

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KREN KİRİŞLERİNİN HAREKETLİ YÜK ALTINDAKİ DİNAMİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

SAMİ KURAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ C. OKTAY AZELOĞLU**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KREN KİRİŞLERİNİN HAREKETLİ YÜK ALTINDAKİ DİNAMİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Sami KURAL tarafından hazırlanan tez çalışması 03.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen, izotropik bir Euler-Bernoulli tipi kiriş için hareketli yük problemi matematiksel olarak ifade edilmiş ve çözülmüştür. Hareketli yük kirişe tekil bir kuvvet şeklinde etki ettirilmiştir. Böylece, kren kirişleri için yer değiştirmeleri, eğilme momentini, kesme kuvvetlerini veren matematik modeller elde edilmiştir.

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, hiçbir konuda yardım ve fedakarlığını esirgemeyen, hoşgörülü, anlayışlı ve güler yüzü ile çalışmamın her aşamasında bana ışık tutan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU'na tüm yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca, yaşantımın her anında yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler sunarım.

Mayıs, 2018

Sami KURAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	5
1.4 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisine Bir Bakış	6
1.4.1 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi İçin Yer Değiştirme Alanları.....	6
1.4.2 Bu Kiriş Teorisi İçin Yer Değiştirme, Şekil Değiştirme Ve Gerilmeler Arasındaki Bağlılıklar	7
BÖLÜM 2	
TRANSPORT TEKNİĞİ VE KALDIRMA SİSTEMLERİ.....	9
2.1 Mal/Malzeme ve Transport Sistemlerinin Sınıflandırılması	11
2.1.1 Kesikli Taşıyıcılar	12
2.2 Krenler.....	14
2.2.1 Köprülü Krenler.....	14
2.2.2 Tek ve Çift Kirişli Tavan Krenleri	14
2.2.3 Portal Krenler.....	15
2.2.4 Kollu Krenler	16
2.2.5 Kule Krenleri	17
2.3 FEM ve DIN Normlarına Göre Transport Sistemlerinin Hesabı.....	18

2.3.1	DIN'e göre Yükleme Halleri ve Mukavemet Değerleri	18
2.3.1.1	Yüklemenin H-Hali.....	19
2.3.1.2	Yüklemenin HZ-Hali.....	19
2.3.1.3	Yüklemenin HS-Hali.....	20
2.3.1.4	Genel Emniyet Gerilme Değerleri	20
2.3.2	FEM'e göre Yükleme Halleri ve Mukavemet Değerleri	21
2.3.2.1	I.Hal: Rüzgâr Kuvveti Olmayan Normal İşletmeler.....	21
2.3.2.2	II.Hal: Şiddetli Rüzgâr Kuvvetinin Bulunduğu Kabul Edilen İşletmeler.....	21
2.3.2.3	III.Hal: Çok Özel Etkiler Altında Çalışan İşletmeler	22
2.3.2.4	Krenin "H" Kaldırma Sınıfının Saptanması.....	22
2.3.2.5	Krenin "B" Yükleme Grubunun Saptanması	23
2.3.2.6	Yükleme ve İş Sayıları	24
2.3.2.7	Kollektif Gerilme	24
2.3.2.8	Krenin Yükleme Grubu Katsayısı " k_B " Saptanması	25
2.3.2.9	Kaldırma Yüğü Katsayısı " ψ " Saptanması	25
2.3.2.10	Öz Ağırlık Katsayısı " Φ " Saptanması.....	26
2.3.2.11	Rüzgâr Kuvveti.....	26
2.3.2.12	FEM Normlarına göre Emniyetli Gerilme Değerleri	27
2.3.2.13	FEM'e göre Bu Çalışmada Kullanılan Birim Kiriş İçin Mukavemet Hesabı	28
 BÖLÜM 3		
KRENLERDE HAREKETLİ YÜK PROBLEMİ		30
3.1	Kirişin Hareket Denklemi	31
3.1.1	Kirişin Doğal Frekans ve Mod Şekillerinin Çıkarılması	34
3.2	Problem Formülasyonu.....	38
3.2.1	Problem Çözüm Metodu	40
3.2.2	Sönümsüz Matematik Model	44
3.2.3	Sönümlü Matematik Model.....	45
 BÖLÜM 4		
KREN KİRİŞİNİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ.....		46
4.1	Kiriş Yer Değiştirmelerinin Dinamik Analizi.....	48
4.1.1	Kirişin Sönümsüz Yer Değiştirmelerinin Dinamik Analizi.....	48
4.1.2	Kirişin Sönümlü Yer Değiştirmelerinin Dinamik Analizi	57
4.2	Kirişteki Eğilme Momentinin Dinamik Analizi	66
4.2.1	Kirişin Sönümsüz Eğilme Momentinin Dinamik Analizi	66
4.2.2	Kirişin Sönümlü Eğilme Momentinin Dinamik Analizi	75
4.3	Kirişteki Kesme Kuvvetlerinin Dinamik Analizi.....	83
4.3.1	Kirişin Sönümsüz Kesme Kuvvetlerinin Dinamik Analizi.....	83
4.3.2	Kirişin Sönümlü Kesme Kuvvetlerinin Dinamik Analizi	92
4.4	Sonuçların Değerlendirilmesi	99
SONUÇ VE ÖNERİLER		101

KAYNAKLAR.....	102
EK-A	
ÇİZELGELER.....	105
A-1 Fourier Sinüs Sonlu İntegral Dönüşümleri.....	105
A-2 Laplace-Carson İntegral Dönüşümleri	106
ÖZGEÇMİŞ.....	107

SİMGE LİSTESİ

A	Kirişin kesit alanı
ρ	Kiriş malzeme yoğunluğu
g	Yer çekimi ivmesi
E	Kirişin Young Modülü
x	Kiriş koordinat eksen
z	Kiriş koordinat eksen
$H(x)$	Heaviside fonksiyonu
a, b, ξ	Sabit katsayılar
p	Laplace-Carson integral dönüşümünde kompleks sayı
$V(j, t)$	$w(x, t)$ fonksiyonun Fourier sinüs sonlu integral dönüşümü
$V^*(j, p)$	$V(j, t)$ fonksiyonun Laplace-Carson integral dönüşümü
t	Kiriş üzerindeki yükün hareket süresi
L	Kirişin uzunluğu
m	Hareketli yükün toplam ağırlığı
M	Kirişin ağırlığı
f_j	Doğal frekans
T_j	j 'inci mod serbest titreşim periyodu
I	Kirişin kesitinin atalet momenti
j	Titreşim mod sayısı
N	Newton
T	Zaman
m	Metre
s	Saniye
α	Hız parametresi
β	Sönüm parametresi
$\delta(x)$	Dirac delta fonksiyonu
μ	Kirişin birim uzunluk başına kütlesi
ω	Yük hareketini ifade eden dairesel frekans
ω_b	Sönüm dairesel frekansı
ω_j	j 'inci mod titreşimindeki doğal dairesel frekans
$\dot{\omega}_j$	Kirişin j 'inci mod sönümlü dairesel frekansı
v	Yükün hızı
v_0	Statik kuvvet ile yüklü kirişin orta açıklığındaki sehim

v_{kr}	Kritik hız
P	Yükün kuvveti
$w(x,t)$	x noktasında ve t zamanındaki kirişin düşey dinamik yer değıştirmesi
$M(x,t)$	Kirişin x noktasında ve t zamanındaki dinamik eğilme momenti
$T(x,t)$	Kirişin x noktasında ve t zamanındaki dinamik kesme kuvveti
m/M	Kütle oranı
n	Tam sayı
M_0	Statik eğilme momenti
T_0	Statik kesme kuvveti

KISALTMA LİSTESİ

DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
FEM	Avrupa Kaldırma Araçları İmalatçıları Birliği
MHI	Material Handling Institution

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1	Euler-Bernoulli kirişinin eğilme öncesi ve sonrasındaki durumu	6
Şekil 2. 1	Antik Yunan konstrüksiyon kren örneği.....	9
Şekil 2. 2	Leonardo da Vinci tarafından tasarlanan vinç	10
Şekil 2. 3	Kesikli çalışan transport makinalarının çalışma süreleri	12
Şekil 2. 4	Köprülü kren örneği	14
Şekil 2. 5	Tavan kren örneği	15
Şekil 2. 6	Portal kren örneği	16
Şekil 2. 7	Kollu kren örneği	17
Şekil 2. 8	Kule kren örneği	18
Şekil 3. 1	Tekil kuvvet şeklinde bir hareketli yüke maruz kren kirişi	31
Şekil 3. 2	Eğilme etkisindeki bir kiriş örneği	31
Şekil 3. 3	Basit mesnetli değişken yüklü kiriş	33
Şekil 3. 4	Kiriş bölümünün iç denge serbest cisim diyagramı	33
Şekil 4. 1	Kutu kiriş kesit profili	43
Şekil 4. 2	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	49
Şekil 4. 3	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	49
Şekil 4. 4	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	50
Şekil 4. 5	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	51
Şekil 4. 6	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	51
Şekil 4. 7	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	52
Şekil 4. 8	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	53
Şekil 4. 9	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme ...	541
Şekil 4. 10	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	54
Şekil 4. 11	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	55
Şekil 4. 12	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	56
Şekil 4. 13	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme	56
Şekil 4. 14	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	58
Şekil 4. 15	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	58
Şekil 4. 16	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	59
Şekil 4. 17	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	60
Şekil 4. 18	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	60
Şekil 4. 19	Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	61
Şekil 4. 20	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	62
Şekil 4. 21	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme	62

Şekil 4. 68	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti	96
Şekil 4. 69	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti	96
Şekil 4. 70	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti	97
Şekil 4. 71	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti	97
Şekil 4. 72	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti	98
Şekil 4. 73	Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti	98

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Gerilme emniyet değerleri 20
Çizelge 2. 2	Kren kaldırma sınıfları 23
Çizelge 2. 3	Kren elemanlarının ve krenin yükleme grubunun saptanması 24
Çizelge 2. 4	Kollektif gerilme için öneriler 25
Çizelge 2. 5	Yükleme grubuna göre k_B katsayıları 25
Çizelge 2. 6	Kaldırma yükü katsayısı 26
Çizelge 2. 7	Öz ağırlık katsayısı 26
Çizelge 2. 8	Rüzgârın işletmedeki hesapsal dinamik basıncı değerleri..... 27
Çizelge 2. 9	Yükleme halleri için emniyet katsayıları..... 28
Çizelge 2. 10	St37, St44 ve St52 için emniyetli mukavemet değerleri 28
Çizelge 4. 1	Bu uygulamada kullanılan kren kirişinin malzeme özellikleri 44
Çizelge 4. 2	Farklı hızlardaki hız parametreleri..... 44
Çizelge 4. 3	Kirişin yüksüz durumdaki ilk üç doğal frekans değerleri..... 45
Çizelge 4. 4	Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümsüz ve statik maksimum yer değiştirme değerleri 54
Çizelge 4. 5	Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümlü ve statik maksimum yer değiştirme değerleri 63
Çizelge 4. 6	Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümsüz ve statik maksimum eğilme momenti değerleri..... 72
Çizelge 4. 7	Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümlü ve statik maksimum eğilme momenti değerleri..... 80
Çizelge 4. 8	Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümsüz ve statik maksimum kesme kuvveti değerleri 88
Çizelge 4. 9	Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümlü ve statik maksimum kesme kuvveti değerleri 99

KREN KİRİŞLERİNİN HAREKETLİ YÜK ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sami KURAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU

Hareketli yük problemi pek çok mühendislik alanını etkileyen önemli bir konudur ve krenlerde dinamik etkilere neden olmaktadır. Günümüzde, krenler daha yüksek hızlarla çalıştığından, kren tasarımında hareketli yükten kaynaklanan dinamik etkilerin çok iyi incelenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Bu nedenle, bu çalışmada hareketli yüke maruz kren kirişlerinin dinamik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen, izotropik bir Euler-Bernoulli tipi kiriş için hareketli yük problemi matematiksel olarak ifade edilmiş ve çözülmüştür. Hareketli yük kirişe tekil bir kuvvet şeklinde etki ettirilmiştir. Böylece, kren kirişleri için yer değiştirmeleri, eğilme momentini, kesme kuvvetlerini veren matematik modeller elde edilmiştir. Bu çalışmada, sönümlü durum için elde edilen matematik modeller literatürde önceki çalışmalardan sönümsüz durum için elde edilen matematik modeller ile karşılaştırılmıştır. Ardından, Matlab programında algoritmalar oluşturulmuş ve çeşitli çalışma senaryoları için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Senaryolar, farklı hızlar ve farklı kütle oranları için belirlenmiş ve her senaryo için kirişte sönümlü ve sönümsüz durumda oluşan yer değiştirmeler, eğilme momenti, kesme kuvveti grafikler ve tablolar halinde verilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, sönümlü ve sönümsüz durumdaki matematik modellerden elde edilen sonuçlarda karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, yüksek hızlarda çalışan krenler için statik hesapların yetersiz kaldığını göstermektedir. Krenlerde, hareketli yükten kaynaklanan dinamik etkilerin çalışma senaryolarına göre analiz edilmesi ve tasarımın buna göre yapılması uygun olacaktır.

Anahtar Sözcükler: Kren kirişleri, hareketli yük, sönümlü matematik model, dinamik davranış

**INVESTIGATION DYNAMIC BEHAVIORS OF THE CRANE BEAMS UNDER
MOVING LOAD**

Sami KURAL

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. C. Oktay AZELOĞLU

The moving load problem is an important issue that affects many engineering fields and causes dynamic effects in the cranes. Nowadays, as the cranes are operated with higher speeds, in the design of the cranes, the dynamic behaviors arising from the moving loads should be investigated and analysed accurately. Therefore, dynamic behaviors of the crane beams under the moving load were investigated in this study. For that purpose, the moving load problem was stated and solved mathematically for a simply supported, homogeneous, an isotropic Euler-Bernoulli type beam representing the main beam of the crane. The moving load is acted as a concentrated and singular load on the beam. Thus, the mathematical models that gives the deflections, bending moment, shear forces were obtained for the crane beams. In this study, the mathematical models obtained for the damped condition are compared with the mathematical models obtained from the previous studies in the literature for the undamped condition. Then, the algorithms were created in the Matlab program and the simulation studies were carried out for various working scenarios. The scenarios were determined for different speeds and different mass ratios and were evaluated by the diagrams and tables the deflections, bending moment, shear force that occurred on the beam in the damped and undamped situation. Besides, results obtained from the mathematical models with damped and undamped situations were also compared.

As a result, the studies show that static calculations are inadequate for cranes working in high speed. So, it will be appropriate both to analyze dynamic behaviors arising from the moving load according to the working scenarios and to design according to obtained results for the cranes.

Keywords: Crane beams, moving load, mathematical model with damped, dynamic behavior

GİRİŞ

Hareketli yük problemi pek çok mühendislik alanını etkileyen önemli bir konudur ve krenlerde dinamik etkilere neden olmaktadır. Günümüzde, krenler daha yüksek hızlarla çalıştığından, kren tasarımında hareketli yükten kaynaklanan dinamik etkilerin çok iyi incelenmesi ve analiz edilmesi gerekir.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde, 1996'dan 2018'e kadar olan kısımda literatürde kırışlerde hareketli yük problemiyle ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Krenleri tasarım, uygulama ve bakım ana başlıklarıyla inceleyen geniş kapsamlı bir kaynaktır. Yüke bağılı çelik halatları, yükü hareket ettiren motor sistemleri, motor fren mekanizmaları, bazı standartlar, çelik konstrüksiyonlar, gerilme ve yorulma üzerine hesap metodları alt başlıklar halinde sunulmuştur [1]. Hareket altında çalışan köprülü krenleri hiyerarşik mod kontrol yöntemiyle Matlab-Simulink programları vasıtasıyla yük arabasının yer değışimi ve ivmesini, kaldırılan yükün açısını ve açısal yükünü inceleyen kapsamlı bir kaynaktır [2]. Malzemelerin taşınmasına yönelik hazırlanmış, tüm transport sistemlerini kapsayan birçok standartlardan yararlanılmış geniş kapsamlı bir rehber kaynaktır [3]. Yüksek lisans tezinde hareketli yük altında çalışan basit mesnetli Euler-Bernoulli kırışının çeşitli hız ve kütle oranlarına göre dinamik davranışlarını incelemiştir. Kırışin sönümsüz dinamik davranışlarını veren matematik modelleri Matlab programı yardımıyla çözmüştür [5]. Bu çalışmada, Kelvin-Voigt viskoelastik davranış ile birlikte ötelenme destekli ve dönen eklemlili homojen Euler-Bernoulli kırışının hareketli yük altındaki titreşim davranışları incelenmiştir. Sehim modları için

uygun ortogonalite şartları temel alınarak, hareketli yük altındaki davranışlar zaman alanında modal süperpozisyon ile kurulmuştur [8]. Doktora tezinde hareketli yüke maruz köprülÜ kren kirişlerinin sönümsüz dinamik davranışlarını Newmark metodu ve basit mesnetli Euler-Bernoulli kirişİ için çıkarılan hareket denklemlerinden elde edilen matematik modellerle incelemiştir. Bu çalışmadan farklı olarak kiriş sönümsüz olarak ele alınmış ve analizlerde sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan SAP 2000 paket programı kullanılmıştır [9], [10]. Hareketli yük altında çalışan yapıların titreşim davranışlarıyla ilgili kapsamlı bir çalışma sunulmuştur ve temel kaynak niteliğindedir [11]. Üzerinde hareketli osilatör taşıyan elastik bir yapının dinamik davranış problemleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı, rastgele değişen osilatör hızı için bir metot sunmaktır. Farklı mesnet tiplerindeki kirişlerin sehim davranışları incelenmiştir [14]. Üzerinde hareketli bir kütlenin bulunduğu sonlu elastik bir kirişin boyuna ve enine hareketleri incelenmiştir. Hamilton prensibi kullanılarak kirişin enine ve boyuna yer değiştirmelerini gösteren iki lineer olmayan çiftli diferansiyel denklem geliştirilmiştir. Ortaya çıkan sınır değer problemini çözmek için permütasyon tekniğı ile birleştirilen sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Dinamik sistemler için hareketli kütle ve hareketli kuvvet arasındaki farklar gösterilmiştir. Hareketli kütle ve kiriş arasındaki sürtünme kuvvetinin boyuna hareketler üzerine etkisinin önemli olduğunu ortaya çıkarmışlardır [15]. 19.yy'da hareketli yük probleminin ilk ortaya çıkarıldığı demir yolu köprülerine yönelik kapsamlı bir araştırma yapılmıştır ve temel kaynak niteliğindedir [16]. Hareketli bir kütleye maruz sonlu uzunluklu, basit mesnetli Bernoulli-Euler kirişinin davranışlarını belirlemek için dinamik bir Green fonksiyonu kullanmışlardır. Önerilen metot, kirişin yer değişimi için basit bir matris ifadesi sunmaktadır. Kullanılan metodun verimliliğı ve basitliğı birkaç sayısal örneklerle gösterilmiş ve dinamik davranışlar üzerine değişik parametrelerin etkisi araştırılmıştır [17]. Geleneksel hareketli kütle problemini, kütle ile kiriş arasındaki başlangıç ayrımını gösteren etkileşim kuvvetinin sıfıra eşitlenmesiyle çözmüşlerdir. Ardından, kiriş serbest titreşimlerini ve yer çekimi etkisinden kütle hareketlerini gösteren denklemleri ayrı ayrı çözmüşlerdir [18]. Hareketli tekil bir kuvvet tarafından uyarılan klasik olmayan lineer dağılmış bir sistemin davranış problemini incelemişlerdir. Sürekli sistemin kompleks öz fonksiyonlarına göre davranışın seri genişlemesini temel alan bir çözüm metodu önermişlerdir. Elde edilen denklemleri

farklı mesnet tipli kirişler üzerinde kullanmışlardır [19], [20]. Bu çalışmada hareketli bir kuvvete maruz bir kirişin titreşim problemi incelenmiştir. Çalışmanın amacı, hareketli bir kuvvetin herhangi bir hız değerinde kirişin maksimum sehimini bulmak için basit bir araç geliştirmektir. Maksimum davranış fonksiyonunu her iki ucu sabit mesnetli kiriş için sayısal olarak ve basit mesnetli kiriş için ise analitik olarak hesaplamışlardır. Daha yüksek titreşim modlarının maksimum sehim üzerindeki etkisini de incelemişlerdir [21]. Üzerinde hareketli bir kütle olan hasarlı Euler-Bernoulli tipi kirişin davranışını incelemek için teorik ve deneysel verileri karşılaştırmışlardır. Hasar, doğrusal elastik kırılma mekaniği kullanılarak uygunluğu değerlendirilen dönen yaylar vasıtasıyla modellenmiştir. Teorik sonuçların deneysel sonuçlar ile benzerlik gösterdiğini bildirmişlerdir [22]. Hareketli bir kütleye maruz basit mesnetli sönümsüz Euler-Bernoulli tipi kirişin dinamik davranışları üzerine enine çatlakların etkisini belirlemek için bir iteratif modal analiz yaklaşımı geliştirmişlerdir. Çatlakların daha yüksek sehim oluşturduğunu ve kiriş davranış modellerini değiştirdiğini saptamışlardır [23]. Hareketli yükün neden olduğu yapısal dinamik problem çalışmaları yapılmıştır. Hareketli yük taşıyan basit mesnetli bir kirişin basit bir örneği vasıtasıyla hareketli kütle problemine has birkaç temel konsept tanıtılmıştır. Çeşitli hareketli yük problemleri kısaca tanıtılmıştır [24]. Hareketli yük etkisindeki mesnetleri hareketli bir kirişin doğrusal olmayan bağlı titreşim analizlerini incelemişlerdir. İki farklı konuda çalışılmıştır. İlki, hareketli kütle kiriş üzerinden sabit bir hızla geçmektedir (hareketli yük hızı kirişin dikey veya yatay hareketiyle etkilenmemektedir). İkincisi, hareketli kütlenin bağlı hızı zaman değişkeni olarak kabul edilmiştir. Her iki durum için hareket denklemlerini gösteren bağlı doğrusal olmayan denklemler türetilmiş ve farklı parametreler için çözülmüştür [25]. Bu çalışmada, hareketli kuvvet sabitinin üzerinde hareket ettiği çift kirişli bir sistemin dinamik davranışı incelenmiştir. Sistem iki elastik homojen, izotropik Euler-Bernoulli kirişinden oluşmaktadır. Burada iki basit mesnetli prizmatik kiriş özdeş, birbirine paraleldir ve bir viskoelastik tabaka tarafından sürekli olarak bağlanmıştır. Her iki kirişin dinamik sehim analitik kapalı formda verilmiştir. Hareketli yük hızı, sönüm ve viskoelastik tabakanın kirişin dinamik davranışları üzerine olan etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, kirişlerin sehim grafikleri verilmiştir ve farklı sönüm oranı, hız ve rijitlik parametre değerleri için incelenmiştir. Kirişler arasında iletilen kuvvetler

saptanmış ve bu kuvvetler üzerine sistem parametrelerin etkisi araştırılmıştır [26]. Bu çalışma, hareketli yük altındaki yapıların doğrusal olmayan dinamik davranışlarını belirlemek için bir metot sunmaktadır. Burada yük, lineer süspansiyonlu ve esnek tekerlekli 4 serbestlik dereceli bir sistem olarak dikkate alınmıştır ve yapı her iki ucu basit mesnetli olan Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiştir. Yük-yapı sisteminin doğrusal olmayan dinamik etkileşimi tartışılmıştır. Kiriş için Kelvin-Voigt malzeme modeli kullanılmıştır. Dinamik etkileşimin doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemleri, von Karman doğrusal olmayan teori ve D'Alembert's prensibi kullanılarak türetilmiştir. Galerkin metodu temelinde, sistemin kısmi diferansiyel denklemleri, Newton-Raphson iterasyon metodu ve Newmark metodu kullanılarak çözülen doğrusal olmayan sıradan denklemlere dönüştürülmüştür [27]. Deforme edilebilir üç boyutlu bir yapı üzerindeki hareketli bir parçacığın bağlaışık dinamik analizi gösterilmiştir. Sunulan nümerik model kirişin bükülmüş başlangıç geometrisini, rastgele eğirileri ve yapının geometrik doğrusalsızlığını hesaba katabilir. Yapının dinamik denklemleri ile birleştirildiğinde hareketli parçacık denklemleri çözülür. Hareketli parçacık dinamik yükü temsil eder ve yapının kütle dağılımını değiştirir. Parçacığın hareket denklemleri kirişin dinamik denklem sistemine eklenmiştir. Sabitlik koşullarının zayıf formu temel alınarak özel olarak tasarlanan 3 boyutlu kirişin sonlu elemanlar formülasyonu sınır koşullarının temas kuvvetlerince etkilendiği yerde uygulanmıştır [28]. Bu çalışma, değişken hızlı asılı yük ve hareketli kütleyle maruz basit mesnetli Euler-Bernoulli kirişinin dikey dinamik davranışlarını göstermektedir. Değişken hızlı asılı yük ve hareketli kütle sisteminin düzlemsel teorik modeli birkaç varsayımlara (asılı yük ipi rijit ve kütesiz, uzunluğu sabit) dayanarak geliştirilmiştir. Köprü krenin kiriş rijitliği destek kirişinden daha büyüktür ve destek kirişi boyunca hareket eden bir kütle parçacığı olarak davranabilir. Destek kirişi basit mesnetli Euler-Bernoulli kirişi olarak düşünülebilir. Önerilen metot hem deneysel hem de nümerik metotlar kullanılarak doğrulanmıştır. Kiriş esnekliğinin salınan yük davranışına olan etkisi de incelenmiştir. Asılı yükün salınma davranışı işletme durumları için kiriş rijitliğine duyarlı değildir. Bu yüzden basit hareketli asılı yük modeli asılı yükün salınma kontrollerinde kullanılabilir. Daha sonraki araştırmalar için değişen hızlar (hızlanma veya yavaşlama), asılı yükün toplam hareketli yüke olan kütle oranları ve sarkaç uzunluğu gibi bir dizi parametreleri

kapsayan olası etkileyici faktörlerin etkisi, nümerik örnekler yönetilebilir [29]. Hareketli yük altında çalışan kren kirişlerinin deformasyon analizlerini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Bu amaçla bir sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik modelin sonuçlarının geçerliliğini doğrulamak için deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır [30]. Bu çalışmada, hareketli osilatör problemi olarak adlandırılan 1 boyutlu elastik sistemi incelemiştir. Problem, bağıl yer değiştirme modeli kullanılarak formüle edilmiştir. Birleşik hareket denklemleri, doğrudan sayısal yöntem ile çözülebilmesi için integral denklemlere dönüştürülmüştür. Yay ve basit mesnetli kiriş için sayısal sonuçlar sunulmuştur ve hareketli kuvvet sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [31]. Bu çalışmada, çoklu kütleleri taşıyan değişik kirişler için öz fonksiyonların kullanılmasıyla bir titreşim analizi incelenmiştir. Analitik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Mod şekillerini içeren bir karşılaştırma çalışması yapılmış ve polinom yaklaşımlarıyla incelenmiştir [32]. Bu çalışmada, üzerinde tekil noktasal bir yükün hareket ettiği basit bir kiriş ele alınmıştır. Hareketli yük için kısmi diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmüştür. Sonlu farkların direk kullanımı pratik olarak kullanılamaz olduğu için ortalama ivmelenme metodu kullanılmıştır. Sayısal ve analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır [33].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, hareketli tekil yüke maruz kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen, izotropik Euler-Bernoulli tipi kirişte oluşan dinamik davranışları belirlemek için sönümsüz ve sönümlü matematik modeller oluşturmak ve bu matematik modellerden elde edilen sonuçları incelemektir. Böylece, hareketli yükün oluşturduğu dinamik etkiler daha doğru şekilde tespit edilecek ve kren kirişlerinin tasarımında konstrüktörü statik analizlerin yanında dinamik analizler yapmaya yönlendirecektir.

1.3 Hipotez

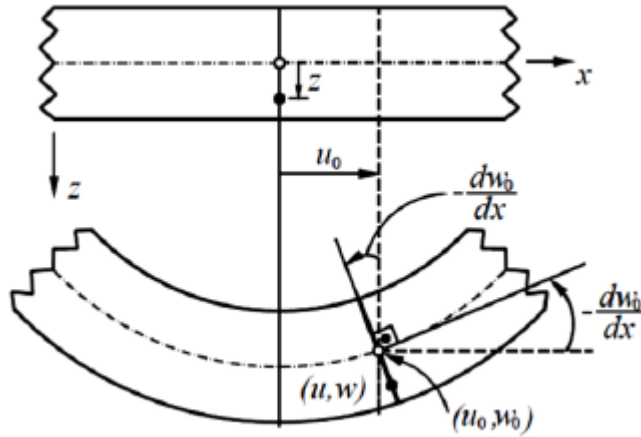
Bu tez kapsamında elde edilen sonuçların, kren kirişlerinin tasarımında konstrüktörlere yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın sonuçlarının kullanılması daha yüksek hızlı krenlerin tasarımına yardımcı olacaktır.

1.4 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisine Bir Bakış

Bu çalışmada kullanılan Euler-Bernoulli kiriş teorisi için yapılan temel kabuller şunlardır;

- Deformasyondan önce kirişin düzlem kesitleri tarafsız eksene diktir ve deformasyondan sonra ise düzlem kesitleri tarafsız eksene dik kalır (Şekil 1.1).
- Eğilme deformasyonları küçüktür.
- Kiriş lineer elastik izotropiktir ve Poisson oranının etkisi ihmal edilmiştir.
- Kayma şekil değiştirmelerinin etkisi ihmal edilmiştir.

Yukarıdan verilen temel kabuller nedeniyle diğer kiriş teorilerinden ayrılan Euler-Bernoulli kirişi kren kirişi olarak modellenmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada da bu kiriş tipi kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, izotropik, homojen bir kiriş olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. 1 Euler-Bernoulli kirişinin eğilme öncesi ve sonrasındaki durumu [5]

1.4.1 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi İçin Yer Değiştirme Alanları

Yukarıda verilen Şekil 1.1'den görüleceği gibi sağ üçlü kartezyen koordinat sistemi $O(x,y,z)$ kirişin orta noktasında tanımlanmıştır. x eksenı kiriş eksenı doğrultusunda, y eksenı kesit genişliği doğrultusunda ve z eksenı kesit yüksekliği doğrultusundadır. Kirişe etki eden tüm dış yükler ve $O(x,y,z)$ eksenleri doğrultusunda (u,v,w) şeklinde tanımlanan yer değiştirme bileşenleri, x ve z koordinatlarının fonksiyonu şeklindedir.

Ele alınan kiriş, bir başka deyişle (x,z) düzleminde eğildiği kabul edilmiştir. Bu kabulün doğal sonucu olarak y eksenini doğrultusundaki v yer değiştirme bileşeni sıfırdır.

Şekil 1.1’de Euler-Bernoulli kiriş teorisi için yer değiştirme alanı şu şekildedir:

$$u^E(x, z, t) = u_o^E(x, t) - z \frac{\partial w_o^E(x, t)}{\partial x} \quad (1.1)$$

$$v^E(x, z, t) = 0 \quad (1.2)$$

$$w^E(x, z, t) = w_o^E(x, t) \quad (1.3)$$

Burada u^E , v^E , w^E kiriş düşey kesiti üzerinde tarafsız eksenden z mesafesi kadar uzaklıktaki bir noktanın sırasıyla x , y , z eksenleri doğrultularındaki yer değiştirmelerini ifade etmektedir. u_o^E , kiriş eksenindeki bir noktanın boyuna yer değiştirmesidir. w_o^E ise kiriş eksenindeki bir noktanın düşey yer değiştirmesidir. Kiriş genişliği boyunca tüm noktaların aynı yer değiştirmeyi yaptığı kabulüyle, bundan sonra u_o^E değeri orta düzlemdeki bir noktanın uzaması, w_o^E değeri yer değiştirmesi olarak belirtilecektir. Değişkenlerin üzerindeki E üst indisi, Euler-Bernoulli kiriş teorisini ifade etmektedir.

1.4.2 Bu Kiriş Teorisi İçin Yer Değiştirme, Şekil Değiştirme Ve Gerilmeler Arasındaki Bağlılıklar

Yer değiştirmeler ile şekil değiştirmeler arasındaki kinematik bağıntıların ilgili bileşenleri, doğrusal olmayan terimlerin ihmal edilmesi ve eğilmenin (x,z) düzleminde olduğunun dikkate alınmasıyla aşağıda gösterilen terimlerle ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.4)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1.5)$$

Burada, ε_{xx} , x eksenini doğrultusundaki boyuna şekil değiştirme, γ_{xz} , $(x-z)$ düzlemindeki kayma şekil değiştirmesidir. Şekil değiştirmelerden gerilmelere geçilirken, gerilmelerle

şekil değiştirmelerin ve şekil değiştirme hızlarının orantılı olduğu, yani malzeme davranışının doğrusal Kelvin-Voigt modeline uyduğu kabul edilmiştir.

Verilen yer değiştirmelerle şekil değiştirmeler arasındaki kinematik bağıntılar kullanılırsa Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre şekil değiştirme bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u^E}{\partial x} = \frac{\partial u_o^E}{\partial x} - z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1.6)$$

$$\gamma_{xz} = 0 \quad (1.7)$$

Euler-Bernoulli kiriş teorisi için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıda gösterilmektedir.

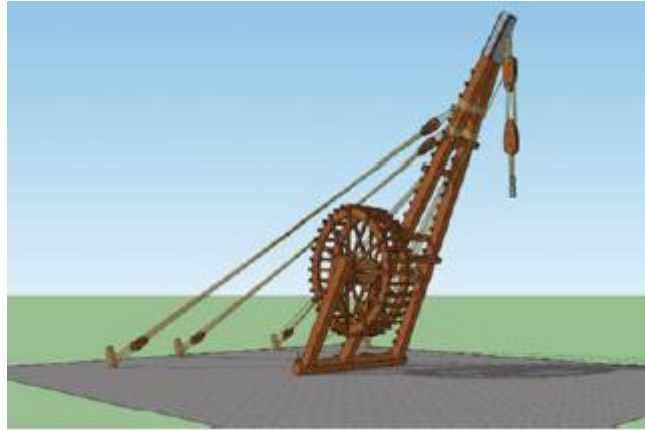
$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^e + \sigma_{xx}^v = E\varepsilon_{xx} + E\eta_b \dot{\varepsilon}_{xx} = E \frac{\partial u_o^E}{\partial x} - Ez \frac{\partial^2 w_o^E}{\partial x^2} + E\eta_b \frac{\partial \dot{u}_o^E}{\partial x} - E\eta_b z \frac{\partial^2 \dot{w}_o^E}{\partial x^2} \quad (1.8)$$

$$\tau_{xz} = 0 \quad (1.9)$$

Burada, σ_{xx} , x eksenine doğrultusundaki normal gerilmedir. $\tau_{xz} = 0$ ise, $(x-z)$ düzlemindeki kayma gerilmesidir (Euler-Bernoulli kiriş teorisi için 0'a eşittir). E , elastisite modülüdür ve değişkenlerin üzerindeki nokta zamana göre türevi göstermektedir.

TRANSPORT TEKNIĞİ VE KALDIRMA SİSTEMLERİ

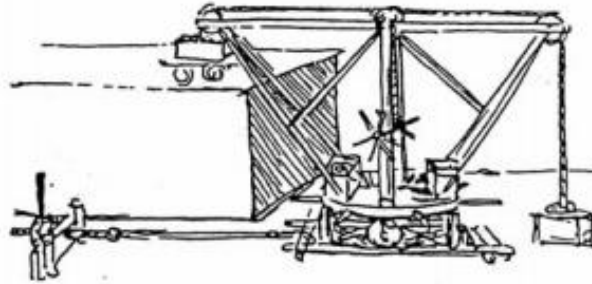
Bir yükün nasıl taşınacağı probleminin tarihçesi insanoğlu kadar eskidir. İlkel çağlarda insanlar bu problem ile yüzleşmişlerdir. Ağır yükleri taşıma ve kaldırma işlemini birlikte çalışarak halletmişlerdir. O dönemlerde, insanlar bir nesneyi sürüklemeye ve taşıma işlemini tekerleğin icadına kadar ilkel yöntemlerle çözmüştür [1]. Milattan önce 6.yy'da ilk konstrüksiyon krenlerini Antik Yunanlar icat etmişlerdir. Bu krenler yapıların inşasında kullanılmıştır. Bu kren örneği Şekil 2.1'de gösterilmiştir [2].



