

152200

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR TOPLU TAŞIMA ARACININ SONLU
ELEMENLAR METODU İLE DİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Deniz Dilek FERHAT
511001110

152200

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Süleyman Tolun
Prof. Dr. Alsan Meriç

[Signatures]

NİSAN 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Mercedes Benz Türk A.Ş.'nin Otobüs Geliştirme Direktörlüğüne bağlı Karoseri ve Dış Donanım Kısım Müdürlüğü'nde yürütülen analiz çalışmaları için hazırlanan modellerden Conecto C üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Conecto C aracının dinamik analizleri sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır. Bu araca ait analizler ilgili bölümde büyük bir titizlikle gerçekleştirilmiş olup, bu çalışma ile paralellik taşımamaktadırlar. Çalışma, bir toplu taşıma aracının dinamik analizinin nasıl yapıldığını, hangi aşamalardan geçtiğini öğrenme amaçlıdır.

Modelleme esnasında MEDINA yazılımı, çözüm esnasında ise ANSYS ve PERMAS yazılımları kullanılmıştır.

Bu çalışmada danışmanlığımı yapan Sayın Prof. Dr. Zahir MECİTOĞLU'na, çalışmam için gerekli koşulları sağlayan, başta DBB Kısım Müdürü Sayın Behiç ÖZTÜRK olmak üzere, tüm Mercedes Benz Türk camiasına teşekkür ederim.

Bu güne kadar tüm başarılarımda, sonsuz desteği ile, benim kadar payı olan annem Sayın Nefise FERHAT'a ve eşim Sayın Burak USTAOĞLU'na teşekkür ederim.

Nisan 2004

Deniz Dilek FERHAT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÖZET	vii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. TOPLU TAŞIMA ARACININ YAPISI	5
2.1 Giriş	5
2.2 Temel Boyutlar	8
2.3 Araç Karoserisi	8
2.3.1 Karoseri Üretimi	9
2.3.2 Kaplamalar	9
2.3.3 Korozyon Koruması	10
2.3.4 Kapılar	10
2.4 Sürüş	11
2.4.1 Motor	11
2.4.2 Soğutma	11
2.4.3 Vites	11
2.5 Yürüten Aksam	12
2.5.1 Akslar	12
2.5.2 Süspansiyon	12
2.5.3 Direksiyon Mekanizması	12
3. SONLU ELEMANLAR MODELİ	13
3.1 Giriş	13
3.2 Titreşim Analizi	16
3.2.1 Titreşimin Temel Denklemleri	16
3.2.2 Lanczos Metodu	17
3.2.2 İndirgenmiş Metot	18
3.3 Kullanılan Paket Programların Tanıtılması	20
3.3.1 ANSYS Paket Programı	20
3.3.1.1 Ön İşlemci	20
3.3.1.2 Çözüm	20
3.3.1.3 Son İşlemci	21
3.2.2 MEDINA Paket Programı	21
3.3.3 PERMAS Paket Programı	22
3.4 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	22
3.4.1 Geometrinin Ağ Yapısı İçin Hazırlanması	22
3.4.2 Ağ Yapısının Oluşturulması	23
3.4.2.1 Ağ Yapısının Boyutunun Seçilmesi	23
3.4.2.2 Ağ Yapısı	24

3.4.3 Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Elemanlar	28
3.4.3.1 Kiriş Eleman	28
3.4.3.2 Kabuk Eleman	30
3.4.3.3 Hacim Eleman	31
3.4.3.4 Kütle Eleman	32
3.4.3.5 Yay-Sönümleme Elemanı	32
3.4.4 Elemanların Geometrik Özelliklerinin Belirlenmesi	33
3.4.5 Elemanların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	34
3.4.6 Sınır Şartları	34
3.4.7 Varsayımlar ve Basitleştirmeler	34
3.4.7.1 Geometri	35
3.4.7.2 Malzeme Özellikleri	35
3.4.7.3 Sınır Koşulları	35
3.4.7.4 Bağlantı Elemanları	36
4. SAYISAL SONUÇLAR	37
4.1 Giriş	37
4.2 Taşıyıcı Konstrüksiyonun Analizi	37
4.2 Karoseri Analizi	42
4.3 Araç Analizi	47
5. DEĞERLENDİRME	56
KAYNAKLAR	58
EK	59
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Conecto C	5
Şekil 2.2 : Conecto C	6
Şekil 2.3 : Conecto G	6
Şekil 2.4 : Conecto U	6
Şekil 2.5 : Conecto H	6
Şekil 2.6 : Conecto M	7
Şekil 2.7 : O 345 Araç Tipleri	7
Şekil 2.8 : Kaplamasız Komple Araç	10
Şekil 2.9 : OM 457 hLA	11
Şekil 2.10 : ZF Vites	12
Şekil 2.11 : Voith Vites	12
Şekil 3.1 : Tüm Aracın Sonlu Elemanlar Modeli	15
Şekil 3.2 : Otobüs İskeletinin Katı Modeli	23
Şekil 3.3 : Ön altyapı	25
Şekil 3.4 : Orta Altyapı	26
Şekil 3.5 : Kiriş Eleman	29
Şekil 3.6 : Kabuk Eleman	30
Şekil 3.7 : Hacim Eleman	31
Şekil 3.8 : Kütle Eleman	32
Şekil 3.9 : Yay-sömümleme elemanı	33
Şekil 4.1 : Taşıyıcı Konstrüksiyonun Sonlu Elemanlar Modeli	38
Şekil 4.2 : Birinci Burulma Modu - Frekans: 8.567 Hz	40
Şekil 4.3 : Birinci Eğilme Modu – Frekans: 12.210 Hz	40
Şekil 4.4 : İkinci Burulma Modu – Frekans: 14.677 Hz	41
Şekil 4.5 : Bileşik Eğilme-Kayma Modu - Frekans: 18.251 Hz	41
Şekil 4.6 : Karoseri Sonlu Elemanlar Modeli	43
Şekil 4.7 : Ana Serbestlik Derecelerinin Konumları	44
Şekil 4.8 : Birinci Burulma Modu – Frekans: 8.004 Hz	45
Şekil 4.9 : Birinci Eğilme Modu – Frekans: 12.275 Hz	45
Şekil 4.10 : Bileşik Eğilme-Kayma Modu – Frekans: 14.710 Hz	46
Şekil 4.11 : İkinci Eğilme Modu – Frekans: 19.437 Hz	46
Şekil 4.12 : Üçüncü Eğilme Modu – Frekans: 19.899 Hz	46
Şekil 4.13 : Araç 1. Mod Şekli - Frekans: 0.635 Hz	48
Şekil 4.14 : Araç 2. Mod Şekli – Frekans: 0.923 Hz	48
Şekil 4.15 : Araç 3. Mod Şekli - Frekans: 1.353 Hz	49
Şekil 4.16 : Araç 4. Mod Şekli - Frekans: 1.426 Hz	49
Şekil 4.17 : Araç 5. Mod Şekli - Frekans: 2.322 Hz	50
Şekil 4.18 : Araç 6. Mod Şekli - Frekans: 2.400 Hz	50
Şekil 4.19 : Araç 9. Mod Şekli – Frekans: 8.392 Hz	51
Şekil 4.20 : Araç 9. Mod Şekli – Frekans: 8.392 Hz	51

Şekil 4.21	: Araç 10. Mod Şekli – Frekans: 8.531 Hz	52
Şekil 4.22	: Araç 11. Mod Şekli – Frekans: 8.664 Hz	52
Şekil 4.23	: Araç 11. Mod Şekli – Frekans: 8.664 Hz	53
Şekil 4.24	: Araç 12. Mod Şekli – Frekans: 8.782 Hz	53
Şekil 4.25	: Araç 13. Mod Şekli – Frekans: 8.836 Hz	54
Şekil 4.26	: Lokal Mod Şekli – Frekans: 12.987	55
Şekil EK.1	: Araç Temel Boyutları	60



BİR TOPLU TAŞIMA ARACININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE DİNAMİK ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, Mercedes Benz Türk A.Ş.'nin ürün yelpazesindeki Conecto C'nin modal analizi sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır. Conecto C, üç kapılı bir şehir içi otobüsü olup, O 345 Conecto ailesinin bir üyesidir. Yapılan analiz ve bulunan sonuçlar tüm ailenin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Modal analizde, yapının doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilir. Bunlar, belirli bir uyarı ile başlayıp, sürtünme veya sönümün olmadığı durumlarda sonsuza kadar süren serbest titreşimin karakteristiğini belirleyen iki unsurdur. Bu karakteristik, sadece sistemin fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonudur.

İlk mod şekli, en düşük potansiyel ve şekil değiştirme enerjisi ile oluştuğundan yapının karakteristiği açısından büyük önem taşır. Harmonik girdiler içeren birçok mühendislik probleminde çok sayıda doğal frekansın hesaplanmasına ihtiyaç duyulur. Bunlar, daha sonra yapılacak dinamik yüklemeler açısından bilgi verirler.

Doğal frekansta olduğu gibi, mod şekillerinde de yapının ağırlığı, kütle dağılımı ve katılığı ana parametreleri oluşturur. Bütün parametrelerin ortak etkisi atalet momentinde belirginleşir. Kütle atalet momenti ile doğal frekansın büyüklüğü ters orantılıdır. Yani kütle atalet momentinin artması ile doğal frekansın değeri düşer.

Çalışmanın üç boyutlu katı modellemesi Karoseri grubunun konstrüktörleri tarafından CATIA ortamında yapılmıştır. Sonlu elemanlar modeli için gerekli sadeleştirilmelerden bir kısmı CATIA ortamında yapıldıktan sonra MEDINA programının CATIA arayüzü kullanılarak modeller MEDINA'ya aktarılmıştır. MEDINA sonlu elemanlar modelinin hazırlanacağı paket program olup özellikle araç iskeleti modellemesinde çok yeteneklidir. MEDINA'da hazırlanan iki boyutlu modele yine iki boyutlu olan camların, bir boyutlu olan kütle ve aks modellerinin eklenmesiyle modellemeye son aşamaya gelmiştir. Bu aşamada, elemanların modelleme esnasında atanmış olan geometrik özelliklerinin ve malzemelerinin, paket programa girilmesi ile analiz aşamasına geçilmiştir.

Modelleme sırasında, kiriş eleman (BEAM4), kabuk eleman (SHELL63), hacim eleman (SOLID45), kütle eleman (MASS 21) ve yay-sönümleme elemanı (COMBIN 14) kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak bir analizde için bazı varsayım ve basitleştirmeler kullanılmaktadır. Otobüs modelinde kullanılan varsayımlardan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

- Kullanılan CAD geometrisinin gerçek yapıyı yeterli ölçüde temsil edebildiği kabul edilir.
- Deplasmanların, lineer bir çözümü sağlayacak ölçüde küçük olduğu kabul edilir.

- Dekoratif nitelik taşıyan yapılar mukavemet açısından etkisiz kabul edilerek modelde göz ardı edilirler.
- Malzeme özelliklerinin lineer bölgede kaldığı ve farklı yük şartlarında değişmediği kabul edilir ve izotropik (veya ortotropik) olarak kabul edilebilir.
- Tüm analizlerin oda sıcaklığı koşullarında yapıldığı kabul edilir. Malzemenin sıcaklığa karşı özelliklerinin değişebilme ihtimali göz ardı edilir.
- Sürekli ve yayılı kütle dağılımı modelde, nokta üzerinde temsil edilir.
- Bağlantı bölgelerinde zaman içerisinde oluşacak çözümler göz ardı edilir.
- Sistemdeki tüm kaynak yapıları ideal ve kusursuz olarak alınır.

Modal analiz, gerekli bilgi birikiminin oluşturulması için üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Taşıyıcı Konstrüksiyonun Analizi
- Karoseri Analizi
- Araç Analizi

İlk iki analizde aracın ilk modunun eğilme yerine burulma olduğu görülmüştür. Eğilme ikinci modda ortaya çıkmıştır. Bu mod şeklinde aracın altyapısının tavana göre daha sağlam olması nedeniyle, tavan altyapıya göre çok daha fazla şekil değiştirmiştir.

Kaplamalar, camlar, kütleler ve akslar içeren araç modelinde ise düşük frekansta görülen global modlar aksların etkisiyle ortaya çıkmıştır. İlk analizlerde görülen global modlar çevresinde, bu analizde görülen çok sayıda global modun aslında tek bir global mod etrafında lokal modların etkisiyle görülmüş varyasyonlar olduğu sonucuna varılmıştır.

A DYNAMIC ANALYSIS OF A PUBLIC TRANSPORTATION VEHICLE WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In this study, one of Mercedes Benz Turk A.Ş.'s products, Conecto C's modal analysis is prepared by the finite element method. Conecto C, which is a city bus with three doors, is a member of O 345 family. Made analysis and found solutions in this study, are important for the development of the whole family.

In the modal analysis, structure's natural frequency and mod shapes are obtained. These are, started with a certain pulse, and unless there is friction or dumping force, sustain infinitively showing the free vibration characteristic. This characteristic is only a function of the system's physical feature.

As it is occurred by the minimum potential and deformation energy, the first mod shape has a great importance. Engineering problems that has harmonic inputs have to be solved for many natural frequencies. These, give information for the behaviors of the structure for dynamic loading.

Structure's weight, weight distribution and stiffness are the master parameters for mode shapes so as it is in the natural frequency. All parameters' mutual effects become clear in the moment of inertia. The body's moment of inertia has an inverse proportion with the natural frequency. That means rise in the body's moment of inertia, will make the natural frequency fall.

3-D solid modeling of the study is prepared in CATIA by the constructors of the Body-Structure group. Some of the necessary elimination for the finite element method is done in CATIA and models are transferred to MEDINA by using the MEDINA's CATIA interface. MEDINA is software that is used for the preparation of the finite element models, and is especially effective in vehicle carcass modeling. By joining the 2-D glasses and 1-D masses and axle models, the 2-D model is finalized in MEDINA. By entering the software the geometric features and the materials of the elements, which are appointed in the modeling phase, this phase is completed.

In the modeling phase, beam element (BEAM4), shell element (SHELL63), solid element (SOLID45), mass element (MASS21) and spring dumper element (COMBIN14) are used.

Some assumption and simplifications are being used in an analysis that will be prepared with finite element method. Some of the assumptions that are used are listed below:

- The CAD geometry that is used is accepted to represent the body.
- Deformation is accepted to be as small as having a linear solution.
- Interior trims that have decorative qualities are omitted as they are thought to have no effect on strength.
- Material qualities are thought to be in the linear region and are not variable by the different loads and are thought to be isotropic (or orthotropic).

- All analyses are thought to be done in the room temperature. And the probability that materials qualities may change by the temperature are omitted.
- Continuous and spread mass distributions are represented on a node in the model.
- The unfastening in the joining regions is omitted.
- Weldings of the structure are thought to be ideal and perfect.

The modal analysis, to obtain the necessary knowledge, is formed in three phase. These;

- Analysis of the carrier construction
- Carcass analysis
- Vehicles analysis.

In the first two analyses it is seen that the first mode of the vehicle is not bending but torsion. Bending is come out in the second mode. In this mode shape, as the bottom of the bus is more rigid than the roof, roof lost more shape.

In the vehicle model, containing coatings, glasses, masses and axle, the global modes that are seen in the low frequencies come out with the effect of the axles. By the information from the global modes seen in the first analyses, many global modes that are seen in this analysis are variations of one global mode affected by the local modes.



1. GİRİŞ

Bu çalışmada, Mercedes-Benz Türk A.Ş. tarafından üretilen O 345 ailesinden 3 kapılı şehirli otobüsü olan Conecto C'nin modal analizi sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır.

Otobüslerin mekanik tasarımında, geometrik çözümlerin, mukavemet, titreşim ve ısı gibi pek çok analize tabi tutulması gerekmektedir. Bunlar da üretim sürelerini ve maliyetlerini oldukça yükseltmektedir. Bunun doğal sonucu olarak, bilgisayar ortamında yapılan tasarımlara analiz sonuçlarının yansıtılarak ilk üründeki sorunların en aza indirgenmesi tasarımcının hedefi olmaktadır. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen tüm bu çalışmalar üretim süresini ve maliyetini düşürürken, ürün kalitesini ve güvenilirliğini artırmaktadır.

Bütün mekanik sistemlerde olduğu gibi otobüslerde de titreşim, hem yolcu konforu hem de otobüsü oluşturan elemanlar için problem teşkil etmektedir. Hareket eden ilk taşıttan bugüne kadar bu problemin çözülmesi için çeşitli sistemler tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Yol yapımı, taşıt üretim teknikleri ve kullanılan teknolojiler ilk zamanlara göre büyük gelişme göstermiş, bu gelişme taşıtların hızlarına da yansımıştır. Dolayısıyla çıkan titreşim problemleri de karmaşıklaşmıştır.

Titreşim problemlerini çözmenin temeli, problemin doğasını anlamaktır. Bir yapı herhangi bir yüklerle zorlandığı zaman hareket edecektir. Eğer yükleme bir frekansa bağlı olarak değişiyor ve bu frekansta yapının doğal frekansının $1/3$ 'den daha düşük ise problem statik problem olarak sınıflandırılabilir. Diğer yandan yükleme yüksek frekanslı veya rasgele olarak değişiyorsa veya yük aniden uygulanıyorsa, problem için dinamik analiz gerekmektedir. Dinamik analizde de statik analizde olduğu gibi rijitlik matrisi kullanılmakta, fakat bir kütle ve bir sönüm matrisine de analiz için gerek duyulmaktadır.

Dinamik yapı analizi, statik analize göre daha fazla çalışma gerektiren bir analiz türüdür. Yükleme zamanın bir fonksiyonudur. Dinamik analizde çeşitli metotlar aynı amaca ulaşılabilceği gibi, aynı model için değişik amaçlar için analizler

gerçeklenebilir. Dinamik analizin diğerk bir zorluğu da sonuçların kontrolü için gerekli adımlardan biri olan yapının davranışını mevcut şartlar altında kestirmektir (statik analiz için bu çok daha kolay şekilde yapılabilir). Diğerk yandan yapı statik ve dinamik yükler altında oldukça farklı tepkiler verebilir.

