

BOĞAZIÇI HAFİF METRO ARACININ YAPISAL TASARIMI

Selman Nas, Temel Kotil, Güven Yücesan, Kemal Yıllıkçı, Zahit Mecitoğlu
İ. T. Ü., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Maslak, İstanbul.

ÖZET

Bu çalışmada Boğaziçi Tramvay aracının yapısal tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın sayısal analiz kısmı sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Aracın servis yükleri ile çeşitli asma ve kaldırma operasyonlarında karşılaşılabilecek yükleme durumları altındaki statik davranışı incelenmiştir. Aynı sonlu eleman modeli kullanılarak aracın serbest titreşim modları ve doğal frekansları bulunmuştur. Ayrıca araç yapısı üzerine yerleştirilen strain-gage'lerle birim uzama ölçümleri yapılmış ve buradan elde edilen asal gerilmeler sayısal olarak elde edilenlerle karşılaştırılarak iyi bir uyumun olduğu görülmüştür.

STRUCTURAL DESIGN OF BOĞAZIÇI LIGHT RAIL VEHICLE

ABSTRACT

This study presents the structural design of Boğaziçi light rail vehicle. The structural modeling is performed using finite elements method. Different static loading cases under normal servis operations and different railing cases are simulated. Using the same model, structural dynamic modes and natural frequencies of the vehicle are determined. Experimental stress analysis is performed using strain-gages mounted on the chassis of the vehicle. The results are in good agreement with the finite element simulation.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada Boğaziçi hafif metro (BHT) aracının mühendislik analizleri yapılmıştır. Bu araç özgün bir tasarım olup İstanbul Ulaşım Sanayii ve Ticaret A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Mühendislik çalışmaları olarak önce sonlu eleman analizleri yapılmıştır. İmalat sonrası ise araç üzerinde gerilme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modeli genellikle kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model ile statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Gerilme ölçümleri ise araç üzerinde çeşitli noktalara yerleştirilen strain-gage'lerle yapılmıştır. Bulunan sonuçlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. BOĞAZIÇI HAFİF METRO ARACI

Bir hafif metro aracı ile ilgili dizayn, analiz ve imalat çalışmaları ülkemizde ilk olarak gerçekleştirilmiştir. Aracın geometrik tasarımı Şekil 1'de görülmektedir. Bu bölümde araç hakkında genel bilgiler verilecektir.

Boğaziçi hafif metro (BHM) aracının ortadan mafsallı, toplam üç bojili bir platforma sahip bir raylı sistem toplu taşıma aracıdır. Her bojide iki aks bulunduğu için araçta toplam altı aks bulunmaktadır. Yine her bojide bir adet sürücü motor bulunmaktadır. Araç tek sürücü kabinine sahip olup sağ ve sol yanlarında dörder adet kapı bulunmaktadır.

BHM aracının temel boyutları şöyledir [1]: Raylar arasındaki açıklık, 1435 mm; araç genişliği, 2650 mm; Araç uzunluğu, 12250 mm; araç yüksekliği, 3255 mm (Ray seviyesinden itibaren); kapı açıklığının genişliği, 1650 mm; kapı açıklığının yüksekliği, 2000 mm; maksimum tekerlek çapı, 680 mm.

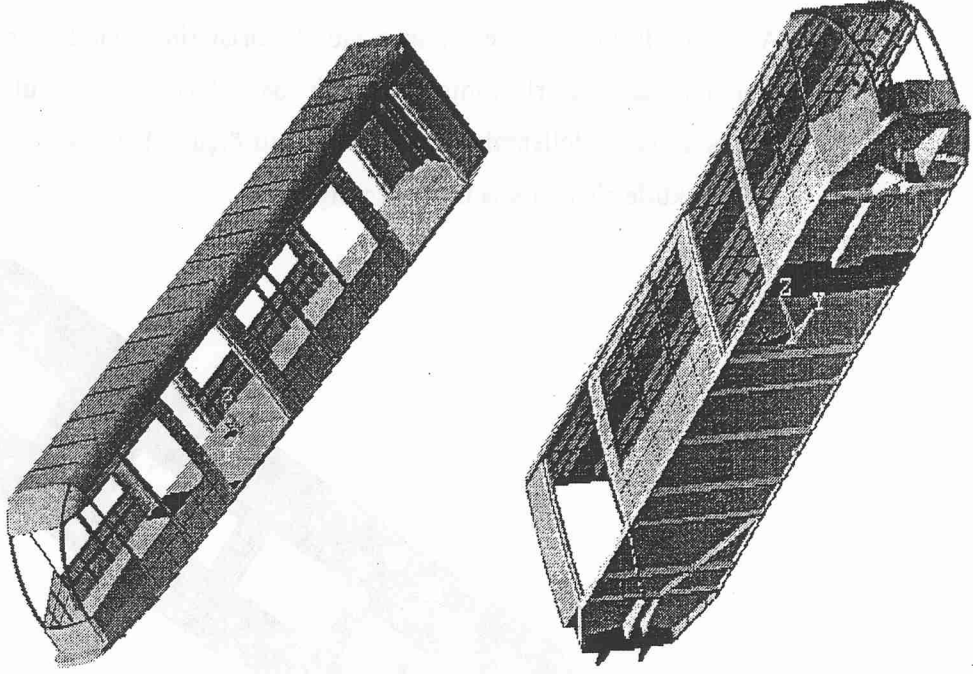
Maksimum eğim %6'dır. Maksimum oturma sayısı 32'dir. Maksimum yük metrekareye 4 yolcu; nihai yük ise metrekareye 8 yolcudur. Maksimum ivmelenme $1,1 \text{ m/s}^2$ ve maksimum frenleme ivmesi $1,5 \text{ m/s}^2$; acil frenleme ivmesi ise $3,0 \text{ m/s}^2$ 'dir. Maksimum hız 80km/sa'tir.