Şekil 2. 1 Antik Yunan konstrüksiyon kren örneği [2]

Zamanla uygarlıkların gelişmesi, işçilerin organize olması mısır piramitleri gibi yapıları ortaya çıkarmıştır. Mısırlılar, engin mezarların yapımında çok ağır taşları kaldırmış ve taşımışlardır. Çok farklı teoriler olsada mısırlıların kocaman taş blokların taşınmasında kızakları kullandığına inanılmaktadır. Orta çağlarda limanlarda ahşaptan döner krenler kullanılmıştır. Bu kocaman ahşaptan yapılmış döner krenler genellikle tersanelerde ağır yüklerin kaldırılmasında kullanılmıştır [1]. Zamanla bilim, teknoloji ve mühendisliğin

gelişimi ağır ve geniş yüklerin taşınması ve kaldırılması işlemlerini kolaylaştırmak için transport makinaların yapımına yöneltmiştir. Bir örnek vermek gerekirse Leonardo da Vinci tarafından, taş bloklarını kaldırmak ve taşımak amacıyla tasarlanan çift döner vinç örneği Şekil 2.2’de görülmektedir. Vinç, bütün makınayı kendi temeli üzerinde çekmek amacıyla tasarlanmıştır [3].



Şekil 2. 2 Leonardo da Vinci tarafından tasarlanan vinç [3]

Transport Tekniğinin Tanımı: Transport tekniği insan ve malların bir yerden başka bir yere taşınmasını inceleyen bilim dalıdır. Transport tekniği, belirli bir amacı gerçekleştirmek için malzemelerin taşınmasını, paketlenmesini ve depolanmasını sağlayan ekipman ile metodlar, hizmetler, işlemler sistemi ve kombinasyonudur. Transport tekniği, en genel anlamda her çeşit malın taşınması, paketlenmesi ve depolanması bilimi olarak tanımlanır. Ancak son yıllarda transport işleminin uygulama alanları oldukça genişlemiştir. Taşıma uzak ve yakın mesafeler arasında olabilir. Yer ve zamanın faydalı kullanımı transport sistemlerinin tanımı açısından önemlidir. İşlemin büyüklüğü veya mekanizasyon derecesi gibi tanımda yer almayan faktörler en az yukarıda bahsedilenler kadar önemlidir. Birkaç temel ekipman gerektiren basit ve küçük transport uygulamaları olabileceği gibi büyük, karmaşık ve otomatize edilmiş sistemler de bulunmaktadır.

Endüstriyel ekonomide malzeme taşınmasının önemi büyüktür. Düzenlenmiş bir taşıma sisteminden yoksun herhangi bir endüstriyel tesis veya işletme düşünülemez. Bir ürün elde etmek maksadıyla tesis içerisine taşınacak her türlü malzemenin, iletilmesi veya üretilmiş ürünlerin ekonomik olarak taşınması, taşıma sistemlerinin doğru ve isabetli seçimine bağlıdır.

Bir fabrika ürün haline dönüştürmek üzere, işlenmemiş malzemeler veya yarı mamül malzemeleri fabrikaya kadar taşıyarak içeriye almak ve bunları ürün haline getirmek için düzenli bir halde üretim birimlerine dağıtmak ve son ürünleri depolamak ve tüketiciye ulaştırmak üzere fabrika dışına taşımak ve fabrika üretim artıklarını da uzaklaştırmak için planlanmış dış ve iç taşıma sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle kısaca transport diye adlandırılan işler iki gruba ayrılmaktadır:

- Dış Transport
- İç Transport

Bu ayrıma rağmen ulaştırma araçlarının yüklenmesi ve boşaltılması işlerinde transport makinalarının yer alması, bantlı konveyörler veya halatlı havai hatlarla malların kilometrelerce uzaklıklara taşınması dikkate alındığında, yakın ve uzak mesafe transportun ne kadar iç içe olduğu ve birbirilerini tamamladıkları gerçeğini çıkarmaktadır [3].

2.1 Mal/Malzeme ve Transport Sistemlerinin Sınıflandırılması

Mal/Malzeme Transportu, Mal/Malzeme Transport Enstitüsü tarafından (MHI) şöyle tanımlanmıştır. Mal/Malzeme ve ürünlerin üretimi, dağıtımı, tüketimi ve tanzimi sırasında taşınması, depolanması, kontrolü ve korunmasıdır. Mal/Malzeme transportunun beş dikkat çekici unsuru şunlardır:

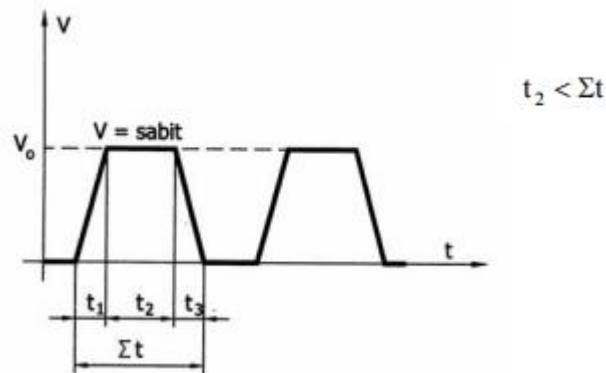
- **Hareket:** En etkili yöntemle ve en ucuza parçalar, Mal/Malzemeler ve bitmiş parçalar bir yerden bir yere taşınmalıdır.
- **Zaman:** O an için mal/malzemeye nerede ihtiyaç varsa o anda orada olmalıdır.
- **Yer:** Mal/Malzemeler kullanım için en uygun yerde ve pozisyonda olmalıdır.
- **Sıklık (Yoğunluk):** İhtiyaç düzeyi gerçekleştirilmekte olan işlemlerin kademelerine göre değişmektedir. Mal/Malzemeler işlemler için doğru sayı, ağırlık, hacim veya sayıda temin veya tahliye edilmelidir.
- **Kullanım Alanı:** Depolama yeri ve etkin kullanımı tüm işlemler ve operasyonların anahtar faktörüdür.

Kaldırma ve taşıma makinalarının çalışma ilkeleri, tasarım özellikleri ile taşınacak malzeme veya malların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin büyük çeşitlilikler göstermeleri “kaldırma ve taşıma makinalarının” genel bir sınıflandırılmasının yapılmasını hemen hemen olanaksızlaştırır. Bir mal veya ürünün bir yerden diğer bir yere taşınmasında veya kaldırılmasında kullanılan makinalara “transport makinaları” denir. Asansörler gibi bazı transport makinaları ile insan taşımacılığı da yapılmaktadır. Transport makinaları çalışma ilkelerine göre iki ana gruba ayrılmaktadır.

- Kesikli Taşıyıcılar
- Sürekli Taşıyıcılar

2.1.1 Kesikli Taşıyıcılar

Kesikli taşıyıcılar bir periyot (örn. bir çalışma günü) içinde devamlı çalıştırılmadan malların veya yüklerin taşınmasında ve kaldırılmasında kullanılan makinalardır. Kesikli taşıyıcılar “kaldırma makinaları” olarak da tanımlanırlar. Bu makinalar kaldırma ve taşıma işlemini tamamladıktan sonra durur ve bir sonraki işlem tekrarlanana kadar çalışmazlar. Asansör, vinç ve kren gibi kesikli çalışan transport makinalarının çalışma süresi, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi kalkış süresi t_1 , sabit rejim hızında çalışma t_2 , V_0 hızında ve durma süresi t_3 sürelerinden oluşur.



Şekil 2. 3 Kesikli çalışan transport makinalarının çalışma süreleri [3]

Kaldırma makinalarına ve kullanım yerlerine ait örnekler aşağıda verilmiştir.

- Kuru yük gemilerinde yükleme-boşaltma işlerinde kullanılan konsol krenler,

- Konteyner taşımacılığı yapan gemilerin limanlarda yükleme-boşaltma işlerinde kullanılan “konteyner krenleri” (kombine krenler),
- Hububat, maden cevheri benzeri dökme mal taşıyan yük gemilerinin yükleme-boşaltma işlerinde kullanılan kepçeli veya kancalı “liman krenleri” veya “kombine krenler”,
- Tahliye sandallarının indirilmesinde kullanılan “mataforalar”,
- Gemilerde çapanın (demirin) indirilip-kaldırılmasında kullanılan “ırgat vinçleri”,
- Feribot ve yolcu gemilerinde kullanılan “insan asansörleri”,
- Arabalı vapur ve feribot kapaklarının açılıp-kapanmasında kullanılan “vinç donanımları”,
- Tersane ve doklarda gemi inşaatı ve tamirinde kullanılan “tersane krenleri” (taklı krenler),
- Ambarlarda, antrepolarda ve büyük yük gemilerinde yüklerin istiflenmesinde kullanılan “istif makinaları” (fork-liftler),
- Gemi manevra ve yanaştırılmasında kullanılan “kabestan kafaları”,
- Rıhtıma yanaşamayan büyük yük gemilerinin yüklenmesi-boşaltılması işlerinde ve kurtarma işlerinde kullanılan “maçunalar” (yüzer krenler).

Kesikli çalışan kaldırma makinaları 5 farklı kategoriye ayrılırlar. Bunlar:

- Krikolar,
- Palangalar,
- Vinçler,
- Krenler,
- Asansörler.

2.2 Krenler

DIN 15001'e göre krenler bir taşıma elemanına asılı olan (genellikle halata) yükü kaldıran ve çeşitli yönlerde hareket ettiren kaldırma ve taşıma makineleridir. Krenler köprülü krenler, portal krenler, döner krenler, monoray krenler, kollu krenler gibi birçok sınıflara ayrılırlar [3].

2.2.1 Köprülü Krenler

Bu tip krenler hareketli yükün bir köprü uzunluğu boyunca hareket ettiği ve hareketli yükün köprünün hareketine dik olduğu bir Kartezyen alanda çalışırlar. Yüksekçe yerleştirilmiş iki kren yolu arasında bir köprü konstrüksiyonundan ibarettir. Yarı ağır endüstriyle ilgili bütün fabrika, tersane, afet bölgeleri, inşaat alanları, mağaza ve makine park salonlarında kullanılırlar. Şekil 2.4'de köprülü kren örneği sunulmuştur. Bir köprülü kren taşınacak yükün maksimum değeri, kaldırma hızı, köprü öteleme, araba öteleme hızı, köprü gezinme mesafesi ve köprü açıklığı ile karakterize edilirler [3].



Şekil 2. 4 Köprülü kren örneği

2.2.2 Tek ve Çift Kirişli Tavan Krenleri

Köprü, yapının sütunları üzerinde destekli olan geçit kirişleri ve raylar üzerinde seyahat eder. Bu düzen köprüyü tavan kafes kirişlerinin alt tarafına yaklaştırır. Böylece, bu tip bir kren tavan boşluğu sınırlı olan birçok uygulamalar için uygun hale gelir. Bu tip

krenin kullanım yerleri hafif sanayi ve depolama alanlarıdır. Kren çalışma alanı dikdörtgen biçimindedir. Uygun bir başlangıç maliyetinde kren kullanıcılarının isteklerinin karşılandığı bir kaldırma oranı sağlarlar. Tek kirişli tavan krenleri genellikle 5 ton kapasite ve yaklaşık 18 m köprü açıklığı ile sınırlıdır. Hem el ile hem de otomatik olarak çalıştırılabilirler. Çift kirişli tavan krenleri ise 20 tonun üzerindeki yükler taşırlar ve geniş köprü aralıklarında kullanılırlar. Hareketli yük çift kiriş üzerinde seyahat eder. Şekil 2.5’de bir tek kirişli tavan kren örneği yer almaktadır. Çift kirişli tavan krenlerinin birçok sınıfı vardır. Bunlar; Kesikli endüstriyel krenler, Santral krenleri, Devamlı endüstri krenleri, Hızlı taşıma sağlayan krenlerdir [4].



Şekil 2. 5 Tavan kren örneği

2.2.3 Portal Krenler

Portal krenler geniş bir alanı kapsar. Yüksüz küle vinçleri, tersane krenleri, santral krenlerini içerirler. Endüstri tesislerinde kullanılan 3 tip portal konfigürasyonu vardır. Bunlar elektrik santrallerinde ve üretimde kullanılırlar. Bu tip krenler 18-45 m arasında köprü açıklığına sahiptirler. Taşıma kapasitesi ise en fazla 150 ton’dur. Özel uygulamalar için daha büyük boyutlarda imal edilebilirler. Standart portal krenlerde hareketli yükün üzerinde gezdiği köprü rijit olarak destek sütunlarının her bir ucunda sabittir. Bu krenler çok farklı uygulamalarda avantajlar sağlar. Ağır sanayi tesislerinde kullanılırlar [4]. Şekil 2.6’da bir portal kren örneği gösterilmiştir.



Şekil 2. 6 Portal kren örneği

2.2.4 Kollu Krenler

Kollu krenler, kendi destek üyesinden konsolla desteklenen tek kirişten ibarettir. Yatay kiriş hareketli yük için bir yol sağlar. Bu tip krenlerin 3 serbestlik derecesi vardır: dikey, dairesel ve dönen. Ancak, çalıştığı ortamda köşelere ulaşamaz. Genellikle makine atölyelerinde kullanılır. Basit bir kollu kren görünümü Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Duvara sabitlenmiş kollu krenler duvar yapısından desteklenirler. Yaklaşık 180° dönme açısına sahiptir. Zemine sabitlenmiş kollu krenlerde (destek sütunu dönmesi için serbest ise) 360°’lik bir dönme açısına sahiptir. Bu tip krenler manuel veya elektrikle çalışırlar. Standart bir kollu krenin kapasitesi 5 tonu ve tek kiriş uzunluğu 9 m’yi bulur. Çeşitli uygulamalarda kullanılan 4 çeşit kollu kren vardır [4]. Bunlar:

- Duvarda yürüyen kollu kren,
- Bir sütunu dönen kollu kren,
- Duvara monte kollu kren,
- Zemine monte kollu kren,



Şekil 2. 7 Kollu kren örneği

2.2.5 Kule Krenleri

Kule krenleri silindirik koordinatlar ile tanımlanır. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi yatay konsol kol dikey kule etrafında dönmektedir. Taşıma yükü, taşıma arabasından bir kablo vasıtasıyla desteklenmektedir. Taşıma arabası radyal yönde konsol kol boyunca hareket etmektedir. Kule krenleri en iyi kaldırma ve yükseklik kombinasyonuna sahiptir. Genellikle bu özelliklerinden dolayı uzun yapıların inşaatında kullanılmaktadırlar. Kapladığı alan ve çalışma alanı oranı küçük olmasından dolayı bu tür yapı inşaatlarında da kullanımları uygundur. Krenin hareket etmesiyle taşıma yükünün oluşturduğu, en zorlanan konulardan biri olan salınımları meydana getirecektir. Doğal olarak bu salınımlar sarkaç tip kren yapılarıyla saptanmaktadır. Bu tip salınımların birçok hasar verici etkileri vardır. Güvenlik riski, zaman gecikmeleri ve pozisyon tamlığını düşürme gibi bir dizi engellerle sınırlı değildir. Sonuç olarak krenlerin verimlilik ve kontrolünün artırılması büyük ekonomik etkilerinden dolayı birçok yararı olacaktır. Yapılan araştırmaların ilgisi taşıma yükünün yapacağı salınımların azaltılması yönünde arttırılmalıdır [2]. Sistem hareketliğine göre kule krenleri 3 sınıfa ayrılırlar [5]. Bunlar:

- Gezer kule krenleri,
- Çalışılan yapının çatısına bağlı kule krenleri,
- Düşey tırmanan kule krenleri.



Şekil 2. 8 Kule kren örneği

2.3 FEM ve DIN Normlarına Göre Transport Sistemlerinin Hesabı

Bir çelik konstrüksiyonda, dolayısıyla krende bir çelik konstrüksiyon olduğuna göre, ilk önce yükleme hallerini belirlemek gereklidir. Çelik konstrüksiyonda yükleme halleri iki esasa göre tanımlanmaktadır.

- DIN'e göre,
- FEM'e göre,

Bu iki esastan birinin seçimi konstrüktörün tercihinine bırakılmıştır [6].

Kaldırma makinaları ve parçalarının konstrüksiyonunda, sistemin kullanım süresince istenen performansta görevini yerine getirmesi dikkate alınması gereken en önemli özelliktir [7].

2.3.1 DIN'e göre Yükleme Halleri ve Mukavemet Değerleri

DIN'e göre yükleme hallerinin belirlenmesi DIN 15018 de anlatıldığı gibi yapılır. Yüklemenin üç hali vardır.

- H hali
- HZ Hali
- HS Hali

2.3.1.1 Yüklemenin H-Hali

Yüklemenin H-hali “ana yük” anlamına gelmektedir. Yapılan hesaplarda yalnızca ana(esas) yükten ileri gelen kuvvetler dikkate alınmış ve hesaplar buna göre yapılmıştır. Genel olarak ana yük krene ait olan sabit ve hareketli parçalar ile yükten ileri gelen kütlelerdir. Bu kütle değerleri yerçekimi ivmesi ile çarpılarak, ayrıca Kaldırma yükü katsayısı ψ ve öz ağırlık katsayısı ϕ ile çarpılarak büyütülür.

Ana yükün tanımlandığı kuvvetler:

- Krenin z ağırlığının kuvveti, bu bütün kreni meydana getiren kısımların öz ağırlıkları demektir. Örneęin: kiriş, araba, çelik halatlar, kanca donanımı, traversler, kepçeler, magnetler, vb.
- Kaldırma yükü kuvveti,
- Tahrik ivmesinden ve frenlemesinden ileri gelen kütle kuvvetleri,
- Yük darbelerinden ileri gelen kuvvet,
- Platform z ağırlığından ileri gelen kuvvet.

2.3.1.2 Yüklemenin HZ-Hali

Yüklemenin HZ-hali “ana ve ek” yükler anlamına gelmektedir. Yapılan hesaplarda ana yükten ileri gelen kuvvetlerin yanında ek yükler de dikkate alınmış ve hesaplar bunlarla yapılmıştır.

Ek yüklerin tanımlandığı kuvvetler:

- Rüzgâr kuvveti (DIN 1055 T4 den),
- Kasılmadan ve çarpık hareketlerden ileri gelen kuvvetler,
- Isıdan ileri gelen kuvvetler,
- Kar yükünden ileri gelen kuvvetler (DIN 1055 T5 den),
- Merdivenler, raflar ve korkulukların yk ağırlığından ileri gelen kuvvetler.

İşletmede birim rüzgâr kuvveti olarak genellikle $q_r=250 \text{ N/m}^2$ alınır. Eğer krende bakım platformu varsa, bakım personeli ve takımlar veya yedek parçalar vb. için ek olarak

3000 N yük kuvveti eklenir. Bu ilave yük kuvveti yalnız platform mukavemet hesabında kullanılır, kaldırma yükü ile yapılan hesaplarda kullanılmaz.

2.3.1.3 Yüklemenin HS-Hali

Yüklemenin HS-hali “ana ve özel yükler” anlamına gelmektedir. Yapılan hesaplarda ana yükten ileri gelen kuvvetlerin yanında özel yükler de dikkate alınmış ve hesaplar bunlarla yapılmıştır [6].

Özel yüklerin tanımlandığı kuvvetler:

- Kreni işletmeye alırken kullanılan kontrol yüklerinden ileri gelen kuvvetler (DIN 15019 T2 den),
- Tampon kuvvetleri,
- İki araba veya iki kren beraberce bir rayda çalışıyorlarsa, bunların çarpışma kuvveti.

2.3.1.4 Genel Emniyet Gerilme Değerleri

DIN 15018 de yükleme durumları (H ve HZ) gruplarına göre genel emniyet gerilme değerleri verilmiştir. Aşağıdaki tabloda çok kullanılan St-37 ve St-52-3 malzemelerinin gerilme emniyet değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. 1 Gerilme emniyet değerleri [7]

Malzeme	DIN	Yükleme Durumu	Çekme emniyet gerilmesi (σ_{em} N/mm ²)	Basma emniyet gerilmesi (σ_{em} N/mm ²)	Kayma emniyet gerilmesi (τ_{em} N/mm ²)
St 37	DIN 17100	H	160	140	92
St 37	DIN 17100	HZ	180	160	104
St 52-3	DIN 17100	H	240	210	138
St 52-3	DIN 17100	HZ	270	240	156

2.3.2 FEM'e göre Yükleme Halleri ve Mukavemet Değerleri

Avrupa Kaldırma Araçları İmalatçıları Birliği (FEM)'e göre krenlerde çelik konstrüksiyon hesapları yapılırken üç işletme halinin bulunduğu kabul edilir:

- I.Hal: Rüzgâr kuvveti olmayan normal işletmeler,
- II.Hal: Şiddetli rüzgâr kuvvetinin bulunduğu işletmeler,
- III.Hal: Çok özel etkiler altında çalışan işletmeler,

Genelde atölye vinçleri rüzgâr kuvveti olmayan normal işletmelerde kullanılmaktadır. Buradaki değerler portal ve liman krenlerinde de uygulanır [6].

2.3.2.1 I.Hal: Rüzgâr Kuvveti Olmayan Normal İşletmeler

Bu işletme hali rüzgâr etkisinde olmayan krenlerin hesaplanmasında kullanılır. Daha çok kapalı yerlerde yani atölye, depo ve benzeri yerlerde çalışan krenlerde şu gerilmeler hesaplanır:

- Statik yüklerden oluşan gerilmeler. Bunlar krenin çelik konstrüksiyonunun, arabanın vb. öz ağırlıklarından ve araba kasılmasından oluşan σ_1 , σ_2 ve σ_5 diye adlandırılan gerilmelerdir.
- Statik yüke çevrilmiş dinamik yükten oluşan gerilmeler. Bunlar kaldırma yükü katsayısı ψ ile büyütülmüş kaldırma yükünden ve atalet kuvvetlerinden oluşan σ_3 ve σ_4 gerilmeleridir.

Böylece tanımlanan bu gerilmeler, bilinenlerin tam olamaması veya akla gelmeyen herhangi bir etkiyi de hesaba katmış olmak için yükleme grubuna göre, k_B faktörü (katsayısı) ile çarpılarak konstrüksiyondaki gerilme büyüklüğü aşağıdaki (2.1) eşitliği yardımıyla hesaplanır [6].

$$\sigma_{top1} = k_B \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \psi \cdot \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5) \quad (2.1)$$

2.3.2.2 II.Hal: Şiddetli Rüzgâr Kuvvetinin Bulunduğu Kabul Edilen İşletmeler

Burada I.Hal deki hesaba rüzgârdan oluşan gerilme de eklenir.

$$\sigma_{top2} = \sigma_{top1} + \sigma_{Rü} \quad (2.2)$$

Dikkat edilmesi gereken bir nokta, rüzgâr etkisi altında hareket ve frenleme zamanlarının daha uzun olmasından ötürü, ivme ve fren kuvvetlerinin I.Hal den daha büyük olmalarıdır [6].

2.3.2.3 III.Hal: Çok Özel Etkiler Altında Çalışan İşletmeler

Çok özel etkiler şu şekilde sıralanabilir:

- İşletmenin çalışmadığı (paydoslarda) rüzgâr etkisindeki krenler,
- İşletmede hızla tamponlara çarpan krenler,
- Teslimat esnasında, dinamik veya statik yüklemelerde %10 veya daha fazla yükle, denenecek krenler.

2.3.2.4 Krenin “H” Kaldırma Sınıfının Saptanması

Kren elemanlarının dolayısıyla krenin yükleme grubunun ayrımı çeşitli değerlere göre yapılır. Bu değerler şu şekilde sıralanmaktadır:

- Gerilmelerin zamana göre dağılımı,
- Krenin çalışma ömrü boyunca yükleme sayısı,

Kren yükleme grubu B1 ve B6 arası altı gruba ayrılmıştır. Tecrübesi olan veya olmayan kişiler kolay ve çabuk hesap yapabilmek için kren yükleme grubu ile kaldırma sınıfını saptamak için Çizelge 2.2’den yararlanabilirler [6].

Çizelge 2. 2 Kren kaldırma sınıfları [6]

Kren Tanımı	Kaldırma Sınıfı
El ile tahrik edilen krenler	H1
Montaj krenleri	H1,H2
Santralde makine binasındaki krenler	H1
Atölye krenleri	H2,H3
Köprülü krenler, Demir hurda depo krenleri	H3,H4
Döküm ve dökümhane krenleri	H2,H3
Ağır yük ve yüzer krenler	H1
İnşaat kule krenleri	H1
Demiryolu krenleri	H2
Mobil ve oto krenler	H2
Gemi krenleri	H2

2.3.2.5 Krenin “B” Yükleme Grubunun Saptanması

Kren elemanlarının dolayısıyla krenin yükleme grubunun saptanması için Çizelge 2.3’den yararlanılmaktadır.

Çizelge 2. 3 Kren elemanlarının ve krenin yükleme grubunun saptanması [6]

Yükleme sayısı sınıfı	N1	N2	N3	N4
Krenin ömrü boyunca gerilme yineleme sayısı N_G	$2.10^4 < N_G < 2.10^5$ Arasına kullanma ve çok uzun molalar	$2.10^5 < N_G < 6.10^5$ Devamlı fakat molalı kullanma	$6.10^5 < N_G < 2.10^6$ Devamlı ve molasız kullanma	$N_G > 2.10^6$ Molasız ve ağır şartlarla kullanma
Gerilme durumu	Kren veya elemanlarının yükleme durumu			
S_0 çok hafif	B1	B2	B3	B4
S_1 hafif	B2	B3	B4	B5
S_2 orta	B3	B4	B5	B6
S_3 ağır	B4	B5	B6	B6

2.3.2.6 Yükleme ve İş Sayıları

Yükleme sayısı, dört grup halinde sınıflandırılmıştır. Bu gruplama “yükleme sayısı” N_G ile belirlenir. Yükleme sayısı, taşınan yükün yalnız kaldırılıp indirilme sayısıdır.

İş sayısı, yükü bir yerden kaldırıp araba ve/veya köprü ile gideceği yere götürmek, yükü bırakmak ve tekrar yükün alındığı yere krenin boş olarak geri dönmesi demektir. Burada anlatılan yük, kollektif gerilmelerdeki en küçük üst gerilmeyi doğuran yüküdür [6].

2.3.2.7 Kollektif Gerilme

Kollektif gerilmeyi basit olarak günlük hesaplar için Çizelge 2.4’den belirleyebiliriz. Kollektif gerilmeyi tam olarak saptamak için ise DIN 15018’den yararlanılabilir.

Çizelge 2. 4 Kollektif gerilme için öneriler [6]

S-Sınıfı	Tanımlama
S_0	Uzun çalışma molası veren, çalıştığında çok küçük yüklerle çalışan, çok ender olarak maksimum yükle çalışan krenler.
S_1	Kısa molalarla çalışan, fakat ortalama kapasitesinin yani maksimum yükün 1/3 civarında yük taşıyan, çok ender olarak maksimum yükle çalışan krenler.
S_2	Oldukça sık çalışan ve kapasitesinin yani maksimum yükün 1/3 ile 2/3'ü civarında yük taşıyan ve maksimum yükle oldukça sık çalışan krenler.
S_3	Devamlı maksimum veya maksimum yüke yakın yükle çalışan krenler.

2.3.2.8 Krenin Yükleme Grubu Katsayısı “ k_B ” Saptanması

Hesaplanan normal gerilmeler krenin çalışma şekline göre ayarlanır. Bunun için de krenin yükleme grubu seçildikten sonra yüklenme grubu katsayısı, k_B Çizelge 2.5'deki değerlere göre saptanır.

Çizelge 2. 5 Yükleme grubuna göre k_B katsayıları [6]

	Yüklenme Grubu					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
k_B -katsayısı	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11...1,14	1,17...1,20

2.3.2.9 Kaldırma Yüğü Katsayısı “ ψ ” Saptanması

Kaldırma yüğü katsayısı, krenin yük kaldırma hızı ve kaldırma sınıfına bağlı olarak saptanmaktadır. Bu katsayının büyüklüğü Çizelge 2.6'da verilen değerlerden bulunur.

Çizelge 2. 6 Kaldırma yükü katsayısı [6]

Kaldırma Sınıfı	Kaldırma yükü katsayısı ψ , kaldırma hızı v_H m/dak olarak	
	$v_H \leq 90$	$v_H \geq 90$
H1	$1,1+0,0022 \cdot v_H$	1,3
H2	$1,2+0,0044 \cdot v_H$	1,6
H3	$1,3+0,0066 \cdot v_H$	1,9
H4	$1,4+0,0088 \cdot v_H$	2,2

2.3.2.10 Öz Ağırlık Katsayısı “ Φ ” Saptanması

Öz ağırlık katsayısı, krenin hareket hızı “ v_F ” ye bağlıdır. Çizelge 2.7’den seçilebilir.

Çizelge 2. 7 Öz ağırlık katsayısı [6]

Hareket hızı v_F , m/dak		Öz ağırlık katsayısı ϕ
Hareket yolu		
Yürüyüş darbeli, ray engebeli veya araları boşluklu ise	Yürüyüş darbesiz, ray düzgün, ray araları kaynatılmış ve işlenmiş ise	
$v_F \leq 60$	$v_F \leq 90$	1,1
$60 < v_F \leq 200$	$90 < v_F \leq 300$	1,2
$200 \geq v_F$	$300 \geq v_F$	$\geq 1,2$

2.3.2.11 Rüzgâr Kuvveti

Rüzgâr basıncı, krenin işletme anındaki rüzgâr basıncının hesabını basitleştirmek için bazı kabuller yapılır. Rüzgâr hızını sabit ve herhangi bir yönden yatay olarak kabul edelim. Bu kabullere göre rüzgâr basıncı şu büyüklükte olur:

$$q_{R\ddot{u}} = 0,613 \cdot v_{R\ddot{u}}^2 \quad (2.3)$$

(2.3)’deki denklemde $q_{R\ddot{u}}$ (N/m^2) Rüzgârın dinamik özgül basıncını ve $v_{R\ddot{u}}$ (m/s) Rüzgârın kabul edilen hesapsal hızını göstermektedir [6].

Rüzgârın işletmedeki hesapsal dinamik basıncı, tahmini olarak Çizelge 2.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. 8 Rüzgârın işletmedeki hesapsal dinamik basıncı değerleri [6]

Kren tipi	Dinamik basınç $q_{R\ddot{u}} \approx \text{N/mm}^2$	Rüzgâr hızı	
		$v_{R\ddot{u}} \approx \text{m/s}$	$v_{R\ddot{u}} \approx \text{km/h}$
Çok hafif rüzgâr etkisinde çalışan krenler. Montaj krenleri vb.	125	14	50
Açık sahada çalışan normal krenler	250	20	75
Çok kuvvetli rüzgâr etkisinde çalışan krenler	500	28	100

Taşınan yükün rüzgâr kuvveti, konstrüksiyonun yanısıra taşınacak yükün de rüzgâr etkisinde kaldığı dikkate alınarak rüzgâr kuvveti bulunup hesaplara dahil edilmelidir. Taşınan yükün rüzgâr kuvveti (2.4)’deki eşitlikle hesaplanır.

$$F_{R\ddot{u}Y} = 2,5 \cdot A_Y \cdot q_{R\ddot{u}} \quad (2.4)$$

(2.4) eşitliğinde $F_{R\ddot{u}Y}$ (N/m²) Rüzgârın yükte oluşturduğu kuvveti, A_Y (m²) Yükün rüzgâra karşı alanını ve $q_{R\ddot{u}}$ (N/m²) Rüzgârın dinamik özgül basıncını tanımlamaktadır. Bu hesaplar, eğer kren yük nakli veya yükleme-boşaltma tesisi için sürekli çalışmak üzere özel olarak imal edilecekse yapılır. Normal çalışan krenlerde bu kuvvet dikkate alınmaz. Çünkü kuvvetli rüzgâr altında genelde kren çalıştırılmaz [6].

2.3.2.12 FEM Normlarına göre Emniyetli Gerilme Değerleri

FEM’e göre kren hesaplarında kullanılacak emniyetli mukavemet değerleri Çizelge 2.9 ve 2.10’da gösterilmiştir [6].

Çizelge 2. 9 Yükleme halleri için emniyet katsayıları [6]

Yükleme Hali	I. Hal	II. Hal	III. Hal
Emniyet katsayısı, S_{EM}	1,5	1,33	1,1
Emniyetli mukavemet değeri, σ_{EM}	R_e/S_{EM}	R_e/S_{EM}	R_e/S_{EM}

Çizelge 2. 10 St37, St44 ve St52 için emniyetli mukavemet değerleri [6]

Malzeme	Akma mukavemeti değeri R_e (N/mm ²)	Emniyetli mukavemet değerleri, σ_{EM}		
		I. Hal (N/mm ²)	II. Hal (N/mm ²)	III. Hal (N/mm ²)
St37 (Fe 360 ; E 24)	240	160	180	215
St44 (Fe 430 ; E 26)	260	175	195	240
St52 (Fe 510 ; E 36)	360	240	270	325

2.3.2.13 FEM'e göre Bu Çalışmada Kullanılan Birim Kiriş İçin Mukavemet Hesabı

FEM'e göre I.Hal rüzgâr kuvveti olmayan normal işletmeler için kullanılan kren kiriş konstrüksiyonundaki maksimum normal gerilme hesabı için eşitlik (2.1) kullanılır. İlk önce eşitlikteki gerilme değerleri, k_B yükleme grubu katsayısı ve kaldırma yükü katsayısı ψ hesaplanır. Ardından bulunan değerlerin toplanmasıyla bu çalışmada kullanılan kiriş için maksimum normal gerilme değeri elde edilmiş olur. Ayrıca, elde edilen bu maksimum normal gerilme değeri kirişin emniyetli gerilme değerine göre kontrolü yapılır. Kren kirişlerindeki normal gerilmeler; σ_1 ;Kren kirişinin öz ağırlığından oluşan gerilme, σ_2 ;Arabanın öz ağırlığından oluşan gerilme, σ_3 ;Kaldırma yükünden ileri gelen gerilme, σ_4 ;Atalet kuvvetlerinden ileri gelen gerilme, σ_5 ;Araba kasılmasından ileri gelen gerilme olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, kaldırılan yükün ağırlığı ve kiriş üzerindeki arabanın öz ağırlığı kiriş üzerinde hareket eden tekil bir ağırlık olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla hesaplarda σ_2 ve σ_5 gerilme değeri hesaplanmayacaktır. k_B değeri Çizelge 2.3'de yükleme grubunun belirlenmesinden sonra Çizelge 2.5'den saptanır. Kaldırma yükü katsayısı ψ ise Çizelge 2.6'dan kaldırma hızına göre belirlenir. Bu çalışmada $k_B=1,13$ ve $\psi=0,0264$ olarak alınacaktır.

Kren kirişinin öz ağırlığından oluşan gerilme;

$$\sigma_1 = \frac{\mu \cdot g \cdot L^2}{8 \cdot W_x} = \frac{100 \times 9,81 \times (20)^2}{8 \times 1415 \times 10^{-6}} = 34,7 (MPa) \quad (2.5)$$

Kaldırma yükünden ileri gelen gerilme;

$$\sigma_3 = \frac{P \cdot L}{8 \cdot W_x} = \frac{7848 \times 20}{8 \times 1415 \times 10^{-6}} = 13,8 (MPa) \quad (2.6)$$

Atalet kuvvetlerinden ileri gelen gerilme;

Bu gerilme değerini hesaplaya bilmemiz için öz ağırlık katsayısı olan φ , Çizelge 2.7'den hesaplanır. Burada, $\varphi=1,1$ olarak alınır.

$$\sigma_4 = \frac{0,075 \cdot L}{W_y} [\varphi \cdot \mu \cdot g \cdot L] = \frac{0,075 \times 20}{842 \times 10^{-6}} [1,1 \times 100 \times 9,81 \times 20] = 38,5 (MPa) \quad (2.7)$$

Bulunan değerler eşitlik (2.1)'de yerine konursa denklem (2.8)'deki gibi bir sonuç elde edilir.

$$\sigma_{\max} = k_B (\sigma_1 + \psi \cdot \sigma_3 + \sigma_4) = 1,13 \times (34,7 + 0,0264 \times 13,8 + 38,5) = 83,13 (MPa) \quad (2.8)$$

Elde edilen bu değer, eşitlik (2.9)'da kiriş malzemesinin emniyetli gerilme değeri ile karşılaştırılmıştır. Kirişin emniyetli gerilme değeri σ_{EM} , Çizelge 2.10'dan I.Hal ve St37 malzemesi için elde edilir.