Dinamik analizlerde ilk adım olarak genelde doğal frekans değerkleri ve bu frekanslara ait şekil değıştirme modları hesaplanmaktadır. Bu değerkler yapının her hangi bir zorlayıcı kuvvet altındaki davranışını tespit ederler. Bu modları inceleyerek zorlayıcı kuvvetlerin yapıya hangi modlarda daha çok enerji verebileceğini ve yapının hangi noktasındaki tepkiye hangi modun daha büyük katkı yapacağını görülebilir. Bu çalışma kapsamında da bu ilk adım gerçekleştirilmiş ve Conecto C'nin doğal frekansları ve mod şekilleri bulunmuştur.

Harmonik girdilerin bulunduğu bir dizayn için doğal frekansların bilinmesi, rezonans bölgelerinden kaçınılması gerekliliği nedeniyle çok önemlidir. Modal analizin temel amacı, sistemin işletme frekansında ya da işletme frekansı aralığının yakınlarında rezonans frekansı oluşturacak doğal frekansların bulunmadığını kesin olarak saptanmasıdır. Bunun yanında yolcu konforu açısından da modal analizin önemi vardır. Yolcuları rahatsız edecek frekansların sayahat esnasında oluşamayacağından emin olunmalıdır. Kompleks yapıların modal analizinde kullanılan sonlu elemanlar metodu çok iyi, bazen de tek yöntemdir.

Çalışma tek otobüs için yapılmış olsa da aslında tüm Conecto ailesini ilgilendirmektedir. Zamanın ve iş gücünün en verimli şekilde harcanması gerekliliğinden, bir aileye ait analizler tüm otobüslerde ayrı ayrı yapılmak yerine ailenin ilgilenilen konuda en zayıf üyesi üzerinde yapılır.

Taşıt dinamiğiyle ilgili dikkat çeken ilk çalışmalar 1920'lerde, yönlendirme, kararlılık ve süspansiyon konusundaki ilk yayınlar da 1930'larda yapılmıştır. Taşıt dinamiğindeki ilk yayınlardan 90'lı yıllara taşıt dinamiğindeki temel gelişmeler Segel ve Crolla tarafından özetlenmiştir.

Üniversite-Sanayi İşbirliği projesi çerçevesinde, Mercedes-Benz Türk Geliştirme Test Homologasyon (GTH) Bölümü içerisinde yürütölen analiz çalışmaları kapsamında, Özdemirci (2001), O-345 (Conecto C) otobüsene ait olan orta altyapının, Yiğit (2001), aynı otobüsün öngögüs iskeletinin sonlu elemanlar modelini hazırlanmıştır.

Konunun araç ömrü ve yolcu konforu açısından önemi nedeniyle üreticilerin hemen hemen hepsi bu konuda analizler yapamaktadırlar. Yayınlanmış olanlarından bazıları şunlardır;

Kotil ve diğ. (1999), çalışmalarında bir tramvayın statik ve dinamik analizlerini sonlu elemanlar metoduyla yapmışlardır. Çalışma sırasında ANSYS yazılımını kullanmışlardır. Statik analiz kritik yüklemeler için yapılmış ve analiz sonuçları doğrultusunda araç üzerinde gerekli değişiklikler yapılmıştır. Son aşamada ise en son model kullanılarak aracın serbest titreşim analizleri gerçekleştirilip, 0-100 Hz aralığına tekabül eden doğal frekanslar ve mod şekilleri bulunmuştur.

Gül ve Kaydıhan (1999), çalışmalarında Delta Denizcilik tarafından dizayn edilmiş 200 teu konteyner kapasiteli bir feeder geminin yapısal analizlerini yapmışlardır. Statik analizin ardından, modelin titreşim modları bulunarak, geminin çalıştığı deniz şartlarının veya gemide bulunan çeşitli titreşim yaratan ekipmanların bu modlarla çakışıp çakışmadığını kontrol etmişlerdir.

Ersoy ve Muğan (2002), çalışmalarında yeni Galata köprüsünün üç numaralı kanadının, sonlu elemanlar yöntemiyle doğal frekans analizini yapmış ve çıkan sonuçları ölçüm değerleri ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca ölçüm sırasında elde edilemeyen daha ileri mod şekil ve frekanslarına ulaşmışlardır. Daha sonraki aşamada, model üzerinde deneme amaçlı olarak bazı konstrüktif ilaveler yaparak yapının bunlara verdiği cevaplar elde edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Demirağ (2004), yüksek lisans tezinde farklı taşıt koltuklarının mevcut taşıtlarda oluşturacakları düşey titreşim konforunun hesaplanması ve mevcut taşıt için en uygun düşey titreşim konforunu sağlayan koltuğun seçilebilmesi için bir bilgisayar programı oluşturulmuştur.

Bu çalışma, Mercedes-Benz ürün yelpazesinden Conecto ailesinin Conecto C üyesi için yapılmıştır. Çalışma sırasında aracın katı modellemesi için CATIA, sonlu elemanlar modellemesi için MEDINA, çözümü için ANSYS ve PERMAS, sonuçların incelenmesi için ise ANSYS ve MEDINA yazılımları kullanılmıştır. Modelleme için, kiriş eleman (BEAM4), kabuk eleman (SHELL63), hacim eleman (SOLID45), kütle eleman (MASS 21) ve yay-sönümleme elemanı (COMBIN 14) kullanılmıştır. Karoserinin modellenmesi bittikten sonra dış kaplamalar, camlar, kütleler ve aksların da modele eklenmesiyle modelleme aşaması sona ermiştir.

Elemanların geometrik özellikleri ve malzemeleri modelleme sırasında atanmış olup, bunların özelliklerinin paket programa girilmesi ile analiz aşamasına geçilmiştir. Modal analiz, üç basamakta gerçekleştirilmiş olup ilk basamak aracın temel taşıyıcı kısmının analizi, ikinci basamak karoseri analizi, son basamak ise aracın analizidir. İlk analizlerde aracın ilk modunun eğilme yerine burulma olduğu görülmüştür. Kaplamalar, camlar, kütleler ve akslar içeren araç modelinde ise düşük frekansta görülen global modlar aksların etkisiyle ortaya çıkmıştır. İlk analizlerde görülen global modlar çevresinde görülen çok sayıda global modun aslında tek bir global mod etrafında lokal modların etkisiyle görülmüş varyasyonlar olduğu sonucuna varılmıştır.



2. TOPLU TAŞIMA ARACININ YAPISI

2.1 Giriş

Bu çalışma için seçilen toplu taşıma aracı Mercedes Benz Türk tarafından Türkiye’de üretilen Conecto C tipi belediye otobüsüdür. Şekil 2.1’de Conecto C görülmektedir. Aşağıdaki paragrafta Connecto Ailesi ile ilgili özet bilgi yer almaktadır.



Şekil 2.1 Conecto C

O 345 Connecto ailesi ise Mercedes Benz Türk tarafından imal edilen şehir içi otobüs ailesidir. 1994 yılında başlayan üretim 2004 yılı başında yaklaşık 4650 araca ulaşmış bulunmaktadır. Bu otobüsler Türkiye haricinde Almanya, Fransa, Belçika, Norveç gibi Batı Avrupa ülkelerinin yanı sıra birçok Doğu Avrupa ülkesi, Türkiye Cumhuriyetleri ve Ortadoğu ülkelerine satılmıştır. Bu aile değişik ihtiyaçlara cevap vermek için çeşitlilik göstermektedir. Araç tipleri Şekil 2.7’de görülmektedir.

O 345 Ailesi

Conecto C : 2 ve 3 kapılı versiyonları olan bu araç değişik koltuklandırma seçenekleriyle belediye ve halk otobüsü olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de Conecto C görülmektedir.



Şekil 2.2 Conecto C

Conecto G : 3 ve 4 kapılı versiyonları olan bu araç özellikle yolcu yoğunluğunun fazla olduğu hatlarda kullanılan körüklü otobüstür. Şekil 2.3’de Conecto G görülmektedir.



Şekil 2.3 Conecto G

Conecto U : Okul otobüsü olarak adlandırılan bu otobüsün değişik konum ve ebatlarda olmak üzere her ikisi de 2 kapılı, 2 değişik versiyonu vardır. Servis aracı olarak kullanılabilcek koltuklandırmaya sahiptir. Şekil 2.4’de Conecto G görülmektedir.



Şekil 2.4 Conecto U

Conecto H : Ailenin diğer üyelerine göre 145 mm daha yüksek olarak tasarlanan bu otobüsün de koltuklandırması yine belediye otobüsünden farklıdır. Şekil 2.5’de Conecto H görülmektedir.



Şekil 2.5 Conecto H

Conecto M : Bu otobüs ise ailenin diğer fertlerine göre 88 santimetre daha uzun olması nedeniyle diğer otobüslerden daha fazla oturan yolcu kapasitesine sahiptir. Servis aracı olarak fazla kapasitesi nedeniyle tercih edilmektedir. Şekil 2.6'da Conecto M görülmektedir.



Şekil 2.6 Conecto M

0345 Gelenkbus	0345 Conecto C	0345 Conecto U

0345 Conecto H	0345 Conecto M 12.8m

Şekil 2.7 O 345 Araç Tipleri

2.2 Temel Boyutlar

Conecto C ile ilgili temel boyutlar aşağıda verilmiştir.

Uzunluk	: 11,818 mm
Genişlik	: 2.500 mm
Yükseklik	: 2.945 mm
Maksimum Yükseklik	: 3.081 mm (Klimalı versiyonda)
Dönüş Çapı	: 21.860 mm
Dingil Aralığı	: 5.875 mm
Ön Dingil Çıkıntısı	: 2.583 mm
Arka Dingil Çıkıntısı	: 3.360 mm
Lastik Boyutu	: 11 R 22.5 x75
Kapı Yüksekliği	: 2.089 mm
Kapı Genişliği	: 1.350 mm
Ayakta Durma Yüksekliği	: 2.180 mm
Yaklaşma Açısı	: 9°
Uzaklaşma Açısı	: 9°
Motor	: OM 447 hLA
Çıkış Gücü (2200 rpm)	: 184kW (250 hp)
Maksimum Tork (1100 rpm)	: 1100 Nm
Silindir Sayısı	: 6
Motor Hacmi	: 11.967 cm ³
Vites	: 6 manuel – otomotik (opsiyonel)
Yakıt Deposu	: 235 litre

Araça ait temel boyutlar Şekil EK.1 de gösterilmiştir.

2.3 Araç Karoserisi

Conecto ailesi kaynakla birleştirilmiş, dikişli çelik profillerden üretilmektedir.

Yapısal kararlılığı, ECE R 66¹ normuna uygun olarak tasarlanır.

¹ ECE R 66 : Bu norm gereği, tek katlı bir yolcu otobüsü 800 mm yüksekteki bir platformdan sağ ve ya sol tarafından güçsüz olanın üstüne serbest düşmeye bırakıldığında yaşam bölgesi olarak tanımlanan bölgeye araç konstrüksiyonundan herhangi bir parça girmemelidir. Yaşam bölgesi normda tanımlanmıştır.

2.3.1 Karoseri Üretimi

Aracın karoserisi, 3 değişik üretim aşamasından geçer, bunlar;

1. Şase üretimi (alt yapı)
2. İskelet üretimi (üst yapı)
3. Sac kaplama

Araç imalat bildirisine göre önceden hazırlanan ön, orta, arka alt yapılar birleştirilerek alt yapı oluşturulur. 7 istasyon boyunca şaseye çeşitli parçalar kaynatıldıktan sonra, hassas bir şekilde yanduvur formuna göre şase kol kesimi yapılır. Son kontroller yapıldıktan sonra şase transport araçları yardımıyla iskelet bandına kaydırılır.

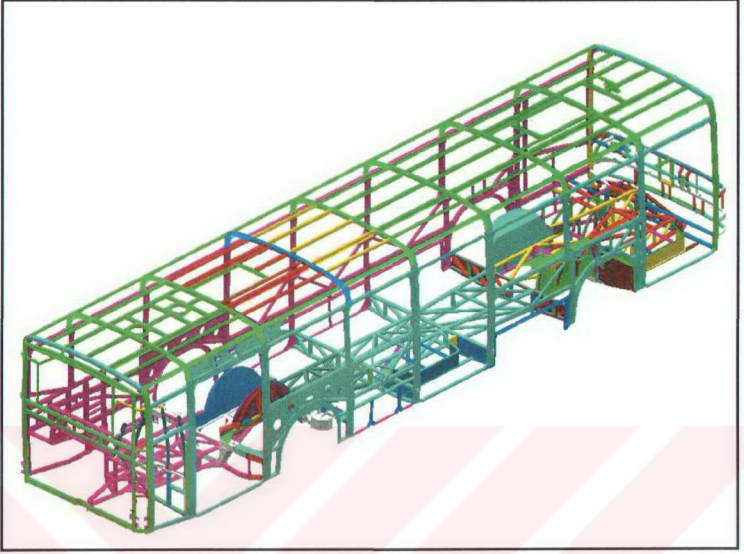
İskelet bandında imalat bildirisine göre önceden hazırlanan yanduvur, tavan, ön ve arka iskeletler birleştirme istasyonunda şasi ile birleştirilir. Bu aşamdan sonra 5 istasyon boyunca üst yapıda öngörülen parçalar kaynak edilir. Kaynak işleminden dolayı meydana gelen kaynak çekmeleri doğrultulduktan sonra araç içinde ve dışında taşlama işlemi yapılarak kaplama bölümüne kaydırılır. Bu aşamaya gelmiş araç şekil 2.8'de görülmektedir.

Sac kaplama bandında araca podest, davlumbaz kaynatılır. Lift istasyonunda araç aşağı yukarı hareket ettirilerek yan duvar, tavan, ön, arka bombe sacları puntalanır. Puntalama işleminden sonraki 5 istasyon boyunca kaporta işlemleri ve aracın son kontrolü yapılarak araç boyahaneye teslim edilir.

Boyahane sonrasında aracın bagaj tabanı yapıştırılır, ön ve arka kaplamalar takılır, arka sağ sol bombe içine poliüretan köpük sıkılır. Son kontroller yapıldıktan sonra araç diğer ünitelerinin takılacağı istasyonlara sevk edilir.

2.3.2 Kaplamalar

Dış metal kaplamalar	: Galvanizlenmiş çelik
Ana iskelet metal kaplamaları	: Galvanizlenmiş çelik
Lastik boşluğu kaplamaları	: Galvanizlenmiş çelik
Giriş kaplamaları	: Galvanizlenmiş çelik
Servis kapakları	: Alüminyum (3 mm kalınlığında)
Bagaj kapakları	: Alüminyum (3 mm kalınlığında)
Ön kaplama	: Plastik (Fiberglasla güçlendirilmiş)
Arka kaplama	: Plastik (Fiberglasla güçlendirilmiş)



Şekil 2.8 Kaplamasız Araç Katı Modeli

2.3.3 Korozyon Koruması

Hidrolik sistem	: ST 35 NBK
Basınçlı su sistemi	: ST 35 NBK ve PA
Su sistemi	: Pirinç
Boya	: Astarlama + Tek renkli fırınlanmış boya

2.3.4 Kapılar

Conecto C, konumları Şekil EK1.1’de görülebilen 3 adet kapıya sahiptir. Her üç kapı içe doğru açılan çift kanada sahiptir. Yanduvar üzerindeki kapı açıklığı 1350 mm olup, iç kapı genişliği 1250 mm’dir.

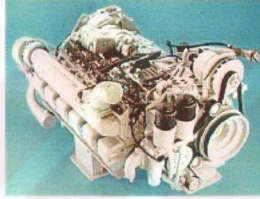
2.4 Sürüş

2.4.1 Motor

Conecto C, Euro III² diesel motorlu bir araçtır. Motor OM hLA olup, bu araçta kullanılan 2 çeşidi vardır:

- 185 kW (252 bhp)
- 220 kW (300 bhp)

OM 457 hLA, su soğutmalı olup sıralı 6 adet silindire sahiptir. Turbo olmasının yanında tam elektronik kontrollüdür. 1558 x 971 x 758 mm boyutlarında olup ağırlığı 1,020 kg dır. Şekil 2.9'da OM 457 hLA'nın resmi görülmektedir.



Şekil 2.9 OM 457 hLA

2.4.2 Soğutma

3 kapılı versiyonda dik, 2 kapılı versiyonda yatay olmak üzere 2 tip radyatör vardır. Aracın arkasında sağ tarafta yer alman radyatör, bakım kolaylığı açısından menteşe ile araca monte edilmiştir. Genleşme tankı radyatörün sütünde bulunmaktadır ve doldurma ağzına bir servis kapağı ile ulaşılabilir. Euro III motor nedeniyle yüksek soğutma kapasiteli bir fana sahiptir.

2.4.3 Vites

Manuel ve otomatik olmak üzere 2 çeşidi mevcuttur. ZF ve Voith firmalarının ürettiği çeşitleriyle araca uygulanabilir. Vites çeşitleri Şekil 2.10 ve 2.11 de görülmektedir.

² Euro III : Bir düşük emisyon normu olan Euro III, aynı zamanda kablo tasarrufu ve motaj kolaylığı sağlayan Control Area Network veri trafik sistemi üzerine kurulmuştur. Sistem sadece düşük zararlı emisyon normuna uygun PDL motorları çalıştırmakla kalmayıp araç üzerinde bulunan tüm aksamın montaj, kullanım ve arıza arama kolaylığı sağlayacak şekilde tümleştirilmesine imkan tanımaktadır. Bu tip Telligent® araçlarda öğrenim fren sistemi, motor, şanzıman ve körük sistemleri ile etkileşimli çalışmakta ve fren mesafesini kısaltmaktadır.

