



MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YAPI MODELLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

CEM MERTAYAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya/HATAY

ARALIK-2009

MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPI MODELLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ**

CEM MERTAYAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yrd.Doç.Dr. Hakan TÜRKER danışmanlığında hazırlanan bu tez/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Yrd.Doç.Dr. Hakan Türker Yrd.Doç.Dr. Hilmi Çoşkun Yrd.Doç.Dr. Ersin Özdemir
Baskan Üye Üye

Bu tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof.Dr.Bünyamin YILDIZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirislerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	8
3.1. Materyal	8
3.1.1. Titreşim.....	8
3.1.1.1. Titreşim Analizi ve Çözüm Yöntemleri.....	9
3.1.1.1.1. Klasik Çözüm.....	9
3.1.1.1.2. Duhamel İntegral Yöntemi.....	10
3.1.1.1.3. Dönüşüm Metodları	12
3.1.1.1.4. Sayısal Yöntemler	13
3.1.2. Serbest Titreşim	13
3.1.3. Sönümlü Serbest Titreşim	14
3.1.4. Sönümlü Zorlanmış Titreşim	16
3.1.5. Çok Serbestlik Dereceli Titreşim	18
3.1.5.1. Yapısal Modeller	20
3.1.5.2. Modal Analiz.....	24
3.1.6. Çok Serbestlik Dereceli Zorlanmış Titreşim	27
3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. Ankastre Serbest Titreşim Düzeneği	29
3.2.1.1. Deneysel Mantık	29
3.2.1.2. Akustik Analiz.....	33
3.2.1.2.1. Akustik Kayıt Sistemi	34
3.2.1.2.2. Akustik Kayıt İşlemi	34
3.2.1.2.3. Akustik Kayıtların Analizi	35
3.2.1.2.4. Kalibrasyon ve Hata Oranları.....	35

3.2.1.3. Deneysel Ölçümleme	37
3.2.1.3.1. Titreşim Akustik Analizi.....	38
3.2.1.4. Deneysel ve Teorik Karşılaştırmalar	49
3.2.2. Çerçeve Serbest Titreşim düzeneği	50
3.2.2.1. Akustik Analiz Veri Karşılaştırması	51
3.2.2.2. Çerçeve Rijitlik Ölçümü.....	51
3.2.2.3. Çerçeve Görüntü Analizi.....	53
3.2.2.4. Sönümlenme Hesabı.....	53
3.2.2.5. Deneysel ve Teorik Karşılaştırmalar.....	57
3.2.3. Zorlanmış Titreşim	58
3.2.3.1. Zorlanmış Titreşim Düzeneği (Sarsma Tablası)	71
3.2.3.2. Tek Serbestlik Dereceli Titreşim.....	77
3.2.3.3. Çok serbestlik Dereceli Titreşim.....	79
3.2.3.4. Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırması	81
3.2.3.5. Hata Faktörleri ve Oranları	81
3.2.4. Görüntü Analizi	82
3.2.4.1. Görüntü Kayıt Sistemi.....	82
3.2.4.2. Görüntü Kayıtlarının analizi.....	83
3.2.4.3. Kalibrasyon	86
3.2.4.4. Boyut Etkisi.....	86
3.2.4.5. Hata Faktörleri ve Oranları	87
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	88
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	90
TEŞEKKÜR.....	92
ÖZGEÇMİŞ	93

I ÖZET

YAPI MODELLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

Çalışmada, çeşitli serbestlik dereceli yapı modelleri oluşturulmuştur. Modellerin elastiklik özellikleri deneysel ve teorik olarak hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Özellikleri belirlenen modeller Serbest ve Zorlanmış titreşim düzeneklerinde teste tabi tutularak, dinamik davranış özellikleri akustik ve görüntü işleme yöntemleriyle kaydedilmiştir.

Serbest titreşim düzeneği hazırlanarak bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Düzenek yardımıyla, serbest salınım yapan modelin akustik kaydı yapılmıştır. Düzenekte kayıt arabirimi olarak mikrofon kullanılmış, bilgisayara kaydedilen ses kayıt grafiği işlenerek, modelin frekansı bulunmuştur. Teorik model ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir bir hata oranıyla doğru sonuç elde edilmiştir.

Zorlanmış titreşim düzeneğinde, monofaze olarak aldığı elektrik akımını trifaze akıma çevirerek hız kontrolü sağlayan bir hız kontrol cihazı, bu cihaza bağlanan bir elektrik motoru ve redüktörle hızı yavaşlatılarak bir titreşim düzeneği kurulmuştur. Düzenek metal bir sehpa üzerine monte edilerek ayarlı bir disk yardımıyla sehpa üzerindeki kayar tablanın tek doğrultuda titreşmesini sağlamıştır.

Kayar tablaya bağlanan çeşitli modeller çeşitli frekanslarda titreştirilerek, modellerin hareketleri videoya kaydedilmiştir. Videolar özel görüntü işleme programları yardımıyla analiz edilerek, modellerin dinamik davranışları saptanmıştır. Sonuçlar teorik hesaplamalarla karşılaştırıldığında gerçeğe yakın değerler elde edilmiştir.

Bu çalışma için imal edilen düzeneklerle, deneysel ve teorik karşılaştırmaların yanında, basit araç ve gereçlerle yapısal modellerin imal edilebileceği ve eğitsel ve deneysel çalışmalarda kullanılma olanakları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Titreşim, yapısal model, görüntü işleme, ses işleme, serbestlik derece, akustik, analiz, sayısallaştırma, hız kontrol, sarsma tablası

II

ABSTRACT

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF DYNAMIC STRUCTURAL MODELS

In the study structural models are built in various degrees of freedom. The elasticity properties of the models are compared experimentally and theoretically. The models are tested in free vibration and forced vibration mechanisms and properties of dynamic behavior by acoustic and picture processing techniques.

An experimental mechanism is prepared for free vibration test. By the mechanism acoustic behavior is recorded. A microphone is used for acoustic recording interface and the graph is processed in which recorded to computer and the frequency of the model is calculated. When it is compared to theoretical model a satisfactory result is obtained.

For the forced vibration test, a vibration machine is composed by an electrical speed control unit is used to convert mono phased current into tri phase current, an electrical motor and a mechanical system to reduce the speed of the motor. All items are mounted on a metal table and there is a metal disc producing eccentric vibration of a plate in one direction when it rotates.

The models mounted on the vibrating plate are vibrated in a definite frequency and the films of vibrations are recorded. Videos are processed and analyzed by some specific programs and the dynamic behaviors of them are calculated. The results are found very closed to hypothetical results.

Behind the comparison of hypothetical and experimental calculations, another purpose of the study is to show the simplicity of making experimental mechanisms by materials that can be found easily and usage of them for educational experiments.

Keywords: Vibration, structural model, picture processing, sound processing, degree of freedom, acoustic, analysis, digitization, speed control, shake table

III SİMGELER ve KISALTMALAR

a	: İvme
a_i	: i inci adımdaki ivme değeri
a_{i-1}	: $(i-1)$ inci adımdaki ivme değeri
b	: Kesit hesaplamasında genişlik
c	: Sönümlenme katsayısı
C	: Sönüm matrisi
D	: Dinamik yükseltme faktörü
E	: Elastiklik katsayısı (Elastisite modülü)
E_k	: Kinetik enerji
E_p	: Potansiyel enerji
f	: Frekans
g	: yer çekimi ivmesi ($g = 9.81 \text{ m/sn}^2$)
h	: Kesit hesaplamasında hesaplanan yükseklik
I	: Atalet Momenti
k	: Rijitlik, yay sabiti
$[K]$: Rijitlik matrisi
l	: Boy
$[M]$: Kütle matrisi
P	: Kuvvet
r	: Zorlanmış titreşim frekans oranı
T	: Periyot
T_n	: n 'nci doğal periyot
t	: Zaman
Δt	: Zaman adımı
$u(t)$: Zamana bağlı deplasman fonksiyonu
\dot{u}_g	: Yer veya mesnet hızı
\ddot{u}_g	: Yer veya mesnet ivmesi

$V(t)$: Zamana bağlı etkin kuvvet fonksiyonu
v	: Hız
v_i	: i inci adımdaki hız
v_{i-1}	: $(i-1)$ inci adımdaki hız
W	: Ağırlık
ω	: Açısal hız
ω_n	: Sönümsüz n 'nci doğal frekans (rad/sn)
\dot{x}	: Yerdeğiştirmeden hesaplanan hız
\ddot{x}	: Yerdeğiştirmeden hesaplanan ivme
ζ	: Sönümlenme oranı
ϕ	: Açısal faz farkı
$[\Phi]$: Mod matrisi
$[\Omega]$: Spektral matris
β	: Sönümlü hareket frekans oranı
δ	: Logaritmik genlik azalması
ε	: Birim Şekil değiştirme
ϕ_1	: İki fonksiyon arasındaki matematiksel ilişki
λ	: İvme ve hız benzerliği için ölçek faktörü
ν	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme

IV

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge .3.1. Elastik çubuklar ve ağırlıkları.	37
Çizelge .3.2. Kullanılan kütle ağırlıkları	38
Çizelge .3.3 Ölçümü yapılan deplasman değerleri.	39
Çizelge .3.4. Deplasman fark değerleri.	39
Çizelge .3.5. Göreceli deplasman değerleri	39
Çizelge .3.6. Çubuklara ait boyut ve elastik özellikler.	40
Çizelge .3.7. Deplasman değerlerine göre elastik özellikler.	41
Çizelge .3.8. Kütleler ile sağlanan Deplasman değerleri	41
Çizelge .3.9. Dinamik davranışa esas kütle hesabı.	41
Çizelge .3.10. Mavi çubuğun deplasmanlara bağlı rijitlik katsayıları	42
Çizelge .3.11. “VIBRAMATH” tablosu giriş değerleri	42
Çizelge .3.12. “VIBRAMATH” tablosu, 2. derece etki bölümü.	44
Çizelge .3.13. “VIBRAMATH” tablosu normal salınım bölümü.	45
Çizelge .3.14. Salınım periyotları kıyaslamalı tablosu.	48
Çizelge .3.15. Salınım hata oranları.	49
Çizelge .3.16. Kütle 2.derece etkisinin fark oranları.	49
Çizelge .3.17. Çubuk mesnetlenme durumuna göre serbest açıklıkları	50
Çizelge .3.18. Çerçeve taşıyıcı çubukları rijitlik katsayı hesaplaması	51
Çizelge .3.19. Çerçeve deneyi ölçüm ağırlıkları.	51
Çizelge .3.20. Çerçeve ağırlık bileşenleri.	51
Çizelge .3.21. Çerçeve toplam ağırlık hesapları	52
Çizelge .3.22. Çerçeve deplasman ölçüm değerleri.	52
Çizelge .3.23. Çerçeve deplasman hesapları.	52
Çizelge .3.24. Çerçeve fark deplasmanları.	52
Çizelge .3.25. Çerçeve Deplasman değerlerine göre elastik özellikleri.	53
Çizelge .3.26. Çerçeve salınım maksimum ve minimum deplasman değerleri.	54
Çizelge .3.27. Çerçeve salınım deplasman eksenel değerleri	55
Çizelge .3.28. Çerçeve sönümleme değerleri	56

Çizelge.3.29. Sönümlü Dairesel Frekans Değerleri Karşılaştırması	56
Çizelge.3.30. Çerçeve periyot karşılaştırma tablosu	57
Çizelge.3.31. Ankastre siyah çubuk yükleme tablosu.	58
Çizelge.3.32. Ankastre siyah çubuk yükleme fark tablosu.	58
Çizelge.3.33. Çubuklara ait Rijitlik Dönüşümü.	59
Çizelge.3.34. Siyah Çubuklu Çerçeve yükleme tablosu.	60
Çizelge.3.35. Ankastre Siyah Çubuk yükleme tablosu.	60
Çizelge.3.36. Çerçeve rijitlik tablosu	61
Çizelge.3.37. Çerçeve deneysel kütle tablosu.	61
Çizelge.3.38. Çerçeve karşılaştırmalı periyot tablosu.	61
Çizelge.3.39. Çerçeve periyot fark oranları.	62
Çizelge.3.40. 3 Katlı Çerçeve kat yükleri.	63
Çizelge.3.41. 3 Katlı Çerçeve eklenmiş kat yükleri	64
Çizelge.3.42. 3 Katlı Çerçeve kat rijitlikleri tablosu	64
Çizelge.3.43. Vibra-Math ağırlık faktörlü hesap tablosu giriş bilgileri	64
Çizelge.3.44. Vibra-Math ile hesaplanan azaltılmış 2. etkili kat rijitlikleri tablosu	65
Çizelge.3.45. Modal analiz 3.derece denklem katsayıları	67
Çizelge.3.46. Modal analiz λ değer tablosu	68
Çizelge.3.47. Modal analiz açısal hız sonuç değerleri.	68
Çizelge.3.48. Modal analiz Periyot sonuç değerleri	68
Çizelge.3.49. Doğal periyotlara ait açısal hız değerleri	71
Çizelge.3.50. Sarsma tablası eşdeğer gösterge değerleri	71
Çizelge.3.51. Sarsma tablası uygulanabilen gösterge değerleri	81
Çizelge.3.52. Teorik ve Uygulama açısal hız fark oranları	81

V

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Genel titreşim modelleri	9
Şekil 3.2. İtme kuvveti grafik tanımı	11
Şekil 3.3. Serbest titreşim düzeneği	13
Şekil 3.4. Sönümlenme oranlarına göre deplasman oranları.	15
Şekil 3.5. Sönümlenmeli mesnet hareketli zorlanmış titreşim düzeneği.	17
Şekil 3.6. Sönümlü zorlanmış titreşim uygulama örneği.	18
Şekil 3.7. Yapı genel görünüşü.	19
Şekil 3.8. 3-Boyutlu Yapı Modeli	20
Şekil 3.9. 2-Boyutlu çok serbestlik dereceli yapısal model örneği.	22
Şekil 3.10. Çok serbestlik dereceli sistem yapı modeli örneği	22
Şekil 3.11 Çok serbestlik dereceli sistemlerde sönümlenme örneği.	23
Şekil.3.12. Yapı Modeline ait mod şekilleri	25
Şekil 3.13. Zorlanmış titreşim etkisinde çok serbestlik dereceli model.	27
Şekil 3.14. Serbest Titreşim Düzeneği	29
Şekil 3.15. Elastik çubuk k değerinin hesaplanma şeması	30
Şekil 3.16. Serbest titreşim düzeneği	30
Şekil 3.17. Esneme Ölçümü Yapılması	31
Şekil 3.18. Mikrofon konsolu ve iğne.	32
Şekil 3.19. Mikrofon ve iğne.	32
Şekil 3.20. Abartılmış titreşim zaman grafiği	35
Şekil 3.21. Ses Kayıt tepe noktası tespiti	36
Şekil 3.22. Elastik esnek çubuklar	37
Şekil 3.23. Test ağırlıkları	38
Şekil 3.24. Esneme değerinin okunması	38
Şekil 3.25. Deneysel Ağırlık/Deplasman değişim grafiği	40
Şekil 3.26. Kütlelerin 2. derece etkisi	43
Şekil 3.27. Serbest salınım üzerinde 2.Derece kütle etkisi grafiği	46
Şekil 3.28. Akustik analiz abartılmış ses grafiği.	47
Şekil 3.29. Yakınlaştırılmış ses grafiğinden değer okuma.	47

Şekil 3.30. Deneysel ve teorik hesaplamaların karşılaştırılması.	48
Şekil 3.31. Çerçeve ve ankastre çubuk serbest boy farkı.	50
Şekil 3.32. Çerçeve deneysel Ağırlık/Deplasman değişim grafiği.	52
Şekil 3.33. Çerçeve deneysel salınım grafiği.	53
Şekil 3.34. Çerçeve sönümlenme grafiği.	53
Şekil 3.35. Çerçeve genlik değişim grafiği.	55
Şekil 3.36. Çerçeve deplasman 2. derece etki değerleri karşılaştırma grafiği.	57
Şekil 3.37. Ankastre Siyah Çubuk Kuvvet-Deplasman Grafiği	59
Şekil 3.38. Siyah Çubuklu çerçeve Kuvvet Deplasman Grafiği	61
Şekil 3.39. Periyot sonuç karşılaştırma grafiği	62
Şekil 3.40. Çerçeve düşey yük 2.Etki moment grafiği	62
Şekil 3.41. Çok serbestlik dereceli model örneği	63
Şekil 3.42. $K_w=1$ değeri için deplasman-zaman grafiği	65
Şekil 3.43. $K_w=2$ değeri için deplasman-zaman grafiği	65
Şekil 3.44. $K_w=3$ değeri için deplasman-zaman grafiği	66
Şekil 3.45. Sarsma Tablası	73
Şekil 3.46. Kayar Tabla Ray Detayı	73
Şekil 3.47. Sarsma Tablası motoru ve redüktör	74
Şekil 3.48. Sarsma tablası eksantrik disk mekanizması	75
Şekil 3.49. Hız kontrol cihazı (Trifaze sürücü)	75
Şekil 3.50. Sarsma tablası çerçeve montaj detayları.	76
Şekil 3.51. Model yapı elastik taşıyıcı kolonları	76
Şekil 3.52. Çerçeve ek ağırlıkların montajı	77
Şekil 3.53. Tek serbestlik dereceli çerçeve Zorlanmış Titreşim modeli	77
Şekil 3.54. Zorlanmış Titreşim Tabla yerel Titreşim Grafiği	78
Şekil 3.55. Zorlanmış Titreşim Çerçeve yerel Titreşim Grafiği	78
Şekil 3.56. Zorlanmış titreşim Tabla-Çerçeve yerel Titreşim Grafiği.	78
Şekil 3.57. Zorlanmış titreşim Tabla-Çerçeve göreceli deplasman Grafiği	79
Şekil 3.58. M2 ağırlık seti 2.Mod. şekli	79
Şekil 3.59. M1 ağırlık seti 1. Mod şekli	80
Şekil 3.60. M3 Ağırlık seti 2. Mod Şekli	80
Şekil 3.61. M2 ağırlık seti 1. Mod şekli	80

Şekil 3.62. Kayıt Kamerası	83
Şekil 3.63. Tespit işaretleri	84
Şekil 3.64. Kalibrasyon işaretleri.	86

1. GİRİŞ

Barınma ihtiyacı ile başlayıp, çeşitlenerek ve gelişerek artan yapı ihtiyacı, inşaat mühendisliğinin önem kazanmasını sağlamıştır. İnşaat Mühendisliği ihtiyaç duyulan yapıların, ihtiyacı karşılayacak özelliklerde, güvenli ve ekonomik olarak inşasını sağlayan bilim dalıdır. Ulaşılabilen malzemeleri kullanarak, yapının karşılaşacağı yüklerin özelliklerini hesaplayarak yapının teknik özelliklerini tasarlar ve inşa koşullarını oluşturur. Malzeme özellikleri artan teknolojiyle çeşitlenerek tasarımcı mühendise daha geniş seçenekler sunmaktadır. Türkiye’de de çeşitli malzemelerin kullanılmasına karşılık, yaygın yapı tipi olarak betonarme karkas tip denen, kolon, perde ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveli sistemler tercih edilmektedir. Mühendisin tasarımı doğru olarak yapması, malzeme davranışına ve yapıya etki eden yükleri doğru olarak hesaplamasına bağlıdır. Yapıya etki eden yükler statik ve dinamik yükler olarak iki gruba ayrılır. Statik yüklerin hesaplanmasında yapının kendi ağırlığı ve projede belirtilen özel yükler (makineler, depolama malzemeleri, iklimsel kar ve rüzgar, toz yüklerini temsil eden sabit yükler) hesaba katılmaktadır. Statik yüklerin yapının elemanları üzerine dağılımı yaklaşık yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Genel olarak ağırlıklardan oluşan, yapının kendi formundan kaynaklanan statik yükler yanında, deprem ve yapıya etki eden titreşim yükleri gibi dinamik yüklere de maruz kalmaktadır. Yapı üzerinde hareket eden araçlar ve makineler, yapının deprem ve çarpma gibi etkiler karşısındaki durumu statik yüklere ek olarak değişken ve bazen de olasılık hesaplarıyla kabulü yapılan kuvvetler oluşturmaktadır. Bütün bu yükler karşısında yapıda oluşan iç kuvvetler tasarımın temelini oluşturmaktadır. Dinamik yüklerin yarattığı iç kuvvetlerin hesaplanmasında yapının karakteristiği olan doğal salınım periyotları kullanılmaktadır. Çünkü doğal salınım periyotlarında yapılar karşılaşacakları en fazla deplasman ve bunun sonucu olan kuvvetlerle karşılaşılır. Doğal salınım periyotlarının belirlenmesi için yapıyı bir bütün olarak değerlendiren mod analizi yapılmaktadır. Bu analiz bilgisayarda matris hesaplamalarına dayanan bir analiz yöntemi olduğundan ve hesabı yapılan matrislerin büyük boyutlarda olduğundan doğruluğunun kontrol edilmesi mümkün olmamaktadır.

Bu çalışmada basit deneysel modellerle bu modellere ait doğal salınım frekanslarının teorik hesaplamalarıyla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması yapılacaktır.

Deneysel sonuçlar için bir sarsma tablası ve çeşitli yapı modelleri imal edilmiş olup, birkaç doğal titreşim frekansının oluşumu görsel olarak sağlanacaktır.

Kullanılan düzenekler, ayarlanabilir genlikte ve frekansta hareket eden tabla üzerine sabitlenmiş;

- Tek ve çok katlı çerçeve sistemleri,
- Basit ankastre kolon ve kule modelleri,
- Sönümlenmeli modeller,
- Su deposu modelleri,

davranışları analiz edilerek, görüntü analiz yöntemleriyle, deplasman, hız, ivme, genlik, frekans bilgileri elde edilecektir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Birçok mühendislik dalında incelenen titreşim hareketleri, laboratuvar ortamına taşındığında bu titreşimlerin etkilerini incelemek için titreşim kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle istenen titreşimin özelliğine bağlı olarak çeşitli makineler tasarlanmıştır. İnşaat mühendisliği konularında titreşimin en yaygın olarak incelendiği konu deprem hareketleri ve sismik analizlerdir. Deneysel çalışmalarla deprem mühendisliğinde aşağıdaki bilgiler elde edilir.

- Yapı malzemelerinin yük-deplasman karakteristiklerinin, analitik modellerinin ve matematik modellerinin geliştirilmesi

- Deprem, dalga, rüzgar gibi karmaşık dinamik yükler için gerçekçi yükleme modellerinin elde edilmesi.

- Yapı modellerinin model yükler altında davranışının şeklinin hesaplanması ve tespiti. Çalışmaların amacı analitik modelinin model yükler altında denenmesi ve gerçek yapının davranışının ve güvenliğinin belirlenmesidir.

Bu amaçlar için kullanılan yöntemler ve gerçek zamanlı veri alma yolları ise şöyle sıralanabilir (Sollogoub, 2006).

a). Gerçek deprem deneyiminden tecrübe elde etmek: Deprem mühendisliğinin ilk dönemlerinden beri uygulanmaktadır. Bu şekilde depreme dayanıklı yapı tasarımı ve yönetmeliklerin oluşturulması sağlanmakta ve deprem sırasında yapının davranışı hakkında önemli bilgiler elde edilmektedir.

b). Saha deneyleri: Hidrolik, elektrikli ve çeşitli tahrik mekanizmaları kullanılarak prototip veya gerçek bir yapının yüklenmesi ile gerçek şartlar altında testin yapılması önemli bir avantajdır. Bu konuda eksiklik daha sonra kullanılacağı için yapı zorlanamamaktadır. Yöntem ile yapının doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm karakteristikleri hakkında bilgi elde edilmektedir.

c). Statik testler: Yapının kritik kısımları veya genel davranışı hakkında bilgi sağlayan artımsal itme analizi (push-over) yöntemidir.

d). Santrifüj testleri: Genel olarak zemin mühendisliğinde kullanılan bir yöntemdir. Zemin içindeki gerilme durumlarının yapay olarak zemin numunesi veya küçük ölçekli yapı modeli üzerinde merkezkaç kuvveti ile laboratuvar şartlarında oluşturulmasıdır.

5. Yarı dinamik (pseudo-dynamic) testler: Büyük ölçekli modellerin ve prototiplerin dinamik yük altındaki davranışını belirlemek amacıyla kullanılır ve sayısal çözüm birlikte ilerler. İlk adımda yapı dengededir, bir sonraki aşamada bilinmeyen deplasman sayısal olarak hesaplanır, hesaplanan deplasman hidrolik yükleyiciler yardımıyla model yapıya uygulanır, oluşan kuvvetler ölçülür, bilinmeyen hız ve ivme değerleri sayısal olarak hesaplanır, bir sonraki adıma geçilir. Yöntem analitik ve deney sonuçlarını birleştirdiği için zamanla artan sistematik hatalar tamamen hatalı bir sonuca yol açabilmektedir.

6. Sarsma tablası testleri: Deprem davranışını en çok benzeştiren (örnekleyen) yaklaşımdır. Model yapı rijit bir plaka üstüne yerleştirilmekte ve plaka hidrolik veya elektrikli bir motor yardımıyla sarsılmakta ve model yapıdan ölçülmek istenen büyüklük kaydedilmektedir. Eğer sınır şartları doğru bir şekilde belirlendiyse deprem esnasındaki davranışına en yakın davranış elde edilmektedir. Önemli dezavantajı ise ölçekli modeller üzerinde çalışılması gerekliliğidir. Ancak benzerlik yasaları yardımıyla bu dezavantaj önemsiz bir hale dönüştürülebilmektedir. Çeşitli ülkelerde tam ölçekli yapıları test etmeye olanak sağlayan tablalar da mevcuttur.

Bu nedenle deprem davranışına uygun tek doğrultuda titreşim yaratan sarsma tablaları tasarlanmıştır. Bu çalışmaların geçmişi 19.yüzyıl sonlarına kadar uzanmaktadır.

Baran (2008) sarsma Tablası Deneyleri ile ilgili olarak son yıllarda yapılan çalışmaları aşağıdaki şekilde özetlemiştir.

Mills 1979'da, küçültülmüş modeller için tabla performansı ve veri toplama sistemi gereksinimleri üzerinde çalışmıştır.

Moncarz 1981'de, dinamik modellemeyi, küçültülmüş modellerde malzeme davranışını ve yaklaşıklıkları incelemiştir.

Latendresse 1999'da, Kanada Vancouver' daki British Columbia Üniversitesi'nde bulunan sarsma tablasının geliştirilmesi üzerine bir çalışma yapmış ve daha sonra çeşitli ölçeklerdeki modelleri bu tabla üzerinde test etmiştir.

Muhlenkamp 1997'de, Rice Üniversitesi' nde yaptığı çalışmada bir sarsma tablası alt yapısının analizini, tasarımını ve kontrolünü gerçekleştirmiştir.

Trombetti 1996'da, hidrolik bir sarsma tablası imalatı ve kontrolü için gerekli parametreleri belirlemek amacıyla bir çalışma yapmıştır.

Kuehn ve arkadaşları 1999'da, mevcut bir sarsma tablasının bilgisayar kontrol yöntemini iyileştirmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır.

Twitchell ve Symans 2003'de, çalışmalarında "offline" bir düzeltme yöntemiyle deprem kaydının tabla tarafından uygulanma başarısının arttırılabileceğini göstermişlerdir.

Delgado 2005'de, Porto Rico Üniversitesi Mayagüez Kampusu'nda bir sarsma tablasının kurulumu ve geliştirilmesi üzerine çalışmıştır.

Chase ve arkadaşları 2005'de, Canterbury Üniversitesi'nde bulunan bir sarsma tablası için sistem tanımlama ve kontrol parametrelerini geliştirmişlerdir.

Mo ve Hwang 1998'de, küçük ölçekli ön-gerilmeli çerçeveler üzerinde yaptıkları sarsma tablası deneyleri ile çerçevelerin yatay yük ve deplasman ilişkilerini belirlemişlerdir.

Koh ve arkadaşları 1998'de, küçültülmüş üç boyutlu bir sıvı tankı modeli kullanarak, deprem hareketi sonucu oluşan yapı-sıvı etkileşimi problemini araştırmışlardır.

Timler ve arkadaşları 1998'de, 1:4 ölçekli bir model kullanarak yapılarda çelik perde kullanımıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır.

Filiatrault ve Tremblay 1998'de, çelik bir yapı modeli üzerinde yalnız çekmeye çalışan diyagonal elemanların yapının dinamik davranışına etkisiyle ilgili sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir.

Villaverde ve Mosqueda 1999'da, ölçekli bir model kullanarak sismik bir çatı izolasyon sistemi üzerine çalışmışlardır.

Harris ve Sabnis 1999'da, kitaplarında yapısal modelleme, deneysel teknikler ve laboratuvar ölçüm cihazları konusunda oldukça detaylı bilgiler vermişlerdir.

