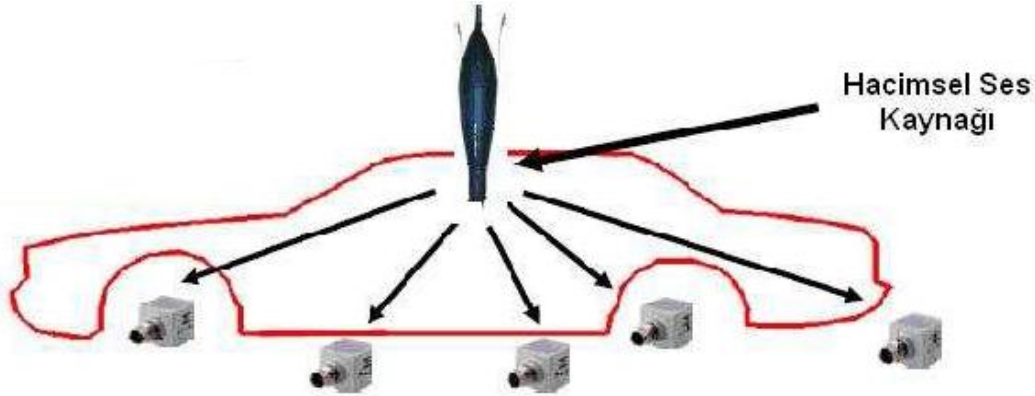
Bu metotların sahip olduğu avantaj ve dezavantajlardan bahsetmek gerekirse, noktadan noktaya yüzey örnekleme metodu sadece yüzeyin iyi tanımlanmış alt yüzeylere bölünebildiği, bu yüzeylerin alanlarının ölçülebildiği ya da hesaplanabildiği ve yüzeylere normal doğrultuda ki ivmelerin ölçülebildiği durumlar için kullanılabilir. Bu metot genellikle değişik panellerin araç içi gürültüsüne etkisinin belirlenmesinde kullanılmaktadır[10].

Ses şiddeti ölçümü metodu düşük frekanslar haricinde doğru sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır. Ancak ses şiddeti metodunun en büyük dezavantajı, ölçümlerin anekoik koşullar altında gerçekleşmesi gerekliliğidir. Bu da operasyonel ölçümlerin durağan koşullar altında, araç hızlanma ve yavaşlama testleri yapılmadan, ölçümlerin gerçekleşmesini zorunlu kılar[10].

MTD metodu ses şiddeti ölçümü metodunun aksine, durağan koşullarda uygulanma zorunluluğuna sahip değildir. Bu metotta ölçümler gerçekçi operasyonel koşullar altında gerçekleşebilir. Ancak MTD metodunda transfer fonksiyonunun elde edilmesi için çok sayıda ölçüme ihtiyaç duyulmaktadır[10].

2.1.2 Gürültü transfer fonksiyonlarının hesabı

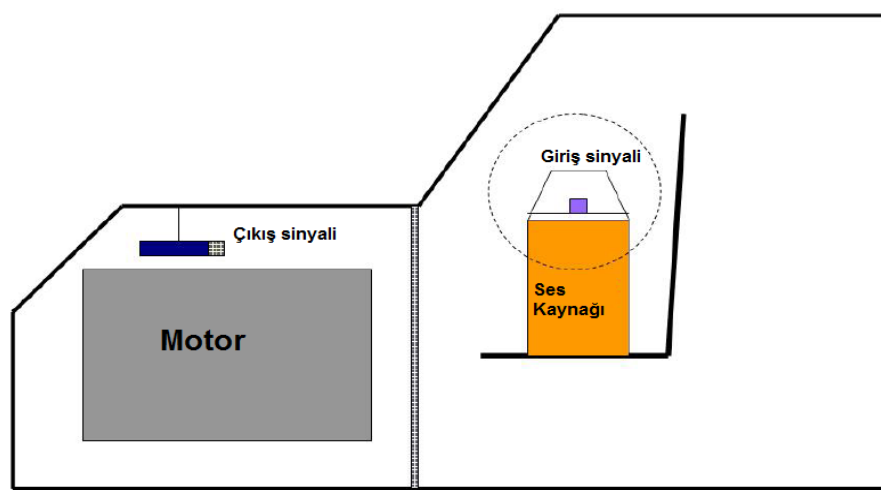
Klasik iletim yolu analizinin gerçekleştirilmesi için operasyonel kuvvetlerin yanı sıra, iletim yollarının gürültü transfer fonksiyonlarının da bulunması gereklidir. Analizin gerçekleştirilmesi için, iletim yolları ile referans noktaları arası transfer fonksiyonlarının tüm iletim yolları için ve her doğrultuda bulunması gerekmektedir. Aracın şasi tarafındaki gürültü transfer fonksiyonlarının doğru biçimde elde edilmesi, iletim yolu analizi için kritik öneme sahiptir. Yapısal iletim yollarının transfer fonksiyonları modal çekiç yada sarsıcı kullanılarak doğrudan ölçülebildiği gibi, hacimsel hız kaynağı kullanılarak tersinir bir metot ile de elde edilebilir. Bu transfer fonksiyonlarının elde edilmesi esnasında, iletim yollarının birbirleri arasında ki etkileşimi kaldırmak için, incelenen iletim yolunda sistemin kaynak bölgesi ile alıcı bölgesi arasındaki fiziksel bağlantılar kaldırılmalıdır[10].



Şekil 2. 6 : Tersinir metot ile yapısal iletim yollarının transfer fonksiyonlarının elde edilmesi[2].

Motor kulakları ile alıcı referans noktası arasında ki yapısal iletim yolları incelemek gerekirse, motordan gelen titreşimlerin iletildiği iletim yolları için, motor şasi bağlantıları ayrılmalı ve motorun şasiye bağlandığı yerden şasi tahrik edilerek alıcı noktasındaki mikrofona ya da ivmeölçer ile arasındaki transfer fonksiyonu elde edilmelidir. Her bir iletim yolu için ve tüm doğrultularda aynı işlem tekrar edilerek, tüm sistemin yapısal yollu iletim yolları için gürültü transfer fonksiyonları elde edilir. Tersinir yolla transfer fonksiyonlarının elde edilmesi için bu sefer, sistemin alıcı noktalarına transfer fonksiyonunun giriş sinyallerini yaratacak olan hacimsel hız kaynakları yerleştirilir. İletim yollarında sistemin pasif taraf başlangıç noktalarına, ivmeölçerler yerleştirilerek hacimsel hız kaynağı ile ivmeölçerler arası transfer fonksiyonları elde edilir. Ancak iletim yollarının alıcı sayısından fazla olduğu

durumlarda doğrudan transfer fonksiyonlarını bulma metodunu kullanmak çok daha hızlı bir yöntemdir[1]. Akustik iletim yolları için gürültü transfer fonksiyonları yapısal iletim yollarına benzer şekilde, ancak bu sefer giriş sinyali olarak hacimsel hız büyüklüğü kullanılarak elde edilir. Akustik iletim yolları için gürültü transfer fonksiyonları, gürültü kaynaklarının olduğu bölgelere yerleştirilen hacimsel hız kaynakları ile alıcı noktadan ölçülen ses basıncı arasındaki transfer fonksiyonlarının bulunması ile elde edilir. Yapısal iletim yollarında olduğu gibi akustik iletim yolları içinde gürültü transfer fonksiyonları tersinir metotlar ile elde edilebilir[10]. Şekil 2.7 de motor kompartımanı ile alıcı arasında ki gürültü transfer fonksiyonunun tersinir olarak elde edilmesi gösterilmiştir. Motor kompartımanı ile alıcı arasında ki gürültü transfer fonksiyonunu tersinir olarak, alıcı noktasına yerleştirilen ses kaynağı ile motor kompartımanına yerleştirilen mikrofonlar arasında ki transfer fonksiyonunun bulunması ile elde edilir[5].



Şekil 2. 7 : Motor kompartımanı ile alıcı noktası arasındaki gürültü transfer fonksiyonunun tersinir olarak elde edilmesi[5].

2.1.3 Orta ve yüksek frekansların incelenmesinde klasik iletim yolu analizi

İncelenen sistemin yüksek orderlarındaki titreşim ve gürültü karakteristiği incelenmek istendiği durumlarda, klasik iletim yolu analizi uygulamaları kullanışsız hale gelir[11]. Yüksek modlarda, modal örtüşme değeri birden büyük olur ve bu durum iletim yolu transfer fonksiyonunun faz ve genlik değerlerini kararsızlaştırmaktadır. Modal örtüşme değeri M denklem 2.11 da aşağıda ki gibi ifade edilmiştir[6].

$$M = \Delta f \frac{dN}{df} \quad (2.11)$$

Bu denklemde

Δf : Ortalama Bant genişliği, incelenen frekans aralığında her bir modun tepe noktasının 3 dB altında ki etek genişliği

dN/df : Mod yoğunluğu, belirli bir frekans aralığında tahrik edilen mod sayısıdır.

Transfer fonksiyonunun faz ve genlik değeri belirli bir kararsızlık durumunu aştığı zaman, klasik iletim yolu analizi uygulamaları artık pratik anlamda kullanışsız hale gelir[11]. Modal örtüşme değeri birden büyük olan frekans aralığında, daha kararlı sonuçlar elde edebilmek için klasik iletim yolu analizi, orta ve yüksek frekans aralığında çalışabilecek şekilde genişletilmiştir[11]. Doğru sonuçları elde edebilmek için frekans cevap fonksiyonlarında makul bir genlik ve faz kararlılığına ihtiyaç vardır. Ancak yüksek frekanslarda faz bilgisi frekansın küçük değişimlerinde bile önemli değişkenlikler gösterebilmektedir. Bu yüzden bu metodun hesaplamalarında sadece genlik değeri hesaba katılırken, faz bilgisi ihmal edilir[12]. İlk aşamada alıcı noktasından ölçülen ses basıncı dağılımı tekrardan tanımlanmalıdır. Buna göre n tahrik noktasından k doğrultusunda tahrik edilen kuvvet sonucu m alıcı noktasında oluşan basınç değeri denklem 2.12 de aşağıda gösterildiği gibidir[11].

$$\tilde{p}_{mnk}^2(\omega) = H_{mnk}^2(\Delta\omega) \cdot \tilde{F}_{nk}^2(\omega) \quad (2.12)$$

Bu denklemde

$\mathbf{H}(\Delta\omega)$: İncelenen frekans aralığı için ortalama frekans cevap fonksiyonudur. Ortalama hesaplanırken, genellikle incelenen frekansın %5 band genişliği aralığındaki değerler hesaba katılır.

İletim yolu analizinde daha kararlı dağılım sonuçlarının elde edilmesi için frekans cevap fonksiyonunda, tek noktadan ölçülen basınç değerleri yerine uzaysal ortalaması alınmış frekans cevap fonksiyonu kullanılabilir. Bu teknikte, sistemin tahrik kuvveti yine tek noktadan etki etmekle beraber, cevap fonksiyonu bir önceki aşamada ifade edilen m alıcı noktası etrafında bulunan L noktalarından alınan basınç değerlerinin ortalaması kullanılarak elde edilir. Uzaysal ortalaması alınmış frekans cevap fonksiyonu denklem 2.13'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir[11].

$$\langle H_{mnk}^2(\Delta\omega) \rangle = \sum_{l=1}^L H_{mnlk}^2(\Delta\omega) \quad (2.13)$$

Uzaysal ortalaması alınmış frekans cevap fonksiyonu ile denklem 2.12, denklem 2.14 formuna kavuşur[11].

$$\tilde{p}_{mnk}^2(\omega) = \langle H_{mnk}^2(\Delta\omega) \rangle \cdot \tilde{F}_{nk}^2(\omega) \quad (2.14)$$

Klasik iletim yolu analizi, ilgili çalışmaların ilk başladığı tarih olan 1980lerden beri özellikle araç içi gürültü probleminin incelendiği çalışmalarda kullanılan bir tekniktir. Ancak bu metotta gürültü transfer fonksiyonları elde edilirken, iletim yolları arası etkileşimin kaldırılması amacı için, incelenen iletim yolunda sistemin aktif tarafı ile pasif tarafı arası fiziksel bağlantı kaldırılmaktadır. Bu durum klasik iletim yolu analizinin sahip olduğu iki temel dezavantajın oluşmasına neden olmaktadır. Bunlardan ilki ayırma işlemlerinin uzun süreçler gerektirmesi ve bu durumun test sürecinin çok uzun olmasına neden olmasıdır. İkinci dezavantaj ise, bu ayırma işlemleri ile elde edilen transfer fonksiyonları, sistem gerçek sınır koşullarına sahip değilken bulunmakta ve sistemin gerçek dinamik yapısını yansıtamamaktadır. Bu sebeplerden ötürü son yıllarda sadece operasyonel verilerin kullanıldığı yeni bir iletim yolu analizi tekniği geliştirilmiştir. Bu yeni tekniğe literatürde operasyonel iletim yolu analizi metodu denilmektedir.

2.2 Operasyonel İletim Yolu Analizi Metodu

Titreşim ve akustik problemlerinin çözümü için genellikle iki temel yaklaşım söz konusudur. Birinci yaklaşım gürültü kaynaklarının tespiti ve bu kaynaklar üzerinde yapılan iyileştirmelerdir. İkinci yaklaşım ise, kaynak ile alıcı arasında titreşim ve gürültünün iletildiği iletim yollarının tespiti ve bu iletim yolları üzerinde yapılan iyileştirmelerdir[3].

Bir mekanik sistem birbirlerine bağlı olan farklı alt sistemlerden oluşan sistemler bütünü olarak kabul edilebilir. İletim yolu analizinin amacı, birden çok alt sistemden oluşan sistemlerde, iletim yollarından hangilerinin alıcı noktalarına gelen toplam titreşim ve/veya gürültü değerleri üzerinde baskın olduğunun tespitidir. Operasyonel iletim yolu analizi metodunda klasik metodun aksine, analizin gerçekleşebilmesi için sadece operasyonel ölçüm verileri gerekmektedir. Ölçülen operasyonel verilerden elde edilen sonuçların yetersiz koşullandırma probleminden etkilenmemesi için genellikle tekil değer ayrışımı metodu kullanılır. Temel olarak, operasyonel iletim yolu analizi cevap değerleri ile iletim yolları arasında var olan ilişkiyi ifade eden bir tür geçirenlik metodudur[4].

2.2.1 Geçirgenlik yaklaşımı

Geçirgenlik fonksiyonu incelenen sistemin iki cevap fonksiyonu arasında ki karakteristik ilişkiyi ifade eden bir fonksiyondur[14]. Geçirgenlik fonksiyonu konsepti operasyonel modal analiz ve operasyonel iletim yolu analizi metotlarında kullanılan bir yaklaşımdır[15]. Geçirgenlik yaklaşımı denklem 2.15 de ifade edilmektedir.

$$T_{ab} = \frac{a_{pa}}{a_{pb}} = \frac{H_{ai}F_i}{H_{bi}F_i} = \frac{H_{ai}}{H_{bi}} \quad (2.15)$$

Burada T_{ab} a ve b noktaları arası geçirgenlik fonksiyonu, a_{pa} ve a_{pb} sistem üzerindeki a ve b noktalarından alınan iki cevap fonksiyonu, F_i bu sistemin i noktasına etkiyen kuvvettir.

Geçirgenlik fonksiyonu denklem 2.15 den anlaşılacağı gibi, üç önemli özelliğe sahiptir. Birinci önemli özellik, sisteme etki eden yükün sistem üzerindeki yeri değişmesi durumunda cevap fonksiyonları ile yük arasındaki frekans tepki fonksiyonları değişeceğinden ötürü, geçirgenlik fonksiyonun sisteme etkiyen yükün yerine bağlı olduğu söylenilebilir. İkinci önemli özellik ise, incelenen sisteme ek bir yükün etkimesi halinde, cevap fonksiyonları ile yük arasındaki frekans tepki fonksiyonları değişeceğinden geçirgenlik fonksiyonu değişir. Son önemli özellik, geçirgenlik matrisi sisteme uygulanan kuvvet veya momentlerin genlik değerlerinden bağımsızdır[15].

Geçirgenlik yaklaşımı sistemde ölçülmeyen ancak değerleri bulunmak istenen cevap fonksiyonlarının bulunmasını sağlayan bir yöntem olarak da kullanılabilir. İncelenen sisteme A koordinatlarında, kuvvetler veya momentler uygulanıyor olduğu kabulü yapılarak, sistemde bilinen ya da ölçülen cevap fonksiyonları K, bilinmeyen ve bulunmak istenen cevap fonksiyonları U alt gurupları altında incelenirse, bu iki bağımsız cevap fonksiyonları arasındaki ilişki denklem 2.16 aşağıda belirtilmiştir.

$$\{X_U\} = [T_{AKU}]\{X_K\} \quad (2.16)$$

Bu denklemde

X_K = Sistemde bilinen yada ölçülen cevap fonksiyonları

X_U = Sistemde bilinmeyen cevap fonksiyonları

T_{AKU} = Bilinen ve bilinmeyen cevap fonksiyonları arasındaki geçirgenlik matrisi

Denklem 2.16 da gösterilen bağıntılardan yola çıkarak bilinen ve bilinmeyen cevap fonksiyonları arasındaki ilişki aşağıda olduğu gibi gösterilmiştir[18].

$$[T_{AKU}] = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1} \quad (2.17)$$

Eğer geçirgenlik matrisi bilinen bir fonksiyon ise, geçirgenlik matrisi ve X_K bilinen cevap fonksiyonu yardımıyla, X_U bilinmeyen cevap fonksiyonu elde edilebilir.

Denklemden de anlaşılacağı gibi, bir yapı için sadece bir tane geçirgenlik fonksiyonun varlığından bahsedilemez. Geçirgenlik matrisi bilinen kuvvetlerin ve/veya momentlerin uygulandığı A noktalarının, K bilinen cevap fonksiyonları noktalarının ve U bilinmeyen cevap fonksiyonları noktalarının yerlerine bağlıdır[18].

H_{KA} matrisinin tersinin alınabilmesi için, kuvvet yada momentlerin uygulandığı noktaların sayısı, ölçüm alınan cevap noktalarının sayısına eşit olması gerekmektedir ($\#A=\#K$). Eğer sisteme uygulanan kuvvet yada momentlerin sayısı ölçüm alınan cevap noktalarının sayısından fazla olursa H_{KA} matrisinin tersini almak mümkün olamaz($\#A>\#K$). Ancak cevap noktalarının sayısı sisteme uygulanan kuvvet yada momentlerin sayısından fazla olursa pseudo-ters matris metodu ile H_{KA} matrisinin tersi elde edilebilir ($\#A<\#K$)[18].

2.2.1.1 Geçirgenlik matrisinin elde edilmesi

A koordinatları üzerinden sisteme, bilinen ve kontrollü bir biçimde f_A^1 dinamik yüklerinin uygulandığı kabulünden yola çıkarak, sistemde ölçülen cevap fonksiyonları arası geçirgenlik denklemi 2.18 de belirtilmiştir.

$$\{X_U^1\} = [T_{AKU}]\{X_K^1\} \quad (2.18)$$

Bu aşamada geçirgenlik matrisi bilinmemekte, X_U ve X_K vektörleri sistemde ölçülen cevap fonksiyonlarından oluşmaktadır. T_{AKU} geçirgenlik matrisinin bulunabilmesi için, sisteme k kadar farklı koşulda dinamik yük uygulanmaya devam edilirse, ölçülen cevap fonksiyonları arası geçirgenlik, denklem 2.19'daki gibi ifade edilebilir[18].

$$[\{X_U^1\}\{X_U^2\} \dots \dots \{X_U^k\}] = [T_{AKU}][\{X_K^1\}\{X_K^2\} \dots \dots \{X_K^k\}] \quad (2.19)$$

Geçirgenlik matrisi sistem üzerine farklı koşullarda dinamik yüklerin uygulanmasına karşın hep sabittir, çünkü denklem 2.17'de belirtildiği gibi geçirgenlik matrisi sisteme uygulanan kuvvet yada momentlerin genlik değerlerinden bağımsızdır[18].

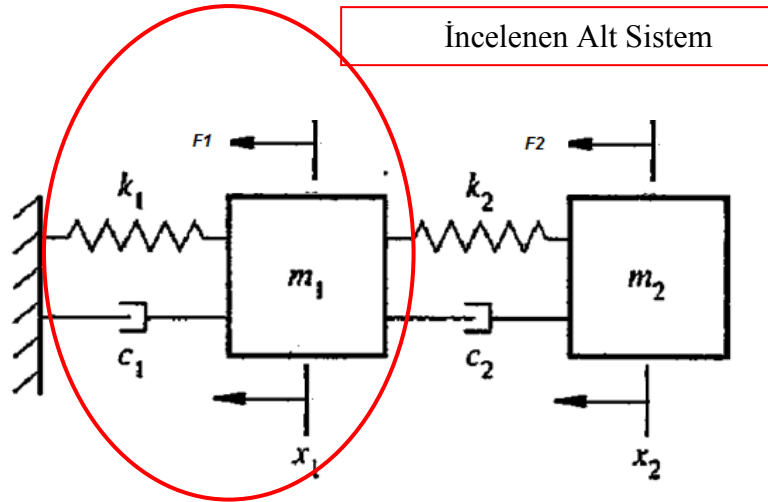
Denklem 2.19 yeniden düzenlenilerek yazılırsa, denklem 2.20 formuna kavuşur.

$$[T_{AKU}] = [\{X_U^1\}\{X_U^2\} \dots \dots \{X_U^k\}][\{X_K^1\}\{X_K^2\} \dots \dots \{X_K^k\}]^{-1} \quad (2.20)$$

Denklem 2.20 ile geçirgenlik matrisinin sadece ölçülen cevap fonksiyonları ile hesaplanabildiği gösterilmektedir. Geçirgenlik matrisinin bu yaklaşımla elde edilebilmesi için X_K cevap fonksiyonlarından oluşan matrisin tersinin alınabiliyor olması lazımdır. Bunun içinde k farklı koşullandırma sayısı K cevap noktalarının sayısına eşit yada fazla olmalıdır.

2.2.2 Operasyonel iletim yolu analizi uygulamaları

Bu bölümde operasyonel iletim yolu analizi teorisinin basitçe açıklanması için iki serbestlik dereceli kütle-damper-yay sistemi kullanılacaktır. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi tüm sistem, F_1 kuvvetinin etkideği m_1 , k_1 ve c_1 değerlerinin oluşturduğu izole alt sistem ve bu sisteme etkiyen, bağlantı sistemi olarak ikiye ayrılmıştır. İki serbestlik dereceli bir kütle-yay-damper sisteminin hareket denklemleri aşağıda gösterildiği gibidir.



Şekil 2.8 : İki serbestlik dereceli sistem ve bu sistemde incelenen alt sistem[7].

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21, Fourier dönüşümü gerçekleştirilerek “s” tanım kümesinde tekrar yazılacak olunursa[3].

$$\left(s^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(s) \\ F_2(s) \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

Burada m_1 , k_1 ve c_1 ilgilenilen alt sistemin kütle, yay ve damper elemanlarını temsil etmektedir. F_2 ise m_2 kütesine etkiyen ve bilinmeyen operasyonel kuvvettir.

Denklem 2.22'de belirtilen ifadenin ilk satırında yola çıkararak ilgilenilen alt sistemin deplasman fonksiyonu olan $X_1(s)$ yeniden yazılacak olunursa denklem 2.23 elde edilir[3].

$$X_1(s) = (s^2m_1 + sc_1 + k_1)^{-1}(F_1(s) + (sc_2 + k_2)(X_2(s) - X_1(s))) \quad (2.23)$$

Herhangi bir viskoz sönümlü tek serbestlik dereceli bir sistemde frekans cevap fonksiyonu H_{11} aşağıda denklem 2.24 de gösterildiği gibidir.

$$H_{11} = (s^2m_1 + sc_1 + k_1)^{-1} \quad (2.24)$$

İncelenen alt sistemin diğer sistemden izole olduğu kabulünden yola çıkarak, incelenen alt sistemin frekans cevap fonksiyonunun viskoz sönümlü tek serbestlik dereceli bir sistemin sahip olduğu frekans cevap fonksiyonuna eşit olduğu çıkarımı yapılabilmektedir. H_{11} fonksiyonu denklem 2.23'e yerleştirilirse $X_1(s)$ ilgilenilen alt sistemin deplasman fonksiyonu, aşağıda denklem 2.25 de gösterilen forma kavuşur.

$$X_1(s) = H_{11}(s)F_1(s) + H_{11}(s)[(sc_2 + k_2)(X_2(s) - X_1(s))] \quad (2.25)$$

Bu formül operasyonel iletim yolu analizinin temelini oluşturmaktadır. Ancak bu yaklaşım aşağıda belirtilen iki temel koşul gerçekleşirse doğru sonuçları vermektedir[3]. Birinci koşul, M_2 kütesine etkiyen bir F_2 kuvveti bulunmalı ve bu kuvvet F_1 bilinen kuvvetinden bağımsız olmasıdır. İkinci koşul ise, $(X_2 - X_1)$ göreceli deplasmanı ölçülebiliniyor olmalı ve F_1 kuvvetinden bağımsız olmalı. Ancak bu koşullar sağlandığında iki serbestlik dereceli bir sistemde, F_1 ve $(X_2 - X_1)$ referans değerleri kullanılarak H_{11} frekans cevap fonksiyonu doğru biçimde bulunabilir[3]. Denklem 2.25'den de anlaşılacağı gibi operasyonel iletim yolu analizi incelenen sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki lineerleştirilmiş transfer fonksiyonlarının bulunmasını sağlayan bir sinyal işleme metodudur. Otomobil gibi çok serbestlik derecesine sahip sistemlerde, giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki bu lineerleştirilmiş ilişki denklem 2.26 de gösterildiği gibi ifade edilebilir[9].

$$H(j\omega)x(j\omega) = y(j\omega) \quad (2.26)$$

Bu denklemde $H(j\omega)$ transfer fonksiyonu matrisi, $x(j\omega)$ giriş sinyalleri vektörü ve $y(j\omega)$ çıkış sinyalleri vektörünü temsil etmektedir. Sistemin frekansa bağlılığı ($j\omega$) ile gösterilmektedir.