3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

3.1 Giriş

Taşıt tasarımı ile ilgili gelişmede konvansiyonel hesap yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda “Sonlu Elemanlar Metodu” önemli bir çıkış noktasıdır. Sonlu elemanlar metodunun gerçek anlamda avantajlı olabilmesi, metodun kendine özgü şartlarının yerine getirilmesine, metodun doğru kullanılmasına ve taşıtın geliştirilmesiyle ilgili süreçte hatasız olarak entegre edilmesine bağlıdır. Bunlar, bu konuda yetişmiş eleman gibi, gelişmiş bilgisayar donanımları gibi, uygun paket programlar gibi hususlardır.

Sonlu elemanlar metodu tek başına taşıt gövdesini geliştirmeye yeterli değildir. Ancak bu metod, geliştirme süresini kısaltmayı, hatalı geliştirmeden kaçınmayı, böylece zaman, malzeme ve personel masraflarından tasarrufta bulunmayı sağlar. Ayrıca geliştirme çalışmaları sırasında yapılan değişikliklerin aracın iskelet yapısı üzerinde meydana getirdiği etkilerin önceden görülmesini sağlayarak bir yandan geliştirme aşamasında konstrüktörlere ve kritik noktaların tespiti konusunda ölçüm mühendislerine yol gösterici bir rol üstlenirken bir yandan da aracın kullanımı sırasında ileride meydana gelebilecek sorunların konumları hakkında fikir verir. Bunların dışında yeni modelleri yeni malzemelerle tamamen teorik olarak denemeye ve böylece yeni gelişmelere ışık tutmaya da yarar.

Bu proje kapsamında yapılmış olan Conecto C tipi otobüse ait sonlu elemanlar modeli, bu konuda Türkiye’nin önder şirketlerinden biri olan Mercedes Benz Türk firmasında Karoseri grup şefliğine bağlı olan Hesaplama alt grubunda yapılmıştır. Modelin hazırlanmasında benim de içinde bulunduğum 4 kişi çalışmıştır. Bu 4 kişinin bir yıllık emeği sonucunda ortaya çıkan modelde yaklaşık 400000 eleman, 375000 düğüm noktası ve 2.250.000 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Modelin hazırlanması sadece bilgisayar başında paket program kullanılmasından ibaret olmayıp, araç başında ve araçta yer alan ağırlıkların tartılmasında harcanan adam/saat’leri de içermektedir. Araç modeli Şekil 3.1’de görülmektedir.

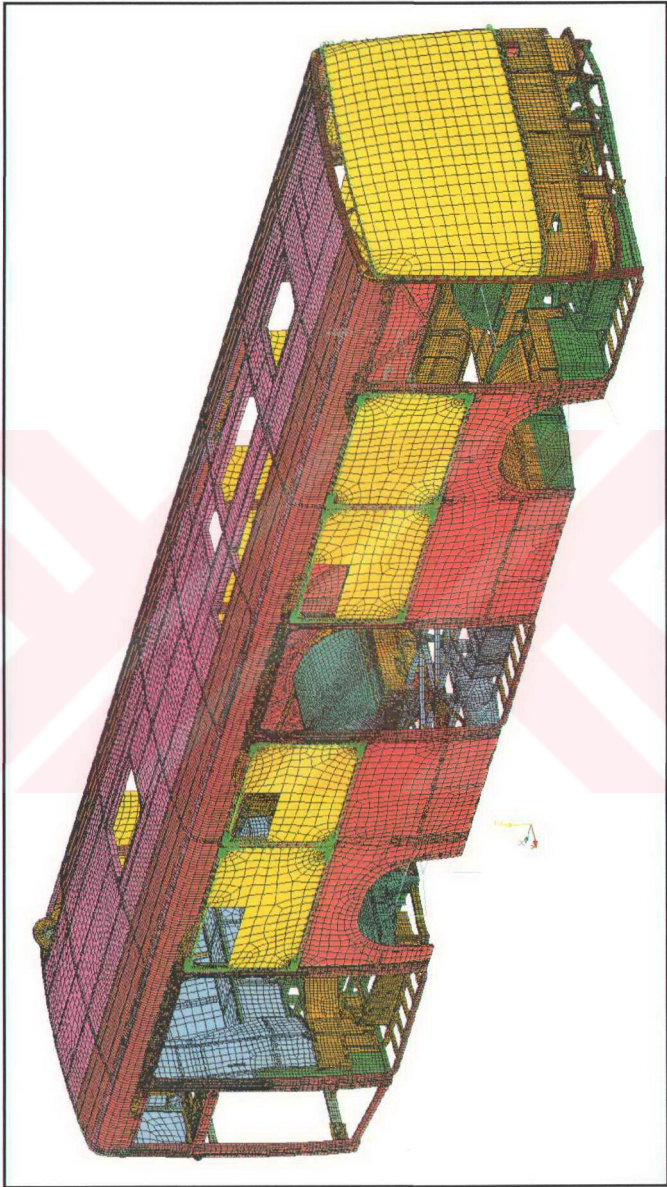
Bu grup temel olarak araç mukavemeti ile ilgilenmektedir. Araç mukavemeti için yapılan modeller, sonlu elemanlar teorisinden gelen özellikler nedeniyle oldukça detaylı olmak zorundadır. Bu detayda modellerin titreşim analizini yapmak çoğu zaman çok zor olmakta bazen ise kullanılan paket programın yetenekleri veya bilgisayar donanımının yetersizliği nedeniyle imkansız hale gelebilmektedir. Bu proje esnasında da bu problemle karşılaşmıştır.

Model, bu konudaki birçok yazılımdan biri olan MEDINA ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan modelin çözülmesi ise çözüm yapma yeteneğine sahip ürün yelpazesinden seçilen ANSYS programında yapılmıştır. Programlar konusundaki ayrıntılar ilgili bölümde verilecektir.

Modelleme çalışmasına, öncelikle kullanılan yazılımların eleman arşivinden uygun elemanların seçilmesi ile başlanmıştır. Bunun için elemanların özellikleri incelenmiş ve benzer çalışmalarda kullanılan elemanlar dikkate alınmıştır. Seçilen bu elemanlarla ilgili bilgiler bölüm 3.4.3'de verilecektir.

Otobüs gibi son derece kapsamlı bir taşıtın kabuk elemanlar kullanılarak detaylı bir modelinin hazırlanması ve bu modelin gelecekte oluşturulacak türevlerinde de kullanılabilmesi için modüler bir yapının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla daha başlangıç aşamasından itibaren sonlu elemanlar modeli, konstrüksiyonun tanımladığı alt gruplar göz önüne alınarak yapılmış ve hazırlanan dokümantasyon içinde hangi grubun hangi aşamada modellendiği detaylı bir şekilde belirtilerek yapı grupları belirlenmiştir. Bu sayede gelecekte yapılması muhtemel değişikliklerin takibi ve modelin aktüel halde tutulması kolaylaştırılmıştır. Ayrıca modelde kullanılan iskelet harici parçalar da tartılarak dokümantasyona eklenmiştir.

Modelin hazırlanması esnasında dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de hangi parçaların göz ardı edilebileceği, hangilerinin ise olabildiğince gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi gerektiğidir. Bu ayrımı yapabilmek için parçaların araçtaki fonksiyonun tam olarak anlaşılması gerekmektedir.



Şekil 3.1 Tüm Aracın Sonlu Elemanlar Modeli

3.2 Titreşim Analizi

3.2.1 Titreşimin Temel Denklemleri

Bir sisteme uygulanan periyodik kuvvet, sistemin titreşimine neden oluyorsa, bu titreşim hareketine zorlanmış titreşim adı verilir. Titreşim, uyarıdaki periyodik değişimle sürdürülür. Titreşim genliği, sistem parametreleri ve uyarı karakteristiklerine bağlıdır. Zorlanmış bir hareketin en genel ifadesi (3.1) diferansiyel denklemi ile verilir:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.1)$$

Bu denklemde, M titreşime uğrayan sistemlerin kütle matrisini, C viskoz sönüm katsayısı matrisini, K elastik yay katsayısı matrisini, F(t) zorlayıcı dış kuvvetleri ve u deplasman değerini ifade etmektedir.

Serbest titreşim, belirli bir uyarı ile başlar ve bu uyarı sisteme belirli bir enerji verdikten sonra ortadan kalkar. Sürtünme veya sönümün olmadığı durumlarda, yani teorik olarak, pozisyon değişikliği ile elastik deformasyonu içeren sistemin potansiyel enerjisi ve kinetik enerjisi arasındaki sürekli değişimden dolayı titreşim sonsuza kadar sürer. Gerçekte, mekanik enerjideki değişim sırasında sürtünmeden kaynaklanan kayıplar nedeniyle, serbest titreşimler zamanla azalarak, sonunda tamamen sönümlenirler. Titreşim genliklerinin azalma mertebesi sistem parametrelerine bağlıdır. Uyarı, hareketin başlangıç şartlarını belirler, dolayısıyla titreşim genliğine etki eder. Sonuç olarak, bu titreşimin ana karakteristiği, sadece sistemin fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olmasıdır. Serbest titreşimde eğer viskoz sönümleyici bulunmuyorsa, (3.2) numaralı denklem oluşur:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.2)$$

(3.2) denklemi harmonik harekete göre düzenlendiğinde;

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{u_i\} = \{0\} \quad (3.3)$$

eşitliği elde edilir. Burada ω_i^2 özdeğerler olup, i ise 1 ile serbestlik derecesi arasındaki değerleri göstermektedir. Ayrıca $\{u_i\}$ terimleri de özvektör olarak adlandırılır. Özdeğerlerin karekökü, yani ω_i doğal dairesel frekanslardır. Özvektörler

$\{u_i\}$ mod şeklini ifade ederler. “Mode extraction” terimi ANSYS programında özdeğer ve özvektörlerin hesaplanmasını sağlayan bir alt program birimidir.

İlk mod şekli, en düşük potansiyel ve şekil değiştirme enerjisi ile oluşur ve doğal frekansın anlaşılmasına yardımcı olur. İkinci ve üçüncü mod şekilleri daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar ve dolayısıyla daha yüksek şekil değiştirme enerjisi içerir. Harmonik girdiler içeren birçok mühendislik probleminde çok sayıda doğal frekansın hesaplanmasına ihtiyaç duyulur. Bunlar, daha sonra yapılacak dinamik yüklemeler açısından bilgi verirler.

Doğal frekansta olduğu gibi, mod şekillerinde de yapının ağırlığı, kütle dağılımı ve katılığı ana parametreleri oluşturur. Bütün parametrelerin ortak etkisi atalet momentinde belirginleşir. Kütle atalet momenti ile doğal frekansın büyüklüğü ters orantılıdır. Yani kütle atalet momentinin artması ile doğal frekansın değeri düşer.

3.2.2 Lanczos Metodu

Lanczos Metodu matrislerin diyagonalleştirilmesi için geliştirilmiştir. Katsayı matrisi, diyagonalleştirildikten sonra özdeğer ve özvektörler efektif olarak hesaplanabilir.

x rasgele bir başlangıç vektörü olsun ve x_1 'i elde etmek için M matrisi ile normalize edilsin;

$$x_1 = \frac{x}{\gamma} \quad \gamma = (x^T M x)^{1/2} \quad (3.4)$$

Ayrıca $\beta_1 = 0$ olsun. Lanczos algoritması ile aşağıdaki eşitlikler kullanılarak $i=2, \dots, q$ için $x_2, \dots, x_q$ vektörleri hesaplanabilir:

$$K\bar{x}_i = Mx_{i-1} \quad (3.5)$$

$$\alpha_{i-1} = \bar{x}_i^T Mx_{i-1} \quad (3.6)$$

$$\tilde{x}_i = \bar{x}_i - \alpha_{i-1}x_{i-1} - \beta_{i-1}x_{i-2} \quad (3.7)$$

$$\beta_i = (\tilde{x}_i^T M\tilde{x}_i)^{1/2} \quad (3.8)$$

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i}{\beta_i} \quad (3.9)$$

Teorik olarak, $X=[x_1, \dots, x_q]$ matrisi aşağıdaki denklemi sağlar:

$$X^T (MK^{-1}M)X = T_q \quad (3.10)$$

Burada, aşağıdaki şekilde, T_q q. dereceden diyagonal bir matristir:

$$T_q = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & & & \\ \beta_2 & \alpha_2 & \beta_3 & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \alpha_{q-1} & \beta_q \\ & & & & \beta_q & \alpha_q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.10 kullanılarak T_q 'nın özdeğer ve özvektörleri $q=n$ olduğu durumlarda $K\phi = \lambda M\phi$ problemleriyle ilişkilendirilebilir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{1}{\lambda} M\phi = MK^{-1}M\phi \quad (3.12)$$

Yani, aşağıdaki dönüşüm kullanılarak

$$\phi = X\tilde{\phi} \quad (3.13)$$

ve eşitlik 3.10 kullanılarak aşağıdaki form elde edilir:

$$T_n\tilde{\phi} = \frac{1}{\lambda}\tilde{\phi} \quad (3.14)$$

3.2.2 İndirgenmiş Metot

İndirgenmiş (reduced) metotta sistem ilk olarak Guyan indirgenmesi ile ana (master) serbestlik derecelerine yoğunlaştırılır. n adet ana serbestlik derecesi takımı, ilgilenilen sistemin doğal frekanslarını karakterize eder. Bu teknik, potansiyel enerjiyi korumakla beraber kinetik enerjiyi bir miktar modifiye eder. Düşük frekansların kinetik enerjisi yüksek frekanslara göre bu yoğunlaşmaya daha az duyarlıdır. Seçilen ana serbestlik derecelerinin sayısı, ilgilenilen doğal frekans sayısının en az iki katı olmalıdır. İndirgenmiş şekil aşağıdaki gibi açıklanabilir:

$$\left\{ \hat{K} \right\} \left\{ \hat{\phi}_i \right\} = \lambda_i \left\{ \hat{M} \right\} \left\{ \hat{\phi}_i \right\} \quad (3.15)$$

Bu denklemde, $[\hat{K}]$ indirgenmiş katılık matrisini, $\{\hat{\phi}_i\}$ özvektörleri, λ_i özdeğerleri ve $[\hat{M}]$ indirgenmiş kütle matrisini ifade etmektedir.

Bu aşamadan sonra, özdeğer hesaplanması aşamasına geçilir. Bunun için kullanılan “Householder-Bisection-Inverse Iteration” tekniği aşağıdaki adımları içermektedir:

3.15 eşitliği istenilen standart özdeğer formuna dönüştürülmelidir:

$$[A]\{\psi\} = \lambda\{\psi\} \quad (3.16)$$

Bu dönüşüm aşağıdaki adımları içerir:

3.15 eşitliğinin her iki yanı $[\hat{M}]^{-1}$ ile çarpılır:

$$[\hat{M}]^{-1}[\hat{K}]\{\hat{\phi}\} = \lambda\{\hat{\phi}\} \quad (3.17)$$

$[\hat{M}]^{-1}$ Cholesky ayrıştırması ile $[L][L]^T$ şeklinde ayrıştırılır. Burada $[L]$ alt üçgensel matristir. Bu ayrıştırma 3.17 eşitliği ile birleştirilirse:

$$[L]^{-T}[L]^{-1}[\hat{K}]\{\hat{\phi}\} = \lambda\{\hat{\phi}\} \quad (3.18)$$

$$\{\hat{\phi}\} = [L]^{-T}\{\psi\} \quad (3.19)$$

şeklinde tanımlamak uygundur.

3.18 ve 3.19 eşitlikleri birleştirilirse:

$$[L]^{-1}[\hat{K}][L]^{-T}\{\psi\} = \lambda\{\psi\} \quad (3.20)$$

veya

$$[A]\{\psi\} = \lambda\{\psi\} \quad (3.21)$$

elde edilir. Burada $[A] = [L]^{-1}[\hat{K}][L]^{-T}$ dir ve simetrisi bu prosedür boyunca korunmuştur.

Aşağıdaki eşitliğin elde edilmesi için Householder metodu kullanılır.

$$[B] = [T]^T[A][T] \quad (3.22)$$

Bu denklemde, [B], [A]'nın diyagonal formunu, [T], [A] matrisini diyagonalleştirmek için kurulan matrisi ifade etmektedir. Özdeğer-özvektör problemi aşağıdaki forma indirgenir:

$$[B]\{\psi\} = \lambda\{\psi\} \quad (3.23)$$

Bu dönüşümler boyunca özdeğerler (λ) değişmemiştir fakat özvektörler aşağıdaki denklem ile ilişkilendirilir:

$$\{\hat{\phi}_i\} = [L]^{-T} [L]\{\psi_i\} \quad (3.23)$$

Konu hakkında ayrıntılı bilgi K. Bathe tarafından yazılan Finite Element Procedures In Engineering Analysis adlı kitapta bulunabilir.

3.3 Kullanılan Paket Programların Tanıtılması

3.3.1 ANSYS Paket Programı

ANSYS, Swanson Analysis System Inc. Şirketi tarafından yaklaşık olarak 30 sene önce geliştirilmeye başlanmıştır. “Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz” konusunda son derece gelişmiş bir program olup yapısal, termal, manyetik alan, elektrik alan, akışkanlar ve bileşik alan analizleri yapmaktadır.

ANSYS paket programı açılışındaki ana menü, program içerisindeki modülleri içermektedir. Program temel olarak ön işlemci (PREP7), çözüm (SOLUTION) ve son işlemci (POST1) modüllerinden oluşur.

3.3.1.1 Ön İşlemci

Ön işlemci (Preprocessing) modülü, geometrik modelin ve sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Geometrik model, kullanılacak olan eleman tipine göre gerekli yerlerde düzeltmeler ve varsayımlar yapılarak ağ yapısı için hazır duruma getirilir. Yapılacak olan analize uygun eleman tipi seçilir, elemanların gerçek sabitleri ve malzeme özellikleri belirlenerek ağ yapısı oluşturulur.