Lu ve Wu 2000'de, sismik enerji emen perdeli yapıları inceledikleri çalışmada, 10 katlı bir yapı modelini sarsma tablası üzerinde test etmişlerdir. Wu (2000), yapısal kontrol konulu çalışmasında, üç katlı tam ölçekli bir yapıyı, ulaştığı sayısal sonuçları doğrulamak amacıyla sarsma tablası üzerinde test etmiştir.

Lu ve Chung (2001), çalıştıkları mod kontrol konusunda geliştirdikleri yöntemin doğruluğunu sınamak için tam ölçekli bir yapının sarsma tablası deneylerinin sonuçlarını kullanmışlardır.

Adam 2001’de, 1:20 ölçekli kesme tipi bir yapı üzerinde, çerçevelerin elastik plastik sınırlar içindeki dinamik davranışını incelemiştir.

Filiatrault ve arkadaşları 2002’de, iki katlı tek odalı, yönetmeliklere göre tasarlanmış ve inşa edilmiş bir yapıyı sarsma tablası üzerinde test etmişlerdir.

Wu ve Samali 2002’de, sismik temel yalıtımlı çelik bir yapı sistemini değişik deprem kayıtları için sarsma tablası üzerinde test etmişler ve sayısal sonuçları deney sonuçlarıyla kıyaslamışlardır.

Yoshida ve arkadaşları 2003’de, simetrik olmayan yapıların dinamik yükleme altında ortaya çıkan burulma davranışının “magnetorheological (MR)” sönümleyicilerle kontrolü üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Popovski ve arkadaşları 2003’de, yaptıkları 15 adet sarsma tablası deneyinde, tek katlı bir yapı modelinde farklı bağlantılara sahip ahşap diyagonal elemanı kullanmışlardır.

Filiatrault ve arkadaşları 2004’de, sarsma tablasında kullanılan ivme kayıtlarının daha hassas saptanmasına yönelik bir çalışma yapmışlardır.

Filiatrault ve arkadaşları 2004’de, daha önce kat hizalarında elde ettikleri kat ivmelerini, sarsma tablasında taban ivmesi olarak kullanarak, yapısal olmayan bölme duvar ve kitaplıkların dinamik davranışını incelemek amacıyla çok sayıda sarsma tablası deneyi gerçekleştirmişlerdir.

Chen ve Chen 2004’de, 1:4 ölçekli, üç katlı bir model yapı kullanarak sarsma tablası deneyleri yapmışlardır.

Liao ve arkadaşları 2004’de, Danimarka Teknik Üniversitesi’nde geliştirilen, sürtünmeli sönüm cihazlarının kullanıldığı üç katlı bir yapı modelini sarsma tablası üzerinde test etmişlerdir.

Elwood 2004’de, betonarme kolonların göçme yüzeylerinin belirlenmesine yönelik geliştirdiği tek eksenli malzeme modeline ait analitik sonuçları sarsma tablası deneyleri yaparak doğrulamıştır.

Folz ve Filiatrault (2004), iki katlı ahşap bir yapının deprem analizi için oluşturdukları formül geliştirme çalışmasını sunmuşlardır.

Yu ve arkadaşları (2005), yapıların deprem etkisi altındaki davranışını belirlemek amacıyla gerçek bir yapıya zorlanmış titreşim testi uygulamışlardır.

El Damatty ve arkadaşları 2005’de, bir kule üzerindeki su tankının küçük ölçekli modelini sarsma tablası üzerinde test etmişler, deney sonuçlarını çalışmada ulaştıkları analitik sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Choi ve arkadaşları 2005’de, yakın fay bölgelerindeki nükleer güç istasyonlarının sismik davranışını belirlemek amacıyla 4 katlı çelik bir yapı modeli kullanarak sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir.

Trombetti ve Conte 2005’de, tek katlı burulmaya elverişli yapılar üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada küçük bir yapı modeli ile gerçekleştirdikleri 88 adet sarsma tablası deneyinin sonuçlarını, geliştirdikleri sayısal yöntemin sonuçlarını doğrulamak amacıyla kullanmışlardır.

Wang ve Li 2006’da, 292 metre yüksekliğinde, mevcut bir betonarme kemer barajın 1:300 ölçekli bir modelinin sarsma tablası deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada yüksekliği 278 metre olan kemer tipi betonarme bir barajın güçlü yer hareketleri altındaki dinamik karakterini sarsma tablası deneyleri ile belirlemişlerdir.

Spiliopoulos ve Lykidis 2006’da, betonarme binaların analizinde kullanılacak üç boyutlu “solid” elemanları kullandıkları çatlama da göz önüne alan sonlu eleman analizine ait sonuçları, daha önce gerçekleştirdikleri sarsma tablası deneyi sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

Ayrıca, elektronik ve bilgisayar teknolojisinin gelişimi sonucunda çok amaçlı laboratuvar ekipmanları üretilmiş ve daha yaygın deneysel imkânlarla ulaşılmıştır. Bu nedenle birçok üniversitede daha küçük çaplı da olsa deneysel araştırmaların yapıldığı düşünülebilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Titreşim

Titreşim, mühendisliğin ve daha birçok bilim dalının sıkça karşılaştığı bir davranış şeklidir. Doğal sebeplerden veya insan yapısı sebeplerden kaynaklanan, sınırlı bir uzunlukta (genlik) ve belirli bir doğrultuda (yön) kendini zamana bağlı olarak tekrarlayan (frekans) bir hareket şeklidir.

İnşaat Mühendisliği anabilim dalında Deprem Mühendisliğinin temel çalışma alanı yapıların deprem yüklemeleri altındaki dinamik davranışını inceleyen bilim dalıdır. Yapıların sismik karakteristiğinin belirlenmesi için gerekli araştırmaları gerçekleştirmektedir. Bu karakteristiğin belirlenmesi için gerekli deneysel ve analitik çalışmaları araştırmakta ve geliştirmektedir.

Yapısal olmayan elemanların dinamik karakterinin belirlenmesi sırasında yapılan testlerin amaçları maddeler halinde şöyle özetlenebilmektedir (Sollogoub, 2006).

1) Kalite kontrol: Özellikle veya öncelikli kritik fonksiyondaki yapıların deprem sırasındaki davranışını sınamak ve gerekli tasarım değişikliklerini yapmak.

2) Analitik modellerin sınanması: Bir yapı ya da donanımın tamamı veya bir parçası için kurulan sayısal modeli, etki eden gerçek şartlar altında değerlendirmek.

3) Yönetmelik ve standart kurallarını sınamak: Yönetmeliklerde belirtilen şartları ve yöntemleri modellemek.

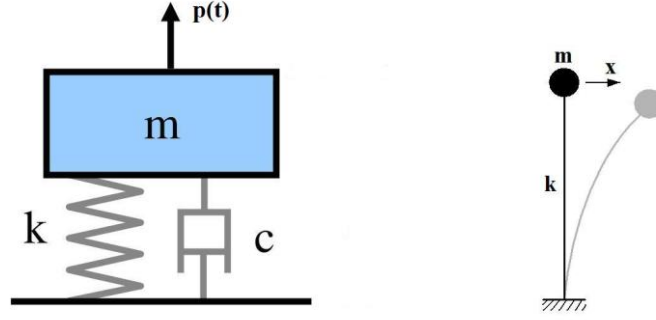
4) Benzeri olmayan yapının sınanması: Özel amaçlı yapılan veya hâlihazırda yönetmeliği bulunmayan yapı ve donanımlarını test etmek, beklenen şekilde davranıp davranmadığını belirlemek.

5) Araştırma ve geliştirme çalışmaları: Geliştirilen özel yapının doğrusal olmayan davranışını test etmek. Geliştirilen hesap yöntemlerinin bilinen yapılar üzerindeki etkilerini ve doğruluğunu test etmek.

Titreşimi tarif ederken kullanılan 3 karakteristik özelliği olan genlik, doğrultu ve frekansı zaman içinde düzensizlik gösterebileceğinden titreşimin zamana bağlı analiz incelenmesi gerekir. Titreşimin düzensizliğinin analizi genel kabul görmüş modellerle basitleştirilmeye çalışılmıştır. Depremler, makine titreşimleri, rüzgâr yükleri gibi düzensiz titreşimler düzenli titreşim modelleri ile analiz edilmektedir. Bu modellemede titreşimin temel üç bileşeninin yanında bunlardan bir veya birkaçının oluşturduğu model

belirli bir zaman aralığındaki belirli bir değişken titreşim modeli de kullanılabilir.

Titreşim analizlerinde temel model bir çubuk, çubuğa bağlı kütle ve titreşime karşı oluşan sönümleme kuvveti olduğundan, genel olarak sistem aşağıdaki gibi modellenmektedir.



Şekil.3.1. Genel titreşim modelleri.

3.1.1.1. Titreşim Analizi ve çözüm yöntemleri

Sistemin analizinde, kütleyle etkiyen kuvvetlerin eşitliği kullanılır.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (3.1.)$$

Eşitlikte problemin tam olarak tanımlanması için başlangıç deplasmanı $u(0)$ ve başlangıç hızı $\dot{u}(0)$ bilinmelidir.

Oluşan ikinci dereceden diferansiyel denklemin çözümü için çeşitli çözüm yöntemleri mevcuttur.

3.1.1.1.1 Klasik Çözüm

Diferansiyel denklemin tam çözümü tamamlayıcı çözüm ve kısmi çözümün toplamından bulunur.

$$u(t) = u_p(t) + u_c(t) \quad (3.2)$$

Denklem ikinci dereceden olduğundan 2 entegrasyon sabitine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar tamamlayıcı çözümden elde edilebilir ve başlangıç şartlarının bilinmesiyle elde edilir.

$p(t) = p_0$ ve $t \geq 0$ durumunda sönümlemesiz bir sistemin diferansiyel hareket denklemi ;

$$m\ddot{u} + ku = p_0 \quad (3.3.)$$

olacaktır.

Denklem (3.3) için kısmi çözüm;

$$u_p(t) = \frac{P_0}{k} \quad (3.4.)$$

ve tamamlayıcı çözüm;

$$u_c(t) = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \quad (3.5.)$$

Burada A ve B entegrasyon sabitleri olup $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ olmaktadır. Tam çözüm için kısmi ve tamamlayıcı çözümün toplamını oluşturmak için denklem (3.4) ve denklem (3.5) toplamından;

$$u(t) = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t + \frac{P_0}{k} \quad (3.6.)$$

Sistemin başlangıç koşulları olarak (t=0 zamanında) durağan olması ($u(0) = 0$ ve $\dot{u}(0) = 0$) durumunda A ve B katsayıları;

$$A = -\frac{P_0}{k} \text{ ve } B = 0 \text{ olduğundan, denklem (3.6.) aşağıdaki sonucu verir.}$$

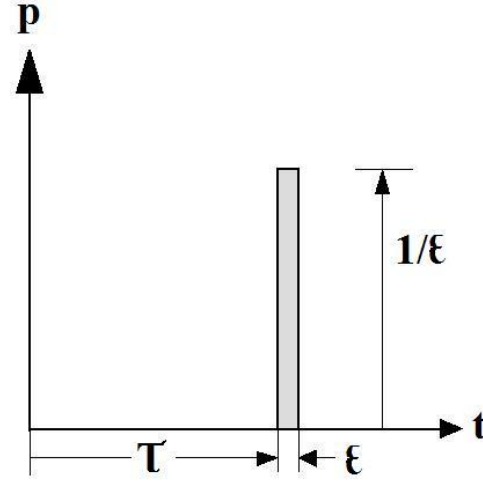
$$u(t) = \frac{P_0}{k} (1 - \cos \omega_n t) \quad (3.7.)$$

Klasik çözüm şekli analitik olarak tarifli yapılan harmonik, adımsal ve itme kuvvetleri altındaki serbest titreşimlerin çözümünde emel metot olarak kullanılır.

3.1.1.1.2 Duhamel Entegral Yöntemi

Tek serbestlik dereceli sistemlerde, etkiyen kuvvetin temel bir şekle oturmadığı veya çok sayıda değişkene bağlı olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılan bir metottur. Kuvvet sisteme çok küçük zaman aralıklarıyla arka arkaya etkiyen itme kuvvetleri olarak modellenir. İtme kuvveti kısa sürede etkiyen büyük bir kuvvet olarak tanımlanabilir.

Sistemin t zamanında etkiyen p(t) kuvvetine tepkisi, o sıradaki etkiyen bütün kuvvetlerin bileşkesi olarak hesaba katılır.



Şekil.3.2. İtme kuvveti grafik tanımı

İtme kuvvetinin bu gösterim tarzı ε sıfıra yakınsarken $p(t)$ 'nin zamana göre entegralinin 1'e eşit olması içindir. Bu nedenle $\varepsilon \rightarrow 0$ birim itme olarak hesaba katılabilir.

Newton'un hareket yasasından m kütesine etkiyen p kuvvetinin zamana bağlı değişimi;

$$\frac{d}{dt}(m\dot{u}) = p \quad (3.8.)$$

Sabit kütle için eşitlik;

$$p = m\ddot{u} \quad (3.9.)$$

Denklem (3.8) ve (3.9) un zamana göre entegrasyonundan;

$$\int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt = m(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = m\Delta\dot{u} \quad (3.10.)$$

İntegralin sol tarafı itme kuvvetinin büyüklüğü, kütle ve hızın çarpımı da momentum olup, itme kuvvetinin büyüklüğü momentumdaki değişime eşittir. Bu sonuç tek serbestlik dereceli sönümlenmeli kütle, çubuk sistemine uygulandığında çubuğun ve sönümlemenin etkisinin olmadığı ortaya çıkarır. Sürenin kısalığı etkiyen kuvvet çubuğun ve sönümlemenin etki yaratmasına meydan vermemiştir. Böylece itme kuvveti $t = \tau$ zamanında denklem (3.10) ile;

$$\dot{u}(\tau) = \frac{1}{m} \quad (3.11.)$$

Fakat deplasman itmeye bağılı olmakla beraber sıfırdır.

$$u(\tau) = 0 \quad (3.12.)$$

Birim itmenin sistemde yaratacağı titreşim Denklem (3.11) ve Denklem (3.12)'den sönümsüz sistemin davranışını verir.

$$h(t - \tau) \equiv u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin[\omega_n(t - \tau)] \quad t \geq \tau \quad (3.13.)$$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \int_0^t p(\tau) \sin[\omega_n(t - \tau)] d\tau \quad (3.14.)$$

Bu denklemde $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ olup, Duhamel Entegral denklemi olarak bilinir.

3.1.1.1.3 Dönüşüm Yöntemleri

Doğrusal diferansiyel denklemlerin çözümünde “Laplace” ve “Fourier” dönüşümleri adı verilen yöntemler de kullanılmaktadır. Her iki dönüşüm yöntemi içerik açısından benzerdir.

$$\text{Fourier dönüşümü } \hat{p}(i\omega) = F[p(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} p(t) dt \quad (3.15.)$$

Fourier dönüşümünde ilk adım t 'ye bağılı olan diferansiyel eşitliği, simgesel bir değer olan $i\omega$ cinsinden bir cebirsel ifadeye dönüştürmektir. Bu şekilde $\hat{u}(i\omega)$ için çözülen eşitlik, $u(t)$ dönüşümü olarak yazılır. Son olarak diferansiyel denklemin $u(t)$ çözümü ters dönüşüm $\hat{u}(i\omega)$ ile belirlenir. Ters dönüşüm işlemi

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(i\omega) \hat{p}(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.16.)$$

olarak sembolize edilir. Eşitlikte karmaşık frekans-tepki fonksiyonu olan $H(i\omega)$, harmonik yüklemeye karşı sistemin tepkisini gösterir.

Fourier dönüşüm yöntemi karmaşık olsalar da sayısal olarak gösterilebilen $p(t)$ veya $\ddot{u}_g(t)$ gibi etkiler altındaki doğrusal sistemlerin, dinamik analizini yapmakta uygun imkânlarla sahiptir.

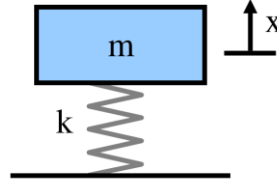
3.1.1.1.4 Sayısal Yöntemler

Anlatılan üç yöntem de doğrusal davranış gösteren sistemlerin çözümü üzerine kullanılmaktadır. Ancak şiddetli depremler veya titreşimler karşısında elastik sınırı aşarak, elastik olmayan deformasyonlara uğrayan sistemlerin modellenmesi ve çözümünde bu üç yöntem kullanılmadığından, pratik olarak sayısal zaman kademeli hesap yöntemleri kullanılmaktadır. Sayısal yöntemler aynı zamanda doğrusal sistemlerin çözümünde de kullanılmaktadır.

3.1.2. Serbest Titreşim

Serbest titreşim, bir çubuğa bağlı kütle ile bu kütleyle verilen bir ilk hız veya deplasman sonucu oluşan çubuk kuvvetinin kütleyle olan etkisinin, deplasman, hız ve ivme olarak zamana bağlı ifadesidir (m : Kütle, x : deplasman, k : yay sabiti olmak üzere).

Sistem enerjisini çubukta depolanan ilk deplasmanın yarattığı potansiyel enerji veya kütleyle verilen ilk hızın yarattığı kinetik enerjiden almaktadır.



Şekil.3.3. Serbest titreşim düzeneği

Yerçekimsiz ortamda kütleyle etkiyen kuvvetler: $F_y + F_m = 0$ olup;

$$F_y = k \cdot x \quad (\text{Çubuk tarafından kütleyle uygulanan kuvvet}) \quad (3.17.)$$

$$F_m = m \cdot a \quad (\text{Kuvvetin kütle ve hareket bağıntısı}) \quad (3.18)$$

Denklem 3.1 ve 3.2'nin birleştirilmesiyle;

$$m \cdot a + k \cdot x = 0 \quad (\text{Temel serbest titreşim eşitliği}) \quad (3.19.)$$

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0 \quad (\text{ivmenin deplasman cinsinden tanımı}) \quad (3.20.)$$

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot x = 0 \quad (\text{diferansiyel denklem olarak deplasman}) \quad (3.21.)$$

Sistemin “A” kadar bir başlangıç deplasmanı ile titreşime başlaması durumunda kütleli sistemin zamana bağlı hareketi;

$$x(t) = A \cos(2\pi \cdot f_n \cdot t) \quad (3.22.)$$

Bu çözüm sistemin “A” genliğinde ve “ f_n ” frekansında “basit harmonik hareket” yaptığını göstermektedir. Formülde “ f_n ” titreşim analizinde, yapının en önemli dinamik karakteristik değerlerinden biri olan “sönümlenmez doğal frekansı” olmaktadır.

Basit yay-kütle düzeneğinde f_n :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.23.)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada açısal frekans $\omega = 2\pi \cdot f_n$ olarak “radyan/saniye” cinsinden açısal hız olarak hesaba katıldığında standart frekans birimi olan Hz (Hertz) cinsinden saniyedeki devir sayısı hesaplanabilmektedir. Bu bağıntı kullanılarak, yay sabiti bilinen bir sistemin hangi frekansta titreşeceği bulunabilmektedir.

3.1.3. Sönümlü Serbest Titreşim

Serbest titreşimde titreşimi sağlayan, enerjinin korunumu sonucu ilk deplasman ile yayda biriken $E_p = \frac{1}{2} k \cdot x^2$ şeklinde hesaplanan potansiyel enerjinin, $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ şeklindeki kinetik enerjiye karşılıklı olarak dönüşümüdür. Ancak uygulamada titreşim genliği bazı enerji kayıpları sonucunda azalarak düzenek zamanla durma noktasına gelir. Bu azalma “Sönümlenme” olarak nitelendirilmekte olup, hava sürtünmesi, içsel sürtünmeler veya özel tasarlanmış sönümleyicilerden kaynaklanır.

Şekil: 3.2. Sönümlenmeli serbest titreşim düzeneği

Sönümlenme oluşturan sebepler kütleli sistemin hızıyla ilişkili olduğundan, yerçekimsiz ortamda kütleli sisteme etki eden kuvvetler:

$$F_y + F_m + F_s = 0 \quad (3.24.)$$

$$k \cdot x + m \cdot a + c \cdot v = 0 \quad (3.25.)$$

$$k \cdot x + m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} = 0 \quad (3.26.)$$

$$k \cdot x + m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} = 0 \quad (3.27.)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü sönümleme katsayısı olan “ C ” değerine bağlıdır. C yeterince küçük ise sistem titreşecek fakat belirli bir zaman sonunda duracaktır. Bu durumdaki sistem “az sönümlü” olarak değerlendirilecektir.

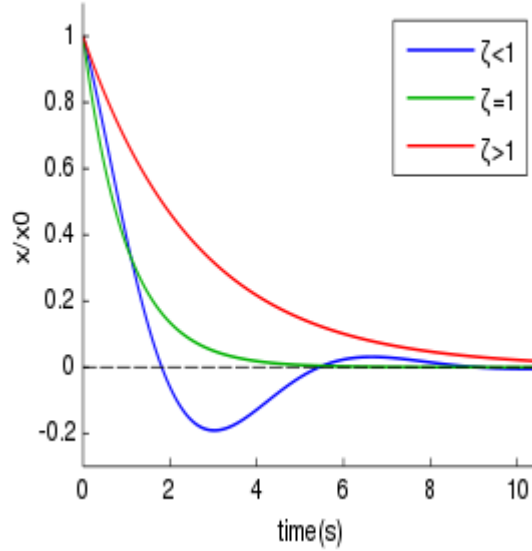
Sistemde C değeri salınımına izin vermeyecek düzeye doğru yükseltildiğinde sistem kritik sönüme ulaşmış olur. Sistemde kritik sönüm değerine ulaşmak için sönümleme değerinin

$$c_c = 2\sqrt{k \cdot m} \quad (3.28.)$$

olması gerekir. Sistemdeki sönüm, sönüm oranı deneni (gerçek sönümün kritik sönüme oranı) bir oran kullanılır.

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} \quad (3.29.)$$

Kritik sönümleme değerine ulaşıldığında hareket;



Şekil.3.4. Sönümleme oranlarına göre deplasman oranları.

Yapı Mühendisliği uygulamalarında özel durumlar dışında sönümlenme oranı kritik sönümlenme oranının oldukça altında varsayılır. (genellikle 0.05-0.10 arasında)

3.1.4. Sönümlü Zorlanmış Titreşim

Yapı Mühendisliğinde yapı analizlerinde deprem etkileri dikkate alındığında, yapıların ilk deplasmandan ziyade yapıya etkiyen değişken bir kuvvet karşısındaki dinamik davranışı (sönümlü zorlanmış titreşim) incelenir.

Yapıya etkiyen harmonik kuvvet olarak etkiyen;

$$F = F_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (3.30.)$$

Kütleye etkiyen kuvvetler olarak;

$$k \cdot x + m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} = F_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (3.31.)$$

hesaplanır. Diferansiyel denklemin kararlı çözümü olarak;

$$x(t) = X \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \phi) \quad (3.32.)$$

elde edilir. Bu sonuç, kütle için etkiyen harmonik kuvvetin etkisinde ϕ kadar bir faz farkıyla (gecikmeyle) salınacağını gösterir.

“ X ” genliğinde bir titreşim için;

$$X = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3.33.)$$

Hesaplanırken, “ r ” harmonik kuvvet frekansının sönümsüz kütle-yay sönüm modelinin doğal frekansına oranı olarak tanımlanır.

$$r = \frac{f}{f_n} \quad (3.34.)$$

Faz farkı “ ϕ ” ise;

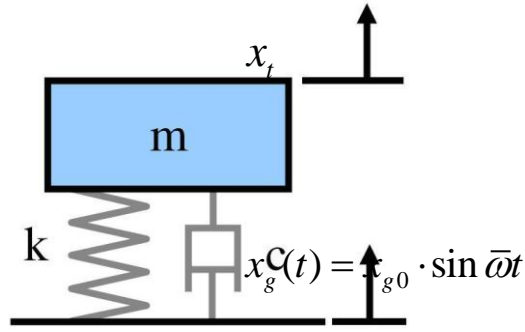
$$\phi = \arctan\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad (3.35.)$$

olarak tanımlanır. Denklem 3.19’da r ’nin 1’e yaklaştığı, yani zorlanma frekansının sistemin doğal frekansına yaklaştığı hatta eşit olduğu durumda, faz farkı 0 değerine yaklaşarak, yapının etkiyen kuvvetin frekansında, giderek artan enerji ve genlikte salınma sebep olur. Bu frekansa **Rezonans Frekansı** denir ve yapının Doğal Frekansına eşittir. Rezonansın yapıya en fazla yükün ve enerjinin aktarılacağı durum

olduğundan, hangi frekansta oluşacağı tespit edilerek buna karşı önlem alınmaya çalışılır.

Zorlanmış titreşimde kuvvetin kütleye etkimesi veya mesnetlerin harmonik hareket etmesi sistem üzerinde farklı davranışlara sebep olur. Bu nedenle Zorlanmış Titreşimi farklı şekilde ele almak gerekir.

Mesnetlerin harmonik hareketi sonucunda;



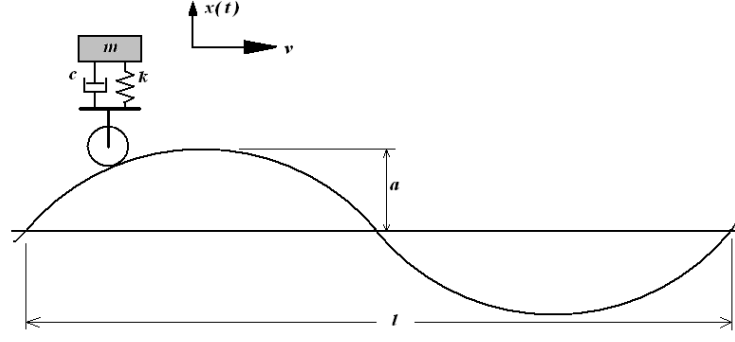
Şekil.3.5. Sönümlenmeli mesnet hareketli zorlanmış titreşim düzeneği.

Düşey harmonik hareket eden zemine izolatör ve yay ile bağlanan kütlenin zemine göre yaptığı hareket;

$$x(t) = x_{g0} \beta^2 D \cdot \sin(\bar{\omega}t - \phi) \quad (3.36.)$$

Formülde $\beta = \frac{T}{T_p}$ frekans oranı, D dinamik yükseltme faktörü, ϕ faz açısıdır.

Zorlanmış titreşimde zamana bağlı değişken kuvvetin kütleye etki etmesi durumunda sistemin davranışı, mesnedin zamana bağlı yer değiştirmesi durumundaki sistemin davranışından farklıdır. Kütleye etkileyen yükleme pratikte, yapılara etkileyen çevresel kuvvetler (makine titreşimi, rüzgar yükü gibi) sonucunda oluşmaktadır. Zemin yer değiştirmesi sonucu oluşan kuvvetler ve buna bağlı deplasmanlar, yer değiştirmenin yarattığı içsel kuvvetler sonucunda oluşmakta olup, pratikte ivmeölçerler, sarsma deneylerinde, ulaştırma sektöründe düzensiz zemin üzerinde hareket eden araçların analizinde kullanılmaktadır.



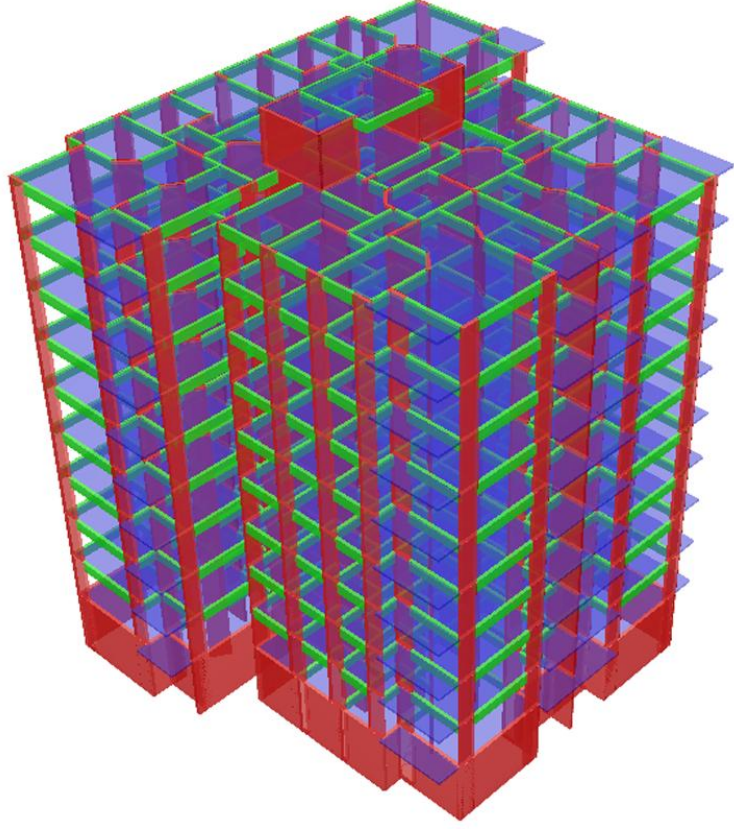
Şekil.3.6. Sönümlü zorlanmış titreşim uygulama örneği.