Titreşim ve akustik ile ilgili çalışmalarda kullanılan ölçüm sinyalleri genellikle hareket (ivme, hız, deplasman), kuvvet veya ses basıncıdır[9]. Bu ifadeler ışığında incelenen sisteme ait giriş ve çıkış sinyalleri denklem 2.27’de olduğu gibi ifade edilebilir.

$$x(j\omega) = \begin{bmatrix} u_x(j\omega) \\ f_x(j\omega) \\ p_x(j\omega) \end{bmatrix}; y(j\omega) = \begin{bmatrix} u_y(j\omega) \\ f_y(j\omega) \\ p_y(j\omega) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Denklem 2.27’den anlaşılacağı gibi, operasyonel iletim yolu analizinde, sisteme etkileyen giriş ve çıkış sinyalleri olarak hangi büyüklüklerin seçileceği analizi uygulayan kişiye bağlıdır. Klasik iletim yolu metodunun aksine sadece kuvvet sinyalleri değil, basınç ve hareket sinyalleri de sistemin giriş sinyalleri olarak seçilebilir[9]. Buna ek olarak giriş ve çıkış sinyallerin sayısı bir birine eşit olmak zorunda değildir. Giriş sinyali m adet çıkış sinyali n adet olan bir sistemde, giriş ve çıkış sinyalleri arası transfer fonksiyonu aşağıda gösterildiği gibi denklem 2.28’de ifade edilmiştir.

$$[x^1(j\omega) \dots \dots x^m(j\omega)] \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1m} & \dots & H_{mn} \end{bmatrix} = [y^1(j\omega) \dots \dots y^n(j\omega)] \quad (2.28)$$

Denklem 2.28 den de anlaşılacağı gibi tek bir ölçüm ile sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki transfer fonksiyonunu elde etmek mümkün değildir. Çünkü toplamda m ve n sayılarının çarpımı kadar bilinmeyen olmasına karşın, sadece n kadar denklem mevcuttur. Denklem çözülerek transfer fonksiyonu matrisinin elde edilebilmesi için en az giriş sinyali sayısı kadar bir birinden bağımsız, farklı koşullar altında ölçüm alınmalıdır. Bu sayede giriş sinyalleri matrisinin tersi alınarak, transfer fonksiyonları elde edilebilir. r adet farklı koşullar altında ölçümlerin yapılması sonucu denklem 2.28, aşağıda gösterilen denklem 2.29 denklemi formuna dönüşür.

$$\begin{bmatrix} x_1^1(j\omega) & \dots & x_1^m(j\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_r^1(j\omega) & \dots & x_r^m(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1m} & \dots & H_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1^1(j\omega) & \dots & y_1^m(j\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_r^1(j\omega) & \dots & y_r^m(j\omega) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Daha kısa bir matris formatında denklemi yeniden ifade etmek gerekirse denklem 2.30’deki ifade elde edilir.

$$XH = Y \quad (2.30)$$

Özellikle düşük frekanslarda yapının sahip olduğu yüksek modal özellik sonucu giriş sinyallerinde nümerik hatalara neden olabilecek yüksek bağıdaşıklık problemi oluşabilmektedir[8]. Bu durumun transfer fonksiyonu üzerindeki etkilerini olabildiğince azaltmak için tekil değer analizi metodu uygulanır.

Sistemin giriş sinyallerini oluşturan X matrisi tekil değer analizi metodunu kullanılarak aşağıda gösterilen biçimde ifade edilebilir.

$$X = U\Sigma V^T \quad (2.31)$$

Burada U $r \times m$ boyutlarında üniter matris, Σ $m \times m$ boyutlarında diyagonal elemanları reel ve negatif olmayan diyagonal matris, V^T $m \times m$ boyutlu V üniter matrisinin konjüge transpozunu ifade etmektedir. Tekil değer analizi metodu kullanılarak sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$H = V\Sigma^{-1}U^TY \quad (2.32)$$

Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki transfer matrisindeki küçük tekil değerler, genellikle dış bozucu etmenlerin ya da sinyaldeki gürültü problemi nedeniyle oluşmaktadır, bu yüzden ihmal edilebilirler[11,12].

Operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen modelin, incelenen sistemin gerçek durumunu ne kadar yansıttığının bulunması için test esansında ölçülen cevap sinyalleri ile analiz sonucu elde edilen referans cevap sinyalleri karşılaştırılır. Ölçülen cevap sinyalleri ile analiz sonucu elde edilen sonuçlar arasında fark görülmesi durumu, sisteme etkileyen ancak iletim yolu analizi hesabına katılmamış bir iletim yolunun varlığının göstergesidir[9].

2.3 Klasik Metot ile Operasyonel İletim Yolu Analizi Metodunun Karşılaştırılması

Operasyonel iletim yolu analizinde kullanılan, kabin içi toplam ses basıncını ve buradan yola çıkarak iletim yollarının bu ses basıncı üzerindeki dağılımını veren denklem, yapısal olarak klasik iletim yolu analizinde kullanılan ve denklem 2.1 de verilen ifadeye benzemektedir. Operasyonel iletim yolu analizinde toplam cevap fonksiyonu ifadesi denklemi 2.33'de gösterildiği gibidir.

$$p_t(\omega) = \sum_{i=1}^n T_i(\omega)a_{pi}(\omega) + \sum_{j=1}^r T_j(\omega)p_{pj}(\omega) \quad (2.33)$$

Bu denklemde

ω : frekans.

n : Yapısal iletim yolu sayısı.

r : Akustik iletim yolu sayısı.

$p_t(\omega)$: Toplam cevap fonksiyonu.

$a_{pi}(\omega)$: i ($i=1, \dots, n$) yapısal iletim yoluna etki eden operasyonel ivme.

$p_{pj}(\omega)$: j ($j=1, \dots, r$) akustik iletim yoluna etki eden operasyonel basınç.

$T_i(\omega)$: i yapısal iletim yolunda cevap sinyali ile operasyonel ivme sinyali arasındaki geçirgenlik fonksiyonu.

$T_j(\omega)$: j akustik iletim yolunda cevap sinyali ile operasyonel basınç sinyali arasındaki geçirgenlik fonksiyonudur.

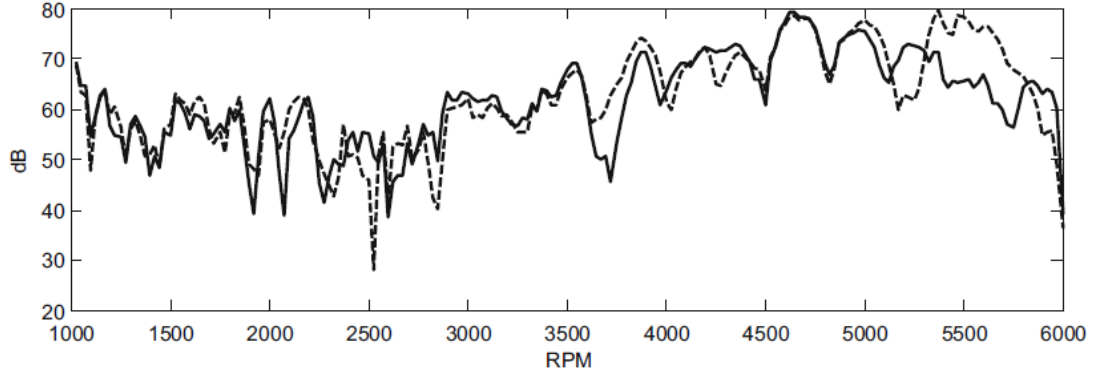
Operasyonel iletim yolu analizinde kullanılan matematiksel model klasik metotta kullanılan model arasında yapısal olarak benzerlik bulunsa da iki denklem arasında temel farklılıklar vardır. Operasyonel iletim yolu analizi klasik metodun aksine nedensel değildir[8]. Klasik metotta sisteme etkiyen yük ile cevap arasındaki ilişki kullanılırken, operasyonel iletim yolu analizinde denklemler cevap-cevap arası ilişkiye göre kurulmuştur[15]. Bu durum şu sonuca neden olmaktadır ki, klasik metotta herhangi bir yükün toplam cevap fonksiyonu üzerindeki etkisi gösterilebilirken, operasyonel iletim yolu analizinde incelenen operasyonel koşullar için giriş sinyalleri ile cevap fonksiyonu arasındaki ilişki gösterilebilmektedir. Ayrıca geçirgenlik fonksiyonları, transfer fonksiyonlarının aksine karakteristik bir yapı olmayıp sisteme etkiyen yüklerin sayısına ve yüklerin sistem üzerindeki etki yerlerine bağlı olduğu söylenilebilir[15].

Bugüne kadar yapılan çalışmalar sonucu operasyonel iletim yolu analizinde dikkat edilmesi gereken üç temel husus olduğu anlaşılmıştır[10,14]. Bunlardan birincisi iletim yollarının toplam cevap fonksiyonu üzerindeki dağılımının doğru bir biçimde bulunabilmesi için, sisteme etkiyen farklı koşullar arasındaki korelasyonun düşük olması gerekmektedir. Geçirgenlik matrisinin elde edilebilmesi için farklı koşullandırmalar ile ölçümlerin alınması gerektiği bölüm 2.2.1.1 de bahsedilmiştir. Bu farklı koşullar motorun hızlanma ve yavaşlama durumları altında farklı RPM'lerde alınan ölçümler olabilir. Eğer ölçümde alınan farklı koşulların sayısı gerektiğinden az olursa giriş sinyalleri arası korelasyon yüzünden sistemin gerçek

durumunu yansıtmayan geçirgenlik matrisleri elde edilebilir. Motor hızlanma yaparken her bir frekans farklı orderlarda tetiklenir ve bu durum da giriş sinyalleri arasında farklı faz ilişkisinin oluşmasını sağlar[15]. Giriş sinyalinde incelenen order sayısı incelenen iletim yolu sayısının en az iki katı olacak şekilde farklı koşullarda ölçüm alınmalıdır[15].

Dikkat edilmesi gereken ikinci önemli husus ise iletim yolları arasında çapraz bağlaşım etkisi düşük olmalıdır, diğer bir deyişle belirli bir iletim yoluna etkileyen operasyonel yükün diğer iletim yolları üzerindeki etkisi incelenen iletim yolunun giriş sinyalinin büyüklüğüne nazaran ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır[15]. Çapraz bağlaşım etkisi, sistemin pasif tarafında belirli bir noktada ölçülen ivme verisinde o noktaya etkileyen operasyonel kuvvetin yanı sıra diğer kuvvetlerinde etkimesi durumudur. Böyle bir durum söz konusu olduğunda iletim yolunun toplam cevap fonksiyonu üzerindeki etkisi yanlış hesaplanabilir.

Operasyonel iletim yolu analizinde dikkat edilmesi gereken üçüncü husus ise, sistemin sahip olduğu tüm aktif iletim yolları, iletim yolu analizi hesabına katılmalıdır[10,14]. Eğer operasyonel yüklerin ölçülmesi esansında bir ya da daha çok iletim yolunun giriş sinyalleri ölçüme dahil edilmez ise, toplam ölçülen ses basıncı değerleri ile hesaplanan ses basıncı değerleri arasında fark ortaya çıkar. Ancak giriş sinyalleri arasında çapraz bağlaşım etkisi yüksek olduğu durumlarda, ölçülen ses basıncı değeri ile analiz sonucu elde edilen ses basıncı değeri arasında dikkat çekici bir fark gözlenemeyebilir. Bu durumun oluşmasının nedeni, hesaba katılmayan giriş sinyallerinin enerjisi, eğer iletim yolları arasında önemli bir çapraz bağlaşım etkisi söz konusu ise, diğer iletim yollarını etkilemekte ve iletim yollarının toplam sistem üzerindeki dağılımının gerçekten farklı olmasına sebebiyet vermesidir[8]. Bu durum hesaba katılmamış iletim yollarının olduğu sonuçlardan açıkça anlaşılabilir ve hatalı sonuçların elde edilmesine neden olabilir. Şekil 2.9 da hesaba katılmayan iletim yolunun olması durumunda ölçülen toplam cevap fonksiyonu ile analiz ile hesap edilen cevap fonksiyonunun arasındaki farklılık göstermektedir.



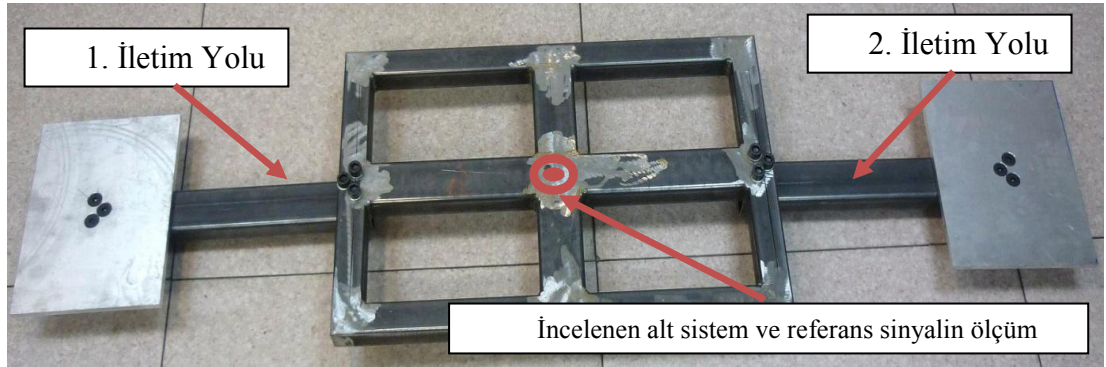
Şekil 2. 9 : Hesaba katılmayan iletim yolunun olması halinde ölçülen toplam cevap fonksiyonunun analiz ile elde edilen cevap fonksiyonu ile karşılaştırılması. Kesikli çizgiler ile gösterilen grafik analiz ile elde edilen değerleri, düz çizgi ile gösterilen değerler ise orijinal cevap fonksiyonunu ifade etmektedir[15].

3. DENEYSEL UYGULAMALAR

3.1 Giriş

Klasik ve operasyonel iletim yolu analizinin teorik altyapısının bahsinden sonra, bu bölümde tasarlanan bir deney düzeneği üzerinde yapılan iletim yolu analizi uygulamaları anlatılmıştır. İlk önce tasarlanan deney düzeneği üzerinde modal analiz uygulanarak yapının modal parametreleri belirlenmiştir. Sonrasında farklı operasyonel yükler altında hem klasik hem de operasyonel analiz uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Test düzeneği, konu ile ilgili literatürde var olan test düzenekleri göz önüne alınarak, incelenen alt sisteme etkiyen birbirinden bağımsız iki iletim yolu olacak şekilde tasarlanmıştır. Test düzeneği ve iletim yolları şekil 3.1 de gösterilmektedir.



Şekil 3. 1 : İletim yolu analizlerinde kullanılan test düzeneği.

Test düzeneği üzerinde operasyonel ve klasik iletim yolu analizlerinin deneysel uygulamaları, bir birinden farklı iki sınır koşulu altında gerçekleştirilmiştir. İki farklı sınır koşulu için analizlerin gerçekleştirilmesindeki amaç, farklı sınır koşullarında klasik ve operasyonel iletim yolu analizlerini karşılaştırmak ve çalışmalar sonucu elde edilen sayısal programların doğruluğunun kontrol edilmesidir. Birinci sınır koşulunda test düzeneği, elastik ipler ile bir test rigine bağlı ve sistem sarsıcılar ile tahrik edilirken, iletim yolu analizi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. İkinci sınır koşullarında ise test düzeneği elastik takozlar üzerinde iken ve sistem elektrik motorları ile tahrik edilirken deneysel uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen

sınır koşullarında yapılan testler bölüm 3.1 ve 3.2 de daha detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel çalışmalarda ölçümler için şekil 3.2 de gösterilen LMS Scadas 310 analizörü kullanılmıştır. Sınırlı sayıda ivmeölçer adedi olması nedeniyle sistemin modal parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan modal analiz uygulamalarında, tüm noktalardan ölçüm alabilmek için ivmeölçerler yapı üzerinde gezdirilerek ölçümler yapılmıştır.

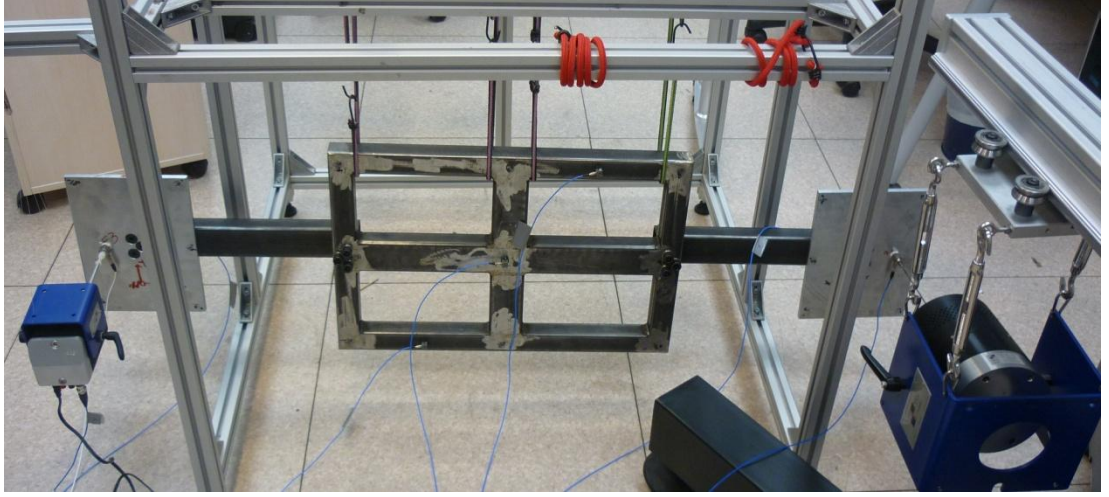


Şekil 3. 2 : LMS Scadas 310 Analizörü.

İvmeölçerlerle yapılan titreşim ölçümlerinin Fourier dönüşümleri ve spektrumlarının hesaplanması analizör tarafından gerçekleştirilmiştir. Alınan titreşim ölçümlerinin zamana bağlı veri olarak kaydedilmesi ve daha sonra MATLAB programında Fourier dönüşümünün gerçekleştirilmesi de mümkündür. Ancak, istenilen parametrelerin analizörün ara yüz programına girilmesinden sonra spektrumların hesap edilmesi için analizörün kullanılması veri kalitesi açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu sebepten spektrumların analizöre hesap ettirilmesi tercih edilmiştir.

3.2 Serbest-Serbest Sınır Koşulları İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar

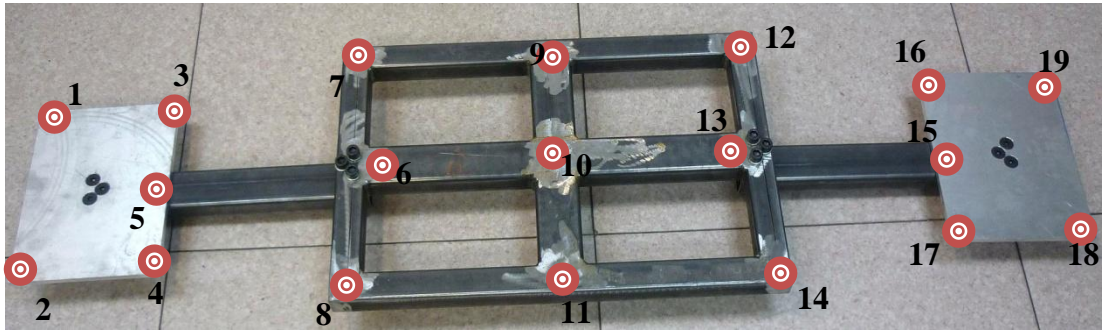
Deneysel bölümde ki çalışmaların ilk gurubu, test düzeneğinin Şekil 3.3’de gösterildiği gibi test rigine elastik ipler ile asılması sonucu oluşan sınır koşulları için gerçekleştirilmiştir. Bu sınır koşulları altında operasyonel ve klasik iletim yolu analizi uygulamalarından önce, sistemin sahip olduğu modal parametreleri belirlemek için, yapı modal çekiç ile tahrik edilmiş ve ortaya çıkan FTF’ler analiz edilerek modal analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 : Serbest-Serbest sınır koşulları altında test düzeneği.

3.2.1 Modal parametrelerin belirlenmesi

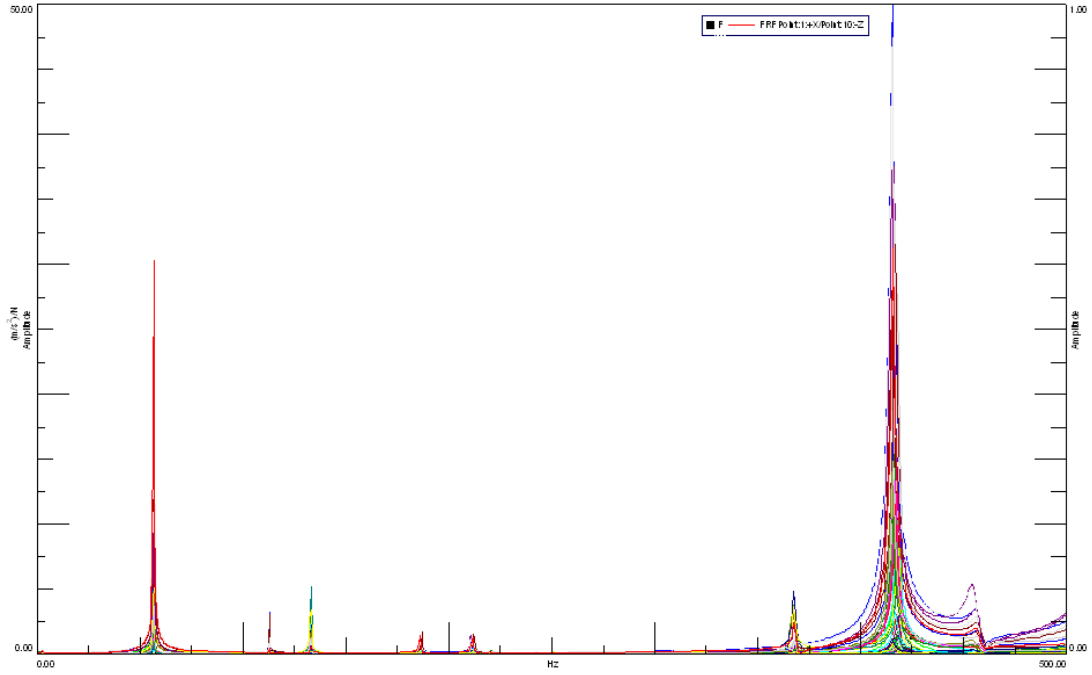
Serbest-serbest sınır koşulları için sistemin modal parametrelerinin belirlenmesi işleminde 100mv/g hassasiyete sahip PCB marka 356A32 modelinde iki ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivme ölçerlerin adetinin azlığı sebebiyle, modal analiz esnasında, tüm noktalardan ölçüm alabilmek için ivmeölçerler yapı üzerinde gezdirilmiştir. Sistemin test rigine asılı halde ve elastik takozlar üzerindeki iki farklı sınır koşulu için yapılan modal analizlerde ivmeölçer için aynı lokasyonlar kullanılmıştır. İvme ölçer lokasyonları şekil 3.4 de gösterilmektedir.