Aracın çalıştığı çevre sıcaklığı -10°C ile $+45^\circ\text{C}$ arasındadır. Çalışma ortamının rutubet ortalaması %70 ve maksimum rutubet %100'dür. Kar, don ve dolu şartları altında çalışabilecektir. Maksimum rüzgar hızı 120 km/saat olarak düşünülmüştür. Günlük minimum kat ettiği uzaklık 300 km olacaktır.

Araç gövdesinin bir çarpışma durumunda sürücüyü koruyacak ve araç kapılarının sıkışmasını önleyecek mukavemet gereklerini sağlaması beklenmektedir. Araç kendi kendini, üzerindeki teçhizat ve yolcu yükünü taşıyabilecek bir çerçeve yapıya sahip olacaktır. Minimum 40 yıllık bir çalışma periyodu süresince dinamik yüklere karşı koyabilmelidir.

Diğer yandan aracın küçük motor gücüyle kolay ivmelenebilmesi için yapının mümkün olduğu kadar hafif olması gerekmektedir. Dolayısıyla iyi bir tasarımda monokok yapıdan yararlanmak gerektiği açıktır.

Bu tip toplu taşıma araçlarının aranan bir özelliği de yolcu konforudur. Bu da yapısal tasarımda dinamik analizlerin ve gürültü önleyici malzeme seçiminin önemini artırmaktadır.



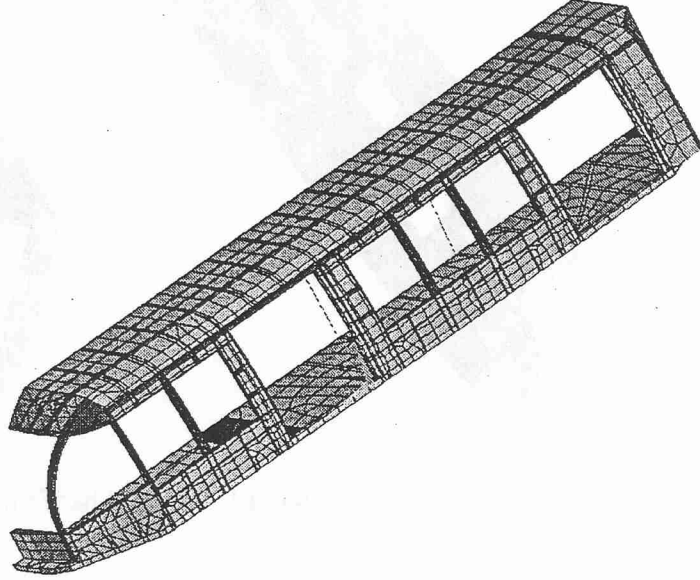
Şekil 1. Boğaziçi hafif metro aracı.

3. SONLU ELEMEN ANALİZİ

BHM aracının ön geometrik tasarımı proje ekibinin Ulaşım A.Ş.'nin mühendisleri ile birlikte yaptığı çalışmalar sonucunda gerçekleştirilmiştir. Bu ön tasarıma sadık kalarak bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur, Şekil 2. Bu şekilden görüldüğü gibi araç simetrik olup yarısı modellenmiştir. Araç geneli itibariyle simetrik olsa da simetrik olmayan yükleme durumlarının mevcut olabileceği, güç sistemi ve diğer bazı sistem yerleştirmelerinin simetri şartını ihlal edebileceği unutulmamalıdır. Ayrıca modal ve har-monik cevap analizlerinde simetrik olmayan modların hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir.

Araç ana çerçeve yapısının, değişik enine kesitlere sahip giriş elemanlardan oluşması tasarlanmıştır. Bu modelde yük taşınmasına birinci derecede katkıda bulunan elemanlar kullanılmış olup, pencereler, koltuklar ve yük taşınmasına birinci derecede katkıda bulunmayan diğer aksamlar modele dahil edilmemiştir. Fakat bu elemanların eşdeğer kütleleri model içerisinde ilgili noktalara kütle elemanları olarak etiketilerek dinamik modlar ve statik mukavemete etkileri göz önünde bulundurulmuştur.

Araç gövdesini teşkil eden ince cidarlı kirişlerin modellenmesinde genellikle kabuk elemanlardan yararlanılmıştır. Ancak bazı kirişler zorunluluklardan dolayı çubuk elemanlarla modellenmiştir. Ayrıca önemli ölçüde bir yük taşımayan bazı parçalar da yapısal kütle elemanlarla modellenmişlerdir.



Şekil 2. Sonlu eleman modeli.