3.1.5. Çok Serbestlik Dereceli Titreşim

Özellikle birden fazla katlı veya çerçevesel taşıyıcı sistemlerin, birden fazla serbestlik derecesine sahip çeşitli kütlelerle modellenmesi gerçeğe daha yakın yapısal davranış göstereceğinden dinamik analizlerde “çok serbestlik dereceli yapısal sistemler” adı altında incelenir.

Yapı mühendisliğinde yapıya etkiyen statik yükler altında yapıda oluşan iç kuvvetler yanında, dinamik yüklerle oluşan iç kuvvetler de önemli olduğundan, dinamik analizin sağlıklı olarak yapılabilmesi gerekmektedir. Yapıya etkiyen dinamik yükler statik yükler gibi sabit kuvvetlerden oluşmadığı için, daha karmaşık varsayım ve hesaplamalarla bulunur. Dinamik yükler zamana bağlı değişkenlik gösterdiğinden, zamana bağlı fonksiyonlarla tanımlanarak, oluşacak en olumsuz etkilerin bulunmasına çalışılır. Yapının geometrik olarak modellenmesi aynı şekilde dinamik analizde de önem taşımaktadır. Hesaplamalar sonucunda yapının Modal şekilleri elde edilerek, dinamik yükler sonucunda yapıda oluşacak en olumsuz kuvvetler bulunarak tasarım aşamasına geçilir. Modal şekillerin yapının bütünü oluşturduğu yapı elemanlarının her birinin geometri, rijitlik ve kütlelerine bağlı olması, binanın tamamı hakkında dinamik davranış özelliğinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu nedenle yapının matematik modelinin oluşturulması sırasında, doğru varsayımlar yapılması, analiz ve tasarımın her aşamasında sonuçların doğruluğunu etkilemektedir.



Şekil.3.7. Yapı genel görünüşü.

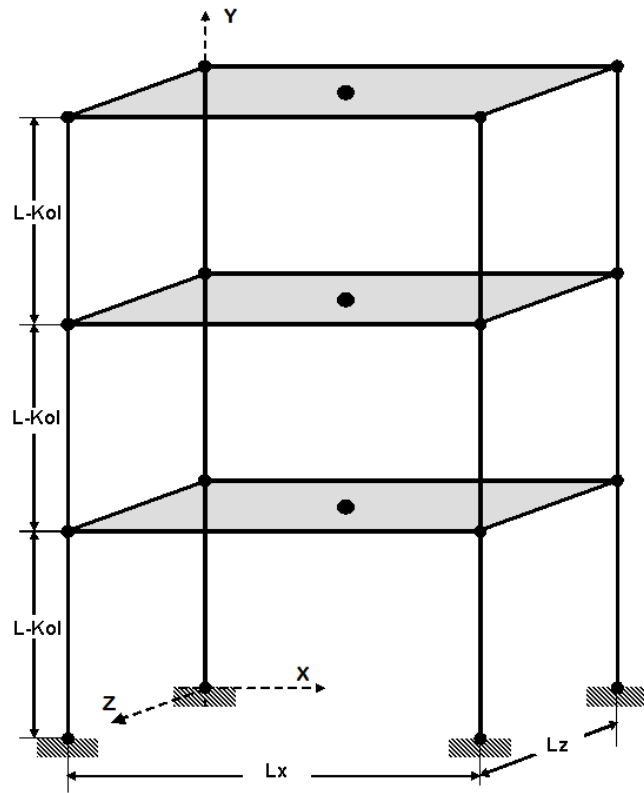
Modellemede birleşim noktaları arasında birer çizgi şeklinde gösterilen kolon ve kirişler, mesnet serbestlik derecelerini gösteren destek şekilleri, 2 boyutlu döşeme diyaframları kullanılarak yapının geometrik yapısı tanıtılır. Analizde çizgi olarak gösterilen yapısal elemanların kesit ve malzeme özellikleri kullanılır. Birleşim noktalarının bağlı bulunan elemanların kesit ve malzeme özelliklerine bağlı olarak diğer birleşim noktalarıyla olan ilişkilendirilmesi yapılır. Bu şekilde yapısal bütünlük oluşturulur. Herhangi bir noktanın yapacağı hareket veya o noktaya doğrudan veya bağlı bulunan yapısal eleman aracılığıyla etki eden kuvvet sonucunda tüm yapıda meydana gelecek kuvvet ve hareket değişiklikleri hesaplanır. Bu değişikliklerle yapısal elemanların içsel kuvvetleri ve şekilsel değişiklikleri hesaplanır. Yapısal elemanların birleştirilmesiyle sağlanan yapısal bütünlük sonucunda yapının etki eden kuvvetlere ve deformasyonlara karşı belirlenen sınırlamalar çerçevesinde tepki vermesi sağlanır.

Bu analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için modelleme, analiz ve varsayımların sağlıklı yapılmasına bağlıdır. Yapısal modellerin oluşturulmasında analizin basitleştirilmesi ve hata oranlarının azaltılması amacıyla yapının geometrik özelliklerine göre bazı basitleştirmeler yapılır. Yapı çerçevelere dönüştürülür. Oluşan

çerçeveler hareket serbestliğine göre mesnetlere bağlanır. Yapının kütlesi statik analiz için kuvvetlere veya dinamik analiz için noktasal kütlere dönüştürülür.

3.1.5.1. Yapısal Modeller

Dinamik davranışlar genellikle 3 boyutlu uzayda gerçekleşir ve bu şekilde modellenip incelenmesi gerekir. Ancak varsayımlar ve bazı göz ardı edilebilir davranışların hesaplarda ve analizlerde zaman kaybı ve karmaşıklık yaratmasını engellemek için yapısal model 2-Boyuta indirgenerek analizi yapılır.



Şekil.3.8. 3-Boyutlu Yapı Modeli

3-Boyutlu çerçevelerin analizi bilgisayar teknolojisinin günümüz son yıllardaki veri işleme kapasitesine ulaşmasından önce asal eksenler yönünde yapılan 2-boyutlu analizlerle elde edilen sonuçların birleştirilmesinden oluşmaktaydı. Teknolojideki gelişmeler bilgisayarların veri işleme kapasitesindeki artışı beraberinde getirince, 2 boyutlu analizler artık genel olarak kullanım alanı olarak eğitim amaçlı deneysel ve teorik çalışmalarda yoğunluk kazanmıştır.

Yapı hakkında gerçekçi bilgiler elde etmek için laboratuvar şartlarında test etmek amacıyla yapının tamamının veya bir kısmının benzeri (modeli) üretilir. Yapının yıkıcı etkiler altındaki davranışının öğrenilmesi modeller sayesinde daha düşük maliyetlerde ve emniyetli şekilde mümkün olmaktadır. Modeller yapının birebir aynısı olduğu gibi bazen yapı davranışını sembolize edecek şekilde basitleştirilebilir. Bu nedenle modeller istenilen bilgi çeşidine göre sınıflandırılır.

Elastik Model: Doğrudan geometrik benzerliği olan modellerdir. Yapının malzemesi farklı ve geometrisi ölçekli bile olsa homojen ve elastik malzeme ile üretilirler. Genel davranışı göstermek için kullanılırlar.

Dolaylı (İndirekt) Model: Yapının davranışını taklit eden, birebir aynısı olmayan modellerdir. Elastik Modellerin bir türü olarak düşünülebilir.

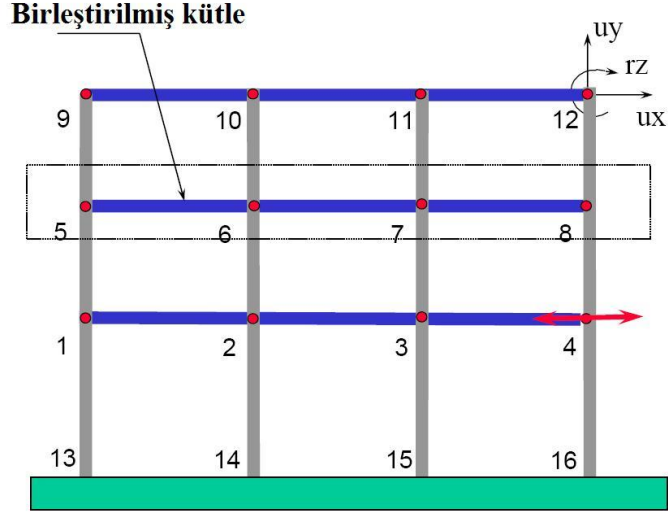
Direkt Model: Yapı ile aynı malzeme ve geometride oluşturulan modellerdir.

Mukavemet Modeli: Elastik sınırın dışında kalan davranışların incelenmesi amacıyla ölçekli olarak yapının benzeri ve aynı malzemeden imal edilen modellerdir.

Dinamik Model: Dinamik etki altında yapıların davranışının araştırılmasında kullanılır. Sarsma tablası modelleri ve aero-elastik modeller bu kapsamda değerlendirilir.

Bilgilendirme, Araştırma ve Tasarım Modelleri: Bilgilendirme modelleri basit gösterim amaçlı modellerdir. Araştırma modelleri eğitim amaçlı etkinliklerde kullanılabilen modellerdir. Tasarım modelleri yükler altındaki deformasyon veya kapasite değerlerinin tespitinde kullanılır.

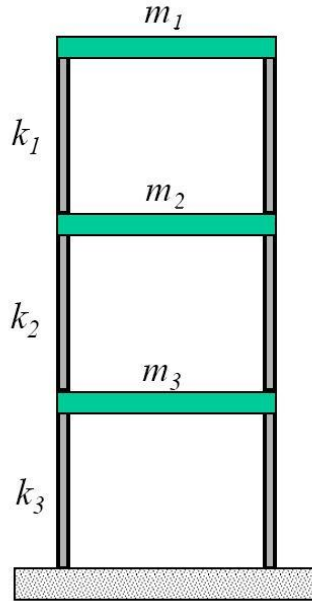
Diğer Modeller: Termal modeller, elektromekanik modeller, fotomekanik modellerdir.



Şekil.3.9. 2-Boyutlu çok serbestlik dereceli yapısal model örneği.

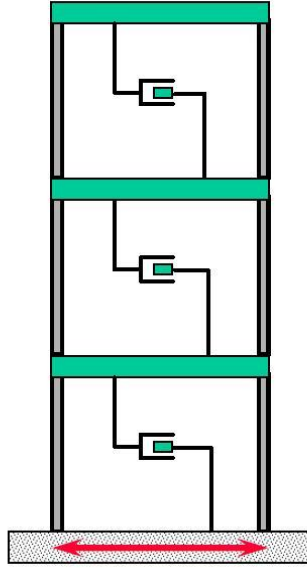
Yapısal modellerde kütlelerin statik ve dinamik davranışı değiştirmeyecek şekilde noktalara dağıtılması analizin doğru sonuç vermesi için önem taşımaktadır. Çerçeve sistemlerin çok serbestlik dereceli dinamik analizlerinde yaygın olarak 2 kolonlu ve tek kütleli katlardan oluşan aşağıdaki yapısal model kullanılmaktadır.

Katlar sonsuz değerde sertlikte, kolonların toplam elastik katsayılarından oluşan kat elastik katsayısı (k), kat kütlesi (m) kullanılarak model oluşturulmaktadır.



Şekil.3.10. Çok serbestlik dereceli sistem yapı modeli örneği.

Çerçevesi sistemlerle modellenmiş yapılarda bulunan bölme duvarlar ve malzemenin bir özelliği olan sönümlenme de modellerde ve analizde dinamik davranışı etkilediğinden hesaplarda yer almaktadır. Sönümlenme, yapının dinamik yükler altında hareketi sırasında yapının hızına veya ivmesine karşı yapının kinetik enerjisini soğuracak davranış sergileyen malzeme veya aletlerle sağlanır. Bölme duvarlar en yaygın olarak görülen sönümlenme malzemeleridir. Ancak, sönümlenme amacıyla tasarlanmadıkları ve tam olarak sönümlenme özellikleri bilinmediği için yaklaşık varsayımlarla hesaba katılmaktadırlar. Her malzemenin dinamik hareketleri sönümlenme özelliği vardır. Ancak yapının geneline bakıldığında birden fazla malzemenin kullanılması sönümlenme değerlerinin tahminini güçleştireceğinden analizlerde yapının tamamı için genel bir sönümlenme değeri kullanılması gerekir. Genel olarak deneysel çalışmalarla elde edilmiş yapısal sönümlenme değerleri kullanılır.



Şekil.3.11. Çok serbestlik dereceli sistemlerde sönümlenme örneği.

Sönümlenme yapının genel yapısına bağlı olabildiği gibi, özellikle tasarlanmış makinelerle de sağlanabilmektedir. Bu durumda kullanılan makinenin tasarımına bağlı sönümlenme değerleri analizlerde kullanılır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde analiz serbestlik dereceleri numaralandırılarak oluşturulmuş matris düzeninde yapılır. Şekil:3.9'daki sistemin analizi yapılırken öncelikle kütle ve elastik katsayı matrisi oluşturulur.

3.1.5.2. Modal Analiz

Elastik katsayı matrisi her noktanın göreceli olarak 1 birim yer değiştirmesinin (satırlarda) diğer noktalarda yaratacağı kuvvetlerin (sütunlarda) çapraz olarak yazılmasıyla oluşturulur.

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \quad (3.37.)$$

Kütle matrisi de aynı şekilde noktalara bağlı kütlelerin yazılmasıyla oluşturulur.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (3.38.)$$

$$M\ddot{U}(t) + KU(t) = V(t) \quad (3.39.)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \ddot{u}_3(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{Bmatrix}$$

1. Serbestlik Derecesi

$$m_1\ddot{u}_1(t) + k_1u_1(t) - k_1u_2(t) = V_1(t) \quad (3.40.)$$

2. Serbestlik derecesi

$$m_3\ddot{u}_2(t) - k_1u_1(t) + k_1u_2(t) + k_2u_2(t) - k_2u_3(t) = V_2(t) \quad (3.41.)$$

3. Serbestlik derecesi

$$m_3\ddot{u}_3(t) - k_2u_2(t) + k_2u_3(t) + k_3u_3(t) = V_3(t) \quad (3.42.)$$

Sönümleşmemiş Serbest Titreşim Çözümü:

$$M\ddot{U}(t) + KU(t) = 0 \quad (3.43.)$$

$$u(t) = \phi \sin \omega t$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 \phi \sin \omega t \quad (3.44.)$$

$$K\phi - \omega^2 M\phi = 0 \quad (3.45.)$$

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{21} \\ \varphi_{31} \end{Bmatrix}, \omega_1 \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} \varphi_{12} \\ \varphi_{22} \\ \varphi_{32} \end{Bmatrix}, \omega_2 \quad \phi_3 = \begin{Bmatrix} \varphi_{13} \\ \varphi_{23} \\ \varphi_{33} \end{Bmatrix}, \omega_3 \quad (3.46.)$$

ϕ : Doğal Mod Şekli

ω : Doğal Frekans

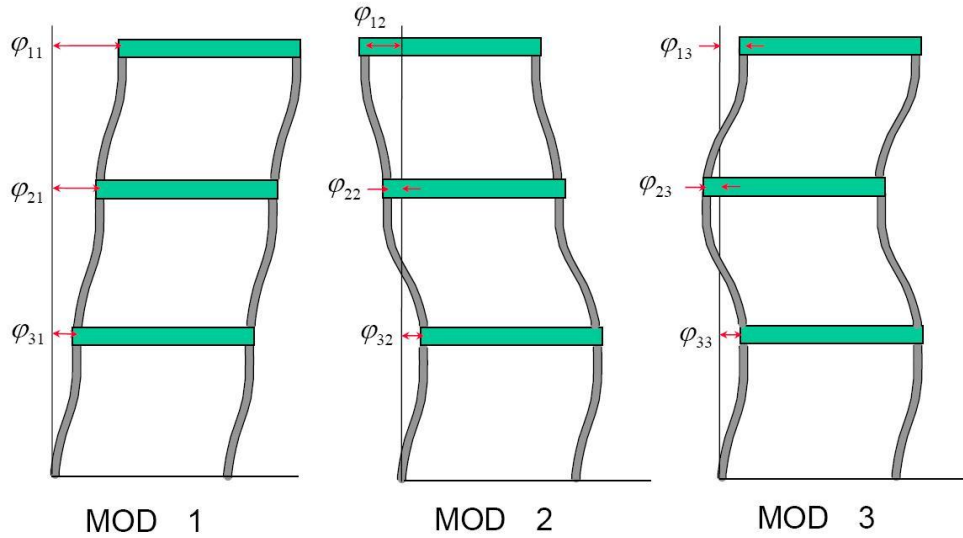
$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad \text{Bir mod için} \quad (3.47.)$$

$$K\Phi = M\Phi\Omega^2 \quad \text{Bütün modlar için} \quad (3.48.)$$

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3] \quad (3.49.)$$

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \omega_2^2 & \\ & & \omega_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.50.)$$

Mod şekli orantısız olarak bulunmuş olup ölçeği değişiklik gösterir. Genel olarak $\varphi_{ii} = 1$ veya $\Phi^T M \Phi = 1$ olarak kabul edilerek matrisi oluşturulur.



Şekil.3.12. Yapı Modeline ait mod şekilleri.

Doğrusal mod şekilleri birleşiminde koordinatlar mod şekilleri matrisinin bir katsayı ile çarpımından bulunur.

$$U = \Phi Y \quad (3.51.)$$

$$U = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{Bmatrix} \quad (3.52.)$$

$$U = \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \end{Bmatrix} Y_1 + \begin{Bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \\ \phi_{32} \end{Bmatrix} Y_2 + \begin{Bmatrix} \phi_{13} \\ \phi_{23} \\ \phi_{33} \end{Bmatrix} Y_3 \quad (3.53.)$$

$$KU = V \quad (3.54.)$$

$$K\Phi Y = V \quad (3.55.)$$

$$\Phi^T K\Phi Y = \Phi^T V \quad (3.56.)$$

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3] \quad (3.57.)$$

Genelleştirilmiş Kütle

$$\Phi^T M \Phi = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix} \quad (3.58.)$$

Genelleştirilmiş Esneklik

$$\Phi^T K \Phi = \begin{bmatrix} k_1 & & \\ & k_2 & \\ & & k_3 \end{bmatrix} \quad (3.59.)$$

Genelleştirilmiş Sönümleme

$$\Phi^T C \Phi = \begin{bmatrix} c_1 & & \\ & c_2 & \\ & & c_3 \end{bmatrix} \quad (3.60.)$$

Genelleştirilmiş Kuvvet

$$\Phi^T V(t) = \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} \quad (3.61.)$$

Çok serbestlik dereceli hareket denklemi: $M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = V(t)$ (3.62.)

Koordinatların dönüştürülmesi ile: $u = \Phi y$ (3.63.)

Birleştirilerek: $M\Phi\ddot{y} + C\Phi\dot{y} + K\Phi y = V(t)$ (3.64.)

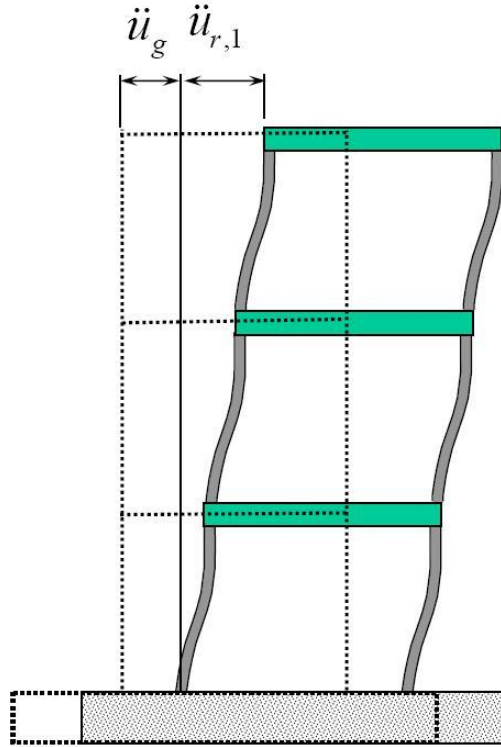
Φ^T ile çarpılarak: $\Phi^T M\Phi\ddot{y} + \Phi^T C\Phi\dot{y} + \Phi^T K\Phi y = \Phi^T V(t)$ (3.65.)

Denklem (3.42), (3.43) ve (3.44)'den;

$$\begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & & \\ & c_2 & \\ & & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & & \\ & k_2 & \\ & & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{Bmatrix} \quad (3.66.)$$

3.1.6. Çok Serbestlik Dereceli Zorlanmış Titreşim

Zorlanmış titreşim durumunda;



Şekil: 3.13. Zorlanmış titreşim etkisinde çok serbestlik dereceli model.

$$F_1(t) = M \begin{Bmatrix} \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_{R,1}(t) \\ \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_{R,2}(t) \\ \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_{R,3}(t) \end{Bmatrix} = M \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g(t) + M \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{R,1}(t) \\ \ddot{u}_{R,2}(t) \\ \ddot{u}_{R,3}(t) \end{Bmatrix} \quad (3.67.)$$

Hareket denklemlerinden;

$$\text{MOD 1 } m_1 \ddot{y}_1 + c_1 \dot{y}_1 + k_1 y_1 = V_1(t)$$

$$\text{MOD 2 } m_2 \ddot{y}_2 + c_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 = V_2(t)$$

$$\text{MOD 3 } m_3 \ddot{y}_3 + c_3 \dot{y}_3 + k_3 y_3 = V_3(t)$$

“ m ” ile bölünerek sadeleştirilerek, $\zeta_i = \frac{c_i}{2m_i \omega_i}$ sönümlenme oranı cinsinden

düzenlenmesiyle;

$$\text{MOD 1 } \ddot{y}_1 + 2\zeta_1 \omega_1 \dot{y}_1 + \omega_1^2 y_1 = V_1(t) / m_1$$

$$\text{MOD 2 } \ddot{y}_2 + 2\zeta_2 \omega_2 \dot{y}_2 + \omega_2^2 y_2 = V_2(t) / m_2$$

$$\text{MOD 3 } \ddot{y}_3 + 2\zeta_3 \omega_3 \dot{y}_3 + \omega_3^2 y_3 = V_3(t) / m_3$$

Bu şekilde elde edilen kuvvet ve etkin kütlelerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

3.2. Yöntem

Teorik olarak hesaplanan yapı davranışlarının laboratuvar ortamında incelenebilmesi için tasarım yükleri altında yapı gibi davranacak deney düzenekleri oluşturulmuştur. Düzeneklere incelenecek analiz tipine göre çeşitli titreşim yükleri uygulanmıştır.

Deney düzenekleri mesnet ve uygulanacak titreşim özelliklerine göre sınıflandırılarak incelenmiştir.

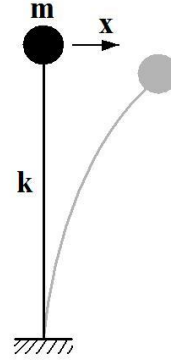
3.2.1. Ankastre Serbest Titreşim Düzenegi

3.2.1.1. Deneysel Mantık

Tek serbestlik dereceli titreşim deneyi için aşağıdaki parçalardan oluşan bir düzenek hazırlanmıştır;

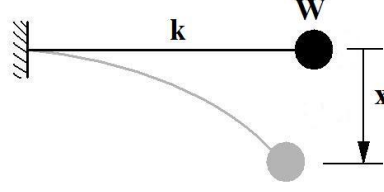
- Elastik çubuk (30 cm boyunda yüksek kalite çelikten imal edilmiş demir testeresi kullanılmıştır).
- Mesnet ve sehpa (elastik çubuğun bir ucundan sabitlenmesini sağlamaktadır).
- Kalibrasyon cetveli (Elastik çubuğun esneme miktarının ölçülebilmesini sağlayan metrik cetvel kullanılmıştır).
- Ağırlık (Elastik çubuğun ucuna vidalanabilen çeşitli büyüklükte metal ağırlıklar bulunmaktadır).

Düzenek düşey olarak sabitlenmiş k esnekliğinde bir çubuğun üzerinde bulunan m kütleinin x yönünde serbest salınım yapması için tasarlanmıştır.



Şekil.3.14. Serbest Titreşim Düzenegi.

Öncelikle k değeri deneysel olarak m kütleinin yerçekimi etkisinde yaptığı deplasmandan hesaplanmaktadır (Şekil: 3.6).



Şekil.3.15. Elastik çubuk k değerinin hesaplanma şeması.

$$W = k \cdot x \quad (3.68.)$$

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \cdot g}{W}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{x}} \quad (\text{Denklem 3.68'de kütlenin açılımı yazılarak})$$

Bu şekilde çeşitli ağırlığa sahip 3 adet elastik çubuk ve 3 ağırlık kullanılarak deney düzeneğinde k değerleri hesaplanmıştır. Çubuklar standart 29 cm uzunluğunda esnek demir testereleridir.

Çubuklara ait ölçümlerin yapılabilmesi için bir Serbest Titreşim Düzeneği hazırlanmıştır. Düzenek 30 x 50 cm boyutlarında bir tabla üzerine montajı yapılmış;

- Ölçme Cetveli
- Mikrofon ve iğne konsolu
- Sabitleme yuvasından oluşmaktadır.



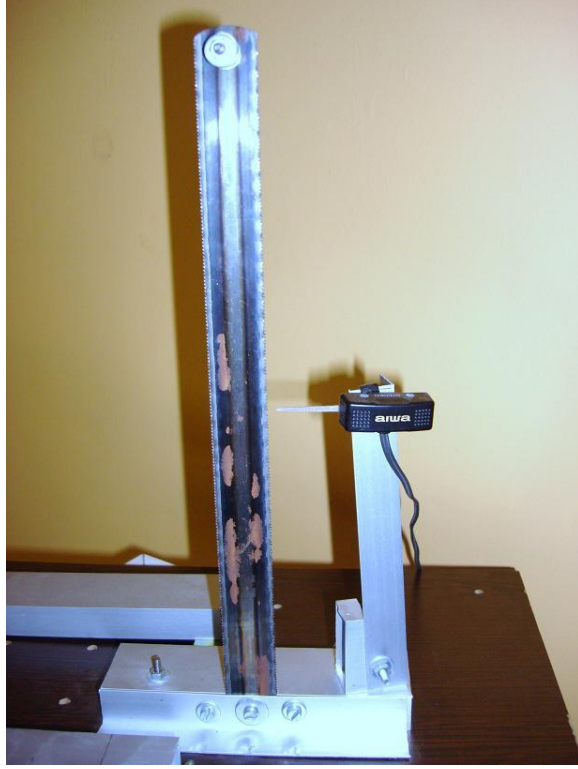
Şekil.3.16. Serbest titreşim düzeneği.

Ölçme cetveli menteşeli iki kola bağlı bir cetvelden oluşur. Cetvel menteşelerinden bükülerek dik duruma getirilerek ölçümü yapılacak çubuğun esnememiş halinin ölçümünü sağlamaktadır. Bu durumda düzenek yan yatırıldığında elastik çubuğun esnemiş halinin ölçümü yapılmaktadır.



Şekil. 3.17. Esneme Ölçümü Yapılması.

Mikrofon konsolu, mikrofonu ve iğneyi taşıyan metal bir koldur. Sabitlenen elastik çubuk ile iğne mesafesinin ayarlanabilmesi için öne ve arkaya hareket edebilmekte ve titreşim sırasında bu mesafesini koruyabilmektedir. Üzerinde bir mikrofon ve mikrofonu temas eden plastik bir iğne bulunmaktadır.



Şekil.3.18. Mikrofon konsolu ve iğne.

İğne mikrofonla temas edecek şekilde sıkıştırılmıştır. Plastik yapısı nedeniyle iğnenin müstakil bir serbest titreşim oluşturması mümkün görülmemektedir. Elastik çubuk sabitlendikten sonra, iğnenin elastik çubuğun sallanırken hareketine engel olmayacak şekilde değmesi sağlanır.



Şekil.3.19. Mikrofon ve iğne.

Elastik çubuk titreşim sırasında iğneye değerek ses üretmesi sağlanır. Üretilen ses mikrofon tarafından bilgisayara iletilir. Bilgisayar ses kayıt yazılımıyla sesi zaman çizelgesi üzerinde kaydeder. Kaydedilen ses dalgaları yazılım tarafından abartılarak, iğnenin elastik çubuğa her değmesinde oluşan ses dalgalarının tepe noktası bulunur.