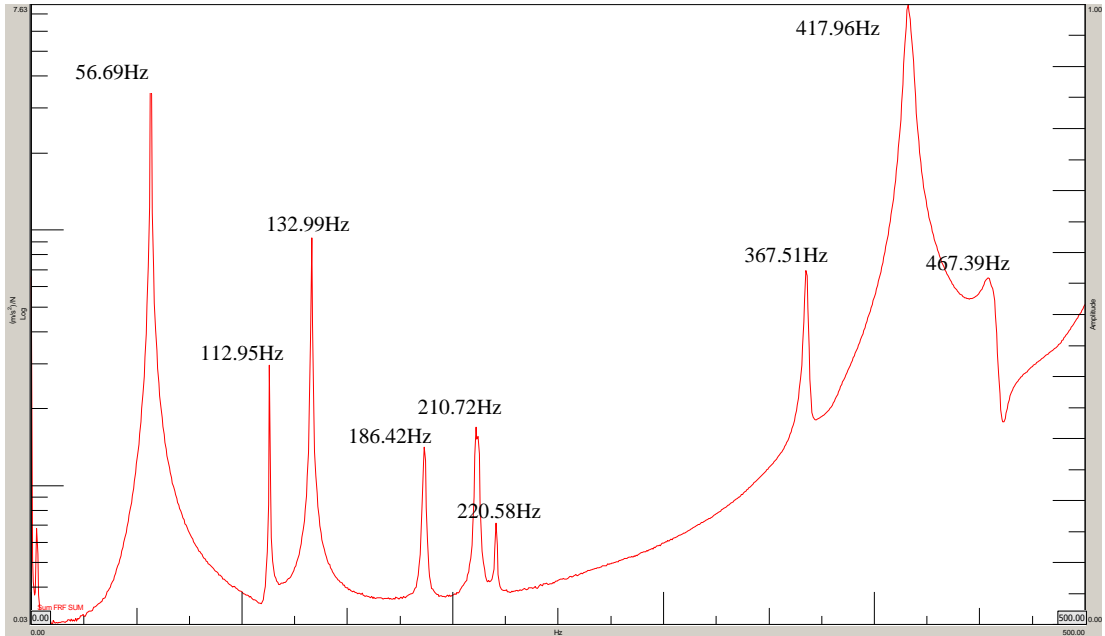
Şekil 3.4 : Modal analiz esnasında ivmeölçerlerin yerleştirildiği noktalar.

Bu tez kapsamında yapılan iletim yolu analizlerinde 0-400Hz aralığında ki titreşimler incelenmiştir. Bu yaklaşımdan yola çıkarak modal parametrelerin belirlenmesi işlemi 0-500 Hz aralığı ile sınırlı tutulmuştur. Modal analiz esnasında, giriş sinyali için kuvvet-üstel windowing uygulanırken, çıkış sinyaline üstel windowing uygulanmıştır. Yapı üzerinden ölçülen spektrumların üç defa ortalaması alınarak FTF'ler belirlenmiştir. Test düzeneği serbest-serbest sınır koşullarına sahip iken 500 Hz'e kadar 9 adet modunun bulunduğu modal analiz sonucu ortaya çıkarılmıştır. 0-

500Hz aralığında, modal analiz sonucu tüm ölçüm noktalarından elde edilen FTF grafikleri ve bu FTF'lerin toplamını gösteren grafik şekil 3.5'de ve şekil3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3. 5 : Serbest-serbest sınır koşullarında ki test düzeneği için tüm noktalardan alınan FTF grafikleri.



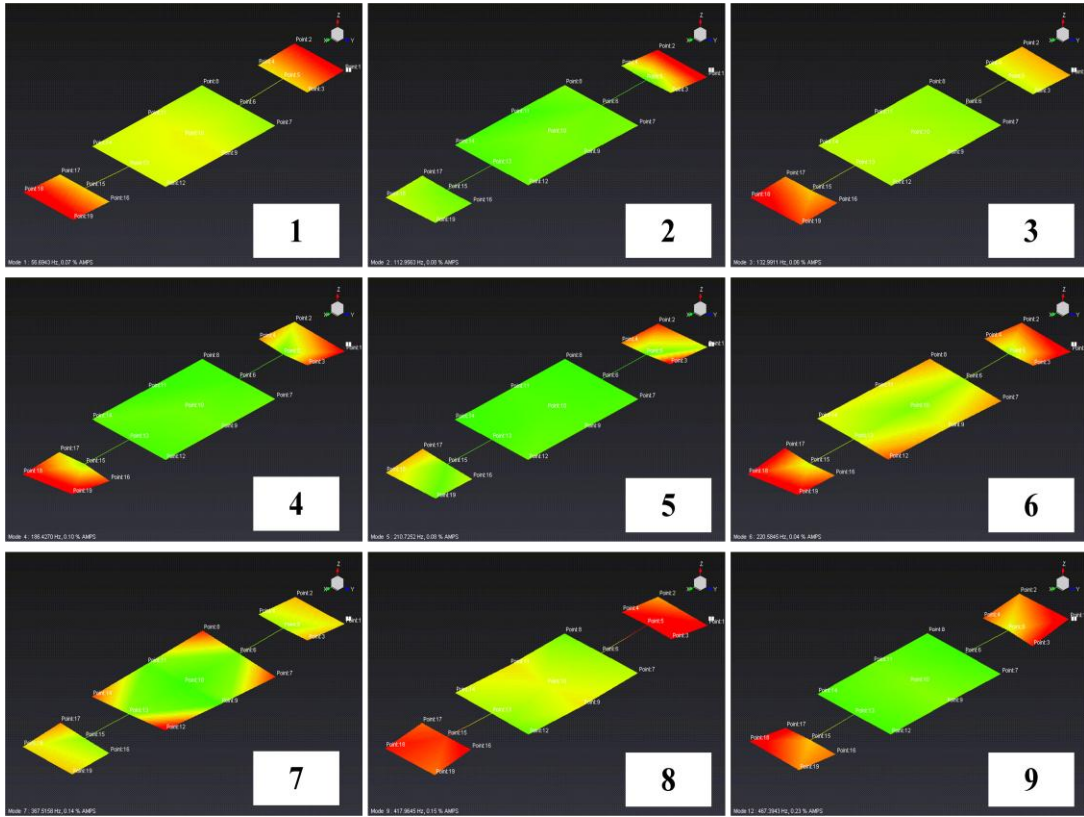
Şekil 3. 6 : Serbest-serbest sınır koşullarındaki test düzeneğinde tüm noktalardan alınan FTF grafiklerinin tek bir grafikte toplanmış hali.

Serbest-serbest sınır koşulları için sistemin 0-500 Hz aralığında sahip oldu modlar çizelge 3.1 de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemin 500Hz'e kadar sahip olduğu doğal frekansları.

Mod Numarası	Frekans(Hz)
1	56.69
2	112.95
3	132.99
4	186.42
5	210.72
6	220.58
7	367.51
8	417.96
9	467.39

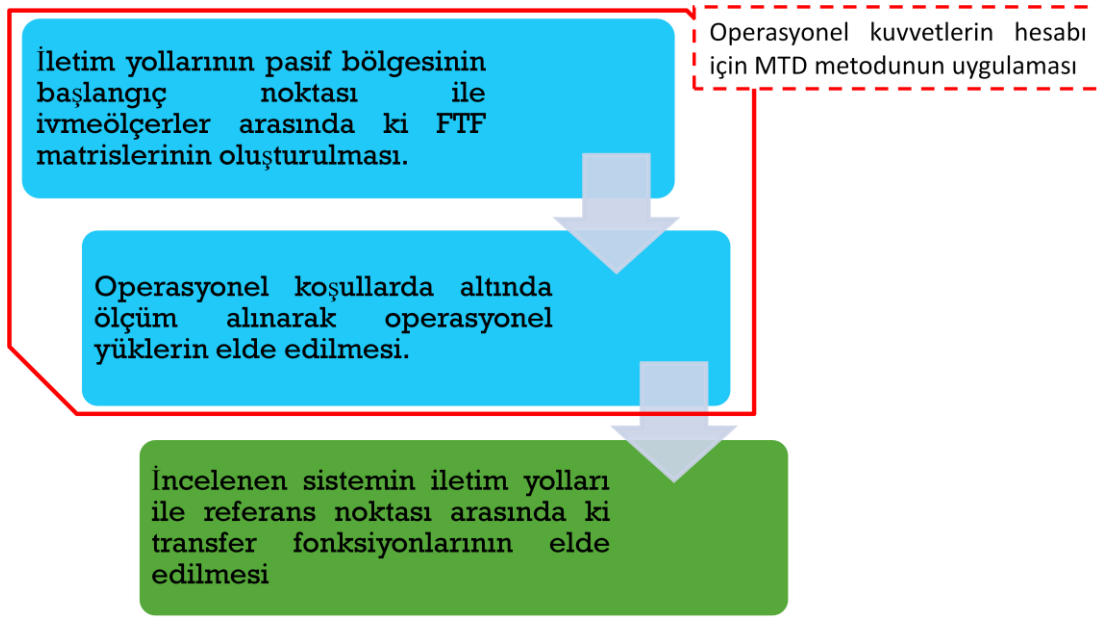
Test düzeneğin serbest-serbest sınır koşullarında 500 Hz'e kadar sahip olduğu 9 modun mod şekilleri şekil 3.7 de gösterilmektedir.



Şekil 3. 7 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneğinin 0-500Hz aralığında mod şekilleri.

3.2.2 Klasik iletim yolu analizi

Klasik iletim yolu analizi, incelenen sistem üzerinde gerçekleştirilmesi için denklem 1.1 ve 2.1 de gösterildiği gibi incelenen sisteme ait temel iki değere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar iletim yolları ile sistemin referans noktaları arasında ki transfer fonksiyonları ve sisteme etkiyen operasyonel kuvvetlerdir. Klasik iletim yolu analizi için deneysel uygulamada yapılan çalışmaların adımları şematik olarak şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 8 : Klasik iletim yolu analizi için deneysel uygulamada yapılan adımlar.

Bu tez kapsamında sadece yapısal iletim yolları incelenmektedir. Yapısal operasyonel kuvvetlerin hesabında üç temel metodun olduğu teori bölümünde bahsedilmiştir. İletim yolu analizi uygulanacak test düzeneğinde, iletim yolları ile incelenen alt sistem arasındaki bağlantının rijit bir yapıda olması sebebiyle, teori bölümünde bahsedildiği gibi matris ters dönüşüm metodunun uygulanması daha uygundur. Bu yüzden operasyonel kuvvetlerin hesabında matris ters dönüşüm metodu uygulanmıştır.

MTD metodunda operasyonel kuvvet, denklem 3.1’de gösterildiği gibi, iletim yollarının pasif taraflarının başlangıç noktası ile sistemin pasif tarafına yerleştirilmiş ivmeölçerler arasında ki ivme-kuvvet FTF matrisinin pseudo tersi ve operasyonel anda iletim yollarının pasif tarafından ölçülen ivme verilerinin çarpımı sonucu bulunmaktadır.

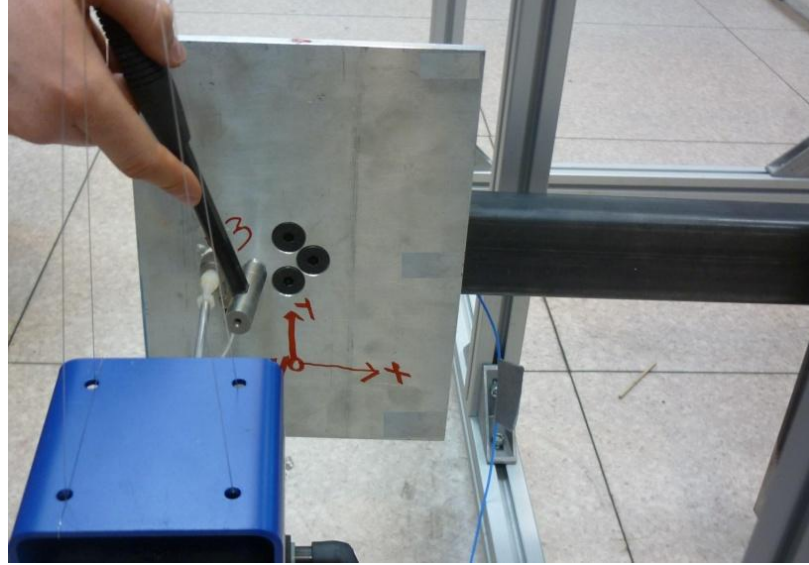
$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\ddot{x}_1/F_1} & H_{\ddot{x}_1/F_2} & \dots & H_{\ddot{x}_1/F_n} \\ H_{\ddot{x}_2/F_1} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{\ddot{x}_m/F_1} & \dots & \dots & H_{\ddot{x}_m/F_n} \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Bu denklemde

$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \dots \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix}$: sistemin pasif tarafındaki operasyonel ivme vektörleri.

$H_{\ddot{x}_j/F_i}$: i iletim yoluna etkiyen tahrik kuvveti ile j alıcısında ki ivme değeri arasında ki frekans cevap fonksiyonudur.

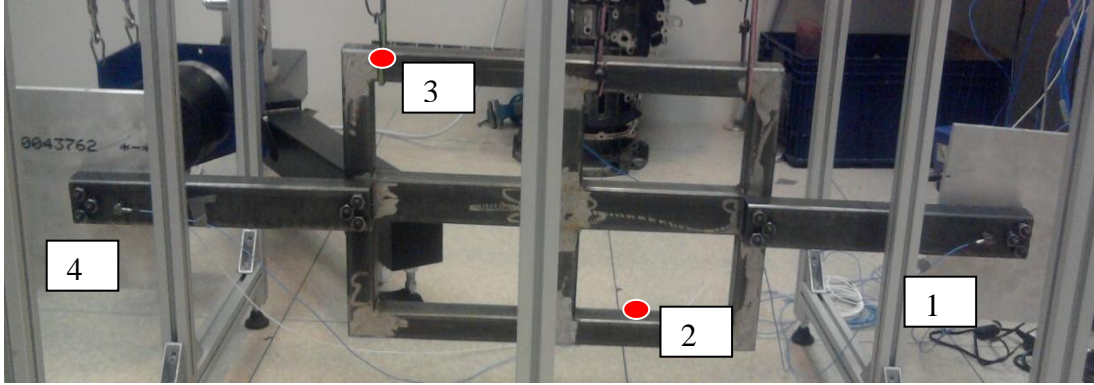
Uygulamada operasyonel kuvvetlerin hesabı için gerekli olan ivme-kuvvet FTF matrisi, her bir iletim yolunun tüm doğrultularında sistemin iletim yollarının pasif tarafları, modal çekiç ile tahrik edilerek bulunmuştur. Şekil 3.9’da incelenen sistemin modal çekiç kullanılarak birinci iletim yolunun-Z doğrultusunda tahrik edilmesi gösterilmektedir.



Şekil 3. 9 : MTD metodu ile operasyonel kuvvetlerin hesabı, iletim yollarında kuvvet tahrikine bağlı olarak ölçülen FTF matrisinin bulunması.

Operasyonel kuvvetlerin elde edilmesi için deney düzeneği üzerinde yapılan uygulamada, teori bölümünde bahsedilen ve MTD metodunun en önemli hususu olan yetersiz koşullandırma probleminin meydana gelmemesi için, cevap noktalarının sayısı tahrik noktaların sayısının en az iki katı olması gerekmektedir. Deneysel uygulamada bu koşul, sistemin pasif tarafına eklenen iki adet ek gösterge ivmeölçerinden alınan sinyaller ile sağlanmıştır. Test düzeneği üzerinde, iletim

yollarına yerleştirilen ve ek gösterge sinyalleri oluşturması için sistemin pasif tarafında yerleştirilen ivme ölçeler şekil 3.10’de gösterilmiştir. şekil 3.10’da ek gösterge ivmeölçerleri test düzeneğinin görünmeyen bölgesinde kaldığı için buldukları lokasyonlar kırmızı noktalar ile işaret edilmektedir.

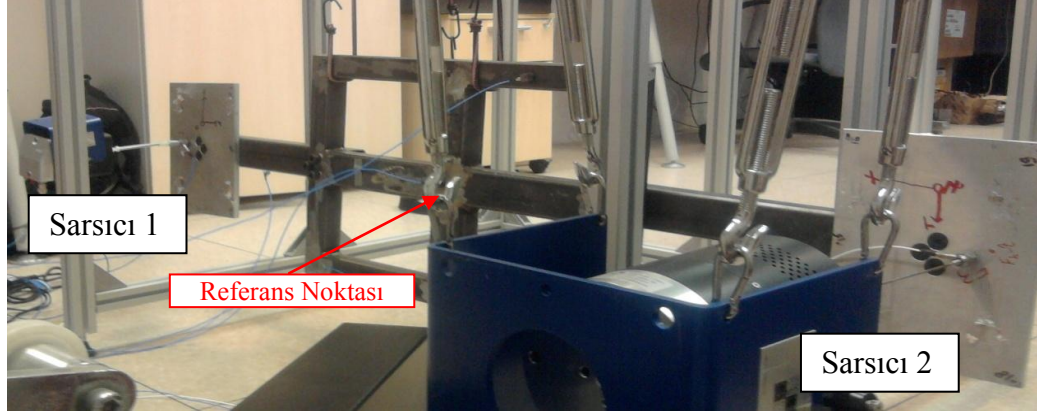


Şekil 3. 10 : Operasyonel kuvvetlerin hesabında kullanılan MTD metodunu için kullanılan ve test düzeneği üzerine yerleştirilen dört adet ivmeölçerin lokasyonları.

Çalışmanın bu aşamasında 10mv/g hassasiyete sahip PCB marka 356B21 modelinde ki ivmeölçerler kullanılmıştır. FTF’lerin elde edilmesi için yapılan çalışmalarda, giriş sinyali için kuvvet-üstel windowing uygulanırken çıkış sinyali üzerine üstel windowing uygulanmıştır.

Klasik iletim yolu analizinde, operasyonel kuvvetlerin elde edilmesi aşamasında, FTF matrisinin elde edilmesinden sonraki işlem, operasyonel ivme verilerinin elde edilmesidir. İletim yolu analizinin son aşamasında ölçülen sinyal ile analiz sonucu elde edilen sinyalin karşılaştırılabilmesi için operasyonel çalışma koşulları altında sistemin referans noktasından da ivme verisi ölçülmelidir. Operasyonel ivme verilerinin elde edilmesi aşamasına geçmeden önce, sistemin referans noktasına, 10mv/g hassasiyete sahip PCB marka 356B21 modelinde bir ivmeölçer daha yerleştirilmiştir.

Deneyisel uygulamada, incelenecek operasyonel çalışma koşulları, sistemin aktif tarafını oluşturan sarsıcılar ile sistem tahrik edilerek oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerinde birinci iletim yoluna etkiyen sarsıcı “Sarsıcı 1”, ikinci iletim yoluna etkiyen sarsıcı ise “Sarsıcı 2” olarak adlandırılacaktır. Sarsıcı 1 ve sarsıcı 2 test düzeneği üzerinde şekil 3.11 de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.11 : Test düzeneği üzerinde operasyonel yükleri oluşturan sarsıcıların yerleşimleri. Test düzeneği üzerine etki edecek operasyonel yükler, klasik iletim yolu analizinin yanı sıra, operasyonel iletim yolu analizinde de kullanılacak biçimde tasarlanmıştır. Burada amaç aynı operasyonel yükler karşısında klasik ve operasyonel iletim yolu analizi metotları ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıdır. Bir birinden farklı iki sarsma tipi ile sistem tahrik edilmiş ve bu sayede klasik iletim yolu analizi için kurulan sayısal çözümleme yapan programın doğruluğu test edilmiştir. Operasyonel koşullar ile ilgili daha detaylı bilgi, operasyonel iletim yolu analizi için yapılan testlerin anlatıldığı bölümde daha detaylı olarak verilmiştir.

Klasik iletim yolu analizinin bir sonraki aşamasında, deney düzeneğinin birinci ve ikinci iletim yolları ile referans noktası arasında ki transfer fonksiyonları hesap edilmiştir. Deneysel uygulamanın bu aşamada her bir iletim yolu için ayrı ayrı, sistemin aktif tarafını oluşturan sarsıcılar sistemden ayrıldıktan sonra, iletim yolları modal çekiç kullanılarak tahrik edilerek, iletim yolları ile referans noktası arasında ki transfer fonksiyonları elde edilir.

3.2.3 Operasyonel iletim yolu analizi

Çalışmanın bu aşamasında klasik iletim yolu analizi uygulanan deney düzeneği üzerinde operasyonel iletim yolu analizi uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmanın teori bölümünde de bahsedildiği gibi, operasyonel iletim yolu analizinin gerçekleşmesi için sadece operasyonel koşullar altında, iletim yollarının pasif taraflarından ve referans noktasından alınan operasyonel ivme verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Operasyonel koşullar sistemin sarsıcı 1 ve sarsıcı 2 tarafından tahrik edilmesi sonucu elde edilmiştir. İncelenen sistem bir birinden farklı iki sarsma tipi ile tahrik edilerek operasyonel analiz metodu için oluşturulan sayısal çözücü programın doğruluğunun test edilmesi hedeflenmiştir.

Teori kısmında bahsi geçen denklem 2.28'den de anlaşılacağı üzere tek bir operasyonel koşul altında alınan operasyonel veriler ile operasyonel iletim yolu analizini gerçekleştirmek mümkün değildir. Giriş sinyali “m” adet çıkış sinyali “n” adet olan bir sistemde, giriş ve çıkış sinyalleri arası transfer fonksiyonlarının elde edilebilmesi için, en az giriş sinyali sayısı kadar farklı koşullarda operasyonel ölçüm alınmalıdır. Bu tez kapsamında yapılan literatür araştırmalarında anlaşılmıştır ki, analiz sonuçlarının yetersiz koşullandırma probleminden etkilenmemesi için farklı koşullandırma sayısı en az giriş sinyalleri sayısının iki katı kadar olmalı ve giriş sinyalleri üzerinde tekil değer analizi uygulaması gerçekleştirilmesi gerekmektedir[3,4]. Çalışmanın bu bölümünde sistemin iki adet iletim yolunun her bir doğrultusu için toplamda altı adet giriş sinyali olacağından, sistem üzerine on iki farklı koşulda tahrik uygulanmasına karar verilmiştir. Bir birinden farklı iki sinyal tipi ve on iki farklı koşul sonucunda toplamda yirmi dört adet operasyonel durum için ivme verisi toplanmıştır. Birinci sinyal tipinde incelenen sistem, sarsıcı 1 ve sarsıcı 2 ile sabit genlikte, azalarak değişen on iki farklı frekansta tahrik edilmiştir. Bu aşamada sistem üzerine uygulanan operasyonel sinyaller toplu olarak çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 2 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemi sabit genlikte azalarak değişen frekanslarda sistemi tahrik eden sinyaller.

Durum	Sinyal Tipi	Sarsıcı 1		Sarsıcı 2	
		Frekans(Hz)	Seviye(V)	Frekans(Hz)	Seviye(V)
Durum 1	Sinüs	375	0.55	375	0.30
Durum 2	Sinüs	350	0.55	350	0.30
Durum 3	Sinüs	325	0.55	325	0.30
Durum 4	Sinüs	300	0.55	300	0.30
Durum 5	Sinüs	275	0.55	275	0.30
Durum 6	Sinüs	250	0.55	250	0.30
Durum 7	Sinüs	225	0.55	225	0.30
Durum 8	Sinüs	200	0.55	200	0.30
Durum 9	Sinüs	175	0.55	175	0.30
Durum 10	Sinüs	150	0.55	150	0.30
Durum 11	Sinüs	125	0.55	125	0.30
Durum 12	Sinüs	100	0.55	100	0.30

Serbest-serbest sınır koşulları altında yapılan operasyonel iletim yolu analizinin ikinci aşamasında, sistem azalarak değişen genliklerde verilen beyaz gürültü tipi sinyaller ile tahrik edilmiştir. İkinci aşamada incelenen sisteme uygulanan operasyonel sinyaller toplu olarak çizelge 3.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 3 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemi azalarak değişen genliklerde sistemi tahrik eden sinyaller.

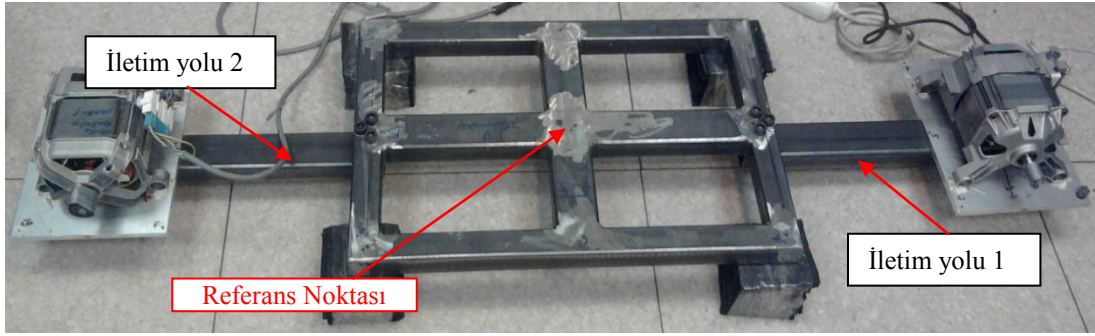
Durum	Sinyal Tipi	Sarsıcı 1		Sarsıcı 2	
		Frekans(Hz)	Seviye(V)	Frekans(Hz)	Seviye(V)
Durum 1	Beyaz Gürültü	0-4096	1.5	0-4096	1.2
Durum 2	Beyaz Gürültü	0-4096	1.4	0-4096	1.1
Durum 3	Beyaz Gürültü	0-4096	1.3	0-4096	1.0
Durum 4	Beyaz Gürültü	0-4096	1.2	0-4096	0.9
Durum 5	Beyaz Gürültü	0-4096	1.1	0-4096	0.8
Durum 6	Beyaz Gürültü	0-4096	1.0	0-4096	0.7
Durum 7	Beyaz Gürültü	0-4096	0.9	0-4096	0.6
Durum 8	Beyaz Gürültü	0-4096	0.8	0-4096	0.5
Durum 9	Beyaz Gürültü	0-4096	0.7	0-4096	0.4
Durum 10	Beyaz Gürültü	0-4096	0.6	0-4096	0.3
Durum 11	Beyaz Gürültü	0-4096	0.5	0-4096	0.2
Durum 12	Beyaz Gürültü	0-4096	0.4	0-4096	0.1

Operasyonel koşullar altında elde edilen verilerinin Fourier dönüşümleri ve spektrumları analizör tarafından test ile eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çıkış sinyalleri için hanning tipi windowing uygulanmış ve operasyonel verilerin spektrumları 0-400 Hz için 0.5 Hz aralıklarla elde edilmiştir.