3.3.1.2 Çözüm

Çözüm (Solution) modülünde, yapılacak olan analiz tipi belirtilip sınır şartları tanımlandıktan ve yükler uygulandıktan sonra her bir eleman için eleman katılık

matrisi hesaplanır. Hafızaya alınan bu matris kullanılarak çözüm ve analiz işlemi gerçekleştirilir.

Bu modül içerisinde analiz için kullanılacak çözümleme metodu belirlenebilir. Çözümleme metodları;

- Block Lanczos
- Power Dynamics
- Reduced (Householder) Method
- Unsymmetric Method
- Damped Method
- QR Damped Method

olarak sayılabilir.

3.3.1.3 Son İşlemci

Analiz sonuçlarının elde edilmesinden sonraki değerlendirme ve çözüm sonuçlarının görselleştirilme aşamasıdır. Son işlemci (Postprocessing) modülü, sonuçların bulunduğu dosyaları alarak yapısal deformasyon ve gerilme bileşenlerinin grafik görüntüsünü kullanıcıya sunar. Sonuçlar grafik halinde alınabildiği gibi liste ya da renk dağılımı olarak da temin edilebilir.

Eleman üzerinde yapılan hesaplamalar, elemana ait düğüm noktalarına enterpole edilir. Birden fazla elemana ait olan ortak düğüm noktalarında gerilme değeri, her bir elemandan bu noktaya gelen değerlerin toplanarak ortalamasının alınmasıyla bulunur.

3.3.2 MEDINA Paket Programı

MEDINA sonlu elemanlar paket programı, ağ yapısını oluşturmak, mevcut ağ yapısını değiştirmek ve analiz sonuçlarını gözlemlemek için geliştirilmiş bir yazılımdır. Program, ön işlemci ve son işlemci olmak üzere iki adet ana modülden oluşmaktadır. MEDINA, yukarıda tanıtılmış olan ANSYS programından farklı olarak, kendi içerisinde bir çözücü modül içermediğinden hazırlanan sonlu elemanlar modellerinin hesap işlemleri için mutlak bir çözücü yazılıma ihtiyaç duymaktadır.

Programın en ayrıcalıklı özelliği, bazı CAD programları, sonlu elemanlar programları ve çözücüler için ara yüzler içermesidir. MEDINA'nın doğrudan arayüzü bulunan programlar şunlardır: ABAQUS, ANSYS, AUTOFORM,

AutoSEA, CATIA, LS-DYNA, MARC, NASTRAN, PAMCRASH, PATRAN, STAR-CD, PERMAS.

MEDINA programı uzun yıllar sadece UNIX ortamında çalışmasına karşın, son bir kaç versiyonuyla beraber PC ortamına da taşınmıştır.

3.3.3 PERMAS Paket Programı

1984 yılında kurulan INTES tarafından geliştirilen PERMAS da bir sonlu elemanlar paket programı olup yukarda adı geçen ANSYS ve MEDINA programlarından farklı olarak sadece bir çözücü modüle sahiptir. Ön ve son işlemci olarak MEDINA gibi bir paket programa ihtiyaç duymaktadır. PERMAS, statik, dinamik, ısı transferi, optimizasyon, elektrodinamik analizleri yapabilmektedir.

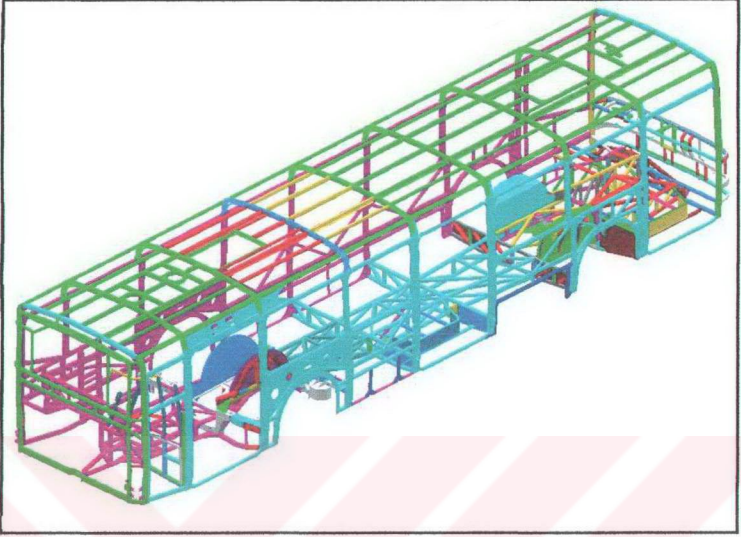
Diğer çözücü paket programlardan farklı olarak kısa zamanda daha az bellek ve boş sabit disk alanına ihtiyaç duyarak analizlerini tamamlar.

PERMAS'ın doğrudan arayüzü bulunan programlar şunlardır: MEDINA, CATIA, PATRAN, I-DEAS, ADAMS, DADS, SIMPACK, NASTRAN, MATLAB.

3.4 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

3.4.1 Geometrinin Ağ Yapısı İçin Hazırlanması

Karoseri grubunun konstrüktörleri tarafından CATIA yazılımı kullanılarak oluşturulan araç iskeleti otobüsün ana taşıyıcı ögesidir. İlk önce üç boyutlu CATIA modelleri, bu ortamda sadeleştirmeler yapılarak sonlu elemanlar analizine uygun hale getirilmiştir. Bu sadeleştirmeler, mukavemet açısından fazla etkisi olmayan deliklerin silinmesi, köşe yuvarlatmaları (fillet) ve bağlayıcı görev yapan bazı elemanların yok edilmesi gibi örneklenebilir. Geometri üzerinde düzeltmeler yapılırken çeşitli varsayım ve basitleştirmelerden faydalanılmış ancak geometrideki değişimin minimum düzeyde tutulmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra MEDINA'nın CATIA-arayüzü kullanılarak modeller MEDINA programına transfer edilmiştir. CATIA ortamında hacimlerden oluşan model, transfer sonrası MEDINA ortamında çizgi ve alanlar şeklini almaktadır. Şekil 3.2'de şehirci otobüsüne ait iskeletin CAD ortamındaki katı modeli görülmektedir.



Şekil 3.2 Otobüs İskeletinin Katı Modeli

3.4.2 Ağ Yapısının Oluşturulması

3.4.2.1 Ağ Yapısının Boyutunun Seçilmesi

Otobüs yapısı, genel olarak, ince cidarlı borulardan ve sac plakalardan meydana gelecek tarzda tasarlandığından modelleme aşamasında kabuk elemanların kullanılması uygun görülmüştür.

Otobüs içerisindeki taşıyıcı boruları, kiriş elemanlar kullanarak da modellemek mümkündür. Böyle bir modelde borular kiriş olarak tanımlanırken, borular arasındaki sac plakalar kabuk elemanlarla modellenir. Ancak kabuk modele göre çok daha kısa sürede hazırlanan ve çözüm aşaması çok daha az zaman alan kiriş model kullanılarak, kabuk model kadar hassas sonuçlar elde edilemez.

Diğer yandan tamamen üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak da bir model oluşturulabilir. Ancak böyle bir modellemede kullanılabilecek en basit eleman sekiz düğüm noktalı ve 24 serbestlik dereceli bir prizmatik eleman olacaktır. Hesaplamalardaki doğruluk derecesini artırmak amacı ile eleman maksimum uzunluğu ile minimum uzunluğa arasındaki oranın $1/4$ 'den küçük olması zorunluluğu

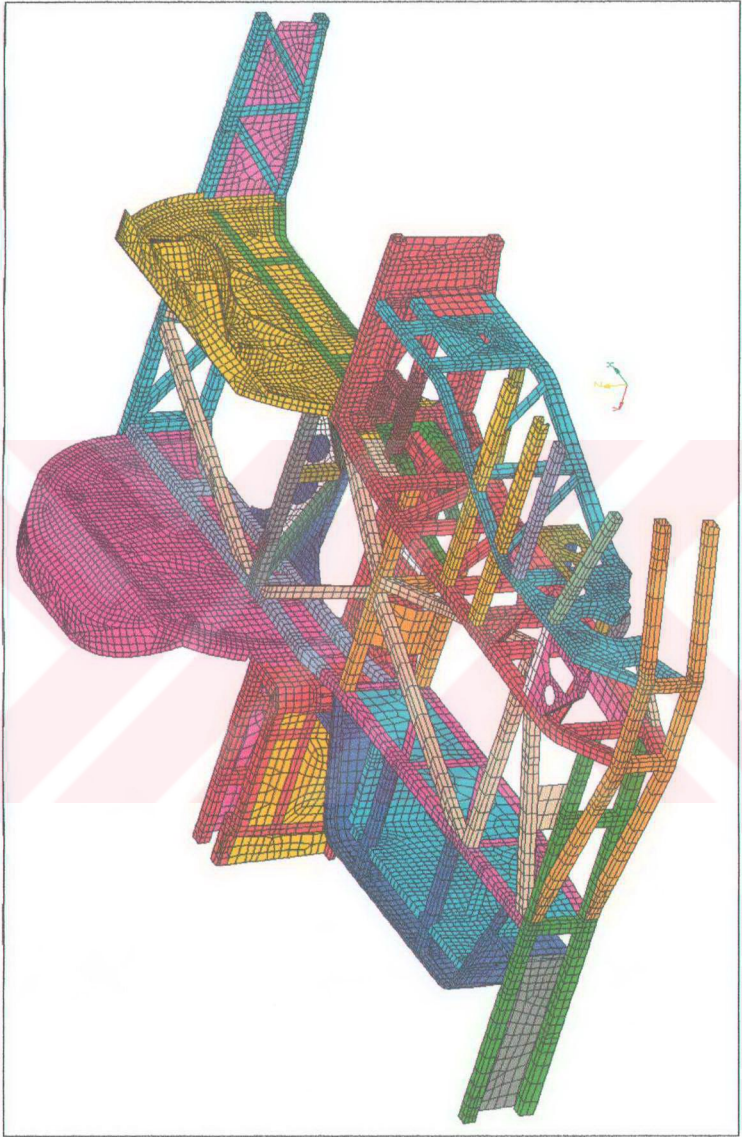
göz önüne alındığında eleman boyutları küçülecektir. Bu ise toplam düğüm noktası sayısını ve serbestlik derecesini artırdığından, problemin çözüm süresini uzatacaktır. *Bilgisayarların ve kullanılan yazılımların kapasiteleri bu mertebede bir eleman sayısı kullanımına müsaade etmediğinden bu yöntem tercih edilmemiştir.*

Taşıyıcı sistemdeki boruların kabuk elemanlar kullanılarak üç boyutlu modellenmesi, eleman kalınlığının değiştirilmesi suretiyle borunun kalınlığının değiştirebilmesi imkanını da sağlamaktadır. Böylece kalınlık bir dizayn parametresi olarak alınarak analizler sonucunda gerekli görülecek dizayn değişikliklerinin kolayca yapılabilmesini mümkün kılmaktadır.

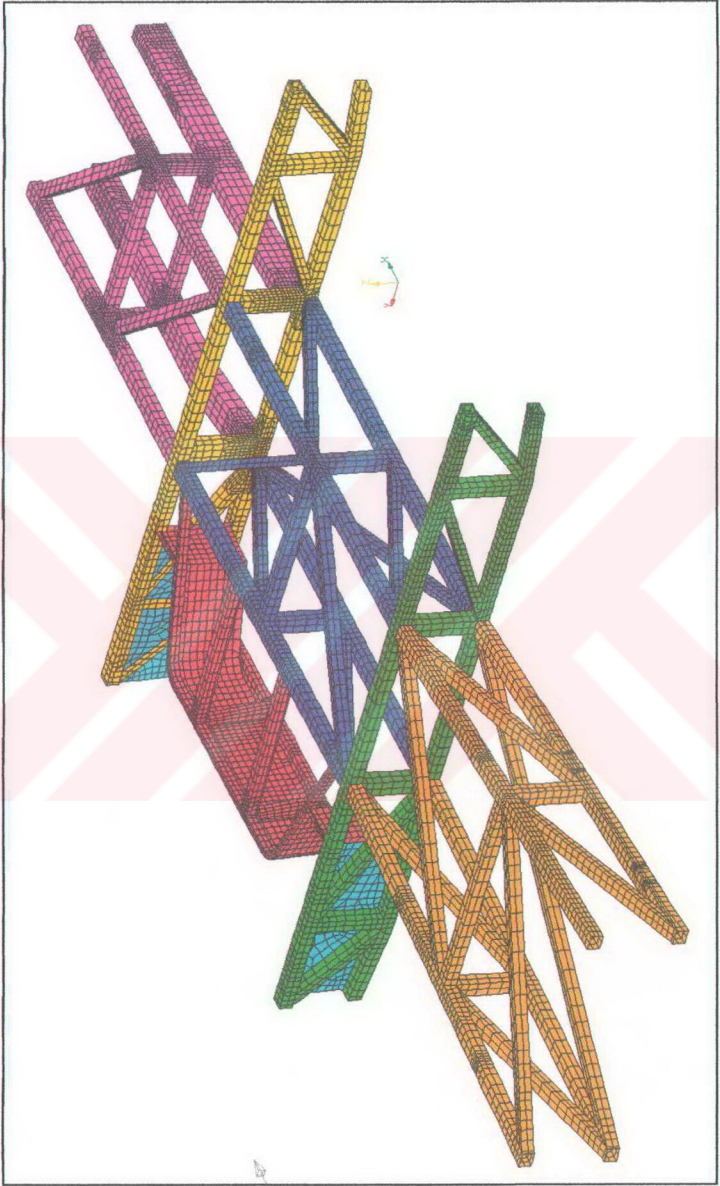
3.4.2.2 Ağ Yapısı

Ağ yapısının sıklığı da model hazırlanmaya başlanmadan belirlenmesi gereken parametrelerden birisidir. Modelin hazırlanışında eleman sayısının artırılması çözümü gerçeğe yaklaştıırken hesaplamaların karmaşıklaşmasından dolayı çözümün süresini uzatacaktır. *Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır. Otobüs iskeleti için uygun büyüklük belirlenmiştir.*

Tüm seçimler ve kabuller yapıldıktan sonra sıra, otobüs iskeletinin, konstrüksiyon grupları baz alınarak MEDINA'ya aktarılıp, ağ yapısının oluşturulmasına gelmiştir. Bu konuda bir sıra olmamasına karşın üretimdeki sırayı takip etmek çalışma kolaylığı sağlar. Ön alt yapıdan başlanan ağ yapısı, taşıyıcı iskeletin yapımı ve son olarak tamamlayıcı parçaların da birleştirilmesiyle sona ermiştir. Bu esnada her konstrüksiyon grubu öncelikle tek başına MEDINA'ya transfer edilmiş, ağ yapısı MEDINA'nın özellikleri kullanılarak yapılmış ve bir önceki grupla birleştirilmiştir. Böylece model her seferinde bir basamak daha büyümüş en son kütle elemanların ve aksların da konmasıyla beraber son halini almıştır. Şekil 3.3 ve 3.4 de bahsi geçen konstrüksiyon gruplarından örnekler görülmektedir.



Şekil 3.3 Ön altyapı



Şekil 3.4 Orta Altyapı

Ağ yapısı içerisinde mümkün olduğu kadar dörtgen elemanların yer almasına özen gösterilmiş, üçgen elemanlar ve aşırı deforme olmuş dörtgen elemanların kullanımından kaçınılmıştır. Geometrinin mecbur kıldığı durumlar dahilinde oluşan üçgen elemanların, mümkün olduğu kadar kritik bölgelerden uzakta kalmasına dikkat edilmiştir.

Model, yük taşımaya birinci derecede katkıda bulunan parçaları içermektedir. Koltuklar, motor, havalandırma sistemi gibi yük taşımaya birinci derecede katkıda bulunmayan diğer aksamlar modele dahil edilmemiştir. Ancak bu elemanların eşdeğer kütleleri model içerisinde ilgili noktalara kütle elemanları olarak etkililerek doğal frekanslara olan etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda kütle eleman olarak modellenen bölümler sunulmaktadır.

- Motor ve bağlı yapılar
- Klima ve klima tesisatı
- Tüm motor soğutma sistemi
- Motor yapısı üzerindeki borular
- Motor taşıyıcıları
- Motor taşıyıcı bağlantılar
- Şanzıman
- Amortisör ve bağlı elemanlar
- Tekerlek ve jantlar
- Fren Mekanizması
- Direksiyon ve aparatları
- Yakıt tankı
- Egzoz ve susturucu
- Hava emiş borusu
- ABS kontrol elemanları kompleksi
- Ana kablo tesisatı
- Sigorta kutusu ve kabloları

- Kumanda hidroliği
- Ön panel
- Kapılar ve mekanizmaları
- Semt göstergeleri
- Silecek tesisatı
- Şoför kabini
- Akü ve bağlantıları
- Koltuklar ve bağlantıları
- Aynalar

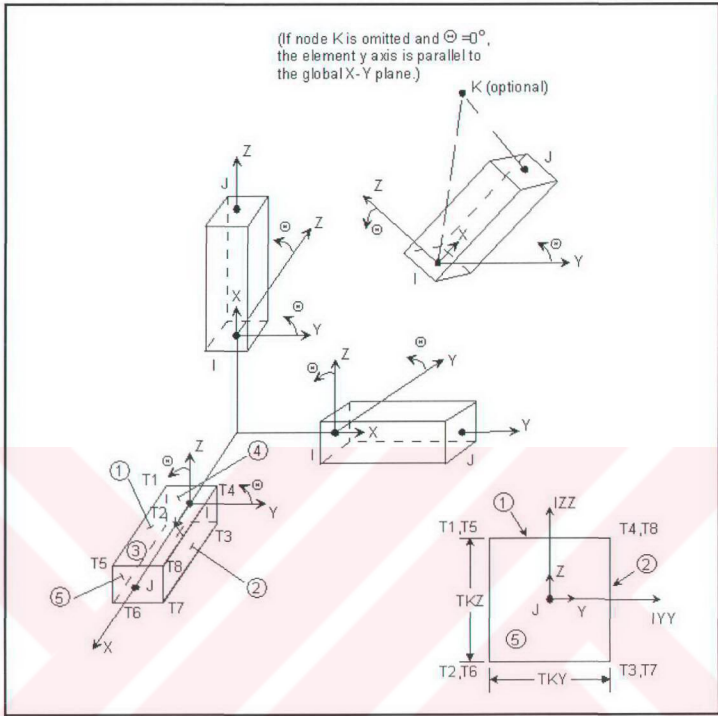
Bu çalışmanın amacı otobüs iskeletinin analizi olduğu için iskelet ve sac kaplamalar haricindeki parçalar detaylı olarak modellenmemiştir. Bu sebepten dolayı aracın ön ve arka aks yapısı bir boyutlu elemanlar ile modellenmiştir. Böylece akslar üzerindeki lokal mod şekilleri incelenmediği halde aksların araç genelinde etkisi görülebilmektedir.