3.2.1.2. Akustik Analiz

Akustik analiz, ses kayıt cihazları yardımıyla deney düzeneklerinden elde edilen sayısal kayıtlar ve bu kayıtların analizi sonucunda deneysel veriler elde etme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu analizde kayıtların zamana bağlı yinleme özellikleri değerlendirilebileceği gibi, kayıt karakteristikleri de deneylerden sayısal sonuç elde etmekte kullanılabilir. Sesin havadaki hızının (340-m/s) elektrik veya ışık iletim hızından düşük olması, bazı deneysel sınırlamalar getirirse de katı kütleler içindeki yayılma hızıyla veya ses dalgalarının elektriksel dalgalara çevrilmesiyle çeşitli deneysel kullanım olanakları bulunmuştur. İnşaat Mühendisliği alanında, sesin beton ve çelik içindeki yayılma hızının, yayılma ve yansıma özellikleriyle birçok yapısal analiz ve değerlendirme yöntemi literatürde yer almıştır. Teknolojinin gelişmesiyle paralel olarak gelişen yazılım ve donanımlar daha basit yöntemlerin daha geniş alanlarda (tıp, jeofizik, otomotiv gibi) kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Birçok kayıt sisteminde olduğu gibi sistemde ses kayıt sisteminde de sese duyarlı cihazlar (piezo elektrik sensorlar, mikrofonlar) yardımıyla yaratılan elektriksel akımlar veya elektriksel özellik değişiklikleri, sayısallaştırıcı ara birimler (ses kartları) aracılığı ile bilgisayarlara iletilebilmekte, iletilen kayıtlar veri dosyalarında depolanarak özel yazılımlar ile analiz edilerek istenen özellikleri grafikler, sayısal değerler haline dönüştürülür.

Her deneysel çalışmada olduğu gibi ölçüm ve kayıtlardaki hata oranları ve bu oranları azaltacak kalibrasyonların yapılması, kayıt şartlarının iyileştirilmesi deneysel başarıyı doğrudan etkileyecektir.

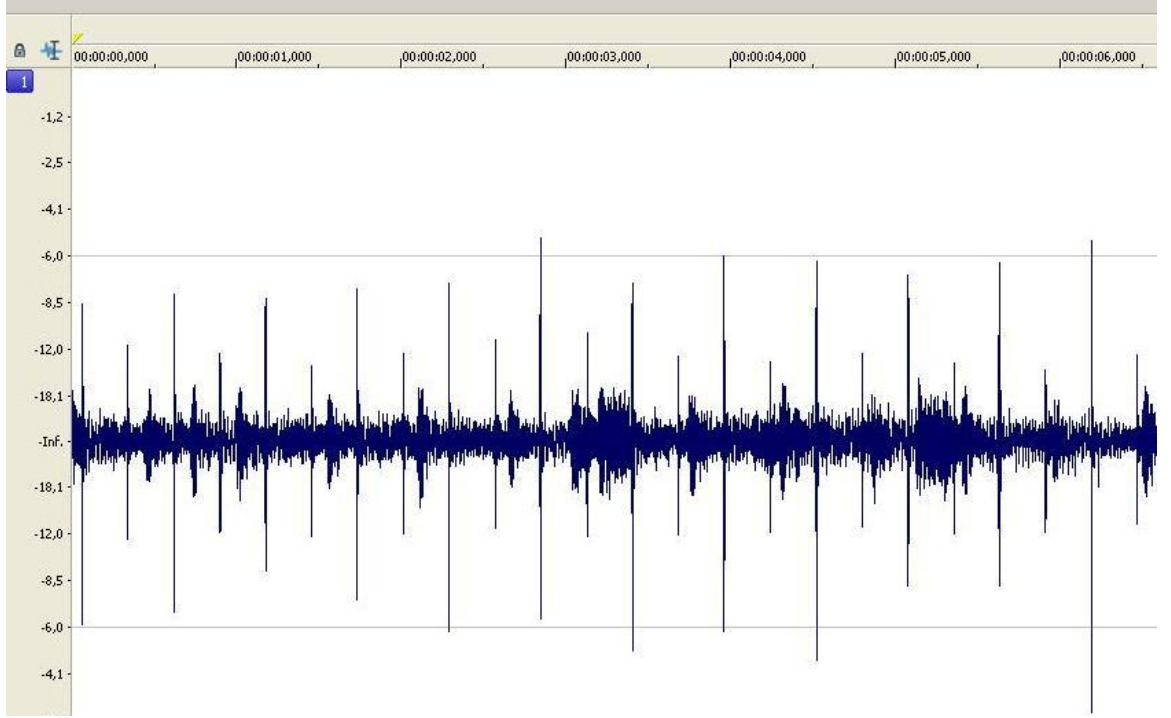
3.2.1.2.1 Akustik Kayıt Sistemi

Akustik kayıt sistemi bir diz üstü bilgisayara bağlı dinamik mikrofondan oluşmaktadır. Dinamik mikrofonlar, ses dalgalarıyla hareket eden bir diyafram ve diyafram ile birlikte hareket eden hafif bir mikro bobinden oluşur. Bobinin hareketiyle mikrofonun değişen elektriksel manyetik gücü (empedansı) bilgisayara bağlı olan ses kartında dijital değerleri dönüştürülerek, değişen empedans değerleri değişen sayısal verilere dönüştürülür. Aynı anda bu değerleri okuyan yazılım seslerin zaman bağlı değerlerini kaydeder. Kayıtların hassasiyeti saniyede kaydedilen bayt (byte) değerleriyle ölçülür. Yazılım ve işletim sisteminin kapasitesi bu ölçümlerde sınırlayıcı olmaktadır.

Hazırlanan sistemde ses dalgasını yaratması için, hareket esnasında mikrofonta kaydedilmesi amaçlanan sesi yaratacak bir düzeneğe ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle sallanmakta olan elastik çubuğun aynı noktadan her geçişinde ses üretilmesi için elasto-plastik bir iğne elastik çubuğun orta yüksekliğine yakın bir yükseklikte metal bir tutamağa sabitlenmiştir. Sesin en kısa yoldan mikrofonta ulaşması için mikrofon iğne ile birlikte aynı metal tutamağa sabitlenmiştir. Elastik çubuğun tutamak hizasından her geçişinde elasto-plastik iğne mikrofonta çarparak ses üretimini gerçekleştirmektedir. Bu ses dinamik mikrofonta empedans değişimine ve ayarlanan bayt/saniye hassasiyetinde dijital değerler halinde bilgisayarın geçici belleğine kaydedilmektedir. Yazılım ile oluşturulan zaman-ses şiddeti grafiğinde görsel olarak iğnenin ürettiği çarpma sinyalleri görülebilmektedir.

3.2.1.2.2 Akustik Kayıt İşlemi

Akustik kayıt sistemiyle kaydedilen sesin zamana bağlı grafiğinde ses dalgalarını daha net gösterimi için, ses dalgaları yazılım yardımıyla abartılmaktadır. Böylece elastik çubuğun tutamak önünden her geçişinin yarattığı etki zaman çizelgesinde yüksek genlikte ses dalgaları olarak kolaylıkla görülebilmektedir. Zaman çizelgesinin yakınlştırılmasıyla, 1/1000 saniye (1 milisaniye) çözünürlükte dalgaların sıçraması tespit edilebilmektedir.



Şekil: 3.20. Abartılmış titreşim zaman grafiği.

Elastik Çubuğun iğneye dokunması sırasında oluşan ses sıçramaları her iki yönde de aynı olmadığından uzun ve kısa sıçramalar oluşmaktadır. Bu nedenle uzun sıçramalar arasındaki süre elastik çubuğun periyodunu göstermektedir. Sıçramaların eşit aralıklı gibi görünmesine rağmen 10 saniye için yapılan kayıtlar sırasında tespit edilebilen sıçrama sayılarının aralıklarının ilk ve sonuncusunun zaman farkı sıçrama sayısına bölünerek ortalama alınmaktadır. Ses sıçramalarının net olarak görülebilmesi için ses dalgaları 10-50 kat arasında abartılarak, dalgaların tepe noktaları tespit edilmektedir.

3.2.1.2.3 Akustik Kayıtların Analizi

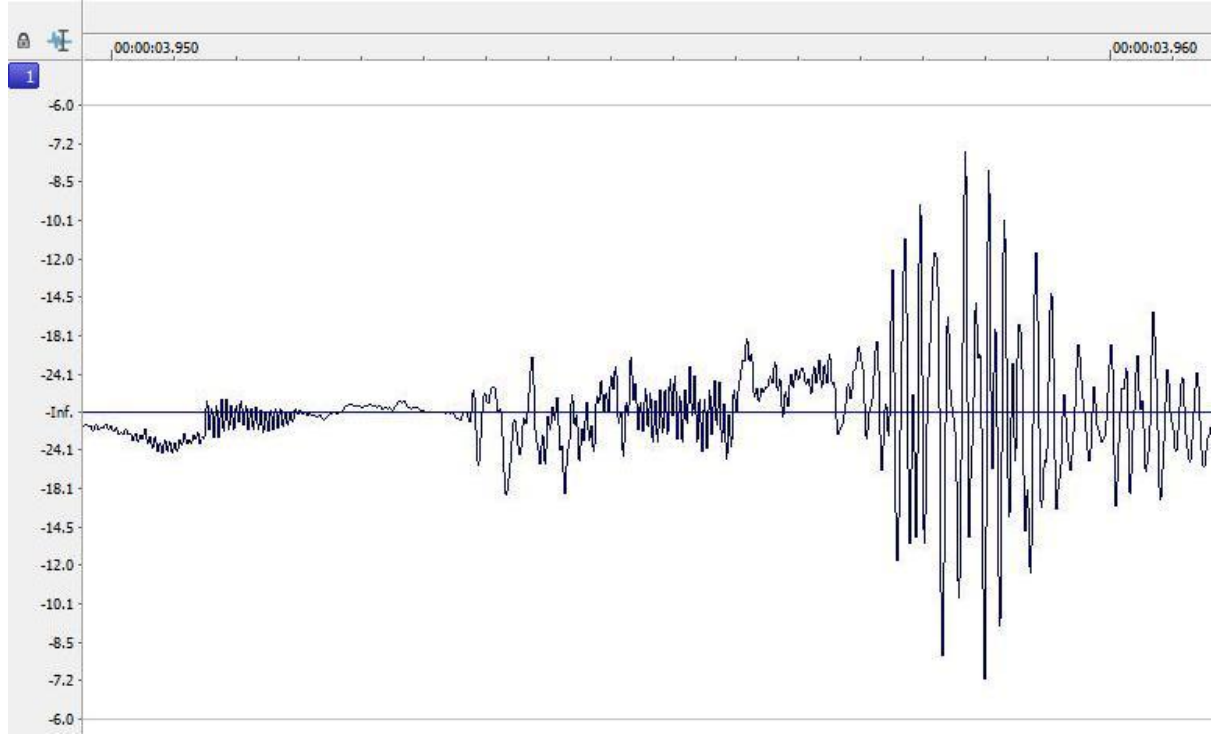
Ses sıçramalarının net olarak görülebilmesi için ses dalgaları 10-50 kat arasında abartılarak, dalgaların tepe noktaları tespit edilmektedir. Tespit edilen tepe noktalarının arasındaki süre periyot olarak varsayılmaktadır.

3.2.1.2.4 Kalibrasyon ve Hata Oranları

Ölçüm hatalarının azaltılması için grafiklerdeki tepe noktalarının arasındaki sürenin ölçülenmesinde, grafikte kolaylıkla okunan en geniş aralıktaki ilk ve son dalganın tepe noktaları ve arasındaki zaman aralığı hesaba katılmaktadır.

Ölçüm sırasında elastik çubuğun salınım dışında ikincil bir içsel titreşim yapmaması sağlanmıştır.

Yazılım grafik üzerinde istenen yakınlaştırma işlemlerini yapabildiği için tepe noktalarının zaman değerlerini okumak için yeterince yakınlaştırma yapılması gerekmektedir. Verilerin daha hassas okunabilmesi için okunacak rakamsal verilerin ara gösterge çizelgesi değerleriyle birlikte kaydedilmesi gereklidir. Bu durumda milisaniyeden daha hassas okuma yapılması da mümkün olacaktır. Birden fazla yüksek dalga olması durumunda, sıçramaların karakteristik özellikleri göz önüne alınarak ilk yüksek dalga, en yüksek dalga veya orta yüksek dalga okunabilir.



Şekil.3.21. Ses Kayıt tepe noktası tespiti

Ayrıca düzeneğin yan yatırılıp cetvel değerlerinin okunması sırasında hareketsiz olarak durması ve tam olarak yatay durması ve her cetvel okumasında aynı referans noktadan okunması hata oranının azalmasını sağlayacaktır.

3.2.1.3. Deneysel Ölçümlere

Deneysel ölçümlere için 3 farklı boyutta ve malzeme kalitesinde çubuk kullanılmıştır. Çubukların her iki ucundaki delikler çubukların sabitlenmesi veya ucuna çeşitli kütlelerin bağlanmasına imkân sağlamaktadır. Malzemelerin yüksek esnekliğe sahip olması, doğrusal kuvvet-deplasman ilişkisinin incelenmesini de mümkün kılmaktadır.



Şekil.3.22. Elastik esnek çubukları.

Çubukların boyutları ve ağırlıkları, kumpas ve hassas terazi ile ölçülerek fiziksel özelliklerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Çizelge.3.1. Elastik çubuklar ve ağırlıkları.

ÇUBUK AĞIRLIKLARI (g)		
MAVİ	KIRMIZI	SİYAH
15.35	18.34	52.30



Şekil.3.23. Test ağırlıkları.

Çizelge.3.2. Kullanılan kütle ağırlıkları.

DENEYSEL AĞIRLIKLAR (g)			
BOŞ	W1	W2	W3
0.00	8.41	12.76	17.93

Çubukların uçlarına farklı salınım ve deplasman ölçümleri sağlamak amacıyla, bir vida ve somuna dizilmiş çeşitli sayıda rondela gurubu kullanılmıştır.

3.2.1.3.1 Titreşim Akustik Analizi

Kurulan deneysel düzenekle, öncelikle çubukların esneklik katsayısının tespiti gereklidir.



Şekil.3.24. Esneme değerinin okunması.

Çizelge: 3.3 Ölçümü yapılan deplasman değerleri.

CETVEL ÖLÇÜMLERİ (cm)					
ÇUBUKLAR	DİK	BOŞ	W1	W2	W3
MAVİ	10.50	8.90	6.60	5.30	3.90
KIRMIZI	10.00	9.00	7.60	7.00	6.20
SİYAH	10.20	9.40	9.00	8.80	8.60

Deplasman ölçümlerinde düzenek öncelikle dük durumda çubuğun esnememiş durumu cetveldен okunarak, “DİK” durum cetvel değeri, daha sonra Şekil: 3.17’de görüldüğü şekilde yatay hale getirilerek, çubuğun “BOŞ” durum cetvel değeri okunmaktadır. Daha sonra çubuğun ucuna W1, W2 ve W3 ağırlıkları takılarak çubuğun esneme miktarları cetveldен okunmaktadır. Yapılan her iki ölçüm arasındaki fark, çubuğun kendi ağırlığı veya eğer ucuna bir ağırlık takılmış ise toplam ağırlığın altında yaptığı esnemeyi verecektir.

Çizelge: 3.4. Deplasman fark değerleri.

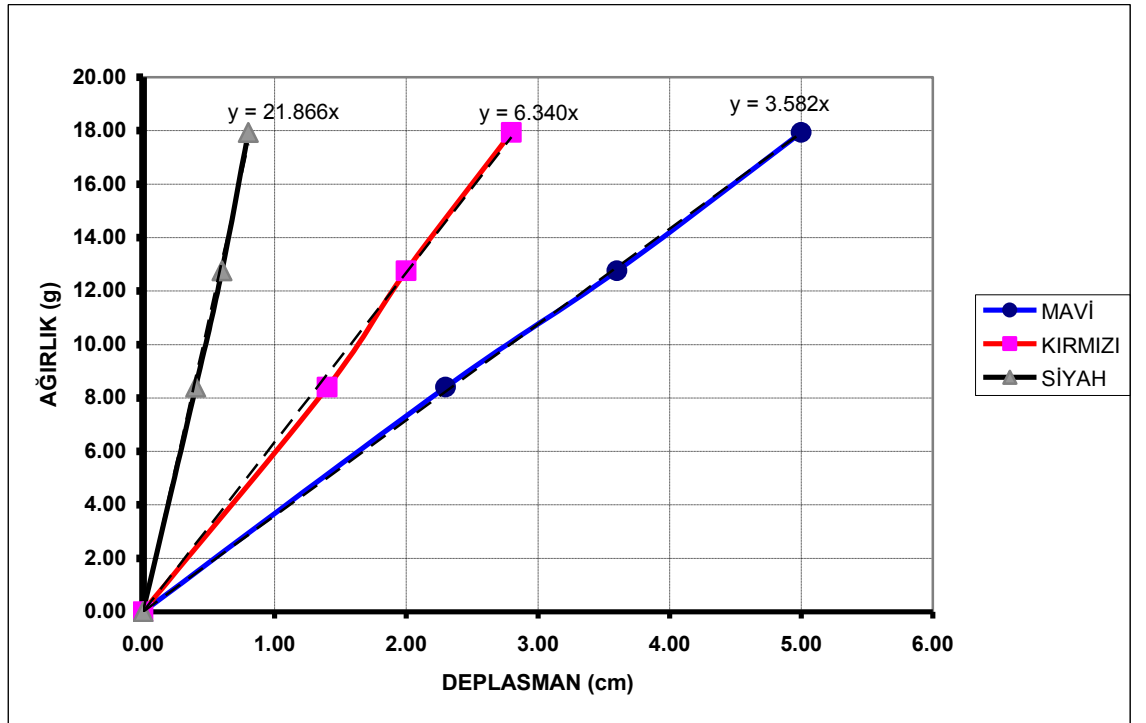
DEPLASMANLAR (cm)				
ÇUBUKLAR	BOŞ	W1	W2	W3
MAVİ	1.6	3.9	5.2	6.6
KIRMIZI	1.0	2.4	3.0	3.8
SİYAH	0.8	1.2	1.4	1.6

Ölçümde “BOŞ” değeri çubuğun zati ağırlığından oluşan deplasmanı vermektedir. Zati ağırlığın yayılı yük olması sebebiyle, uç yükler altında esnemenin ölçümü için, “BOŞ” ölçümün bir “dara alma” işlemi olarak değerlendirilerek, “FARK DEPLASMANLAR” hesaplamasına geçilmesi daha sağlıklı ölçüm yapılmasını sağlamıştır.

Çizelge: 3.5. Göreceli deplasman değerleri.

FARK DEPLASMANLAR (cm)				
ÇUBUKLAR	BOŞ	W1	W2	W3
MAVİ	0.00	2.30	3.60	5.00
KIRMIZI	0.00	1.40	2.00	2.80
SİYAH	0.00	0.40	0.60	0.80

“Fark Deplasmanlar” tekil uç yüklerin oluşturduğu deplasmanlar olup, çubuğun esnekliğine bağlı değerlerdir. Ölçülen birkaç ağırlık ve bunlara bağlı deplasmanlarla her çubuğa ait doğrusal kuvvet-deplasman grafiği oluşturulmuştur. Bu grafikten çubukların rijitlik katsayısı olan K değeri hesaplanmıştır.



Şekil.3.25. Deneysel ağırlık/Deplasman değişim grafiği.

Kullanılan çubukların boyutları kumpas ile ölçülerek E değeri hesaplanmıştır. Ancak çubuklar geometrik olarak değişken kesitli olduğundan, geometrik özellikleri sadece yaklaşık bir E değeri hesaplanmasında kullanılmıştır. Analizlerde K değeri deneysel olarak elde edilen yük/deplasman grafiklerinden hesaplanmıştır.

Çizelge.3.6. Çubuklara ait boyut ve elastik özellikler.

	GEOMETRİK ÖZELLİKLER			
	MAVİ	KIRMIZI	SİYAH	
b=	12.50	12.61	24.50	mm
d=	0.52	0.59	0.83	mm
I=	0.15	0.22	1.17	mm ⁴
E=	1.99E+10	2.39E+10	1.52E+10	kg/m ²

Grafikteki eğim çizgisi denklemindeki katsayılar, g/cm cinsinden K katsayıları olduğundan kg/m birimine dönüştürmek için, 10'a bölmek gerekmektedir.

Çizelge.3.7. Deplasman değerlerine göre elastik özellikler.

	ÇUBUKLARA GÖRE RİJİTLİK		
	MAVİ	KIRMIZI	SİYAH
K(kg/m)	0.3582	0.6340	2.1866
EI (kg*m2)	0.0029	0.0052	0.0178

Çubuğun Elastisite Modülü E için literatürde çelik türünde malzemeler için $1.50E+10$ kg/m² ile $2.50E+10$ kg/m² arasında genel bir değer aralığı verilmiştir. Daha yaklaşık değer hesaplanması için;

- Çubukların geometrik boyutları hassas olarak ölçülmüş,
- Deplasman ölçümlerinden rijitlik katsayısı K değeri hesaplanmış,
- K değerini oluşturan bileşenlerden Elastisite modülü E yaklaşık olarak tahmin edilmiştir.

Çizelge: 3.5 ve Çizelge:3.6'dan "Elastisite Modülü" olarak E sayısının seçilen malzeme kalitesini doğrulayan aralıkta olduğu görülmektedir. E değeri analizlerde tek başına kullanılmayıp deneysel olarak elde edilen K değeri kullanılmıştır. K değerinden elde edilen EI değeri mesnet ve serbest yükleme boyu değişen çubuklarda yeni K değerlerinin bulunması için dönüşüm hesaplamalarında kullanılmıştır.

Çizelge.3.8. Küteller ile sağlanan Deplasman değerleri.

DEPLASMANLAR (m)			
ÇUBUKLAR	W1	W2	W3
MAVİ	0.023	0.036	0.050
KIRMIZI	0.014	0.020	0.028
SİYAH	0.004	0.006	0.008

Çizelge: 3.9. Dinamik davranışa esas kütle hesabı.

	DENEYSEL AĞIRLIKLAR (Kg)		
	W1	W2	W3
W	0.0084	0.0128	0.0179
W-Çub. %23	0.0035	0.0035	0.0035
W-Toplam	0.0119	0.0163	0.0215

Uç kütleli ankastre kirişlerin dinamik davranış hesaplarında kiriş toplam kütesinin %23'ü uç kütleyle katılmaktadır. (Bk. J.P.Den Hartog "Mechanical Vibrations", sf.430)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M + 0.23m}} \quad (3.69.)$$

Çizelge.3.10. Mavi çubuğun deplasmanlara bağlı rijitlik katsayıları.

DEPLASMANLARA GÖRE RİJİTLİK			
Mavi ÇUBUK	W1	W2	W3
K(kg/m)	0.3657	0.3544	0.3586

Deplasmanlara göre hesaplanan rijitlik katsayısından dinamik davranış hesaplamalarına geçildiğinde, kütlelin salınım esnasında çubuk üzerinde yarattığı kuvvetleri ve deplasmanları detaylı olarak incelemek gerekmektedir.

Bu amaçla salınım "VIBRAMATH" isimli bir hesap tablosunda matematik ifadelerle tarif edilerek sisteme etkiyen kuvvetler ve sistemin davranışı çok küçük zaman aralıklarında incelenmiştir.

Sistemin T_0 zamanında, X_0 kadar esnetilerek, ilk hızı olmaksızın bırakıldıktan sonraki hareketi incelenmektedir.

Mavi Çubuk için hesaplanan değerler tabloda kullanılmıştır.

Çizelge: 3.11 "VIBRAMATH" tablosu giriş değerleri.

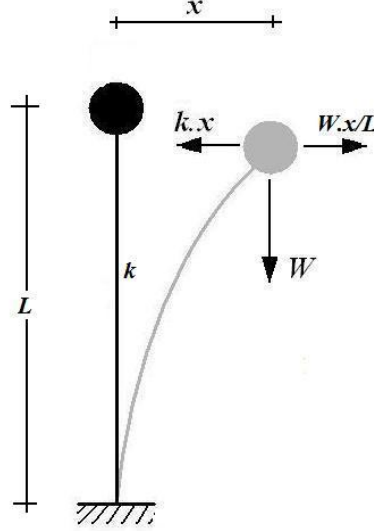
K	0.3582	kg/m
W	0.0215	kg
Vo	0.0000	m/sn
Xo	0.0325	m
L	0.2900	m
m	0.0022	kg
EI	0.0029	kg*m2

Tabloya sistemin hesaplanan veya deplasman grafiklerinden hesaplanan rijitlik katsayısı K , çubuğun ucundaki kütlelin ağırlığı W , sistemin ilk hızı V_0 , sistemin ilk deplasmanı X_0 , çubuk boyu girilmekte, "m" ve "EI" değeri hesaplanmaktadır.

Tabloda 0 nolu satırda X_0 kadar gerilmiş ve $V_0=0$ ilk hızındaki sistemin enerjisi hesaplanmıştır.

Tabloda Formül $E_0=(X_0^2*(K-W/L)+m*V_0^2)/2$ şeklinde yazılmıştır.

Enerjinin hesaplanmasında çubuğun X_0 noktasında çubuğun kütleyle uyguladığı kuvvetin, kütle'nin 2. derece etkisi olarak $W.x/L$ kadar dengelendiği yani gerilmeye yardımcı olduğu, bu nedenle salınım sırasında çubuğun kütleyle uyguladığı kuvveti azaltarak sistemin enerjisini azalttığı görülmektedir.



Şekil.3.26. Kütle'nin 2. derece etkisi.

Sistemin bir sönümlenme etkisi altında olmadığı varsayılmaktadır. Bu nedenle enerjisi korunacağı için, salınımı kendini tekrarlamaktadır.

$$E_0 = E_1 = E_2 = E_3 \dots E_{400} \quad (3.70.)$$

1 numaralı satıra geçişte, çubuğun $X_0/100$ kadar deplasman yaptığı durumda, kaybettiği çubuk potansiyel enerjisinin, kinetik enerjiye dönüşmesi halinde ulaşacağı hız V_1 hesaplanmıştır;

$$V_1 = \left(\frac{2 \cdot E_0 - X_1^2 \cdot (K - W/L)}{m} \right)^{0,5} \quad (3.71.)$$

Sistemin V_1 hızına ulaşması için geçen zaman T_1 ;

$$T_1 = T_0 + (X_0/100) / ((V_1 + V_0)/2) \quad (3.72.)$$

Sistemin T_0 'dan T_1 'e kadar olan zamanda V_0 'dan V_1 hızına ulaşması;

$a_1 = (V_1 - V_0) / (T_1 - T_0)$ ivmesinin ve kütleyle etkilen;

$F_1 = m \cdot a_1$ kuvvetinin hesaplanabilmesine olanak sağlar.

Çizelge: 3.12. “VIBRAMATH” tablosu, 2. derece etki bölümü.

	X (cm)	V (m/sn)	T (F1)	Enerji	a(m/sn2)	F (kg)
0	0,0500	0,0000	0	0,000355078		
1	0,0495	0,0803	0,0125	0,000355078	6,4482	0,0141
2	0,0490	0,1133	0,0176	0,000355078	6,3834	0,0140
3	0,0485	0,1384	0,0216	0,000355078	6,3186	0,0138
4	0,0480	0,1594	0,0250	0,000355078	6,2538	0,0137
5	0,0475	0,1777	0,0279	0,000355078	6,1890	0,0136
6	0,0470	0,1942	0,0306	0,000355078	6,1241	0,0134
7	0,0465	0,2092	0,0331	0,000355078	6,0593	0,0133
8	0,0460	0,2231	0,0354	0,000355078	5,9945	0,0131
9	0,0455	0,2360	0,0376	0,000355078	5,9297	0,0130
10	0,0450	0,2481	0,0396	0,000355078	5,8649	0,0129
11	0,0445	0,2595	0,0416	0,000355078	5,8001	0,0127
12	0,0440	0,2704	0,0435	0,000355078	5,7353	0,0126
13	0,0435	0,2807	0,0453	0,000355078	5,6705	0,0124
14	0,0430	0,2905	0,0471	0,000355078	5,6057	0,0123
15	0,0425	0,2999	0,0488	0,000355078	5,5409	0,0121
16	0,0420	0,3089	0,0504	0,000355078	5,4761	0,0120
17	0,0415	0,3175	0,0520	0,000355078	5,4113	0,0119
18	0,0410	0,3258	0,0536	0,000355078	5,3465	0,0117
19	0,0405	0,3338	0,0551	0,000355078	5,2817	0,0116
20	0,0400	0,3415	0,0565	0,000355078	5,2169	0,0114
:	:	:	:			
390	0,0450	0,2481	0,5124	0,000355078	-5,8001	-0,0127
391	0,0455	0,2360	0,5144	0,000355078	-5,8649	-0,0129
392	0,0460	0,2231	0,5166	0,000355078	-5,9297	-0,0130
393	0,0465	0,2092	0,5189	0,000355078	-5,9945	-0,0131
394	0,0470	0,1942	0,5214	0,000355078	-6,0593	-0,0133
395	0,0475	0,1777	0,5241	0,000355078	-6,1241	-0,0134
396	0,0480	0,1594	0,5270	0,000355078	-6,1890	-0,0136
397	0,0485	0,1384	0,5304	0,000355078	-6,2538	-0,0137
398	0,0490	0,1133	0,5344	0,000355078	-6,3186	-0,0138
399	0,0495	0,0803	0,5395	0,000355078	-6,3834	-0,0140
400	0,0500	0,0000	0,5520	0,000355078	-6,4482	-0,0141

Tablo Xo/100 kadar aralıklı deplasman adımlarıyla incelendiğinden, 2’si pozitif 2’si negatif bölgede olan 4 adet 100 parçadan oluşan toplamı bir tam salınım olan 400 adımlık bir modelle incelenmiştir.