Bu çalışmada birinci sinyal tipi için tek bir frekansta etki eden kuvvetlerin seçilmesinde, basit ve bilinen operasyonel yükler karşısında operasyonel iletim yolu için yapılan çalışmaların doğruluğunun araştırılması hedeflenmiştir. İkinci sinyal tipinde beyaz gürültü tipi bir sinyal seçilerek, gerçekçi operasyonel yükler karşısında operasyonel iletim yolu analizinin uygulanması amaçlanmıştır. Her iki sinyal tipi içinde çizelge 3.2 ve 3.3’de gösterilen operasyonel çalışma koşulları neticesinde elde edilen operasyonel veriler, hem klasik hem de operasyonel iletim yolu analizi uygulamalarında kullanılmıştır. Bu sayede aynı sistem için klasik ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3 Elastik Takozlar Üzerine Yerleştirilen Test Düzenğinde Yapılan Deneysel Çalışmalar

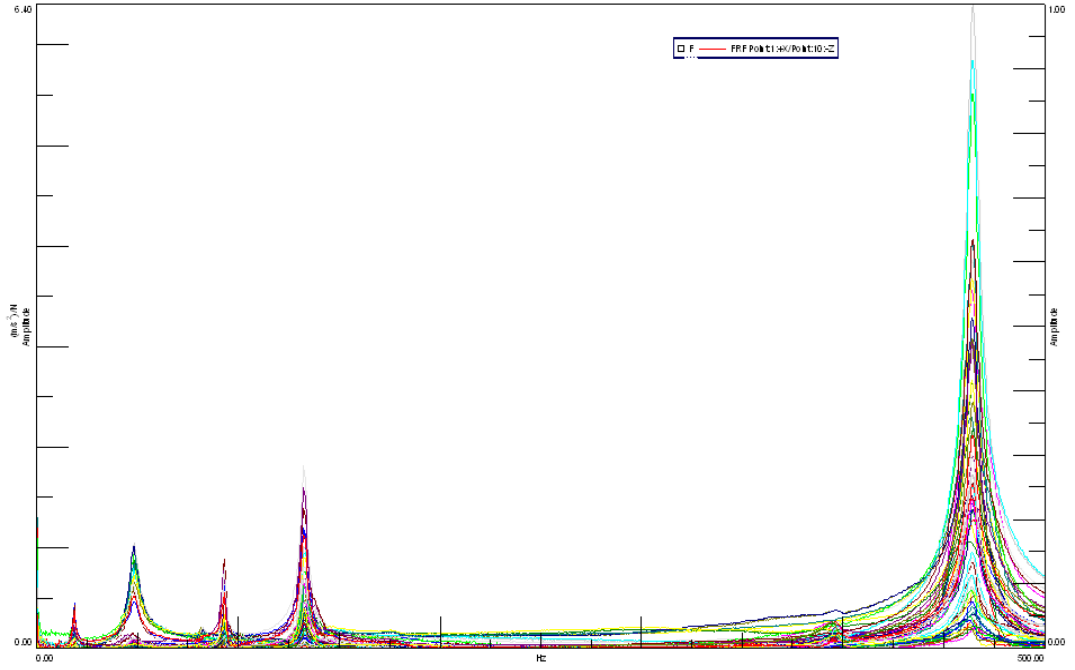
Deneysel bölümdeki çalışmaların ikinci aşamasında, test düzeneği Şekil 3.10'da gösterildiği gibi elastik takozlar üzerine yerleştirilmiştir. Sistemin üzerine etkiyecek operasyonel yüklerin sağlaması amacıyla iki adet elektrik motoru kullanılmıştır. Elektrik motorları bir varyak yardımıyla şartlandırılarak operasyonel iletim yolu analizi için ihtiyaç duyulan farklı koşullandırmalar sağlanmaktadır. Bu sınır koşulları altında operasyonel ve klasik iletim yolu analizi uygulamalarından önce, sistemin sahip olduğu modal parametrelerin belirlenmesi amacıyla, yapı modal çekiş ile tahrik edilmiş ve ortaya çıkan FTF'ler analiz edilerek modal analiz gerçekleştirilmiştir.



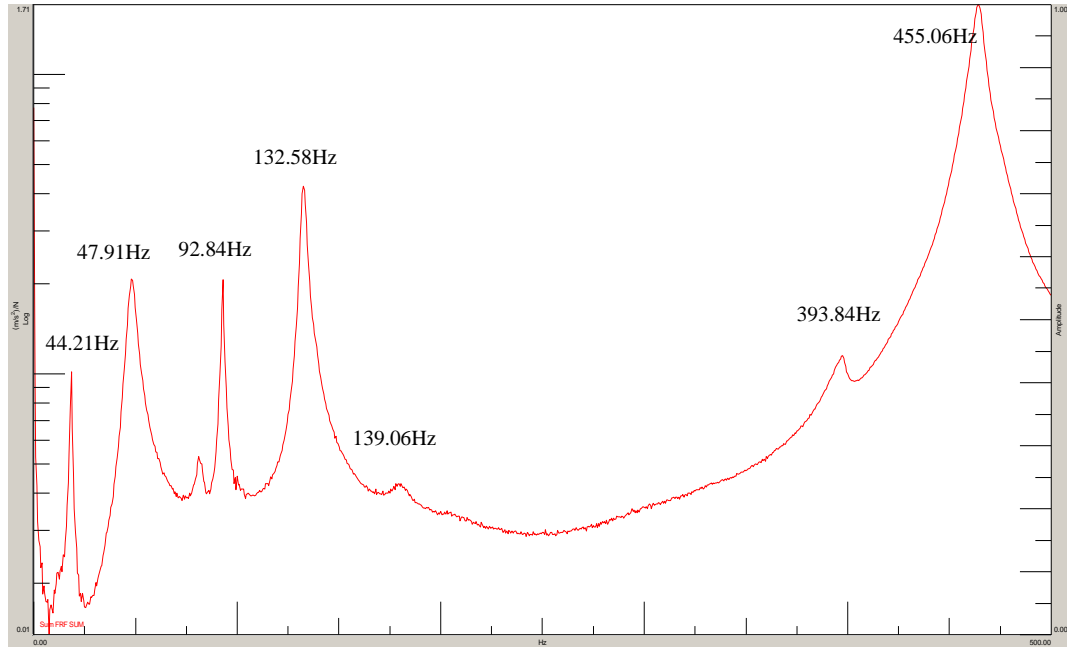
Şekil 3. 12 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilip elektrik motorları ile tahrik edilen test düzeneği.

3.3.1 Modal parametrelerin belirlenmesi

İncelenecek olan sistemin modal parametreleri belirlenmesi işleminde 100mv/g hassasiyete sahip PCB marka 356A32 modelinde iki ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivme ölçerlerin adetinin azlığı sebebiyle, modal analiz esnasında, tüm noktalardan ölçüm alabilmek için ivmeölçerler yapı üzerinde gezdirilmiştir. Serbest-serbest sınır koşulları için yapılan modal analiz çalışmasında olduğu gibi, modal analiz 0-500 Hz aralığında gerçekleştirilmiştir. Giriş sinyali için kuvvet-üstel windowing uygulanırken, çıkış sinyali üzerine üstel windowing uygulanmıştır. Yapı üzerinden ölçülen spektrumların üç defa ortalaması alınarak FTF'ler belirlenmiştir. 0-500Hz aralığında, modal analiz sonucu tüm ölçüm noktalarından elde edilen FTF grafiği ve bu FTF'lerin toplamını gösteren grafik şekil 3.13'de ve şekil3.14'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 13 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için tüm noktalardan alınan FTF grafikleri.



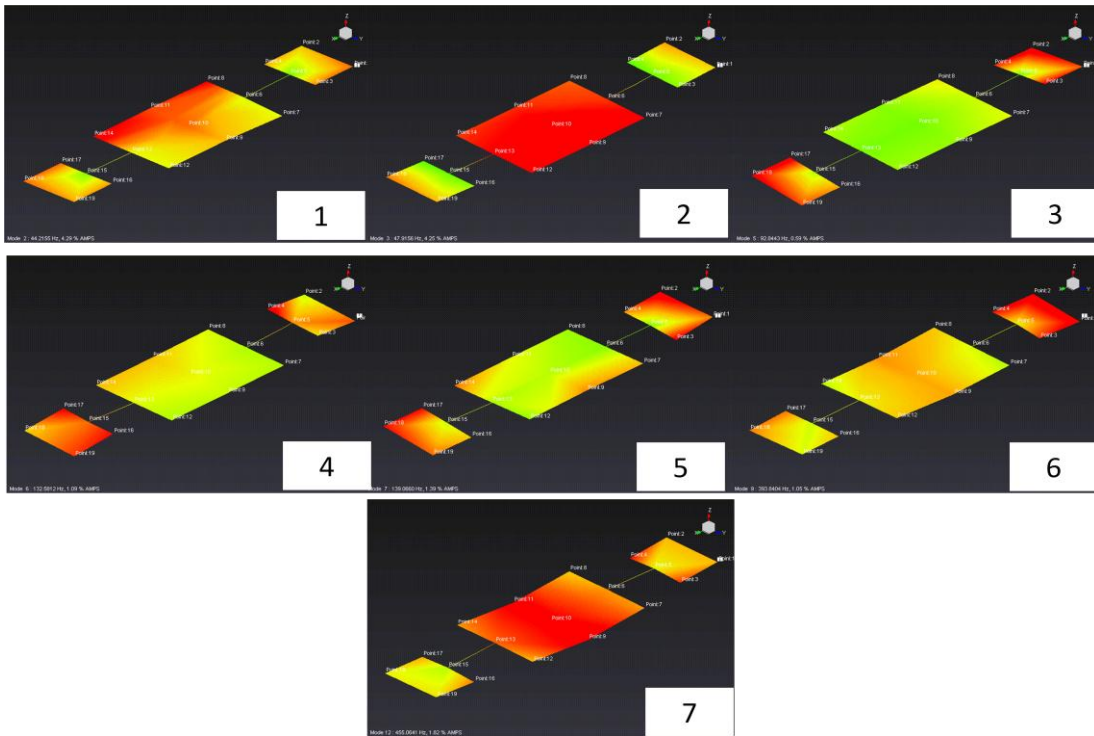
Şekil 3. 14 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için tüm noktalardan alınan FTF grafiklerinin tek bir grafikte toplanmış hali.

Test düzeneğinin 500 Hz'e kadar 7 adet modu mevcuttur ve bu modlar çizelge 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 4 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneğinin 500 Hz'e kadar sahip olduğu doğal frekansları.

Mod Numarası	Frekans(Hz)
1	44.21
2	47.91
3	92.84
4	132.58
5	139.06
6	393.84
7	455.06

Takozlar üzerine yerleştirilmiş test düzeneğinin 500 Hz'e kadar sahip olduğu 7 modun mod şekilleri şekil 3.15 de gösterilmiştir.



Şekil 3. 15 : Takozlar üzerine yerleştirilmiş test düzeneğinin 0-500Hz aralığında sahip olduğu mod şekilleri.

3.3.2 Klasik iletim yolu analizi

Çalışmaların bu aşamasında, serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneğine klasik iletim yolu analizi için uygulanan metotlar aynı şekilde takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneğinin klasik iletim yolu analizi çalışmaları içinde uygulanmıştır.

İlk adımda operasyonel kuvvetlerin hesabında MTD metodunda kullanılması için, iletim yollarının pasif tarafının başlangıç noktası ile sistemin pasif tarafına yerleştirilmiş ivmeölçerler arasındaki transfer matrisleri elde edilmiştir. Şekil 3.16'da

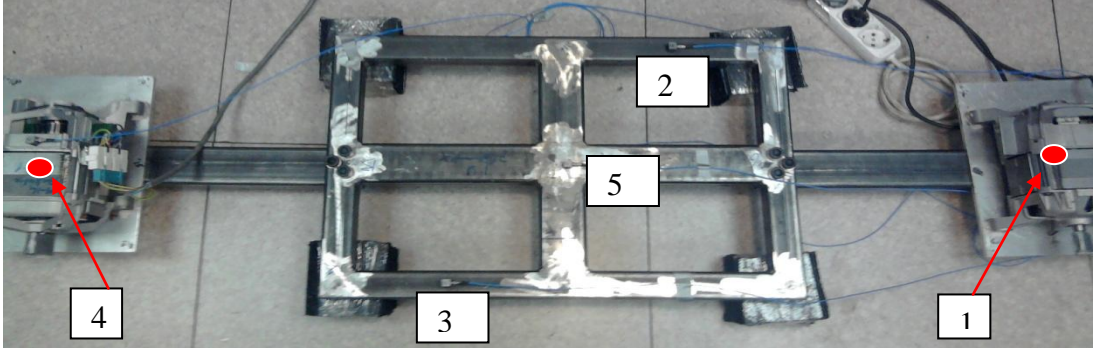
incelenen sistemde, transfer matrislerinin bulunması amacıyla birinci iletim yolu –Z doğrultusunda modal çekiç kullanılarak tahrik edilmesi gösterilmektedir.



Şekil 3. 16 : MTD metodu için iletim yollarında kuvvet tahrikine bağlı olarak ölçülen FTF matrisinin bulunması.

FTF'lerin elde edilmesi için yapılan çalışmalarda, giriş sinyali için kuvvet-üstel windowing uygulanırken çıkış sinyali üzerine üstel windowing uygulanmıştır. MTD metodunun ikinci aşaması olan operasyonel kuvvetlerin elde edilmesi esnasında, yetersiz koşullandırma probleminin meydana gelmemesi için, sistem üzerine eklenen ek gösterge ivme ölçerleri, serbest-serbest sınır koşulları altında yapılan testler için yerleştirilen ve şekil 3.7 de gösterilen ek gösterge ivmeölçerleri ile aynı noktalara yerleştirilmiştir. Operasyonel çalışma koşulları altında yapılan testlerde 10mv/g hassasiyete sahip PCB marka 356B21 modelinde ki ivmeölçerler kullanılmıştır. Operasyonel ivme verilerinin toplanması esnasında kullanılan ivmeölçerlerin sistem üzerindeki lokasyonları şekil 3.17'de gösterilmektedir. Şekil 3.17'de birinci ve ikinci iletim yollarına yerleştirilen, bir ve dört numaralı ivmeölçerler test düzeneğinin alt kısmında kaldığı ve resimde görünemedikleri için kırmızı noktalar ile işaretlenmiştir. Şekilde gösterilen iki ve üç numaralı ivmeölçerler MTD metodunun uygulaması esnasında analizin yetersiz koşullandırma problemi ile karşılaşmaması için yerleştirilen ek gösterge ivmeölçerleridir. Beş numaralı ivmeölçer ise referans sinyali için yerleştirilen ivmeölçerdir.

İncelenecek operasyonel çalışma koşulları, sistemin aktif tarafını oluşturan elektrik motorlarının çalıştırılması ile sistem tahrik edilerek oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerinde birinci iletim yoluna etkiyen elektrik motoru “Motor 1”, ikinci iletim yoluna etkiyen elektrik motoru “Motor 2” olarak adlandırılacaktır.



Şekil 3. 17 : Operasyonel ivme verilerinin ölçümü için kullanılan ivmeölçerlerin test düzeneği üzerindeki yerleşimi.

Sistem üzerine etkileyen operasyonel titreşim seviyelerinin daha belirgin hale gelmesi için motor 1 motor 2'nin rotorlarının uçlarına, 1g'lik ek ağırlıklar bağlanmıştır. Sistemi tahrik edecek operasyonel çalışma koşulları, elektrik motorlarının kapasitesi ve aynı koşulların operasyonel iletim yolu analizinde de kullanılacak olması göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

Test düzeneği üzerinde yapılan klasik iletim yolu analizinin bir sonraki aşamasında, deney düzeneğinin birinci ve ikinci iletim yolları ile referans noktası arasında ki transfer fonksiyonları hesap edilmiştir. Deneysel uygulamanın bu aşamada sistemin aktif tarafını oluşturan elektrik motorları her bir iletim yolu için ayrı ayrı sistemden ayrıldıktan sonra, iletim yolları modal çekiç kullanılarak tahrik edilerek, iletim yolları ile referans noktası arasında ki transfer fonksiyonları elde edilir.

3.3.3 Operasyonel iletim yolu analizi

Çalışmanın bu aşamasında klasik iletim yolu analizi uygulanan deney düzeneği üzerinde, operasyonel iletim yolu analizi uygulaması yapılmıştır. Operasyonel çalışma koşulları motor 1 ve motor 2'nin farklı hızlarda döndürülmesi sonucu oluşan titreşimlerin, sistemi tahrik etmesi sonucu elde edilmiştir. Operasyonel iletim yolu analizinin gerçekleşebilmesi için gerekli, bir birinden farklı on iki operasyonel çalışma koşulu bir varyak yardımıyla elektrik motorlarına gönderilen elektrik gücünün artırılması suretiyle farklı çalışma koşullarının oluşturulması sonucu elde edilmiştir.

Operasyonel koşullar altında elde edilen verilerin Fourier dönüşümleri ve spektrumlarının hesap edilmesi analizöre test ile eş zamanlı olarak hesaplatılmıştır. Çıkış sinyalleri için hanning tipi windowing uygulanmış ve operasyonel veriler 0-400 Hz için 0.5 Hz aralıklarla elde edilmiştir.

Bir birinde farklı operasyonel çalışma koşulları için elde edilen operasyonel veriler, hem klasik hem de operasyonel iletim yolu analizi uygulamalarında kullanılmıştır. Bu sayede aynı sistem için klasik ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4. İLETİM YOLU ANALİZLERİ UYGULAMALARI İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

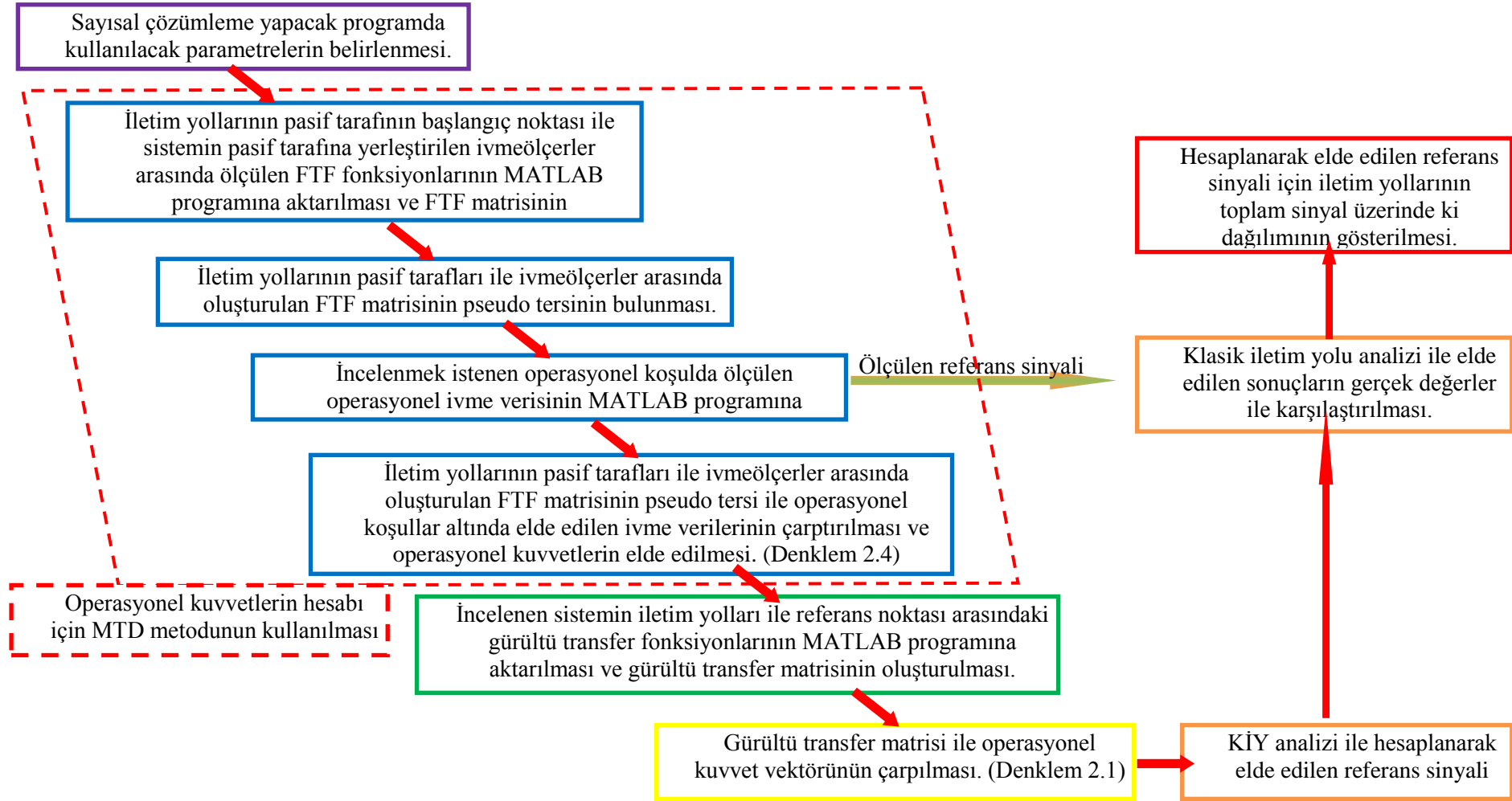
Bu bölümde, klasik ve operasyonel iletim yolu analizleri için testlerde elde edilen veriler kullanılarak, incelenen sistem ve operasyonel koşul için klasik ve operasyonel iletim yolu analizlerini gerçekleştiren, sayısal çözücü program tanıtılmıştır.

4.1 Klasik İletim Yolu Analizi İçin Sayısal Çözücünün Programlanması

Çalışmaların bu bölümünde, klasik iletim yolu analizinde sayısal çözümleme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için, MATLAB programı kullanılarak oluşturulan program anlatılmaktadır. Test düzeneğinin, serbest-serbest ve elastik takozlar üzerindeki farklı sınır şartlarında ve her operasyonel çalışma koşulu için, sayısal çözümleme işlemlerinde aynı program kullanılmıştır. Bu sayede sayısal çözümlemeyi sağlayan programın doğruluğu test edilmiştir. Klasik iletim yolu analizinde sayısal çözümleme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için oluşturulmuş sayısal çözücü programın akış diyagramı şekil 4.1’de gösterilmektedir.

Akış diyagramından da anlaşılacağı gibi, klasik iletim yolu analizi uygulaması için, oluşturulan sayısal çözücü programın ilk aşamasında, çözümlemenin gerçekleşmesi için gerekli olan parametreler programa girilmektedir. Bu parametreler incelenen sistemde kaç adet iletim yolu olduğu, incelenecek frekans aralığı ve frekans çözünürlüğüdür.

Bir sonraki aşama, MTD metodu ile operasyonel kuvvetlerin elde edilmesi aşamasıdır. İletim yollarının pasif tarafları ile ivmeölçerler arasında oluşturulan frekans tepki fonksiyonları programa okutulur ve daha sonrasında tüm iletim yollarının doğrultuları için bu fonksiyonlar birleştirilerek tek bir FTF matrisi elde edilir. Denklem 2.4’den de anlaşılacağı gibi operasyonel kuvvetlerin elde edilmesi için FTF matrisinin pseudo tersi ile operasyonel ivme verilerinin çarpılması gerekmektedir.



Şekil 4. 1 : Klasik iletim yolu analizi için oluşturulan sayısal çözücü programın akış şeması.

FTF matrisinin pseudo tersi elde edildikten sonra, operasyonel çalışma koşulları altında ölçülen, operasyonel ivme verileri programa okutulur. Bu aşamada operasyonel çalışma koşullarında referans noktasından alınan operasyonel ivme verisi, programın en son işlemi olan ölçüm değerleri ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması için ayrı bir matrisin içersine yazdırılır.