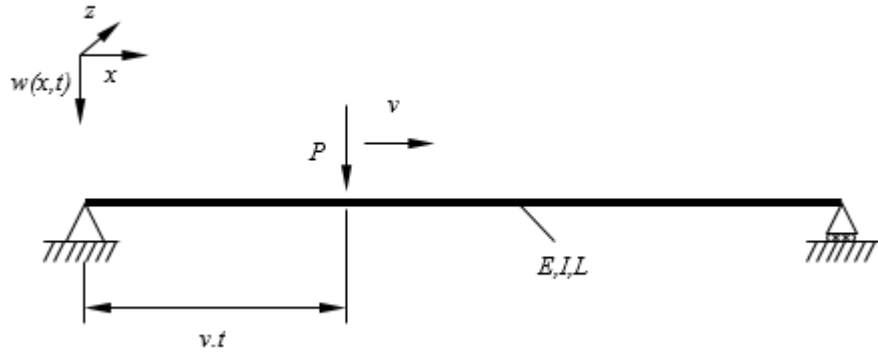
$$\sigma_{\max} = 83,13 (MPa) < \sigma_{EM} = 160 (MPa) \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.9)'da görüldüğü gibi maksimum normal gerilme değeri kirişin emniyetli gerilme değerinden küçük olmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada kren kirişi rahatlıkla kullanılabilir.

KRENLERDE HAREKETLİ YÜK PROBLEMİ

Hareketli yük altındaki kiriş benzeri yapıların titreşim analizi, yapı dinamiğinde ve üzerinde hareket eden yükler bulunan demir yolu, karayolu köprülerinde, viyadüklerde ve buna benzer birçok mühendislik alanında önemli bir konudur [8]. Hareketli yükler transport sistemlerinde özellikle krenlerde de önemli dinamik etkilere neden olurlar. Son yıllarda hareketli yüklerin daha hızlı hareket ettirilmesi beklenirken aynı zamanda daha ince ve hafif yapıların tasarımı için istenmesi hareketli yük probleminin neden olduğu dinamik etkileri arttırmaktadır [8].

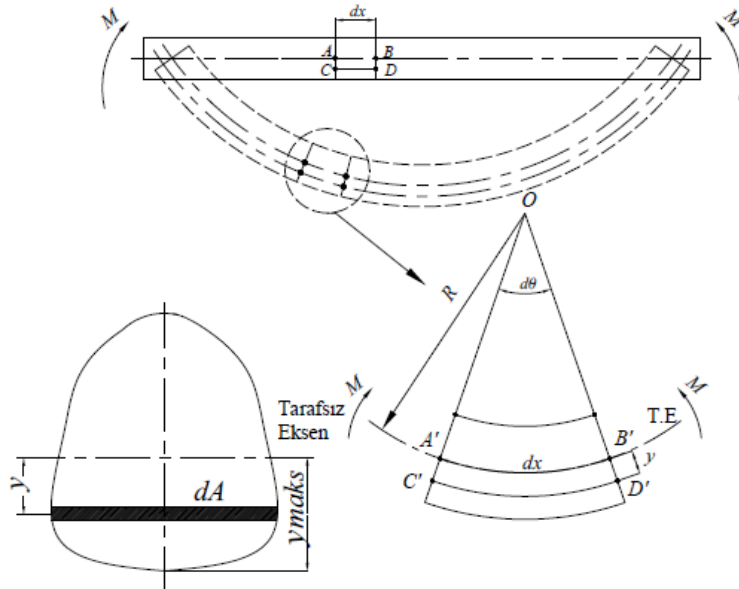
Üzerinde hareketli yük bulunan kren ana kirişini temsil eden homojen, izotropik, basit besnetli Euler-Bernoulli tipi kirişin fiziksel modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Fiziksel model taşıyıcı kiriş, üzerinde v sabit bir hız ile hareket eden bir tekil P yükünden oluşmaktadır. Kren kirişlerinin kesit ebatları genellikle boyuna göre küçük olduğundan dolayı bu kirişler Euler-Bernoulli kirişi olarak adlandırılırlar. Kirişin dönme ataleti ve kayma yer değiştirmesi dikkate alınmamaktadır [9].



Şekil 3. 1 Tekil kuvvet şeklinde bir hareketli yüke maruz kren kirişi

3.1 Kirişin Hareket Denklemi

Hareket denklemlerini elde etmek için sadece eğilme etkisindeki bir kirişi ele almak gereklidir. Bu kiriş örneği Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Eğilme etkisindeki bir kirişin üst kısmında basma gerilmesinden dolayı kısalma, alt kısmında ise çekme gerilmesinden dolayı uzama meydana gelmektedir. Kısalma ve uzamanın arasında boyuna yer değiştirmenin sıfır olduğu bir nokta vardır. Bu noktadan geçen doğruya tarafsız eksen denmektedir [9].



Şekil 3. 2 Eğilme etkisindeki bir kiriş örneği [9]

Kiriş üzerinde dx aralığında tarafsız eksen üzerinde olan AB ve y uzaklığındaki CD doğruları incelenmektedir. Eğilme etkisiyle CD uzayarak $C'D'$ olur. AB tarafsız ekseninde olduğu için aynı uzunlukta $A'B'$ olur. $A'B'$ eğrisinin yarıçapı R olmaktadır. Küçük açılar için, $AB = A'B' = CD = dx = R d\theta$ yazılabilir. y mesafesindeki $C'D'$, $C'D' = (R+y)d\theta$ değerini almaktadır. Birim uzama ε_x , (3.1) eşitliğinde verilmiştir [9].

$$\varepsilon_x = \frac{C'D' - CD}{CD} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_x = \frac{(R+y)d\theta - R d\theta}{R d\theta}$$

Sadeleştirme işleminden sonra $\varepsilon_x = y/R$ olarak elde edilir. $R = dx/d\theta$ olduğundan (3.2) eşitliği elde edilir.

$$\varepsilon_x = y \frac{d\theta}{dx} \quad (3.2)$$

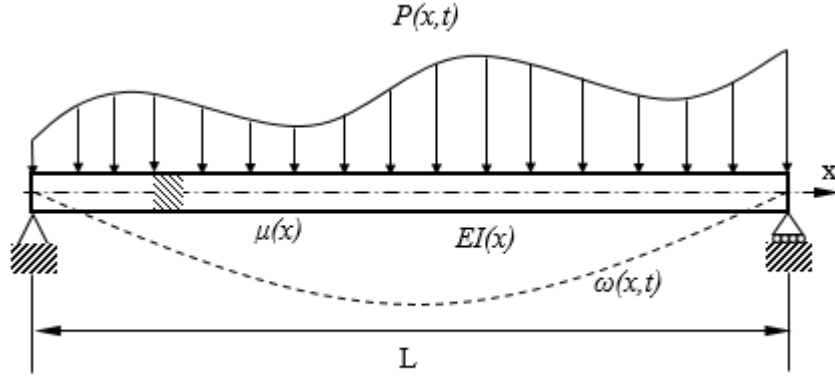
Kiriş kesitinin eğimi, θ olarak gösterilmiştir. Çok küçük açılar için, $Eğim = \tan\theta = \theta = dw/dx$ yazılabilir. Burada, dw enine yer değiştirme (3.2)'de yerine konulursa (3.3) eşitliği elde edilir.

$$\varepsilon_x = y \frac{d}{dx} \left(\frac{dw}{dx} \right) = y \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{My}{EI} \quad (3.3)$$

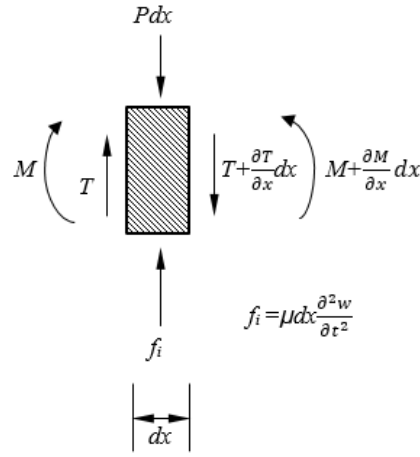
Burada eşitliğin her iki tarafındaki y 'ler gider ve moment ifadesi (3.4) şeklinde elde edilir.

$$M = EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4) kirişin enine yer değiştirmesi ile moment arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Şekil 3.3'de üzerinde zamana bağlı değişken $P(x,t)$ yükü bulunan $\mu(x)$ birim kütleli $EI(x)$ rijitliğindeki basit mesnetli bir kiriş gösterilmiştir. Kirişin tarama ile gösterilen kısmının serbest cisim diyagramı Şekil 3.4'de görülmektedir [9].



Şekil 3. 3 Basit mesnetli değişken yüklü kiriş



Şekil 3. 4 Kiriş bölümünün iç denge serbest cisim diyagramı

Kesme kuvvetindeki değişim (3.5) eşitliğinde yazılabilir.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = P(x,t) - \mu(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte $w(x,t)$ verilen nokta ve zamandaki kirişin enine yer değiştirmesidir. Kesme kuvveti ile moment arasındaki bilinen ilişki denklem (3.6)'da gösterilmiştir. Denklem (3.4)'den moment ifadesi denklem (3.7) gibi yazılabilir [9].

$$T(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} \quad (3.6)$$

$$M = EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (3.7)$$

Denklem (3.6) ve (3.7)'den kesme kuvveti eşitliğini gösteren denklem (3.8) elde edilir.

$$T = EI \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} \quad (3.8)$$

Kesme kuvvetindeki değişim denklem (3.9)'da ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9), denklem (3.5)'te yerine konulursa aşağıdaki denklem (3.10) elde edilir.

$$EI(x) \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = P(x,t) - \mu(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

Yükün kiriş üzerinde düzgün dağıldığını ve kiriş boyunca katılığın değişmediğini kabul edersek denklem aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = P(x,t) \quad (3.11)$$

Denklem (3.11) üzerinde $P(x,t)$ yükü bulunan sönümsüz kirişin kısmi diferansiyel hareket denklemi olup kiriş boyutuna ve zamana bağlı değişkenlere sahiptir [9].

3.1.1 Kirişin Doğal Frekans ve Mod Şekillerinin Çıkarılması

Denklem (3.11)'in homojen çözümünden doğal frekansları ve titreşim mod şekillerini elde ederiz. Homojen çözüm için denklemde dış kuvvet sıfır yapılır [9].

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.12)$$

Kirişin davranışının zamana bağlı bir fonksiyon ile kiriş üzerindeki pozisyona bağlı diğer bir fonksiyonun ürünü olduğunu kabul edersek denklem (3.13) elde edilir.

$$w(x,t) = G(x).Q(t) \quad (3.13)$$

Bu metod değişkenlerin ayrımı olarak adlandırılır ve denklem (3.11) gibi kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılır. Bu yeni ifadenin x ve t 'ye göre türevlendirilip denklem (3.11)'de yerine konması ile denklem (3.14) elde edilir [9].

$$EI.G'''(x).Q(t) + G(x).Q''(t) = 0 \quad (3.14)$$

Burada $(\cdot)$ zamana göre türevi, $(\cdot)'$ x 'e göre türevi ifade eder. Denklem (3.14) yeniden düzenlenirse aşağıdaki biçimi alır.

$$EI \frac{G'''(x)}{\mu G(x)} = - \frac{Q''(t)}{Q(t)} \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'in sol tarafı değişken x 'e, sağ tarafı ise zamana bağlıdır. Eğer iki değişkene bağlı iki eşitlik birbirine eşitse bu eşitliklerin her biri bir sabit sayıya eşit olmak zorundadır. Buna ayırma sabiti denir ve denklem (3.16)'da gösterilmiştir [9].

$$EI \frac{G'''(x)}{\mu G(x)} = - \frac{Q''(t)}{Q(t)} = \omega_j^2 \quad (3.16)$$

Sistemin öz frekansının karesine eşittir. Denklem (3.16)'dan biri x 'e diğeri t 'ye bağlı iki adi diferansiyel denklem elde edilir.

$$G'''(x) - \frac{\mu \omega_j^2}{EI} G(x) = 0 \quad (3.17)$$

$$-Q''(t) + \omega_j^2.Q(t) = 0$$

Elde edilen denklem (3.17), basit mesnetli kiriş için uç noktalarda yer değiştirmeler ve momentlerin sıfır sınır şartları ile çözümüyle kirişin dairesel titreşim frekansları ve titreşim mod şekilleri elde edilir. Basitlik olması için aşağıdaki denklem (3.18) eşitliği yazılmıştır [9].

$$b^2 = \frac{EI}{\mu} \quad (3.18)$$

Denklem (3.17)'deki birinci eşitliğe, denklem (3.18) yerine yazılırsa denklem (3.19) elde edilir.

$$G''''(x) - \frac{\omega_j^2}{b^2} G(x) = 0 \quad (3.19)$$

Çözümü, denklem (3.20)'deki gibi kabul edelim.

$$G(x) = A e^{rx} \quad (3.20)$$

Denklem (3.19)'un karakteristik denklemi, denklem (3.21)'deki şeklini alır.

$$r^4 - \frac{\omega_j^2}{b^2} = 0 \quad (3.21)$$

Karakteristik denklemin kökleri aşağıda gösterildiği gibidir.

$$(r_1 = \sqrt{\omega/b}), (r_2 = -\sqrt{\omega/b}), (r_3 = i\sqrt{\omega/b}), (r_4 = -i\sqrt{\omega/b}) \quad (3.22)$$

Bu karakteristik denklem köklerini göz önüne alırsak genel çözüm denklem (3.23)'deki gibidir.

$$G(x) = A_1 e^{r_1 x} + A_2 e^{r_2 x} + A_3 e^{r_3 x} + A_4 e^{r_4 x} \quad (3.23)$$

Denklem (3.23) şu şekilde de yazılabilir.

$$G(x) = C_1 \cosh \sqrt{\omega/b} x + C_2 \sinh \sqrt{\omega/b} x + C_3 \cos \sqrt{\omega/b} x + C_4 \sin \sqrt{\omega/b} x \quad (3.24)$$

Basit mesnetli bir kirişin sınır şartlarında kiriş uç noktalarında yer değiştirme ve moment sıfır olarak alınır. Bu ifadenin açılımı denklem (3.25)'de gösterilmiştir.

$$G(0) = 0, G(L) = 0, G''(0) = 0, G''(L) = 0 \quad (3.25)$$

$G(0)=0$ için denklem (3.24)'den $C_1+C_3=0$ elde edilir. İkinci türev alınıp denklem (3.24)'de yerine yazılırsa $G''(0)=0$ için $C_1-C_3=0$ elde edilir. Bundan dolayı $C_1=C_3=0$ elde edilir. $G(L)=0$ ve $G''(L)=0$ için ise sırasıyla denklem (3.26), (3.27) elde edilir.

$$C_2 \sinh \sqrt{\omega/b.L} + C_4 \sin \sqrt{\omega/b.L} = 0 \quad (3.26)$$

$$\omega/b.C_2 \sinh \sqrt{\omega/b.L} - C_4 \sin \sqrt{\omega/b.L} = 0 \quad (3.27)$$

Denklemler (3.26) ve (3.27) toplandığında ise denklem (3.28) elde edilir.

$$C_2 \sinh \sqrt{\omega/b.L} + 0 = 0 \quad (3.28)$$

Burada $C_2=0$ ve $G(L)=C_4.\sin \sqrt{\omega/b.L}=0$ olarak elde edilir. Bu eşitlikte C_4 sıfıra eşitlenemez dolayısıyla $\sin \sqrt{\omega/b.L}=0$ ifadesi sıfıra eşit olur. Buradan, aşağıdaki denklem (3.29) elde edilir.

$$\sqrt{\omega/b.L} = j\pi, j = 1, 2, 3, \dots \quad (3.29)$$

Denklem (3.29) tekrardan düzenlenirse denklem (3.30) elde edilir.

$$\omega_j = \frac{j^2 \pi^2}{L^2} b \quad (3.30)$$

Denklem (3.18)'den b yerine konursa kirişin dairesel frekansı, ω_j ve titreşim mod şekli, $G_j(x)$ aşağıda verilen denklemlerde gösterildiği gibi elde edilir.

$$\omega_j^2 = \frac{j^4 \pi^4 . EI}{\mu L^4} \quad j= 1, 2, 3, \dots \quad (3.31)$$

$$G_j(x) = C.\sin(j\pi x) \quad j=1, 2, 3, \dots \quad (3.32)$$

Basit mesnetli bir kirişin doğal titreşim frekansı denklem (3.31)'den aşağıdaki gibi elde edilir [9].

$$f_j = \frac{\omega_j}{2\pi} = \frac{j^2 \pi}{2L^2} \left(\frac{EI}{\mu} \right)^{1/2} \quad (3.33)$$

3.2 Problemin Formülasyonu

Hareketli yük probleminin formülasyonu için literatürde Fryba'nın [11], Esen'nin [9] doktora tezinde ve Hasan'ın [5] yüksek lisans tezinde kullanılan matematiksel ifadeler ve bazı kabuller temel alınmıştır. [9] ve [5]'deki çalışmalardan farklı olarak hem sönümsüz hem sönümlü matematik modeller elde edilmiştir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi üzerinde tekil ve noktasal yük bulunan ana kren kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen, izotropik Euler-Bernoulli tipi kirişi ele alınmıştır.

Sistemin modellenmesinde aşağıda verilen kabuller temel alınmıştır.

1. Kirişin davranışı, uygulanan küçük yer değiştirmeler, Hooke Kanunu, Navier hipotezi ve Saint-Venant prensibi varsayımlarıyla Euler-Bernoulli diferansiyel denklemi ile tanımlanmıştır. Kiriş sabit kesitli ve birim uzunluk başına ağırlığı sabittir.
2. Hareketli yükün kütlesi, kirişin kütlesiyle karşılaştırıldığında küçüktür. Bu nedenle sadece yükün yerçekimi etkisi dikkate alınmıştır.
3. Kiriş üzerindeki yük, sabit hızda kirişin sol ucundan sağ ucuna doğru hareket etmektedir.
4. Kirişin titreşim sönümlemesi titreşim hızıyla orantılıdır.
5. Hesaplamalar kirişin her iki ucunda da eğilme momenti ve yer değiştirmelerin sıfır olduğu basit mesnetli bir kirişe uygulanmıştır. Kuvvet harekete başlamadan önce kiriş hareketsizdir.
6. Yük arabaya kütsüz ve rijit bir çubuk ile bağlanmıştır.
7. Kiriş üzerindeki toplam yük noktasal yük olup, arabanın ve kaldırılan yükün toplamına eşittir.

Sistemin hareketini yöneten kısmi diferansiyel denklem, denklem (3.11)'de verilen hareket denkleminin titreşimlerin sönümlenmesini temsil eden ifadenin eklenmesi ve hareketli dış kuvvetin yerleştirilmesi ile yukarıda yapılan kabuller altında bu problem denklem (3.34) ile tanımlanmıştır [9], [11].

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + 2\mu\omega_b \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = P\delta(x-vt) \quad (3.34)$$

Burada, E Young modülü, I atalet momenti, μ kirişin birim ağırlığı, x kirişin koordinat eksenini, t zaman, $w(x,t)$ kirişin düşey yer değiştirmesi, ω_b sönüm dairesel frekansı, P hareketli yükün kuvveti, $\delta(x-v.t)$ Dirac-delta fonksiyonudur [11].

Basit mesnetli bir kirişin sınır ve başlangıç şartları ($x=0$ ve $x=L$ için), (3.35) ve (3.36) eşitliklerindeki gibi ifade edilebilir [11].

$$w(0,t) = w(L,t) = \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (3.35)$$

$$w(x,0) = \frac{\partial w(x,0)}{\partial t} = 0 \quad t=0 \text{ için} \quad (3.36)$$

Mekanikte Dirac-delta fonksiyonu, $\delta(x)$, $x=0$ noktasında hareket eden birim konsantre kuvvet olarak düşünülebilir. Dirac-delta fonksiyonu (3.37) eşitliğinde Heaviside fonksiyonunun dağılımsal türevi olarak tanımlanmıştır. $H(x)$ fonksiyonu, Heaviside birim fonksiyonu olarak eşitlik (3.38)'deki gibi tanımlanmaktadır [11], [12].

$$\delta(x) = \frac{dH(x)}{dx} \quad (3.37)$$

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{için } x < 0 \\ 1 & \text{için } x \geq 0 \end{cases} \quad (3.38)$$

Kiriş üzerindeki yükü ifade eden genelleştirilmiş bir fonksiyon olan Dirac-delta fonksiyonu denklem (3.39) ve (3.40) ifadelerinde gösterilmiştir.

$$p(x,t) = \delta(x)P \quad (3.39)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (3.40)$$

Aşağıda gösterilen denklemler Dirac-delta fonksiyonu (a , b , ξ sabitler ve $f(x)$, $[a,b]$ aralığında sürekli bir fonksiyondur) arasındaki ilişkileri göstermektedir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-a) f(x) dx = f(a) \quad (3.41)$$

$$\int_a^b \delta(x-\xi) f(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{için } \xi < a < b \\ f(\xi) & \text{için } a < \xi < b \\ 0 & \text{için } a < b < \xi \end{cases} \quad (3.42)$$

Dirac-delta fonksiyonunun n 'inci dereceden genelleştirilmiş türevini daha genel olarak tanım için (3.43) ifadesi kullanılabilir.

$$\int_a^b \delta^{(n)}(x-\xi) f(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{için } \xi < a < b \\ (-1)^n f^{(n)}(\xi) & \text{için } a < \xi < b \\ 0 & \text{için } a < b < \xi \end{cases} \quad (3.43)$$

3.2.1 Problemin Çözüm Metodu

Sırasıyla, sınır ve başlangıç koşulları olan denklem (3.35) ve (3.36), denklem (3.34) ile birlikte integral dönüşüm metodu yardımıyla çözülmüştür. İlk olarak denklem (3.34)'ün her terimi $\sin(j\pi x/L)$ ile çarpılmıştır ardından 0 ve L aralığında x 'e bağlı olarak integrali alınmıştır. Denklem (3.34)'ü çözmek için Fourier sinüs sonlu integral dönüşümü yardımıyla denklem (3.44) elde edilmiştir. Ek-A, Çizelge A.1'de Fourier sinüs sonlu integral dönüşümleri verilmiştir.

$$V(j,t) = \int_0^L w(x,t) \sin \frac{j\pi x}{L} dx \quad j=1, 2, 3, \dots \quad (3.44)$$

$$w(x,t) = \frac{2}{L} \sum_{j=1}^{\infty} V(j,t) \sin \frac{j\pi x}{L}$$

Denklem (3.44), orjinal $w(x,t)$ 'nin dönüşümünün $V(j,t)$ olduğunu göstermektedir. Verilen yöntemler ile sınır koşulları (3.35) ve Dirac fonksiyonunun, (3.41) eşitliğindeki özelliklerini kullanarak Çizelge A.1'deki Fourier sinüs sonlu integral dönüşüm metodu yardımıyla (A 1.1)'den (A 1.4)'e kadar dönüşümler yapılarak denklem (3.45) elde edilmiştir.

$$\frac{j^4 \pi^4}{L^4} EIV(j,t) + \mu \ddot{V}(j,t) + 2\mu\omega_b \dot{V}(j,t) = P \sin \frac{j\pi vt}{L} \quad (3.45)$$

Basit mesnetli bir kirişin j 'inci mod titreşimindeki dairesel frekansı denklem (3.46)'de gösterilmiştir. Doğal frekans ise denklem (3.47)'da gösterilmektedir.

$$\omega_j^2 = \frac{j^4 \pi^4 EI}{L^4 \mu} \quad (3.46)$$

$$f_j = \frac{\omega_j}{2\pi} = \frac{j^2 \pi}{2L^2} \left(\frac{EI}{\mu} \right)^{1/2} \quad (3.47)$$

Hareketli yükün kirişi etkileyen dairesel frekansı ise denklem (3.48)'de ifade edilmektedir.

$$\omega = \frac{\pi v}{L} \quad (3.48)$$

(3.45) eşitliği, denklem (3.46), (3.47), (3.48) kullanılarak düzenlendiğinde (3.49) ifadesi elde edilir.

$$\ddot{V}(j,t) + 2\omega_b \dot{V}(j,t) + \omega_j^2 V(j,t) = \frac{P}{\mu} \sin j\omega t \quad (3.49)$$

(3.49) ifadesini çözmek için Laplace-Carson integral dönüşüm metodu kullanılmıştır. Bu amaçla, Denklem (3.49) ilk olarak e^{-pt} ile çarpılmış ve her bir terimi t 'ye bağlı olarak 0 ve ∞ aralığında integrali alınmış ardından p ile çarpılmıştır. Burada, p kompleks düzlemdeki bir değişkendir. Ek-A, Çizelge A.2'de bu hesaplamalarda kullanılan Laplace-Carson integral dönüşüm metodu ve yukarıdaki işlemlerin uygulanmasıyla (3.50) eşitliği elde edilmiştir [11].

$$V^*(j, p) = p \int_0^{\infty} V(j, t) \cdot e^{-pt} \cdot dt \quad (3.50)$$

$$V(j, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a_0 - i\infty}^{a_0 + i\infty} e^{tp} \frac{V^*(j, p)}{p} dp$$

(3.50) ifadesinde ikinci eşitlikte yer alan a_0 integrasyonu, kompleks değişken $e^{tp} \cdot V(j, t) / p$ 'nin fonksiyonun tüm tekilliklerinin sağında kalan sanal eksene paralel düz

bir çizgi boyunca uygulandığını ifade etmektedir. Burada, $i = \sqrt{-1}$ kompleks sayıdır [11].

Denklem (3.49), (3.50) eşitliği, başlangıç koşulları (3.36) ve Laplace-Carson integral dönüşüm metodu Çizelge A.2’de (A 1.5)’den (A 1.10)’a kadar olan eşitliklere göre dönüştürülerek (3.51) eşitliği elde edilir ve (3.52) ifadesindeki gibi düzenlenebilir.

$$p^2 V^*(j, p) + 2\omega_b p V^*(j, p) + \omega_j^2 V^*(j, p) = \frac{Pj\omega}{\mu} \frac{p}{p^2 + j^2 \omega^2} \quad (3.51)$$

$$V^*(j, p) = \frac{Pj\omega}{\mu} \frac{p}{p^2 + j^2 \omega^2} \frac{1}{p^2 + 2\omega_b p + \omega_j^2} \quad (3.52)$$

Kompleks değişkenli fonksiyon (3.52) kutup pozisyonlarına bağlı olarak, aşağıdaki iki boyutsuz parametrenin girilmesi ile analizi daha kolay hale getiren birkaç durum arasında ayırım yapılır. Burada, hız parametresini (3.53) ve sönümlleme parametresini ifade eden (3.54) aşağıda verilmiştir [11].

$$\alpha = \frac{\omega}{\omega_j} = \frac{v}{2 f_j L} = \frac{T_j}{2t} = \frac{vL}{\pi} \left(\frac{\mu}{EI} \right)^{(1/2)} = \frac{v}{v_{kr}} \quad (3.53)$$

$$\beta = \frac{\omega_b}{\omega_j} = \frac{\omega_b L^2}{\pi^2} \left(\frac{\mu}{EI} \right)^{(1/2)} \quad (3.54)$$

(3.53) ve (3.54) eşitliklerinde kullanılan bazı değerler aşağıda verilmiştir. Bunlar;

(3.55) eşitliği, j 'inci mod serbest titreşim periyodudur. (3.56) eşitliği, kiriş üzerinde hareket eden yükün hareket süresidir. (3.57) eşitliği, hareketli yükün kritik hızıdır [11].

$$T_j = \frac{1}{f_j} \quad (3.55)$$

$$t = \frac{L}{v} \quad (3.56)$$

$$v_{kr} = 2 f_j L = \frac{\pi}{L} \left(\frac{EI}{\mu} \right)^{1/2} \quad (3.57)$$

(3.58) eşitliği, $x=L/2$ noktasında statik tekil bir kuvvet P ile yüklü bir kirişin statik yer değişimini ifade etmektedir [11].

$$v_0 = \frac{PL^3}{48EI} \approx \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \quad (3.58)$$

Hafif sönümlü ($0 < \beta < 1$) bir kirişin dairesel frekansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\omega'_{(j)}{}^2 = \omega_{(j)}^2 - \omega_b^2 \quad (3.59)$$

Hafif sönümleme durumunda (3.52) eşitliğinin dört kutbu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} 1.kutup &= i.j.\omega, & 3.kutup &= -\omega_b + i\omega'_{(j)}, \\ 2.kutup &= -i.j.\omega, & 4.kutup &= -\omega_b - i\omega'_{(j)}. \end{aligned} \quad (3.60)$$

$p^2 + 2\omega_b p + \omega_{(j)}^2 = (p + \omega_b)^2 + \omega_{(j)}'^2$ olduğundan orijinal $V(j,t)$, Çizelge A.2 eşitlik (A 1.10) yardımıyla hesaplanabilir. Denklem (3.44)'deki birinci eşitlik yine aynı denklemdeki ikinci eşitlikte yerine konulup, ters Fourier dönüşümü yapıp, $t \leq T$ için bazı düzenlemelerden sonra kirişteki sehimin analitik ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir [9].

$$\begin{aligned} w(x,t) &= \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2[j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2]} \sin \frac{j\pi x}{L} \\ &\left[\begin{aligned} &j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha[j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} \\ &e^{-\omega_b t} \cdot \sin \omega'_{(j)} t - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cdot \cos \omega'_{(j)} t) \end{aligned} \right] \quad (3.61) \end{aligned}$$

Burada, (3.59) eşitliği tekrar düzenlendiğinde hafif sönümlü kirişin dairesel frekansı olan $\omega'_{(j)} = \sqrt{\omega_{(j)}^2 - \omega_b^2}$ ifadesi elde edilir.

Eğilme momenti ($M(x,t)$) ve Kesme kuvveti ($T(x,t)$) ifadeleri, eşitlik (3.61)'in denklem (3.62) ve (3.63)'de bulunan eşitliğinde yerine yazılıp gerekli işlemlerin uygulanmasıyla elde edilmiştir [11].

$$M(x,t) = -EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (3.62)$$

$$T(x,t) = -EI \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} \quad (3.63)$$

P , tekil kuvvetinin statik olarak uygulandığı durumda kiriş orta açıklığındaki statik eğilme momenti ve kesme kuvveti (3.64) ve (3.65) eşitliklerinde gösterilmiştir [11].

$$M_0 = \frac{PL}{4} \quad (3.64)$$

$$T_0 = P \quad (3.65)$$

Sonuç olarak hareketli tekil kuvvete maruz kirişte eğilme momenti ve kesme kuvvetini veren genel denklemler aşağıda gösterilmiştir [11].

$$M(x,t) = M_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{8j^2}{\pi^2} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2[j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2]} \\ [j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha[j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega'_{(j)} t - \\ - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega'_{(j)} t)] \quad (3.66)$$

$$T(x,t) = T_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2j^3}{\pi} \cos \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2[j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2]} \\ [j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha[j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega'_{(j)} t - \\ - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega'_{(j)} t)] \quad (3.67)$$

3.2.2 Sönümsüz Matematik Model

Sönümsüz ifadesi, kren kiriş malzemesi olarak kullanılan çelik yapının kendi iç sönümünün hesaplara dahil edilmediğini ifade etmektedir. Denklem (3.61), sırasıyla sınır ve başlangıç koşulları olan denklem (3.35) ve (3.36)'ya göre tekrar düzenlenir, sönümsüz durum için $\alpha \neq j$, $\beta = 0$, $\omega_b = 0$ alınır ve $x \leq x$, $v.t \leq L$ için düzenlenirse sönümsüz durumda kirişin zamana bağlı enine yer değiştirmelerini veren (3.68) ifadesi elde edilir.

$$w(x,t) = \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(j^2 - \alpha^2)} \left(\sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} \sin \omega'_{(j)} t \right) \quad (3.68)$$

Bu çalışmada (3.68) ifadesi, kren kirişlerinde hareketli yük altındaki sönümsüz dinamik yer değiştirme davranışlarını veren matematik model olarak kullanılacaktır.

Bu durumda, sönümsüz haldeki kiriş için eğilme momenti ve kesme kuvvetini veren formülasyonlar ise aşağıdaki gibi düzenlenebilir [11], [9], [5].

$$M(x,t) = M_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(1-\alpha^2/j^2)} \left(\sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} \sin \omega_{(j)} t \right) \quad (3.69)$$

$$T(x,t) = P_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \cos \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(1-\alpha^2/j^2)} \left(\sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} \sin \omega_{(j)} t \right) \quad (3.70)$$

3.2.3 Sönümlü Matematik Model

Sönümlü ifadesi, kren kiriş malzemesi olarak kullanılan çelik yapının kendi iç sönümünün hesaplara dahil edildiğini ifade etmektedir. Denklem (3.61), sırasıyla sınır ve başlangıç koşulları olan denklem (3.35) ve (3.36)'ya göre tekrar düzenlenir, hafif sönümlü durum $\alpha \neq j$, $0 < \beta < 1$ ve $x \leq L$, $v.t \leq L$ için düzenlenirse hafif sönümlü durumda kirişin zamana bağlı enine yer değiştirmelerini veren (3.71) ifadesi elde edilir [11].

(Azeloğlu vd. [13]), kren kirişlerinde Rayleigh sönüm prensibine göre hesaplanan sönüm parametresini $\beta = 0,01$ olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada da sönüm parametresi $\beta = 0,01$ olarak alınmıştır.

$$w(x,t) = \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(j^2 - \alpha^2)} \left(\sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t \right) \quad (3.71)$$

Bu çalışmada (3.71) ifadesi, kren kirişlerinde hareketli yük altındaki hafif sönümlü dinamik yer değiştirme davranışlarını veren matematik model olarak kullanılacaktır.

Bu durumda, hafif sönümlü haldeki kiriş için eğilme momenti ve kesme kuvvetini veren formülasyonlar ise aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

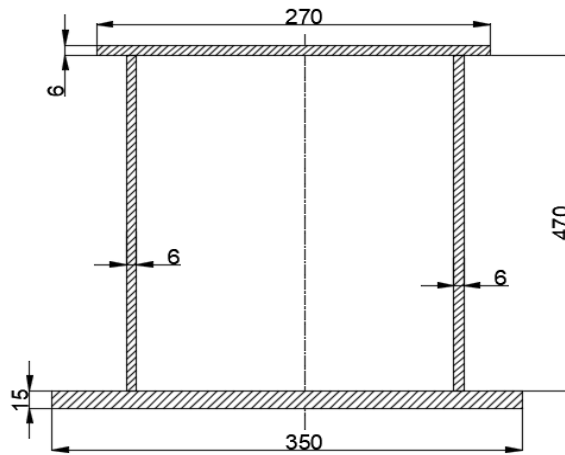
$$M(x,t) = M_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(j^2 - \alpha^2)} \left(\sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t \right) \quad (3.72)$$

$$T(x,t) = P_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \cos \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j(1-\alpha^2/j^2)} \left(\sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t \right) \quad (3.73)$$

BÖLÜM 4

KREN KİRİŞİNİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Bu bölümde, önceki bölümden elde edilen sönümsüz ve hafif sönümlü durumdaki matematik modeller Matlab programı kullanılarak çözülmüştür. Daha sonra çeşitli çalışma senaryoları için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Senaryolarda kiriş üzerindeki hareketli yükün hızı (v), sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 m/s olarak alınmıştır. Bu durumda yük, $t=0$ anında kirişin sol ucunda olup ve $t=L/v$ anında kirişin sağ ucuna ulaşmaktadır. Kirişe ait parametreler ise Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu çalışmada, m kiriş üzerindeki hareketli yükün kütlesi yani tekil kuvvet P ’yi ifade etmektedir. M ise kirişin özgül ağırlığını göstermektedir. Senaryolarda kütle oranı sırasıyla (m/M), 0,2 ve 0,4 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kütle oranları ve hızlara bağlı olarak toplam 12 senaryo için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de bu uygulamada kullanılan kren kirişinin kesit profili görülmektedir.



Şekil 4. 1 Kutu kiriş kesit profili

Çizelge 4. 1 Bu uygulamada kullanılan kren kirişinin malzeme özellikleri

Parametreler	Semboller	Değerler
Kiriş kesit alanı	A	$1,25 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
Young modülü	E	$2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Kiriş uzunluğu	L	20 m
Atalet momenti	I	$2,7 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Yer çekimi ivmesi	g	$9,81 \text{ m/s}^2$
Kiriş malzeme yoğunluğu	ρ	7900 kg/m^3
Kirişin kütlesi	$M=\rho AL$	2000 kg
Kirişin uzunluk birimi başına kütlesi	μ	100 kg/m

Uygulamalarda, sisteme ait hız parametrelerini (α) bulmak için kritik hız değeri (v_{kr}) hesaplanmıştır. Bu amaçla denklem (3.57) ve Çizelge 4.1'deki değerler kullanılmıştır. Bu sistem için elde edilen kritik hız değeri 37,4 m/s olarak hesaplanır. Buna göre her bir hıza karşılık gelen hız parametresi Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ardından tanımlanan senaryolar için benzetim çalışmalarına başlanmıştır.