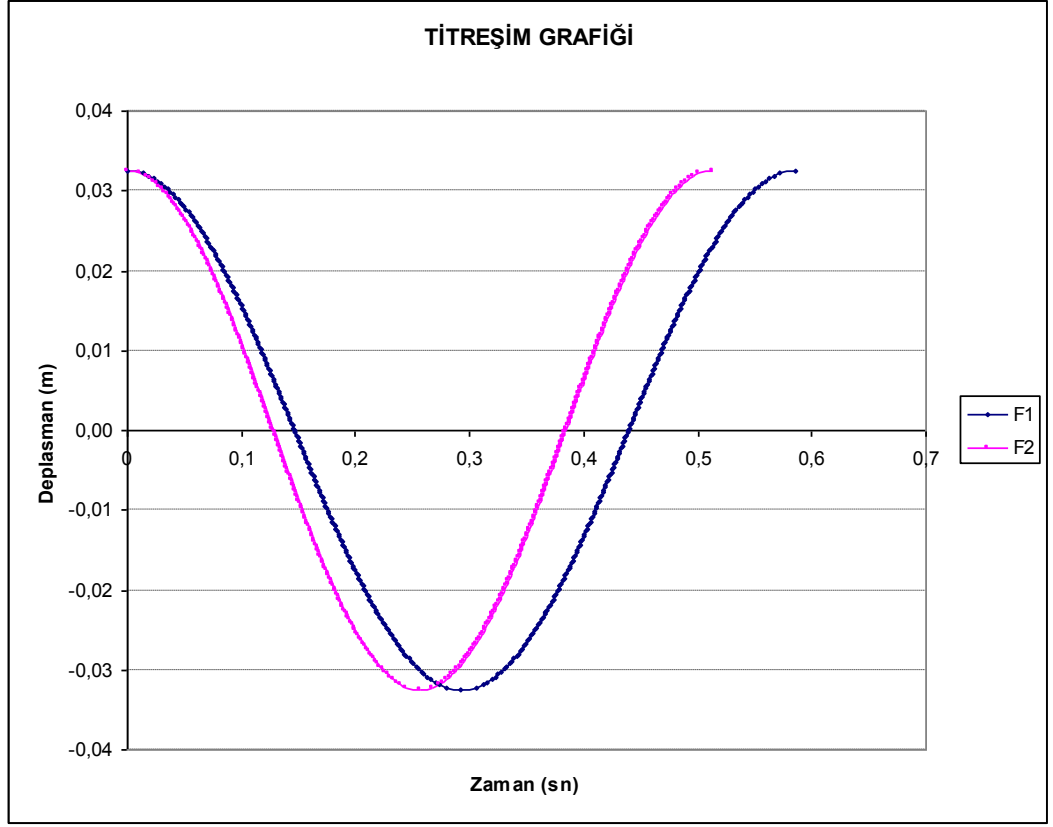
Kütlenin 2. derece etkisinin olmadığı durumda sistemin enerjisi sadece 2. etkinin bulunduğu durumdan daha büyük olmak üzere, çubuğun gerilmesi sonucu oluşan potansiyel enerji kadar olacaktır. 2. Derece etkinin hesaba katıldığı sistemde kütleye uygulanan kuvvet daha az olduğundan aynı kütle ve aynı deplasmanla harekete başlayan sistemin periyodu daha büyük olacaktır.

Çizelge: 3.13. “VIBRAMATH” tablosu normal salınım bölümü.

	Enerji	V (m/sn)	T (F2)
0	0,00044775	0	0,0000
1	0,00044775	0,0902	0,0111
2	0,00044775	0,1272	0,0157
3	0,00044775	0,1554	0,0192
4	0,00044775	0,1790	0,0222
5	0,00044775	0,1996	0,0249
6	0,00044775	0,2181	0,0273
7	0,00044775	0,2350	0,0295
8	0,00044775	0,2505	0,0315
9	0,00044775	0,2650	0,0335
10	0,00044775	0,2786	0,0353
11	0,00044775	0,2915	0,0371
12	0,00044775	0,3036	0,0387
13	0,00044775	0,3152	0,0404
14	0,00044775	0,3262	0,0419
15	0,00044775	0,3367	0,0434
16	0,00044775	0,3468	0,0449
17	0,00044775	0,3565	0,0463
18	0,00044775	0,3659	0,0477
19	0,00044775	0,3749	0,0490
20	0,00044775	0,3835	0,0504
390	0,00044775	0,2786	0,4563
391	0,00044775	0,2650	0,4581
392	0,00044775	0,2505	0,4600
393	0,00044775	0,2350	0,4621
394	0,00044775	0,2181	0,4643
395	0,00044775	0,1996	0,4667
396	0,00044775	0,1790	0,4693
397	0,00044775	0,1554	0,4723
398	0,00044775	0,1272	0,4759
399	0,00044775	0,0902	0,4805
400	0,00044775	0,0000	0,4916

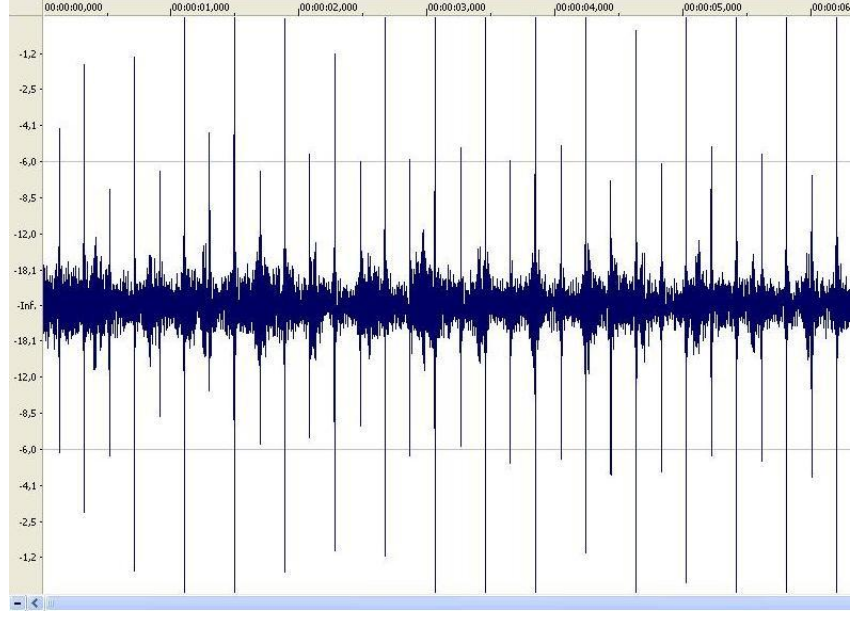
Tabloların son satırlarında tam bir salınım yapılması için gerekli zaman değerleri renkli olarak görülmektedir. Doğal frekans hesaplamasında

$$T=2*3.14*(W/(K*9.81))^{0.5} \quad (3.73.)$$

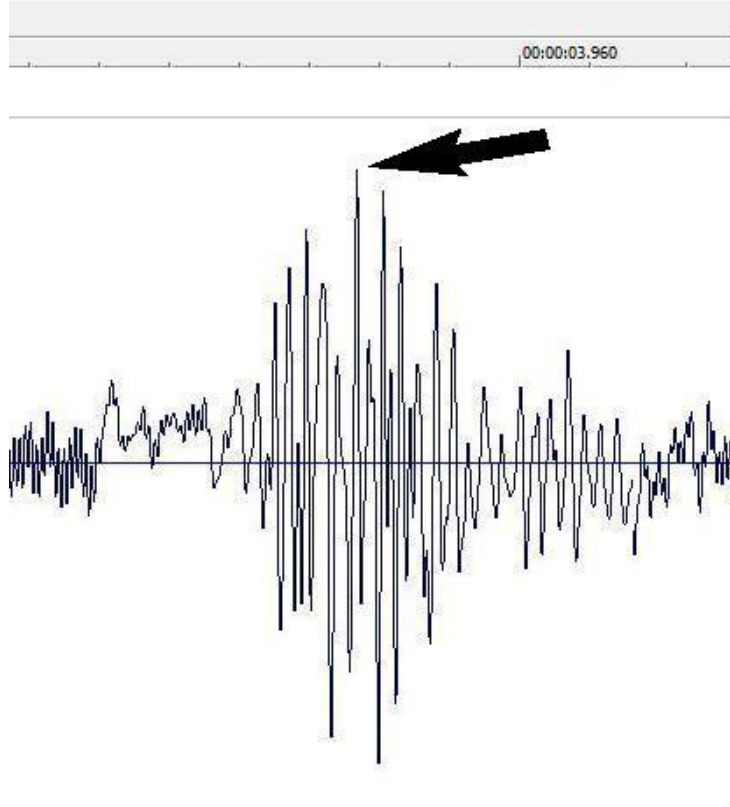


Şekil: 3.27. Serbest salınım üzerinde 2.Derece kütle etkisi grafiği.

Akustik analiz ölçümlerinde elde edilen ses grafiği uygun okumaların yapılabilmesi için net olarak ses sıçramalarının görülebilmesi için 500-1000 kat abartılarak incelenmektedir. Sıçramalar düzenekteki çubuğun iğneye vuruşunda benzer karakteristikte dalgalar oluşturmaktadır. Benzer sıçramalardaki maksimum, minimum veya hepsinde genel olan sıçramaların herhangi bir noktası seçilerek zaman değeri okunmaya çalışılmıştır. Zaman okunurken yakınlaştırma yapılarak milisaniye hassasiyetinde zaman değeri okunmuştur. Aşağıdaki yakınlaştırılmış dalga grafiğinden ölçek yardımıyla sayısal değerlerin hassasiyetini artırmak mümkündür.



Şekil.3.28. Akustik analiz abartılmış ses grafiği.



Şekil.3.29. Yakınlaştırılmış ses grafiğinden değer okuma.

Çizelge.3.14. Salınım periyotları kıyaslamalı tablosu.

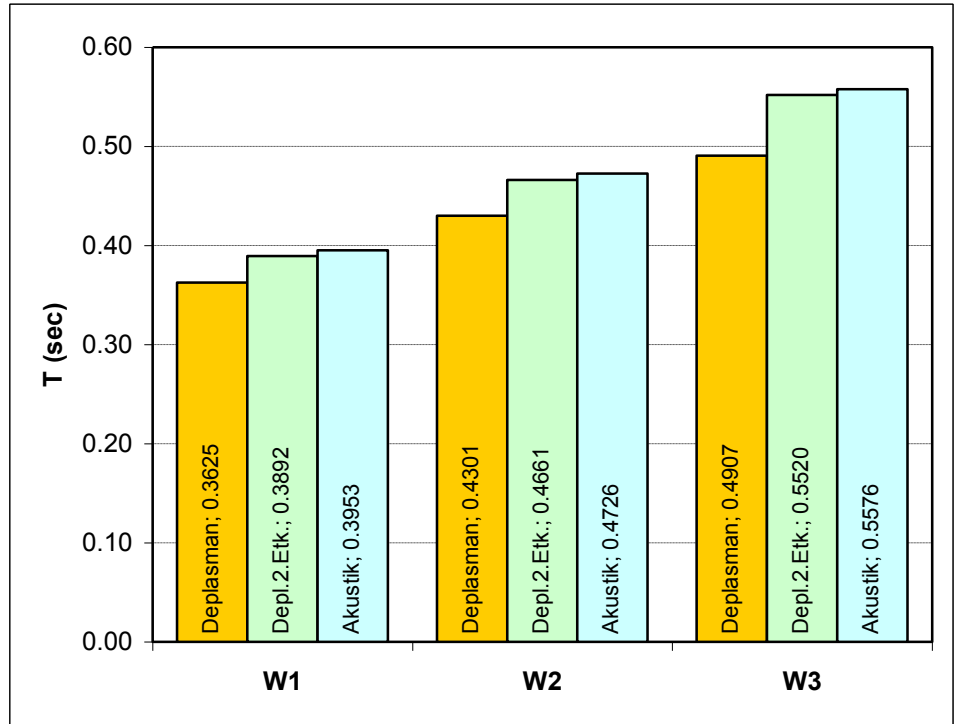
Mavi ÇUBUK	PERİYOTLAR T (sn)		
	W1 (0.0119kg)	W2 (0.0163kg)	W3 (0.0215kg)
DEPLASMAN	0.3625	0.4301	0.4907
DEPLASMAN 2. ETKİ	0.3892	0.4661	0.5520
AKUSTİK ÖLÇÜM	0.3953	0.4726	0.5576

“Deplasman” değerleri; Deneysel kuvvet/deplasman grafiğinden elde edilen K değeri ile hesaplanan periyot değerleridir.

“Deplasman 2.Etki” değerleri, Deneysel elde edilen K değeri ile Vibra-math hesap tablosundan elde edilen 2. derece etkili periyot değerleridir.

“Akustik Ölçüm” değerleri, Akustik deney düzeneği ile ölçülen Periyot değerleridir.

Çizelge: 3.13.’den görüldüğü gibi Geometrik boyutlarla hesaplanan ve deplasmana bağlı hesaplanan T periyotları arasındaki benzerlik ile materyal özelliklerinin sağlıklı olarak deplasmandan hesaplanması sağlanmıştır. Ayrıca kütle 2. derece etkisiyle hesaplanan periyot, deneysel akustik ölçüm ile uyum sağlamaktadır.



Şekil.3.30. Deneysel ve teorik hesaplamaların karşılaştırılması.

Çizelge: 3.15. Salınım hata oranları.

Mavi ÇUBUK	HATA ORANLARI (%)		
	W1	W2	W3
Geometrik-Deplasman	-9.05%	-9.89%	-13.63%
Depl. 2.Etk.-Akustik	-1.57%	-1.39%	-1.01%

Çizelge: 3.16. Kütle 2.derece etkisinin fark oranları.

Mavi ÇUBUK	2.ETKİ FARK ORANLARI (%)		
	W1	W2	W3
Depl.-Depl.2.Etki.	7.37%	8.38%	12.48%

3.2.1.4. Deneysel ve Teorik Karşılaştırmalar

Çizelgelerde Akustik ölçüm ile Deplasman 2.Etki periyot değerleri arasındaki hata oranının azlığı Vibra-math hesap tablosunda yapılan deplasmana bağlı 2. Derece etki hesaplamasının doğru bir yakınsama içinde olduğunu göstermektedir.

Akustik ölçümün ölçüm hassaslığı aşağıdaki bölümlerde anlatılacak olan Görüntü Analizi ile sağlanması yapılmış ve çok düşük hata oranına sahip olduğu görülmüştür.

Elastik özellikleri bilinmeyen bir malzemeden yapılmış çelik çubuk ile oluşturulan deneysel modele çeşitli kuvvetler etki ettirilmiştir. Bu kuvvetler altında yaptığı deplasman değerlerinden, elastik katsayısı (rijitliği) hesaplanarak deneyin ileri aşamalarında bu rijitlik değeri kullanılmıştır.

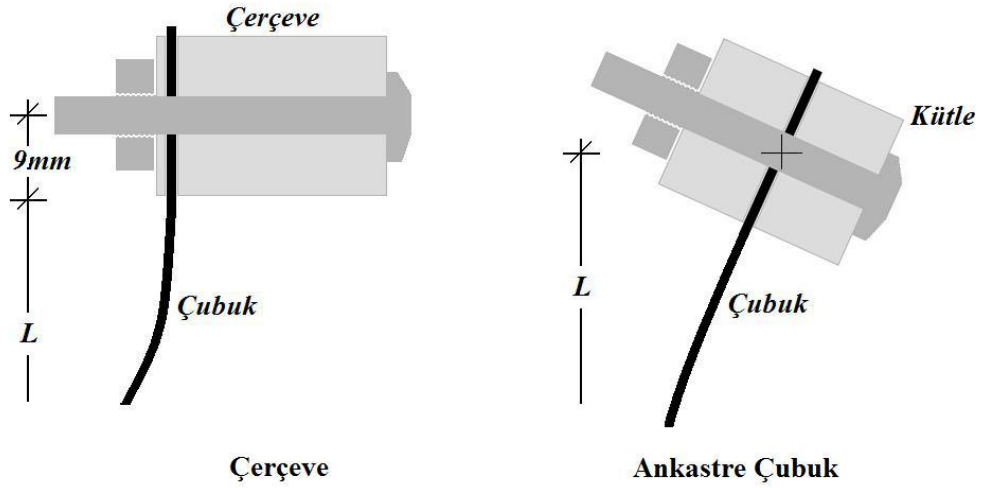
Deneysel düzenekte deplasmanların görülebilir ve ölçülebilir olması için büyük deplasmanlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle “2. Etki” olarak adlandırılan deplasmandan kaynaklanan ek momentlerin, deplasman oluşturan kuvvete yardım ettiği tespit edilmiştir. Bu ek kuvvet sonucunda düzenek daha elastik bir davranış göstermiş, gerçek rijitliğinden daha düşük bir rijitlik değerinde bir sistem gibi davranmıştır. 2.Derece etki nedeniyle çelik çubukta oluşan yumuşama Vibra-Math hesap tablosuyla yapılan periyot hesabına da katılarak deneysel sonuçlara yakın teorik hesaplamalar yapılmıştır. Aradaki farkların, ölçüm hassasiyetlerinden ve çelik çubuk etkin kütlelerinin salınım sırasındaki değişiminden kaynaklandığı varsayılabilir.

3.2.2. Çerçeve Serbest Titreşim Düzenegi

Basitleştirilmiş ankastre titreşim düzeneginde titreşim hareketinin temel özelliklerini inceledikten sonra deneysel çalışma, yapı modellerine daha yakın özellikler taşıyan çerçevesel modeller üzerinde yapılmıştır. Ancak Akustik analizin veri toplama özelliği çerçeve sistem için yeterli ve uygun olmadığından Görüntü Analizi Yöntemi (Bölüm 3.2.4.) kullanılmıştır.

Çizelge: 3.17. Çubuk mesnetlenme durumuna göre serbest açıklıkları.

Mavi ÇUBUK	SERBEST BOY (m)
ANKASTRE DURUMDA	0.2900
ÇERÇEVE DURUMDA	0.2810



Şekil.3.31. Çerçeve ve ankastre çubuk serbest boy farkı.

Fiziksel özellikleri incelenen tekli ankastre çubuktan, aynı özellikte 4 çubuk tarafından taşınan çerçeve modeline geçerken, yeni modelin elastik özelliklerinde oluşan değişiklikler hesaplanmalıdır. Bu değişiklik sırasında;

- Ankastre çubuk sayısı 4'e çıkması
- 2 ucunun ankastre hale getirilmesi
- Serbest boyun azalması,

Sistemin elastik davranışını etkileyecektir.

3.2.2.1. Akustik Analiz Veri Karşılaştırması

Ankastre çubuk düzeneğinin akustik analiz ile yapılan ölçümlerinden elde edilen değerlerin, serbestlik dereceleri hesaba katılarak çerçeve sisteme dönüştürülmesiyle elde edilen çerçeve sistem rijitlik değerlerinin tutarlılığı incelenmiştir.

Rijitlik katsayısı K 'nın bir ucu ankastre olan çubuk için $K = \frac{3EI}{L^3}$ olması, iki ucu ankastrelili olması durumunda $K = \frac{12EI}{L^3}$ olması, çerçeve için 4 adet çubuğun kullanılması, çerçeveli sisteme geçişte rijitlik katsayılarını aşağıdaki şekilde hesaplamamızı gerektirmektedir.

Çizelge.3.18. Mavi Çubuklu çerçeve rijitlik katsayı hesaplaması.

K (ankastre tek çubuk)	0.3582	kg/m
EI (Tek çubuk)	0.0029	kg/m ²
K1 (2 ucu sabit tek çubuk)	1.5749	kg/m
K4 (4'lü çerçeve)=4 K1	6.2997	kg/m

3.2.2.2. Çerçeve Rijitlik Ölçümü

Bir ucu ankastre olan çubuk ile yaptığımız rijitlik ölçümünü aynı mavi çubuklardan oluşturulan çerçeve ile farklı ağırlıklarla tekrarlanmıştır.

Çizelge. 3.19. Çerçeve deneyi ölçüm ağırlıkları.

Mavi ÇERÇEVE	W4	W5	W6
AĞIRLIK (Kg)	0.0391	0.0779	0.1740

Bir ucu ankastre çubuk için kullandığımız kütleler çerçeve için çok küçük deplasmanlar oluşturacağından daha büyük kütleler kullanılmıştır (W4, W5, W6).

Çizelge. 3.20. Çerçeve ağırlık bileşenleri.

ÇERÇEVE AĞIRLIĞI	330.69	g
VİDA AĞIRLIĞI	68.90	g
ÇUBUK KÜTLE KATILIMI (%23)	14.12	g
TOPLAM ÇERÇEVE	413.71	g

Çizelge. 3.21. Çerçeve toplam ağırlık hesapları.

Mavi Çerçeve	DİK	BOŞ	W4	W5	W6
KUVVET (kg)	0	0.4137	0.4528	0.4916	0.5878

Çizelge. 3.22. Çerçeve deplasman ölçüm değerleri.

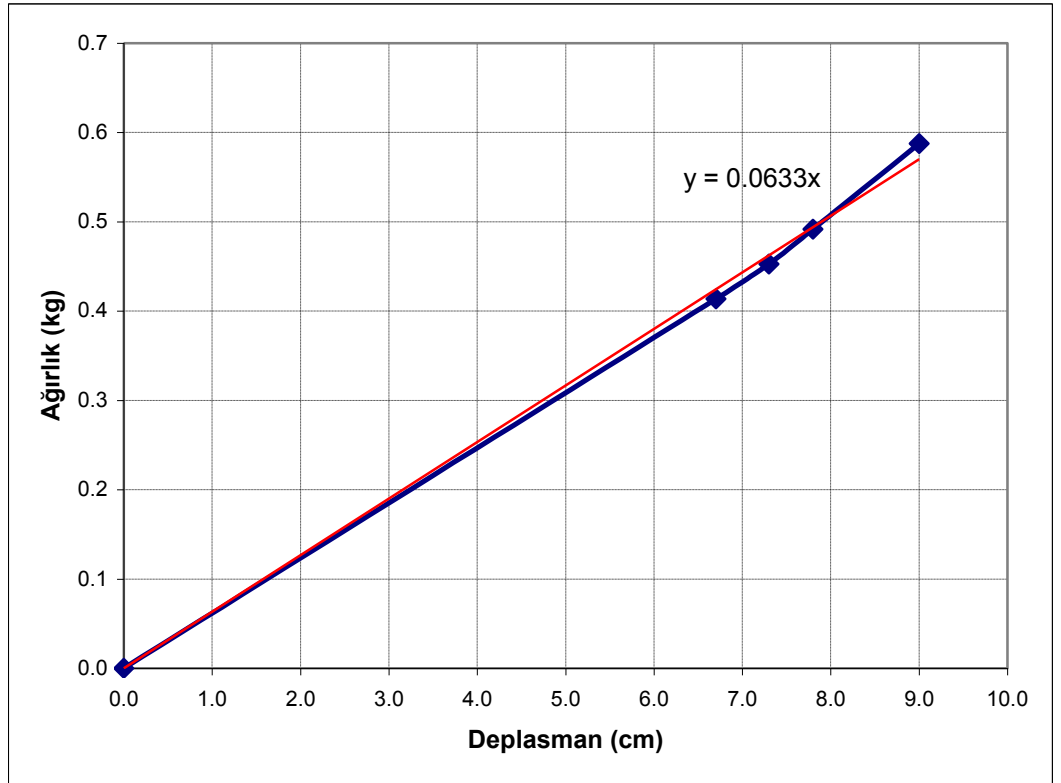
Mavi Çerçeve	CETVEL DEĞERLERİ (cm)				
	DİK	BOŞ	W4	W5	W6
DEPLASMAN	16.90	10.20	9.70	9.10	7.90

Çizelge.3.23. Çerçeve deplasman hesapları.

Mavi Çerçeve	DEPLASMANLAR (cm)				
	DİK	BOŞ	W1	W2	W3
MAVİ ÇUBUK	0.00	6.70	7.30	7.80	9.00

Çizelge.3.24. Çerçeve fark deplasmanları.

FARK DEPLASMANLAR (cm)		
W4	W5	W6
0.50	1.10	2.30



Şekil.3.32. Çerçeve Deneysel Ağırlık/Deplasman değişim grafiği.

Çizelge: 3.25. Çerçeve Deplasman değerlerine göre elastik özellikleri.

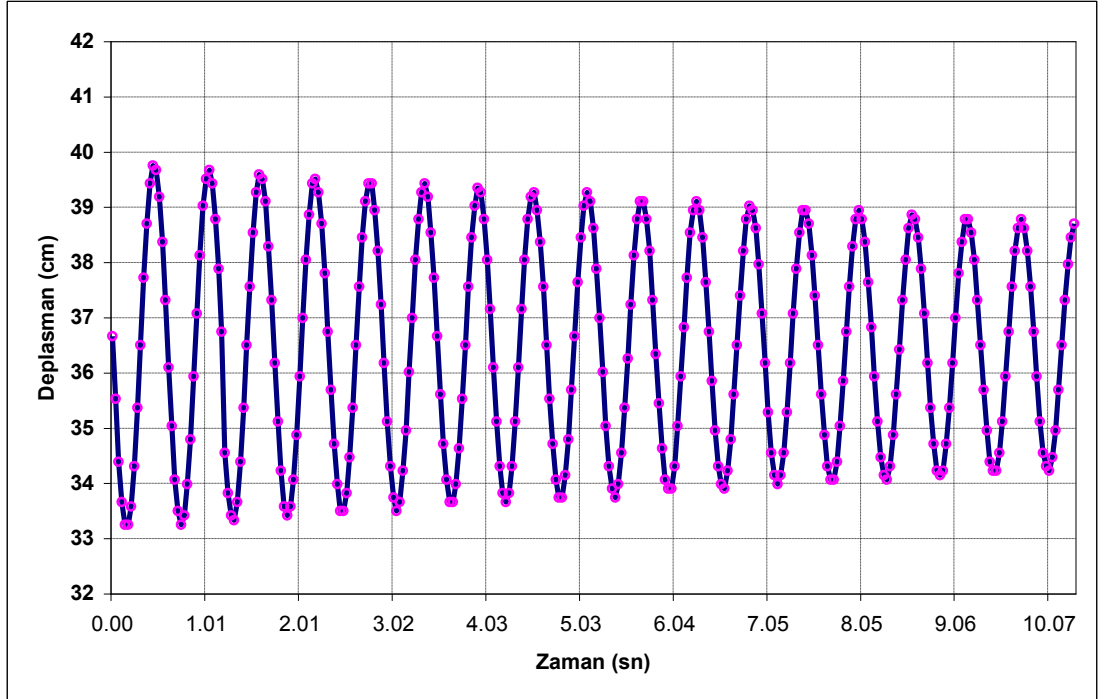
AĞIRLIKLARA GÖRE RİJİTLİK K-(Kg/m)			
BOŞ	W4	W5	W6
6.17	6.20	6.30	6.53

3.2.2.3. Çerçeve Görüntü Analizi

Aşağıdaki bölümlerde anlatılan Görüntü Analizi ile, özellikleri tespit edilen mavi çerçevenin serbest titreşimi kaydedilmiş, Şekil 2.4.'deki zaman deplasman grafiği elde edilmiştir. Grafikte periyot ve sönüm sebebiyle azalan titreşim genliği görülmektedir. Genlikteki azalma salınım sırasında malzemedeki ve sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybı nedeniyle oluşmaktadır. Sönümlenme değeri, zaman-deplasman grafiğinden elde edilebilmektedir.

3.2.2.4. Sönümlenme Hesabı

Salınım genliğinin azalması grafikte tepe noktalarının birleştirilmesiyle net olarak görülebilmektedir. Sönümlenme, teorik olarak genlik üzerinde logaritmik bir azalma sağlamaktadır.