Bir sonraki aşamada operasyonel ivme verileri ile FTF matrisinin pseudo tersi ile çarpılarak incelenen frekans aralığında operasyonel kuvvetler elde edilmektedir.

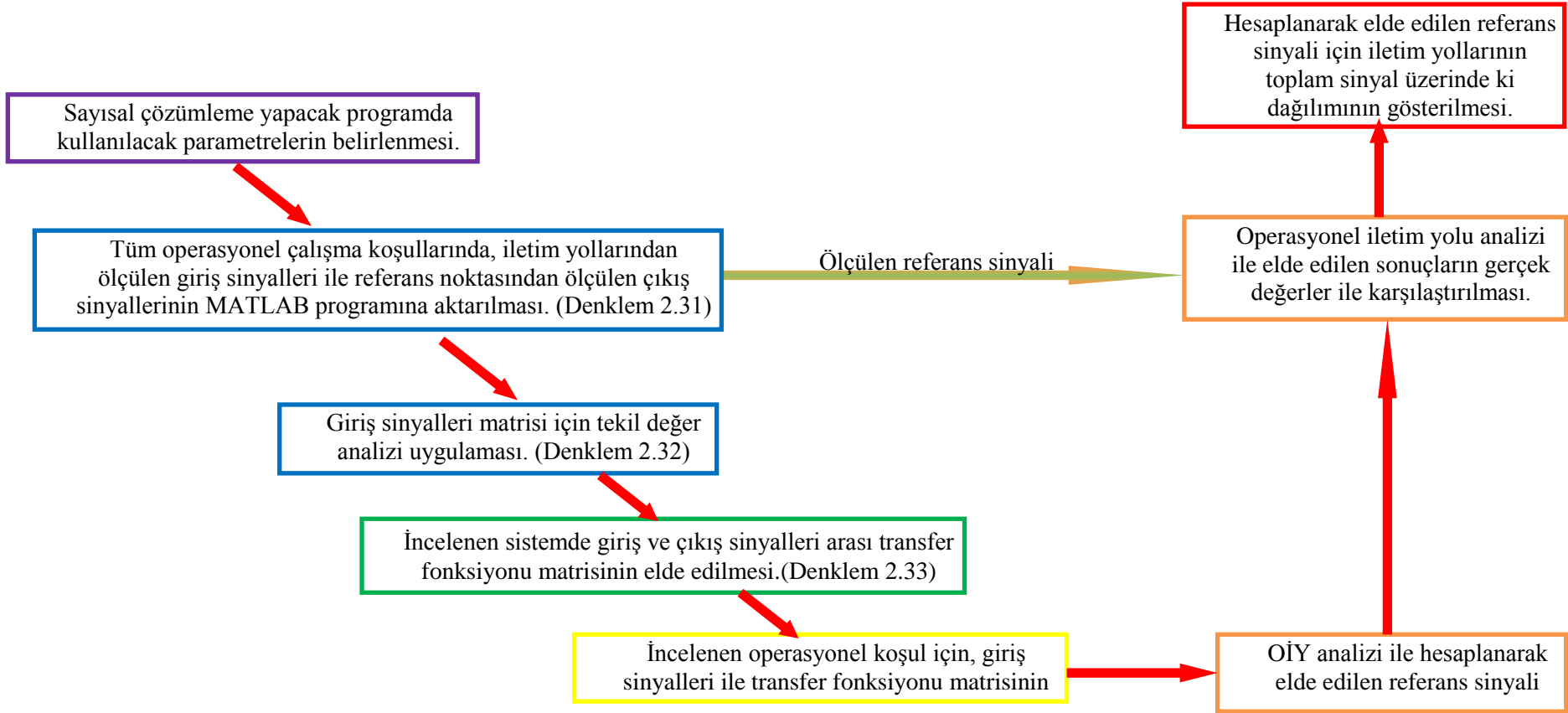
MTD metodu ile operasyonel kuvvetler elde edildikten sonra denklem 2.1'de gösterildiği gibi hesaplanan referans sinyalinin elde edilmesi için, gürültü transfer fonksiyonu matrisi ile operasyonel kuvvetler çarpılmalıdır. Bu aşamada her iletim yolu için ayrı ayrı bulunan gürültü transfer fonksiyonları programa okutulup birleştirildikten sonra tek bir transfer fonksiyonu matrisi elde edilir. Bu matris incelenen frekans aralığında operasyonel kuvvetler ile çarpılarak, referans sinyali elde edilir.

Bir sonraki aşamada hesaplanarak elde edilen referans sinyali ile operasyonel çalışma koşulları altında toplanan referans sinyali üst üste çizdirilmesi suretiyle karşılaştırılarak, klasik iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçların doğruluğu incelenir.

Son aşamada analiz sonucu elde edilen referans sinyali için iletim yollarının toplam sinyal üzerindeki dağılımı gösterilir, bu sayede iletim yolu analizlerinin amacı olan, referans sinyali üzerinde hangi iletim yolunun katkısının daha fazla olduğu gösterilir.

4.2 Operasyonel İletim Yolu Analizi İçin Sayısal Çözücünün Programlanması

Klasik iletim yolu analizi için yapılan çalışmalara benzer şekilde, operasyonel iletim yolu analizleri için sayısal çözümlemede kullanılacak program MATLAB programı kullanılarak elde edilmiştir. Operasyonel iletim yolu analizi için yazılan program, test düzeneğinin tüm sınır şartları ve operasyonel çalışma koşullarında elde edilen sinyaller için kullanılmış, bu sayede sayısal çözümlemeyi yapan programın doğruluğu test edilmiştir. Operasyonel iletim yolu analizinde sayısal çözümleme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için oluşturulmuş sayısal çözücü programın akış diyagramı şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 2 : Operasyonel iletim yolu analizi için oluşturulan sayısal çözücü programın akış şeması.

Klasik iletim yolu analizinde olduğu gibi, operasyonel iletim yolu analizi için oluşturulan sayısal çözücü programın ilk aşamasında, çözümlemenin gerçekleşmesi için gerekli olan parametreler programa girilmektedir. Bu parametreler incelenen sistemde kaç adet iletim yolu olduğu, incelenecek frekans aralığı, frekans çözünürlüğüdür ve kaç farklı operasyonel koşulun incelendiğidir.

Operasyonel iletim yolu analizinin yetersiz koşullandırma probleminden etkilenmemesi amacıyla, sistemin sahip olduğu iletim yollarının toplam doğrultu sayısının iki katı kadar farklı operasyonel çalışma koşulu altında ölçümler alınmalıdır. Sayısal çözücü programın ikinci aşamasında farklı operasyonel koşullarda toplanan bu giriş sinyalleri tek bir giriş sinyali matrisi altına toplanır. Aynı işlem çıkış sinyalleri içinde gerçekleştirilir.

Bir sonraki işlemde giriş sinyalleri matrisi için tekil değer analizi uygulanır. Tekil değer analizi sonucu giriş sinyali matrisi, iki adet tekil matrisin ve giriş sinyali matrisinin tekil değerlerinden oluşan diyagonal S matrisinin çarpımı olarak ifade edilir. İncelenen her bir frekans aralığında, S matrisinin ilk elemanına göre belirli bir toleransın altında ki değerlere sahip S matrisinin diğer elemanları, gürültü ya da diğer bozucu etmenler nedeniyle oluşmuştur ve hesaplamalardan çıkarılması gerekmektedir [7,8]. Tekil değer analizinde kullanılacak bu tolerans değeri, bu aşamada programa girilmektedir.

Dördüncü aşamada tekil değer analizi uygulanarak yeniden ifade edilen giriş sinyali matrisinin tersi alınarak denklem 2.33'de gösterildiği gibi çıkış sinyalleri matrisi ile çarpılır. Bu sayede, sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasında ki transfer fonksiyonu elde edilir.

Beşinci aşamada, sistemin transfer fonksiyonu incelenen operasyonel koşullarda ölçülen giriş sinyalleri ile çarpılarak, hesaplanarak elde edilen referans sinyali oluşturulur.

Bu aşamadan sonra operasyonel iletim yolu analizi ile hesaplanarak elde edilen referans sinyali, incelenen operasyonel çalışma koşullarında ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali karşılaştırılarak, operasyonel iletim yolu analizi sonuçlarının doğruluğu incelenir.

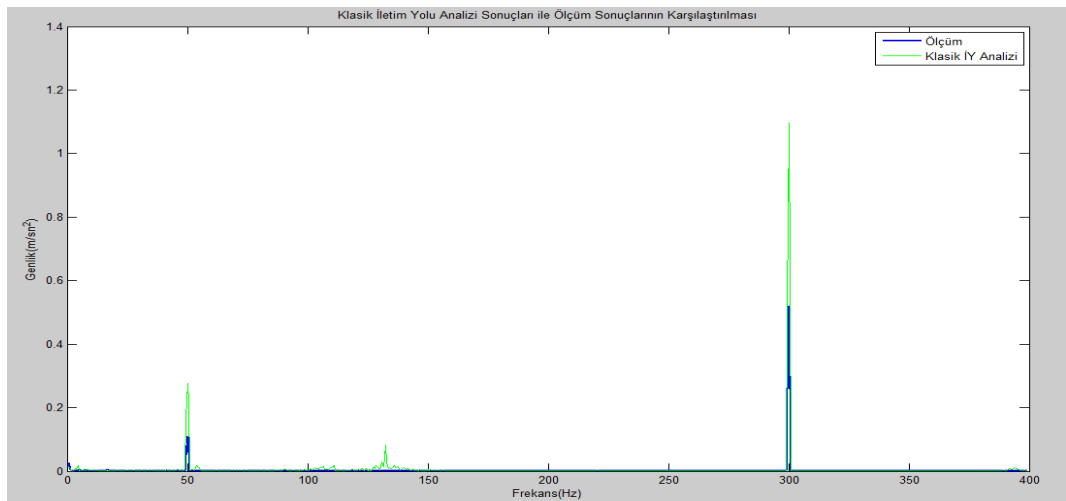
Son aşamada analiz sonucu elde edilen referans sinyali için iletim yollarının toplam sinyal üzerindeki dağılımı bulunur, bu sayede iletim yolu analizlerinin amacı olan, referans sinyali üzerinde hangi iletim yolunun katkısının daha fazla olduğu gösterilir.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1 Klasik İletim Yolu Analizi Uygulaması İle Elde Edilen Sonuçlar

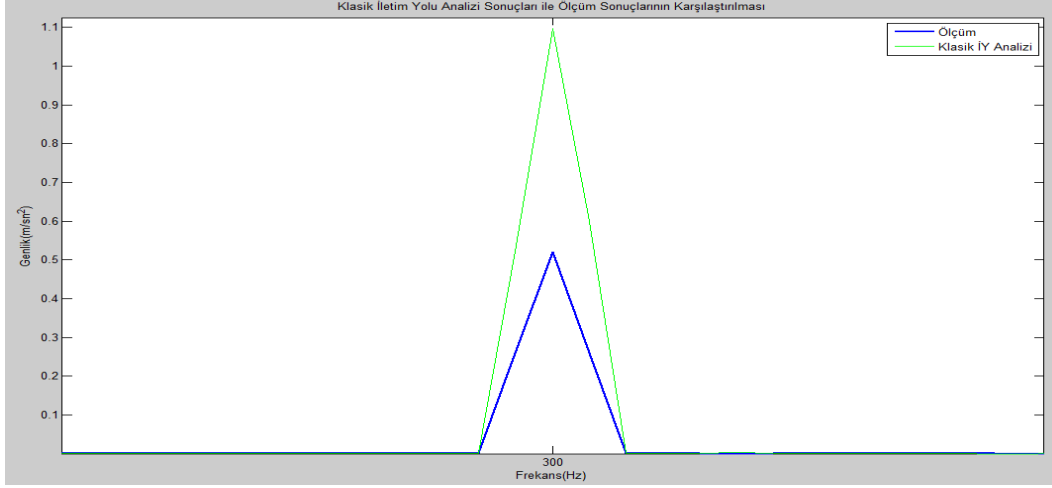
5.1.1 Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için elde edilen sonuçlar

Serbest-serbest sınır koşullarına sahip olan test düzeneğine, çizelge 3.2 ve 3.3'de belirtilen tüm operasyonel çalışma koşulları için klasik iletim yolu analizi uygulanmıştır. Bu bölümde gösterim kolaylığı olması açısından tüm sonuçlar yerine, çizelge 3.2'de gösterilen durum 4 ve çizelge 3.3'de gösterilen durum 6 operasyonel çalışma koşulları için klasik iletim yolu analizi çalışmasının sonuçları gösterilmektedir. İlk etapta, tek bir frekansta sistemi tahrik eden durum 4 operasyonel çalışma koşulu için yapılan klasik iletim yolu analizi incelenmektedir. Durum 4 operasyonel çalışma koşulunda, incelenen sisteme sarsıcı 1 ve sarsıcı 2 tarafından $-Z$ yönünde sabit 300 Hz frekansında sinüs dalgası verilmekte olup, sarsıcı 1 tarafından, sarsıcı 2 'ye göre sisteme daha yüksek genlikte titreşim sinyali gönderilmektedir. Şekil 5.1'de durum 4 operasyonel koşulu için klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması gösterilmektedir.



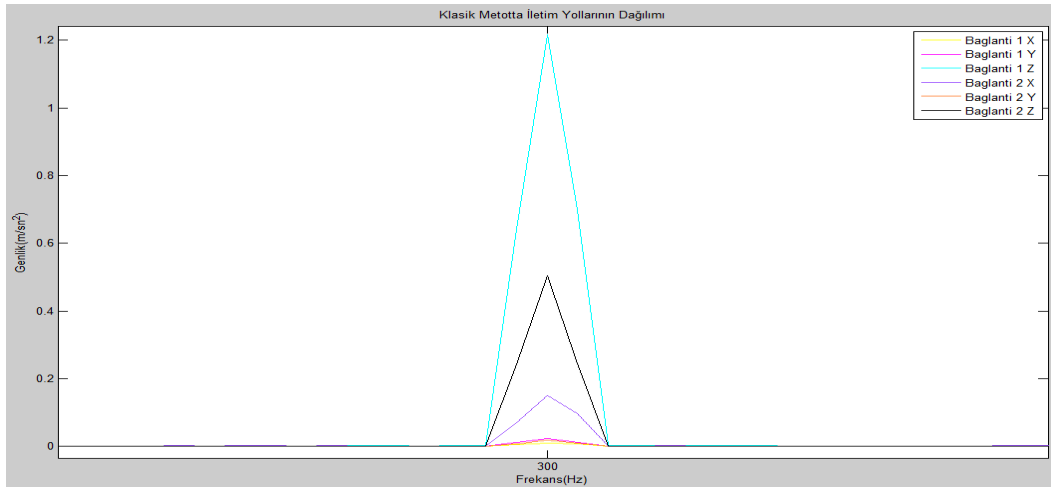
Şekil 5. 1 : Çizelge 3.2'de belirtilen durum 4 operasyonel çalışma koşulları için KİY analizi ile elde edilen sonuçlarının, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.

Şekil 5.1 de 50 Hz de görülmekte olan tepe noktası şebeke frekansından kaynaklanmakta olup, analiz sonuçlarının ölçüm sonuçları ile kıyaslanmasında dikkate alınmamalıdır. Klasik iletim yolu analizi kullanılarak hesaplanan referans sinyalinin, ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile farkının daha net görülebilmesi için, Şekil 5.2’de 300 Hz tahrik frekansında görülen tepe noktası daha yakından incelenmektedir.



Şekil 5. 2 : Durum 4 operasyonel koşulu için KİY analizi ile ölçüm sonuçlarının tahrik frekansı çevresinde karşılaştırılması.

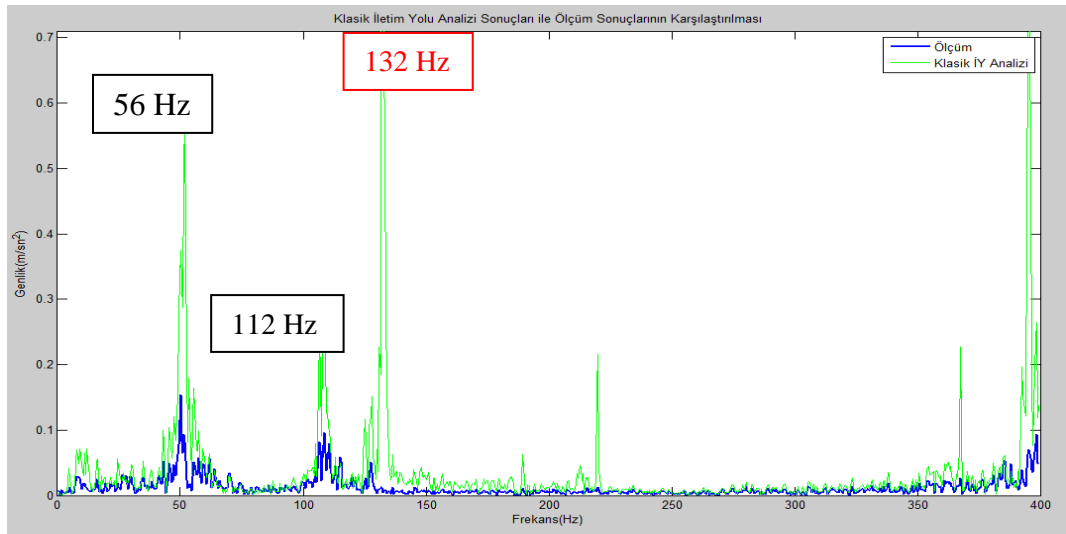
Şekil 5.2’den anlaşıldığı gibi klasik iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar, ölçüm sonuçları ile özellikle 300 Hz’de ki tepe noktasının genliği açısından, farklılık göstermektedir. Yapılan klasik iletim yolu analizi sayesinde, durum 4 operasyonel çalışma koşulu için, referans sinyali üzerinde hangi iletim yolunun katkısının daha baskın olduğu ortaya çıkarılmıştır. İncelenen tahrik frekansında, toplam referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımı şekil 5.3’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 3 : Durum 4 operasyonel koşulu için incelenen 300Hz tahrik frekansında iletim yollarının katkısı.

Çizelge 3.2’den de anlaşılacağı gibi, sarsıcı 1 sarsıcı 2’ye göre daha yüksek genlikte sistemi –Z yönünde tahrik etmektedir. Bu operasyonel koşullar altında, birbiri ile aynı yapıda iki iletim yoluna sahip test düzeneğinde, birinci iletim yolunun Z yönünün, toplam referans sinyali üzerindeki katkısının daha baskın olması beklenmektedir. Klasik iletim yolu analizi aynı doğrultuda sonuçlar vermekte olup, bu operasyonel koşullarda birinci iletim yolunun Z yönünün toplam referans sinyali üzerinde daha baskın olduğunu göstermektedir.

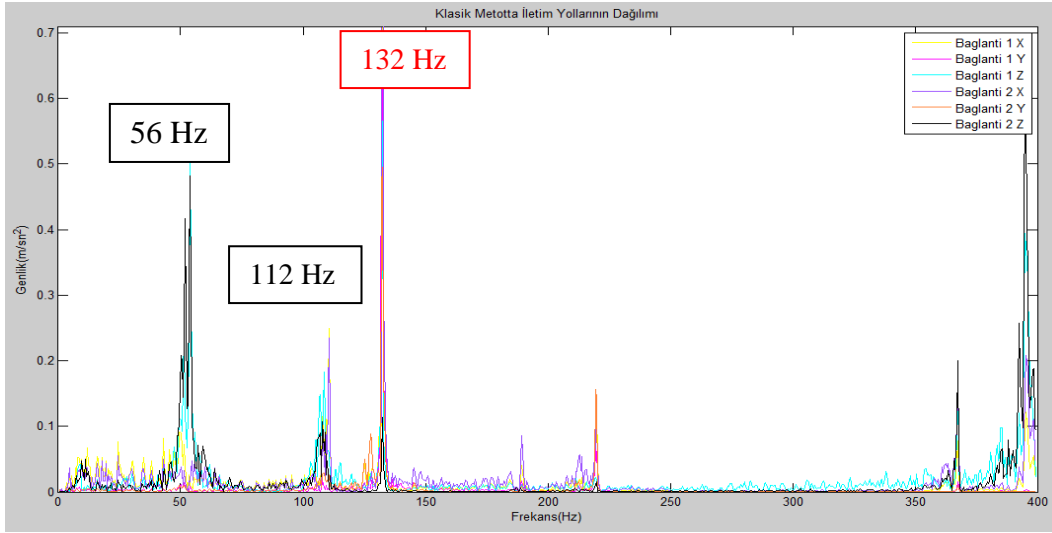
Bu bölümün ikinci aşamasında, çizelge 3.3’de gösterilen durum 6 operasyonel koşulu için uygulanan klasik iletim yolu analizi sonuçları gösterilmektedir. Durum 6 operasyonel çalışma koşulunda incelenen sistem, sarsıcılar tarafından beyaz gürültü tipi sinyal ile tahrik edilmekte olup, sarsıcı 1 sarsıcı 2 ‘ye göre, sisteme daha yüksek genlikte titreşim sinyali göndermektedir. Şekil 5.4’de durum 6 operasyonel koşulu için klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali karşılaştırması gösterilmektedir



Şekil 5. 4 : Çizelge 3.3’de belirtilen durum 6 operasyonel çalışma koşulu için KİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.

Şekil 5.4’de işaretlenmiş olan tepe noktaları, incelenen test düzeneğinin sahip olduğu ve şekil 3.5’de gösterilen, sırasıyla 56Hz, 112Hz ve 132Hz frekanslarında bulunan modlardır. 132Hz frekansında klasik iletim yolu analizi hatalı sonuçlar elde ederek, bu frekansta gerçek referans sinyalinde var olmayan bir tepe noktası göstermektedir. Ayrıca klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali, özellikle tepe noktalarında gerçek sinyalden farklılaşarak, hatalı olarak yüksek genlikler göstermektedir.

Yapılan klasik iletim yolu analizi sonucunda, durum 6 operasyonel çalışma koşulu için oluşturulan referans sinyali üzerinde hangi iletim yolunun katkısının daha baskın olduğu ortaya çıkarılmıştır. Toplam referans sinyali üzerinde, iletim yollarının katkısının dağılımı şekil 5.5’de gösterilmektedir.



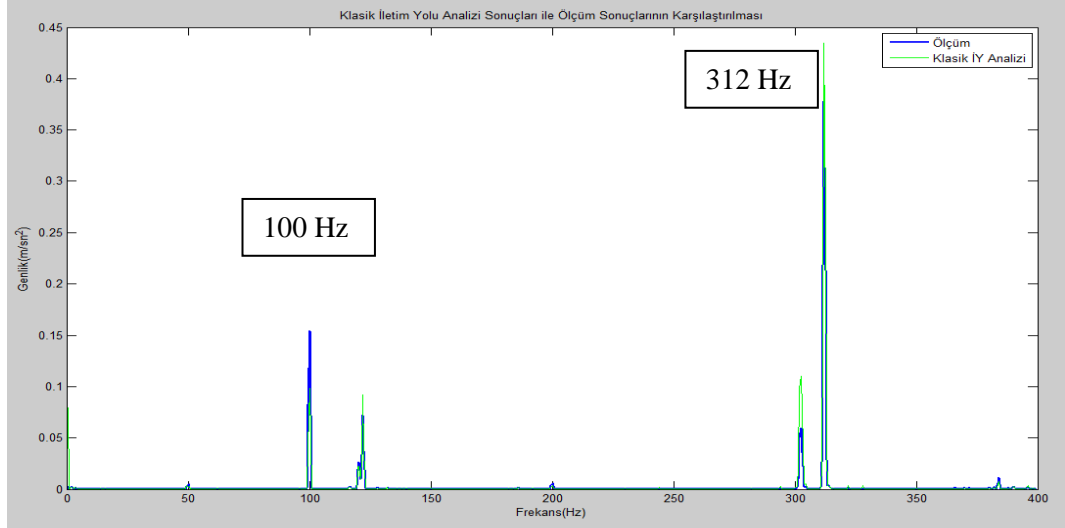
Şekil 5.5 : İncelenen operasyonel koşul için iletim yollarının katkısı.

56Hz ve 112Hz frekanslarında sistemin sahip olduğu modlar Z doğrultusunda hareket eden mod şekillerine sahiptir. Klasik iletim yolu analizi ile elde edilen dağılım grafiğinde ki sonuçlar incelendiğinde, 56Hz ve 112Hz civarlarında beklenildiği gibi, iletim yollarının Z yönlerindeki dağılımının, diğer yönlere göre daha baskın olduğu görülmektedir.