Çizelge 4. 2 Farklı hızlardaki hız parametreleri

v [m/s]	α (Hız parametresi)
1	0.0267
2	0.0535
3	0.0802
4	0.1069
5	0.1337
6	0.1604

Hareketli tekil yükün hızı ile doğru orantılı olan hız parametre değeri 1'e yaklaştıkça kiriş anormal dinamik davranışlar sergilemektedir. Hareketli tekil yükün hızı, v_{kr} hız değerini aştığı zaman kirişte rezonans meydana gelmektedir. Böyle bir durumda kirişin

dinamik davranışlarını saptamak için yapılan benzetim çalışmaları uygun olmayan sonuçlar verecektir.

Kiriş üzerindeki hareketli tekil yükün etkisiyle kirişin doğal titreşim frekans değerleri değişmektedir. Kirişin mod değerine göre denklem (3.47)'de Çizelge 4.1'den elde edilen parametreleri yerine yazarak yüksüz kirişin doğal titreşim frekans değerlerini elde ederiz. Kirişin yüksüz durumdaki ilk üç doğal frekans değeri Çizelge 4.3'de görülmektedir.

Çizelge 4. 3 Kirişin yüksüz durumdaki ilk üç doğal frekans değerleri

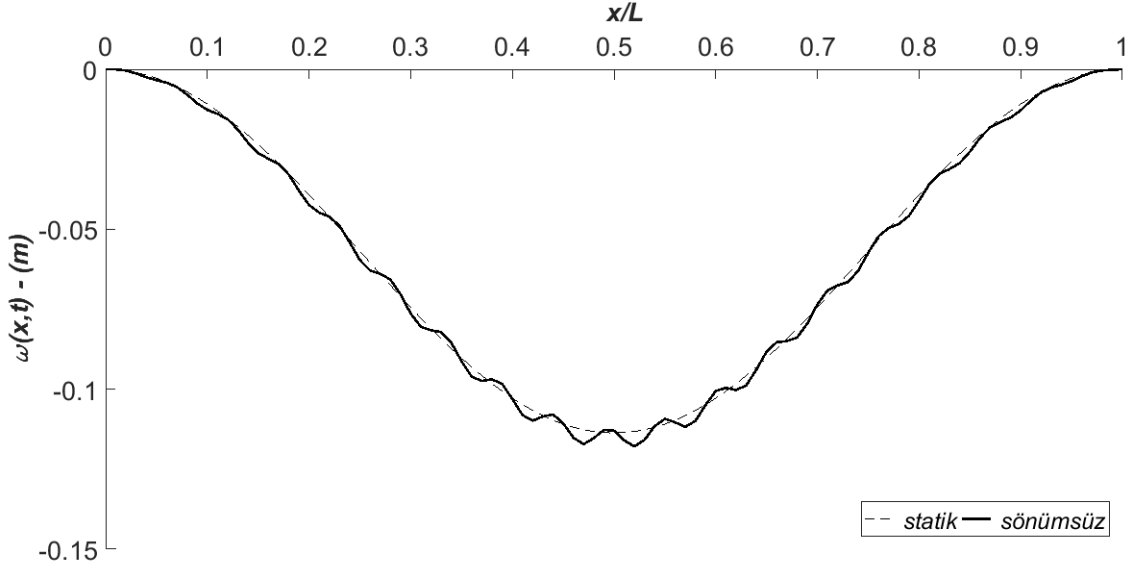
f_1 (1.mod) [Hz]	f_2 (2.mod) [Hz]	f_3 (3.mod) [Hz]
0,9351	3,7403	8,4158

4.1 Kiriş Yer Değiştirmelerinin Dinamik Analizi

Bu bölümde farklı kütle oranları ile farklı hızlar için kirişte oluşan sönümlü ve sönümsüz dinamik yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler statik yer değiştirme değerleriyle grafik ve tablolar halinde karşılaştırılmıştır. Kütle oranları (m/M) 0,2 ve 0,4 olarak belirlenmiş ve hareketli tekil yükün hızı sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 m/s alınmıştır.

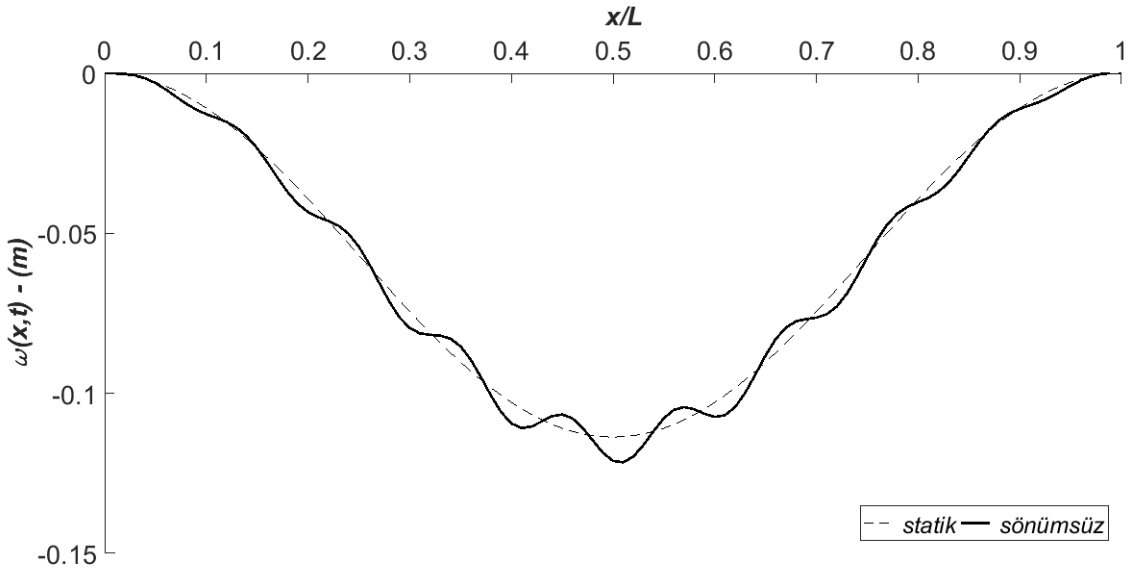
4.1.1 Kirişin Sönümsüz Yer Değiştirmelerinin Dinamik Analizi

Analizler ilk olarak kütle oranı 0,2 için ardından 0,4 için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m'de oluşmaktadır.



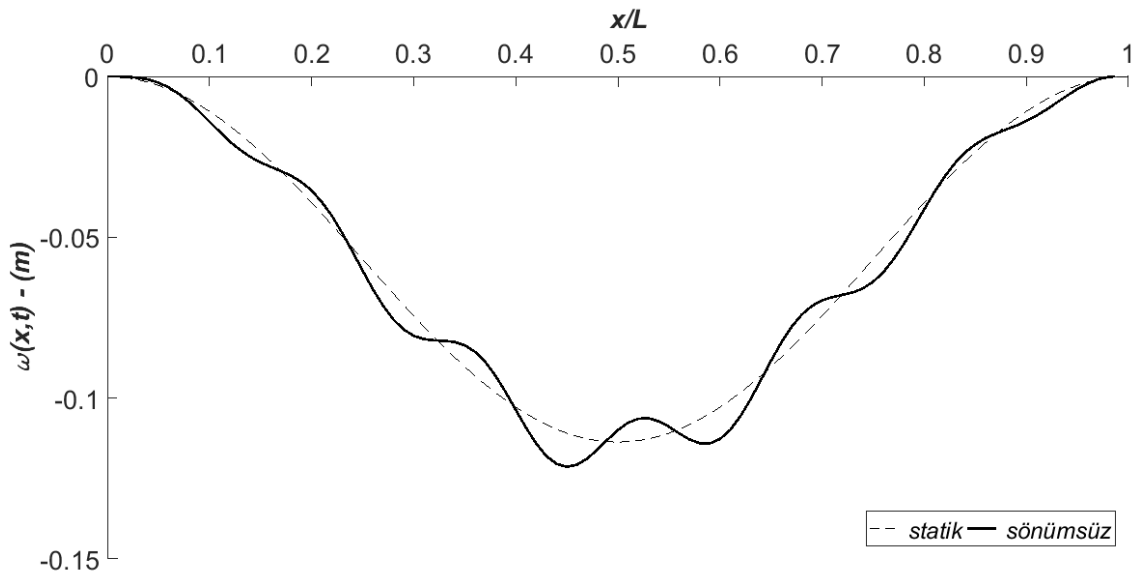
Şekil 4. 2 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.3’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



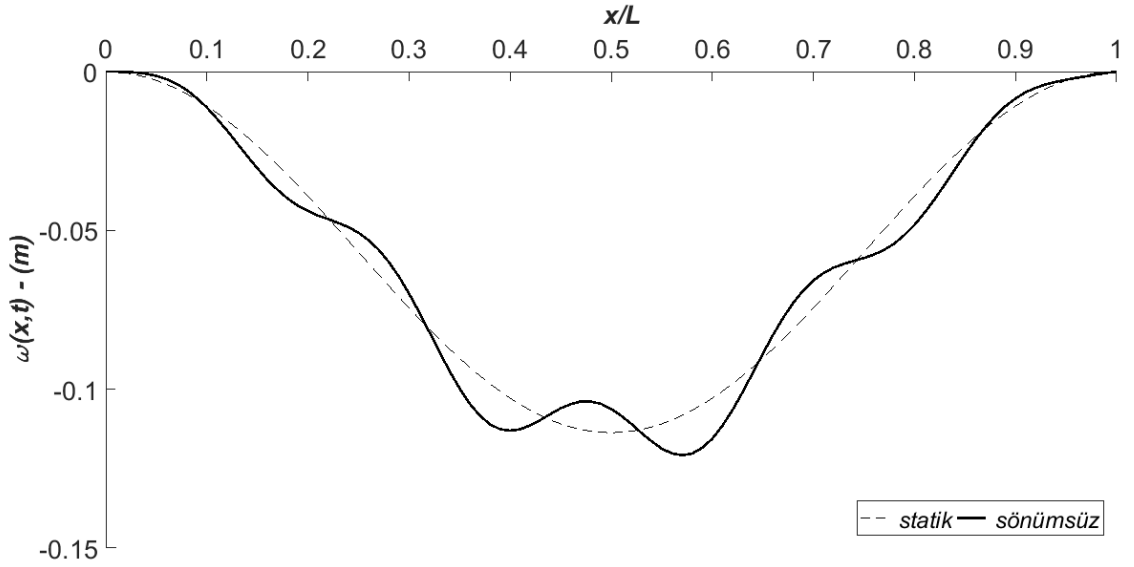
Şekil 4. 3 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.4’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %10 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



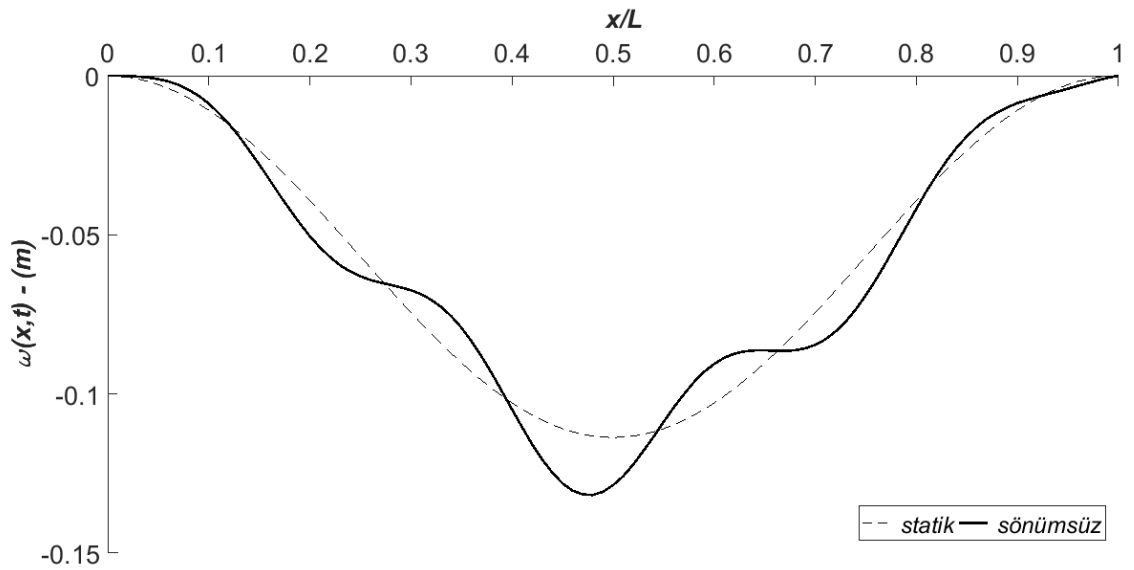
Şekil 4. 4 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.5’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %14 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür.



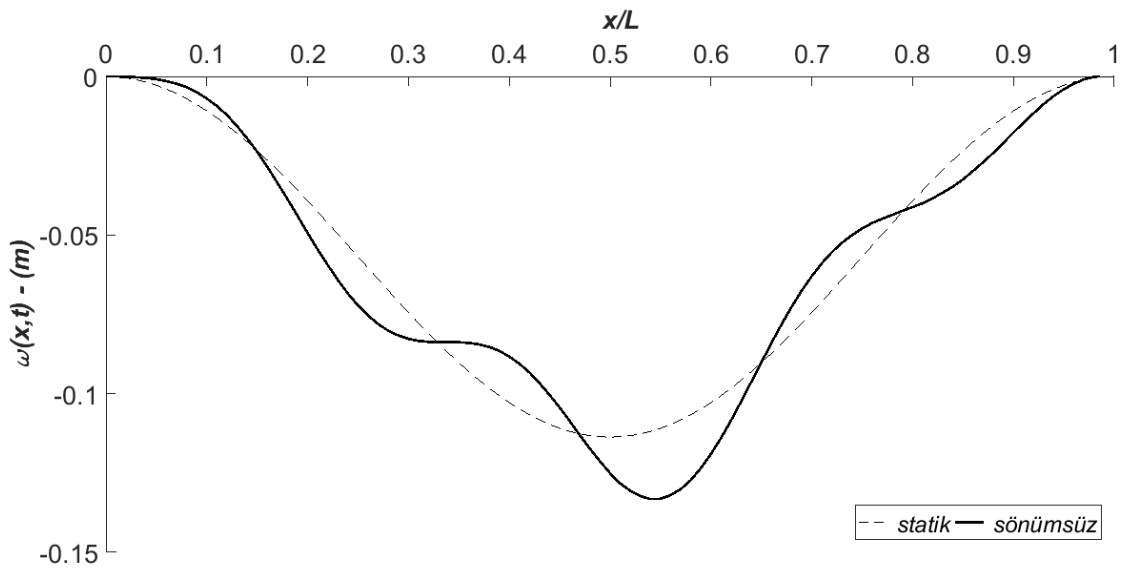
Şekil 4. 5 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.6’da hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



Şekil 4. 6 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.7’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %8 oranında saptmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



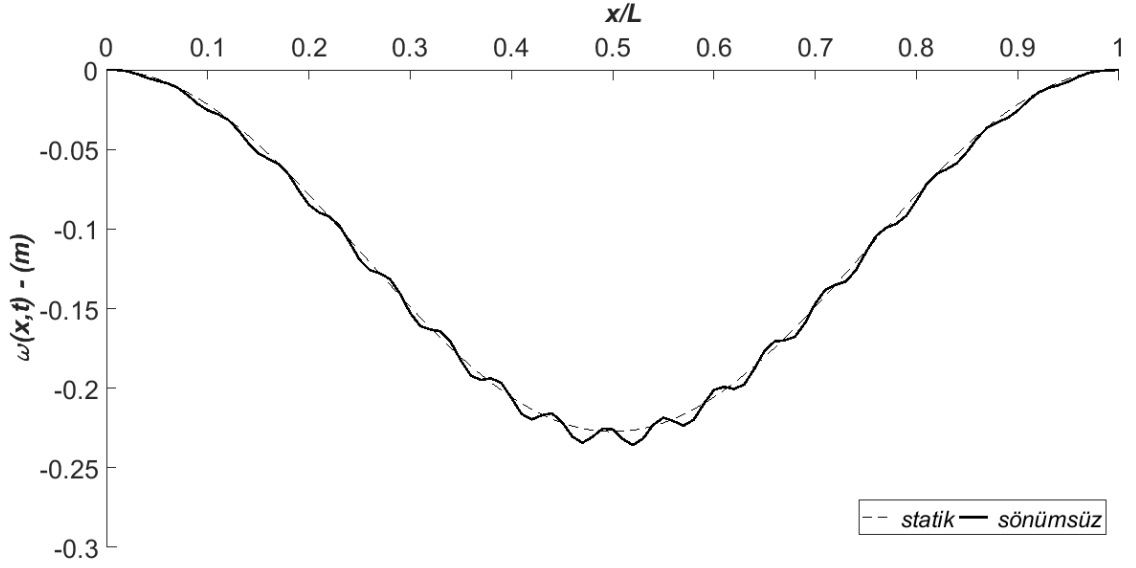
Şekil 4. 7 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Hareketli yükün hızı arttıkça dinamik salınımlar farklılık göstermektedir. Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik yer değiştirme değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %14 oranında sağa veya sola saptığı görülmektedir.

Devam eden bölümde kütle oranı 0,4 için ve çeşitli tekil yük hız değerlerinde kirişin sönümsüz dinamik davranışları gösterilmiştir.

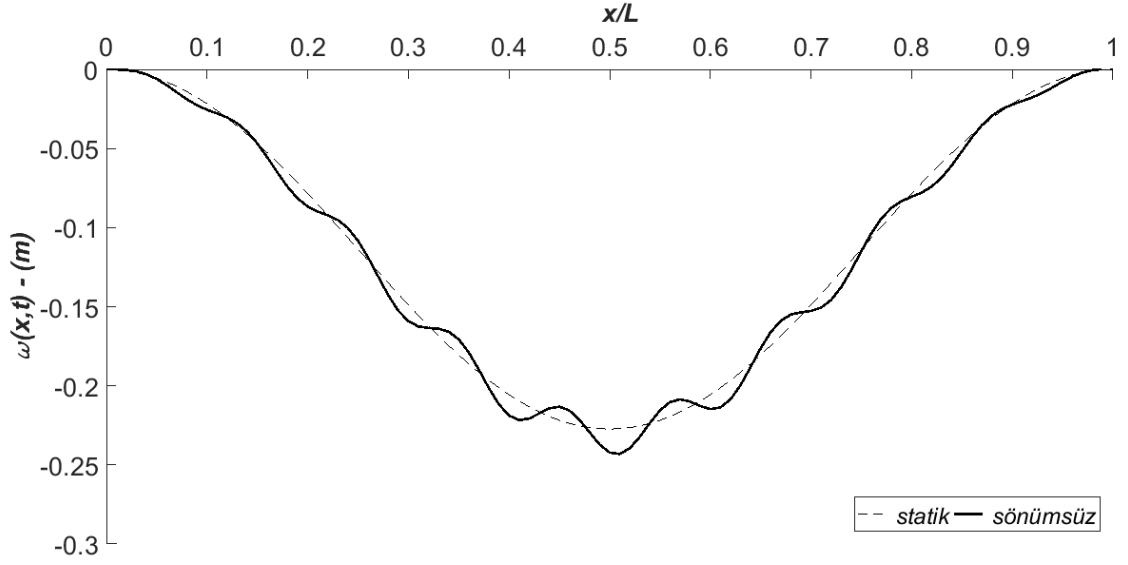
Şekil 4.8’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %4 oranında saptmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise

simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değıştirme değeri kütle oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir ve kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



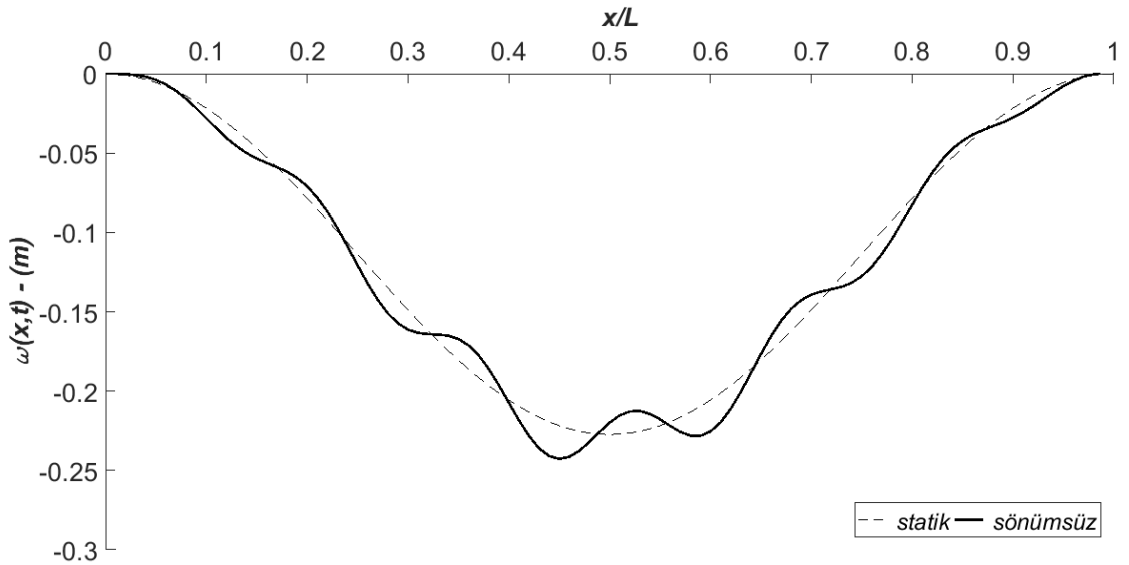
Şekil 4. 8 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik yer değıştirme

Şekil 4.9’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik yer değıştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değışimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değışim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görölmektedir. Sönümsüz maksimum yer değıştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmaktadır. Statik yer değıştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değıştirme değeri kütle oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir ve kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



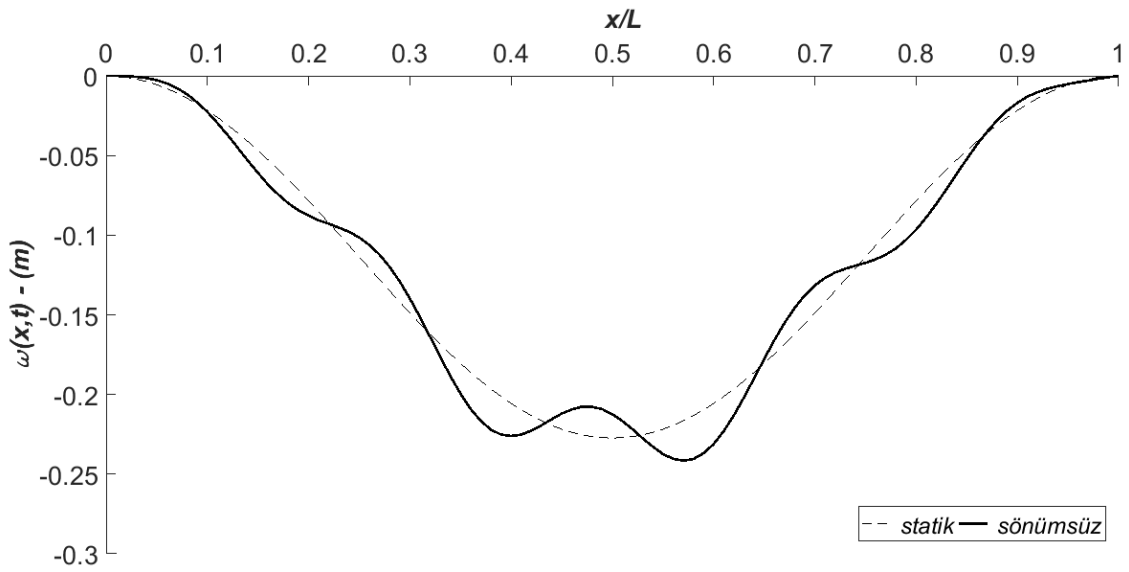
Şekil 4. 9 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.10'da hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %10 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kütle oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir ve kiriş orta noktasında v.t=5 m'de oluşmaktadır.



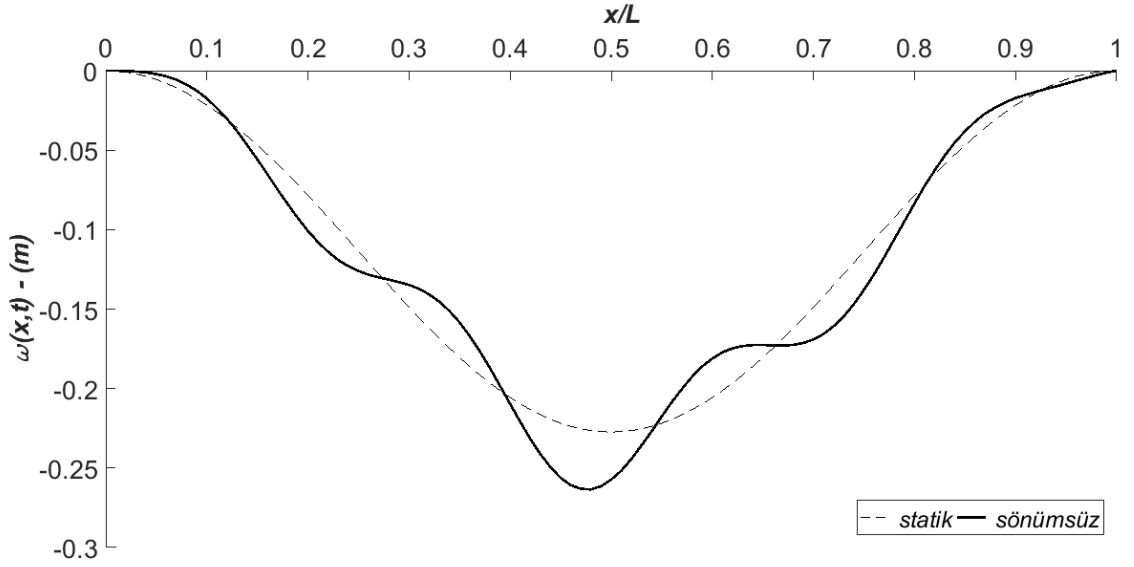
Şekil 4. 10 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.11’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %14 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kütle oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir ve kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



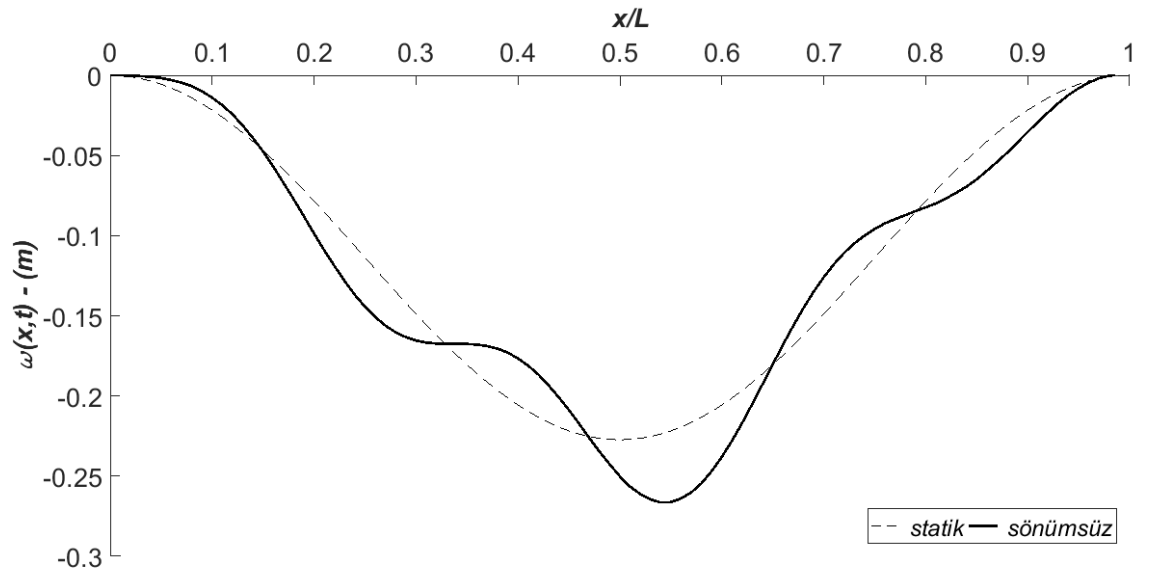
Şekil 4. 11 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.12’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kütle oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir ve kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



Şekil 4. 12 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Şekil 4.13’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümsüz maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %8 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kütle oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir ve kiriş orta noktasında v.t=5 m’de oluşmaktadır.



Şekil 4. 13 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik yer değiştirme

Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik yer değıştirme değeri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %14 oranında sağa veya sola saptığı görölmektedir. Kütle oranındaki artışın dinamik salınım hareketlere etkisinin çok az olduğu sadece maksimum dinamik değeri arttırdığı Çizelge 4.4’de görölmektedir.

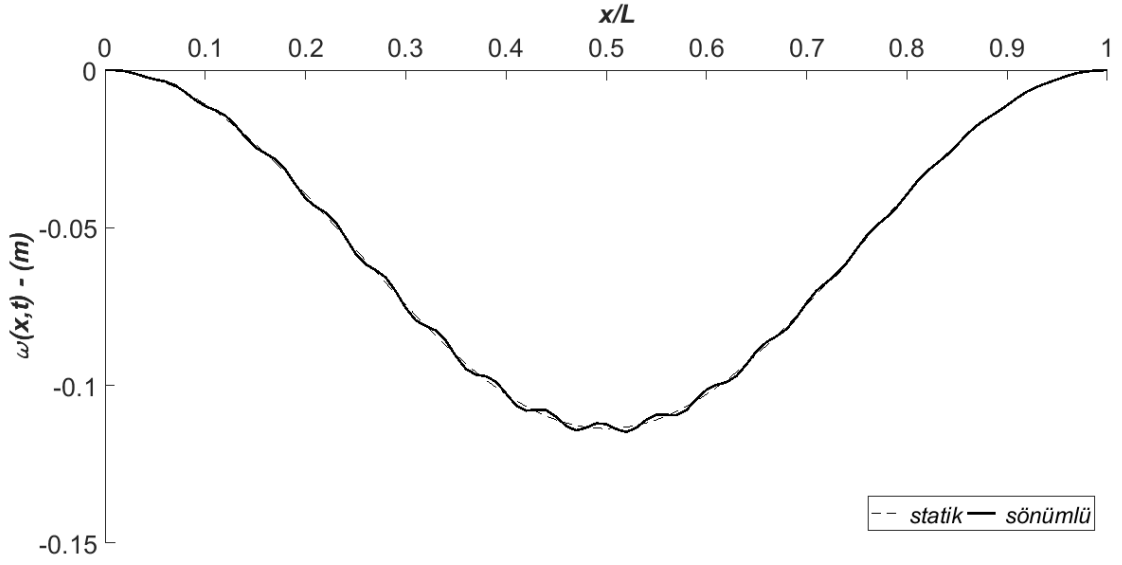
Çizelge 4. 4 Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümsüz ve statik maksimum yer değıştirme değeri

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	$\omega_{\text{statik (max)}}$ [m]	$\omega_{\text{sönümsüz (max)}}$ [m]	$\omega_{\text{statik (max)}}$ [m]	$\omega_{\text{sönümsüz (max)}}$ [m]
1	-0.114	-0.118	-0.227	-0.236
2	-0.114	-0.122	-0.227	-0.243
3	-0.114	-0.122	-0.227	-0.245
4	-0.114	-0.122	-0.227	-0.245
5	-0.114	-0.132	-0.227	-0.264
6	-0.114	-0.134	-0.227	-0.268

4.1.2 Kirişin Sönümlü Yer Değıştirmelerinin Dinamik Analizi

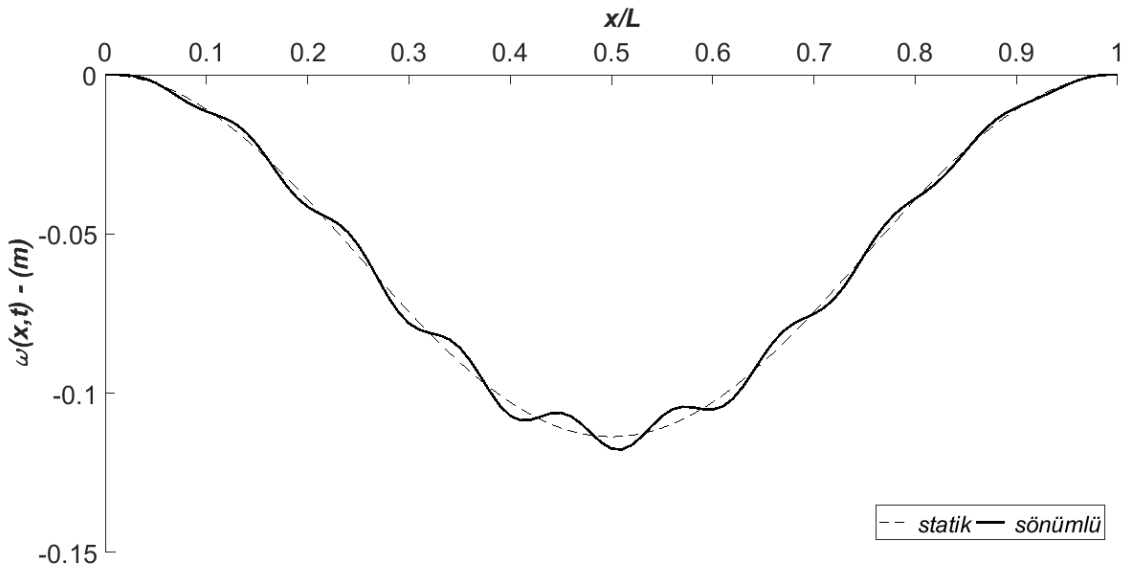
Analizler ilk olarak kütle oranı 0,2 için ardından 0,4 için gerçekleştirilmiştir. Statik yer değıştirme eğrisi, sönümlü dinamik matematik modelden tekil yükün hızı $v=0,01$ m/s alınarak elde edilmiştir.

Şekil 4.14’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik yer değıştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değışimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değışim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görölmektedir. Sönümlü maksimum yer değıştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değıştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değıştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



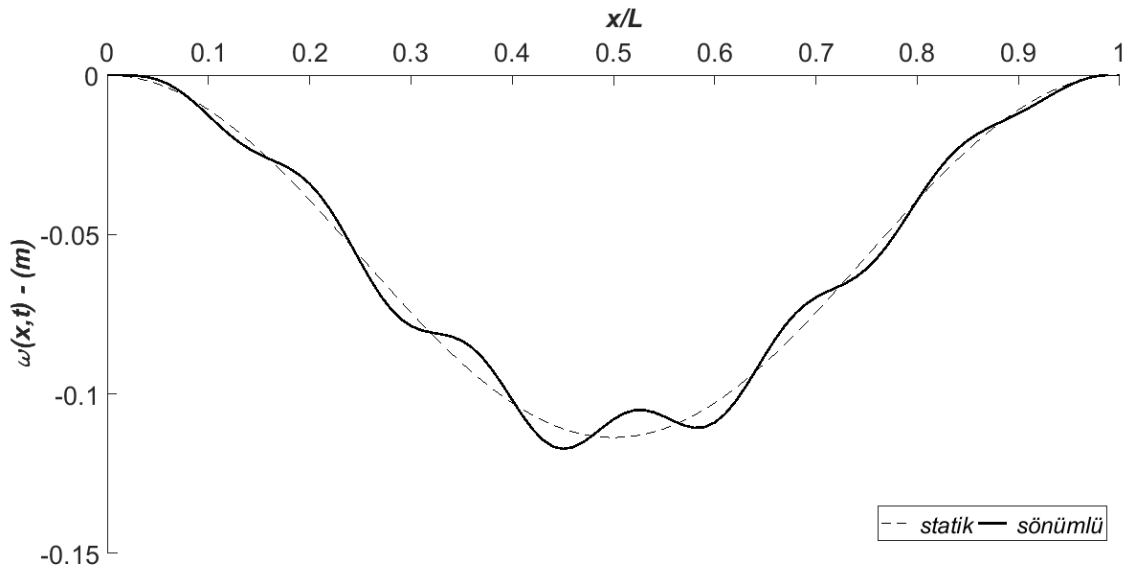
Şekil 4. 14 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.15’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında v.t=5 m’de oluşmaktadır.