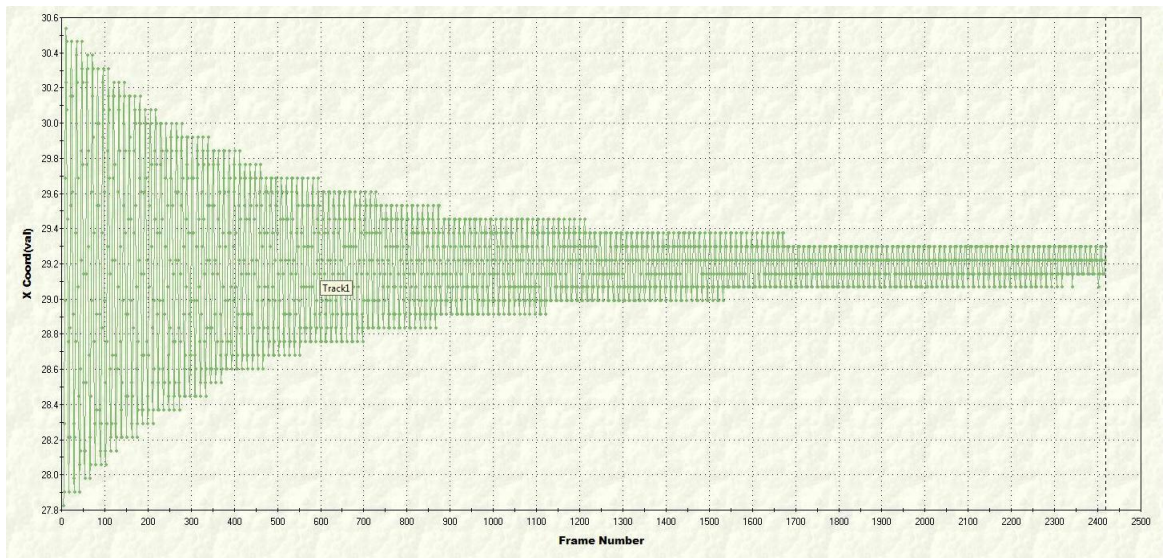


Şekil.3.33 Çerçeve deneysel salınım grafiği.

Çizelge: 3.26. Çerçeve salınım maksimum ve minimum deplasman değerleri.

No	Zaman (sn)	Mak-x	Zaman (sn)	Min-x	Xo	Deplasman
	(sn)	(cm)	(sn)	(cm)	(cm)	(cm)
0	0.4362	39.7560	0.1342	33.2520	36.5040	3.2520
1	1.0402	39.6750	0.7382	33.2520	36.4838	3.1913
2	1.5770	39.5930	1.3086	33.3330	36.4835	3.1095
3	2.1810	39.5120	1.8790	33.4150	36.4838	3.0283
4	2.7849	39.4310	2.4494	33.4960	36.4635	2.9675
5	3.3553	39.4310	3.0534	33.4960	36.5043	2.9268
6	3.9257	39.3500	3.6238	33.6590	36.5045	2.8455
7	4.5297	39.2680	4.2277	33.6590	36.4838	2.7843
8	5.1001	39.2680	4.7981	33.7400	36.5040	2.7640
9	5.7041	39.1060	5.4021	33.7400	36.4635	2.6425
10	6.2745	39.1060	5.9725	33.9020	36.5040	2.6020
11	6.8449	39.0240	6.5765	33.9020	36.4835	2.5405
12	7.4489	38.9430	7.1469	33.9840	36.4838	2.4593
13	8.0193	38.9430	7.7173	34.0650	36.5040	2.4390
14	8.5897	38.8620	8.3212	34.0650	36.4838	2.3783
15	9.1936	38.7800	8.8917	34.1460	36.4835	2.2965
16	9.7640	38.7800	9.4621	34.2280	36.5040	2.2760
17	10.3344	38.6990	10.0660	34.2280		

Sönüm değeri malzeme özelliklerinden dolayı çok düşük değerlerde olduğundan, doğrusal gibi görünse de, daha geniş zaman aralıklarında logaritmik olmaktadır. Şekil.3.33'de dar bir titreşim aralığı seçildiğinden doğrusal gibi görünmekte, ancak Şekil.3.34'de 2500 kareden oluşan ölçümden elde edilen logaritmik sönümlenme grafiği daha net olarak görülmektedir.

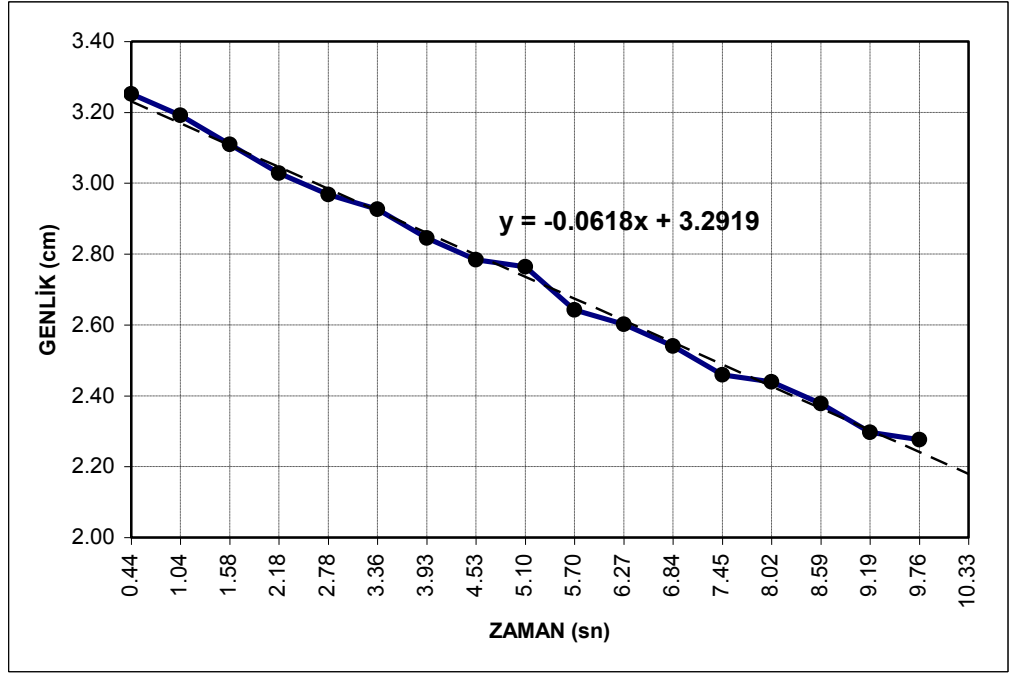


Şekil: 3.34. Çerçeve sönümlenme grafiği.

Şekil: 3.34.'de görülen Deplasman/Zaman grafiğinde, tepe (Mak-x) ve dip (Min-x) noktaların genlik değerlerinden kalibre edilmiş sıfır (orta) nokta değeri hesaplanarak, salınımların genliklerindeki sönümden kaynaklanan azalma değerleri elde edilmektedir. Bu şekilde sistemin sönüm karakteristiği hesaplanmaktadır. Xo değerleri ikişer tepe ve ikişer dip noktadan hesaplanan sıfır (orta) nokta değeri olup, hesaba katılacak sıfır (orta) noktası değeri Çizelge.3.25.'deki Xo değerlerinin ortalaması olarak kabul edilmiştir.

Çizelge.3.27. Çerçeve salınım deplasman aksenal değerleri.

Periyot	0.5823	Sn
Orta nokta	36.4897	Cm
Mak-Depl.	3.2520	Cm



Şekil.3.35. Çerçeve genlik değişim grafiği.

Şekil:3.36.'da Şekil:3.34.'de kaydedilen Deplasman/Zaman grafiğindeki her salınıminin tepe noktasından (Mak-x) elde edilen genlik değerleri gösterilmektedir. Kayıt küçük zaman aralığında yapıldığından doprusal gibi görünmektedir. Şekil:3.36'daki Deplasman değerleri Çizelge.3.25'deki deplasman değerlerinin, hesaplanan Sıfır (orta) nokta değerinden olan farklarıdır.

Çizelge.3.28. Çerçeve sönümlenme değerleri

Salınım No	Genlik (cm)	Logaritmik Sönüml.
0	3.2520	
1	3.1913	0.0189
2	3.1095	0.0260
3	3.0283	0.0265
4	2.9675	0.0203
5	2.9268	0.0138
6	2.8455	0.0282
7	2.7843	0.0218
8	2.7640	0.0073
9	2.6425	0.0450
10	2.6020	0.0154
11	2.5405	0.0239
12	2.4593	0.0325
13	2.4390	0.0083
14	2.3783	0.0252
15	2.2965	0.0350
16	2.2760	0.0090
ORTALAMA		0.0223

Çizelge.3.29. Sönümlü Dairesel Frekans Değerleri Karşılaştırması.

Mavi Çerçeve	T (sn)	w (rad/sn)
DEPLASMAN	0.5129	12.2503
DEPLASMAN 2.ETKİ	0.5855	10.7313
GÖRÜNTÜ ANALİZİ	0.5823	10.7912

Logaritmik genlik azalması (logarithmic decrement);

$$\delta = \ln \frac{v_n}{v_{n+1}} = 0.0223 \quad (3.74.)$$

Sönümlenme oranı bağıntısından;

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.75.)$$

Denklemden sönümlenme oranı ξ çekerek;

$$\xi = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 - \delta^2}} = \%0.355 \text{ değeri hesaplanır.}$$

Düşük sönümlenme değerleri için ξ aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir.;

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.0223}{2\pi} = \%0.3549 \quad (3.76.)$$

Sönümlenme katsayısı;

$$c = \xi c_c = \xi 2mw = 0.0223 * 2 * \frac{0.4137}{9.81} * 10.7912 = 0.0203 \text{ kg / m} \cdot \text{sn} \quad (3.77.)$$

Sönümlü dairesel frekans küçük sönümlenme oranı için;

$$w_d = w(1 - \xi^2) \cong w \quad (3.78.)$$

Şeklinde hesaplanabilir. Bu nedenle sönümlü doğal periyot aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

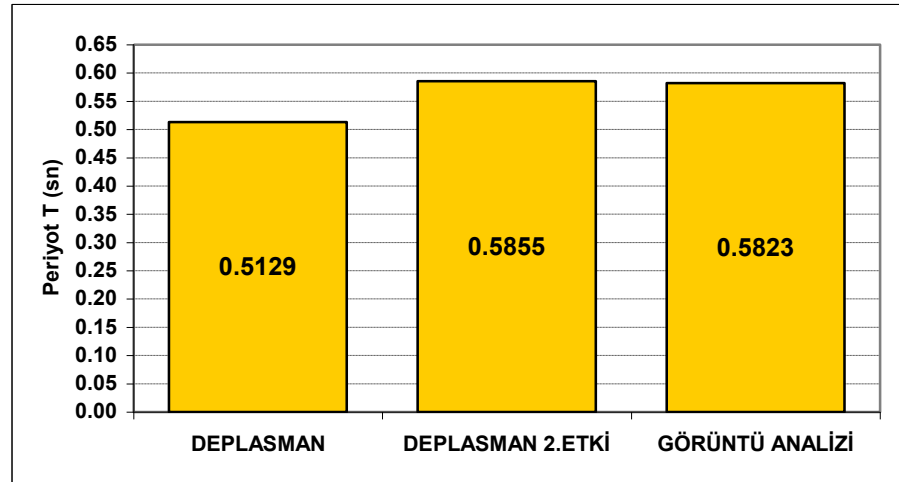
$$T_d = \frac{2\pi}{w_d} = T \quad (3.79.)$$

3.2.2.5. Deneysel ve Teorik Karşılaştırmalar

Kuvvet-Deplasman elde edilen rijitlik değeri ile hesaplanan serbest titreşim periyodu ile görüntü analizi ile elde edilen periyot değeri arasındaki fark, yüksek genlikteki titreşimlerde kütle ağırlığından kaynaklanan 2. Derece etkilerin dinamik davranışı yüksek oranlarda etkilediğini göstermektedir. 2. Derece Etki katkısı ile hesaplanan salım periyodunun deneysel sonuca yakınlığı hesap yönteminin gerçekçiliğini göstermektedir.

Çizelge.3.30. Çerçeve periyot karşılaştırma tablosu.

Mavi Çerçeve	T (sn)	w (rad/sn)
DEPLASMAN	0.5129	12.2503
DEPLASMAN 2.ETKİ	0.5855	10.7313
GÖRÜNTÜ ANALİZİ	0.5823	10.7912



Şekil.3.36. Çerçeve deplasman 2. derece etki değerleri karşılaştırma grafiği.

3.2.3. Zorlanmış Titreşim

Zorlanmış titreşim analizinde yapılacak doğal frekans hesaplamalarında çerçeve kütleleri kullanılacağından, hata oranlarını azaltmak için çubuk ağırlıklarının kat kütlelerine oranını azaltmak gerekmektedir. Bu amaçla daha büyük kütleler kullanılacağından daha rijit bir yapı modeli oluşturulmak istenmiştir. Bu nedenle daha düşük elastisite modülüne sahip olsa da daha büyük kesit alanından dolayı siyah çubuklar kullanılmıştır. Siyah çubuklardan oluşturulan çerçevenin özelliklerinin belirlenmesi için mavi çubuklar için yapılan testler tekrarlanmıştır.

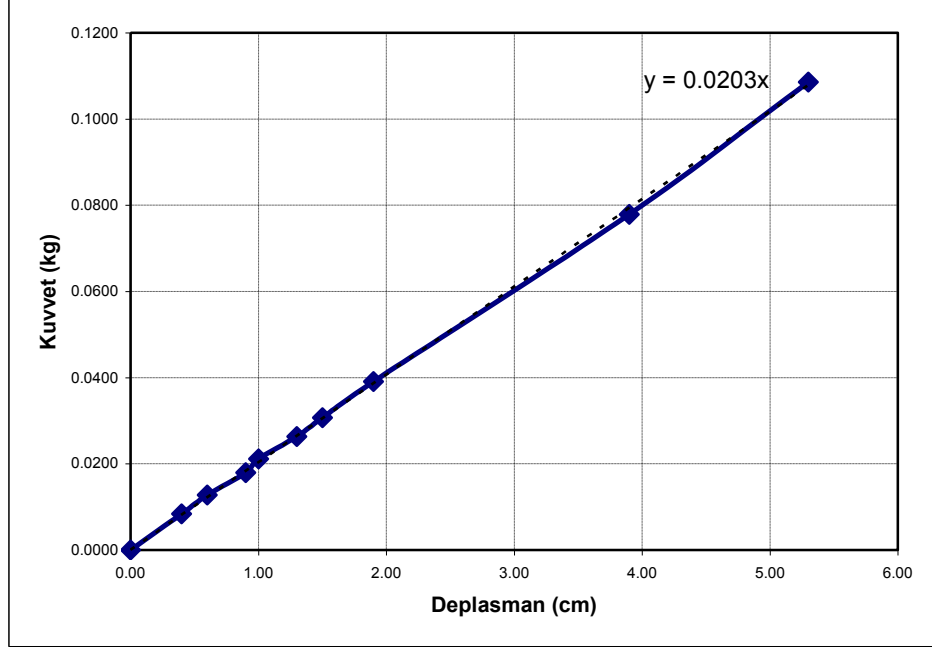
Çizelge.3.31. Ankastre Siyah Çubuk yükleme tablosu.

ANKASTRE SİYAH ÇUBUK		
YÜK	F(kg)	d(cm)
BOŞ	0.0155	0.70
W1	0.0239	1.10
W2	0.0283	1.30
W3	0.0334	1.60
W4	0.0367	1.70
W5	0.0419	2.00
W6	0.0462	2.20
W7	0.0546	2.60
W8	0.0934	4.60
W9	0.1241	6.00

Elde edilen deplasman değerlerinin farkından ağırlık etiksindeki ek deplasmanlar bulunmuştur.

Çizelge.3.32. Ankastre Siyah Çubuk yükleme fark tablosu.

ANKASTRE SİYAH ÇUBUK		
YÜK	F(kg)	d(cm)
BOŞ	0.0000	0.00
W1	0.0084	0.40
W2	0.0128	0.60
W3	0.0179	0.90
W4	0.0212	1.00
W5	0.0263	1.30
W6	0.0307	1.50
W7	0.0391	1.90
W8	0.0779	3.90
W9	0.1086	5.30



Şekil.3.37. Ankastr SİYAH Çubuk Kuvvet-Deplasman Grafiği.

Çizelge.3.33. Çubuklara ait Rijitlik Dönüşümü.

K1	2.0300	kg/m
EI	0.0157	kg/m ²
K2	8.1200	kg/m
4K2	32.4800	kg/m

Siyah tekli ankastr çubuk ile yapılan ölçümlerden elde edilen rijitlik katsayısı teorik olarak 4'lü çerçeve ölçümlerine dönüştürüldüğünde, deneysel çerçeve ölçümlerinden farklı bir rijitlik katsayısı elde edilmektedir. Rijitlik katsayısı düşük olan mavi çubuklarda aynı sapma ile karşılaşılmamıştır.

Kat diyaframını oluşturan alüminyum dikdörtgen kesitli çerçeve üzerindeki bağlantı vidaları ile oluşturulan mesnetler teorik olarak rijit olması gerekirken, orantısal olarak yüksek rijitlik değerine sahip çubuklar bağlandığında, diyaframın iç kuvvetler sonucu esnemesi çerçevenin esnekliğini artırarak rijitlik katsayısının azalmasına sebep olmaktadır.

Elastisite katsayısı için çubuklu sisteme etkiyen "F" kuvveti sonucunda "d" deplasmanı ölçülerek grafik haline getirilmiştir.

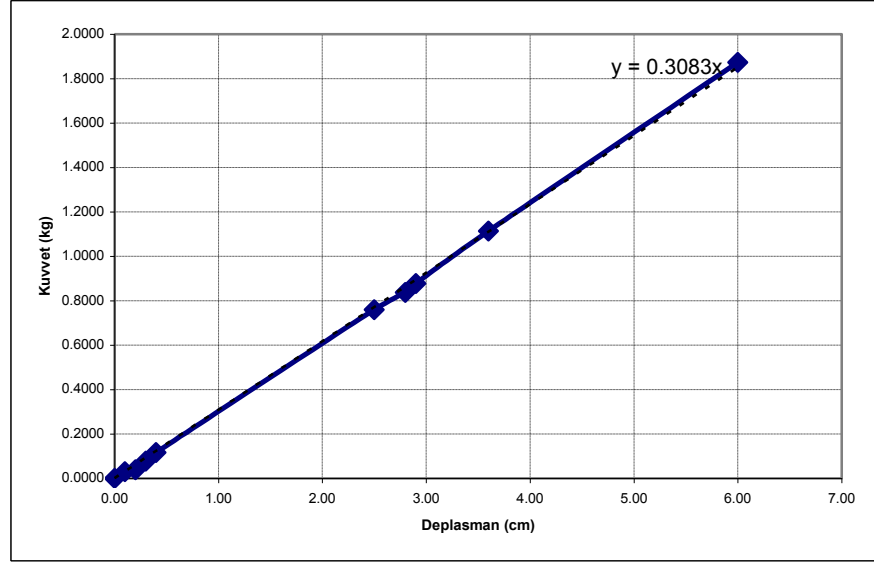
Çizelge.3.34. Siyah Çubuklu Çerçeve yükleme tablosu.

ÇERÇEVE SİYAH ÇUBUK		
YÜK	F(kg)	d(cm)
BOŞ	0.0000	0.00
W1	0.4539	1.50
W2	0.4846	1.60
W3	0.4930	1.70
W4	0.5318	1.80
W5	0.5709	1.90
W6	1.2139	4.00
W7	1.2918	4.30
W8	1.3309	4.40
W9	1.5679	5.10
W10	2.3279	7.50

Çizelge.3.35. Siyah Çubuklu Çerçeve yükleme fark tablosu.

ANKASTRE SİYAH ÇUBUK		
YÜK	F(kg)	d(cm)
BOŞ	0.0000	0.00
W1	0.0307	0.10
W2	0.0391	0.20
W3	0.0779	0.30
W4	0.1170	0.40
W5	0.7600	2.50
W6	0.8379	2.80
W7	0.8770	2.90
W8	1.1140	3.60
W9	1.8740	6.00

Grafikteki Kuvvet/Deplasman değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirilerek bu noktalara bağlı ideal eğim çizgisinden modelin Elastisite Katsayısı “K” değeri elde edilmiştir. Daha önce kullanılan Mavi Çubuklar elastik davranışı sağlıklı şekilde göstermiş, ancak çok serbestlik dereceli sistemler için yeterli mukavemeti göstermediğinden, daha yüksek rijitlikteki siyah çubuklarla çerçeve oluşturma gereği duyulmuştur.



Şekil.3.38. Siyah çubuklu çerçeve Kuvvet Deplasman Grafiği

Tek katlı çerçeve sistemin rijitlik katsayısı grafikten elde edilir.

Çizelge.3.36. Çerçeve rijitlik tablosu

K	30.83	kg/m
----------	--------------	------

Ek çerçeve ağırlıkları çerçevenin kütle merkezine vidalarla sabitlenmiştir. Bu şekilde bir burulma etkisi önlenmiştir.

Çizelge.3.37. Çerçeve deneysel kütle tablosu.

Siyah Çerçeve	W4	W5	W6
AĞIRLIK (Kg)	1.2550	1.6500	2.4700

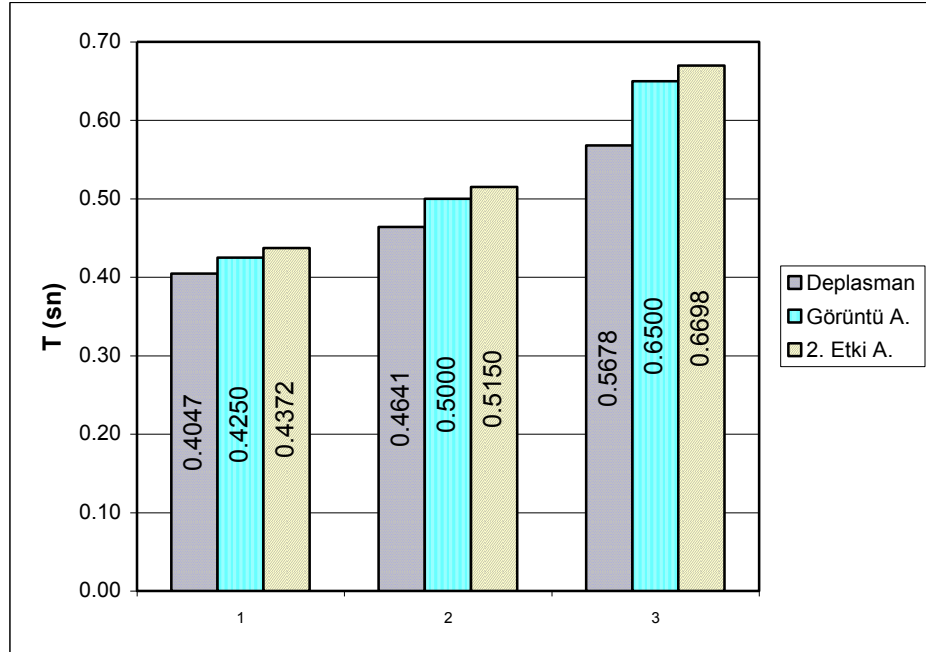
Daha önceki testlerde kullanılan hesaplama yöntemiyle deneysel yöntemle elde edilen “K” rijitlik katsayısının formül ile hesaplanan periyot değerleri, bu değerlerin 2. derece etkiyle geliştirilmiş sonuçları (Vibra-math ile hesaplanan) ve görüntü analizi ile elde edilen periyotlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge.3.38. Çerçeve karşılaştırmalı periyot tablosu.

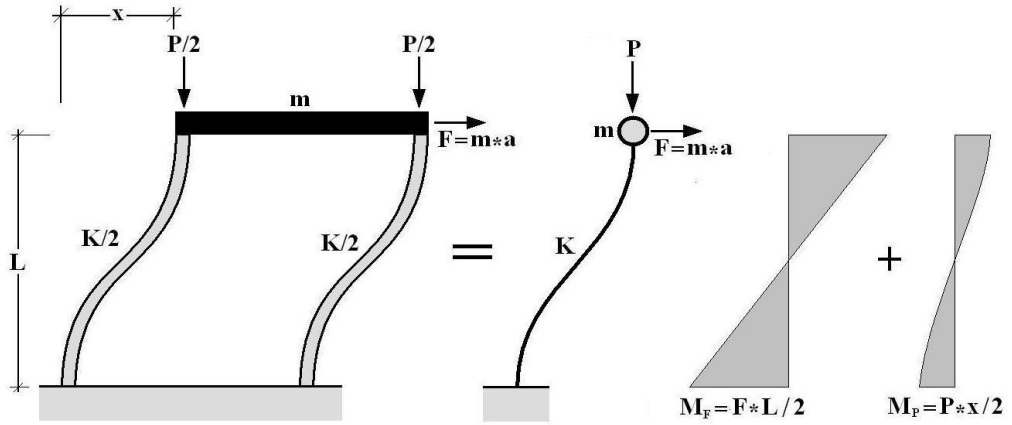
Siyah Çerçeve	PERİYOTLAR T (sn)		
	W1	W2	W3
DEPLASMAN	0.4047	0.4641	0.5678
GÖRÜNTÜ ANALİZİ	0.4250	0.5000	0.6500
DEPLASMAN 2. ETKİ	0.4372	0.5150	0.6698

Çizelge.3.39. Çerçeve periyot fark oranları.

Siyah Çerçeve	FARK ORANLARI (%)		
	W1	W2	W3
Depl.-Depl.2.Etki.	2.79%	2.91%	2.96%

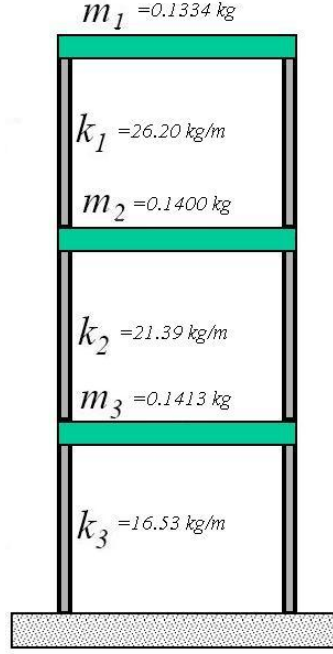


Şekil.3.39.Periyot sonuç karşılaştırma grafiği.



Şekil.3.40. Çerçeve düşey yük 2.Etki moment grafiği.

Şekilde düşey yükler altında 2. derece etkinin yarattığı moment ve buna bağlı deformasyondan kaynaklanan deplasman, K olan toplam rijitliği azaltarak, sistemin kütle etkisi karşısında daha azaltılmış bir rijitliğe sahipmiş gibi davranmasına yol açmaktadır. Bu nedenle daha önce açıklaması yapılan Vibra-Math hesap tablosunda düşey yük altında sistemin azaltılmış rijitliği hesaplanmıştır.



Şekil.3.41. Çok serbestlik dereceli model örneği.

Çizelge.3.40. 3 Katlı Çerçeve kat yükleri.

3 Katlı Çerçeve	MÜSTAKİL KAT YÜKLERİ (Kgf)		
	M1	M2	M3
3.Kat	1.309	1.680	2.448
2.Kat	1.373	1.730	2.498
1.Kat	1.386	1.740	2.500

Kat yükleri hassas olarak ölçülerek, çerçevelerin ve ek kütlelerin imalatı sırasındaki küçük boyut farklılıklardan kaynaklanan kütle farkları da hesaba katılmıştır.

Çizelge.3.41. 3 Katlı Çerçeve eklenmiş kat yükleri.

3 Katlı Çerçeve	EKLENMİŞ KAT YÜKLERİ (Kg)		
	M1	M2	M3
3.Kat	1.3090	1.6800	2.4480
2.Kat	2.6820	3.4100	4.9460
1.Kat	4.0680	5.1500	7.4460

Katların kolonlarını temsil eden çubuklara etkiyen düşey yükler yukarı katlardan aşağıya doğru toplanarak hesaplanmıştır. Rijitlik katsayısı Çizelge.3.35.'de deneysel olarak hesaplanan "K" değeri olarak hesaba katılmıştır.

Çizelge.3.42. 3 Katlı Çerçeve kat rijitlikleri tablosu.