5.1.2 Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için elde edilen sonuçlar

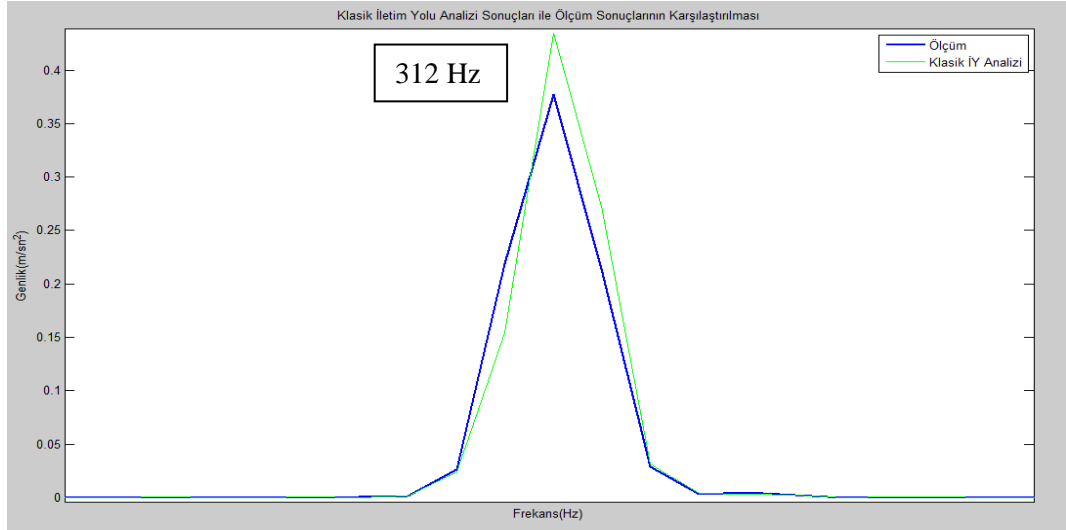
Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sisteme, on iki farklı operasyonel çalışma koşulu için klasik iletim yolu analizi uygulanmıştır. Bu bölümde, seçilen bir operasyonel çalışma koşulu için yapılan klasik iletim yolu analizi sonuçları incelenmektedir. Şekil 5.6’da, incelenen operasyonel çalışma koşulu için klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırması gösterilmektedir.

Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için operasyonel çalışma koşulları, sistemi tahrik eden elektrik motorlarının her operasyonel koşul için farklı, sabit dönme hızları ile 10 saniyelik alınan ölçümler sonucu oluşturulmuştur. Bu durumun sonucu olarak, her operasyonel çalışma koşulunda farklı olacak biçimde, incelenen frekans aralığında sistemi tahrik eden bir baskın frekans oluşmaktadır.



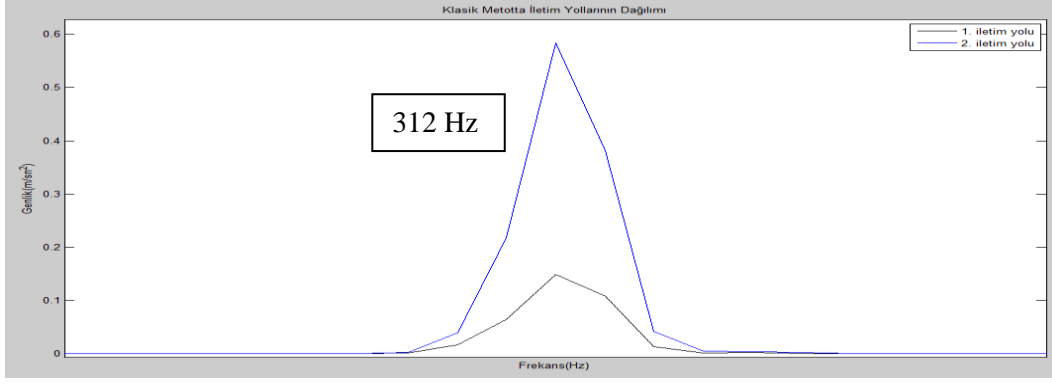
Şekil 5. 6 : Elastik takozlar üzerindeki sistemin incelenen operasyonel çalışma koşullarında KİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile karşılaştırılması.

İncelenen operasyonel koşulda 100Hz ve 312 Hz frekansları, sistemi en baskın şekilde tahrik eden frekanslar olmaktadır. KİY analizi ile hesaplanan referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali karşılaştırmasının net görülebilmesi için, Şekil 5.7’de en baskın tahrik frekansı olan 312Hz’de görülen tepe noktası daha yakından incelenmektedir.



Şekil 5. 7 : Elastik takozlar üzerindeki sistemin 312 Hz’de KİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.

Klasik iletim yolu analizi ile incelenen operasyonel çalışma koşulları için referans sinyali üzerinde, hangi iletim yolunun katkısının daha baskın olduğu ortaya çıkartılmıştır. İncelenen operasyonel koşulda baskın frekansta, toplam referans sinyali için iletim yollarının katkısının dağılımı şekil 5.8’de gösterilmektedir.



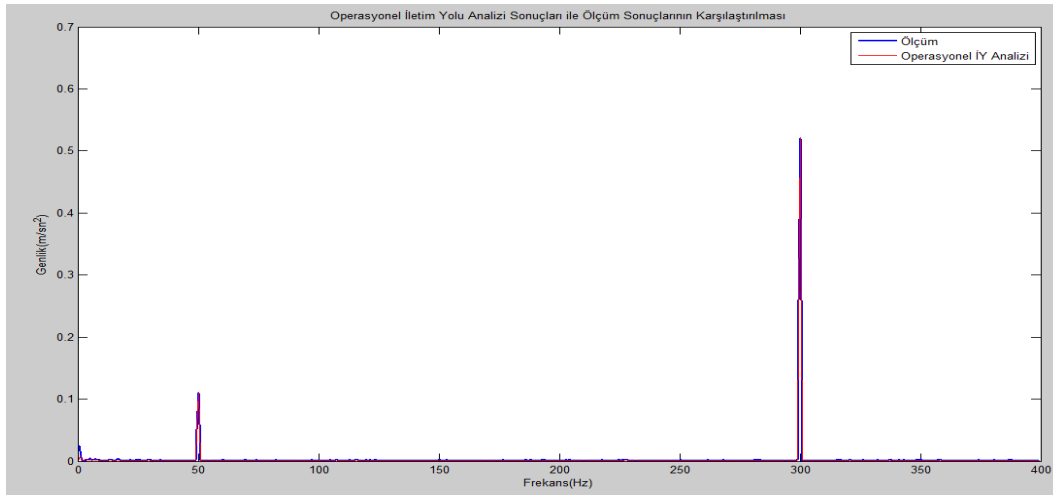
Şekil 5.8 : Elastik takozlar üzerindeki sistemin KİY analizi ile elde edilen, incelenen operasyonel koşullarda toplam referans sinyali üzerinde iletim yollarının etkisinin dağılımı.

Şekil 5.8'den anlaşılacağı gibi 312 Hz'de oluşan tepe noktasında, toplam referans sinyali üzerinde motor 2'nin tahrik ettiği ikinci iletim yolunun etkisi birinci iletim yoluna göre daha baskındır.

5.2 Operasyonel İletim Yolu Analizi Uygulaması İle Elde Edilen Sonuçlar

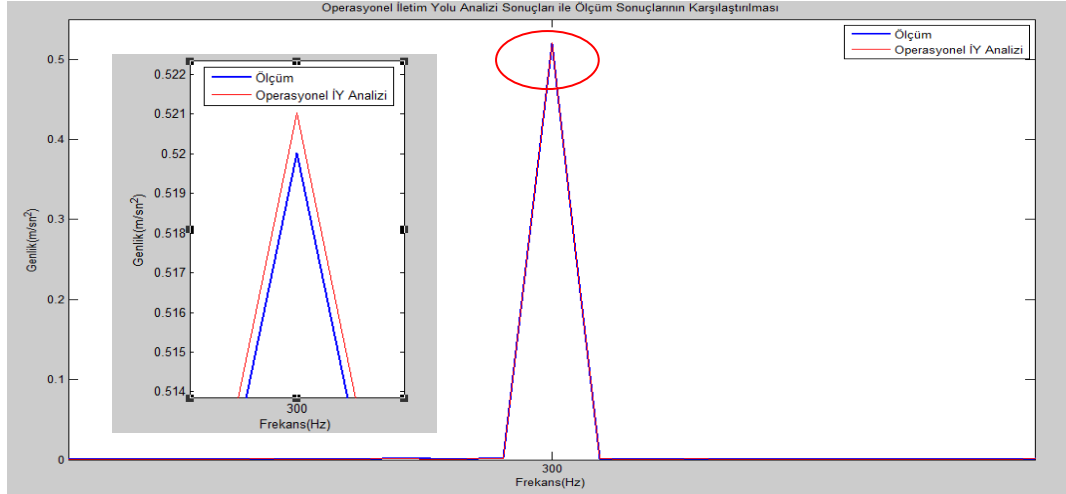
5.2.1 Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için elde edilen sonuçlar

Bu bölümde klasik iletim yolu analizi uygulanan aynı operasyonel koşullar için, operasyonel iletim yolu analizi uygulanması neticesinde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. İlk aşamada çizelge 3.2'de belirtilen durum 4 operasyonel çalışma koşulu için yapılan operasyonel iletim yolu analizi incelenmektedir. Şekil 5.9'da durum 4 operasyonel koşulu için operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırması gösterilmektedir.



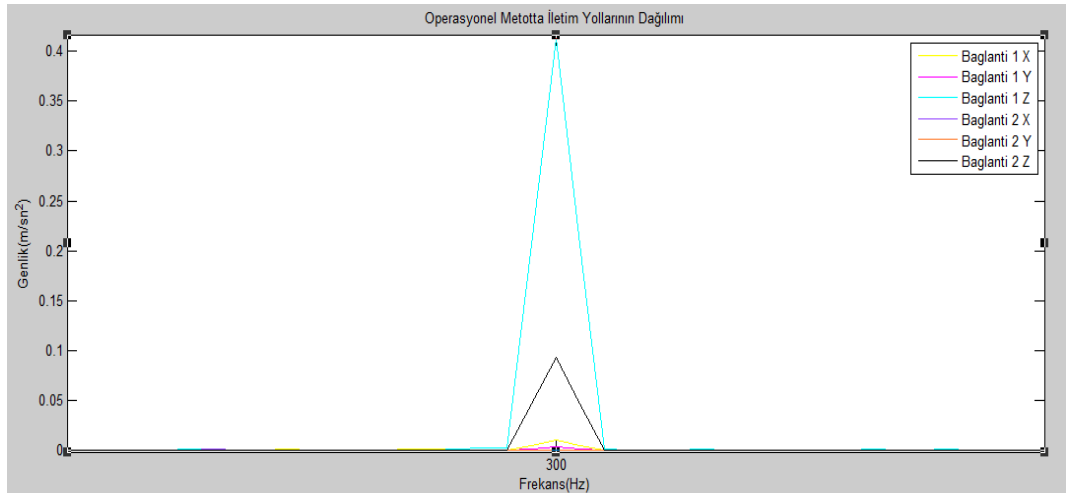
Şekil 5.9 : Çizelge 3.2'de gösterilen durum 4 operasyonel çalışma koşulu için OİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.

Şekil 5.9’da operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlarda görülmekte olan ve şebeke frekansından dolayı oluşan 50Hz’de ki tepe noktası, analiz sonuçlarının ölçüm sonuçları ile kıyaslanmasında dikkate alınmamalıdır. Operasyonel iletim yolu analizi kullanılarak hesaplanan referans sinyalinin, ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile farkını daha net görülebilmesi için, Şekil 5.10’da 300 Hz tahrik frekansında görülen tepe noktası daha yakından incelenmektedir.



Şekil 5. 10 : 300 Hz tahrik frekansında OİY analizi ile elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

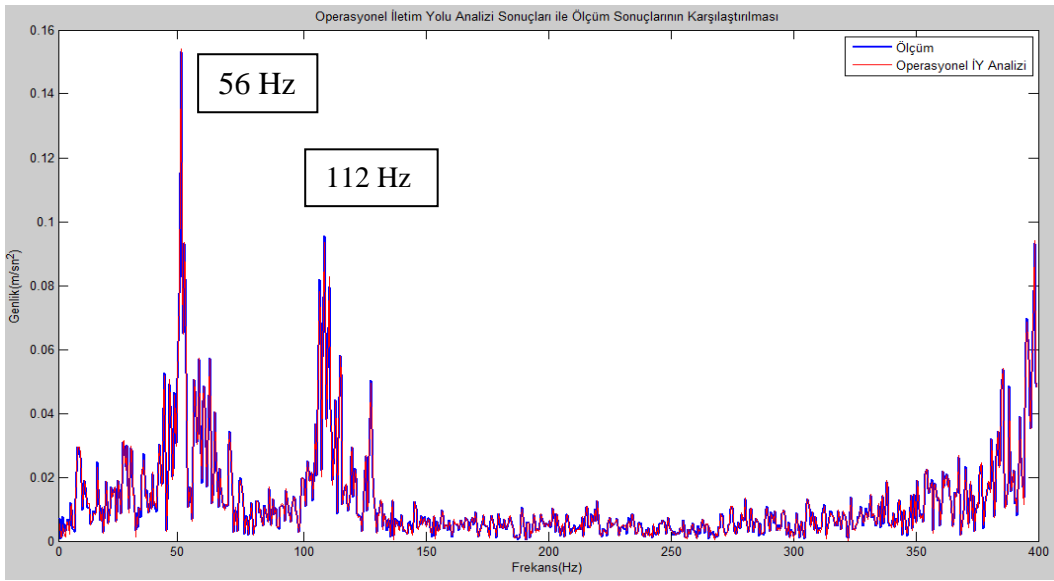
Şekil 5.10’da görüldüğü gibi operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali, ölçüm sonucu ile neredeyse birebir örtüşmektedir. İncelenen tahrik frekansında, toplam referans sinyali üzerinde iletim yollarının etkisinin dağılımı şekil 5.11’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 11 : Durum 4 operasyonel koşulu için OİY analizi ile elde edilen iletim yollarının toplam referans sinyali üzerinde katkısının dağılımı.

Şekil 5.11’de görüldüğü üzere bu operasyonel koşullarda birinci iletim yolunun Z doğrultusunun toplam referans sinyali üzerinde en fazla katkıyı sağlayan iletim yolu olduğu görülmektedir. Bu durum operasyonel koşulun yapısı gereği beklenen bir durumdur.

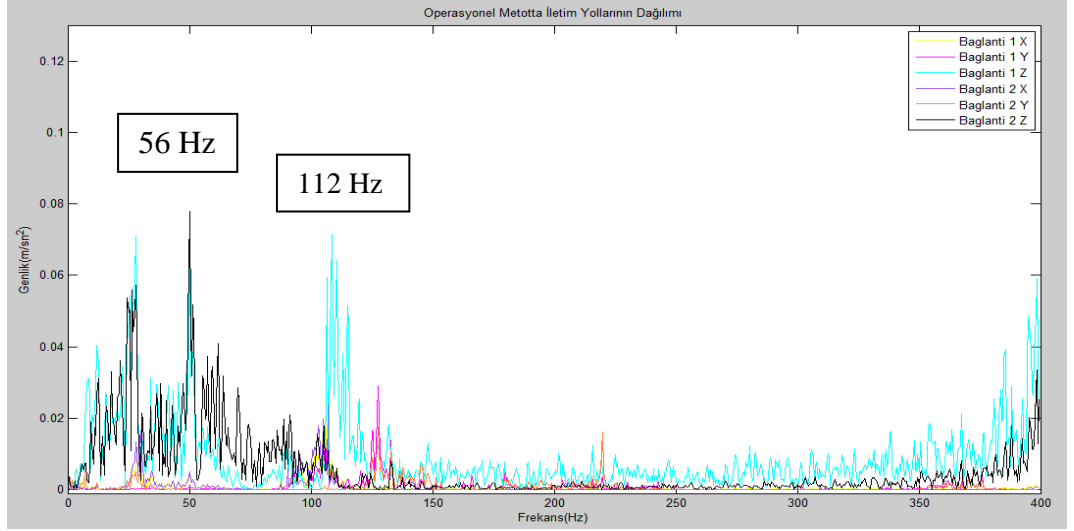
İkinci aşamada, çizelge 3.3’de belirtilen durum 6 operasyonel çalışma koşulu için yapılan operasyonel iletim yolu analizi incelenmektedir. Şekil 5.12’de durum 6 operasyonel koşulu için operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırması gösterilmektedir.



Şekil 5. 12 : Çizelge 3.3’de belirtilen durum 6 operasyonel çalışma koşulları için OİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.

İncelenen tüm operasyonel koşullarda şekil 5.12’de görüldüğü gibi operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali, ölçüm sonuçları ile örtüşmektedir. Operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali üzerinde, iletim yollarının katkısının dağılımı şekil 5.13’de gösterilmektedir.

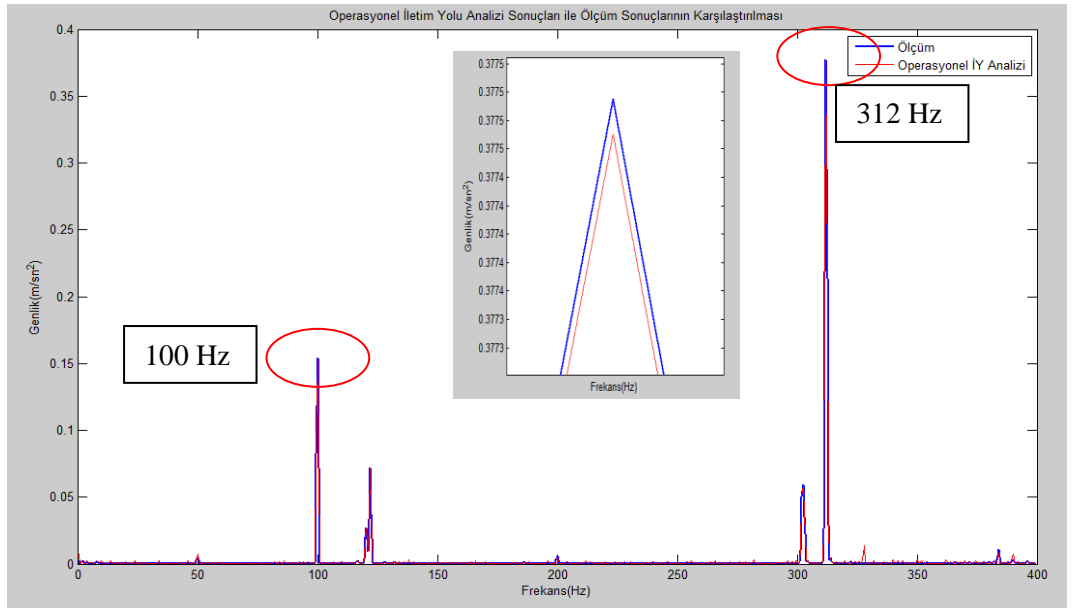
Operasyonel iletim yolu ile elde edilen dağılım grafiği incelendiğinde, 56Hz ve 112Hz civarlarında beklendiği gibi, iletim yollarının Z yönlerindeki dağılımının diğer yönlere göre daha baskın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13 : İncelenen durum 6 operasyonel koşulu için OİY ile elde edilen, iletim yollarının katkısının dağılımı grafiği.

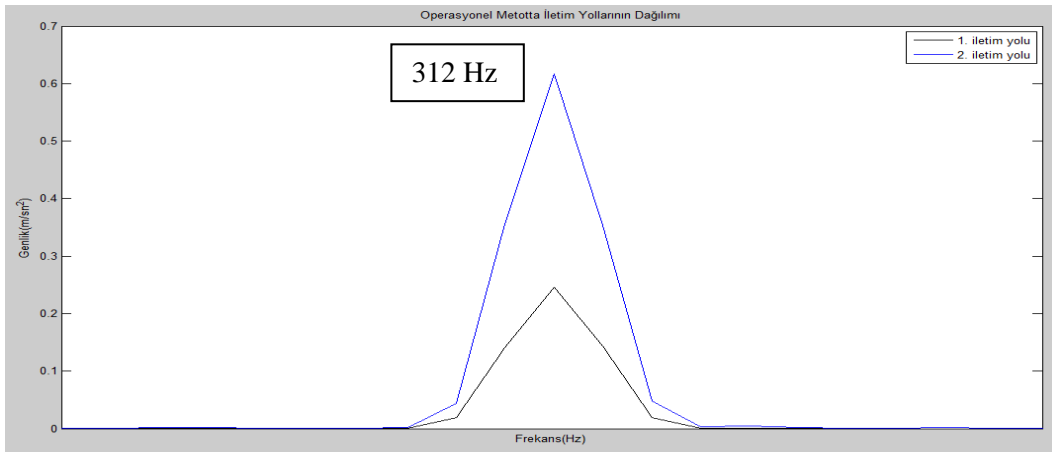
5.2.2 Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için elde edilen sonuçlar

Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için, Klasik iletim yolu analizi uygulanan tüm operasyonel koşullarda, Operasyonel iletim yolu analizi de uygulanmıştır. Bu aşamada klasik iletim yolu analizi uygulanan ve bölüm 5.1.2’de sonuçları gösterilen aynı operasyonel çalışma koşulu için yapılan operasyonel iletim yolu analizi sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.14’de, incelenen operasyonel koşul için operasyonel iletim yolu analizi sonuçları ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali karşılaştırılmaktadır.



Şekil 5.14 : Elastik takozlar üzerindeki sistemde incelenen operasyonel çalışma koşullarında OİY analizi ile elde edilen sonuçların ölçülen referans sinyali ile karşılaştırılması.

Serbest-serbest sınır koşulları için yapılan operasyonel iletim yolu analizi sonuçlarında olduğu gibi, elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için yapılan operasyonel iletim yolu analizlerinde, elde edilen referans sinyali ölçüm sonuçları ile klasik iletim yolu analizi sonuçlarına göre daha iyi örtüşmektedir. Operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen ve incelenen operasyonel koşul için en baskın tahrik frekansı 312Hz'de, iletim yollarının toplam referans sinyaline katkısını gösteren grafik şekil 5.15'de gösterilmektedir.

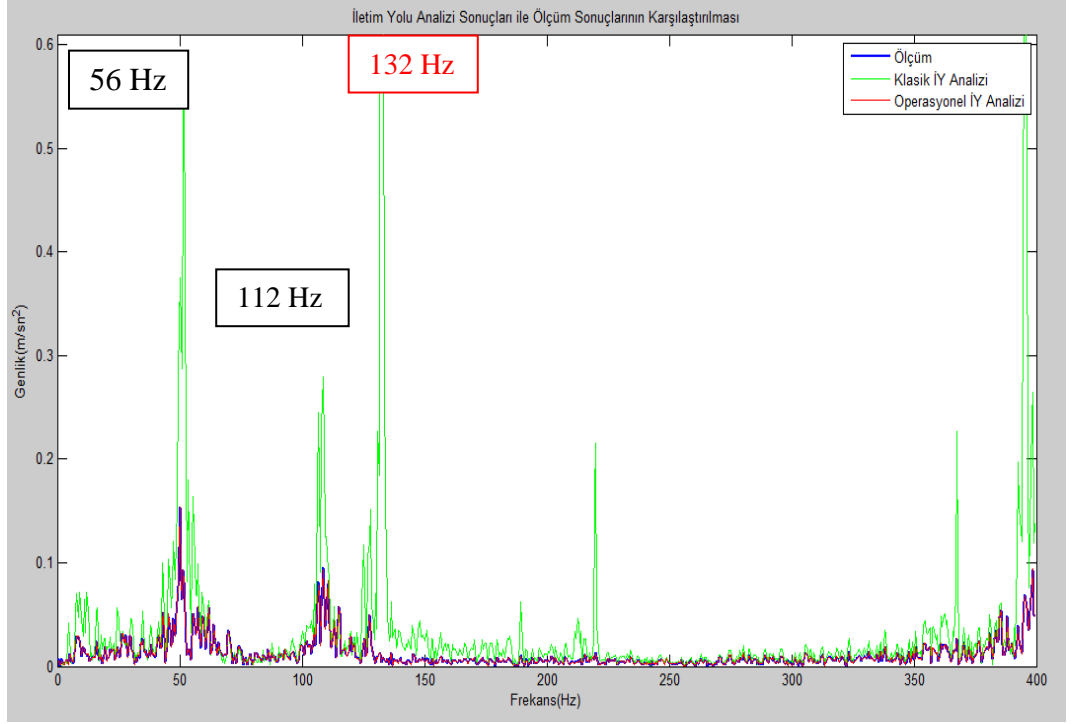


Şekil 5. 15 : Elastik takozlar üzerindeki sistem için, OİY analizi ile elde edilen, incelenen operasyonel koşulda referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımı.

Klasik iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlara benzer şekilde, operasyonel iletim yolu analizi sonuçlarında görülmektedir ki, toplam referans sinyali üzerinde motor 2'nin tahrik ettiği ikinci iletim yolunun etkisi birinci iletim yoluna göre daha baskındır.