Kabuk eleman olarak, genelde, 4 düğüm noktasına (node) sahip dörtgen eleman kullanılmıştır. Bir dörtgen kabuk elemanın her bir köşe noktasında 6 tane olmak üzere toplam 24 serbestlik derecesi vardır. Modellemede kullanılan çubuk eleman çekme-basma, burulma ve eğilme yüklerini taşıma yeteneğine sahiptir. Elemanın iki düğüm noktası bulunmaktadır. Her bir düğüm noktasında ise altı serbestlik derecesi bulunmaktadır. Kullanılan kütle eleman ise altı serbestlik derecesi bulunan bir nokta elemandır.

Tüm TRAMCAR sonlu eleman modelinde kullanılan toplam eleman sayısı 5947 ve toplam düğüm noktalarının sayısı ise 5131'dir. Herbir düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi bulunduğu için tüm yapının toplam serbestlik derecesi, yaklaşık olarak, $5131 \times 6 = 30786$ 'dir. Sınır şartlarından dolayı toplam serbestlik derecesi doğal olarak az bir miktar bu sayının altında olacaktır.

i) **Statik Analiz:** Statik analizde simetrik model üzerinde çalışıldığından BHM aracının simetri düzlemine simetri sınır şartları uygulanmıştır. Aracın sertifikasyonu için bazı

yükleme durumları için yeterli mukavemette olduğunun gösterilmesi gerekmektedir. Bu yükleme durumları EK A'da sunulmuştur. Bu yükleme durumları için yapılan analizlerden 3. yükleme durumuna tekabül eden gerilmeler Şekil 3'da sunulmuştur. Tasarımda emniyet gerilmelerinin altında kalınmasına dikkat edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Yüklem Durumu: Elde edilen sonuçlara göre maksimum gerilmeler yüklemenin uygulandığı noktaların civarı ile ön pencereler ve ön kapı çerçevelerinde oluşmaktadır. En büyük deformasyon ise ön kapı çerçevesinde meydana gelmektedir. Kaza durumunda kapının açılmaması durumuna karşı kapı çerçeve tasarımı önemlidir.

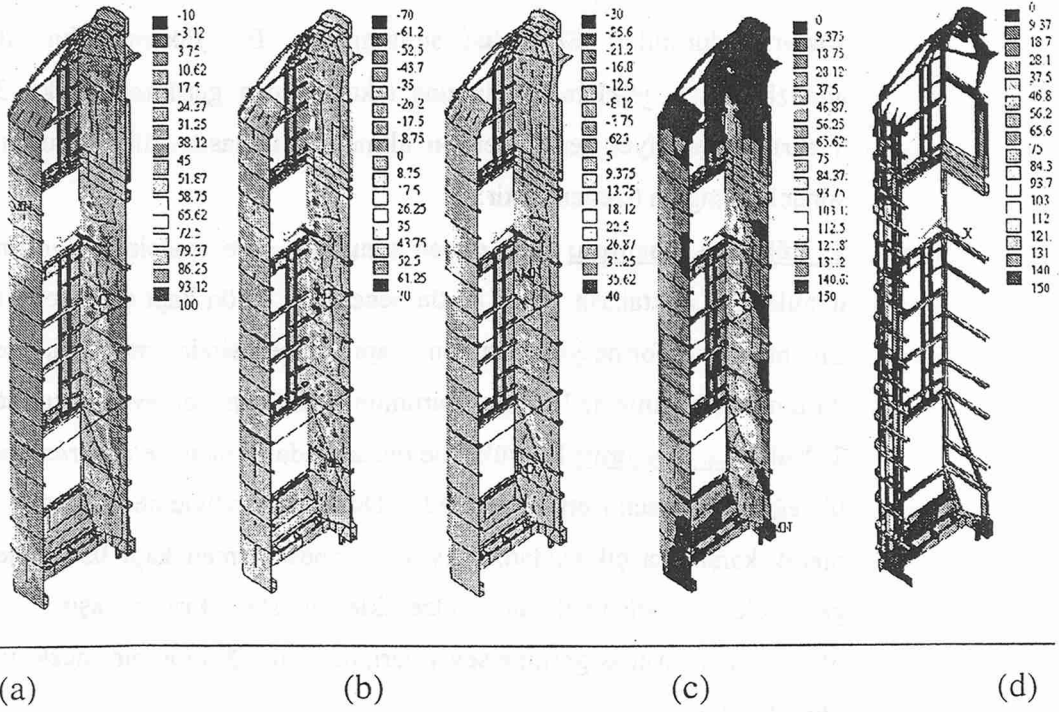
2. Yüklem Durumu: Bu yüklem durumunda birincisine nazaran araç üzerine daha az bir eğilme momenti etki etmektedir. Dolayısıyla yüklem daha çok şasenin sıkışması olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda kısmen kapı üst çerçevelerinde yüksek gerilmelere rastlanmaktadır. Özellikle bolster kirişte aşırı basma gerilmeleri oluşmaktadır. Ancak gerilme seviyeleri, beklenildiği gibi, bir önceki yüklem durumuna göre düşüktür.

3. Yüklem Durumu: Bu yüklem durumunda taşınan yolcu sayısının yüksek olmasından dolayı araç iki boji arasında bir miktar bel vermektedir. Deneysel ölçümler bu yüklem durumu altında yapıldığından elde edilen analiz sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuştur.