3.4.3 Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Elemanlar

3.4.3.1 Kiriş Eleman

Kiriş eleman (BEAM4), çekme, basma, burulma ve eğilme kabiliyetleri olan tek eksenli bir elemandır. Her bir düğüm noktasında üçü yer değiştirme ve üçü de dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesine sahiptir.

Şekil 3.5’de elemanın geometrisi, düğüm noktalarının yeri (I, J, K) ve elemana ait koordinat sistemi görülmektedir. BEAM4, iki ve ya üç düğüm noktası, kesit alanı, kirişin enine kesitinin asal eksenlere göre iki alan atalet momenti (IYY ve IZZ), enine kesitin Z ve Y yönlerindeki iki kalınlık (TKZ ve TKY), elemanın x eksenine etrafındaki oryantasyon açısı (θ), burulma atalet momenti (IXX) ve malzeme özellikleri ile tanımlıdır. Eğer IXX tanımlanmazsa ve ya 0.0 girilirse elemanın polar atalet momenti $IYY+IZZ$ ’ye eşit olduğu kabul edilir. IXX pozitifdir ve genellikle polar atalet momentinden küçüktür. IXX değeri düştükçe burulma katılığı değeri de düşmektedir. Ayrıca, gerektiği durumlarda birim uzunluk üzerinde ilave kütle tanımlanabilir.



Şekil 3.5 Kiriş Eleman

Elemanın x-ekseni I düğümünden J düğümüne doğrudur. İki düğüm noktalı opsiyonda $\theta = 0$ olması halinde y eksenini otomatik olarak XY-düzlemine paralel olacak şekilde hesaplanır. Çeşitli oryantasyonlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Elemanın global Z-eksenine paralel olması halinde (veya eğimi yüzde 0.01 dahilindeyse) elemanın y-ekseni global Y-eksenine paralel olarak yerleştirilir. Kullanıcı elemanın e-ekseni etrafındaki oryantasyonunu kontrol etmek için θ açısını veya üç düğüm noktası opsiyonunu kullanabilir. Eğer her ikisi birden tanımlanmamışsa üç düğüm noktası opsiyonunun önceliği vardır. Üç düğüm noktası opsiyonunda girilen üç düğüm noktasının oluşturduğu düzlem x- ve z-eksenlerini kapsar.

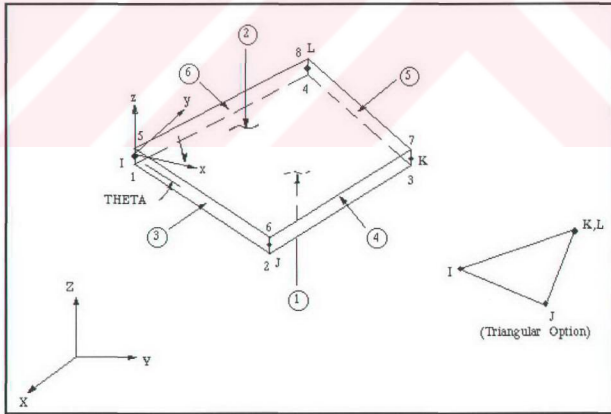
Eleman üzerinde birçok farklı yüklemeler tanımlanabilmektedir. Elemanın yukarıda daire içine alınmış numaralarla gösterilen yüzeyleri üzerinde basınç tanımlanabilir. Bu

tanımlamada, pozitif değer, basıncın yönünün elemanın içine doğru olduğunu gösterir. Yanal basınçlar birim uzunluktaki yükler olarak tanımlanabilir. “Uç basınçlar” kuvvet olarak tanımlanır. Sıcaklık değerleri, gereken durumlarda her bir köşede (T1-T8) ayrı ayrı tanımlanır.

3.4.3.2 Kabuk Eleman

Kabuk Eleman (SHELL63), her bir düğüm noktasında altı serbestlik derecesi bulunan dört düğüm noktasından oluşmaktadır. Bu serbestlik dereceleri, düğüm noktasının x, y ve z eksen yönlerindeki yer değiştirmeleri ile yine bu eksenler etrafındaki dönmelerdir. SHELL63 eğilme ve membran yüklerini taşıma özelliğine sahiptir.

Şekil 3.6’da elemanın geometrisi (dörtgen veya üçgen), düğüm noktalarının yeri (I, J, K, L), köşe noktaları (1-8), yüzeyler (1-6) ve elemana ait koordinat sistemi görülmektedir. SHELL63, dört düğüm noktası, bu noktalardaki eleman kalınlığı ve elemanı oluşturan malzemeye ait gerekli malzeme özellikleri ile tanımlanmaktadır. Eğer ortotropik bir malzeme tanımlanacaksa malzeme özelliklerinin doğrultusu elemanın koordinat sistemi ile çakışmalıdır.



Şekil 3.6 Kabuk Eleman

Elemanın kalınlığı, dört düğüm noktasında tanımlanmış kalınlıklar esas alınarak program tarafından tanımlanır. Eleman kalınlığı her noktada sabit ise bir düğüm noktasındaki kalınlığı tanımlamak yeterli olmaktadır.

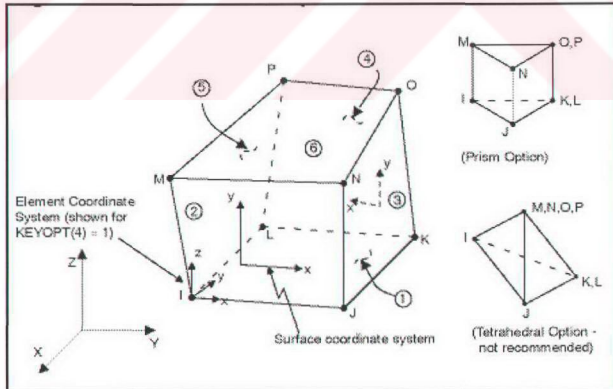
Bu eleman, gerekli bazı değerler tanımlanarak heterojen ya da sandviç kabuk uygulamalarında da kullanılır. Ayrıca, gerektiği durumlarda birim alan üzerinde ilave kütle tanımlanabilir.

Eleman üzerinde birçok farklı yüklemeler tanımlanabilmektedir. Yüklemeler kısaca şunlardır:

- Elemanın yukarıda daire içine alınmış numaralarla gösterilen yüzeyleri üzerinde basınç tanımlanabilir. Bu tanımlamada, pozitif değer, basıncın yönünün elemanın içine doğru olduğunu gösterir.
- Kenar basınçları, düğüm noktalarında toplanarak bu noktalarda noktasal yükler olarak uygulanabileceği gibi elemanın yüzeyine yayılı olarak da uygulanabilir.
- Sıcaklık değerleri, gereken durumlarda her bir köşede (1-8) ayrı ayrı tanımlanır.

3.4.3.3 Hacim Eleman

Hacim Eleman (SOLID45), her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesi bulunan sekiz düğüm noktasından oluşmaktadır. Bu serbestlik dereceleri, düğüm noktasının x, y ve z eksenli yönlerindeki yer değiştirmelerdir. SOLID45 plastisite, sürünme, şişme (swelling), gerilme sertleşmesi, büyük sapma ve büyük şekil değiştirme yeteneklerine sahiptir.



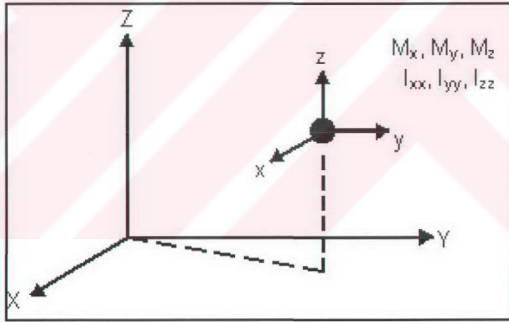
Şekil 3.7 Hacim Eleman

Şekil 3.7’de elemanın geometrisi (sekizyüzlü, üçgen prizma veya piramit), düğüm noktalarının yeri (I, J, K, L, M, N, O, P), köşe noktaları (1-8), yüzeyler (1-6) ve elemana ait koordinat sistemi görülmektedir. SOLID45, sekiz düğüm noktası ve ortotropik malzeme özellikleri ile tanımlanır. Ortotropik malzeme yönleri eleman koordinat sistemine uygun olmalıdır.

3.4.3.4 Kütle Eleman

Kütle Eleman (MASS 21), tek düğüm noktalı bir nokta elemandır. Üçü yer değiştirme ve üçü dönme olmak üzere altı serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Şekil 3.8’de elemanın geometrisi, düğüm noktası ve elemana ait koordinat sistemi görülmektedir. Her bir koordinat yönünde farklı kütle ve atalet momenti tanımlanabilmektedir. Koordinat sistemi kullanıcının tercihiye göre başlangıçta global koordinat sistemine veya düğüm noktası koordinat sistemine paralel olabilir. Eğer bir kütle değeri tanımlanırsa bu değerin tüm koordinat yönlerine etki ettiği düşünülür.



Şekil 3.8 MASS21 Kütle Eleman

Yapılan analiz sonucunda MASS 21 elemanının sadece düğüm noktasındaki yer değiştirme miktarı elde edilir.

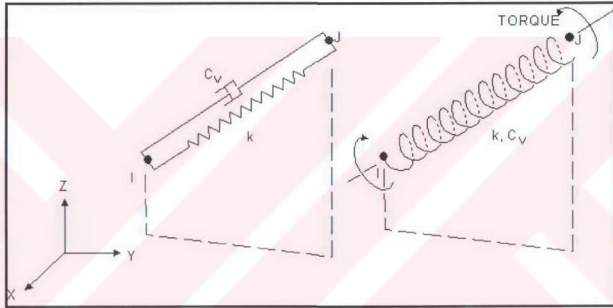
3.4.3.5 Yay-Sönümlleme Elemanı

Yay-Sönümlleme Elemanı (COMBIN 14), çekme-basma ya da burulma opsiyonlu; bir, iki veya üç boyutlu uygulamalarda kullanılan bir elemandır. Çekme-basma opsiyonunda, elemanı oluşturan her iki düğüm noktasının x, y ve z yönlerinde yer

değiştirme olmak üzere üç serbestlik derecesi bulunmaktadır. Burulma ve eğilme yüklemeleri hesaba katılmamaktadır. Burulma opsiyonunda ise düğüm noktalarında sadece x, y ve z eksenleri etrafında dönme serbestlik dereceleri vardır. Bu sefer eğilme ve eksenel yüklemeler hesaba katılmamaktadır.

Bu elemanın kütlesi yoktur. Gerekğinde kütleler MASS21 elemanı ile tanımlanabilir. Ayrıca elemanın yaylanma ya da sönümleme özelliği iptal edilebilir.

Şekil 3.9'da elemanın geometrisi, düğüm noktaları ve elemana ait koordinat sistemi görülmektedir. COMBIN14, iki düğüm noktası, bir yay sabiti (k), ve sönümleme sabitleri $(c_v)_1$ ve $(c_v)_2$ ile tanımlanmaktadır. Statik ve modal analizlerde sönümleme özelliği kullanılmaz.



Şekil 3.9 Yay-sönümleme elemanı

3.4.4 Elemanların Geometrik Özelliklerinin Belirlenmesi

SHELL63 ile modellenen kısımlar için gerçek sabitler olarak farklı profillerin farklı et kalınlıkları tanımlanmakta ve ağ yapısı oluşturulurken elemanlar için uygun et kalınlığı o elemanlara atanmaktadır.

SOLID45 eleman tipi için herhangi bir gerçek sabit atanmasına gerek olmamaktadır.

Kütle eleman için gerekli kütle miktarı tartım sonuçlarından gelen bilgiler doğrultusunda tanımlanırken, COMBIN14 elemanının yay sabitleri grafiklerden okunup programa girilirken, sönümleme katsayısı ise ihmal edilmiştir.

3.4.5 Elemanların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

O-345 belediye otobüsünü meydana getiren plaka ve borular genelde M16 olarak adlandırılan çelikten yapılmış olup malzeme özellikleri, özkütle ve elastisite modülü olarak paket programlara girilmiştir. Sayısal değerler Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1 Malzeme Özellikleri

	Çelik (M16)	Cam
Elastisite Katsayısı (Gpa)	210	71
Poisson Oranı	0,3	0,14
Yoğunluk (kg/m^3)	7850	2480

Son aşamada araç modelinin toplam ağırlığının aracın ağırlığına ulaşmadığı görülmüştür. Bunun sebepleri:

- Modelleme esnasında yapılan basitleştirmeler ve kabuller
- Araçta toplam kütlesi belirlenemeyen unsurlar (civata, somun, kablo vs.)
- Teknik dolayısıyla modellenemeyen unsurlar (kaynak vs.)

şeklinde örneklebilir. Bu sebepten dolayı model ağırlığı araç ağırlığına getirmek için karoseri yoğunluğu gerektiği kadar artırılmıştır.

3.4.6 Sınır Şartları

Yapılan analiz serbest titreşim analizi olmasına karşın, yerçekimi etkisi göz önünde bulundurulduğunda aracın havada asılı kalmayacağı, lastiklerin yere temasta bulunacağı göz önüne alınarak, yapılan son analizlerde araç lastikleri temsil eden yaylar üzerinden sabitlenmiştir. Yapılan ilk karoseri analizlerinde ise yapının tamamen serbest titreşim karakteristiğini ortaya çıkarmak için herhangi bir sınır şartı verilmemiştir.

3.4.7 Varsayımlar ve Basitleştirmeler

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak bir analizde sonucun gerçeğe mümkün olduğu kadar yakın ve mümkün olduğu kadar kısa sürede elde edilmesi için bazı varsayım ve basitleştirmeler kullanılmaktadır. Otobüs modelinde kullanılan varsayımlardan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

3.4.7.1 Geometri

- Kullanılan CAD geometrisinin gerçek yapıyı yeterli ölçüde temsil edebildiği kabul edilir. İmalat toleranslarından doğan, gövde saç aksamına ait kalınlık farkları ve presleme sonucu oluşan kıvrım yerlerindeki incelemeler ihmal edilir.
- Non-linear geometrik pekleşmenin sistemin davranışını etkilemediği düşünülür.
- Deplasmanların, lineer bir çözümü sağlayacak ölçüde küçük olduğu kabul edilir.
- Kontrol edilen bölge dışındaki gerilme davranışı geometrik basitleştirmeler sonucu farklı olabilir. Ancak bu hatalar kontrol edilen bölgedeki değerleri etkilemediği kabul edilir.
- Dekoratif nitelik taşıyan yapılar mukavemet açısından etkisiz kabul edilerek modelde göz ardı edilirler.
- Yapıda çeşitli etkiler nedeniyle oluşabilecek kütle değişimleri göz ardı edilebilir. (örneğin otobüsteki yolcu kütlesi)

3.4.7.2 Malzeme Özellikleri

- Malzeme özelliklerinin lineer bölgede kaldığı ve farklı yük şartlarında değişmediği kabul edilir ve izotropik (veya ortotropik) olarak kabul edilebilir.
- Parça yüzeylerinde gerilme yığılmalarına neden olabilecek geometrik düzgünlüklerin bulunmadığı kabul edilir.
- Kaynak bölgeleri ve ısı etkisinde kalmış bölgeler, ana malzeme ile aynı özelliklere sahip olarak kabul edilirler.
- Tüm analizlerin oda sıcaklığı koşullarında yapıldığı kabul edilir. Malzemenin sıcaklığa karşı özelliklerinin değişebilme ihtimali göz ardı edilir.
- Bağlı neme bağlı olarak malzeme özelliklerinin değişimi ihmal edilir.
- Uzun dönemde malzemenin bütünlüğünü bozabilecek, aşındırıcı etkiler (UV ışınları, kimyasallar vs.) göz ardı edilebilir.

3.4.7.3 Sınır Koşulları

- Sistemdeki sürtünmelerden kaynaklanacak kayıplar ihmal edilir.
- Sürekli ve yayılı kütle dağılımı modelde, nokta üzerinde temsil edilir.

3.4.7.4 Bağlantı Elemanları

- Cıvata ve kaynak bağlantıları gibi montaj yöntemlerinde oluşan gerime yığılmaları ihmal edilir.
- Bağlantı bölgelerinde zaman içerisinde oluşacak çözülmeler göz ardı edilir.
- Bağlantı bölgeleri çoğu zaman kusursuz bağlantılar olarak kabul edilir.
- Sistemdeki tüm kaynak yapıları ideal ve kusursuz olarak alınır.
- Bağlantı elemanlarında oluşabilecek hasarlar göz ardı edilir.

4. SAYISAL SONUÇLAR

4.1 Giriş

Otobüs gibi son derece kompleks bir yapının titreşim karakteristiğini ortaya çıkarmak için tek bir analiz yapmak, özellikle bu konu hakkında bilgi birikimine sahip olunmadığı durumlarda yeterli olmaz. Bütün yapı üzerinde, karakteristiğe etki edecek çok sayıda etken vardır; karoseri konstrüksiyonu, kütle dağılımı, aksların kendilerine ait doğal frekansları örnek olarak verilebilir.