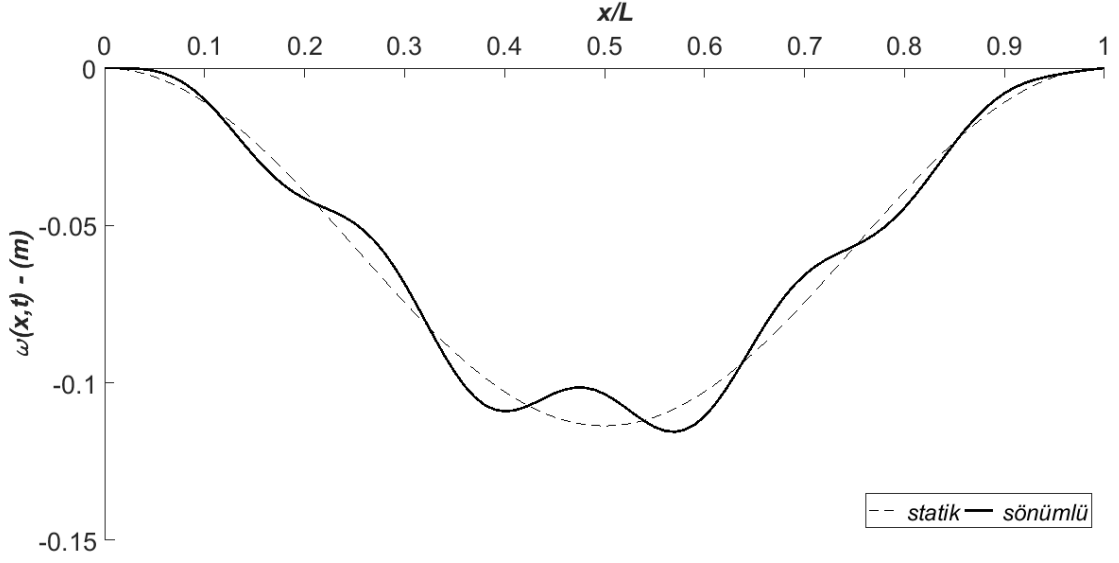
Şekil 4. 15 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.16’da hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %10 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



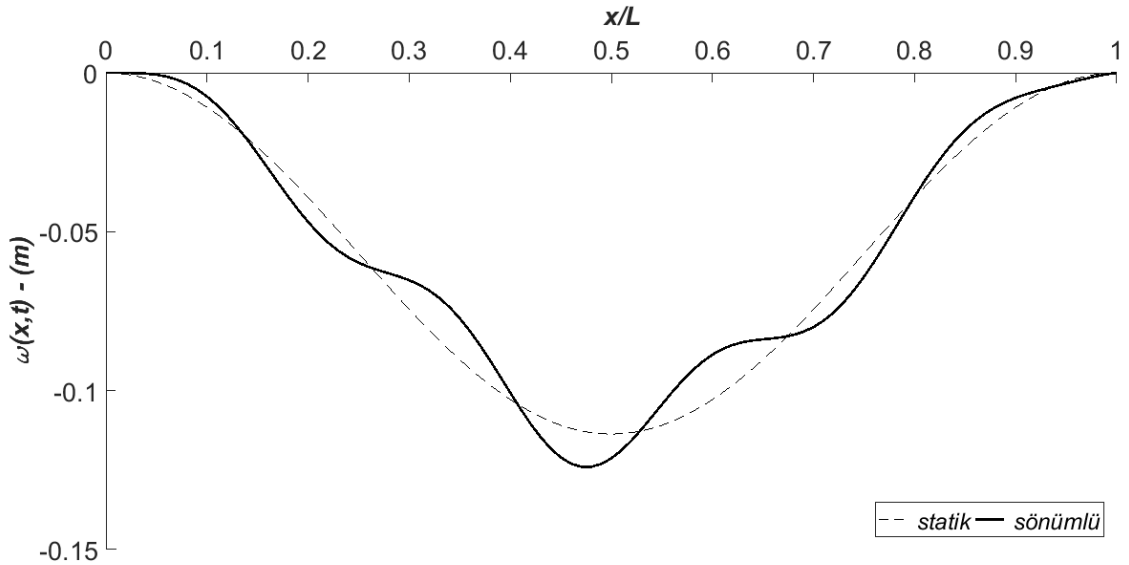
Şekil 4. 16 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.17’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %14 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



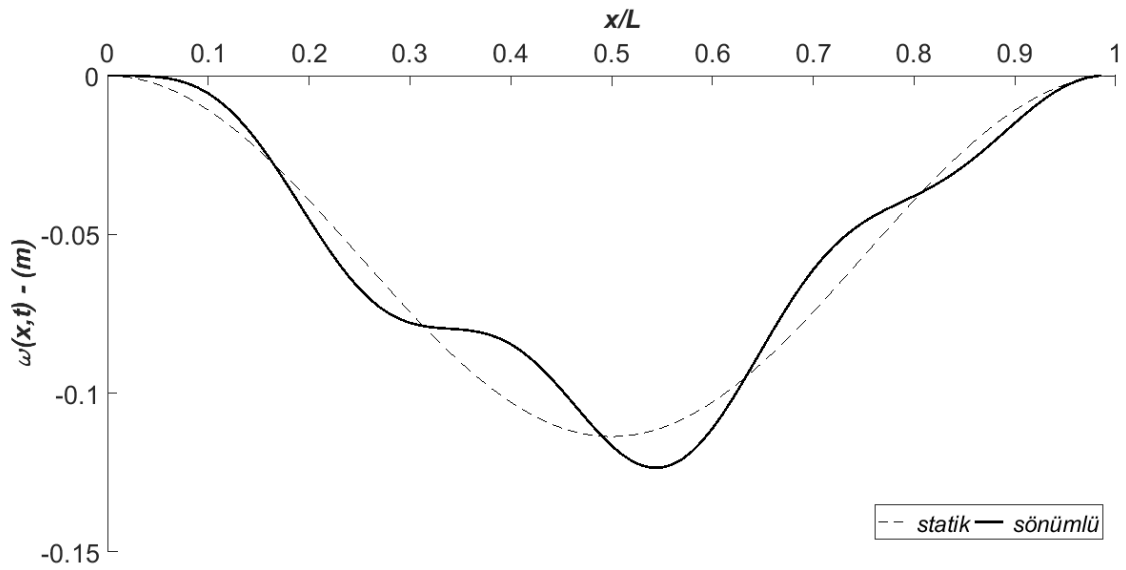
Şekil 4. 17 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.18’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



Şekil 4. 18 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.19’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %8 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.

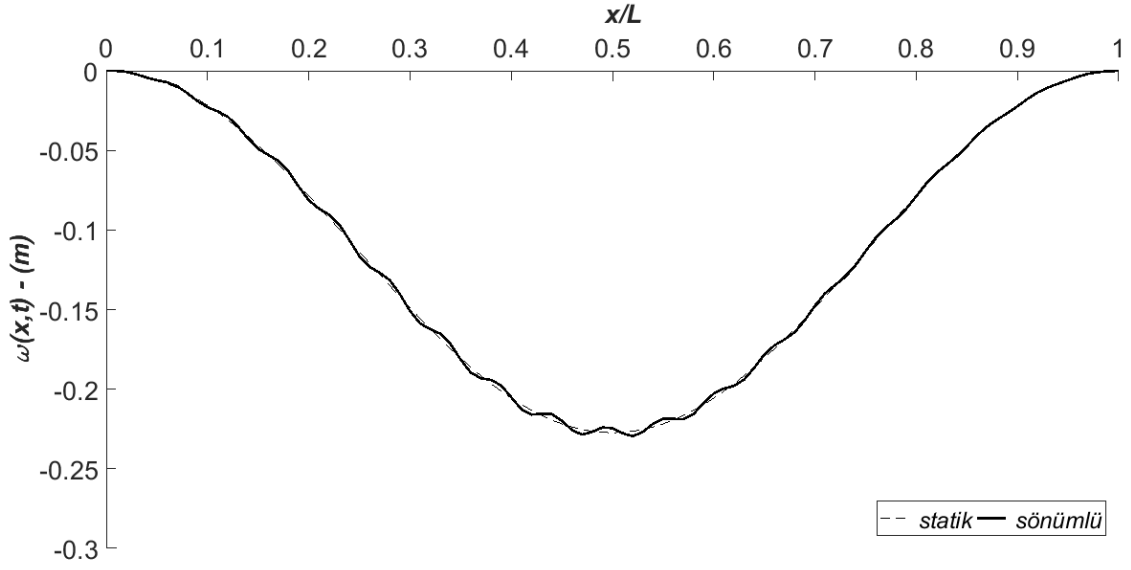


Şekil 4. 19 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Hareketli yükün hızı arttıkça dinamik salınımlar farklılık göstermektedir. Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik yer değiştirme değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %14 oranında sağa veya sola saptığı görülmektedir.

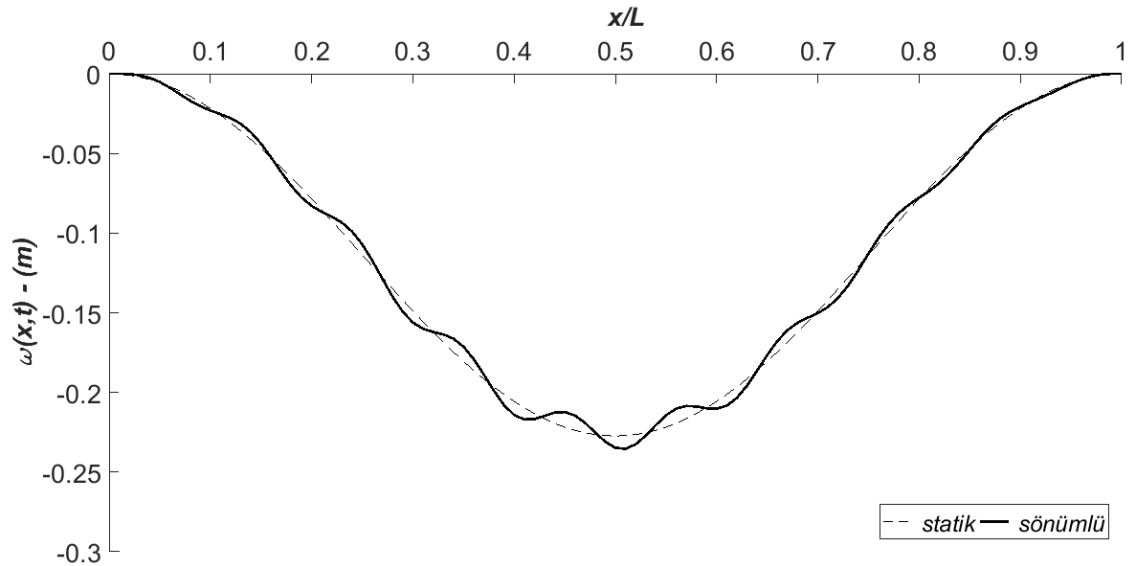
Devam eden bölümde kütle oranı 0,4 için ve çeşitli tekil yük hız değerlerinde kirişin sönümlü dinamik davranışları gösterilmiştir.

Şekil 4.20’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



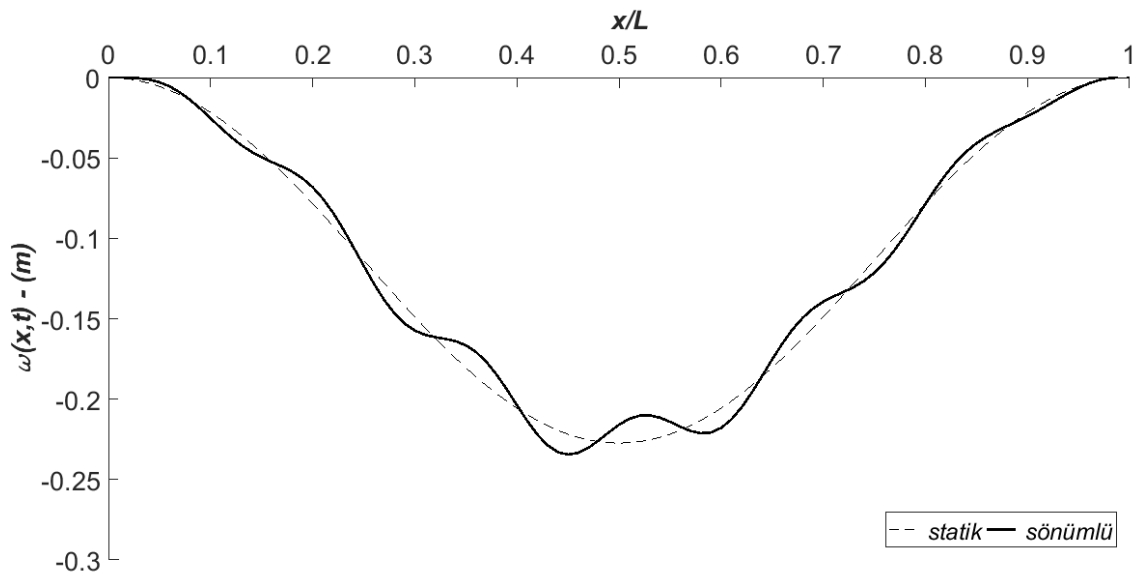
Şekil 4. 20 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.21’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



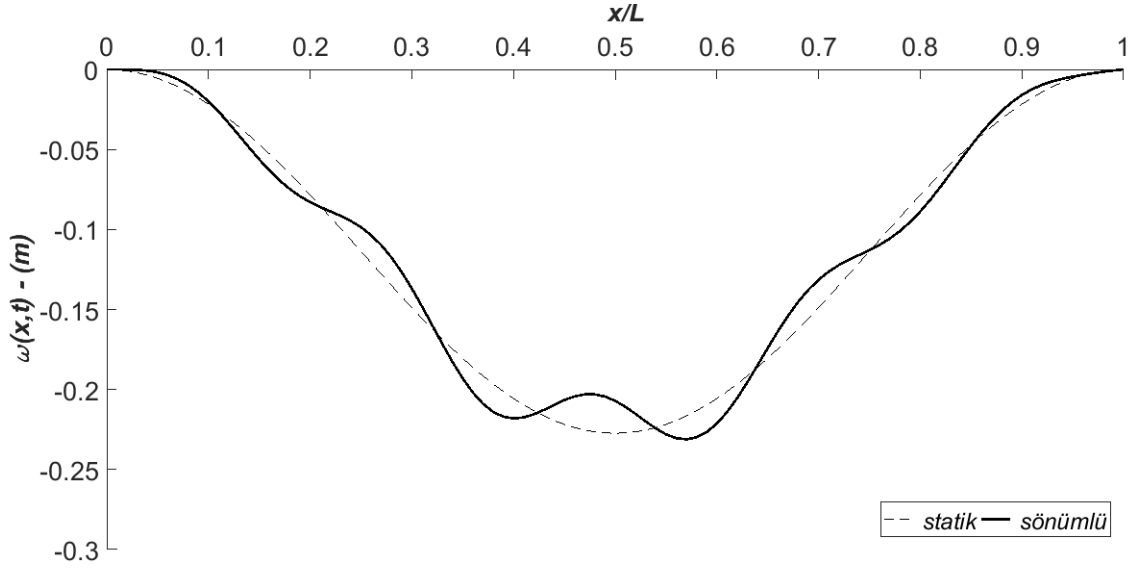
Şekil 4. 21 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.22’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %10 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



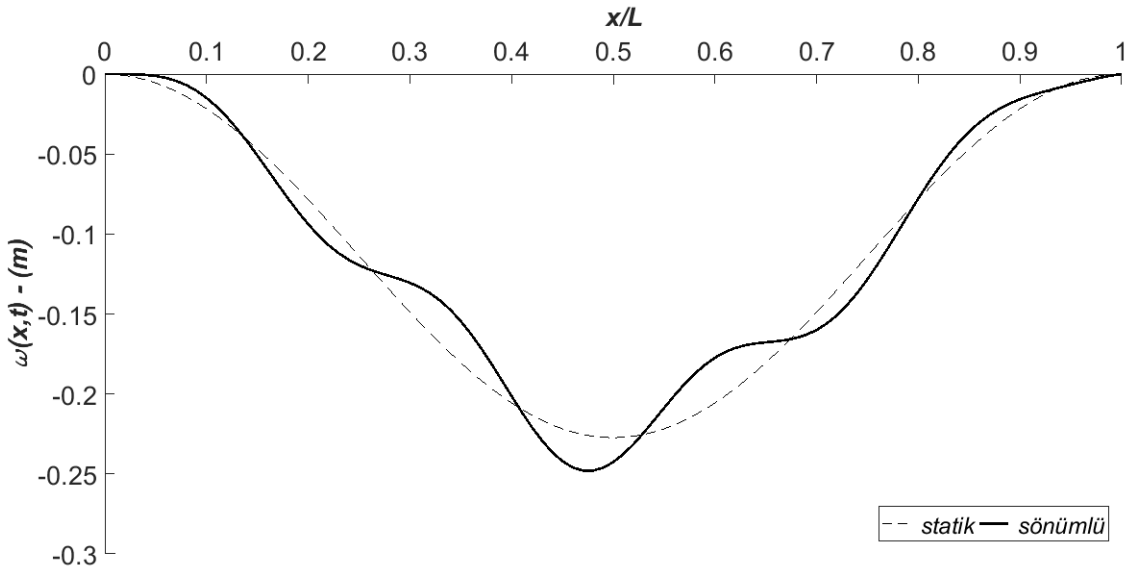
Şekil 4. 22 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.23’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %14 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



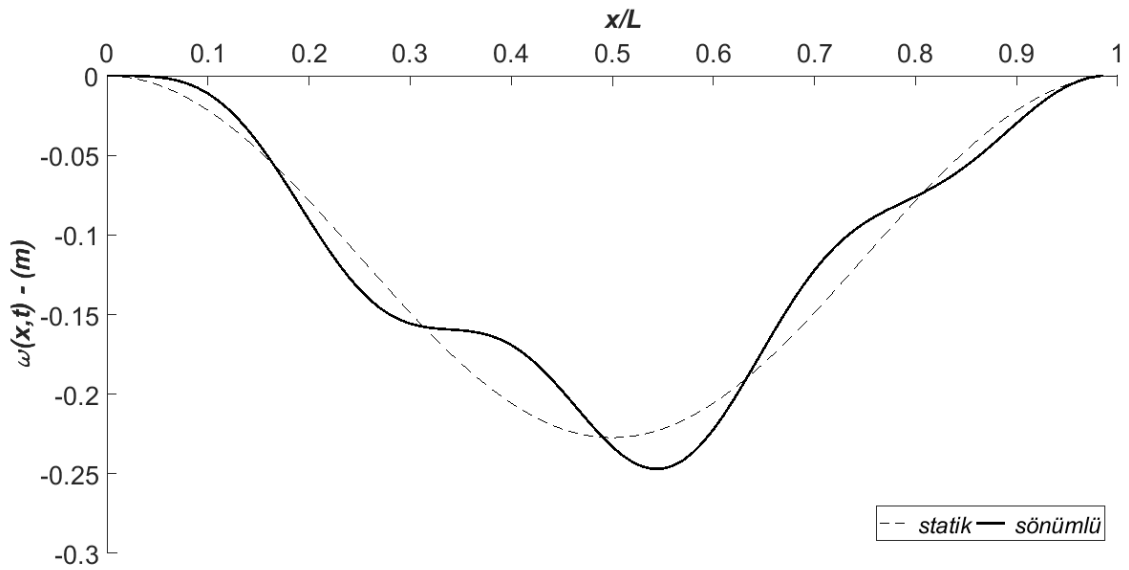
Şekil 4. 23 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.24’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sola doğru %4 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında v.t=5 m’de oluşmaktadır.



Şekil 4. 24 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Şekil 4.25’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik yer değiştirmeler gösterilmiştir. Dinamik değişimlerin hareketli yükün etkisi ile statik değişim etrafında salınım davranışları yaptığı ve kirişin belirli noktalarında statik eğriyi aştıkları görülmektedir. Sönümlü maksimum yer değiştirme değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %8 oranında sapmaktadır. Statik yer değiştirme eğrisi ise simetrik ve düzgündür. Maksimum statik yer değiştirme değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m’de oluşmaktadır.



Şekil 4. 25 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik yer değiştirme

Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik yer değiştirme değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %14 oranında sağa veya sola saptığı görülmektedir. Kütle oranındaki artışın dinamik salınım hareketlere etkisinin çok az olduğu sadece maksimum dinamik değerleri arttırdığı Çizelge 4.5’de görülmektedir.

Çizelge 4. 5 Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümlü ve statik maksimum yer değiştirme değerleri

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	$\omega_{\text{statik (max)}}$ [m]	$\omega_{\text{sönümlü (max)}}$ [m]	$\omega_{\text{statik (max)}}$ [m]	$\omega_{\text{sönümlü (max)}}$ [m]
1	-0.114	-0.114	-0.227	-0.230
2	-0.114	-0.118	-0.227	-0.235
3	-0.114	-0.117	-0.227	-0.234
4	-0.114	-0.116	-0.227	-0.231
5	-0.114	-0.124	-0.227	-0.248
6	-0.114	-0.123	-0.227	-0.247

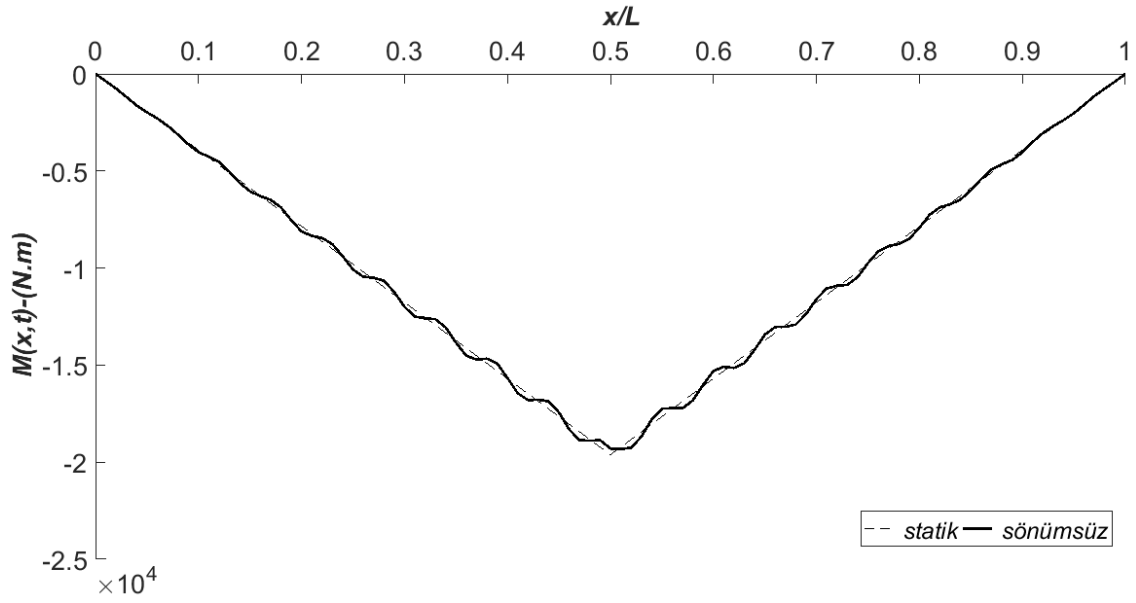
4.2 Kirişteki Eğilme Momentinin Dinamik Analizi

Bu bölümde farklı kütle oranları ile farklı hızlar için kirişte oluşan sönümlü ve sönümsüz dinamik eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler statik eğilme momenti değerleriyle grafik ve tablolar halinde karşılaştırılmıştır. Kütle oranları (m/M) 0,2 ve 0,4 olarak belirlenmiş ve hareketli tekil yükün hızı sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 m/s alınmıştır. Tekil P yükünün kiriş üzerinde hareketinden dolayı iç kuvvetler, eğilme momenti değerleri dinamik davranış göstermektedirler.

4.2.1 Kirişin Sönümsüz Eğilme Momentinin Dinamik Analizi

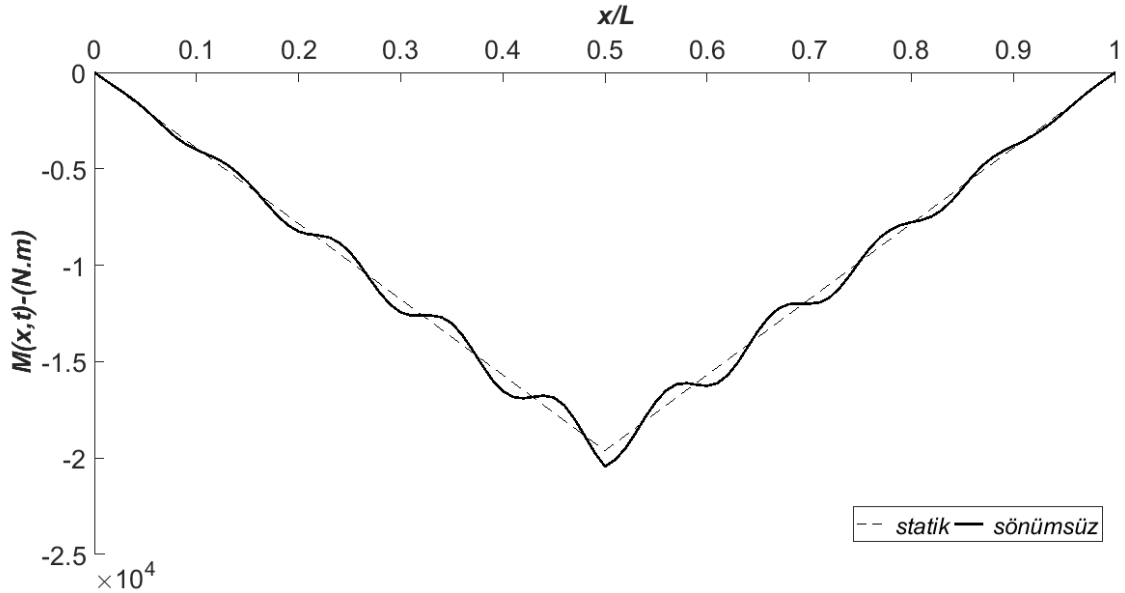
Analizler ilk olarak kütle oranı 0,2 için ardından 0,4 için gerçekleştirilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi statik eğilme momenti eğrisi simetrik ve düzgündür. Maksimum sönümsüz statik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m'de oluşmaktadır.

Şekil 4.26'da hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim statik değişime yakın davranışlar göstermiştir ve kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmıştır.



Şekil 4. 26 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

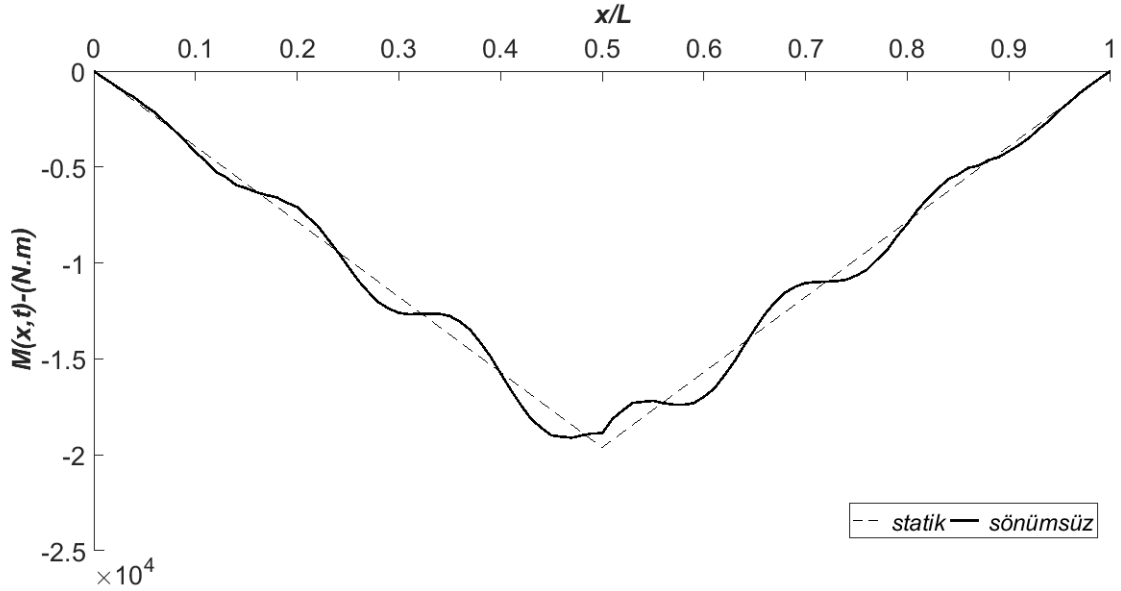
Şekil 4.27’da hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında oluşmaktadır. Bu hız değerinde dinamik değişimler kirişin belirli noktalarında statik değerleri aşmıştır.



Şekil 4. 27 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

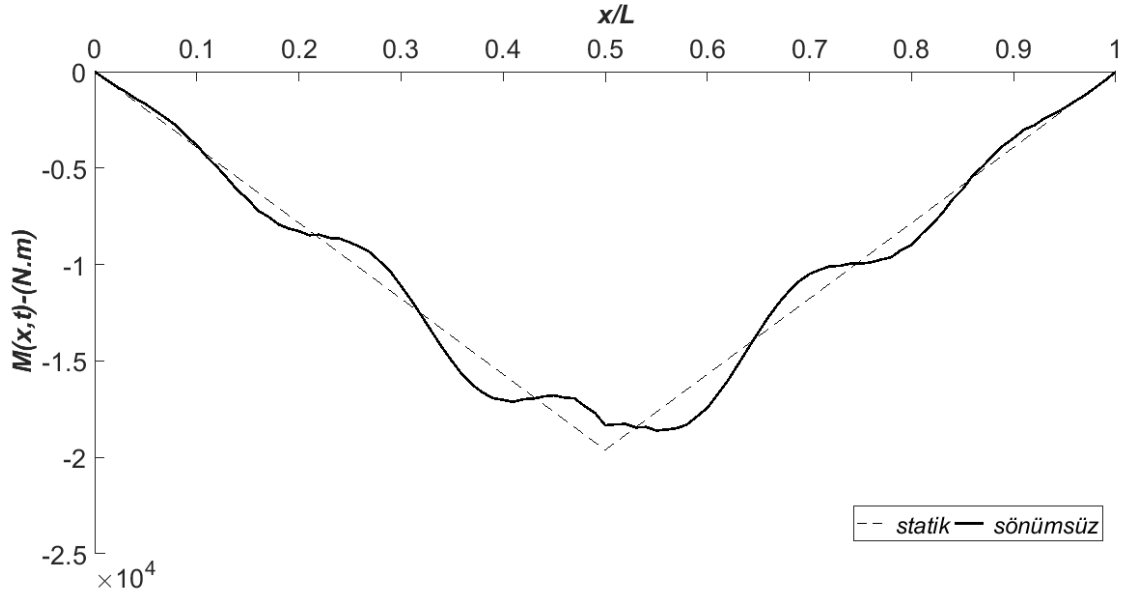
Şekil 4.28’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti

değeri kiriş orta noktasından sola doğru %6 oranında sapmıştır. Ayrıca, maksimum dinamik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasındaki maksimum statik değerden az olmaktadır. Bu hız değerinde dinamik değişimler kirişin belirli noktalarında statik değerleri aşmıştır.



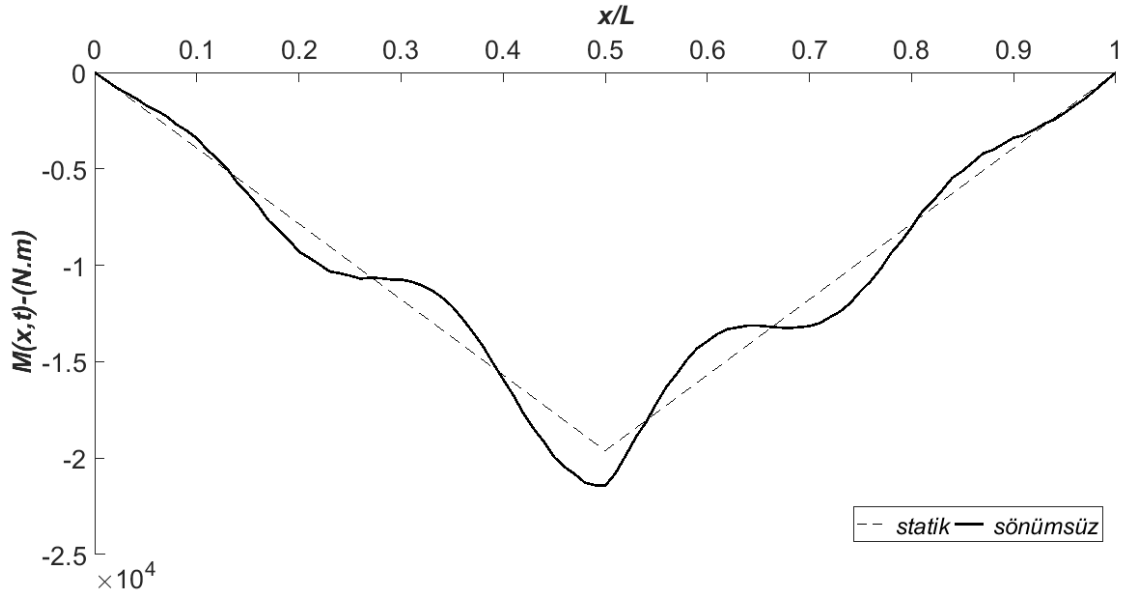
Şekil 4. 28 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Şekil 4.29'da hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik davranışın kirişin belirli noktalarında statik davranışları geçtiği görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %10 oranında sapmıştır. Ayrıca, maksimum dinamik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasındaki maksimum statik değerden az olmaktadır.



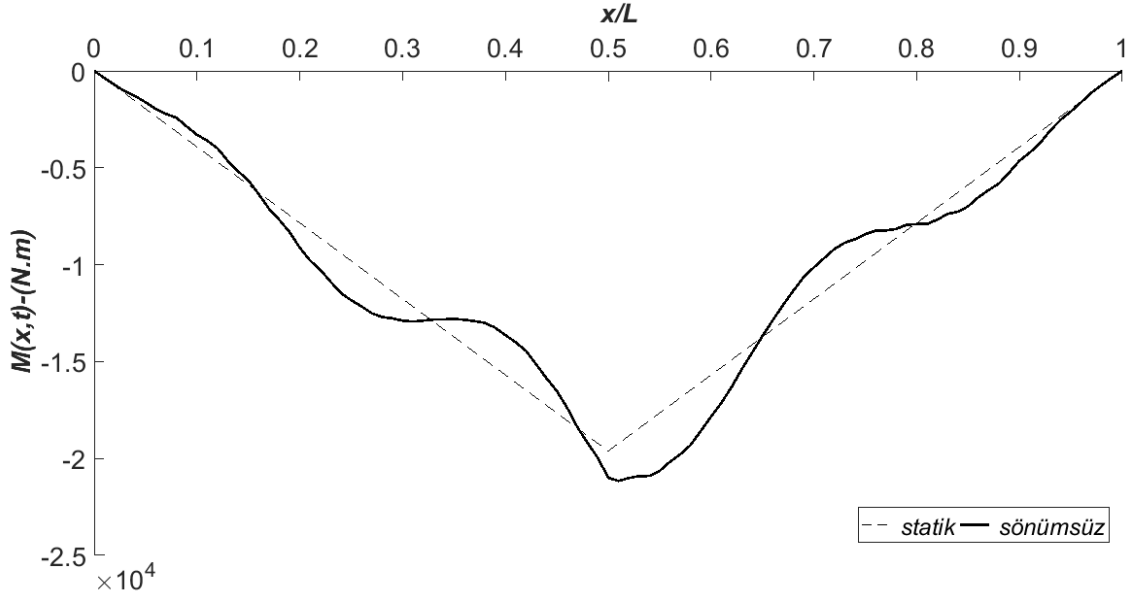
Şekil 4. 29 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Şekil 4.30'da hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik davranışın kirişin belirli noktalarında statik davranışları aştığı görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik değeri aşmıştır.