4. Yüklem Durumu: Aracın önden kaldırıldığı dördüncü yüklem durumundan elde edilen sonuçlara göre tamponda, ön cam kirişlerinde, pencere ve kapı çerçevelerinde zorlanma ve deformasyonlar oluşmaktadır. İlave olarak, daha düşük seviyede olmak üzere, arka kapı ve pencere çerçevelerinde zorlanmalar oluşmaktadır. Ön bojinin bağlantı yerlerinde, ağırlığından dolayı, çökme ve gerilmeler görülmektedir. Diğer yüklemeler altında oluşan gerilme ve deformasyonlarla kıyaslandığında bu yüklem durumunun oldukça kritik olduğu görülmektedir.

5. Yüklem Durumu: Araç gövdesinin çatısında bulunan dört kaldırma noktasından kaldırıldığı bu yüklem ile elde edilen sonuçlara göre en fazla zorlanmalar asma noktaları civarlarında olmaktadır.

6. Yüklem Durumu: Tam teçizatlı aracın alttan dört kaldırma noktasından kaldırıldığı bu yüklem durumunda gerilmeler ve deformasyonlar aracın nisbeten zayıf olduğu arka kapı civarında yoğunlaşmaktadır.



Şekil 4. BHM aracının 3. Yükleme durumu için gerilme dağılımı:
 a) σ_1 .asal gerilmesi, b) σ_2 .asal gerilmesi, c) σ_{xy} .kayma gerilmesi,
 d) Von Misses. gerilmesi, e) kafes yapıdaki Von Misses. gerilmesi.

7. Yükleme Durumu: 4. yükleme durumuna benzer bir yükleme durumudur. Fakat burada araç bojidenden kaldırıldığından oluşan gerilmeler daha küçük bulunmuştur.

8. Yükleme Durumu: Orta bojinin ve diğer aracın asılı olmasından kaynaklanan yüksek seviyeli yüklerin özellikle aracın asıldığı arka kısmında etkili olduğu görülmektedir. Enyüksek gerilmeler aracın asıldığı arka kapı çerçevesinin üst ve alt sağ köşelerinde ortaya çıkmaktadır. Arka kapı çerçevesinde, aynı zamanda yüksek deformasyonlar görülmektedir.

9. Yükleme Durumu: Tam teçizatlı yapıya 3g şiddetinde yavaşlama ivmesi verilmesi halinin analiz edildiği bu durumda oluşan deformasyonlardan yavaşlama ivmesinden dolayı aracın üst tarafının öne doğru deforme olduğu ve bu sırada, özellikle kapı çerçevesinde ve bunun civarındaki taban sacında yüksek gerilmelerin olduğu görülmektedir.

ii) **Modal Analiz:** Modal analiz, veya diğer adıyla serbest titreşim analizi, araç yapısının yapının dinamik karakteristiklerini ortaya koyması bakımından oldukça önemlidir. Bu dinamik karakteristikler araç yapısının serbest titreşim frekansları (doğal

frekansları) ve bunlarla ilgili mod şekilleridir. Bu frekans spektrumundan ve mod şekillerinden hareketle yapının üzerine gelecek dinamik yüklere karşı nasıl cevap vereceği ve hareket edeceği belirlenebilir. Bu analizler sonucunda elde edilen modlar incelenerek aracın esnek kısımları görülebilir ve bir takım takviyelerle ya da o bölgedeki yapısal olmayan kütleler azaltılmak suretiyle dinamik karakteristiklerde iyileştirmeye gidilebilir.

Özellikle dış zorlayıcıların frekansları civarında bulunan doğal frekanslar varsa yapıda aşırı titreşimlere ve rezonans olayına yol açar. Bu durumda yapılacak şey, dış zorlayıcının frekansını değiştirmek mümkün değilse, araç yapısının bu civardaki doğal frekansını ileriye ötelemektir. Bunun da yolu , belirtildiği gibi, mod şeklinin incelenmesinden elde edilen bilginin ışığında yapının takviye edilmesi veya belirli bölgelerden kütle uzaklaştırılması ile mümkün olur.

Burada BHM aracının oluşturulan sonlu eleman modeli kullanılarak serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Eleman kütleleri düğüm noktalarında yığılmış olarak (lumped mass approach) kabul edilmiştir.