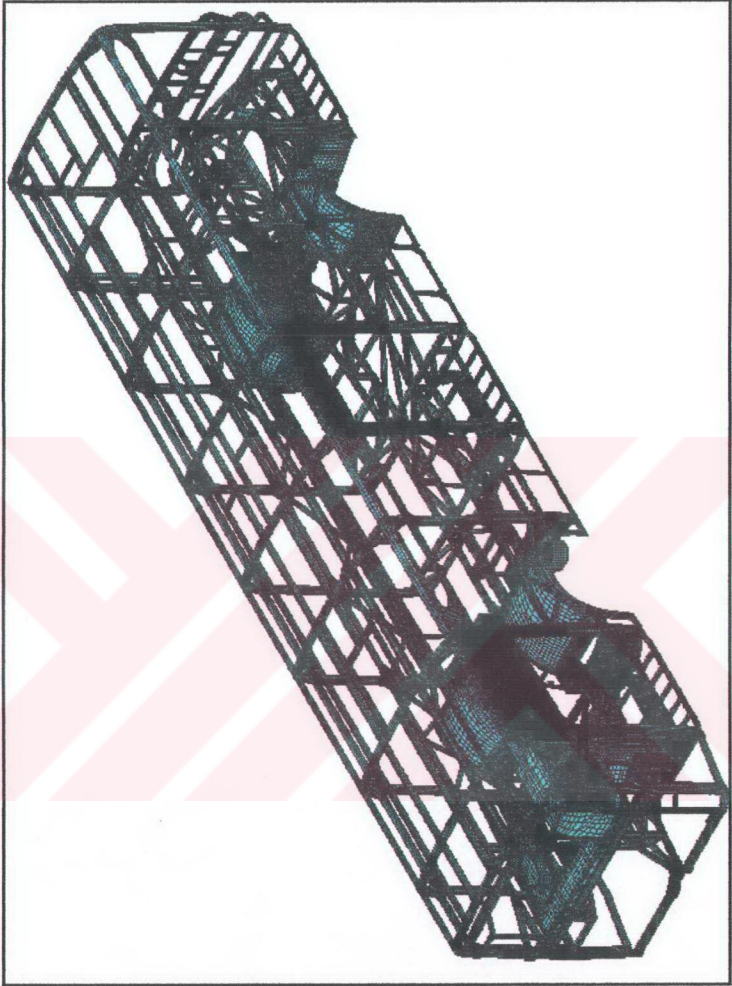
Bu çalışma kapsamında aracın karakteristiğine ait maksimum bilgi edinilmesi için bir dizi analiz yapılmıştır. İlgili bölümlerde her analiz ve sonuçları hakkında detaylı bilgi verilecektir.

4.2 Taşıyıcı Konstrüksiyonun Analizi

İlk analiz olarak, aracın taşıyıcı konstrüksiyonunun modal analizi yapılması uygun görülmüştür. Bu analiz esnasında hiç bir sınır koşulu tanımlanmamıştır. Daha sonraki analizlere temel olması için yapılan bu analizde yapının ilk 5 frekansı bulunmuştur. Bunlardan 1 tanesi lokal olup değerlendirilmeye alınmamıştır. Diğer 4 frekansın değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Taşıyıcı Konstrüksiyonun Doğal Frekansları

Mod No	Frekans (Hz)	Titreşim Türü
1	8.567	Burulma
2	12.210	Eğilme
3	14.677	Kayma
4	18.251	Bileşik kayma eğilme



Şekil 4.1 Taşıyıcı Konstrüksiyonun Sonlu Elemanlar Modeli

Bu analizde kullanılan model Şekil 4.1'de görülmektedir. Yaklaşık olarak 300.000 elemandan oluşan model ANSYS programı ile UNIX ortamında çözülmüştür.

ANSYS paket programında titreşim modlarını hesaplamak için değişik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları direk, bazıları ise iteratif olarak sonuca ulaşırlar.

Katı elemanlar, kabuk elemanlar ve kirişlerden oluşan karmaşık modellerin analizinde iyi sonuç verdiğinden, sınır şartı verilmemiş modlar için elverişli olduğundan dolayı Block Lanczos yöntemi kullanılmıştır.

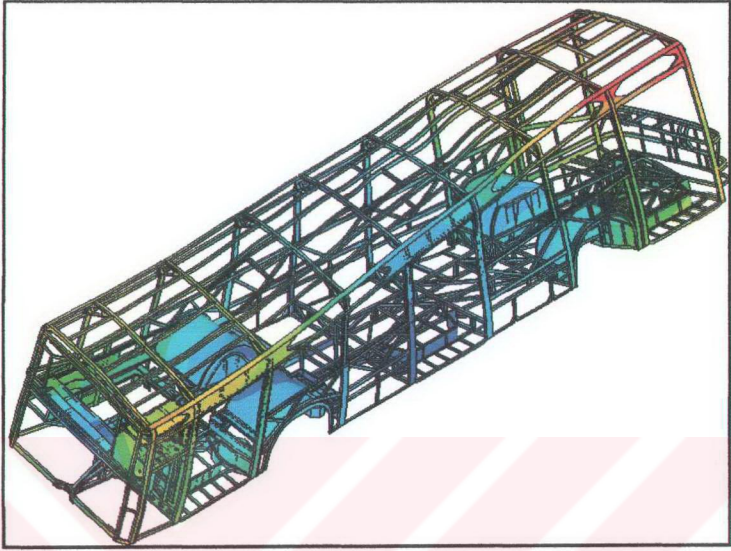
Bu analiz sonucunda bulunan doğal frekanlar ve mod şekilleri sırasıyla Şekil 4.2 - 4.5'de verilmiştir. Tüm renklendirmeler 3 eksendeki şekil değişimlerinin toplamını ifade etmektedir.

Şekil 4.2'de görüleceği üzere taşıyıcı konstrüksiyonun ilk mod şekli beklenen eğilmenin aksine burulma çıkmıştır. Yapılan literatür araştırması ve değerlendirmeler sonucunda, otobüs gibi, metro vagonu gibi yapılarda yolcu taşıma amaçlı olarak araçların iç kısmının boş bırakılması sonucu, burulma rijitliğinin azaldığı ve ilk mod şeklinin eğilmeden burulmaya kaydığı sonucuna varılmıştır.

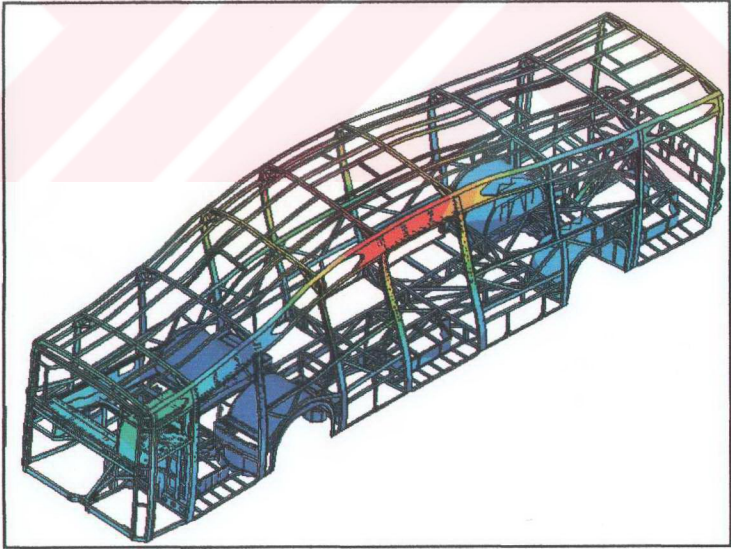
Şekil 4.3'de aracın 2. mod şekli görülmektedir. Beklenen eğilme modu 2. modda ortaya çıkmıştır. Aracın alt yapısının tavana göre çok daha fazla rijit olması sebebiyle eğilme tavanda şiddetli bir şekilde ortaya çıkmasına rağmen alt yapıda çok az gözlemlenebilmektedir.

Şekil 4.4'de aracın kayma modu görülmektedir. Aracın ön tarafında tavan altyapıya göre kayma hareketi yapmaktadır.

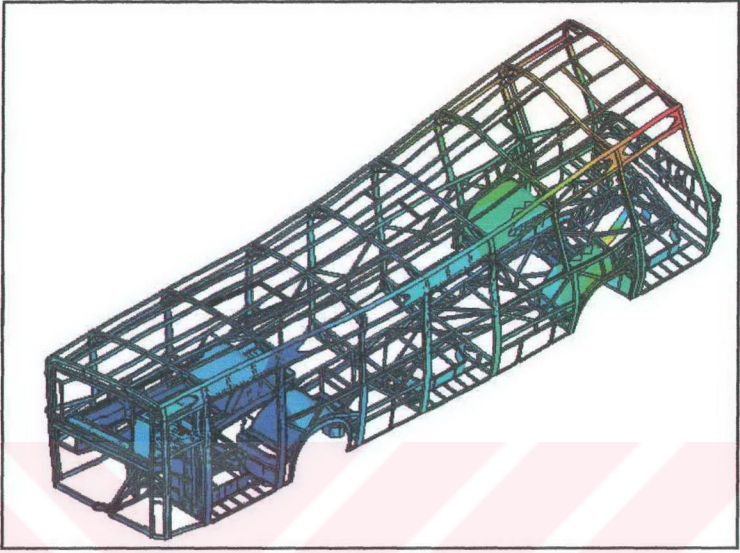
Şekil 4.5'de aracın bileşik kayma eğilme modu görülmektedir. Bu mod şekli karmaşık olduğu için üst, sağ ve izometrik görüntüleri beraber verilmiştir.



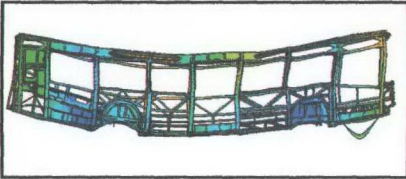
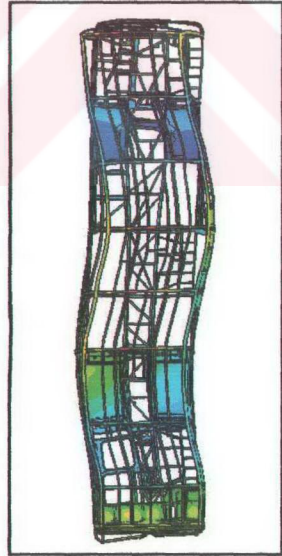
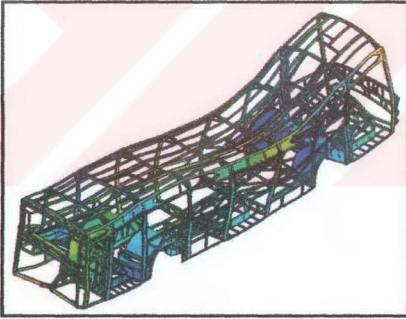
Şekil 4.2 Birinci Burulma Modu - Frekans: 8.567 Hz



Şekil 4.3 Birinci Eğilme Modu – Frekans: 12.210 Hz



Şekil 4.4 Birinci Kayma Modu – Frekans: 14.677 Hz



Şekil 4.5 Bileşik Eğilme-Kayma Modu - Frekans: 18.251 Hz

4.2 Karoseri Analizi

Aracın taşıyıcı konstrüksiyonunun modal analizinin yapılmasından sonraki adım taşıyıcı olmayan parçalarında eklenmesiyle ortaya çıkan karoserinin analizidir. Bu analiz esnasında hiç bir sınır koşulu tanımlanmamıştır. Bu analizde yapının ilk 20 frekansı bulunmuştur. Frekans değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

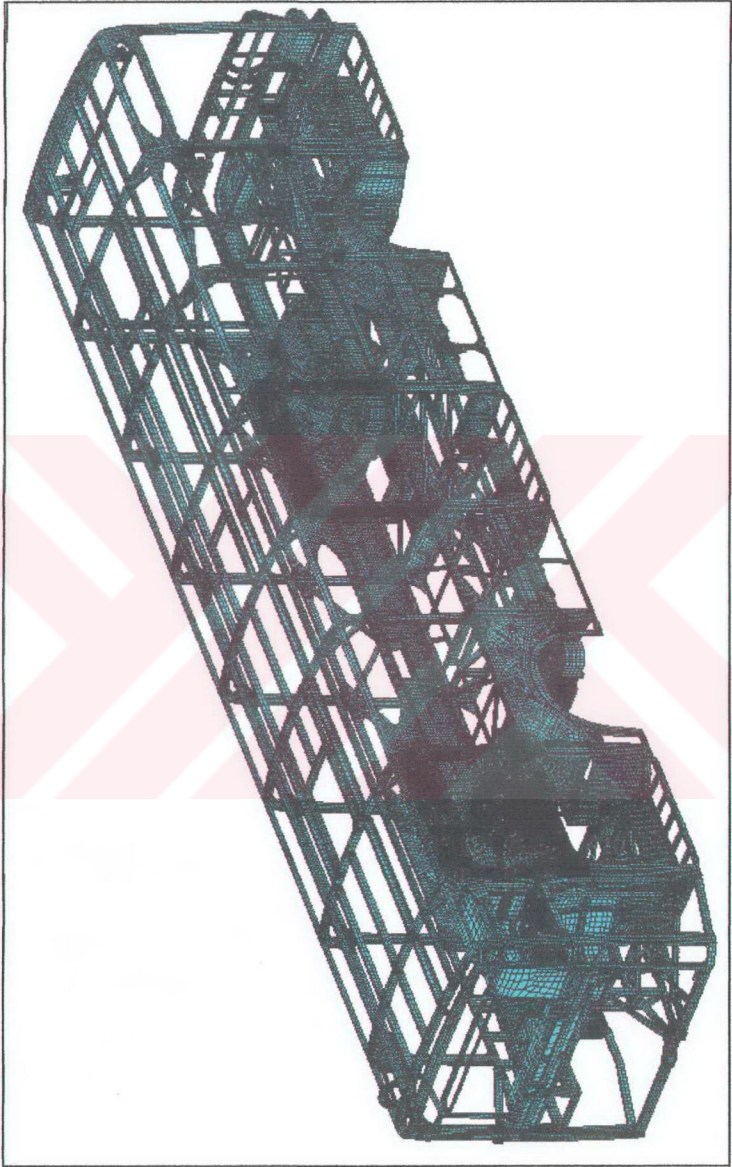
Tablo 4.2 : Araç Karoserisinin Doğal Frekansları

Mod No	Frekans (Hz)	Mod No	Frekans (Hz)
1	8.004	11	36.093
2	12.275	12	38.958
3	14.710	13	40.386
4	19.437	14	41.647
5	19.899	15	42.165
6	21.963	16	48.267
7	25.307	17	49.928
8	28.778	18	57.183
9	29.260	19	67.186
10	33.248	20	79.310

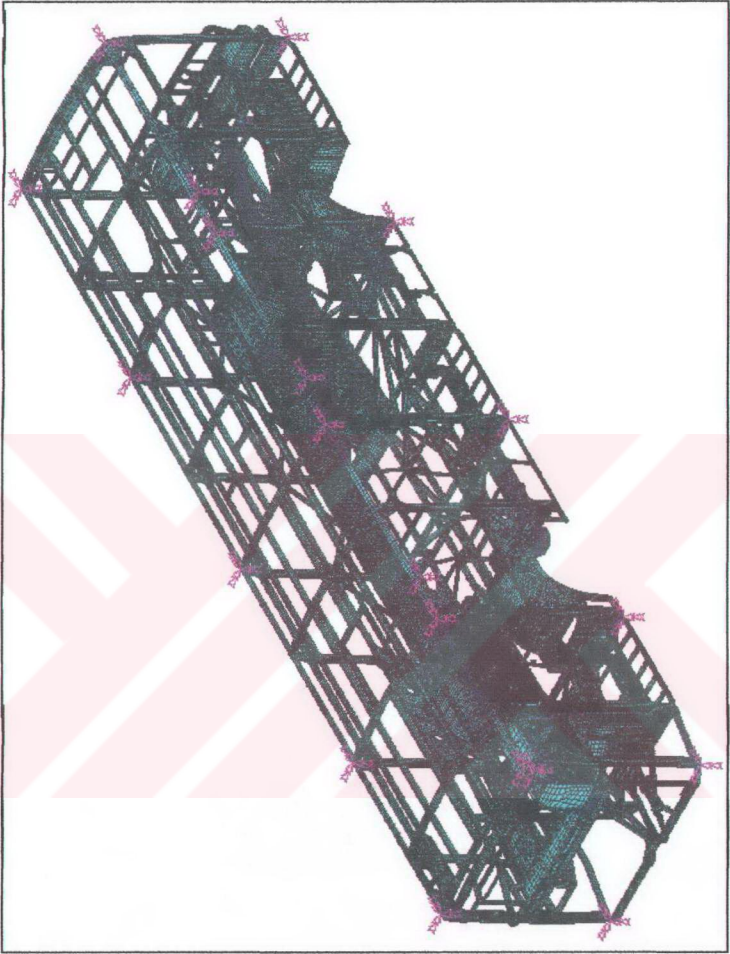
Bu analizde kullanılan model Şekil 4.6’de görülmektedir. Yaklaşık olarak 350.000 elemandan oluşan model ANSYS programı ile PC ortamında çözülmüştür.

Bir önceki adımdan farklı olarak bu modelde çok sayıda plaka olması ve modelin detaylanması sebebiyle bölgesel modlara yakalanmadan genel modların elde edilmesi amacıyla, bu analizde Reduced Method kullanılmıştır. Bu yöntem için tanımlanması gereken ana serbestlik derecelerinin konumları Şekil 4.7’de görülmektedir.