Şekil 4. 30 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Şekil 4.31’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik davranışın kirişin belirli noktalarında statik davranışları aştığı görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmış ve ayrıca maksimum statik değeri aşmıştır.

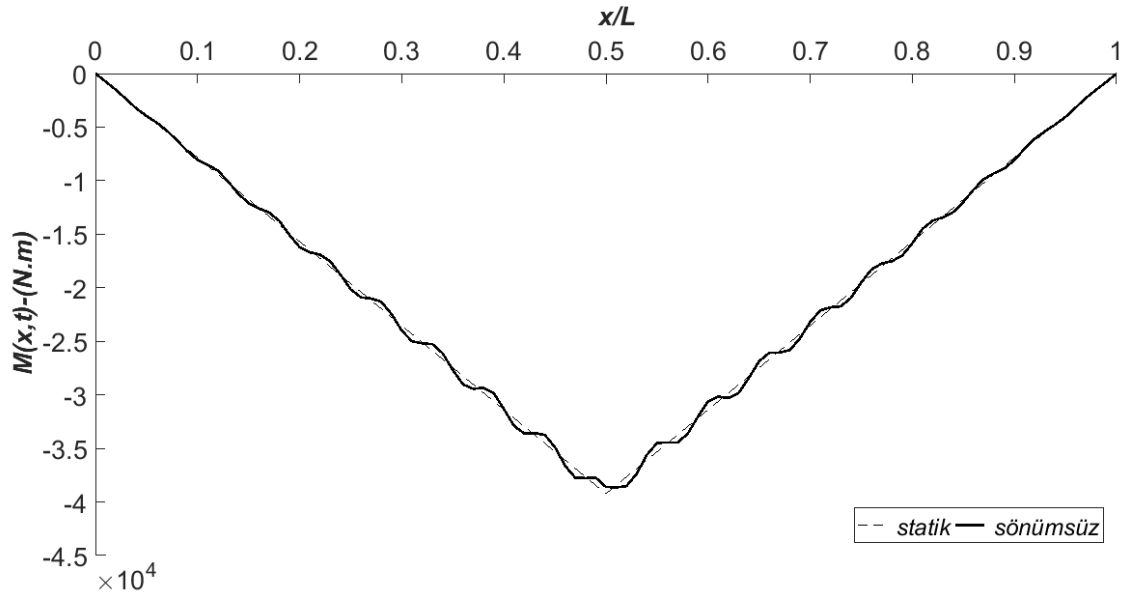


Şekil 4. 31 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Hareketli yükün hızı arttıkça dinamik salınımlar farklılık göstermektedir. Bu kütle oranında ve bazı hız değerlerinde sönümsüz maksimum dinamik eğilme momenti değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %10 oranında sağa veya sola saptığı görülmektedir. Bu kütle oranında tekil yük hızının 2 m/s ve 5 m/s olduğu durumda maksimum sönümsüz dinamik değerler kiriş orta noktasında oluşmaktadır.

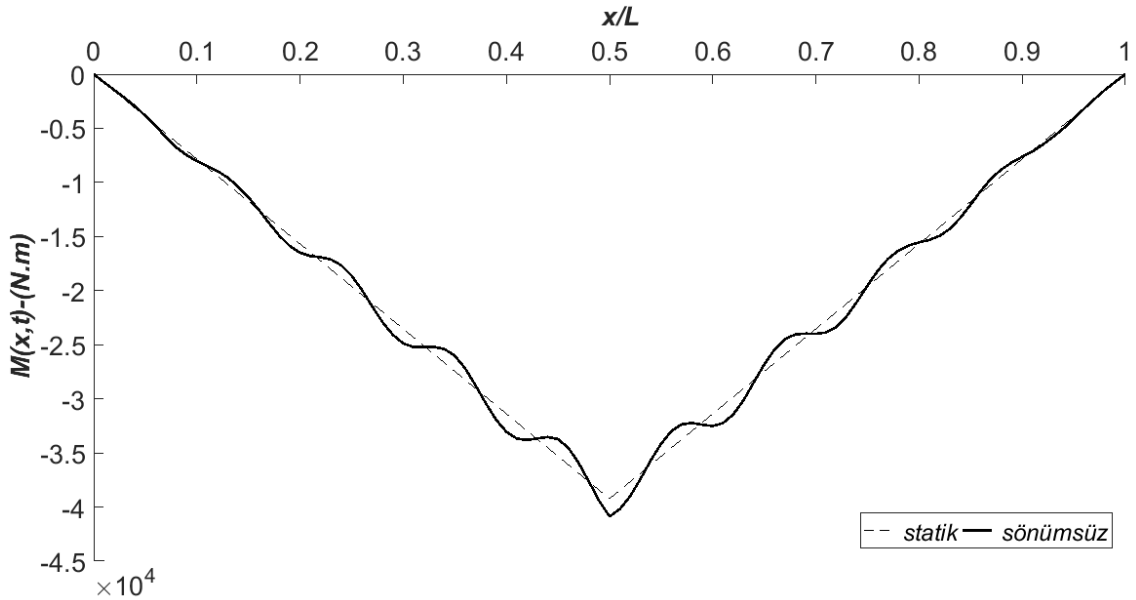
Devam eden bölümde kütle oranı 0,4 için ve çeşitli tekil yük hız değerlerinde kirişin sönümsüz dinamik eğilme momenti davranışları gösterilmiştir.

Şekil 4.32’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim statik değişime benzer davranış göstermiştir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmıştır. Ayrıca, sönümsüz dinamik değişimler kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır.



Şekil 4. 32 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

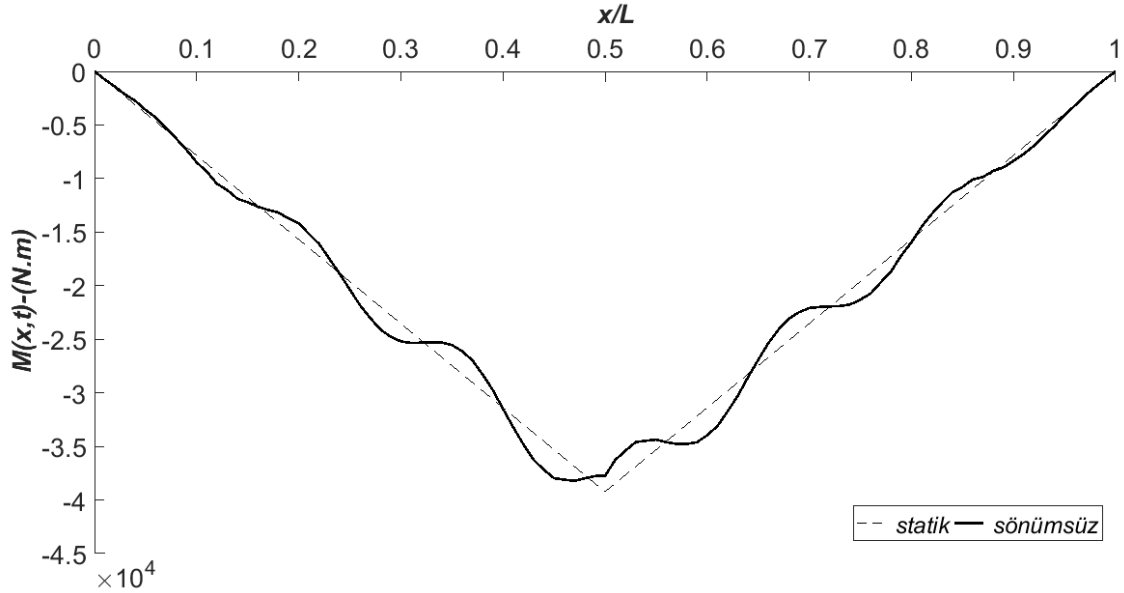
Şekil 4.33’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında oluşmaktadır. Ayrıca, sönümsüz dinamik değişimler kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır.



Şekil 4. 33 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

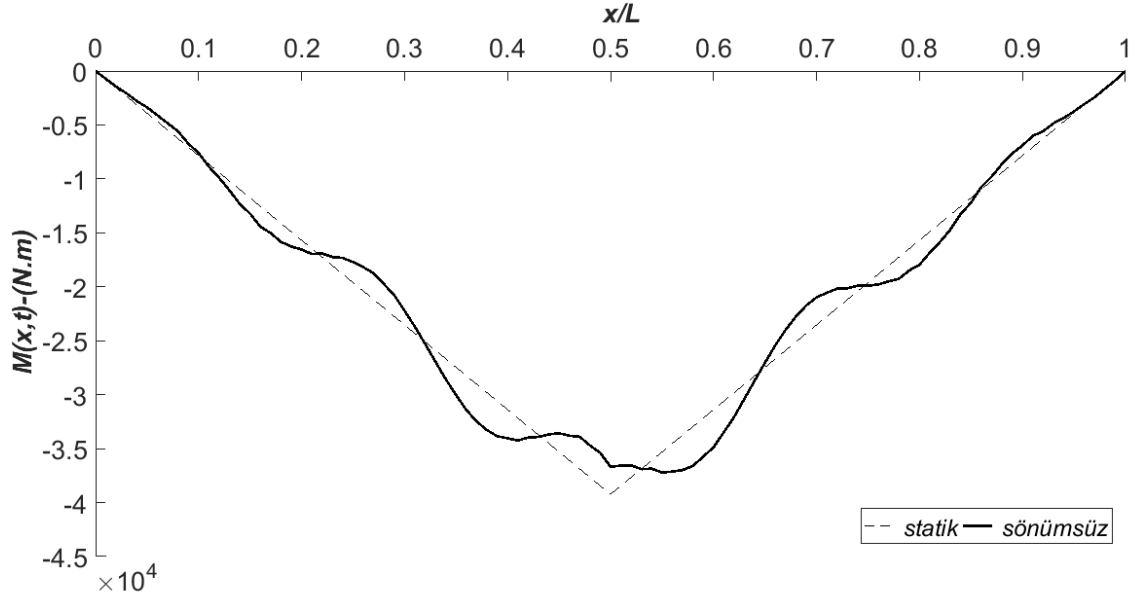
Şekil 4.34’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz davranışın

kirişin belirli noktalarında statik davranışları geçtiği görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sola doğru %6 oranında sapmıştır. Ayrıca, maksimum dinamik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasındaki maksimum statik değerden az olmaktadır.



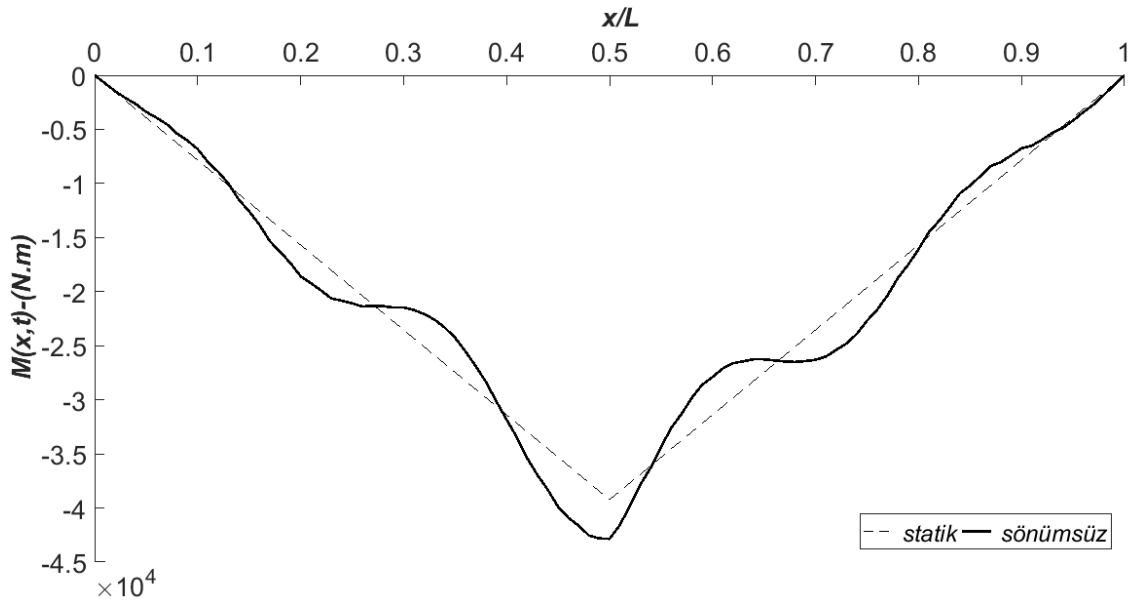
Şekil 4. 34 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Şekil 4.35’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz davranışın kirişin belirli noktalarında statik davranışları aştığı görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %10 oranında sapmıştır. Ayrıca, maksimum dinamik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasındaki maksimum statik değerden az olmaktadır.



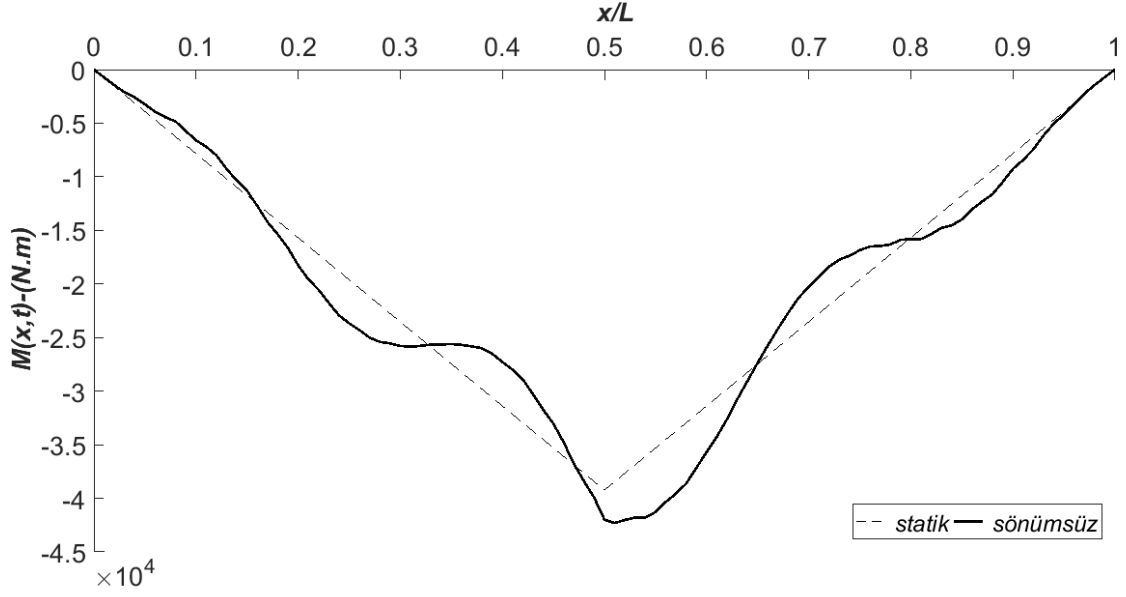
Şekil 4. 35 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Şekil 4.36'da hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz davranışın kirişin belirli noktalarında statik davranışları aştığı aynı zamanda dinamik maksimum sönümsüz değerin maksimum statik değeri geçtiği görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında oluşmaktadır. Maksimum statik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m'de oluşmaktadır.



Şekil 4. 36 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Şekil 4.37’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz davranışın kirişin belirli noktalarında statik davranışları aştığı aynı zamanda dinamik maksimum sönümsüz değer maksimum statik değerden fazla olduğu görülmektedir. Sönümsüz maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmıştır.



Şekil 4. 37 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik eğilme momenti

Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik yer değiştirme değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %10 oranında sağa veya sola saptığı görülmektedir. Bu kütle oranında tekil yük hızının 2 m/s ve 5 m/s olduğu durumda maksimum sönümsüz dinamik değerler kiriş orta noktasında oluşmaktadır. Kütle oranındaki artışın dinamik salınım hareketlerine etkisinin çok az olduğu sadece maksimum değerleri arttırdığı Çizelge 4.6’de görülmektedir.

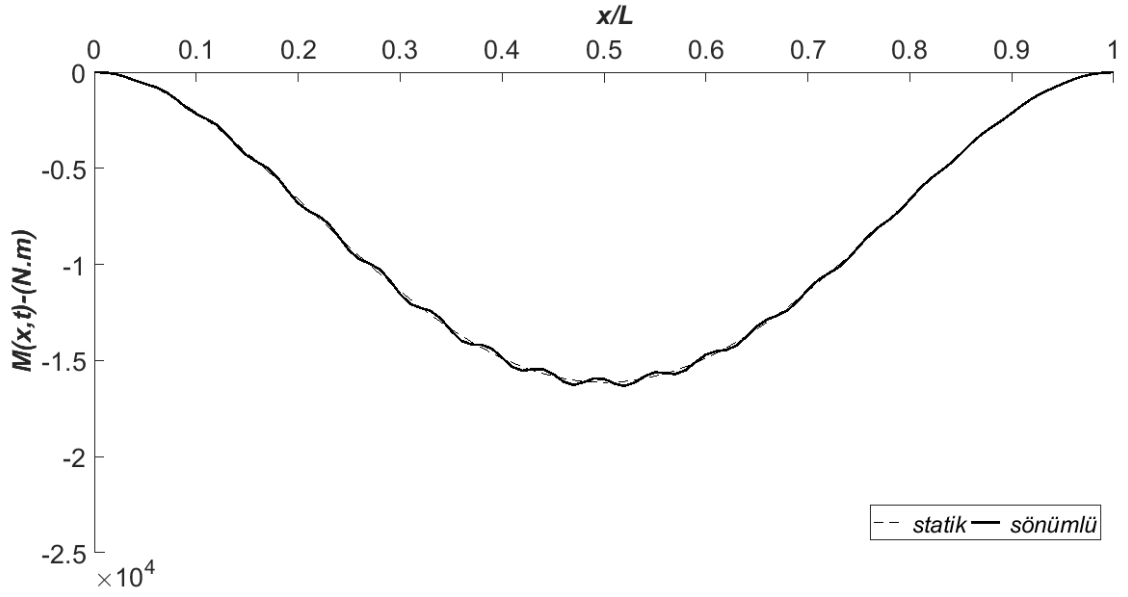
Çizelge 4. 6 Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümsüz ve statik maksimum eğilme momenti değerleri

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	M _{statik (max)} [kNm]	M _{sönümsüz (max)} [kNm]	M _{statik (max)} [kNm]	M _{sönümsüz (max)} [kNm]
1	-19.62	-19.32	-39.24	-38.65
2	-19.62	-20.44	-39.24	-40.88
3	-19.62	-19.11	-39.24	-38.22
4	-19.62	-18.61	-39.24	-37.22
5	-19.62	-21.43	-39.24	-42.85
6	-19.62	-21.16	-39.24	-42.31

4.2.2 Kirişin Sönümlü Eğilme Momentinin Dinamik Analizi

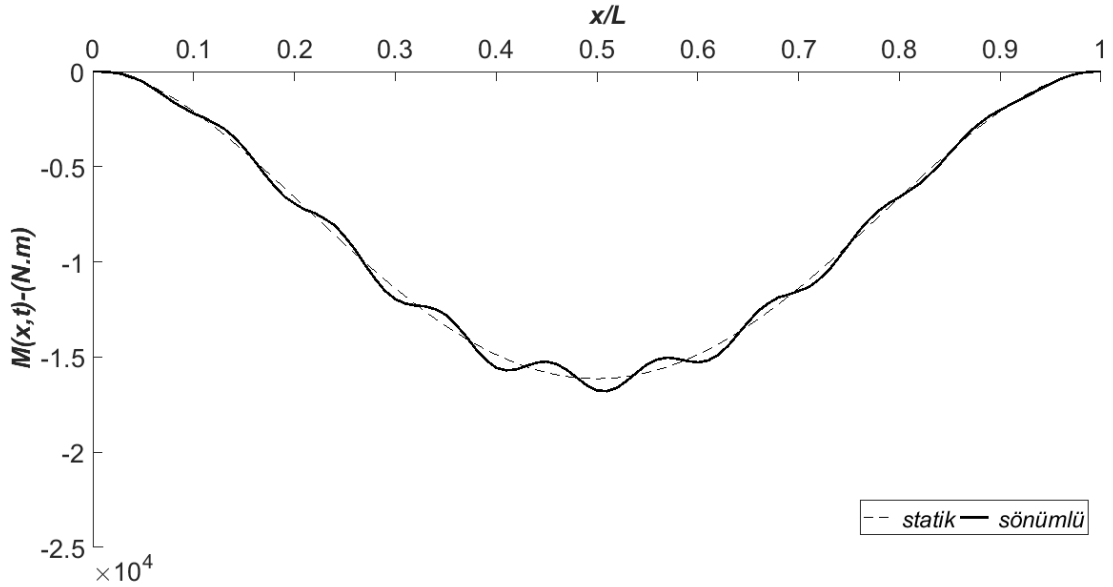
Analizler ilk olarak kütle oranı 0,2 için ardından 0,4 için gerçekleştirilmiştir. Statik eğilme momenti eğrisi, sönümlü dinamik matematik modelden tekil yük hızını $v=0,01$ m/s alınarak elde edilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi statik eğilme momenti eğrisi simetrik ve düzgündür. Maksimum sönümlü statik eğilme momenti değeri kiriş orta noktasında $v.t=5$ m'de oluşmaktadır.

Şekil 4.38'de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim statik değişime yakın davranışlar göstermiştir ve kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %4 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 38 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

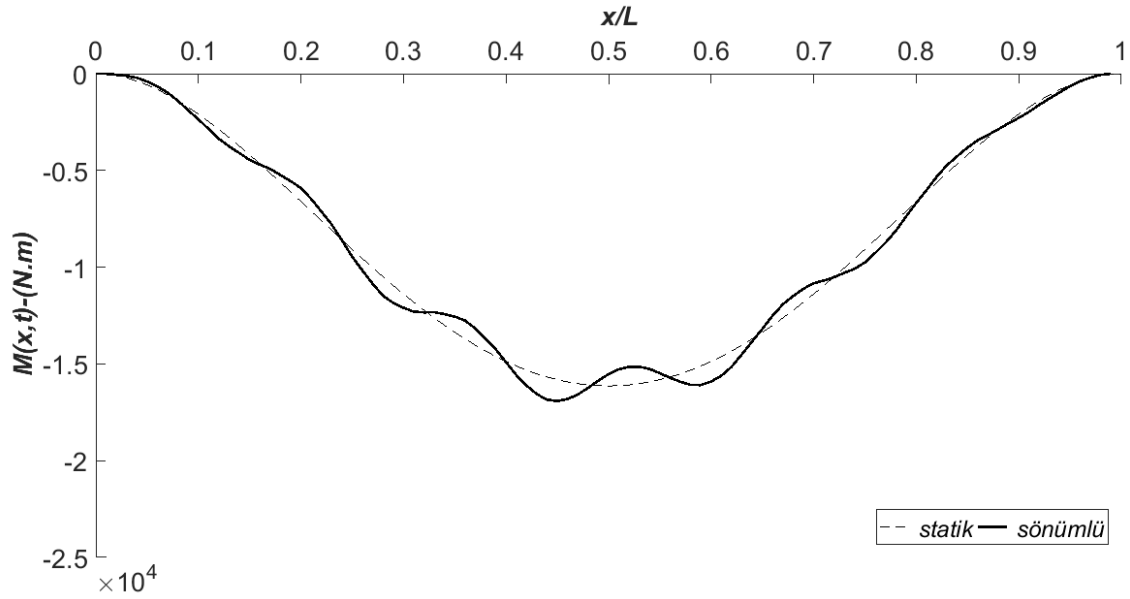
Şekil 4.39’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 39 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

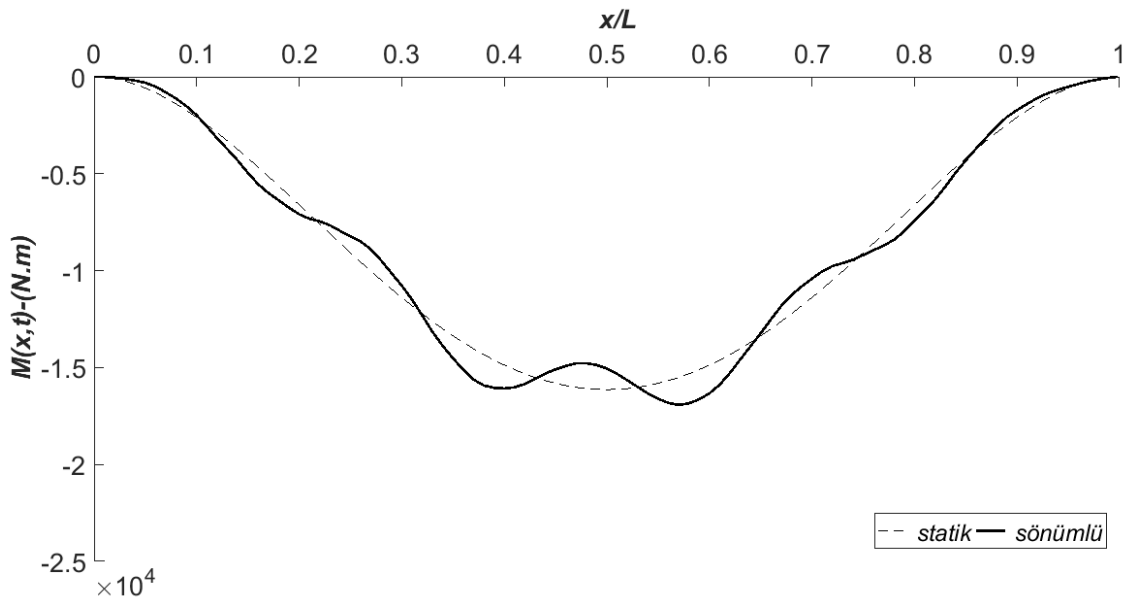
Şekil 4.40’da hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim

kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sola doğru %10 oranında sapmaktadır.



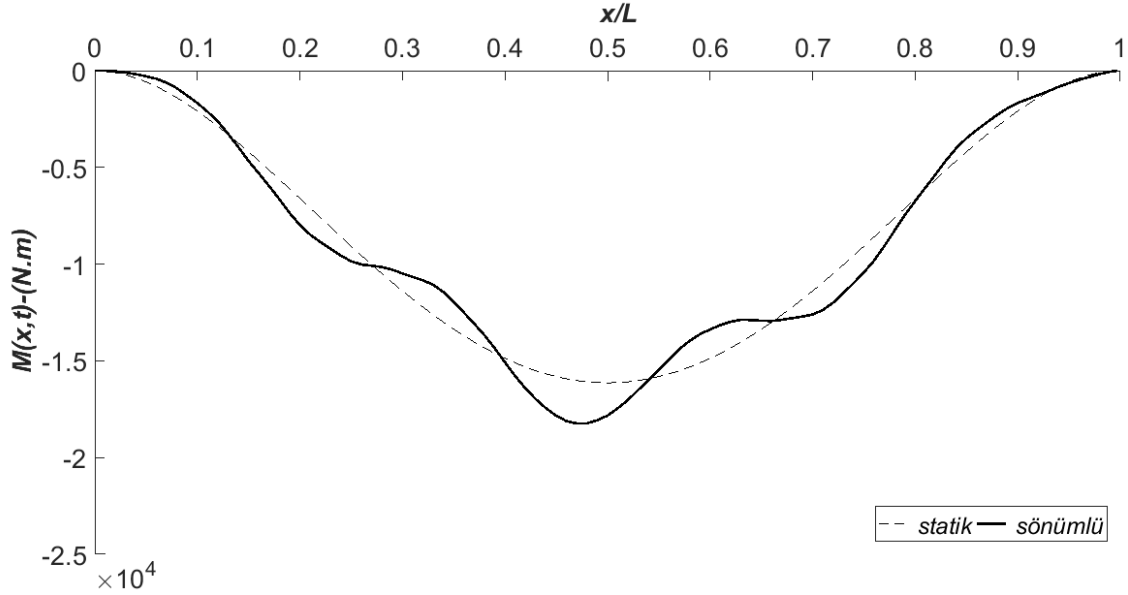
Şekil 4. 40 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Şekil 4.41’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %14 oranında sapmaktadır.



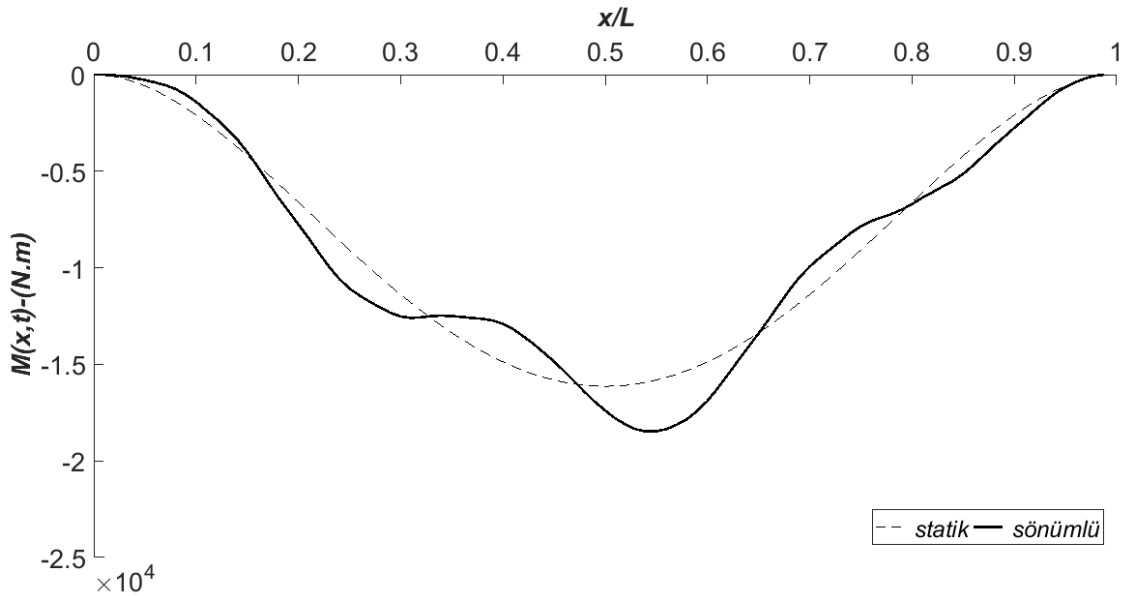
Şekil 4. 41 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Şekil 4.42’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sola doğru %6 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 42 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Şekil 4.43’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %10 oranında sapmaktadır.

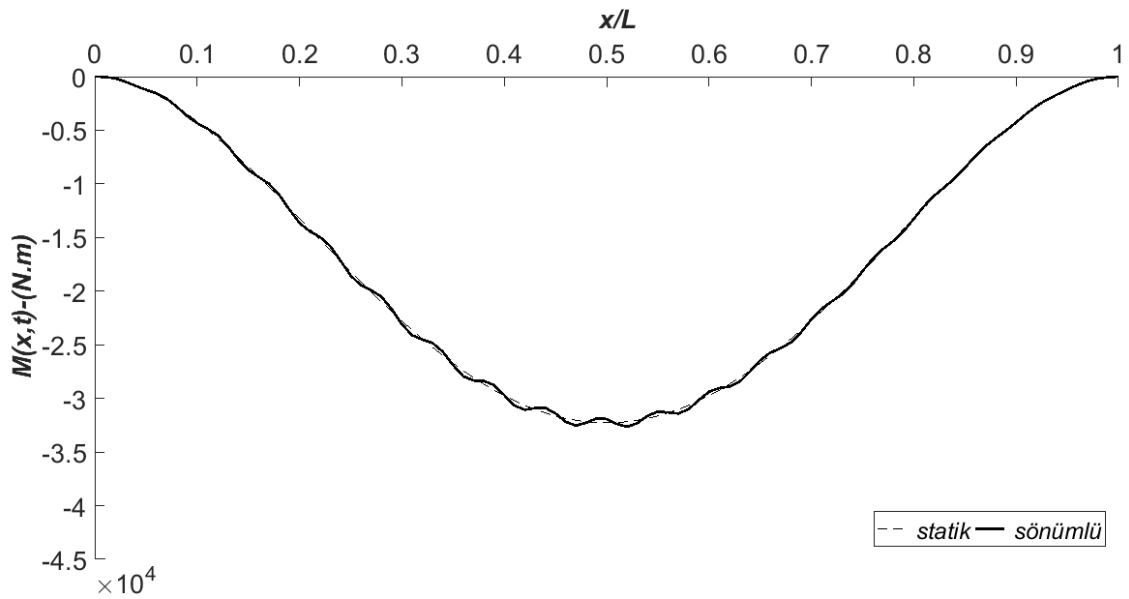


Şekil 4. 43 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Hareketli yükün hızı arttıkça dinamik salınımlar farklılık göstermektedir. Farklı hız değerlerinde sönümlü maksimum dinamik eğilme momenti değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %14 oranında sağa veya sola sapmaktadır. Kiriş üzerindeki tekil yük hızının artması maksimum sönümlü dinamik eğilme momenti değerlerini arttırmıştır ve bu yüzden statik değerleri aşmıştır.

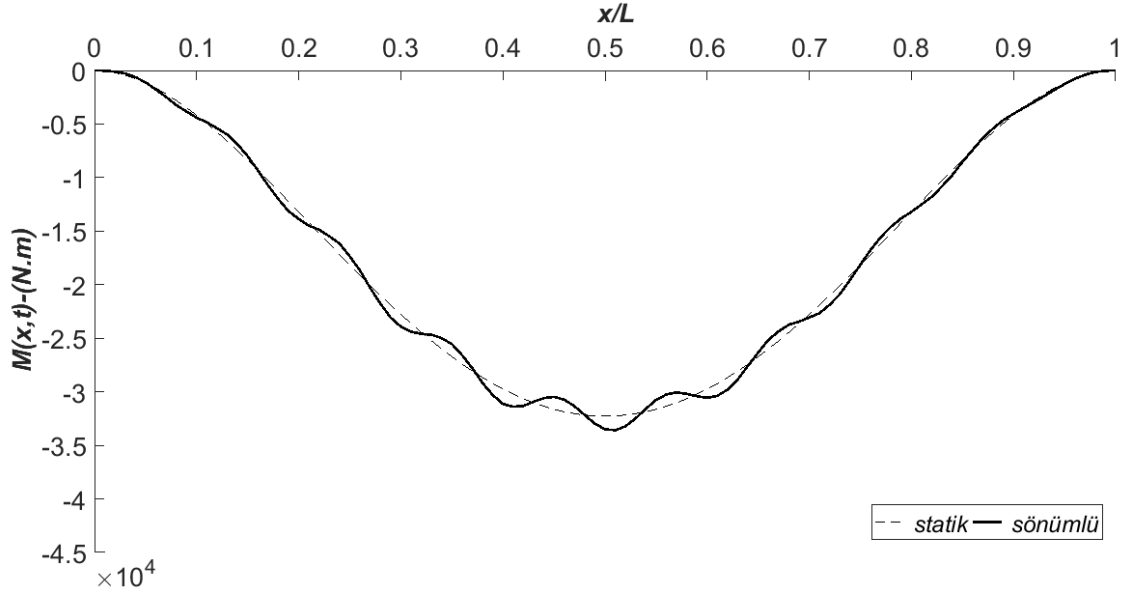
Devam eden bölümde kütle oranı 0,4 için ve çeşitli tekil yük hız değerlerinde kirişin sönümlü dinamik eğilme momenti davranışları gösterilmiştir.

Şekil 4.44’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişime yakın davranışlar göstermiştir ve kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %4 oranında sapmaktadır.