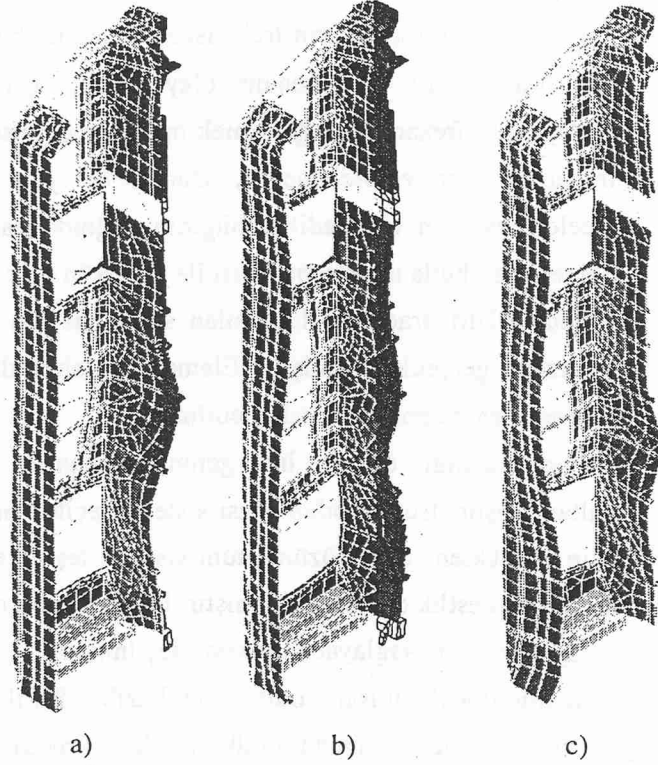
Çözüm tekniği olarak indirgenmiş dinamik analiz tekniği (reduced method) kullanılmıştır. Bu metodun esası sistemi seçilen master serbestlik dereceleri ile temsil edip çözdükten sonra çözümü tüm sisteme teşmil etmektir. Dolayısıyla burada 50 adet master serbestlik derecesi alınmıştır. Bu serbestlik dereceleri sistemin global modlarının kolayca tesbitini sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Sistemin global yapısal modlarından bazıları Şekil 4'de ve ilk 20 tabii frekansı Tablo 1 de sunulmuştur. Bulunan bütün modlar simetrik olup, simetrik olmayan modların bulunması için bütün araç modelinin kullanılması gerekmektedir. Aracın simetrik modlarına ait tabii frekanslar oldukça küçüktür. Mod şekillerinden aracın esnek olduğu kısımlar belirlenip buraların rijitliği artırılarak bu frekans değerleri yükseltilebilir.

BHM aracına çeşitli dinamik yükler etkimektedir. Bunlardan bazılarının harmonik karakterde olduğu kabul edilebilir: i) raydaki ondülasyonlardan kaynaklanan yükler,

Titreşim Modu No:	Frekans (Hz)	Titreşim Modu No:	Frekans (Hz)
1	11	11	45
2	17	12	49
3	20	13	55
4	26	14	58
5	32	15	59
6	36	16	61
7	40	17	63
8	42	18	64
9	43	19	65
10	44	20	66

ii) sürücü motorlardan kaynaklanan yükler, iii) dişli indirgeme ünitesinden gelen harmonikler, iv) virajlardan ve diğer çalışma şartlarından kaynaklanan harmonik olmayan dinamik zorlamalar.

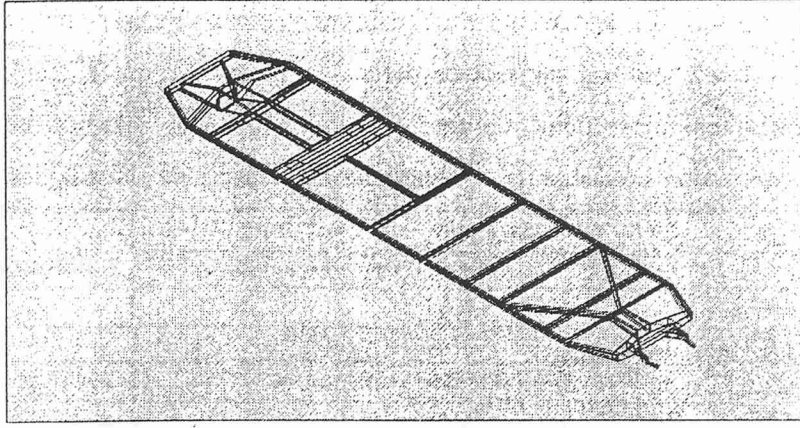


Şekil 4. Aracın Doğal Frekansları ve Mod Şekilleri;
a) 4 mod., $f_4=26$ Hz b) 5.mod, $f_5=32$ Hz c) 6.mod., $f_6=36$ Hz

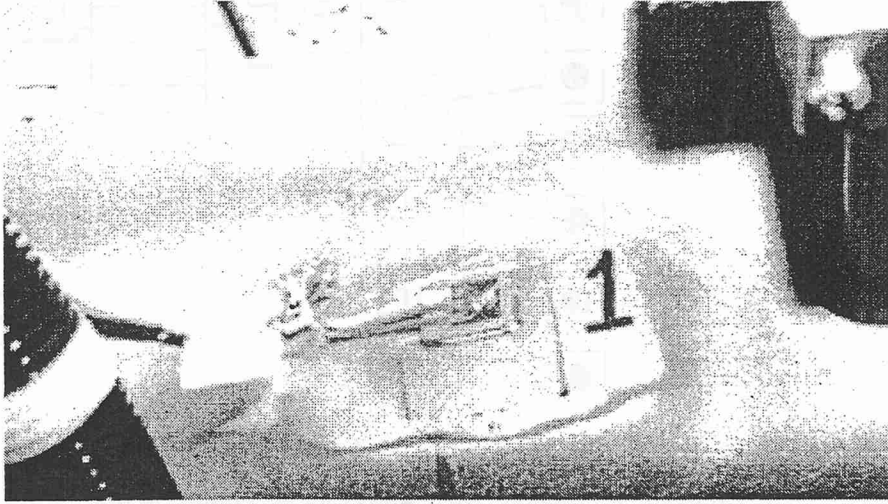
Tablo 1 Serbest titreşim frekansları

4. DENEYSEL GERİLME ANALİZİ

Bu çalışma çerçevesinde BHM aracı üzerinde bir deneysel gerilme ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Ölçüm sistemi ağırlıklı olarak strain-gage'lerle değişik noktalarda birim uzmaların ölçülmesine dayanmaktadır. Strain-gage'lerin yerleştirildiği yerler daha önce, sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan statik analizlerden elde edilen sonuçlara göre tayin edilmiş (Şekil 5) ve bu noktalara $45^\circ/0^\circ/45^\circ$ tipinde üçlü strain-gage rozetleri yerleştirilmiştir, Şekil 6.