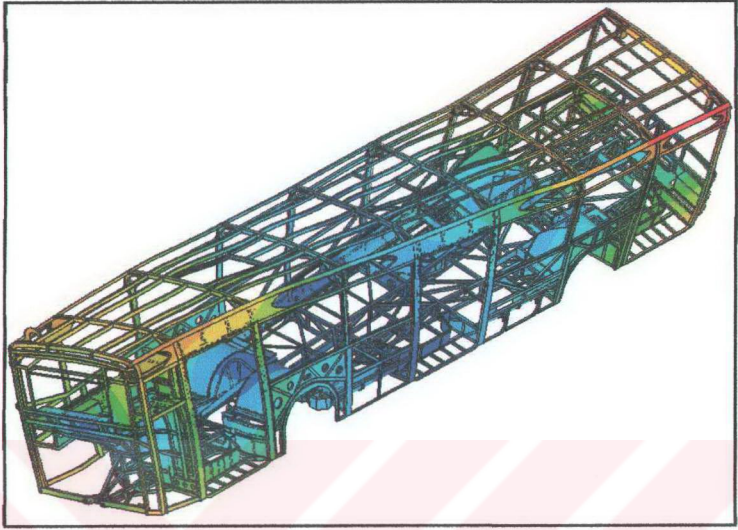
Şekil 4.7 - 4.10’de görüldüğü üzere mod şekilleri bir önceki analiz sonuçlarına paralellik göstermektedir. Frekans değerlerinde küçük sapmalar olmuştur. Şekil 4.11’de ise bu analizde ortaya çıkan üçüncü eğilme modu görülmektedir.



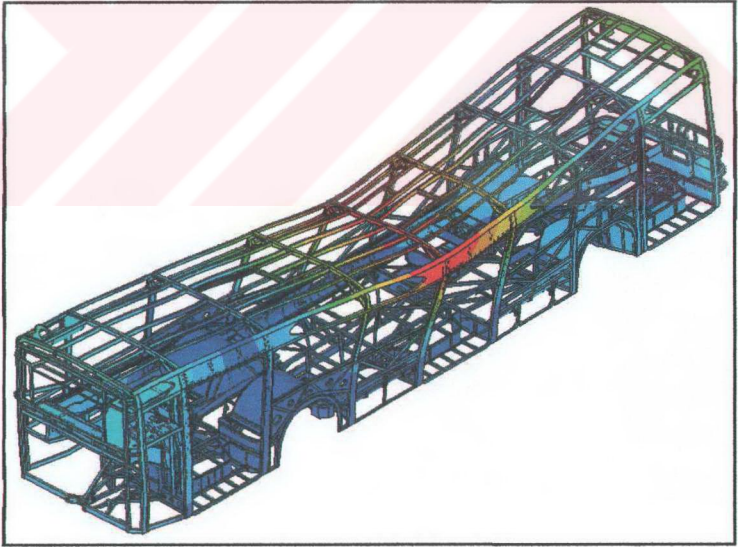
Şekil 4.6 Karoseri Sonlu Elemanlar Modeli



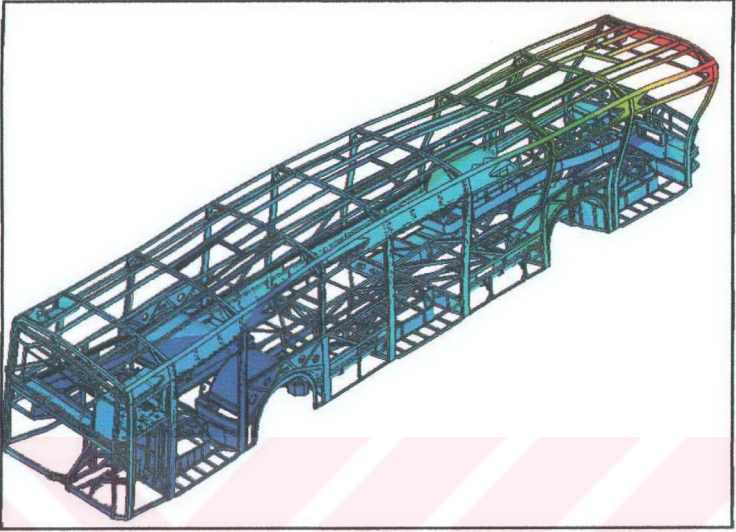
Şekil 4.7 Ana Serbestlik Derecelerinin Konumları



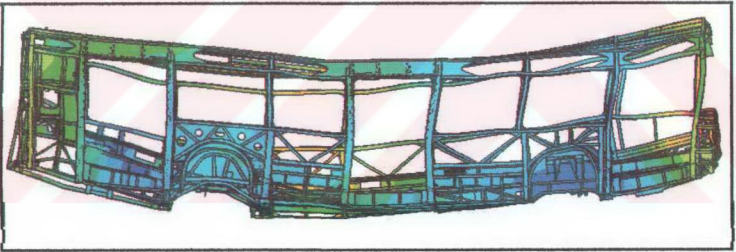
Şekil 4.8 Birinci Burulma Modu – Frekans: 8.004 Hz



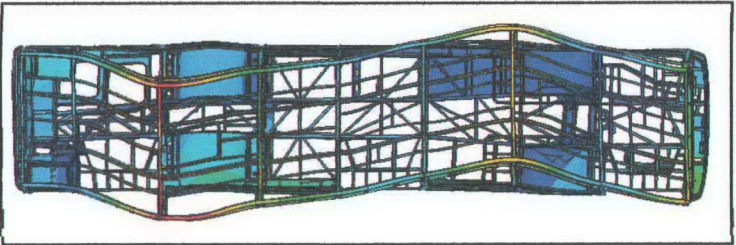
Şekil 4.9 Birinci Eğilme Modu – Frekans: 12.275 Hz



Şekil 4.10 Bileşik Eğilme-Kayma Modu – Frekans: 14.710 Hz



Şekil 4.11 İkinci Eğilme Modu – Frekans: 19.437 Hz



Şekil 4.12 Üçüncü Eğilme Modu – Frekans: 19.437 Hz

4.3 Araç Analizi

Bu aşamaya kadar yapılan analizler sayesinde aracın dinamik karakteristiği hakkında bir bilgi birikimi sağlanmıştır. Bu noktadan sonra yapılan analizlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinde bu birikiminden faydalanılacaktır.

Bir önceki aşamada analizi yapılan karoserinin üzerine kaplama sacları, camlar, akslar ve kütlelerin konmasıyla beraber tüm aracın modeli elde edilmiştir. Uygun sınır şartlarının da tanımlanmasıyla model çözüme hazır hale getirilmiştir.

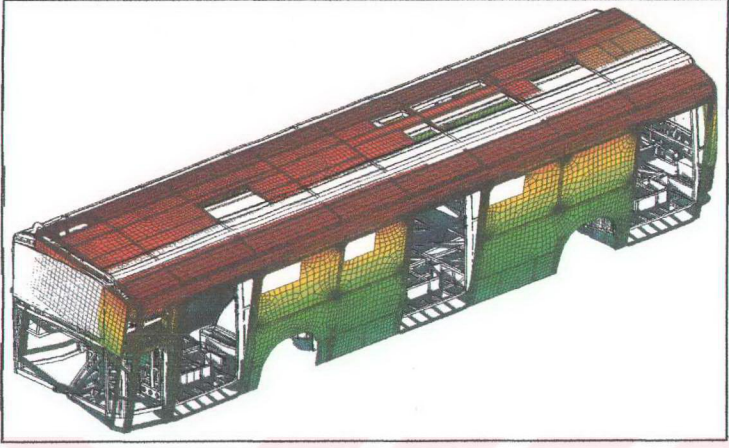
Bu analizde kullanılan model Şekil 3.1'de görülmektedir. Yaklaşık olarak 400.000 elemandan oluşan model PERMAS programı ile UNIX ortamında çözülmüştür.

Analiz sonucunda bulunan frekans değerlerinin bazıları Tablo 4.3'de verilmiştir.

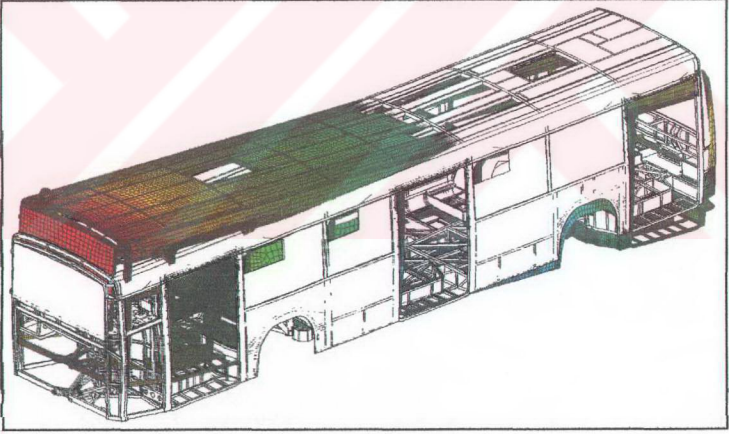
Tablo 4.3 : Aracın Doğal Frekansları

Mod No	Frekans (Hz)	Mod No	Frekans (Hz)
1	0.635	11	8.664
2	0.923	12	8.782
3	1.353	13	8.836
4	1.426	14	9.535
5	2.322	15	9.827
6	2.400	16	11.543
7	6.300	17	12.231
8	7.559	18	15.338
9	8.392	19	17.121
10	8.531	20	17.847

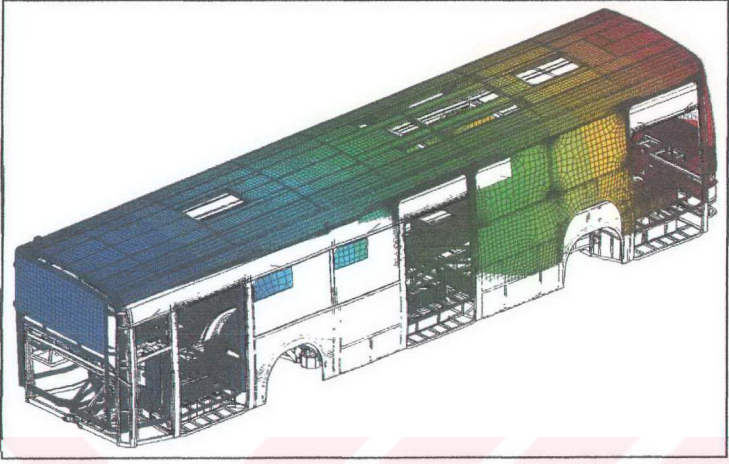
Şekil 4.13 – 4.18'de görülen düşük frekanslı mod şekilleri ilk kez bu analizde ortaya çıkmıştır. Bu modlarda, karoseri üzerinde şekil değişimi olmamakta karoseri akslar üzerinde bütün halinde hareket etmektedir. Bu modların karoserinin kendine ait modları ile çakışması araç konforu açısından kötü sonuçlar doğurmaktadır. Böyle bir durumda aracın içindeki yolcular oldukça rahatsız edici titreşimler hissetmektedir. Bu çalışmadaki analizler sonucu, bu araçta böyle bir çakışma gözlenmemiştir yani araç konfor bakımından güvenli bölgede yer almaktadır.



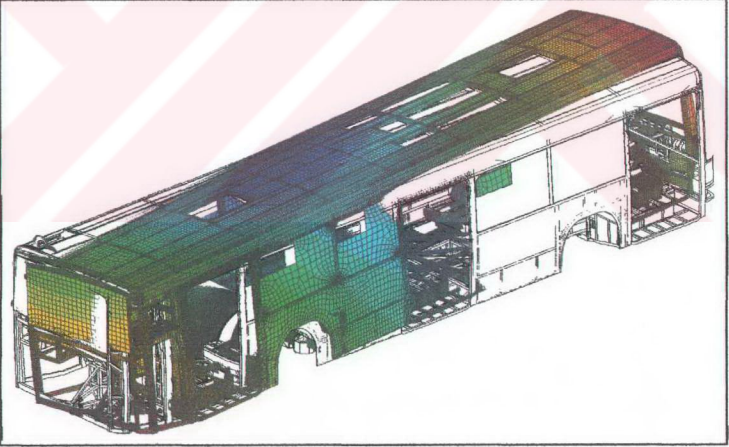
Şekil 4.13 Araç 1. Mod Şekli - Frekans: 0.635 Hz



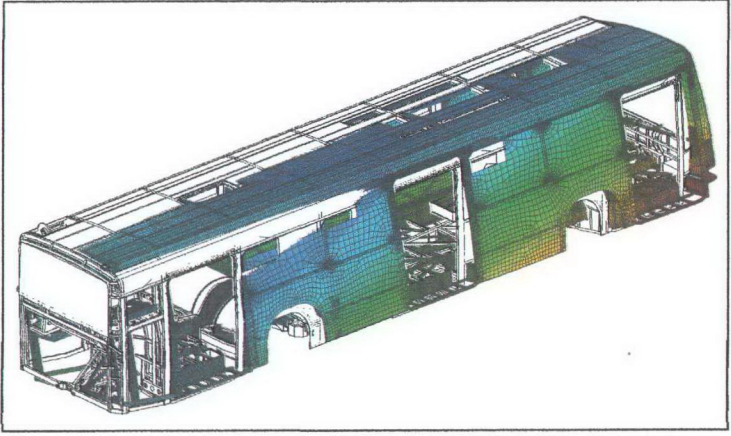
Şekil 4.14 Araç 2. Mod Şekli – Frekans: 0.923 Hz



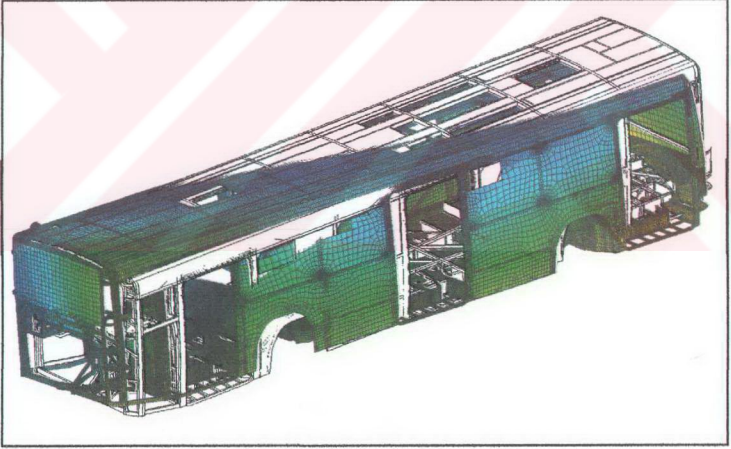
Şekil 4.15 Araç 3. Mod Şekli - Frekans: 1.353 Hz



Şekil 4.16 Araç 4. Mod Şekli - Frekans: 1.426 Hz

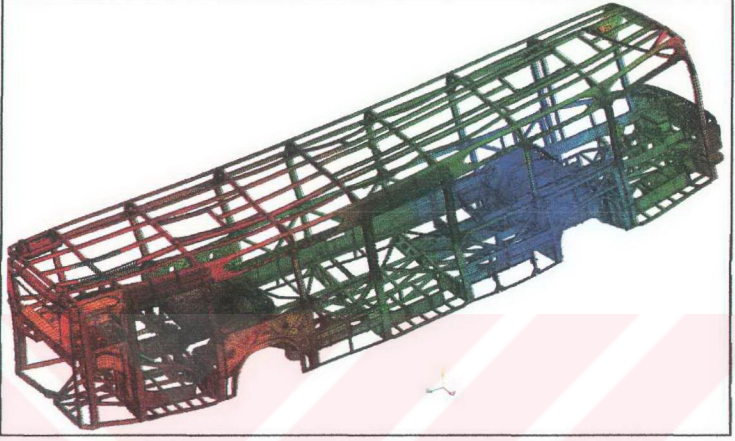


Şekil 4.17 Araç 5. Mod Şekli - Frekans: 2.322 Hz

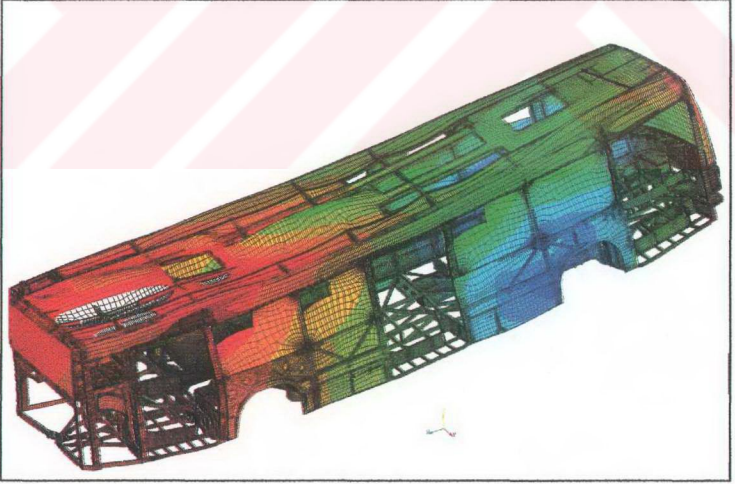


Şekil 4.18 Araç 6. Mod Şekli - Frekans: 2.400 Hz

Araç analizinde, karoseri üzerinde görülen ilk global mod şekli 8.392 Hz'de görülen burulmalı eğilme modudur. Bu mod şekli, Şekil 4.19'da iskelet üzerinde, Şekil 4.20'de araç üzerinde görülmektedir.