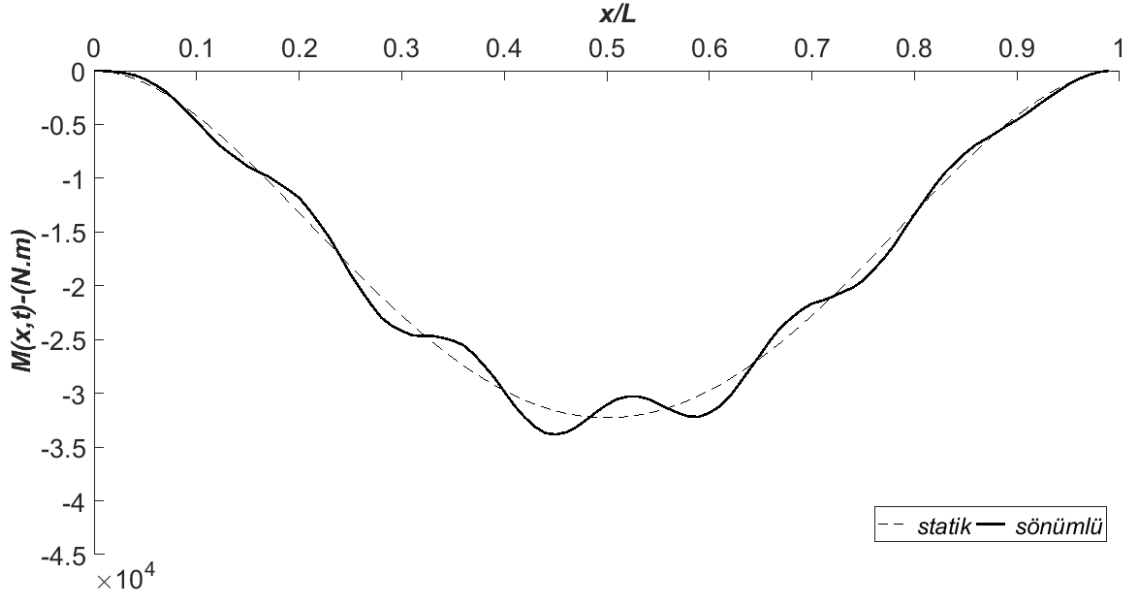
Şekil 4. 44 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Şekil 4.45’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %2 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 45 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

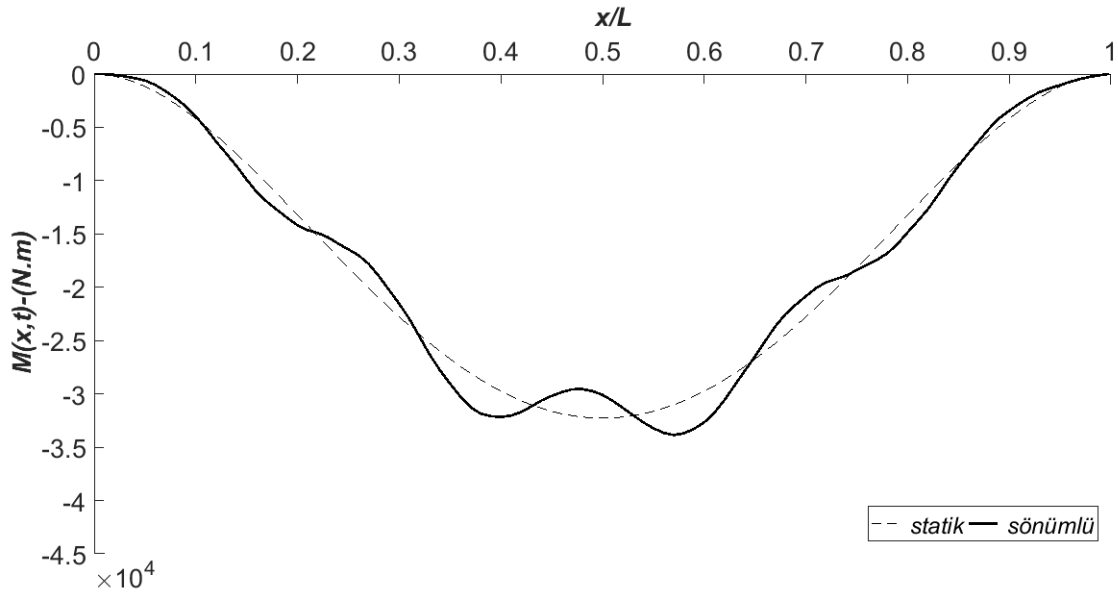
Şekil 4.46'da hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sola doğru %10 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 46 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

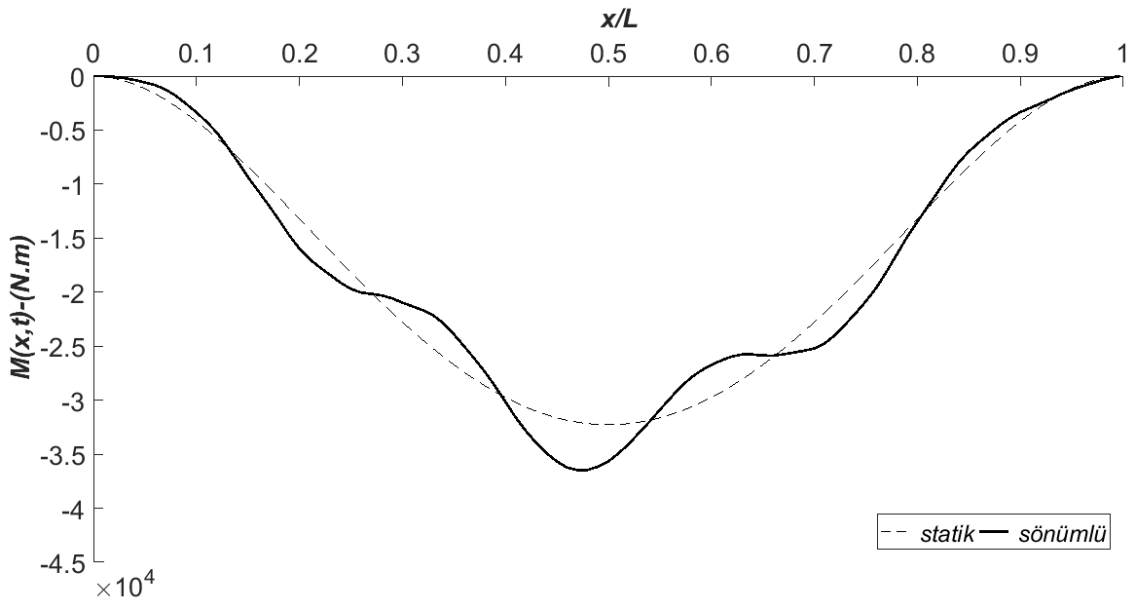
Şekil 4.47'de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim

kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %14 oranında sapmaktadır.



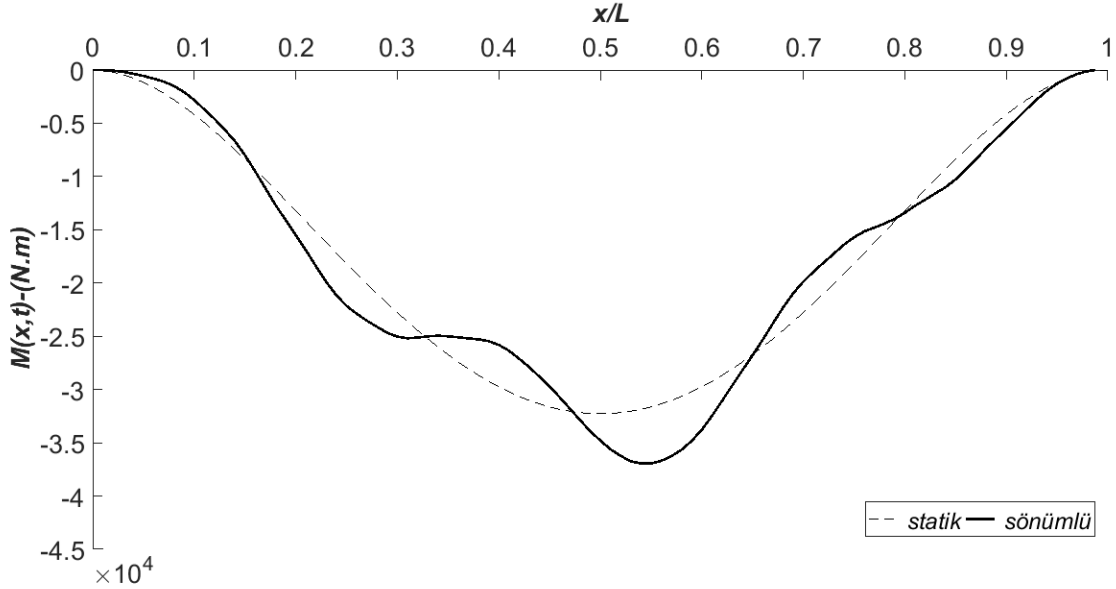
Şekil 4. 47 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Şekil 4.48’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sola doğru %6 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 48 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Şekil 4.49’da hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik eğilme momenti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarında statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum eğilme momenti değeri kiriş orta noktasından sağa doğru %10 oranında sapmaktadır.



Şekil 4. 49 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik eğilme momenti

Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik yer değiştirme değerleri kiriş orta noktasından minimum %2 maksimum %14 oranında sağa veya sola saptığı görülmektedir. Kiriş üzerindeki hareketli yük hızının artması sönümlü dinamik eğilme momenti değerlerini arttırdığı görülmektedir. Kütle oranındaki artışın dinamik salınım hareketlerine etkisinin çok az olduğu sadece maksimum değerleri arttırdığı Çizelge 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4. 7 Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümlü ve statik maksimum eğilme momenti değerleri

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	M _{statik (max)} [kNm]	M _{sönümlü (max)} [kNm]	M _{statik (max)} [kNm]	M _{sönümlü (max)} [kNm]
1	-16	-16.10	-32	-32.20
2	-16	-16.60	-32	-33.12
3	-16	-16.61	-32	-33.23
4	-16	-16.54	-32	-33.10
5	-16	-18.00	-32	-36.00
6	-16	-18.20	-32	-36.40

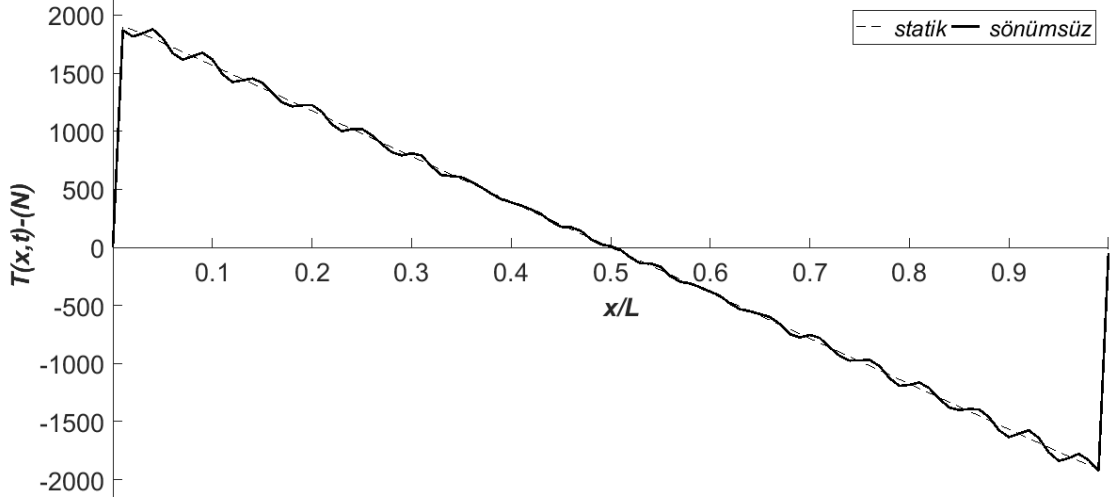
4.3 Kirişteki Kesme Kuvvetlerinin Dinamik Analizi

Bu bölümde farklı kütle oranları ile farklı hızlar için kirişte oluşan sönümlü ve sönümsüz dinamik kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler statik kesme kuvveti değerleriyle grafik ve tablolar halinde karşılaştırılmıştır. Kütle oranları (m/M) 0,2 ve 0,4 olarak belirlenmiş ve hareketli tekil yükün hızı sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 m/s alınmıştır. Tekil P yükünün kiriş üzerinde hareketinden dolayı iç kuvvetler, kesme kuvveti değerleri dinamik davranış göstermektedirler.

4.3.1 Kirişin Sönümsüz Kesme Kuvvetlerinin Dinamik Analizi

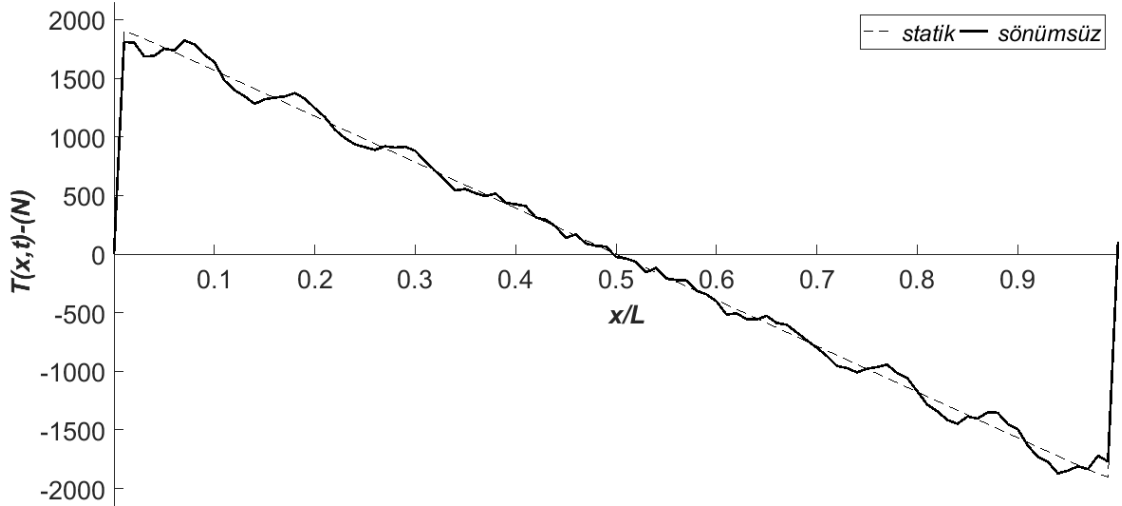
Analizler ilk olarak kütle oranı 0,2 için ardından 0,4 için gerçekleştirilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi statik kesme kuvveti eğrisi simetrik ve düzgündür. Statik kesme kuvveti eğrisi kiriş orta noktasından itibaren işaret değiştirmiştir. Maksimum statik kesme kuvveti değeri kirişin her iki ucunda mesnet noktalarında oluşmaktadır.

Şekil 4.50'de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 50 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

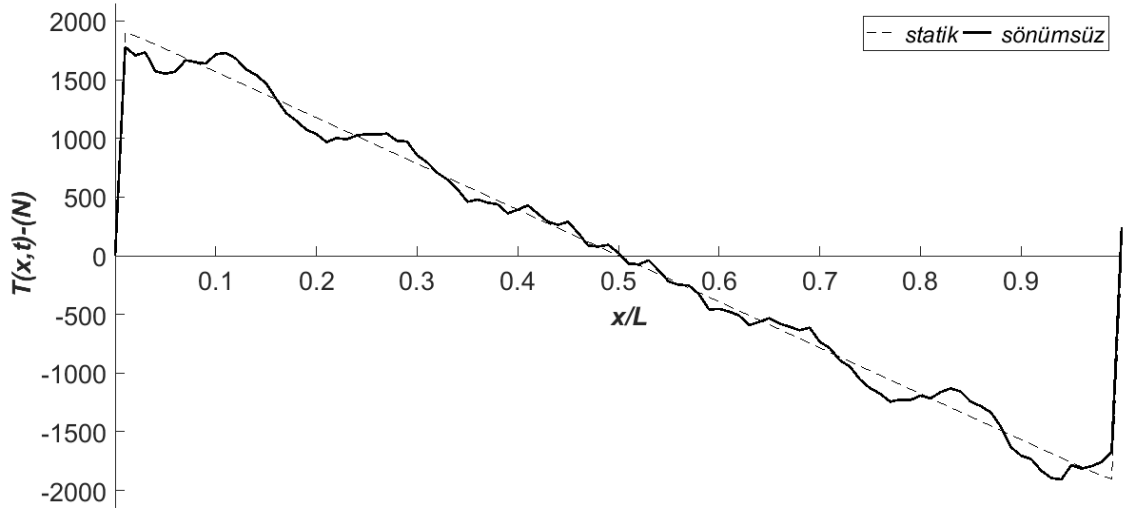
Şekil 4.51’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasından %5 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik değerin gerisinde kalmıştır.



Şekil 4. 51 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

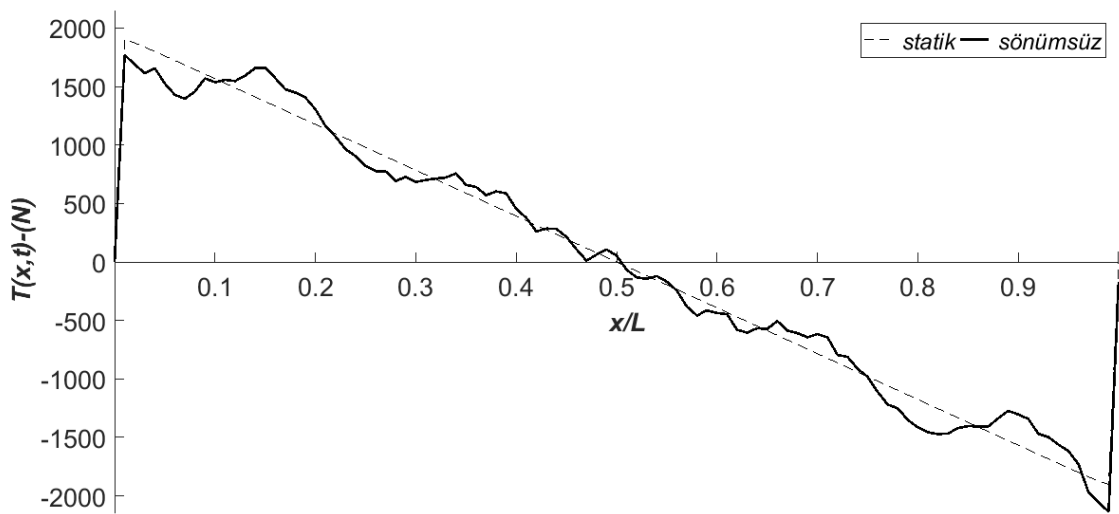
Şekil 4.52’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik

değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasından %5 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



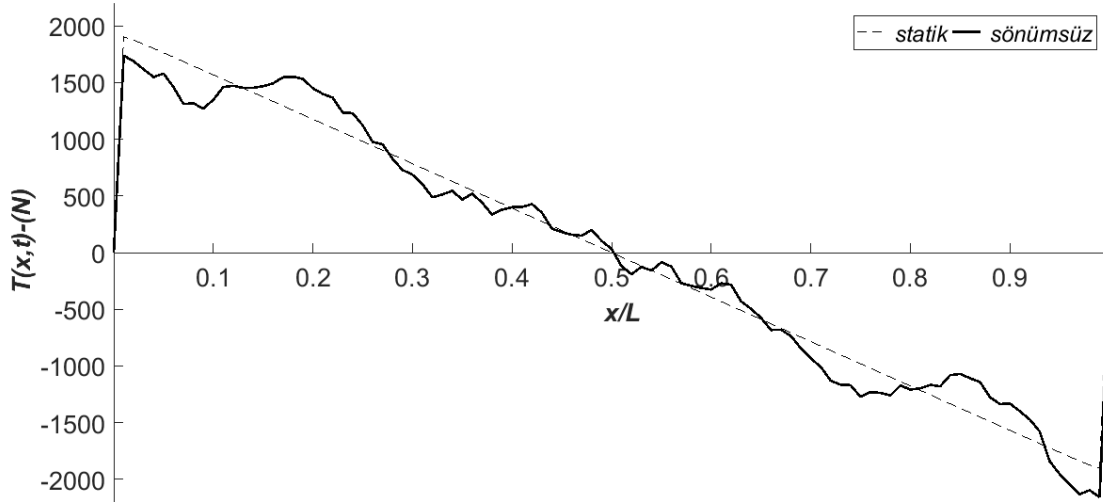
Şekil 4. 52 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.53’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



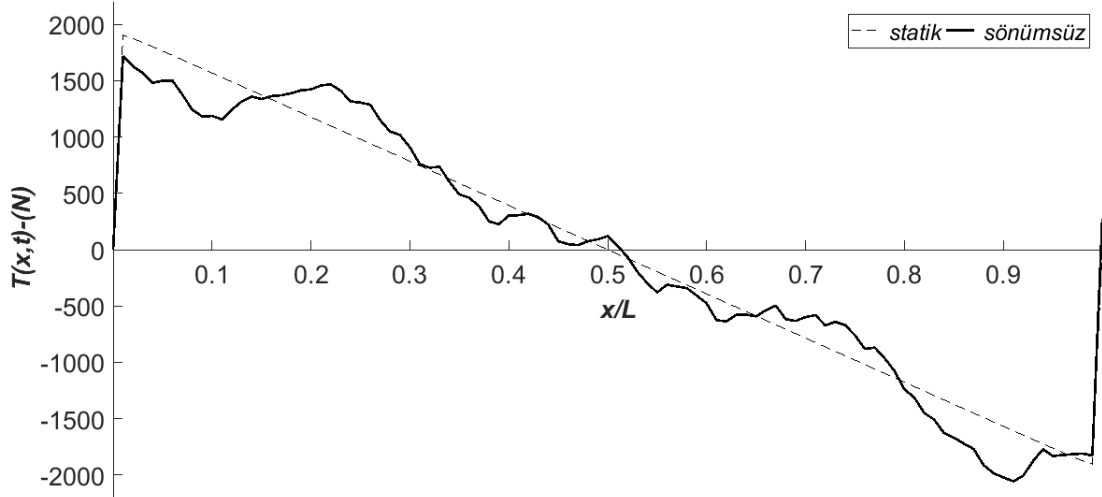
Şekil 4. 53 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.54’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 54 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.55’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasından yaklaşık %8 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.

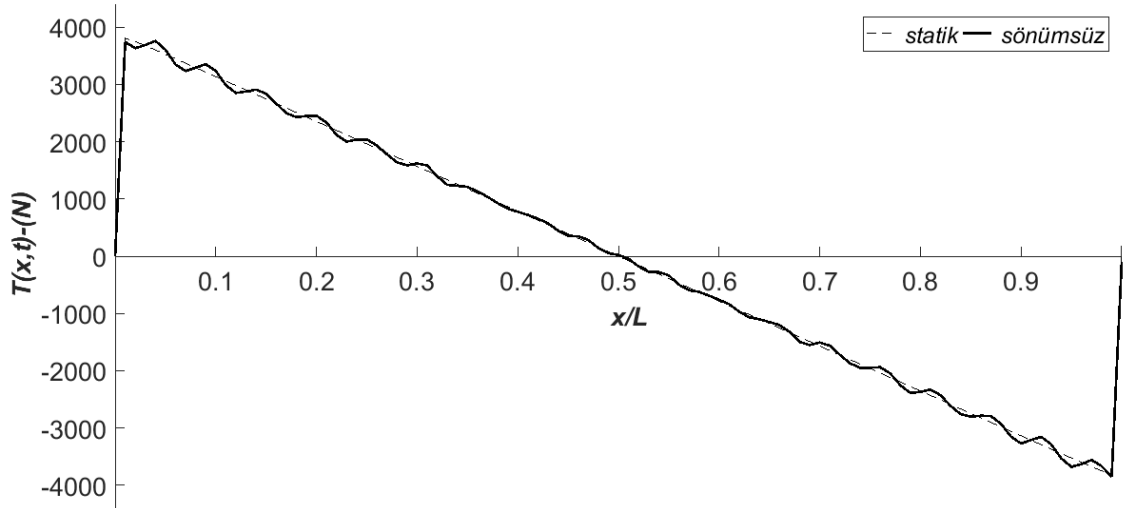


Şekil 4. 55 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Hareketli yükün hızı arttıkça dinamik salınımlar farklılık göstermektedir. Farklı hız değerlerinde sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değerleri kirişin sağ uç mesnet noktasından minimum %5 maksimum %8 oranında sola sapmaktadır. Hareketli yük hızının $v=1, 4$ ve 5 m/s değerlerinde sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır. Kiriş üzerindeki tekil yük hızının artması maksimum sönümsüz dinamik kesme kuvveti değerlerini arttırmıştır ve bu yüzden statik değerleri aşmıştır.

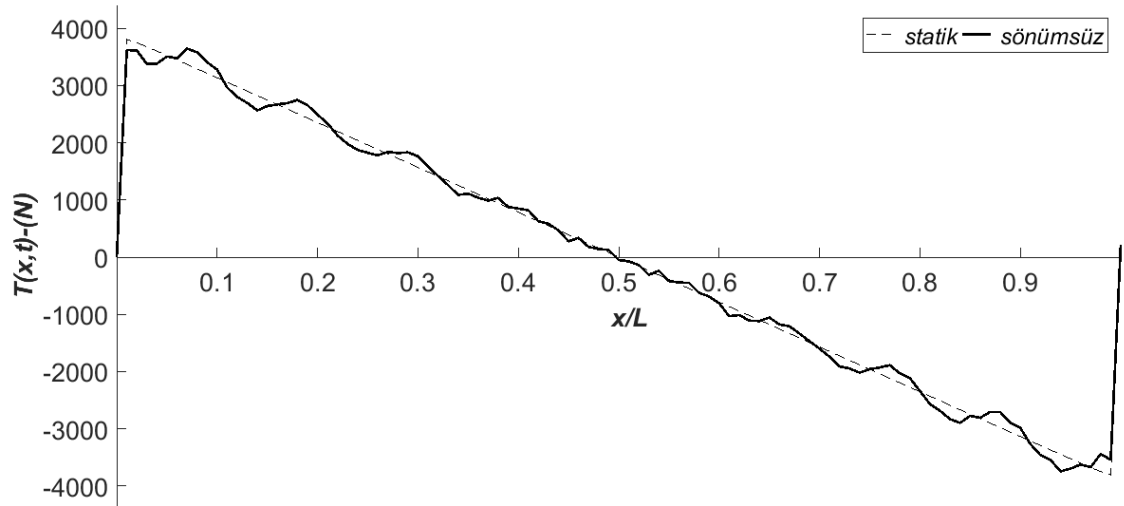
Devam eden bölümde kütle oranı 0,4 için ve çeşitli tekil yük hız değerlerinde kirişin sönümsüz dinamik kesme kuvveti davranışları gösterilmiştir.

Şekil 4.56'da hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının $0,4$ olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 56 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

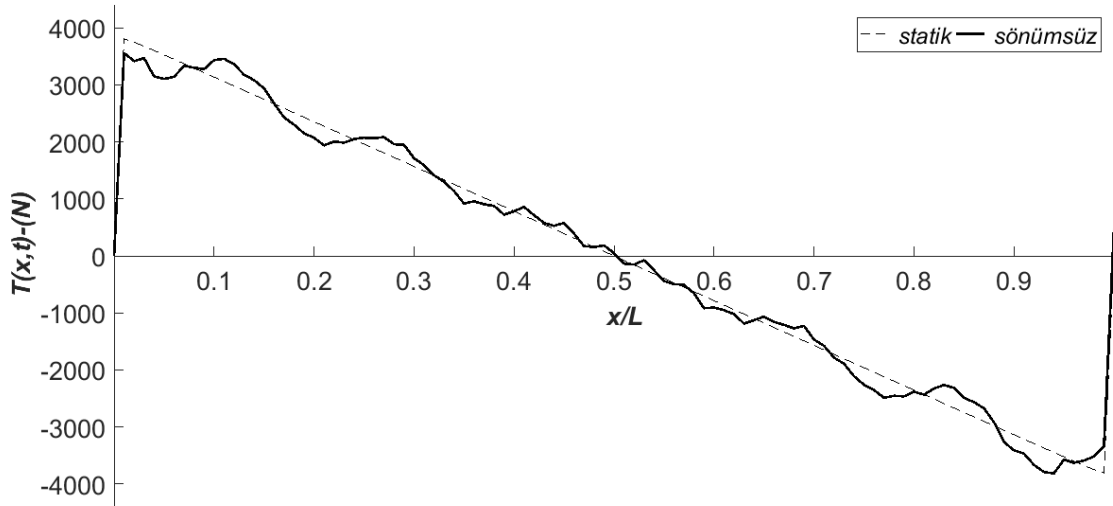
Şekil 4.57’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasından %5 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerinin gerisinde kalmıştır.



Şekil 4. 57 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

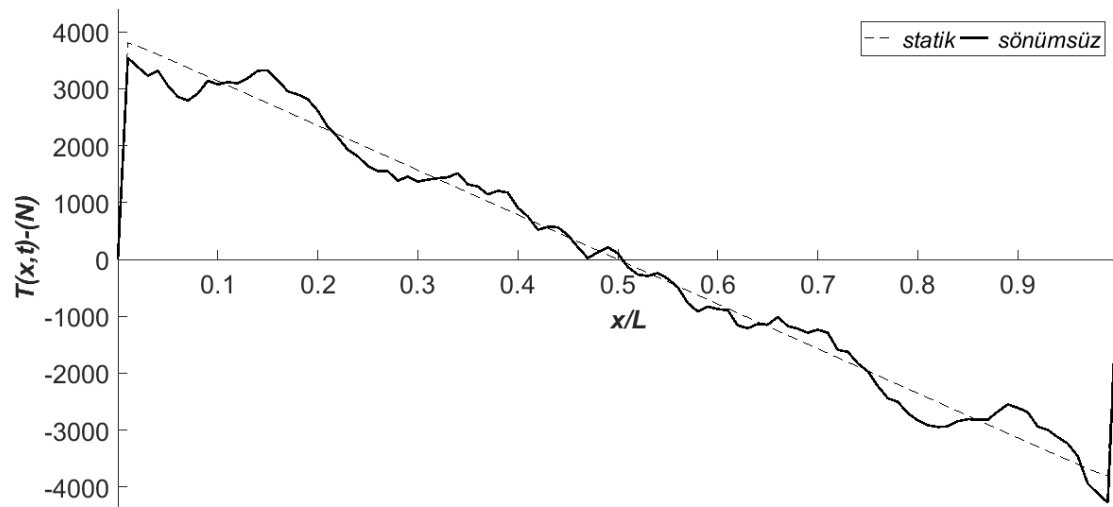
Şekil 4.58’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik

değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasından yaklaşık %5 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



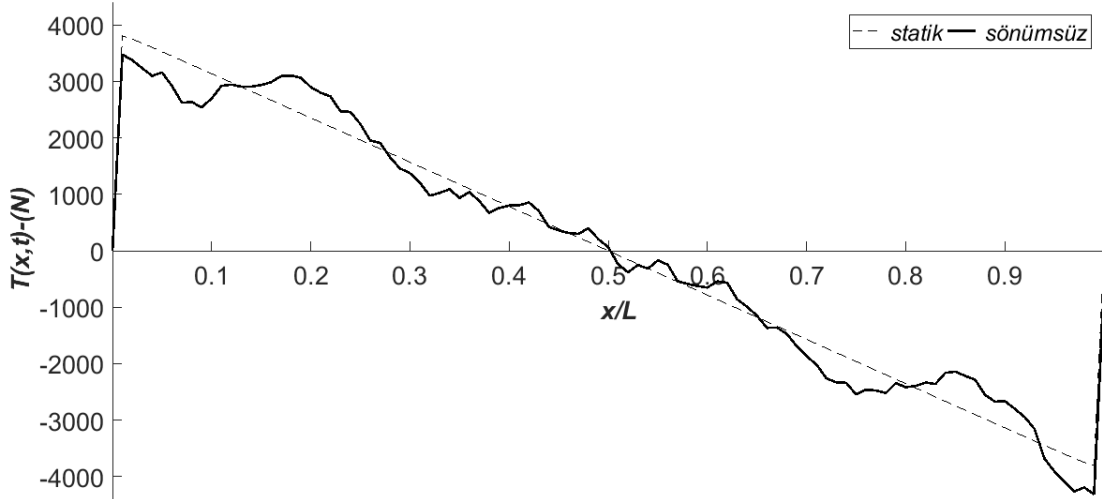
Şekil 4. 58 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.59’da hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



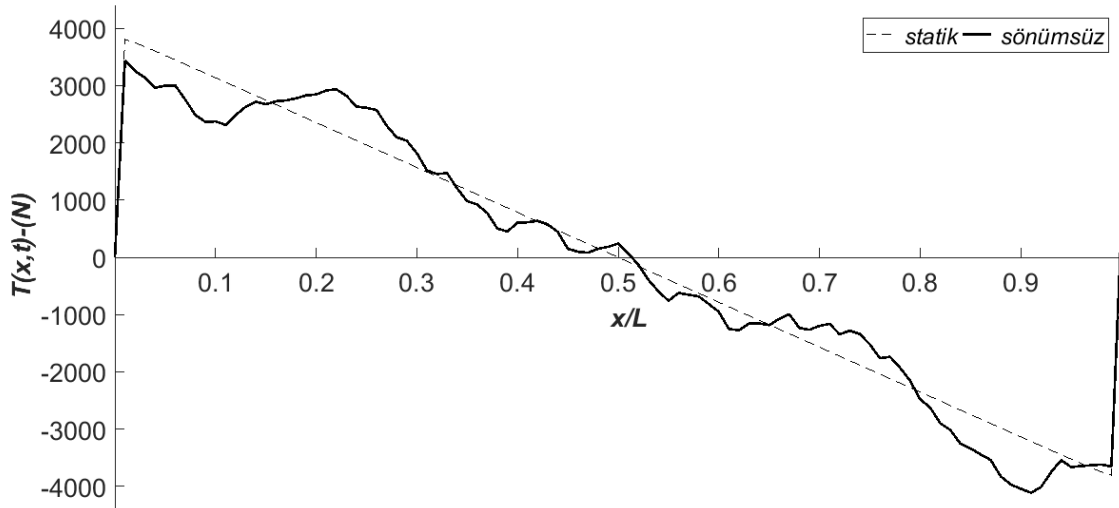
Şekil 4. 59 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.60’da hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 60 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.61’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümsüz ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümsüz dinamik değişim kirişin belirli noktalarında özellikle mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasından yaklaşık %8 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 61 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümsüz dinamik kesme kuvveti

Bazı hız değerlerinde maksimum dinamik kesme kuvveti değerleri kirişin sağ uç mesnet noktasından minimum %5 maksimum %8 oranında sola saptığı görülmektedir. Hareketli yük hızının $v=1, 4$ ve 5 m/s değerlerinde sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır. Kiriş üzerindeki tekil yük hızının artması maksimum sönümsüz dinamik kesme kuvveti değerlerini arttırmıştır ve bu yüzden statik değerleri aşmıştır. Kütle oranındaki artışın dinamik salınım hareketlerine etkisinin çok az olduğu sadece maksimum değerleri arttırdığı Çizelge 4.8’de görülmektedir.