Şekil 5. Strain-gagelerin yapıştırıldığı kirişler



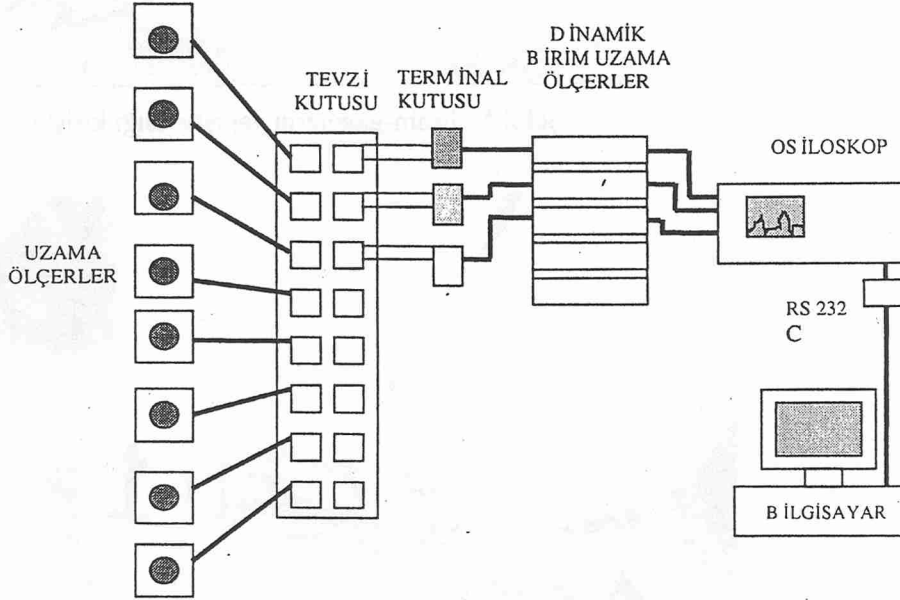
Şekil 6. 1 no'lu strain-gage.

Sistemin akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir. Rozetlerin uçları koaksiyal kablolar aracılığıyla dinamik strainmeter terminallerine bağlanmıştır. Dinamik strain-meter'ın çıkışları ise dijital osiloskopa bağlanmış ve buradan alınan dijital data bilgisayara aktarılmıştır.

Deneylerde kullanılan dinamik strainmeter 6 kanallı, otomatik dengeleme özelliğine sahip, 5 kHz dinamik cevap yeteneğindedir. Strain-gage'den alınan sinyalleri güçlendirerek, analog sinyal olarak verir. Kullanılan dijital osiloskop 100 Mhz, dört kanallı, 2000 nokta/kanal veri hafızalı, 8 bit dikey çözünürlüklü, mikro işlemci kontrollü HP54600A dijital osiloskoptur. Bütün ölçüm parametreleri bilgisayarla kontrol edilmekte ve ölçümle ilgili bütün veriler (kanal dikey volt aralığı, ölçüm yapılıp hafızaya kaydedilen veri nokta sayısı, maksimum, minimum ve ortalama voltlar, V_{rms} ,

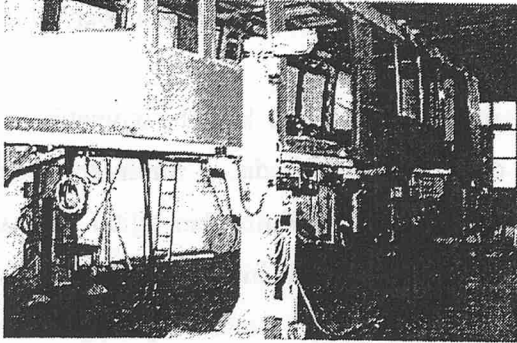
veri hafızası vb.) bilgisayar tarafından okunabilmektedir. Bilgisayar arabirimi yapmak için RS-232 C tipi 24 pin bağlantı seçilmiştir.

Şekil 8a 'da aracın mesnetleme durumu gösterilmiştir. Araç takriben boji bağlantı noktalarına yakın dört noktadan, dengelenmiş krikolar üzerinde durmaktadır. Yükleme her biri 400 N olan 150 kum torbası kullanılarak yapılmıştır, Şekil 8b.

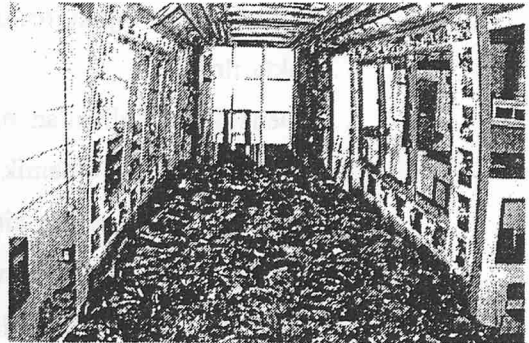


Şekil 7. Akış diyagramı

Dolayısı ile toplam yük $400 \times 150 = 60000$ N'dur. Kum torbaları sürücü kabini haricindeki araç tabanına mümkün mertebe üniform olarak yayılmıştır. Bu vagonun maksimum servis yükünün yarısıdır.