5.3 Klasik ve Operasyonel İletim Yolu Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması

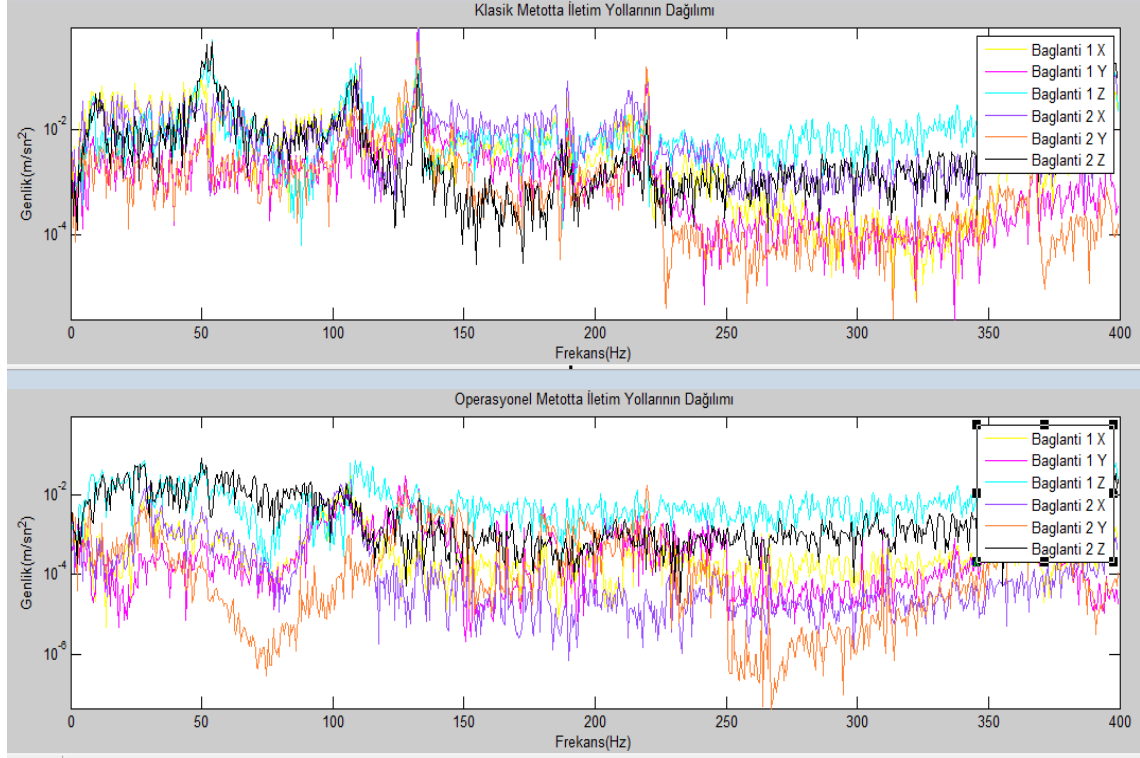
Klasik iletim yolu analizi ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar bölüm 5.1 ve 5.2'de gösterilmiştir. Bu bölümde klasik iletim yolu analizi ve operasyonel iletim yolu analizleri uygulanarak elde edilen sonuçlar, metotların avantaj ve dezavantajları göz önüne alınarak karşılaştırılmaktadır. İlk aşamada serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneğinde, çizelge 3.3'de durum 6 olarak ifade edilen operasyonel çalışma koşulu için yapılan, klasik ve operasyonel iletim yolu analizleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.16'da klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 5.16 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemde KİY ve OİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile karşılaştırılması.

Şekil 5.16'de işaretlenmiş olan tepe noktaları, incelenen test düzeneğinin sahip olduğu ve şekil 3.5'de gösterilen, sırasıyla 56Hz, 112Hz ve 132Hz frekanslarında bulunan modlardır. 132Hz'de bulunan mod haricinde ki diğer modlar genel olarak Z doğrultusunda hareket eden mod şekillerine sahiptir. Şekil 5.16'dan da anlaşılacağı gibi klasik iletim yolu analizi, 132Hz'de hatalı bir sonuç elde etmektedir. Bunun temel nedeni, klasik iletim yolu analizinde gürültü transfer fonksiyonlarının bulunması aşamasında iletim yollarının birbirleri arasında ki etkileşimi kaldırmak için, incelenen her bir iletim yolunda ayrı ayrı olacak şekilde, iletim yollarının aktif taraflarının pasif taraflarından ayrılması işlemidir. Gürültü transfer fonksiyonları ayırma işlemi nedeniyle sistem gerçek sınır koşullarına sahip değilken elde edilirler ve gürültü transfer fonksiyonları sistemi tam olarak ifade edemezler. Bu durum klasik iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçların hatalı olmasına neden olmaktadır.

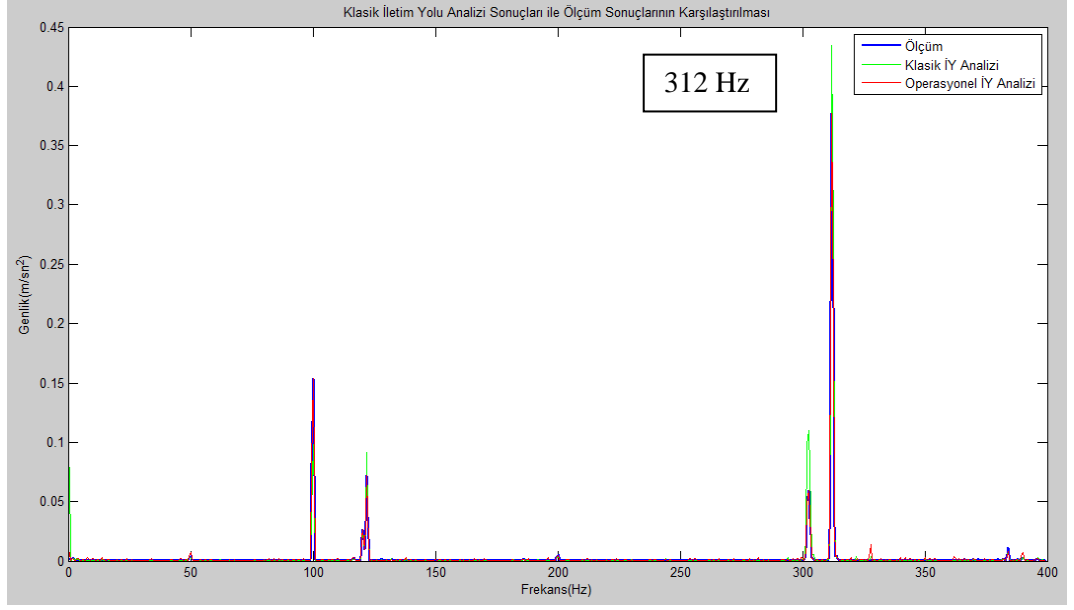
İletim yolu analizlerinin amacı olan, iletim yolları dağılımı sonuçları klasik iletim yolu analizi ve operasyonel iletim yolu analizi için oluşturulmuştur. İncelenen operasyonel koşul için hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını veren grafik şekil 5.17'de ifade edilmiştir.



Şekil 5. 17 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip sistemde incelenen operasyonel koşullar için KİY analizi ve OİY analizi metotları ile elde edilen iletim yolları katkısının grafiğinin logaritmik ölçekte gösterimi.

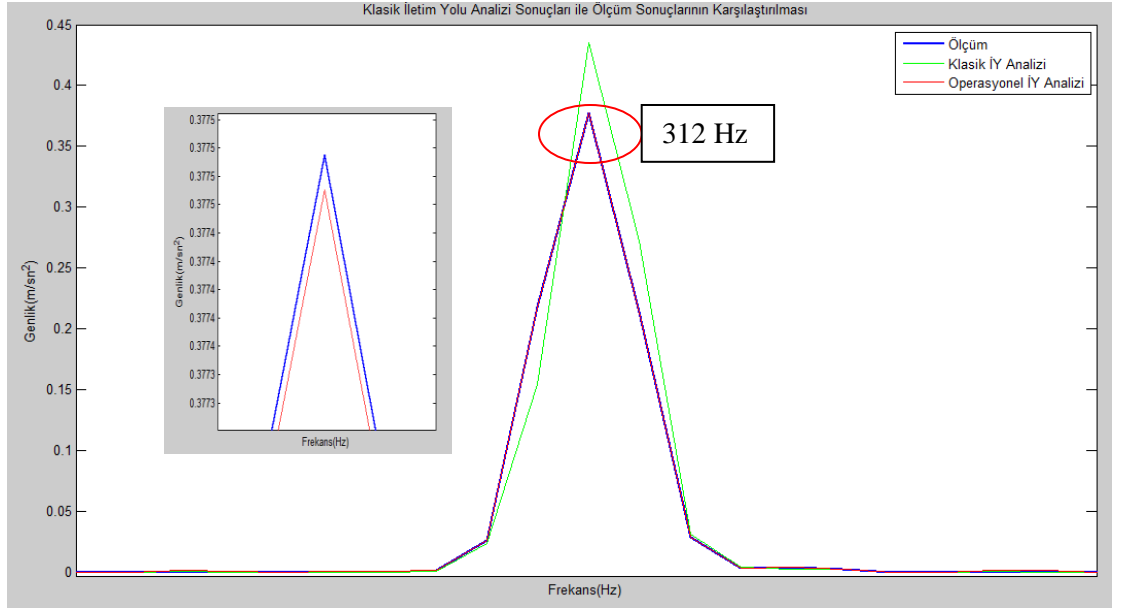
Şekil 3.8’de gösterildiği gibi sistemi tahrik eden sarsıcılar, incelenen sistemi $-Z$ yönünde tahrik etmektedir. Bu durumun sonucu olarak her iki iletim yolunda Z yönünde ki katkıların diğer yönler nazaran daha baskın olması beklenmektedir. Operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen dağılım grafiğinde, beklenildiği gibi Z yönünde ki titreşim seviyeleri diğer yönler nazaran daha baskındır. Klasik metot ile elde edilen sonuçlarda, özellikle hatalı sonuçların elde edildiği 132Hz civarında iletim yollarının X yönünde ki katkılarının baskın olduğu görülmektedir. Klasik iletim yolu analizindeki sonuçlarda görülmektedir ki, elde edilen transfer fonksiyonları sistemin gerçek sınır koşullarını yansıtmamakta, dolayısıyla bu 132Hz’deki modun referans sinyali üzerindeki etkisini gerçekte olduğundan çok daha fazla bir biçimde referans sinyaline yansıtmaktadır.

Bu bölümün ikinci aşamasında elastik takozlar üzerinde, elektrik motorları ile tahrik edilen test düzeneği için uygulanan klasik iletim yolu analizi ve operasyonel iletim yolu analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.18’de iletim yolu analizleri ile hesaplanarak elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali gösterilmektedir.



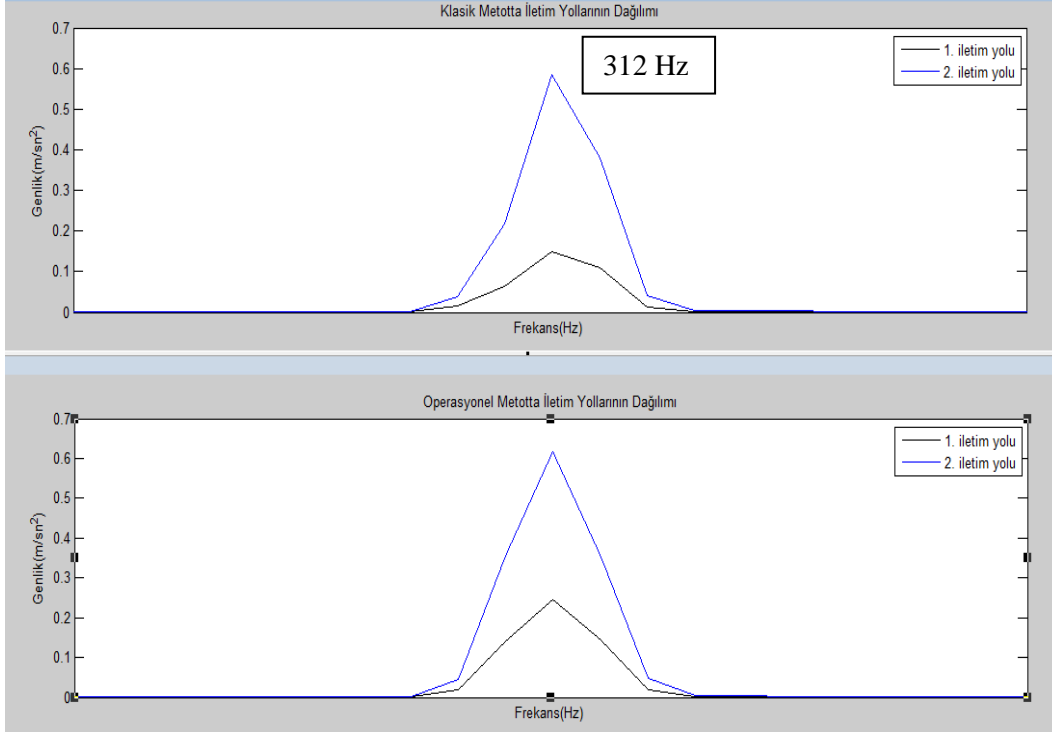
Şekil 5. 18 : Elastik takozlar üzerinde elektrik motorları ile tahrik edilen sistemde incelenen operasyonel koşul için KİY analizi sonuçları ile OİY analizi sonuçlarının karşılaştırılması.

İncelenen operasyonel koşulda sistemi en baskın şekilde tahrik eden frekans olan 312Hz için sonuçlar 5.19’da tekrardan gösterilmektedir.



Şekil 5. 19 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde baskın tahrik frekansı olan 312Hz için KİY analizi sonuçları ile OİY analizi sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.19’den da anlaşılacağı gibi operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali gerçek referans sinyali ile klasik iletim yolu analizine kıyasla daha iyi bir biçimde örtüşmektedir. İncelenen operasyonel koşul için hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını veren grafik şekil 5.20’de ifade edilmiştir.



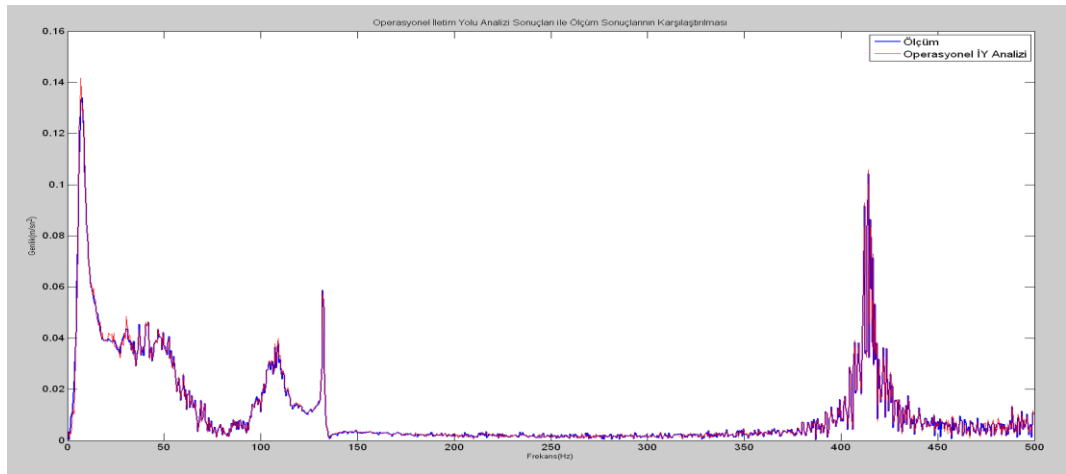
Şekil 5. 20 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde incelenen operasyonel koşullarda baskın tahrik frekansı olan 312 Hz için KİY analizi ve OİY analizi ile elde edilen iletim yolu katkısının dağılımı grafiği.

5.4 Farklı Sinyaller İçin Operasyonel İletim Yolu Analizi Uygulaması

5.4.1 Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için yapılan çalışmalar

Operasyonel iletim yolu analizi, incelenen sistemin iletim yolları ile referans noktaları arasındaki transfer fonksiyonlarının elde edilmesini sağlar. Bu transfer fonksiyonları sayesinde incelenen sistem üzerine etkiyen herhangi bir operasyonel koşul için, referans noktalarında oluşacak cevap fonksiyonları elde edilebilir. Bu çalışmada incelenen serbest-serbest sınır koşullarına sahip sisteme, herhangi bir operasyonel koşulu yansıtması adına seçilen iki farklı giriş sinyali için, operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonları kullanılarak referans sinyalinin hesaplanması hedeflenmektedir. Elde edilen bu referans sinyali, operasyonel anda alınan ölçülen referans sinyali ile karşılaştırılarak operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonunun sistemi ne kadar doğru yansıttığının incelenmesi yapılmaktadır. Sistem tahrik eden sinyal çeşitlerinden ilkinde, sarsıcı 1 den 0-4096 Hz aralığında logaritmik olarak azalan bir chirp tipi sinyal, sarsıcı 2'den ise 0-4096 Hz aralığında pembe gürültü tipi sinyal ile sistem tahrik edilmektedir.

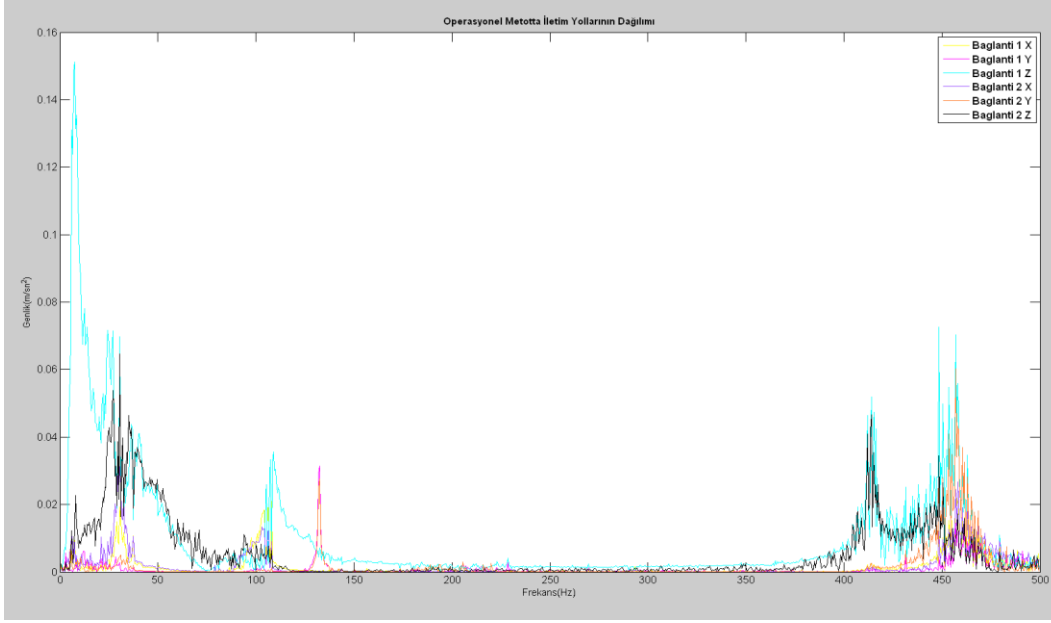
Çalışmanın ilk aşamasında, operasyonel çalışma koşulları esnasında, iletim yollarından ölçülen sinyalleri ile operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonu çarpılarak, incelenen operasyonel koşul için referans sinyali hesap edilir. Bu hesap ile elde edilen referans sinyali ölçüm esnasında referans noktasında ölçülerek elde edilen referans sinyali ile karşılaştırılarak, operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçların doğruluğu araştırılır. Şekil 5.21’de serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneğine etkiyen birinci sinyal tipi için operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ve ölçüm ile elde edilen referans sinyali karşılaştırılmaktadır.



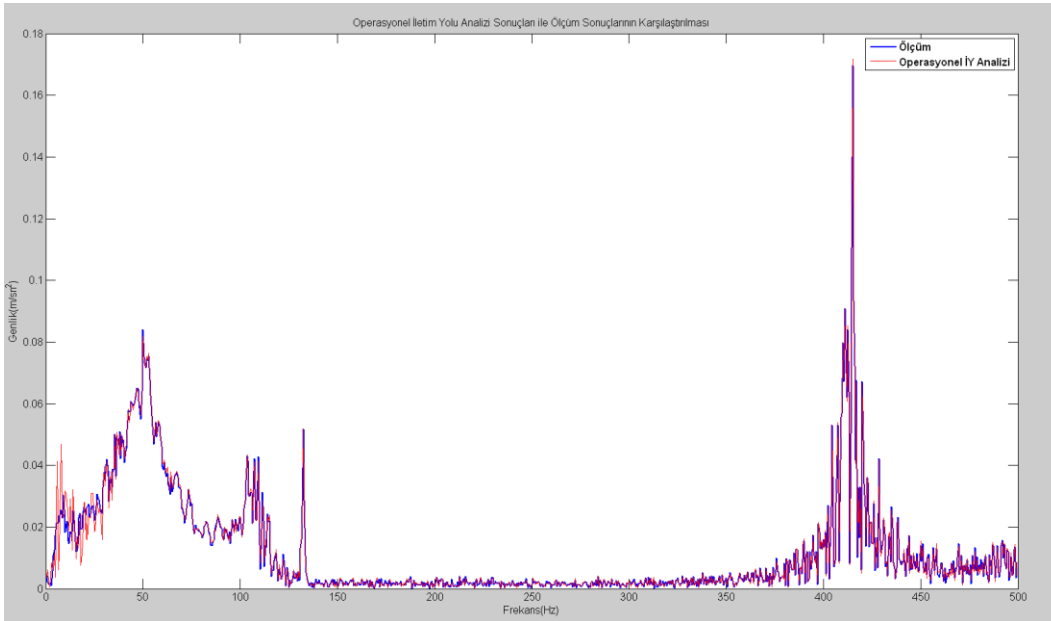
Şekil 5. 21 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için birinci operasyonel koşullar altında OİY analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması.

Şekil 5.21’de görüldüğü üzere operasyonel iletim yolu analizi ile hesap edilerek elde edilmiş olan referans sinyali, operasyonel anda referans noktasından ölçülerek elde edilen sinyali iyi bir biçimde takip etmektedir. Yalnızca tepe noktalarının genlik değerlerinde hesaplanarak elde edilen sinyal ile ölçüm sinyali arasından ufak farklar mevcuttur. İncelenen operasyonel koşul için hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını veren grafik şekil 5.22’de ifade edilmiştir.

Sistem üzerine etkiyen sinyal çeşitlerinden ikincisinde, sarsıcı 1 0-4096 Hz aralığında beyaz gürültü tipi sinyal, sarsıcı 2’den ise 0-4096 Hz aralığında logaritmik olarak azalan chirp tipi sinyal ile sistemi tahrik edilmektedir. Şekil 5.23’de serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneğine etkiyen ikinci sinyal tipi için operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ve ölçüm ile elde edilen referans sinyali karşılaştırılmaktadır.

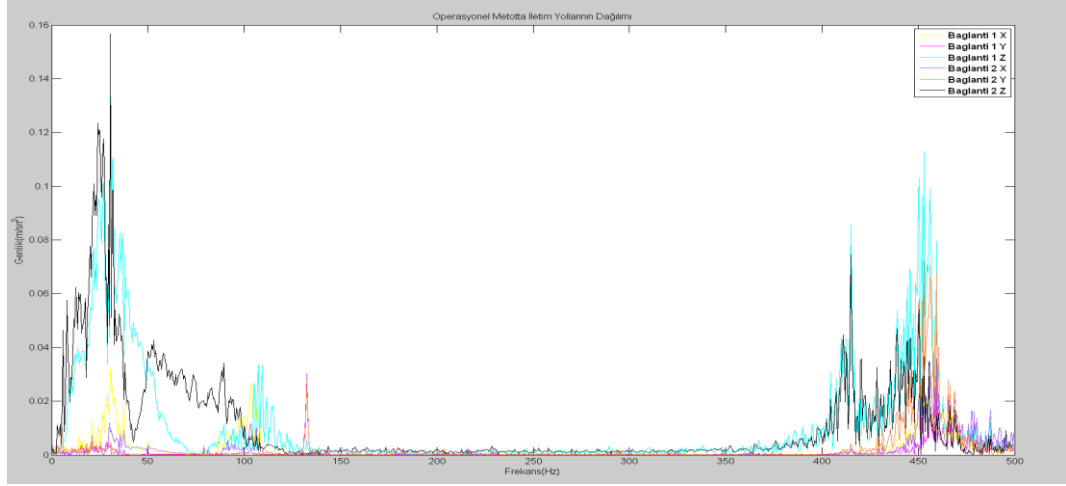


Şekil 5.22 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için incelenen birinci operasyonel koşulda hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını.



Şekil 5.23 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için ikinci operasyonel koşullar altında OİY analizi ile elde edilen referans sinyali ile ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması.