3 Katlı Çerçeve	TEKİL KAT RİJİTLİKLERİ(Kg/m)		
	M1	M2	M3
3.Kat (K3)	30.83	30.83	30.83
2.Kat (K2)	30.83	30.83	30.83
1.Kat (K1)	30.83	30.83	30.83

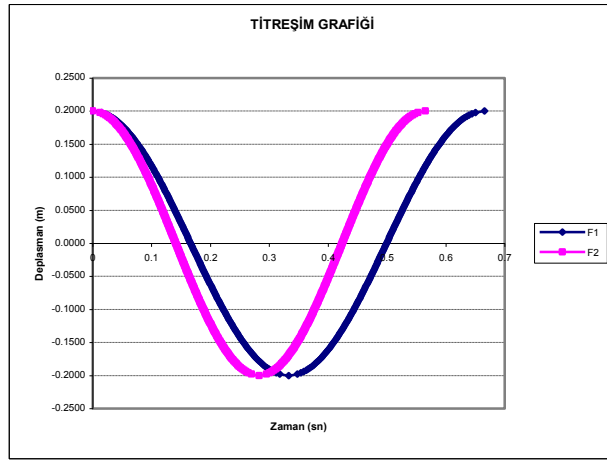
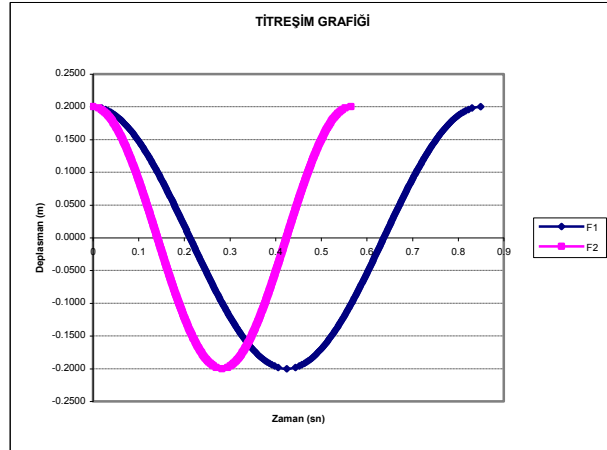
Düşey yükler altında çerçevenin 2.etki momentleri sonucunda rijitliğinde meydana gelecek azalmanın hesabında daha önce Serbest Titreşim bölümünde kullanılan "Vibra-Math" hesap tablosunun düşey yük altında kullanılan bir benzeri hazırlanmıştır. Bu tabloda bir düşey yük faktörü verilerek titreşime kütle olarak katılmayan ancak üst kat çerçevelerinden aksenal yük olarak aktarılan kuvvet Kw faktörü olarak eklenmiştir. Kw'nin 1 yazılması durumunda; 2.etki momentini oluşturan mevcut düşey yük 1 ile, 2 yazılması durumunda 2 ile çarpılacaktır.

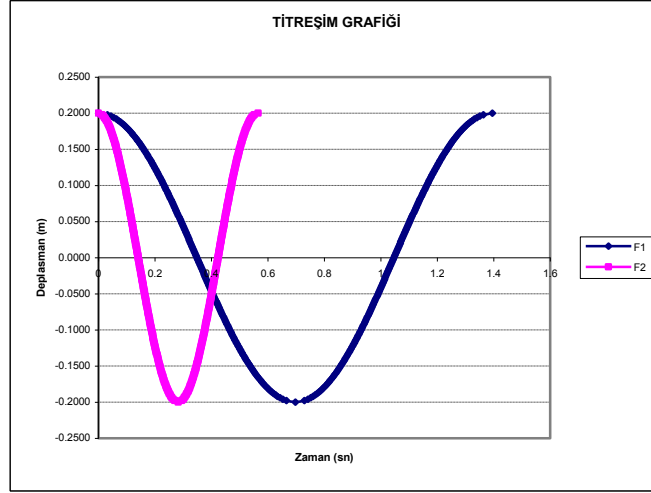
Çizelge.3.43. Vibra-Math ağırlık faktörlü hesap tablosu giriş bilgileri.

K	30.8300	kg/m
W	7.4460	kg
Vo	0.0000	m/sn
Xo	0.2000	m
L	0.2850	m
m	0.7590	kg
EI	0.0595	kg*m2
Kw	1.0000	Vmax

Çizelge.3.44. Vibra-Math ile hesaplanan azaltılmış 2. etkili kat rijitlikleri tablosu.

3 Katlı Çerçeve	2.ETKİLİ KAT RİJİTLİKLERİ (Kg/m)		
	M1	M2	M3
3.Kat (K3)	26.20	24.90	22.21
2.Kat (K2)	21.39	18.84	13.46
1.Kat (K1)	16.53	12.74	4.70

Şekil.3.42. $K_w=1$ değeri için deplasman-zaman grafiği.Şekil.3.43. $K_w=2$ değeri için deplasman-zaman grafiği.



Şekil.3.44. Kw=3 değeri için deplasman-zaman grafiği.

Artan 2.derece yükler karşısında artan periyot deplasmana yardım eden 2. etki momentini gösterdiği gibi, K rijitliğinde azalmaya neden olmaktadır. Bu azalmanın hesaplanarak Modal analizde K matrisinin oluşturulmasında kullanılması gerekmektedir.

Eigenvektörlerin ve diğer dinamik hesaplamalarda “2. Etkili kat rijitlikleri” adı altında bu Vibra-Math hesap tablosu sonuçları kullanılmıştır.

Örnek olarak M1 kütle setinin hesaplaması yapılmıştır.

$$[M] = \begin{bmatrix} 0.1334 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1400 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1413 \end{bmatrix} \quad (3.80.)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 26.20 & -26.20 & 0 \\ -26.20 & 21.39 + 26.20 & -21.39 \\ 0 & -21.39 & 21.39 + 16.53 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 26.20 & -26.20 & 0 \\ -26.20 & 47.59 & -21.39 \\ 0 & -21.39 & 37.92 \end{bmatrix}$$

Eigenvalue problem olarak denklem yazılmıştır.

$$[K]\{\phi\} = \omega^2 [M]\{\phi\} \text{ veya } [[K] - \omega^2 [M]]\{\phi\} = \{0\} \quad (3.81.)$$

$$\begin{bmatrix} 26.20 - 0.1334\omega^2 & -26.20 & 0 \\ -26.20 & 47.59 - 0.14\omega^2 & -21.39 \\ 0 & -21.39 & 37.92 - 0.1413\omega^2 \end{bmatrix} \{\phi\} = \{0\} \quad (3.82.)$$

$$\det \begin{bmatrix} 26.20 - 0.1334\omega^2 & -26.20 & 0 \\ -26.20 & 47.59 - 0.14\omega^2 & -21.39 \\ 0 & -21.39 & 37.92 - 0.1413\omega^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.83.)$$

$$(26.20 - 0.1334\omega^2) [(47.59 - 0.1400\omega^2)(37.92 - 0.1413\omega^2) - 21.39^2] - (-26.20) [(-26.20)(37.92 - 0.1413\omega^2)] = 0$$

Denklem çözümünü basitleştirmek için;

$$\frac{0.1334}{26.20} \omega^2 = \lambda \quad (3.84.)$$

sadeleştirilmesi yapılarak;

$$-1.1106\lambda^3 + 4.5519\lambda^2 - 4.3449\lambda + 0.5151 = 0 \quad (3.85.)$$

denklemini elde edilir.

$$A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X + D = 0 \quad (3.86.)$$

Şekline dönüşebilen denklem, tekrarlanabilen benzer işlemler için Excel Çalışma Sayfası oluşturularak, üç kütle seti için üç bilinmeyenli denklemin A, B, C ve D katsayıları hesaplanmıştır.

Çizelge.3.45. Modal analiz 3.derece denklem katsayıları

3 Katlı Çerçeve	DENKLEM KATSAYILARI		
	M1	M2	M3
A	-1.1106	-1.0665	-1.0421
B	4.5519	4.1919	3.5166
C	-4.3449	-3.7451	-2.3992
D	0.5151	0.3871	0.1282

Elde edilen 3ncü dereceden denklem çözümünden;

Çizelge.3.46. Modal analiz λ değer tablosu.

3 Katlı Çerçeve	DENKLEM ÇÖZÜMLERİ		
	M1	M2	M3
λ_1	0.1378	0.1187	0.0584
λ_2	1.2351	1.1488	0.8577
λ_3	2.7258	2.6630	2.4584

Yine örnek olması açısından M1 kütle setinin değerleriyle;

Yapılmış olan $\frac{0.1334}{26.20} \omega^2 = \lambda$ sadeleştirmesinden;

Tekrar $\omega_n = \sqrt{\frac{\lambda_n \cdot 26.20}{0.1334}}$ hesaplanarak aşağıdaki tablo oluşturulur.

Çizelge.3.47. Modal analiz açısal hız sonuç değerleri.

3 Katlı Çerçeve	DENKLEM ÇÖZÜMLERİ		
	M1	M2	M3
W1	5.2009	4.1535	2.2791
W2	15.5727	12.9240	8.7374
W3	23.1347	19.6772	14.7922

Doğal periyotlar;

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.87.)$$

Eşitliğiyle hesaplanır.

Çizelge.3.48. Modal analiz Periyot sonuç değerleri.

3 Katlı Çerçeve	DOĞAL PERİYOTLAR (sn)		
	M1	M2	M3
T1	1.2080	1.5127	2.7568
T2	0.4035	0.4862	0.7191
T3	0.2716	0.3193	0.4248

Eigen-vektörlerin (Mod şekillerinin) hesaplanması için;

$$\omega_1 = 5.2009$$

Değeri;

$$\begin{bmatrix} 26.20 - 0.1334\omega^2 & -26.20 & 0 \\ -26.20 & 47.59 - 0.14\omega^2 & -21.39 \\ 0 & -21.39 & 37.92 - 0.1413\omega^2 \end{bmatrix} \{\phi\} = \{0\} \quad (3.88.)$$

Eşitliğindeki yerine konulduğunda;

$$\begin{bmatrix} 26.5906 & -26.20 & 0 \\ -26.20 & 43.8041 & -21.39 \\ 0 & -21.39 & 34.0983 \end{bmatrix} \{\phi\} = \{0\} \quad (3.89.)$$

İlk satır 26.5906'ya, ikinci satır -26.20'ye, üçüncü satır -21.39'a bölüldüğünde;

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.16 & 0 \\ 1 & -1.672 & 0.816 \\ 0 & 1 & -1.594 \end{bmatrix} \{\phi\} = \{0\} \quad (3.90.)$$

Birinci satır ikinci satırdan çıkartıldığında;

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.16 & 0 \\ 0 & -0.512 & 0.816 \\ 0 & 1 & -1.594 \end{bmatrix} \{\phi\} = \{0\} \quad (3.91.)$$

İkinci satır -0.512'ye bölünüp, üçüncü satırdan çıkartıldığında;

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.16 & 0 \\ 0 & -0.512 & 0.816 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (3.92.)$$

elde edilir. Bu eşitlikten 2 bilinmeyenli iki eşitlik elde edilir. Bu değerlerden birisine varsayılan bir değer verilerek diğeri bulunur.

$$\phi_1(1.00) + \phi_2(-1.16) = 0 \quad (3.93.)$$

$$\phi_1 = 1.00 \quad (3.94.)$$

Olarak varsayıldığında;

$$\phi_2 = \frac{-1}{-1.16} = 0.862 \quad (3.95.)$$

Olarak bulunur. Benzer şekilde;

$$\phi_3 = 0.442 \quad (3.96.)$$

Olarak bulunur.

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{21} \\ \varphi_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 0.862 \\ 0.442 \end{Bmatrix} \quad (3.97.)$$

$$\phi_2 = \begin{Bmatrix} \varphi_{12} \\ \varphi_{22} \\ \varphi_{32} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -0.235 \\ -1.122 \end{Bmatrix} \quad (3.98.)$$

$$\phi_3 = \begin{Bmatrix} \varphi_{13} \\ \varphi_{23} \\ \varphi_{33} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.726 \\ 0.799 \end{Bmatrix} \quad (3.99.)$$

Mod şekillerine ait etkin kütleler;

$$M_n = \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} \quad (3.100.)$$

$$M_1 = \{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\} = \{1.000 \quad 0.862 \quad 0.442\} \begin{bmatrix} 0.133 & 0 & 0 \\ 0 & 0.140 & 0 \\ 0 & 0 & 0.141 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 0.862 \\ 0.442 \end{Bmatrix} \quad (3.101.)$$

$$M_1 = \{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\} = 0.265 \quad (3.102.)$$

$$M_2 = \{\phi_2\}^T [M] \{\phi_2\} = 0.319 \quad (3.103.)$$

$$M_3 = \{\phi_3\}^T [M] \{\phi_3\} = 0.641 \quad (3.104.)$$

Sarsma tablası, Hız Kontrol Sürücüsünün sayısal göstergesi disk hızını (Devir/Dakika)/2 cinsinden vermektedir. Bu nedenle Teorik olarak hesaplanan Doğal Periyotlar önce Açısal Hızlara daha sonra da Sarsma Tablası Gösterge Hızlarına dönüştürülmüştür.

Çizelge.3.49. Doğal periyotlara ait açısal hız değerleri.

3 Katlı Çerçeve	AÇISAL HIZLAR (Devir/dk)		
	M1	M2	M3
T1	49.67	39.66	21.76
T2	148.71	123.42	83.44
T3	220.93	187.91	141.26

Çizelge.3.50. Sarsma tablası eşdeğer gösterge değerleri.

3 Katlı Çerçeve	TEORİK GÖST.HIZLARI (Dv/30s)		
	M1	M2	M3
G1	24.83	19.83	10.88
G2	74.36	61.71	41.72
G3	110.46	93.95	70.63

Teorik Gösterge Hızları, 1, 2 ve 3ncü mod şekillerinin oluşması için sarma tablasının sahip olması gereken Frekansları göstermektedir. Hesaplanan Teorik Frekanslar ile Kütle setlerinin deneysel doğal frekanslarını karşılaştırmak için deneysel olarak sarsma tablasında “Teorik Gösterge Hızları” uygulanarak modelin davranışı “Görüntü analizi” yöntemi ile analiz edilmiştir.

3.2.3.1. Zorlanmış Titreşim Düzenegi (Sarsma Tablası)

Zorlanmış Titreşimin deneysel koşullarda oluşturulması ve yapı modelleri üzerinde incelenmesi için bir sarsma tablaları kullanılır. Yapı olarak sarsma tablaları deprem deneysel modellerde deprem etkisi yaratması için tasarlanan elektromekanik makinelerdir. Deneysel modelin sabitlenerek yerleştirilebileceği hareketli bir platform ve bu platforma deprem etkisi verecek bir tahrik mekanizmasından oluşur. Tahrik mekanizması genellikle hidrolik veya elektrikli bir motor yardımıyla platformun istenen dinamik özelliklerde sarsılmasını sağlar.

Hidrolik mekanizmalar daha güçlü fakat kontrol edilmesi daha zor olduğundan, büyük ölçekli yapısal modeller için kullanılmaktadır. Elektrikli tahrik sistemleri daha küçük ölçekli modeller için uygun olup, düşük maliyet ve daha kolay güç kontrolü sağlaması sebebiyle tercih edilmektedir.

Bu çalışmada elektrik motorlu tahrik sistemine sahip bir sarsma tablası tasarlanarak, deneysel çalışmada kullanılmıştır.

Sarsma tablası;

- Metal masa,
- Elektrik motoru,
- Redüktör
- Eksantrik disk ve disk kolu,
- Kayar tabla
- Yapı modelleri,
- Hız kontrol ünitesi ve tesisatından oluşmaktadır.

Metal masa düzeneğin taşıyıcı iskeletini oluşturur. Dikdörtgen profilli metal çubuklardan oluşan bir sehpa şeklindedir. Üzerinde Hız Kontrol ünitesi, Eksantrik disk, ve ona bir metal kol ile bağlı tek doğrultuda hareket edebilen Kayar tabla vardır. Alt kısımda güç sağlayan elektrik motoru, ucuna bağlı bir redüktör ve sistemin elektrik enerjisini kontrol eden anahtar bulunmaktadır.

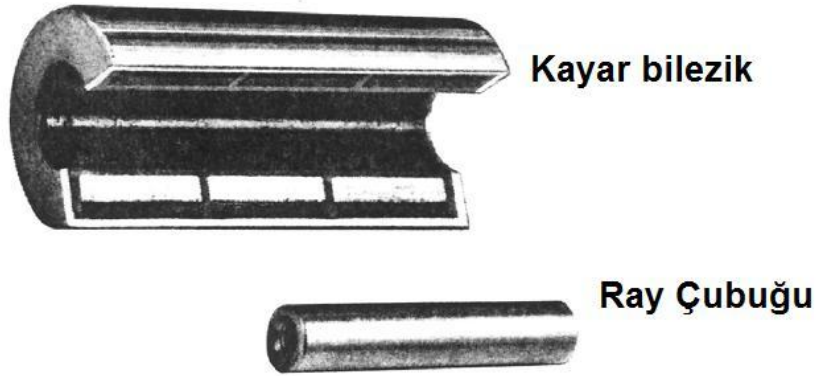
Elektrik motoru, Trifaze elektrik ile çalışan 0.18 kW gücünde elektrik motoru kullanılmıştır. Normal şehir elektriği altında hızı 900 devir/dak. civarındadır. Motor Hız Kontrol Cihazından gelen Trifaze elektriğin faz frekansına uygun hızda dönmektedir.

Laboratuar şartlarında kullanılmak üzere imal edilen diğer tip sarsma tablalarında hareket bilgisayara bir kart aracılığıyla bağlanan bir servo sürücü tarafından sağlanır. Motor kontrolü, bilgisayar aracılığıyla idare edilen bir servo sürücü tarafından sağlanmaktadır. Servo sürücü ve bilgisayar bağlantısını bir kontrol kartı sağlamaktadır ve 5 veya 10 milisaniye aralıklı komutlar bu sürücü tarafından iletilebilmektedir. Kontrol kartı bilgisayardan aldığı ivme veya hız verisini okuyarak, servo sürücüye iletmekte ve deplasman okuma cihazından gelen deplasman verisini kaydetmektedir. Bu tip sarsma tablaları istenen ivme zaman grafiğini modele uygulayabildiği için daha yetenekli olmakla birlikte, maliyetleri daha yüksektir.

Kayar tabla'nın üzerinde çok amaçlı kullanıma uygun 5cm aralıklarla açılmış montaj delikleri bulunmaktadır. Kayar tabla paralel 2 metal çubuk üzerinde 4 adet kayar bilezik yardımıyla tek doğrultuda kayabilmektedir.



Şekil. 3.45. Sarsma Tablası



Şekil: 3.46. Kayar Tabla Ray Detayı

Redüktör, motorun hızını azaltmak için kullanılır. Kutudan 2 adet mil ucu çıkmaktadır. Bunların bir tanesi motora bağlanmakta, diğeri gücün aktarılması istenen yere bağlanmaktadır. Motora bağlı milin dönüşü istenen oranlarda azaltılarak veya

artırılarak ikinci mile aktarılmaktadır. Bu işlem metal bir kutu içindeki çeşitli büyüklük ve geometride dişliler ve kanallı silindirler yardımıyla yapılır. Sürtünmenin aşındırıcı etkisini azaltmak için yağlamaya ihtiyaç duyduğundan kutunun yağlama kapağı bulunur. İhtiyaç duyuldukça bu yağlama kapağından yağlanması gerekir. Tasarımını ve imalatı yapılan deneysel düzenekte motorun dönüş hızını 1/50 oranında azaltan bir redüktör kullanılmıştır.



Şekil.3.47. Sarsma Tablası motoru ve redüktör.

Eksantrik disk, elektrik motorunun redüktör içinden geçen 1/50 oranında yavaşlatılmış dönme hareketi sehpanın üzerindeki diski çevirmektedir. Diskin üzerine yerleştirilmiş Ayar dişlisine bağlı aktarma kolu ile kayar tablanın tek yönde hareketi sağlanmaktadır. Kayar tabla bağlı olduğu raylar üzerinde tek yönde ileri geri hareket etmektedir.

Ayar dişlisi diskin dönüşü sırasında aktarma kolunun diske bağlı ucunun izlediği dairesel yolun yarıçapını belirlemektedir. Kolun diske bağlı ucu dairesel yol izlerken tablaya bağlı olan ucu tablayı bu dairesel yolun çapı kadar bir genlikte ileri ve geri hareket ettirmektedir.



Şekil. 3.48. Sarsma tablası eksantrik disk mekanizması.

Hız Kontrol Cihazı, “Monofaze” olarak aldığı elektriği “Trifaze” akıma çevirerek mikro-işlemcisi ile elektrik motorunun hızını kontrol edebilmekte ve bu hızı ekranda sayısal olarak göstermektedir.

Yeşil tuş ile sıfırdan ayarlanmış dönüş hızına motorun gücüne bağlı bir açışal ivme ile yükselebilmektedir.

Kırmızı tuş ile motora gönderilen faz frekansları motor durana kadar azaltılarak motorun durması sağlanır.

Beyaz ayar düğmesi ile sistem harekette iken motorun hızı artırılabilir veya azaltılabilir. Ayrıca motor duruyorken istenen hız düzeyi ayarlanarak yeşil tuşa basılarak doğrudan istenen hıza ulaşması sağlanır.

Her durumda motorun dönüş hızı anlık olarak göstergeden sayısal olarak okunabilir.



Şekil.3.49. Hız kontrol cihazı (Trifaze sürücü)

Sarsma tablasında yapı modelinin elastik davranış sergileyen kolonları için demir testeresi kullanılmıştır. Kolonların mekanik özellikleri önceki bölümde anlatılan serbest titreşim düzeneğinde ölçülmüştür.

Kolonlar kulaklı vidalar ile sarsma tablası üzerine vidalanmış olan alüminyum çerçeveye sabitlenerek alt uçlarının tabla ile birlikte hareket etmesi sağlanmıştır.

Bu şekilde istenen şekilde değişiklik yapılarak modelin kolon sayısı, kolon özellikleri ve kat sayısı değiştirilebilmektedir. Tabana yerleştirilen Alüminyum çerçeve kolonların temeli temsil eden kata bağlantısını sağlamaktadır.



Şekil.3.50. Sarsma tablası çerçeve montaj detayları.



Şekil.3.51. Model yapı elastik taşıyıcı kolonları

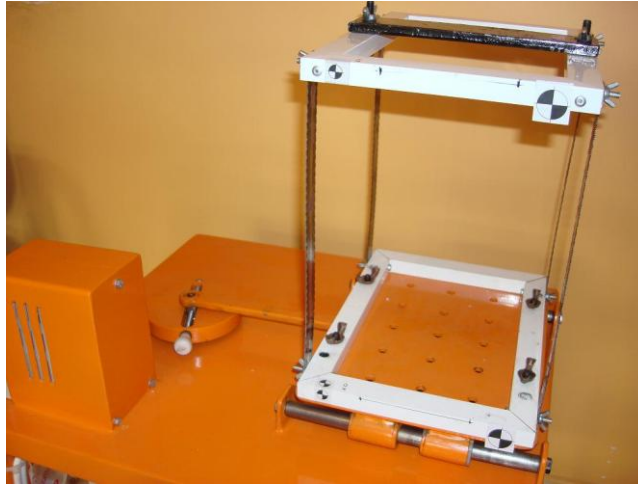
3.2.3.2. Tek Serbestlik Dereceli Titreşim

Tek serbestlik dereceli sistem olarak alüminyum çerçeveye uçlarından ankastre olarak bağlanmış elastik çubuklar diğer uçlarından sarsma tablasına ankastre olarak bağlanmıştır. Düzeneğin elastik katsayısı yatay halde yaptığı deplasmanla tespit edilerek sistemin dinamik davranışı modellenmiştir.

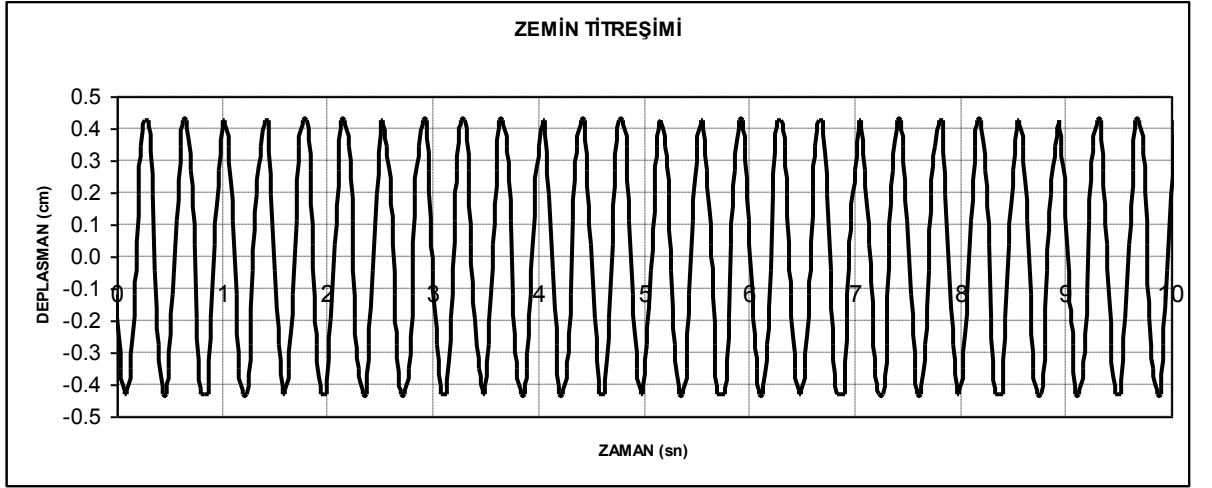
Zorlanmış titreşim düzeneğinde K1 katı 1.386-kgf ağırlıklıkla 150 dev/dak hızda ve 0.8482-cm genlikte sarsılmıştır..



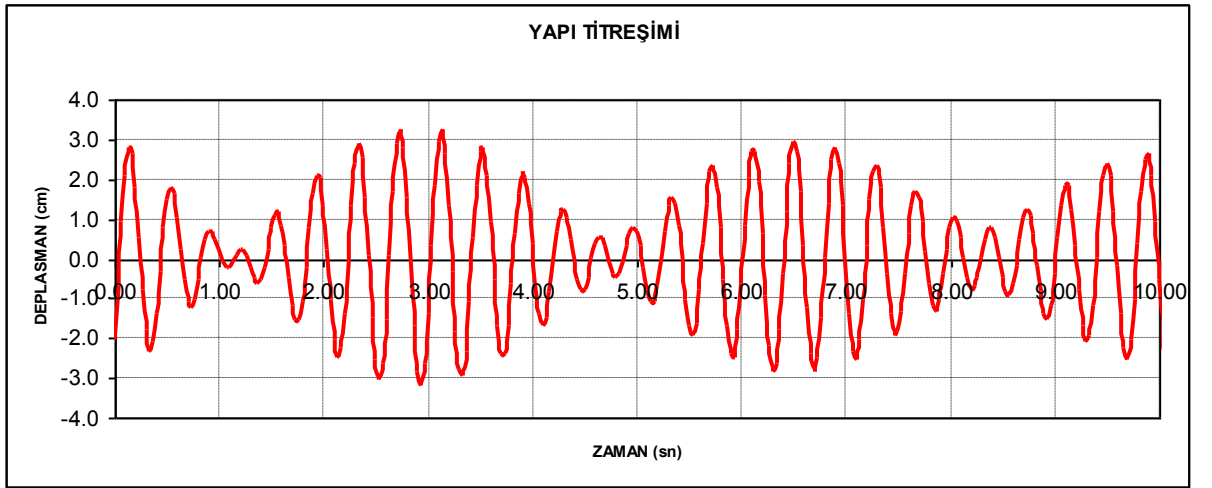
Şekil3.52. Çerçeve ek ağırlıkların montajı.



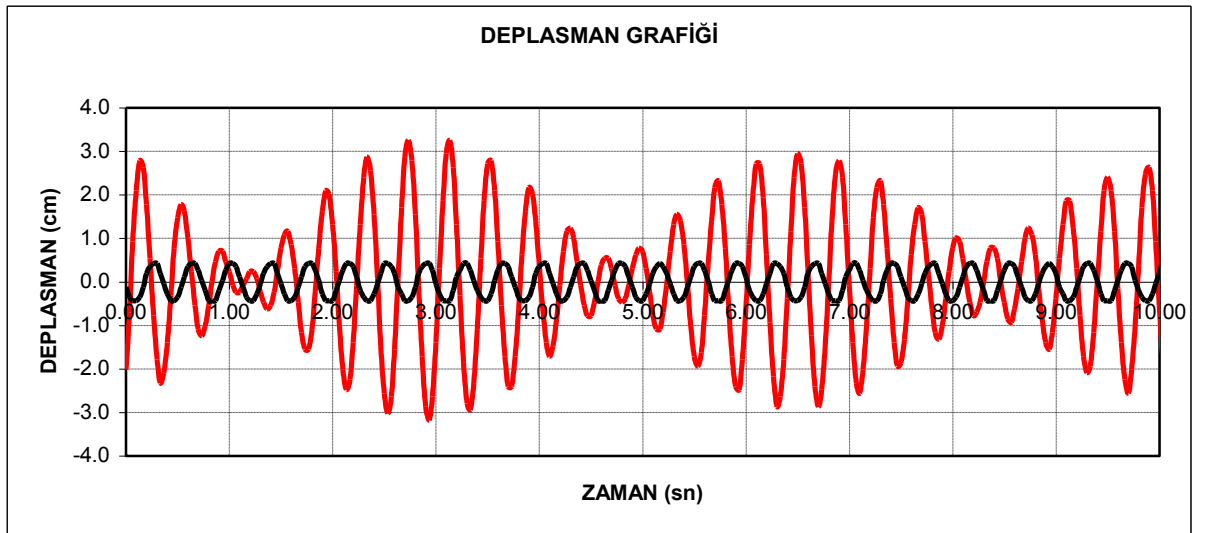
Şekil3.53. Tek serbestlik dereceli çerçeve Zorlanmış Titreşim modeli.