(a)



(b)

Şekil 8. Deney aracının görüntüsü a) mesnetleme durumu, b) yükleme durumu.

Tablo 2 ölçülen birim uzama değerlerini göstermektedir. Tablo 3 ise ölçüm noktaları için hesaplanan asal birim uzama ve asal gerilmeleri göstermektedir.

Tablo 2. Ölçülen birim uzama değerleri. (10^{-6} birim uzama)

Rozet	$\theta = +45$	$\theta = 0$	$\theta = -45$
1	1.83	93.6	15.6
2	—	11.4	-9.56
3	111	-255	39.8
4	-138	—	-35.1
5	-43.7	-74.9	-35.1
6	0.0	12.4	25.7

Tablo 3. Asal birim uzamalar (10^{-6} birim uzama) ve asal gerilmeler (MPa).

Rozet	ϵ_1	ϵ_2	α°	σ_1	σ_2	β
1	8.73	-5,96	119.6	2	-1	-60.4
2	—	—	—	—	—	—
3	163	-308	-206.7	16.3	-60	-26.7
4	—	—	—	—	—	—
5	-34,0	-84,6	204.9	-13.7	-22	24.9
6	15,3	-2.90	5.1	3.3	0	5.1

5. SONUÇ

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Bir hafif metro aracının tasarımında hafiflik önemli bir parametre olduğundan dolayı ağırlığı azaltıcı detaylı mühendislik çalışmaları yapılmalıdır. BHM aracında ki yoğun gerilme analiz çalışması yapısal kütle miktarında önemli bir azalma sağlamıştır.
- Bir hafif metro aracının tasarım ve imalatında yolcu güvenliği açısından kapıların yapısal ve mekanizma tasarımları önemlidir. Bu çalışma ile BHM aracının değişik yükler altında kapı çerçeve ve civarının emniyeti artırılmıştır.
- Yolcu konforunu iyileştirmek için yerel titreşim modlarının tabii frakansaları büyük tutulmaya çalışılmıştır. Bunu sağlayabilmek için özellikle kaplama elemanları üzerine ilave takviyeler eklenmiştir.
- Deneysel gerilme analizi ile FEM sonuçlarının uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Keil St., O. Benning, On the evaluation of Elastoplastic Strains Measured with strain gauges, Experimental Mechanics 19 (1979), pp. 265-270
2. Keil St. Stress Calculation from Measured Strains in the Elastic Deformation Range, RAM, Vol. 3, 1987, No:2, pp. 56-62
3. G. Yücesan, Z. Mecitoğlu, T. Kotil, K. Yıllıkçı, Tramcar Statik Analizi, Teknik Rapor, ITU, Uçak ve Uzay Bil. Fak. 1998
4. G. Yücesan, Z. Mecitoğlu, T. Kotil, K. Yıllıkçı, Tramcar Dinamik Analizi, Teknik Rapor, ITU, Uçak ve Uzay Bil. Fak. 1998
5. Z. Mecitoğlu, G. Yücesan, T. Kotil, Selman Nas, BHM Aracının Deneysel Gerilme Ananlizi, Teknik Rapor, ITU, Uçak ve Uzay Bil. Fak. 1999