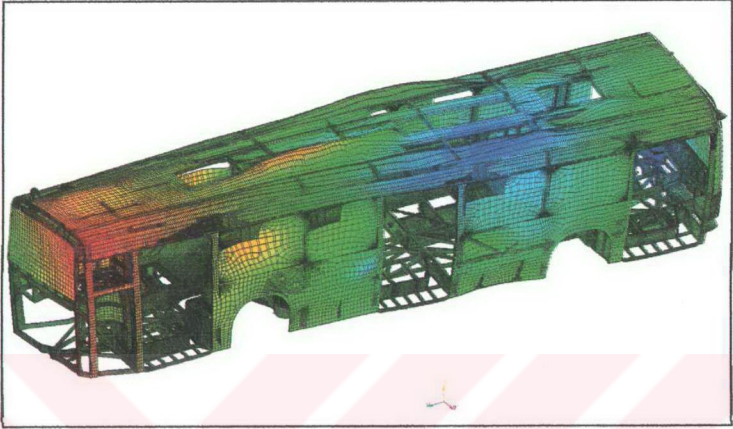


Şekil 4.19 Araç 9. Mod Şekli – Frekans: 8.392 Hz



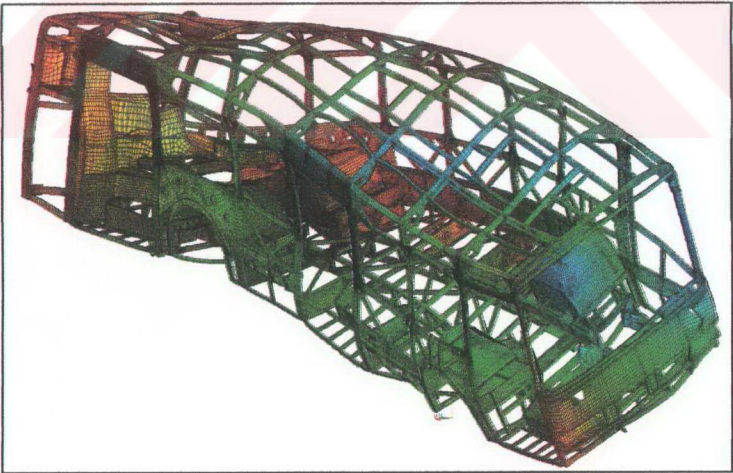
Şekil 4.20 Araç 9. Mod Şekli – Frekans: 8.392 Hz

Araç analizinde, karoseri üzerinde görülen ikinci global mod şekli 8.531 Hz'de görülen burulma modudur. Bu mod, Şekil 4.21'de görülmektedir.

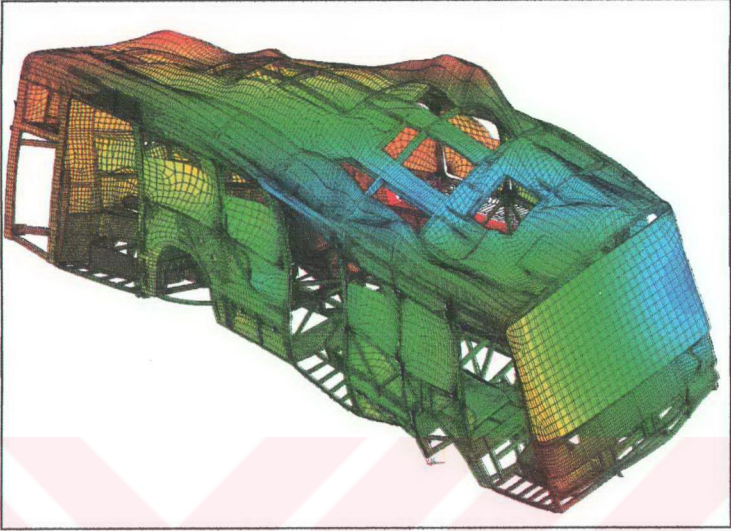


Şekil 4.21 Araç 10. Mod Şekli – Frekans: 8.531 Hz

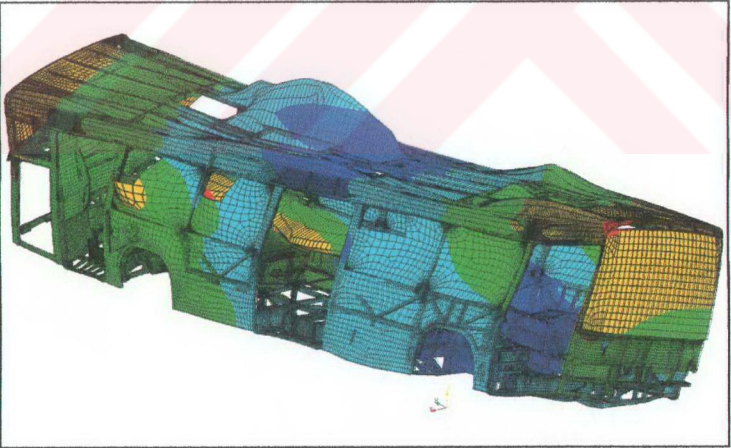
Karoseri üzerinde görülen 11. global mod şekli 8.664 Hz'de görülen burulma modudur. Bu mod, Şekil 4.22 ve 4.23'de görülmektedir.



Şekil 4.22 Araç 11. Mod Şekli – Frekans: 8.664 Hz



Şekil 4.23 Araç 11. Mod Şekli – Frekans: 8.664 Hz

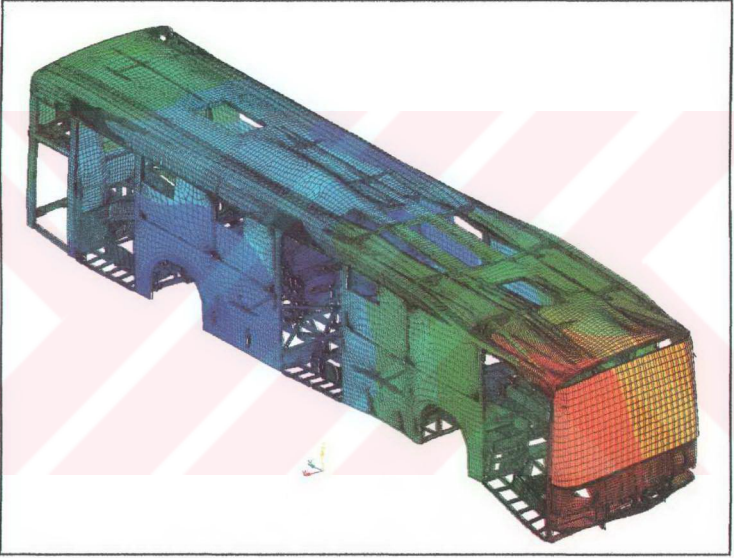


Şekil 4.24 Araç 12. Mod Şekli – Frekans: 8.782 Hz

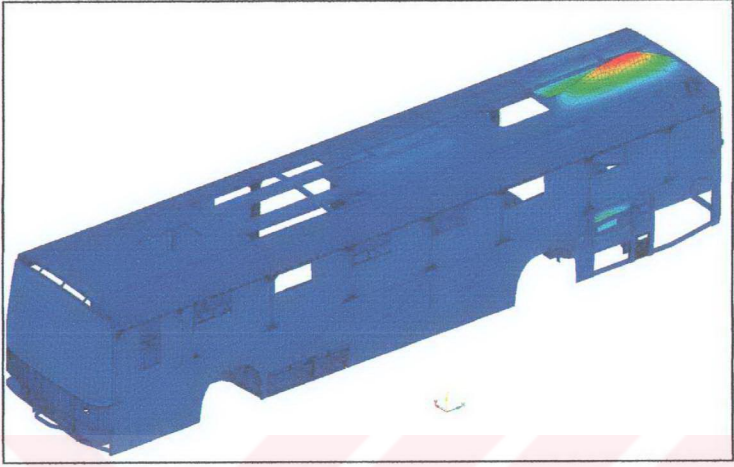
12. mod şekli de burulma olup 8.782 Hz frekansa sahiptir, Şekil 4.24'de görülmektedir. Birden fazla frekansta ortaya çıkan bu global modların aslında tek bir global modun çeşitli lokal modlarla birleşmesinden kaynaklanan varyasyonlar olduğu sonucuna varılmıştır.

13. mod şekli artık burulma olmayıp aracın ön aksından sonra eğilmesidir ve şekil 4.25'de görülebilir.

Bulunan bu global modların yanında çok sayıda lokal moda da rastlanmıştır. Bu modlara örnek olarak şekil 4.26'da 12.987 Hz görülmektedir.



Şekil 4.25 Araç 13. Mod Şekli – Frekans: 8.836 Hz



Şekil 4.26 Lokal Mod Şekli – Frekans: 12.987

5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, 3 kapılı bir şehirli otobüsü olan Conecto C'nin serbest titreşim analizi sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır. Conecto C, Mercedes Benz Türk A.Ş. tarafından geliştirilip üretilmektedir.

Çalışma üç boyutlu katı modelleme aşamasında, CATIA ortamında başlamıştır. Karoseri grubu konstrüktif çalışmalarını bitirdiğinde yine CATIA ortamında sonlu elemanlar metodu için gereksiz ayrıntılar çıkarılarak, modeller dönüşüme hazır hale getirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması için kullanılacak olan MEDINA yazılımının CATIA ile olan arayüzü kullanılarak modeller MEDINA'ya aktarılmıştır. MEDINA ile yapılan çalışmanın sonunda dış kaplamalar, camlar, kütleler ve akslar da modele eklenmiştir. Modelleme için, kiriş eleman (BEAM4), kabuk eleman (SHELL63), hacim eleman (SOLID45), kütle eleman (MASS 21) ve yay-sönümleme elemanı (COMBIN 14) kullanılmıştır. Çözüm için gerekli olan, elemanların geometrik ve malzeme özelliklerinin de programa girilmesiyle modelleme bitmiştir.

Serbest titreşim analizi, üç basamakta gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Taşıyıcı Konstrüksiyonun Analizi
- Karoseri Analizi
- Araç Analizi

İlk analizlerde beklenin aksine aracın ilk modunun yaklaşık 8 Hz civarında oluşan burulma olduğu görülmüştür. Eğilme yerine görülen bu modun, yapılan literatür araştırmasında, yapı içinde çapraz taşıyıcılar bulunmayan otobüs gibi, metro vagonu gibi yapılarda karşılaşılan bir durum olduğu görülmüştür. İkinci modda çıkan eğilmede tavan, daha sağlam olan altyapıya göre daha fazla şekil değiştirmiştir.

Kaplamalar, camlar, kütleler ve aksları içeren araç modelinde ise düşük frekansta global modlar ortaya çıkmıştır. Bu mod şekillerinde karoseri kendi içinde şekil değiştirmeyip akslar üzerinde bütün halinde hareket etmektedir. Bu frekans değerleri daha önce yapılmış olan karoseri analizinde bulunan değerlerle çakışmamalıdır.

Böyle bir çakışma durumunda araç içindeki yolcular rahatsız edici titreşimler hissedebileceklerdir. Yapılan çalışma sonucunda böyle bir çakışma gözlenmemiştir. İlk analizlerde bulunmuş olan global modlar çevresinde, benzer mod şekillerine sahip global modlar yakalanmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda, bu modların, tek bir global mod etrafında, lokal modların etkisiyle görülmüş, varyasyonlar olduğu sonucuna varılmıştır.

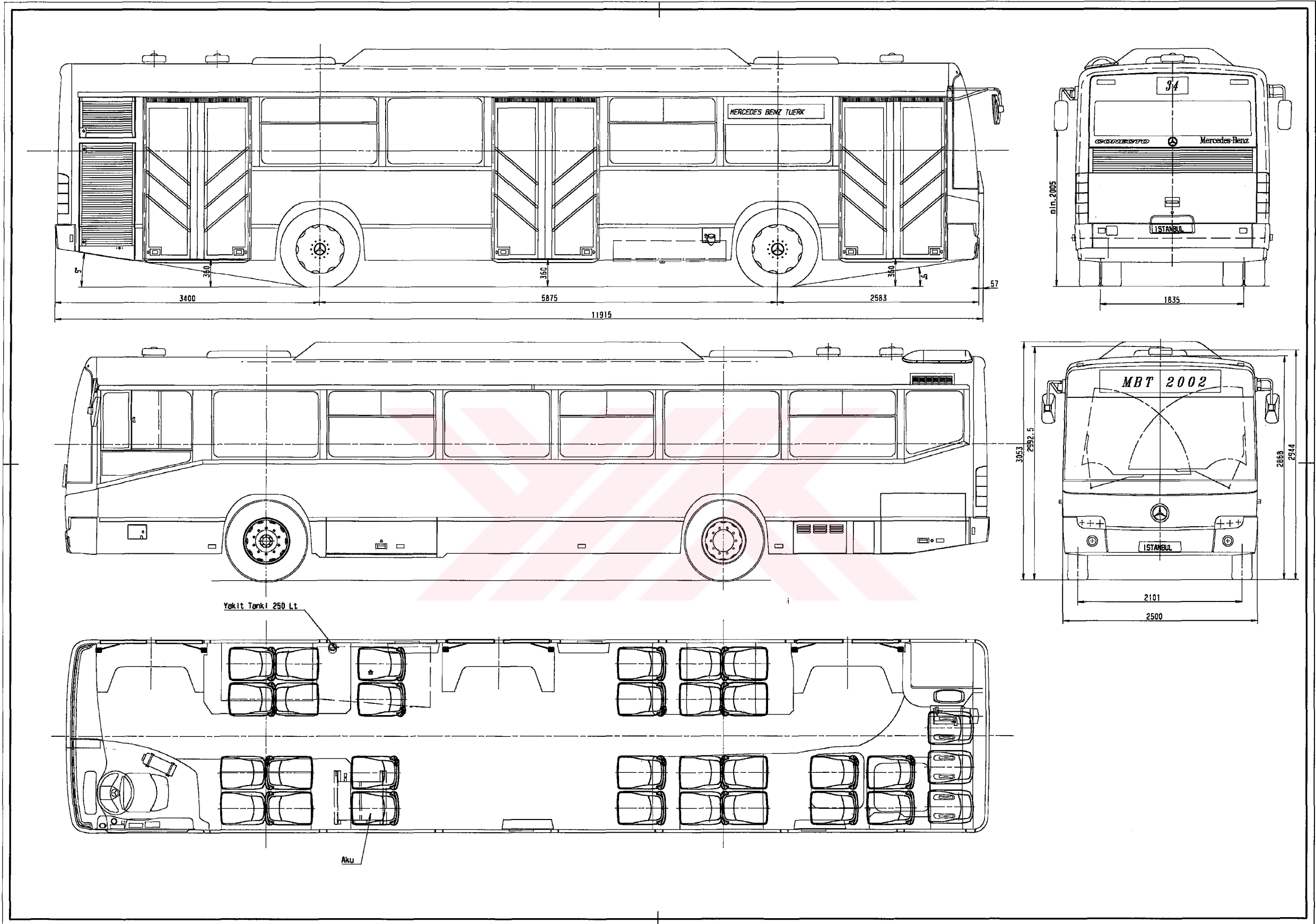
Bu çalışma, bir serbest titreşim analizi olup yapının doğal frekanslarının ve mod şekillerinin bulunması ile sona ermiştir. Arcın titreşim karakteristiğinin bulunması açısından büyük öneme sahip olan bu değerlerin bulunması tek başına yeterli olmayıp aslında bir dizi analizin ilk adımıdır. Bu aşamadan sonra yapının zorlanmış titreşimlere vereceği cevabın incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Bathe, K.**, 1982. Finite Element Procedures In Engineering Analysis, Prentice-Hall International Inc, New Jersey.
- [2] **Chandrupatla, T., and Belegundu, A.**, 1991. Introduction To Finite Elements In Engineering, Prentice-Hall International Inc, New Jersey.
- [3] **Segel, L.**, 1993. An Overview of Development in Road Vehicle Dynamics: Past, Present and Future, Proc. IMechE Conference on Vehicle ride and handling, 1-12.
- [4] **Kotil, T., Yücesan, G. ve Mecitoğlu, Z.**, 1999. Bir tramvay aracının sonlu elemanlar metoduyla yapısal analizi, 4. ANSYS Kullanıcılar Toplantısı, İTÜ, İstanbul, 21-23 Ekim.
- [5] **Kotil, T., Yücesan, G., Mecitoğlu, Z. ve Sevinçler, E.**, (1998). Bir hafif metro aracının sonlu elemanlar metoduyla dinamik analizi, II. Uluslar Arası Ulaşım Sempozyumu, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Mart.
- [6] **Gül, Y. ve Kaydıhan, L.**, 1999. 200 teu kapasiteli bir konteyner gemisinin gerilme ve titreşim analizi, 4. ANSYS Kullanıcılar Toplantısı, İTÜ, İstanbul, 21-23 Ekim.
- [7] **Ersoy, H., ve Muğan, A.**, 2002. Yeni Galata Köprüsünün Doğal Frekans Analizinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapılması ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması, 7. Figes Kullanıcılar Toplantısı, Mudanya, Bursa, 31 Ekim -01 Kasım.
- [8] **Demirdağ, E.**, 2004. Taşıt koltuklarının düşey titreşim konforu açısından değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Özdemirci, Ö.**, 2001. O-345 tipi şehir otobüsünde orta altyapıya ait sonlu elemanlar modelinin hazırlanması, *Lisans Bitirme Ödevi*, , İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul.
- [10] **Yiğit, T.**, 2001. O-345 tipi şehir otobüsünde öngöğüse ait sonlu elemanlar modelinin hazırlanması, *Lisans Bitirme Ödevi*, , İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul.

EK ŞEKİLLER





Şekil EK.1 Arac Temel Boyutları

ÖZGEÇMİŞ

Deniz Dilek FERHAT 1978 yılında Amasya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini orada tamamladı. 1996 yılında İ.T.Ü Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi’nde Uçak Mühendisliği bölümünde öğrenimine başladı. 2000 yılında “Bir Uçak Kanadının Statik Analizi” isimli bitirme ödevi ile mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Kasım 2000 – Nisan 2004 tarihleri arasında Mercedes Benz Türk A.Ş. Geliştirme Bölümünde Analiz Mühendisi olarak çalıştı. Aşağıda sunulan bir yayını vardır:

- **Ustaoglu, H.B. ve Ferhat, D.D. ve Mecitoğlu, Z.,** 2000: Bir Uçak Kanadının Statik Ve Dinamik Analizleri. III. Havacılık Sempozyumu, Kayseri. Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Meslek Yüksek Okulu.