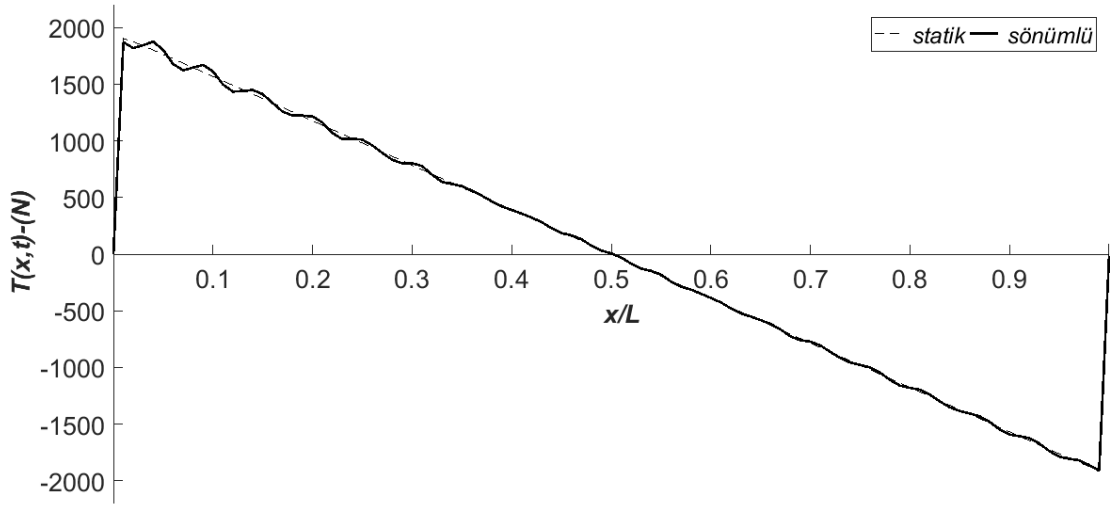
Çizelge 4. 8 Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümsüz ve statik maksimum kesme kuvveti değerleri

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	$T_{\text{statik (max)}}$ [kN]	$T_{\text{sönümsüz (max)}}$ [kN]	$T_{\text{statik (max)}}$ [kN]	$T_{\text{sönümsüz (max)}}$ [kN]
1	± 1.90	-1.93	± 3.81	-3.85
2	± 1.90	-1.87	± 3.81	-3.74
3	± 1.90	-1.91	± 3.81	-3.82
4	± 1.90	-2.14	± 3.81	-4.27
5	± 1.90	-2.16	± 3.81	-4.31
6	± 1.90	-2.10	± 3.81	-4.11

4.3.2 Kirişin Sönümlü Kesme Kuvvetlerinin Dinamik Analizi

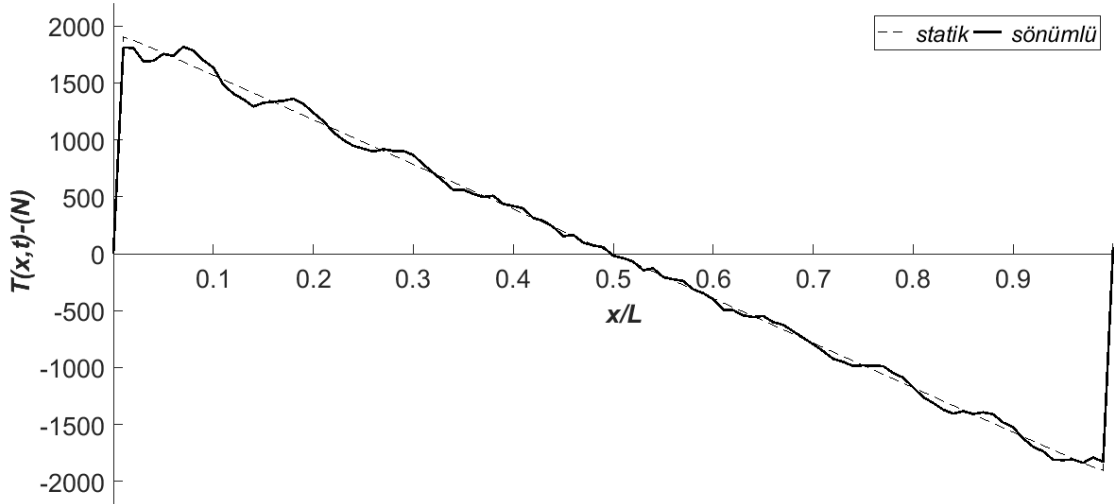
Analizler ilk olarak kütle oranı 0,2 için ardından 0,4 için gerçekleştirilmiştir. Statik kesme kuvveti eğrisi, sönümlü dinamik matematik modelden tekil yükün hızı $v=0,01$ m/s alınarak elde edilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi statik kesme kuvveti eğrisi simetrik ve düzgündür. Statik kesme kuvveti eğrisi kiriş orta noktasından itibaren işaret değiştirmiştir. Maksimum statik kesme kuvveti değeri kirişin her iki ucunda mesnet noktalarında oluşmaktadır.

Şekil 4.62’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin sol uç mesnet noktasına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Ayrıca, kirişin sağ uç mesnet noktalarına yakın yerlerde ise statik değişime yakın davranışlar göstermiştir. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



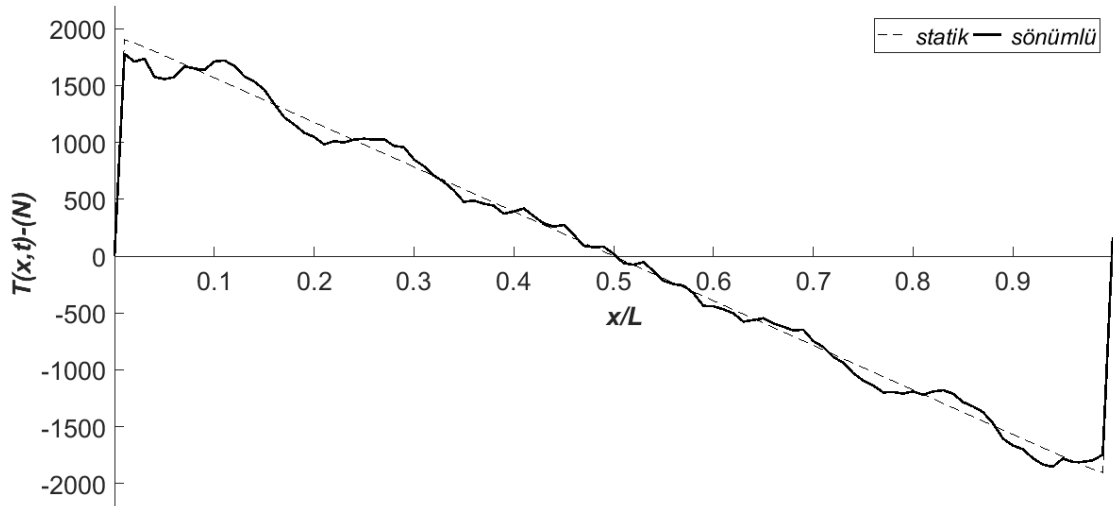
Şekil 4. 62 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.63’de hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasından yaklaşık %2 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerinin gerisinde kalmıştır.



Şekil 4. 63 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

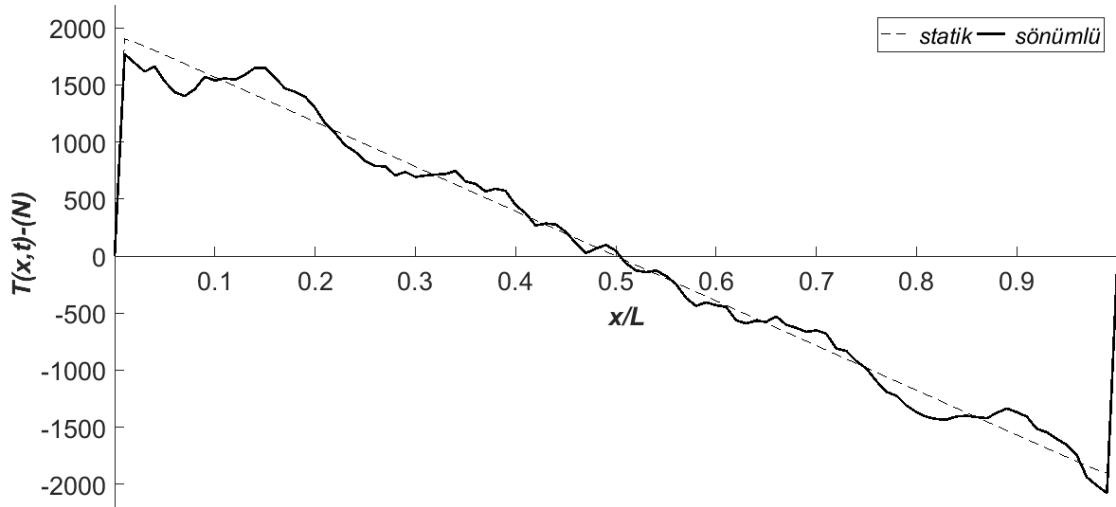
Şekil 4.64’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasından yaklaşık %5 oranında sola sapmıştır ve maksimum statik kesme kuvveti değerinin gerisinde kalmıştır.



Şekil 4. 64 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

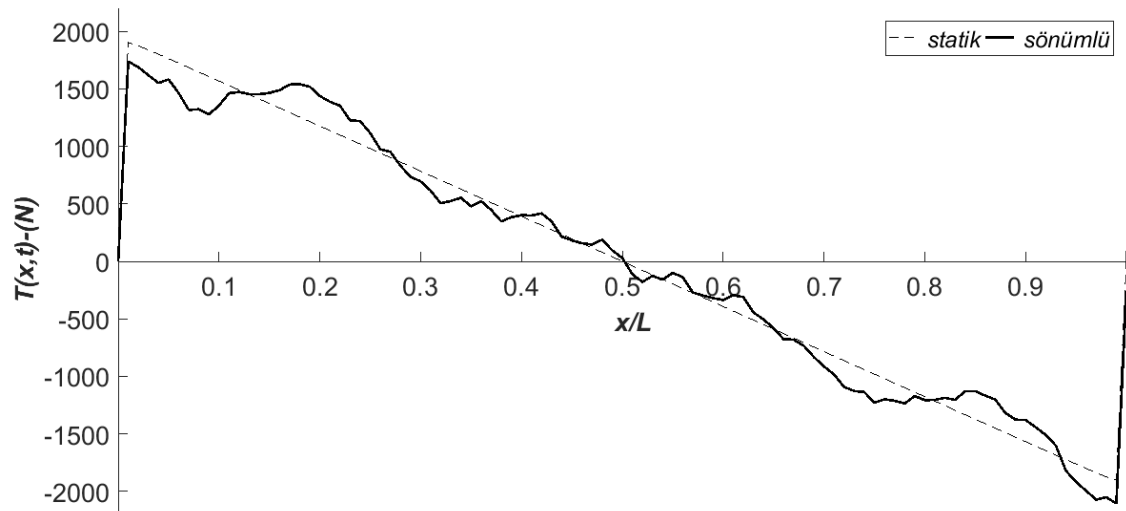
Şekil 4.65’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü

maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



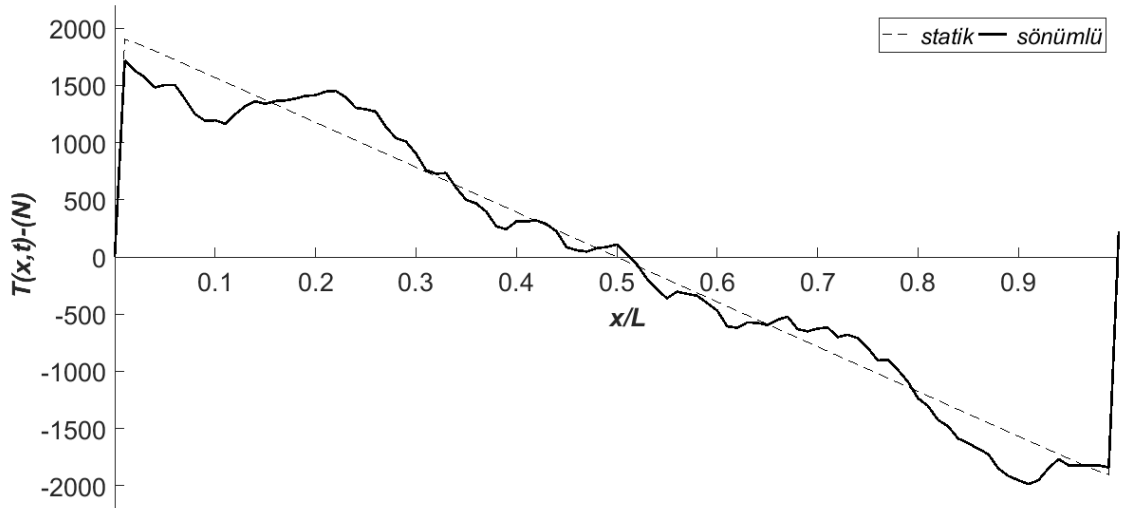
Şekil 4. 65 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.66'da hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 66 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.67’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,2 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasından %8 oranında sola sapmıştır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



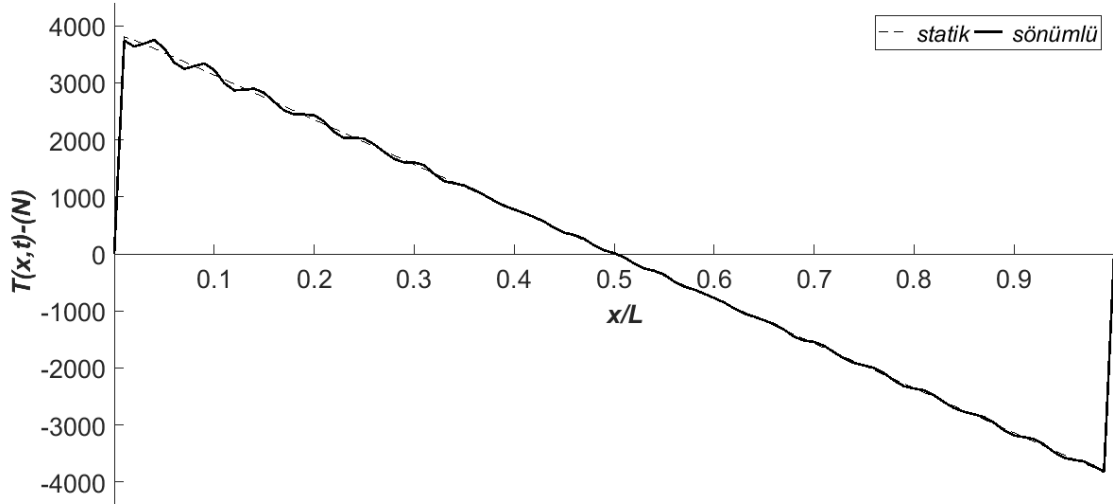
Şekil 4. 67 Kütle oranı 0,2 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Hareketli yükün hızı arttıkça dinamik salınımlar farklılık göstermektedir. Farklı hız değerlerinde sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değerleri kirişin sağ uç mesnet noktasından minimum %2 maksimum %8 oranında sola sapmaktadır. Hareketli yük hızının $v=1, 4$ ve 5 m/s değerlerinde sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır. Kiriş üzerindeki tekil yük hızının artması maksimum sönümlü dinamik kesme kuvveti değerlerini arttırmıştır ve bu yüzden statik değerleri aşmıştır.

Devam eden bölümde kütle oranı 0,4 için ve çeşitli tekil yük hız değerlerinde kirişin sönümsüz dinamik kesme kuvveti davranışları gösterilmiştir.

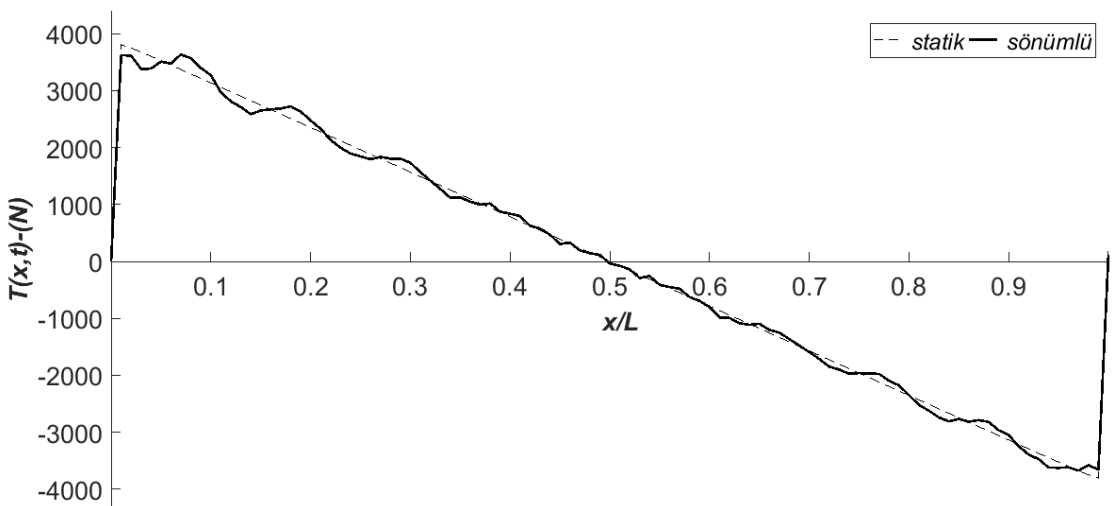
Şekil 4.68’de hareketli yük hızının 1 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin sol uç mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Ayrıca, kirişin sağ uç mesnet noktalarına yakın yerlerde statik değişimlere yakın davranışlar

göstermişleridir. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



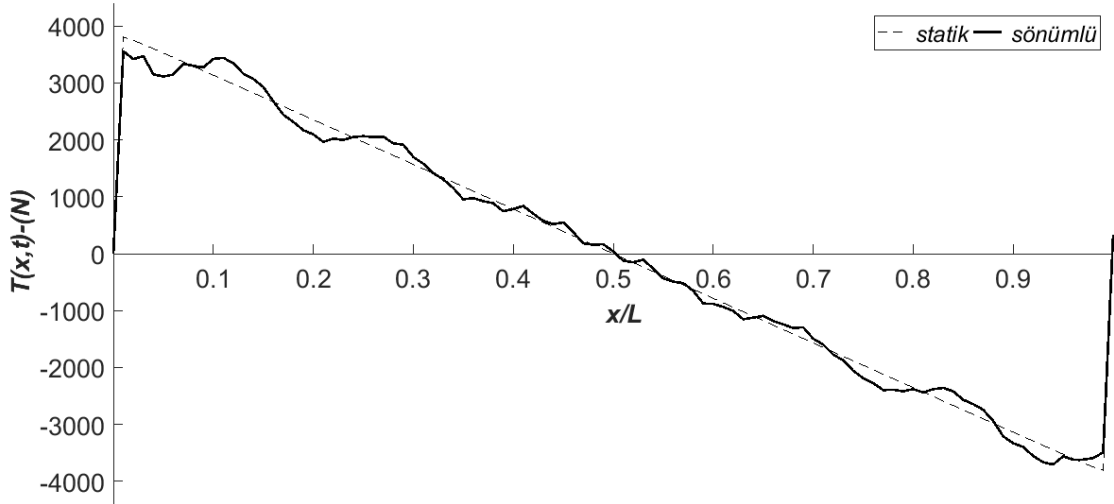
Şekil 4. 68 Kütlesi oranı 0,4 ve yük hızı 1 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.69'da hareketli yük hızının 2 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasından %2 oranında sola sapmıştır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvvetinin gerisinde kalmıştır.



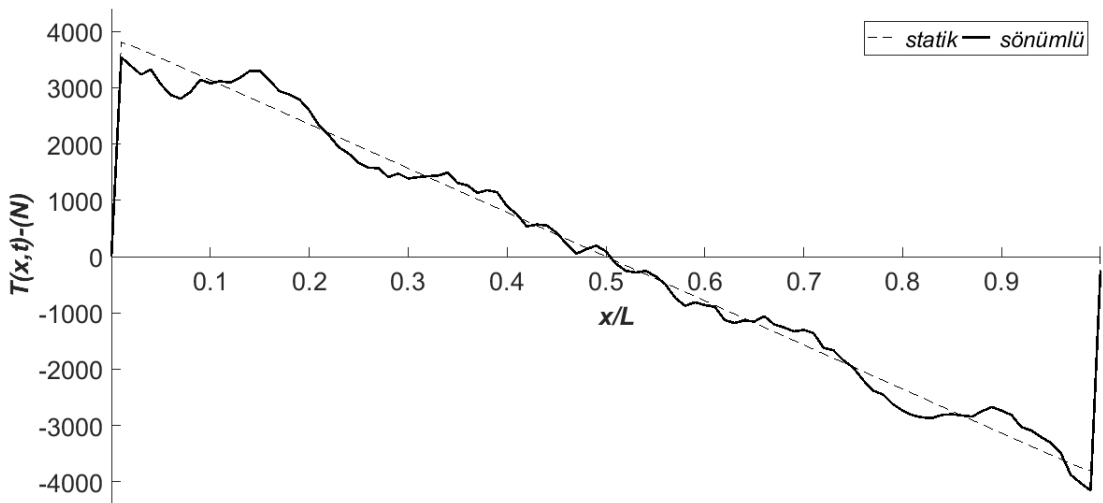
Şekil 4. 69 Kütlesi oranı 0,4 ve yük hızı 2 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.70’de hareketli yük hızının 3 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerinde, sönümlü dinamik değişim kirişin belirli noktalarına yakın yerlerde statik değişimleri aşmıştır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasından %5 oranında sola sapmıştır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvvetinin gerisinde kalmıştır.



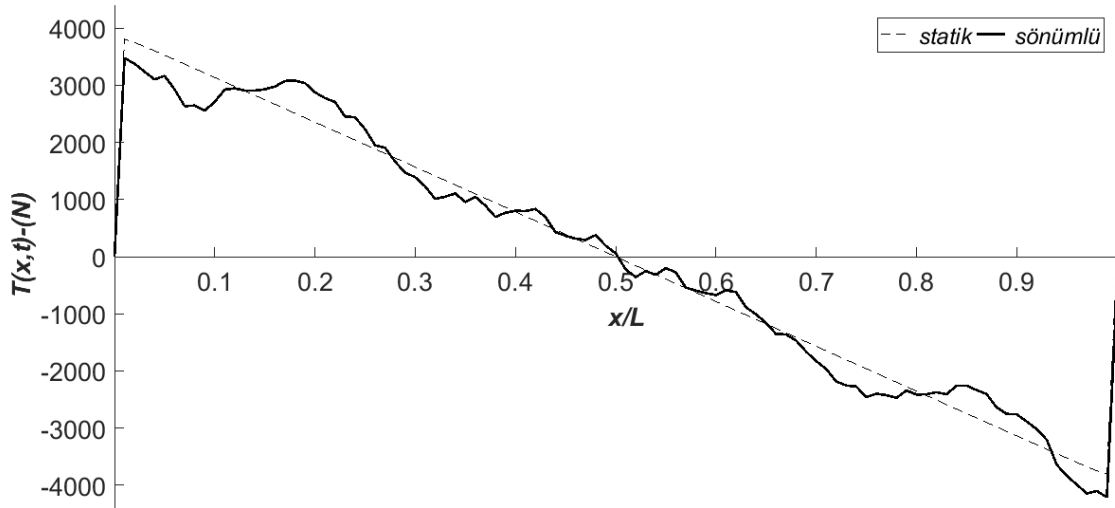
Şekil 4. 70 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 3 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.71’de hareketli yük hızının 4 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



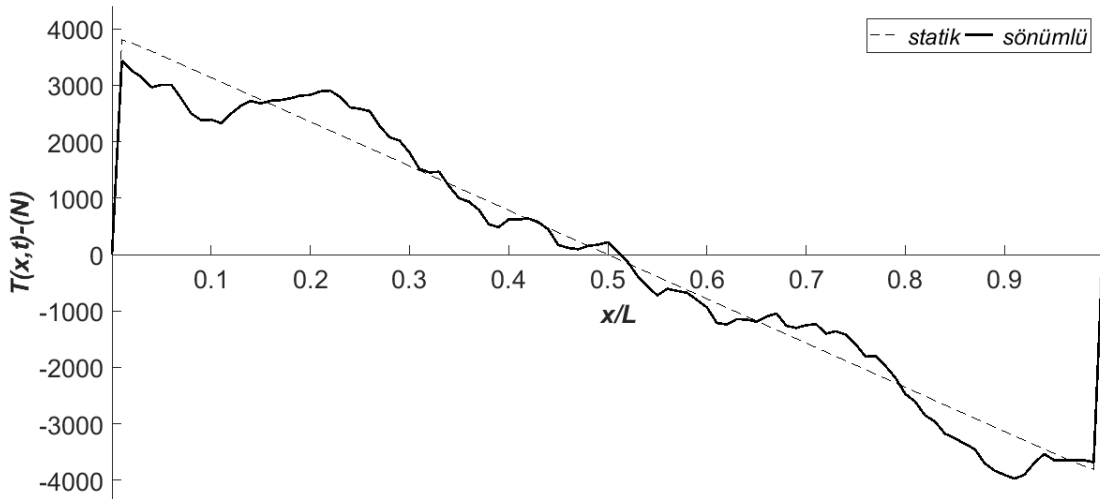
Şekil 4. 71 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 4 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.72’de hareketli yük hızının 5 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 72 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 5 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Şekil 4.73’de hareketli yük hızının 6 m/s ve kütle oranının 0,4 olduğu sönümlü ve statik kesme kuvveti değerleri gösterilmiştir. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri, kirişin sağ uç mesnet noktasından yaklaşık %8 oranında sola sapmıştır ve bu noktada maksimum statik kesme kuvveti değerini aşmıştır.



Şekil 4. 73 Kütle oranı 0,4 ve yük hızı 6 m/s için sönümlü dinamik kesme kuvveti

Bazı hız değerlerinde sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değerleri kirişin sağ uç mesnet noktasından minimum %2 maksimum %8 oranında sola saptığı görülmektedir. Hareketli yük hızının $v=1, 4$ ve 5 m/s değerlerinde sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değeri kirişin sağ uç mesnet noktasında oluşmaktadır. Kiriş üzerindeki tekil yük hızının belirli değerlerinde maksimum sönümlü dinamik kesme kuvveti değerleri artmıştır ve bu yüzden statik değerleri aşmıştır. Kütle oranındaki artışın dinamik salınım hareketlerine etkisinin çok az olduğu sadece maksimum değerleri arttırdığı Çizelge 4.9'da görülmektedir.

Çizelge 4. 9 Kütle oranları (0,2 ve 0,4) ve çeşitli hızlar için kirişin sönümlü ve statik maksimum kesme kuvveti değerleri

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	T _{statik (max)} [kN]	T _{sönümlü (max)} [kN]	T _{statik (max)} [kN]	T _{sönümlü (max)} [kN]
1	±1.90	-1.91	±3.81	-3.82
2	±1.90	-1.84	±3.81	-3.67
3	±1.90	-1.85	±3.81	-3.70
4	±1.90	-2.08	±3.81	-4.16
5	±1.90	-2.10	±3.81	-4.21
6	±1.90	-2.00	±3.81	-4.00

4.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

Kiriş üzerindeki hareketli tekil yük hızının artması kirişin sönümlü ve sönümsüz dinamik davranışlarını arttırmaktadır. Kütle oranındaki artış maksimum dinamik ve statik değerleri arttırmıştır. Sönümlü ve sönümsüz maksimum dinamik yer değiştirme değerlerinin statik değerlerden sapma miktarı minimum %2 maksimum %14 olmaktadır. Sönümsüz maksimum dinamik eğilme momenti değerlerinin statik değerlerden sapma miktarı minimum %2 maksimum %10 olmaktadır. Sönümlü maksimum dinamik eğilme momenti değerlerinin statik değerlerden sapma miktarı minimum %2 maksimum %14 olmaktadır. Sönümsüz maksimum dinamik kesme kuvveti değerlerinin statik değerlerden sapma miktarı minimum %5 maksimum %8 olmaktadır. Sönümlü maksimum dinamik kesme kuvveti değerlerinin statik

değerlerden sapma miktarı minimum %2 maksimum %8 olmaktadır. Özetle, sönümlü ve sönümsüz maksimum dinamik değerlerin maksimum statik değerlerden sapma miktarları çok fazla değişmemiştir. Sönümlü ve sönümsüz dinamik davranışlar kirişin belirli noktalarında ve farklı hareketli hız değerlerinde statik değerleri aşmıştır. Bu nedenle konstrüktörler kren kirişi tasarımında sönümlü matematik modelleri de hesaplara dahil etmelidirler.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, üzerinde hareketli tekil yük bulunan ve kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen, izotropik Euler-Bernoulli tipi kirişin dinamik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, literatürdeki önceki çalışmaların yardımıyla bulunan sönümsüz matematik modeller bu çalışmada elde edilen hafif sönümlü matematik modeller ile karşılaştırılmıştır. Bu modellerden elde edilen yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri incelendiğinde kirişin belirli noktalarında ve farklı hareketli hız değerlerinde statik değerlerin aşıldığı görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada hafif sönümlü durumdaki kiriş için elde edilen sonuçlar, yazarların önceki çalışmalarında [34] ve İ. Esen'in doktora tezinde [9] sönümsüz durumdaki kiriş için elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırıldıklarında sönümsüz ve hafif sönümlü durumdaki kirişin orta noktasından yüzde sapma miktarlarının çok fazla değişmediği sadece hafif sönümlü durumda maksimum dinamik yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti miktarlarının sönümsüz duruma göre daha az olduğu görülmüştür. Bu nedenle, konstrüktörlerin yüksek hızlarda çalışacak kren kirişlerinin tasarımında bu matematik modelleri kullanarak dinamik etkileri de dikkate almaları gerektiği bu çalışmada gösterilmiştir.

Sonraki çalışmalarda kren kirişinin dinamik davranışlarını etkileyen asılı yükün salınım hareketleri, asılı yük ipinin esnekliği, hareketli yükün hızlanma ve yavaşlama etkileri gibi önemli parametrelerin hesaplanması konstrüktörlere kren tasarımının doğru bir şekilde yapılabilmesi için kolaylıklar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Verschoof, J., (2002). Cranes-Design, Practice, and Maintenance, Second Edition, Professional Engineering Publishing Limited, London.
- [2] Qianwei, D. ve Yi, J., (2016). Hierarchical Sliding Mode Control for Under-actuated cranes, Springer, Berlin.
- [3] İmrak, C.E. ve Gerdemeli, İ., Transport Tekniği Ders Notları, <http://transport.itu.edu.tr/dersler/lisansdersleri/mak4023/dersnotlari>, 8 Şubat 2018.
- [4] Kulwiec, A.R., (1985). Materials Handling Handbook, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, New Jersey.
- [5] Hasan, A.G., (2012). Hareketli yüke maruz Euler-Bernoulli Tipi Kirişlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Kurt, S., Kutay, G.M. ve Aslan, R., (2008). Krenlerde Çelik Konstrüksiyonlar, I.Cilt, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- [7] Gerdemeli, İ., Transport Tekniğinde İleri Konular Ders Notları, <http://transport.itu.edu.tr/dersler/lisansustudersleri/mks533/dersnotlari>, 8 Şubat 2018.
- [8] Di Lorenzo, S., Di Paola, M., Failla, G. ve Pirrotta, A., (2017). “On the moving load problem in Euler-Bernoulli uniform beams with viscoelastic supports and joints”, Acta Mech, 228:805-821.
- [9] Esen, İ., (2009). Hareketli Yükler Altındaki Köprülü Kren Kirişinin Dinamik Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Esen, İ. ve Gerdemeli, İ., (2010). “Hareketli yükler altındaki köprülü kren kirişlerinin dinamik davranışı”, İTÜ Dergisi, 9(5):145-156.
- [11] Fryba, L., (1999). Vibration of solids and structures under moving loads, Third Edition, Thomas Telford Ltd., Prague.
- [12] Mikvsinski, J. ve Sikorski, R., (1957). “The elementary theory of distributions (I)”, Rozprawy matematyczne, 12:1-54.

- [13] Azeloğlu, C.O., Sağırılı, A. ve Edinçliler, A., (2013). "Mathematical modelling of the container cranes under seismic loading and proving by shake table", *Nonlinear Dyn*, 73:143-154.
- [14] Pesterev, A.V. ve Bergman, L.A., (1997). "Vibration of elastic continuum carrying accelerating oscillator", *Journal of engineering mechanics*, 123(8):886-889.
- [15] Xu, X., Xu, W. ve Genin, J., (1997). "A non-linear moving mass problem", *Journal of Sound and Vibration*, 204(3):495-504.
- [16] Fryba, L., (1996). *Dynamics of railway bridges*, First edition, Thomas Telford Ltd., Prague.
- [17] Foda, M.D. ve Abduljabbar, Z., (1998). "A dynamic Green Function formulation for the response of a beam structure to a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, 210(3):295-306.
- [18] Pesterev, A.V. ve Bergman, L.A., (1998). "A contribution to the moving mass problem", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 120:824-826.
- [19] Pesterev, A.V. ve Bergman, L.A., (1998). "Response of a nonconservative continuous system to a moving concentrated load", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 65:436-444.
- [20] Pesterev, A.V. ve Bergman, L.A., (2000). "An improved series expansion of the solution to the moving oscillator problem", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 122:54-61.
- [21] Pesterev, A.V., Yang, B., Bergman, L.A. ve Tan, C.A., (2003). "Revisiting the moving force problem", *Journal of Sound and Vibration*, 261:75-91.
- [22] Bilello, C. ve Bergman, L.A., (2004). "Vibration of damaged beams under a moving mass: theory and experimental validation", *Journal of Sound and Vibration*, 274:567-582.
- [23] Abou Zaid, M.A. ve Mahmoud, M.A, (2002). "Dynamic response of a beam with a crack subject to a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, 256(4):591-603.
- [24] Ouyang, H., (2011). "Moving-load dynamic problems: A tutorial (with a brief overview)", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25:2039-2060.
- [25] Karimi, A.H. ve Ziaei-Rad, S., (2015). "Vibration analysis of a beam with moving support subjected to a moving mass travelling with constant and variable speed", *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 29:372-390.
- [26] Abu-Hilal, M., (2006). "Dynamic response of a double Euler-Bernoulli beam due to a moving constant load", *Journal of Sound and Vibration*, 297:477-491.
- [27] Sheng, G.G. ve Wang, X., (2017). "The geometrically nonlinear dynamic responses of simply supported beams under moving loads", *Applied Mathematical Modelling*, 48:183-195.

- [28] Zupan, E. ve Zupan, D., (2018). "Dynamic analysis of geometrically non-linear three dimensional beams under moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, 413:354-367.
- [29] He, W., (2018). "Vertical Dynamics of a single-span beam subjected to moving mass-suspended payload system with variable speeds", *Journal of Sound and Vibration*, 418:36-54.
- [30] Azeloğlu C.O., Hasan A.G., Özen S., Çolak Çakır Ö.Ü. ve Sağırılı A., (2015). "Theoretical and experimental deformation analysis of crane beams subjected to moving load", *Sigma Journal Engineering and Natural Sciences*, 33: 653-663.
- [31] Yang, B., Tan, C.A. ve Bergman, L.A., (2000). "Direct numerical procedure for solution of moving oscillator problems", *Journal of Engineering Mechanics*, 126(5): 462-469.
- [32] Low, K.H., (1997). "An analytical-experimental comparative study of vibration analysis for loaded beams with variable boundary conditions", *Computers and Structures*, 65: 97–107.
- [33] Kožar, I. and Štimac, I., (2003). "Dynamic analysis of loads moving over structures", 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Bizovac, Croatia, September 18-20.
- [34] Azeloğlu, C.O. ve Kural, S., (2017). "Investigation dynamic behaviors of the crane beams under moving load", 3rd Conference on advances in mechanical engineering(ICAME), Istanbul, 886-894.
- [35] Azeloğlu, C.O. ve Kural, S., (2018). "Kren kirişlerinin hareketli tekil yüke maruz sönümlü Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmesi ve dinamik analizi", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi (Baskıda)*.

ÇİZELGELER

A-1 Fourier Sinüs Sonlu İntegral Dönüşümleri

Çizelge A. 1 Fourier sinüs sonlu integral dönüşümü

Orijinal	Dönüşüm	Denklemler Numarası
$f(x) = \frac{2}{L} \sum_{j=1}^{\infty} V(j,t) \sin \frac{j\pi x}{L}$	$F(j) = \int_0^L f(x) \frac{2}{L} \sin \frac{j\pi x}{L}$	(A 1.1)
$\frac{d^4 f(x)}{dx^4}, (f(0) = f(L) = f''(0) = f''(L) = 0)$	$\frac{j^4 \pi^4}{L^4} F(j)$	(A 1.2)
$af(x)$	$aF(j)$	(A 1.3)
$\delta(x-a)$	$\sin \frac{j\pi a}{L}$	(A 1.4)

A-2 Laplace-Carson İntegral Dönüşümleri

Çizelge A. 2 Laplace-Carson integral dönüşümü

Dönüşüm	Orijinal	Denklemler Numarası
$F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$	$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a_0 - i\infty}^{a_0 + i\infty} \frac{F(p)}{p} e^{pt} dp$	(A 1.5)
a	a	(A 1.6)
$\sum_j^n a_j F_j(p)$	$\sum_j^n a_j f_j(t)$	(A 1.7)
$p^n F(p) - p^n f(0_+) - p^{n-1} \frac{df(0_+)}{dt} - \dots - p \frac{d^{n-1} f(0_+)}{dt^{n-1}}$	$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$	(A 1.8)
$\frac{p}{p^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} \sin at$	(A 1.9)
$\frac{p}{(p^2 + c^2)[(p+a)^2 + b^2]}$	$\frac{1}{(a^2 + b^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2} \left[\frac{a^2 + b^2 - c^2}{c^2} (1 - \cos ct) + \frac{3a^2 - b^2 + c^2}{a^2 + b^2} (1 - e^{-at} \cos bt) - \frac{2a}{c} \sin ct + \frac{a(3b^2 - a^2 - c^2)}{b(a^2 + b^2)} e^{-at} \sin bt \right]$	(A 1.10)
$\frac{p}{(p^2 + a^2)(p^2 + b^2)}$	$\frac{1}{ab(a^2 - b^2)} (a \sin bt - b \sin at)$	(A 1.11)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sami KURAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.10.1992, Tomarza
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : samikural@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2014
Lise	Sayısal	İzzet Ünver Lisesi	2010

YAYINLARI

Bildiri

1. Azeloğlu, C.O. ve Kural, S., (2017). “Investigation dynamic behaviors of the crane beams under moving load”, 3rd Conference on advances in mechanical engineering(ICAME), Istanbul, 886-894.