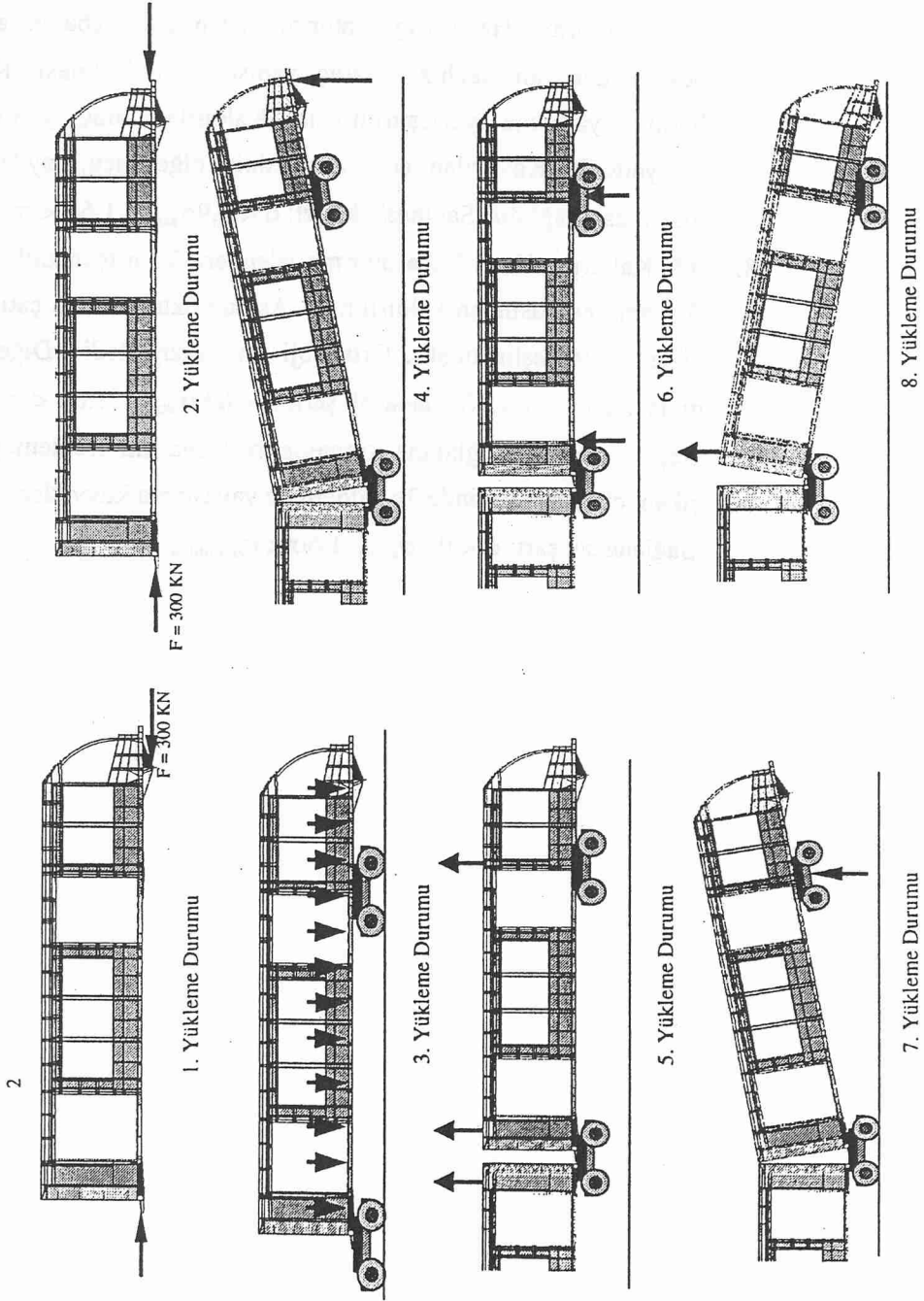
EK: YÜKLEME DURUMLARI

BHT için yükleme durumları aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

1. Bağlama parçasına yatay uzunlamasına 300 kN şiddetindeki basma yükü uygulanmaktadır. Sağlanacak Şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1,6\sigma < \sigma_{burkulma}$
2. Alt çerçeve üzerine simetrik ve düzgün yayılı olarak 300 kN'luk yatay uzunlamasına basma yükü uygulanmaktadır.
Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1,6\sigma < \sigma_{burkulma}$
3. Tam teçhizatlı araç yapısı + herbirinin kütlesi 65 kg olan 155 yolcu + %20'lik bir dinamik yük faktöründen oluşan toplam düşey yük uygulanmaktadır. (155 yolcu = "ÇARPIŞMA YÜKÜ"). $F_{düşey} = 1,2*(W_{ta} + 155*65*g)$.
Sağlanacak şart: $\sigma < 0,67\sigma_{akma}$, $1,6\sigma < \sigma_{burkulma}$
4. (1. Kaldırma Hali) Tünelde raya oturtma işlemleri. Baş kirişin (stook) altından kaldırma cihazı ile arac gövdesinin ön tarafının kaldırılması. Tam teçhizatlı araç gövdesi + asılı durumdaki arka boji. Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1,6\sigma < \sigma_{burkulma}$
5. (2. Kaldırma Hali) Atölye ortamında ve yükleme sırasında araç gövdesinin asılması. Tam teçhizatlı araç gövdesinin bojiler bağlı olduğu halde çatıdaki dört noktadan kaldırılması Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1,6\sigma < \sigma_{burkulma}$
6. (3. Kaldırma Hali) Raya oturtma işlemleri. Tabanın altındaki dört kaldırma noktasından tam teçhizatlı araç yapısının kaldırılması. Kaldırılan araçgövdesinin uç

bojisi ve orta boji asılı vaziyettedir. Diğer araç gövdesinin ucu mafsaldan asılmıştır. Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1.6\sigma < \sigma_{burkulma}$

7. (4. Kaldırma Hali) Raya oturtma işlemleri. Tabanın altındaki iki kaldırma noktasından tam teçhizatlı araç yapısının kaldırılması. Kaldırma noktaları uç bojinin yakınına yerleştirilmiştir. Kaldırılan araç yapısının uç bojisi asılı vaziyettedir. Kaldırılan araç gövdesinin diğer ucu, rayda bulunan diğer araca mafsaldan bağlıdır. Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1.6\sigma < \sigma_{burkulma}$
8. (5. Kaldırma Hali) Raya oturtma işlemleri. Tam teçhizatlı araç yapısının çatıdaki iki asma noktasından kaldırılması. Asma noktaları araç çatısında, orta bojinin ucu hizasına, yerleştirilmiştir. Orta boji asılı vaziyettedir. Diğer araç gövdesinin ucu mafsaldan asılıdır. Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1.6\sigma < \sigma_{burkulma}$
9. Geçici çarpma/bağlanma kuvvetlerine veya ani frenlemeye bağlı olarak ortaya çıkan, cihazlar üzerinde 3g şiddetinde yavaşlama kuvvetleri. Sağlanacak şart: $\sigma < 0,9\sigma_{akma}$, $1.6\sigma < \sigma_{burkulma}$



Şekil Ek1. BHM aracının yükleme durumları