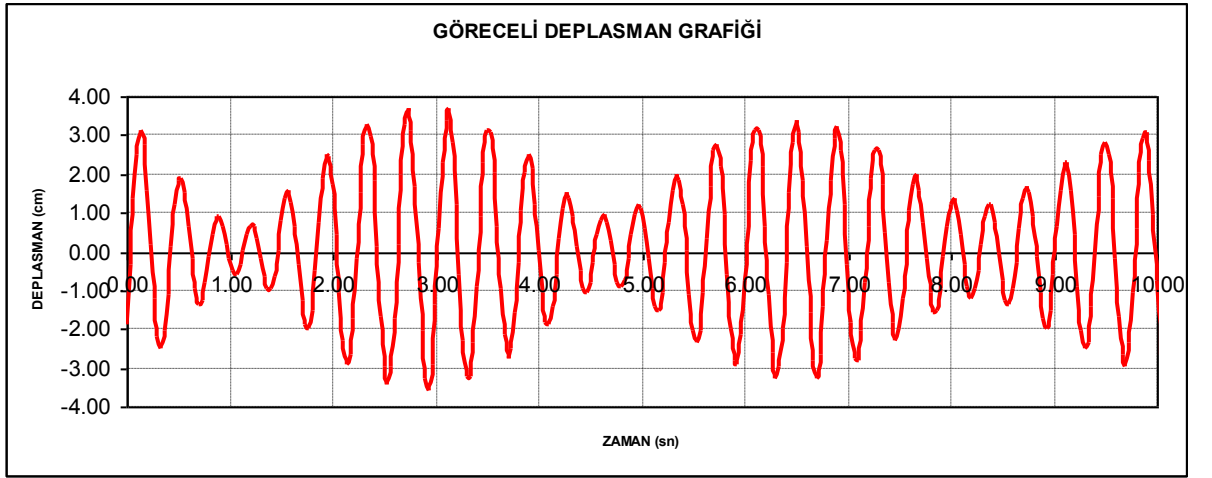
Şekil 3.54. Zorlanmış Titreşim Tabla Titreşim Grafiği.



Şekil 3.55. Zorlanmış Titreşim Çerçeve Titreşim Grafiği.



Şekil 3.56. Zorlanmış titreşim Tabla-Çerçeve yerel Titreşim Grafiği.



Şekil 3.57. Zorlanmış titreşim Tabla-Çerçeve göreceli deplasman Grafiği

3.2.3.3. Çok Serbestlik Dereceli Titreşim

Çok serbestlik dereceli sistem, tek serbestlik dereceli sistemin üst üste montajıyla oluşturulmuştur. Sistemin kütlelerinin değiştirilmesi için her çerçeveye ağırlık montajı mümkün olmaktadır.

Sarsma tablasında model hesaplanan mod frekanslarının uygulandığı modellerin video kayıtlarının görüntüleri mod şekillerinin teorik anlamda oluştuğunu göstermektedir.



Şekil.3.58. M2 ağırlık seti 2.Mod. şekli.



Şekil.3.59. M1 ağırlık seti 1. Mod şekli.



Şekil.3.60. M3 Ağırlık seti 2. Mod Şekli.



Şekil.3.61.M2 ağırlık seti 1. Mod şekli

3.2.3.4. Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

Çok serbestlik dereceli sistem modeli olarak 3 katlı çerçeveden oluşan model sarma tablasında, Modal analiz sonucunda elde edilen frekanslarda test edilmiştir. Testler sırasında modelin ilgili mod şekline uygun deplasmanlar yaptığı görülmüştür.

Sarma Tablasının uygulanabilir frekans aralığı 0.1-99.9 olduğundan M1 ağırlık setinin 3 modu test edilememiştir.

Çizelge.3.50. Sarsma tablası uygulanabilen gösterge değerleri

3 Katlı Çerçeve	UYGULAMA GÖST.HIZL. (Dv/30s)		
	M1	M2	M3
Mod 1	23.8	18.2	10.8
Mod 2	73.7	61.6	41.8
Mod 3	-	92.7	70.6

Testi yapılabilen modellerde teorik hesaplamaya oldukça yakın frekanslar tespit edilmiştir.

Çizelge.3.51. Teorik ve Uygulama açısız hız fark oranları

3 Katlı Çerçeve	TEORİK VE UYGULAMA KARŞ.		
	M1	M2	M3
Mod 1	-4.16%	-8.23%	-0.76%
Mod 2	-0.88%	-0.18%	0.19%
Mod 3	-	-1.34%	-0.04%

3.2.3.5. Hata Faktörleri ve Oranları

Teorik olarak kullanılmakta olan kuvvet deplasman formülleri, elastik olarak uygulanacak kuvvetin karşısında doğrusal bir kuvvet deplasman ilişkisi gerektirir. Ancak elastik sınırlar içinde bile olsa, kuvvet etkisiyle oluşacak defromasyonlar arttıkça moment dağılımı ve değerleri de değişeceğinden deforme şekil üzerindeki moment dağılımının hesaplanması gerekir. Yeni moment dağılımları ve sonucundaki deformasyonların hesaplanmasında iteratif hesaplamalarla sistemin denge halindeki en son deformasyon değerleri hesaplanmalıdır. Bu amaçla “Deflection” isimli bir hesap tablosu hazırlanarak 2 çeşit mesnetlenme şekline göre doğrusal kuvvet-deplasman hesaplamalarındaki hata oranları incelenmiştir.

“Deflection” hesap tablosunda uzunluğu (L), rijitliği (EI) ve uygulanan yükün (F) sayısal olarak girildiği iki çeşit mesnetlenme şeklinin incelendiği bölümler vardır.

3.2.4. Görüntü Analizi

Görüntü analizi, fotoğraf makinası, kamera gibi aygıtlardan elde edilen görüntülerin bilgisayara aktarılarak derlenmesi ve analizi olarak tarif edilebilir. Görüntü yakalama ve analizini gerçekleştirmek için kullanılan yazılım ve donanım üniteleri de görüntü işleme sistemi olarak adlandırılabilir. Görüntüdeki nesneye ait çeşitli fiziksel özellikler ile hareket özellikleri bilgisayar ortamında sayısallaştırılarak analiz edilebilir. Bilgisayar ve elektronik alanındaki hızlı gelişmeler sonucunda görüntü işleme teknolojisinin yaygın kullanımını mümkün kılan yazılım ve donanımların gelişmesiyle bu sistemler birçok alanda kullanım olanağı bulmuştur. Bilimsel, endüstriyel ve askeri alanlar bunlardan birkaçıdır. Görüntü kalitesi yapılacak analiz için önem taşımakla birlikte, kullanılan yazılım ve donanımın uyumluluğu ve kapasitesine bağlıdır.

- Sistemde görüntüyü elektronik ortama aktaracak kamera.
- Görüntüyü anlık olarak kaydeden görüntü yakalama donanımı,
- Yakalanan görüntünün sayısal değerlerini analiz edecek bilgisayar.
- Bu analizi yapacak yazılım, sistemin ana unsurlarıdır.

Analiz sırasında kameraların pozisyonları ve izlemesi yapılan sistemin özelliklerine göre görüntülerde bazı düzeltmeler yapılması gerekebilir. Bunlar donanımın kapasitesinden kaynaklanabileceği gibi, açısal görüntü özelliklerinden de kaynaklanabilir. Bu nedenle görüntülerde, ölçekleme, 3 ana renk bileşeninin veya karşıtlık ve parlaklık gibi görüntü kayıt bileşenlerinin değiştirilmesiyle görüntünün analize daha elverişli duruma getirilmesine çalışılır.

3.2.4.1. Görüntü Kayıt Sistemi

Görüntü yanyana ve alt alta dizilen renkli noktalardan oluşur. Piksel olarak adlandırılan bu noktalar genellikle kare şeklindedirler. Dolayısıyla bir görüntü piksellerin oluşturduğu satır ve sütunlardan meydana gelen bir matris olarak düşünülebilir. Bu matris içerisinde herhangi bir pikselin iki temel özelliği söz konusudur. Bunlardan ilki pikselin görüntü matrisinde sahip olduğu matris koordinatı ve diğeri de aldığı gri renk seviyesi (ışık hassasiyeti) değeridir. Bu özellikleriyle görüntü aslında matematiksel olarak iki boyutlu bir $f(x,y)$ fonksiyonunu tanımlamaktadır. Buradaki x ve y değişkeni bir renk numarası ile temsil edilen pikselin koordinatıdır ve tam sayı değerini alırlar. $f(x,y)$ fonksiyonunun değeri ise (x,y) noktasındaki pikselin

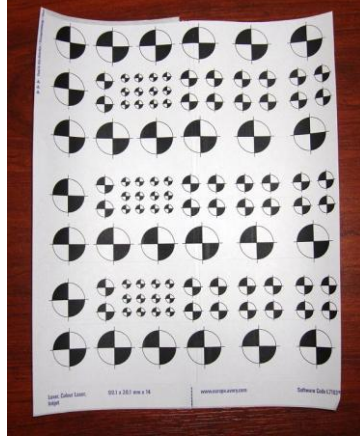
ışıklılık değerini başka bir ifade ile bir renk numarası ile temsil edilen gri renk seviyesini göstermektedir. Ekranın sol üst köşesindeki piksel, koordinat sisteminin varsayılan başlangıç noktasıdır. Bu pikselin koordinatları (0,0)'dır. Ekranın yatay yönü x, düşey yönü ise y koordinatını gösterir. x koordinatı sağa doğru, y koordinatı ise aşağı doğru gidildikçe artmaktadır



şekil 3.62. Kayıt Kamerası.

3.2.4.2. Görüntü Kayıtlarının Analizi

Görüntü işleme işlemi, sayısal hale getirilmiş görüntünün veya bir video kaydını oluşturan görüntülerin istenilen şekilde gerçeğe yakın değerler elde edilmesini sağlayacak şekilde çeşitli özelliklerinin değiştirilmesidir. Sayısal görüntüler elde edildikten sonra, bilgisayar ortamında bunları arka planda bulunan bozukluklar veya aydınlatma sistemi tarafından oluşan istenmeyen yansılardan kurtulmak için çeşitli filtrelemeler yapılabilir veya görüntü kalitesini artırmak, görüntü alma sistemi tarafından oluşan geometrik değişmeleri, bozulmaları düzeltmek için görüntü değişikliği uygulanabilir. Bu tür işlemlere genel olarak sayısal görüntü işleme adı verilmektedir. Görüntü işleme uygulamaları çok çeşitlidir: Görüntü iyileştirme, görüntü süzgeçleme ve onarma, görüntü sıkıştırma görüntüdeki cisimlerin algılanması, görüntüdeki cisimlerin özelliklerinin çıkarılması, görüntüdeki cisimlerin sınırlarının belirlenmesi gibi daha birçok görüntü işleme uygulaması yaygın olarak uygulanmaktadır



Şekil 3.63. Tespit işaretleri

Görüntüde iyileştirme görüntünün görsel yorumlamasını artırmak için yapılır. Örneğin, görüntüdeki bulanıklığın giderilmesi veya keskinleştirilmesi, kenarların belirginleştirilmesi, görüntüdeki zıtlığın veya parlaklığın artırılması veya gürültünün kaldırılması gibi uygulamalardır. Bu gruptaki teknikler nokta işlemleri olarak da bilinir. Her piksel değeri bazı matematiksel işlemlerin uygulanmasıyla bir önceki piksel'in değerine bağlı olan yeni bir piksel ile yer değiştirir. En önemli nokta, işlemleri eşikleme, bölümlenme, kontrast germe veya iyileştirme ve histogram eşitleme olarak sıralanabilir.

Histogram, görüntüdeki aydınlık değerlerinin grafik gösterimidir. Grafikte yansıma değerleri (0–255) x ekseninde ve bu değerlerin görüntüde tekrar etme sıklığı ise y ekseninde gösterilmektedir. Bir görüntünün, belirli dağılıma sahip yansıma değerleri üzerinde işlemler yapılarak görüntüde istenilen özellikler belirgin hale getirilebilir.

Eşikleme tekniği ile değişik gri ton seviyelerine sahip bir resim ikili sayı haline yani; 0 siyah, 1 beyaz rengi göstermek üzere resim 0 ve 1'lerden oluşan bir matris haline getirilir. Eşikleme yaparken bir eşik değeri belirlenir ve bu değer üstündeki değerler için çıkış görüntüsündeki ilgili piksele 1, altındaki değerler içinde 0 değeri atanır.

Kontrast ayarlama ile görüntünün genel parlaklık ve kontrast ayarlarının yanında kırmızı, mavi ve yeşil renklere ait kontrast ayarlamaları da yapılabilir. Görüntüde farklı renklere ait parlaklık, kontrast ayarlamalarıyla bir pikseldeki renk değerleri değiştirilerek görüntü ve renkler belirginleştirilebilir, aynı zamanda renk sınırları keskinleştirilebilir.

Bölümleme işleminde bir görüntüdeki istenilen renkler (veya gri seviyeler) görsel olarak belirlenebilir ve daha sonra bu renkler gerekirse netleştirilebilir veya tüm görüntüden ayrıklaştırılabilir. Bölümleme ile görüntüdeki farklı parçalar veya nesnelere birbirlerinden ayrılabilir ve bunlar arka plandaki gürültülerden temizlenebilir. Bölümleme algoritmaları, bir görüntüdeki parçaların veya nesnelere gruplandırılması, sınıflandırılması için kullanılır. Bölümleme aslında bir görüntüdeki çizgileri, daireleri veya arabalar, binalar, yollar gibi belirli şekillerin ele alınıp incelenmesi için yapılan bir gruplandırma işlemidir.

Görüntü sıkıştırma ise sayısal bir görüntüyü saklamak için ihtiyaç duyulan bellek miktarını azaltmak amacıyla yapılan görüntü işleme teknikleridir. Görüntüyü sıkıştırma ihtiyacı, bazı algılayıcılardan veri elde ederken yüksek hacimli verilerin, sınırlı iletim hızlarıyla gönderilmesi zorunluluğundan dolayı ortaya çıkmıştır. Veriler sıkıştırılırken uygulama amacı dışında kalan verilerin atılması da mümkündür. Ancak görüntüde önemli bilgi kayıplarına yol açmamak gerekir.

Görüntünün tamiri için geliştirilen algoritmalar ile bilinen bir nedenden dolayı zarar görmüş olan görüntüde, düzeltme işlemlerinin yapılabilmesi amaçlanır. Bunlara örnek olarak hareketten dolayı oluşan bulanıklığın giderilmesi, optik (mercek) bozulmalarının kaldırılması verilebilir.

Bu görüntü işlemlerinden filtreler oldukça önemlidir. Görüntülerin analiz edilmeden önce bazı filtrelerden geçirilmesi gereklidir. Filtreler görüntü zenginleştirme amacı ile de uygulanan, adından da anlaşılacağı gibi görüntüde belirli ayrıntıların ayıklanması veya daha belirgin hale getirilmesi gibi işlemleri gerçekleştiren algoritmalarlardır. Özellikle, resimleri sayısal olarak kaydeden cihazların görüntüyü hatalı bir şekilde elde etmeleri ve aydınlatma gibi çevre koşullarının yetersizliğinden kaynaklanan birçok kayıp ya da sorun görüntü işleme filtreleri kullanılarak en aza indirilebilmektedir. Farklı amaçlar için farklı filtreleme algoritmaları vardır. Bunlara kenar keskinleştirme, kenar yakalama, görüntü yumuşatma ve bunun gibi daha birçok amaçla kullanılan filtreler örnek verilebilir.

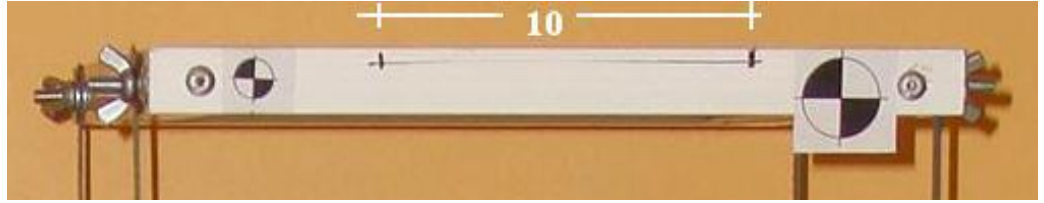
Filtreleme teknikleri frekans ya da uzaysal ortamda gerçekleştirilir. Uzaysal ortam görüntüdeki pikseller topluluğunu ifade eder ve uzaysal ortam metotları ise doğrudan bu pikseller üzerinde yapılan işlemleri belirtmektedir. Görüntü işleme için frekans ortamında yapılan filtreleme Fourier Dönüşümü kullanılarak yapılmaktadır.

Alçak geçirgen bir filtre büyük, benzer tonda homojen alanları belirginleştirmek ve çok küçük detayları azaltarak sadeleştirmek üzere kullanılır. Yüksek geçirgen filtreler ise küçük detayları keskinleştirmek ve mümkün olduğu kadar çok detayı ortaya çıkarmak için kullanılır. Doğrusal filtreler veya kenar sağlama filtreleri, yolları ve alan sınırları gibi çizgisel yapıları vurgulamak için kullanılmaktadırlar.

Sonuç olarak, görüntüyü oluşturan pikseller konumları ve gri değerleri ile tanımlanabilmektedir. Bu görüntü $m \times n$ boyutunda bir matris formuna sahiptir. Aslında birer matematiksel işlem olan filtreler ve diğer görüntü işleme algoritmaları görüntü matrisi üzerinde amaca yönelik olarak işleme sokulur. Bu işlem sonucunda yeni görüntü matrisi değerleri dolayısıyla istenilen yeni görüntü elde edilir.

3.2.4.3. Kalibrasyon

Mercekler veya algılama yüzeyinin düzlemsel olmayan iç veya dışbükeyliği mesafe ölçümlerinde bazı noktalara özel düzeltmeleri gerekli kılmaktadır. Görüntüleri metrik olarak kullanılabilir hale getirmek için, söz konusu hataların belirlenmesi, modellenmesi ve düzeltilmesi gerekmektedir. Bu işlem kalibrasyon olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.64. Kalibrasyon işaretleri.

3.2.4.4. Boyut Etkisi

Model boyutunun gerçek yapı boyutundan küçük olması nedeniyle dayanımın değişmesine boyut etkisi adı verilir. Boyut etkisi kullanılan malzemenin fiziksel özellikleri ile ilişkidir. Çalışmanın amacı da boyut etkisinin araştırılmasını önemli kılmaktadır. Donatı miktarı az olan bir betonarme kiriş çalışmasında basınç dayanımındaki değişim akma dayanımı kadar önemli değildir. Ayrıca yoğun donatılı bir kiriş veya döşemede kayma dayanımının araştırılmasında basınç dayanımındaki değişim büyük önem taşımaktadır.

Boyut etkisi daha çok beton gibi homojen olmayan sahip malzemelerde gözlemlenmektedir. Bunun yanında çelik gibi sünek yapıya sahip malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak metallerin homojen yapısından dolayı boyut etkisi çok fazla görülmediği için bu çalışmalara az rastlanmaktadır. Harris ve Sabnis (1999) tarafından bildirildiğine göre, Morrison (1940), çalışmasında mukavemetin boyutlarından nasıl etkilendiğini araştırmak için küçük boyutlu çelik kirişler kullanmıştır. Çalışma sonucunda, boyutlar küçüldükçe akma gerilmesi sınırının yükseldiği görülmüştür. Davidenkov ve arkadaşları (1947: Harris ve Sabnis 1999'dan) çalışmasında, mukavemetin model boyutundaki azalma karşısında arttığını bildirmişlerdir. Sidebottom ve Clark (1954: Harris ve Sabnis 1999'dan), kare kesitli çelik kirişleri kullandıkları çalışmada, teorik plastik momentleri ve deneysel momentleri karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, deney numunelerinin yüksekliğindeki azalmanın, yük taşıma kapasitesinde kesin bir artışa sebep olduğunu bildirmişlerdir. Ancak bu çalışmada kullanılan modelin elastik değerleri yine aynı modelin kuvvet deplasman ölçümlerinden elde edildiğinden, boyut etkisinin modelin davranışını Geometrik hesaplama dışında etkilemeyeceği düşünülmektedir.

3.2.4.5. Hata Faktörleri ve Oranları

Düşük çözünürlüğe sahip görüntüler, ölçüm hassasiyetini arttırabilmek için bilgisayar ortamında yeniden boyutlandırılarak çözünürlükleri arttırılmaktadır. Bu işlem yapılırken boyutlandırma sonucu elde edilen yeni görüntüler eski piksel değerlerinin enterpolasyonu sonucu bulunmaktadır. Çözünürlük arttırıldığında, görüntülerin büyütülmesi ile nesnelerin tanımlanmasında görüntüde daha az bozulma olmakta ve detaylar kaybolmamaktadır. Ayrıca renk değişimlerinin olduğu sınırlarda enterpolasyondan dolayı keskin bir geçiş olmamakta, renk sınırlarının tam olarak belirgin olmadığı yumuşak geçiş görülmekte ve bir miktar bulanıklaşma meydana gelmektedir. Ardından çekilmiş olan diğer görüntüler düzeltilip renk sınırları belirginleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Elastik davranışı belirlemek için yapılan doğrusal esneme ölçümlerinden elde edilen katsayılar, dinamik analiz yüklemelerindeki davranış hesaplamalarında kullanılarak, tahmin edilen sonuçlarda oluşan sapmalar hesaplanmıştır.

Hesap yönteminde model rijitliğinin modeli yatay pozisyona getirip ölçüldüğü için, büyük modellerde uygulanmasını mümkün hale getirebilmek için;

- Yapıya yatay yükleme imkanı sağlayacak düzenekler,
- Daha hassas deplasmanları ölçebilecek ölçüm aletleri kullanılabilir.

Yapılan hesaplamalarda çok serbestlik dereceli sistemlerde düşey kat çerçeve yüklerinin alt çerçevelerdeki elastik özelliklere olan etkisi değerlendirilebilmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada; elastik davranış gösteren yapısal elemanların, sembolize edilerek çeşitli özelliklerdeki çelik çubuklar ve ağırlıklar ile oluşturulan çerçeve modellerin serbest titreşim, harmonik zorlanmış titreşim sırasındaki deplasman, ivme ve hız özelliklerinin gerçeğe yakın olarak ölçümlenmesi ve teorik karşılaştırması yapılmıştır. Kullanılan malzemenin elastik özellikleri deneysel ve teorik olarak hesaplanarak karşılaştırılmış oluşan sapmaların sebepleri incelenmiştir. Böylece laboratuvar araştırmalarında kullanılacak bir düzenekle yapı dinamiği gibi önemli bir konuda deney imkânı sağlamıştır. Oldukça değerli veriler sağlayan deneysel laboratuvar şartlarının iyileşmesine katkı sağlamış ve sayısal doğrulama için deneysel veriler elde edilmiştir.

Ayrıca, bu çalışma ile;

- Mustafa Kemal Üniversitesine bir sarsma tablası kazandırılmış,
- Deneysel yapı modelleri oluşturulmuş,
- Modellere dinamik yükler uygulanmış,
- Görüntü analizi ile dinamik yükler altındaki davranışları incelenmiş,
- Elde edilen veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırılmış,
- Sayısal hesap tablolarıyla teorik ve deneysel sonuçlar geliştirilmiştir.

Deneysel malzemeler, düzenekler ve sarsma tablası düşük maliyetlerle, piyasada kolaylıkla bulunabilen malzemelerden oluşturulmuştur. Bu mantıkla daha çeşitlendirilmiş veya daha büyük ölçekli düzeneklerin kurulmasına yönelik yeni bir bakış açısı oluşmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alejandro E. Albanesi, Victor D. Fachinotti and Alberto C. 2003. **Inverse Analysis of Large-Displacement Beams** Centro Internacional de M'etodos Computacionales en Ingenier'ia (CIMEC) INTEC - Universidad Nacional del Litoral Guemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina
- Baran, T. 2008. **Yapıların Dinamik Davranışının Deneysel ve Teorik İncelenmesi**, Doktora Tezi Çukurova Üniversitesi, Adana-Türkiye.
- Bjarne Skovmose K. ve Morten Hartvig H., 2008. **Effects of Large Bending Deflections on Blade Flutter Limits**. National Laboratory for Sustainable Energy Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark.
- Chase, J.G., Hudson, N.H., Lin, J., Elliot, R. ve SIM, A., 2005. **Nonlinear Shake Table Identification and Control for Near-Field Earthquake Testing**. Journal of Earthquake Engineering.
- Chopra, Anıl K., 1995. **Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering** Prentice Hall, 19-149 s, NJ-USA.
- Clough R. ve Penzien J. 1989. **Dynamics of Structures**, Mc Graw-Hill, Singapore.
- Conte, J. P. ve Trombetti, T. L., 2000. Linear Dynamic Modeling of a Uni-Axial Servo-Hydraulic Shaking Table System. Earthquake Engng Struct. Dyn. Den Hartog, J.P., 1985. Mechanical Vibrations McGraw-Hill , 30-53s, NY-USA.
- Demirağ O., 2002. **Zemin Rijitliğinin Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerin Serbest Titreşimine Etkisi**. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca/İzmir
- Eren İ., 2008. Determining large deflections in rectangular combined loaded cantilever beams made of non-linear Ludwick type material by means of different arc length assumptions. Yıldız Technical University, Mechanical Engineering Department, Besiktas, Istanbul, Turkey
- Feather, N. 1961. **Vibrations and Waves**, Edinburgh University Publications, Great Britain.
- Feynman R.,Leighton R.,Sands M., **Lectures on Physics**, Addison Wesley, USA.
- Filiatrault, A. ve Tremblay, R., 1998. **Design of Tension-Only Concentrically Braced Steel Frames for Seismic Induced Impact Loading**. Brighton University.

- Gates, Richard.S.ve Pratt, J.R., 2006. **Prototype cantilevers for SI-traceable nanonewton force calibration** Measurements Science and Technology makalesi, 1-9 s, MD-USA.
- Harris G.H. ve Sabnis S.S., 1999. **Structural Modeling And Experimental Techniques**, Crc Press USA.
- Jing Q., Tamal M. and Gary K. F., 2005 **Large-Deflection Beam Model for Schematic-Based Behavioral Simulation in NODAS**. Department of Electrical and Computer Engineering and *The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213-3890 USA.
- Kocaman, S. 2007. **Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi**, Doktora Tezi Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay-Türkiye.
- Moncarz P, Osteraas J, Curzon A., 1984. **Modeling of reinforced concrete containment structures, design of concrete structures, the use of model analysis**. Elsevier Applied Science Publishers, London, England.
- Taşkın Y. ve Yağız N. 2003. **Tek Serbestlik Dereceli Bir Titreşim Sisteminin Model Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi**. İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü. İstanbul Türkiye.
- Thorby D., 2008. **Structural Dynamics and Vibration in Practice**. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA.
- Tolou N. ve Herder J.L., 2001 **A semi-analytical approach to large deflections in compliant beams under point load**. Delft University of Technology, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Department of Biomechanical Engineering, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands.
- Topçu, A., 2008. **Yapı Serbest Titreşim Frekans, Periyot ve Modlarının hesabı**. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh.Anabilim Dalı. Eskişehir-Türkiye.
- Trombetti, T. ve Conte, J. P, 2002. **Shaking Table Dynamics: Results from a Test-Analysis Comparison Study**. Journal of Earthquake Engineering,
- Sollogoub M., 2005. **L'echange International: Fondements Theoriques Et Analyses Empiriques**. Economica, France.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda büyük bir özveriyle destek olan, bilimsel konularda yol gösteren ve değerli görüşleriyle katkı sağlayan danışman hocam Yard.Doç.Dr.Hakan TÜRKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımız sırasındaki yardımlarıyla bize destek olan Yard.Doç.Dr.Selahattin KOCAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında manevi olarak destek olan aileme teşekkürlerimi belirtirim.

ÖZGEÇMİŞ

1966 yılında Bursa'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Antakya'da tamamladım.

1983 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde okudum.

1984 yılında girdiğim Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1990 yılında İnşaat Mühendisi unvanıyla mezun oldum.

1990-1991 yılları arasında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik fakültesinde "Yapı" dalında Yüksek Lisans öğrenimime devam ederken aynı zamanda, "Parsons Brinckerhoff" şirketinde, Gerede-Ankara ve Ankara Çevre Otoyolu sanat yapıları ve Ankara Metrosu projelerinde "Yapı Mühendisi" olarak çalıştım.

1991 yılında Kara Kuvvetlerinde İstihkam Dairesi İnşaat Emlak Dairesinde başladığım askerlik görevimi 1992 yılında tamamladım.

1992 yılından bugüne kadar Hatay'da inşaat sektöründe faaliyet gösteren ortağı olduğum şirkette teknik müdür olarak çalışmaktayım.