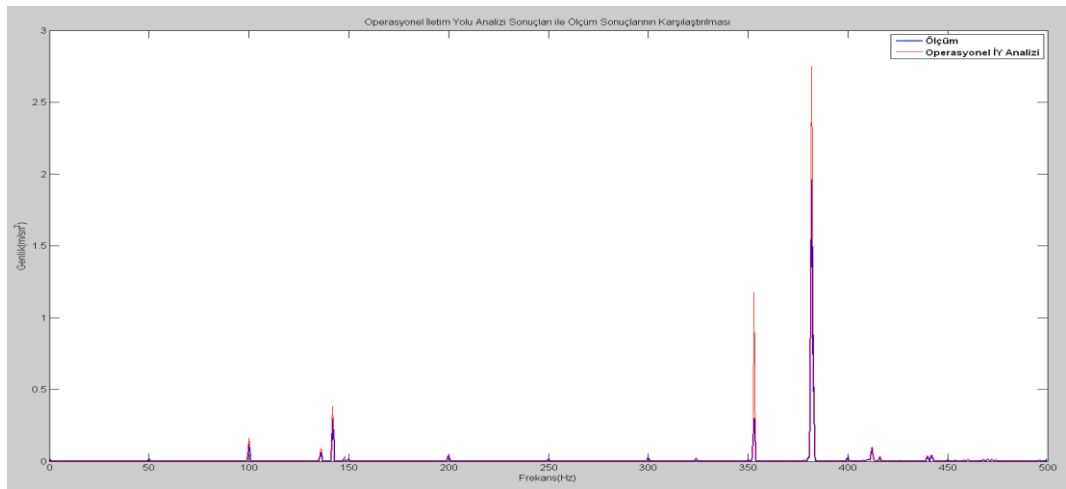
İncelenen ikinci sinyal tipi operasyonel koşul için hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını veren grafik şekil 5.24’de ifade edilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi her iki sinyal tipinde, özellikle logaritmik azalan chirp tipi sinyal uygulanan iletim yolu diğer iletim yoluna göre düşük frekanslarda daha baskın olduğu görülmektedir. Bu durum verilen chirp tipi sinyalin karakteristik yapısı gereği beklenen bir durumdur.



Şekil 5. 24 : Serbest-serbest sınır koşullarına sahip test düzeneği için incelenen ikinci operasyonel koşulda hesaplanan referans sinyalleri üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını.

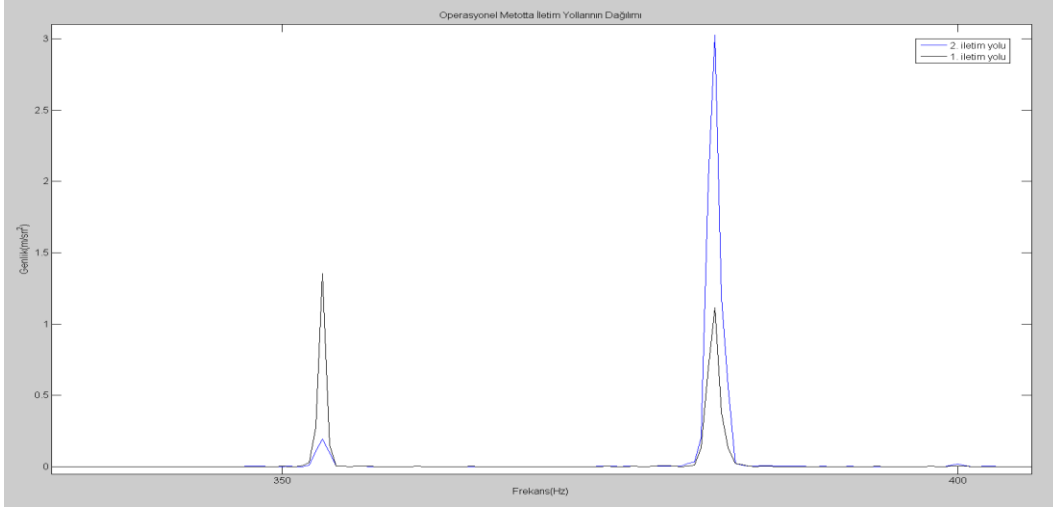
5.4.2 Elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneği için yapılan çalışmalar

Çalışmaların ikinci aşamasında şekil 3.10’da gösterildiği gibi elastik takozlar üzerine yerleştirilen test düzeneğine operasyonel iletim yolu analizi uygulaması sonucu elde edilmiş olan transfer fonksiyonları kullanılarak, iki farklı operasyonel koşul için referans sinyalleri elde edilmiştir. Operasyonel koşullar sistemi tahrik eden elektrik motorlarına 1.5g’lık ek yükler yerleştirilerek ve motorlar operasyonel iletim yolu analizi için yapılan ölçümlerden daha yüksek devirlerde çalıştırılarak elde edilmiştir. Birinci operasyonel çalışma koşulu için operasyonel iletim yolu analizi kullanılarak hesap edilen referans sinyali ve ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılmasını veren grafik şekil 5.25’de gösterilmektedir.



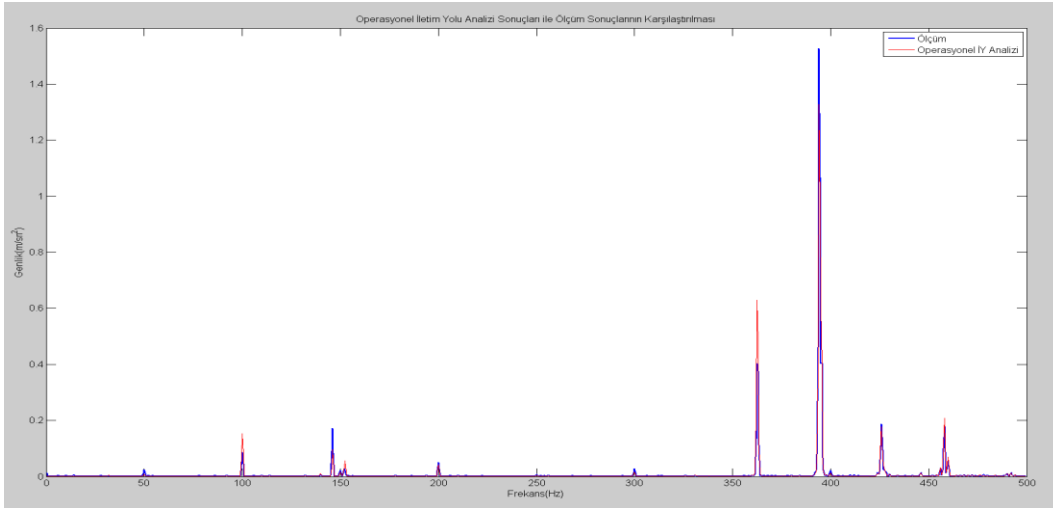
Şekil 5. 25 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, birinci operasyonel çalışma koşulu için OİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin ve ölçüm sonuçları ile elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması.

İncelenen operasyonel koşul için en baskın frekanslar olan 353Hz ve 382 Hz’de hesaplanan referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını veren grafik şekil 5.26’de ifade edilmiştir.



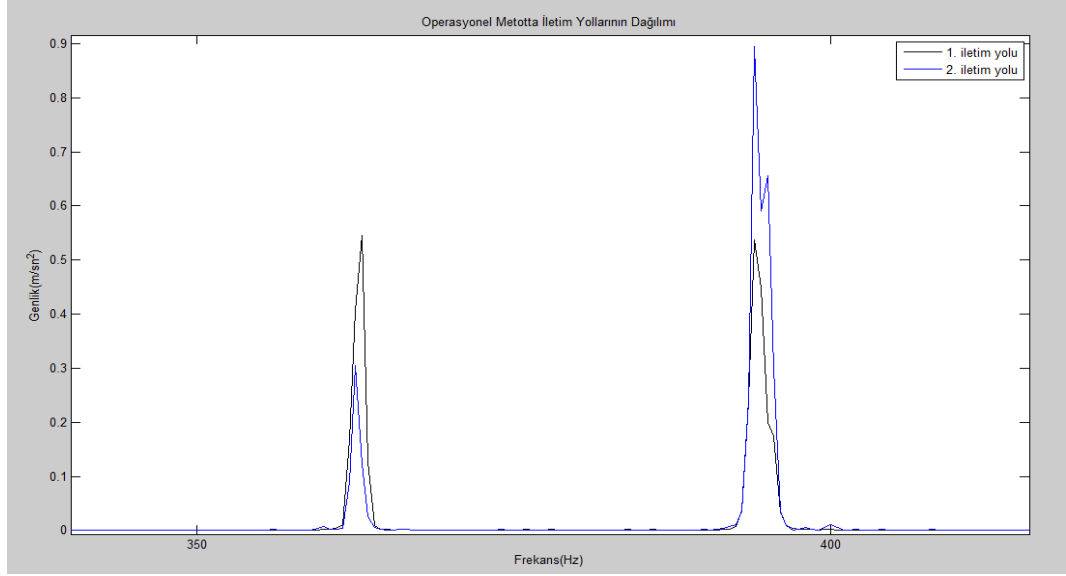
Şekil 5. 26 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, incelenen birinci operasyonel koşul için en baskın frekanslar olan 353Hz ve 382 Hz’de hesaplanan referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımı.

İkinci operasyonel koşul için operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali ve ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılmasını veren grafik şekil 5.27’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 27 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, ikinci operasyonel çalışma koşulu için OİY analizi ile elde edilen referans sinyalinin ve ölçüm sonuçları ile elde edilen referans sinyalinin karşılaştırılması.

İncelenen operasyonel koşul için en baskın frekanslar olan 362Hz ve 394Hz için hesaplanan referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımını veren grafik şekil 5.28’de ifade edilmiştir.

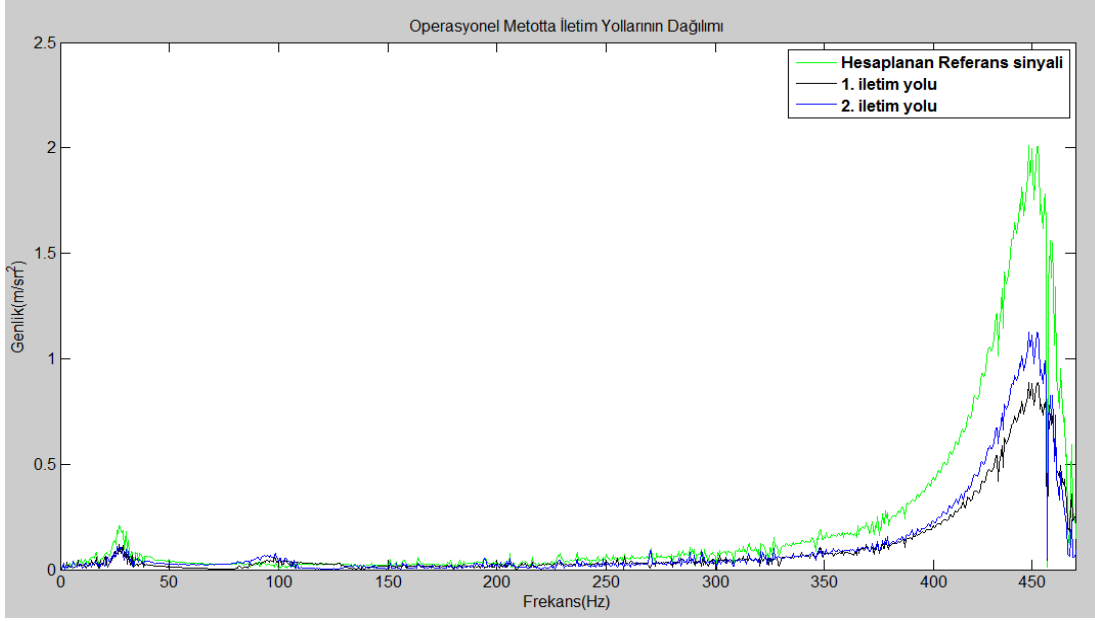


Şekil 5. 28 : Elastik takozlar üzerine yerleştirilen sistemde, incelenen ikinci operasyonel koşul için en baskın frekanslar olan 362Hz ve 394Hz’de hesaplanan referans sinyali üzerinde iletim yollarının katkısının dağılımı.

Grafiklerden anlaşılacağı gibi operasyonel iletim yolu analizi ile hesaplanarak elde edilen referans sinyali sonuçları, ölçüm sonuçlarını takip etmekte ve incelenmek istenen bir operasyonel koşulda, herhangi bir frekansta toplam referans sinyali üzerine iletim yollarının katkısını gösterebilmektedir.

5.5 Yapay Sinyaller İçin OİY Analizi Uygulaması

Çalışmanın bu aşamasında incelenen, serbest-serbest sınır koşullarına sahip sisteme, sanal giriş sinyaller uygulanarak ve operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilmiş olan transfer fonksiyonları kullanılarak referans sinyalinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Burada ki amaç operasyonel iletim yolu analizi sayesinde sistem üzerine etkiyebilecek olası operasyonel koşul senaryolarını deney yapmadan simule edebilmenin mümkün olduğunu göstermektir. İncelenen sisteme, şu ana kadar incelenmiş olan operasyonel koşullardan farklı olarak, her iki iletim yolundan da frekansı ve genliği logaritmik artan fiktif ivme verileri giriş sinyali olarak verilmektedir. Bu sanal sinyalin seçilmesinde ki neden, sarsıcılar ile tahrik edilen sistemin adeta dengesiz yüke sahip ve hızı arttırılan motorlar ile tahriki durumunun simule edilmesidir. Sistemin bu fiktif operasyonel koşul sonucunda oluşturacağı referans sinyali operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonu kullanılarak hesap edilmiştir. Elde edilen bu referans sinyali ve iletim yollarının bu referans sinyaline katkısı şekil 5.29’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 29 : Sanal Operasyonel koşul için OİY analizi kullanılarak elde edilen referans sinyali ve iletim yollarının bu sinyal üzerindeki etkilerinin katkıları.

Sanal operasyonel koşul ile elde edilen referans sinyalinde, 460 Hz'deki modun etkisiyle bu frekans aralığında genlik seviyelerinde artış gözlemlenmektedir. İkinci iletim yolu birinci iletim yoluna nazaran daha yüksek genlikte sanal ivme verileri ile tahrik edildiğinden beklendiği gibi ikinci iletim yolu birinci iletim yoluna göre referans sinyali üzerindeki etkisinin daha baskın olduğu görülmektedir.

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

6.1 Genel Değerlendirme

Bu tez kapsamında klasik ve operasyonel iletim yolu analizi metotları tanıtılmış, deney düzeneği üzerinde yapılan uygulamalar ile operasyonel iletim yolu analizinin klasik iletim yolu analizine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri ortaya çıkarılmıştır.

Klasik iletim yolu analizi metodu özellikle otomotiv sektöründe günümüzde sıkça kullanılan bir metottur. Ancak klasik iletim yolu analizi için gerekli iki temel etmenden biri olan, iletim yolları ile referans noktaları arasındaki transfer fonksiyonlarının bulunması esnasında, iletim yolları arası etkileşimin engellenmesi amacıyla gerçekleştirilen ayırma işlemleri nedeniyle, klasik iletim yolu analizi iki önemli dezavantaja sahiptir. Ayırma işlemleri klasik iletim yolu analizinin uzun zaman alan testler gerektirmesine neden olmaktadır. Ayrıca her bir iletim yolu için ayrı ayrı sistemin aktif ve pasif taraflarının birbirinden ayrılması işlemi, iletim yolu analizi esnasında sistemin sahip olduğu sınır koşullarının, sistemin geçek sınır koşullarından farklı olmasına ve sonuçların incelenen sistemi yansıtmamasına neden olmaktadır. Bu dezavantajın önlenmesi amacıyla son yıllarda yeni bir iletim yolu analizi metodu geliştirilmiştir. Literatürde OTPA, OPA, AMM isimleri ile bilinen bu yeni iletim yolu analizi metodu, analizin gerçekleşebilmesi için sadece operasyonel anda alınan verilere ihtiyaç duyulması sebebiyle genel olarak operasyonel iletim yolu analizi metodu olarak bilinmektedir.

Çalışmalar kapsamında, tasarlanan test düzeneği üzerinde, bir birinden farklı iki sınır koşulu altında, hem klasik iletim yolu analizi, hem de operasyonel iletim yolu analizi uygulanmıştır. Bu sayede klasik iletim yolu analizi ile operasyonel iletim yolu analizi metotları karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin işlenerek, klasik ve operasyonel iletim yolu analizlerinin gerçekleşebilmesi için gerekli olan sayısal çözücü program,

MATLAB programı kullanılarak yazılmıştır. Bu tezin sayısal uygulamalar bölümünde, yazılan sayısal çözücü programın adımları anlatılmaktadır. Operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlarının özellikle düşük frekanslarda yapının sahip olduğu yüksek modal özellik sonucu, giriş sinyallerinde nümerik hatalara neden olabilecek yüksek bağdaşıklık problemi oluşabilmektedir. Bu durumun operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonları üzerindeki etkilerini olabildiğince azaltmak için sayısal çözücü programda, giriş sinyalleri üzerine tekil değer analizi metodu uygulanmıştır.

Deneysel ve sayısal uygulamalar bölümünde, incelenen test düzenekleri için klasik ve operasyonel iletim yolu analizi uygulanmıştır. İncelenen operasyonel koşullarda, operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyali, klasik iletim yolu analizi ile elde edilen referans sinyaline göre ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile çok daha iyi bir biçimde örtüşmektedir. Bu durumun sonucu olarak söylenilebilir ki, operasyonel iletim yolu analizi, klasik iletim yolu analizine nazaran gerçeği daha iyi yansıtan sonuçlar vermektedir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonu kullanılarak, farklı bir operasyonel çalışma koşulu için referans sinyali elde edilmiştir. Ölçüm sonucu elde edilen referans sinyali ile hesaplanarak elde edilen referans sinyali karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hesaplanarak elde edilen referans sinyali, ölçüm sonucu elde edilen referans sinyalini iyi bir biçimde takip ettiği ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak söylenilebilir ki, operasyonel iletim yolu analizi kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonu, incelenen sistemi doğru bir biçimde yansıtmakta olup, herhangi bir operasyonel koşulda toplam referans sinyali üzerinde iletim yollarının dağılımını doğru bir biçimde gösterebilmektedir. Deneysel çalışmaların son aşamasında sisteme sanal operasyonel koşullar etkimesi halinde referans noktasında oluşacak çıkış sinyali operasyonel iletim yolu analizi kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede operasyonel iletim yolu analizi ile sistem üzerine etkiyebilecek olası operasyonel koşul senaryoları deney yapmadan simule edilebildiği gösterilmiştir.

Tez çalışması süresince yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Klasik iletim yolu analizinde, iletim yolları ile referans noktaları arasında ki transfer fonksiyonlarının bulunması esnasında, iletim yolları arası etkileşimi kesmek amacıyla her bir iletim yolu için ayrı ayrı uygulanan, iletim

yollarında sistemin pasif ve aktif taraflarının birbirlerinden ayırma işlemleri nedeniyle, klasik iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar gerçekten farklı olmaktadır. Bunun temel nedeni klasik iletim yolu analizi esnasında yapılan ayırma işlemleri ile yapılan testlerde sistemin sahip olduğu sınır koşulları, sistemin gerçek sınır koşullarından farklı olmakta ve klasik metot ile elde edilen sonuçlar sistemin sahip olduğu gerçek dinamik yapıyı yansıtamamaktadır.

- Operasyonel iletim yolu analizinde ise, sistemin gerçek dinamik yapısına herhangi bir müdahale olmamasından ve sadece operasyonel koşullar altında alınan verilerin kullanılması neticesinde, operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen sonuçlar göstermiştir ki operasyonel iletim yolu analizi sistemi doğru bir biçimde ifade etmektedir.
- Operasyonel iletim yolu analizi ile elde edilen transfer fonksiyonları kullanılarak istenilen herhangi bir operasyonel koşul için iletim yolu analizi uygulanabileceği gibi sanal operasyonel koşullar içinde bu transfer fonksiyonları kullanılarak sistemin oluşturacağı çıkış sinyalleri testler gerçekleştirilmeden hesap edilebilir.

6.2 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu tez kapsamında operasyonel iletim yolu analizlerinde sayısal çözümleme için yazılan program, farklı iletim yolu ve referans noktası sayısına sahip deney düzenekleri için uygulanabilir, bu sayede tez kapsamında elde edilmiş olan sayısal çözücü programın doğruluğu farklı deney düzenekleri üzerinde test edilebilir. Çeşitli makineler üzerinde yapısal yollu iletim yollarının referans noktalarına etkilerinin dağılımlarını bulmak için operasyonel iletim yolu analizi uygulanabilir. Hava yollu iletim yolları bu tez kapsamında incelenmemiştir. Daha sonraki çalışmalarda hava yollu iletim yolları da hesaba katılacak şekilde bir otomobil üzerinde operasyonel iletim yolu analizi uygulanarak çeşitli referans noktaları için hava ve yapısal iletim yollarının referans sinyalleri üzerindeki etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Knapen, P. L.**, (1999). Transfer path analysis related to booming, performed on a car, *Eindhoven University of Technology Yüksek Lisans Tezi, Hollanda*.
- [2] **Girgin, Z.**, (2006). Veichle Booming Noise Investigation. Yüksek Lisans Tezi. Istanbul Teknik Üniversitesi.
- [3] **Sitter, G., Devriendt, C., Guillaume, P., Pruyt, E.**, (2009). Operational Transfer Path Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, (Sf. 416–431).
- [4] **Janssen, K., Gajdatsy, P., Gielen, L., Mas, P.**, (2010). OPAX: A new transfer path analysis method based on parametric load models. *Mechanical System and Signal Processing*, 25, (Sf.1321-1338) .
- [5] **Tandogan, F.**, (2006). Veichle Interior Noise Source Cotribution and Transfer Path Analysis. Yüksek Lisans Tezi. Istanbul Teknik Üniversitesi.
- [6] **Bies, D. ve Hansen, C.** (2009). *Engineering Noise control: Theory and Practice*. Spon Press LTD, New York, USA.
- [7] **Inmann, D.J.** (1996). *Engineering Vibration*. Prentice Hall International, Inc.,USA.
- [8] **Janssen, K., Gajdatsy, P., Van der Auweraer, H.**, (2008). Operational path analysis: a critical review. *International conferance on noise and vibration engineering: Vol. 8*. (Sf. 3657-3671).
- [9] **Klerk, D., Lorhmann, M., Quickert, M., Foken, W.**, (2009). Application of operational transfer path analysis on a classic car. *International Conference on Acoustics: Vol. 2*. (Sf. 776-779).
- [10] **LMS International**, (2005). Transfer path analysis: The Qualification and Quantification of Vibro-Acoustic Transfer Paths. Adres: www.lmsintl.com/download.asp
- [11] **Plunt, J.**, (1998). Strategy for transfer path analysis (TPA) applied to vibro-acoustic systems at medium and high frequencies. *23rd International Conference on Noise and Vibration Engineering*, (Sf. 1311-1316).
- [12] **Plunt, J.**, (2005). Finding and fixing vehicle NVH problems with transfer path analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 39, (Sf. 12-16)
- [13] **Sitter, G., Guillaume, P., Cauberghe, B.**, (2004). Experimental Transfer Path Analysis Without Disassembling the Structure. *22rd Conference & Exposition on Structural Dynamics*. (Sf. 2171-2178)

- [14] **Liu, W. And Ewins, D. J.**, (1998). Transmissibility properties of MDOF systems. *16th International Modal Analysis Conference, IMAC. Part 1.* (Sf. 847-854).
- [15] **Gajdatsy, P., Janssen, K., Van der Auweraer, H.**, (2010). Application of Transibility Concept in Transfer Path Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing, 24*, (Sf. 1963–1976).
- [16] **Klerk. D., Ossipov, A.**, (2010). Operational transfer path analysis; theory guidelines and tyr noise application. *Mechanical System and Signal Processing, 24*, (Sf.1950-1962).
- [17] **Lohrmann, M.**, (2008). Operational transfer path analysis: compearison with conventional methods. *15th International Congress on Sound and Vibration*, Daejeon, Kore 6-10 Temmuz.
- [18] **Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., Ribeiro, A. M. R.**, (2000), Transmissibility convcept multi degree of freedom system. *Mechanical Systems and Signal Processing, 15*, (Sf.129-137).
- [19] **Van der Linden, G., Varet, P.**, (1996). Experimental Determination of Low Frequency Noise Contributions of Interior Vehicle Body Panels in Normal Operation, *SAE Technical Paper 960194*, (Sf.61-66).
- [20] **LMS International**, (2010). LMS test lab transfer path analysis manual, Rev 10b.
- [21] **Url 1** <<http://www.bksv.com/>>, alındığı tarih: 29.02.2012.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Sancar Tuna Koçoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: Samsun, 14.04.1986

Adres: Işıklar Cad. Sardunya Sok. Sardunya Apt. No:1/15 Ataşehir İSTANBUL

E-Posta: sancartuna@yahoo.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği

Mesleki Deneyim : 2009-2010 BSH Ev aletleri A.Ş.,

2010-... Ford Otasan, PT NVH departmanı