

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK HIZLI TREN GEÇİŞLERİ ALTINDAKİ KÖPRÜLERDE REZONANS
TİTREŞİMLERİNİN AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERLE AZALTILMASI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Onur ARAZ

**HAZİRAN 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Yüksek Hızlı Tren Geçişleri Altındaki Köprülerde Rezonans Titreşimlerinin Ayarlı Kütle Sönümleyicilerle Azaltılması” isimli tez çalışmasını bana öneren ve çalışmamın her aşamasında beni destekleyen, daha iyi ve güzel çalışmalar için devamlı teşvik eden değerli hocam Sayın Doç. Dr. Volkan KAHYA'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora tez izleme komitesi ve aynı zamanda jüri üyesi kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ragıp ERDÖL ve Sayın Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU'na eleştiri ve önerilerinden dolayı teşekkür ederim. Tez savunma sınavı jüri üyeliğini kabul eden değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mehmet ÜLKER ve Sayın Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK'a tezle ilgili yapmış oldukları değerlendirmelerinden dolayı teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde ellerinden gelen tüm imkanları sağlayan, özellikle hayatımın bu önemli aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, haklarımı hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli aileme minnet ve şükranlarımı sunmayı hayatımın sonuna kadar bir borç bilirim. Bu çalışma boyunca desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen sevgili eşime ve güler yüzüyle bana her zaman moral veren oğlum Ömer Hamza'ya sonsuz sevgilerimi sunarım. Bu çalışmanın, Ülkemizin bilimsel alanda ilerlemesine ve yeni yapılacak olan çalışmalara katkıda bulunmasını temenni ederim.

Onur ARAZ
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüksek Hızlı Tren Geçişleri Altındaki Köprülerde Rezonans Titreşimlerinin Ayarlı Kütle Sönümleyicilerle Azaltılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Volkan KAHYA'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/06/2017

Onur ARAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.2.1. Köprülerin Hareketli Yük Altındaki Dinamik Davranışını İnceleyen Çalışmalar.....	2
1.2.1.1. Hareketli Taşıt Modelleri	3
1.2.1.2. Köprü Modelleri.....	4
1.2.1.3. Demiryolu Köprüleri ve Yüksek Hızlı Trenler	5
1.2.2. Köprülerde Rezonans Titreşimlerinin Azaltılmasını İnceleyen Çalışmalar.....	6
1.2.2.1. Klasik Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemlerini Konu Alan Çalışmalar.....	7
1.2.2.2. Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemlerini Konu Alan Çalışmalar.....	8
1.3. Tezin Kapsamı ve Önemi	9
1.4. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler ve Teorik Esasları	11
1.4.1. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde İncelenmesi.....	14
1.4.1.1. Model 1: Sönümsüz Ana Sistem ve Sönümsüz AKS.....	14
1.4.1.2. Model 2: Sönümsüz Ana Sistem ve Sönümlü AKS.....	18
1.4.1.3. Model 3: Sönümlü Ana Sistem ve Sönümlü AKS	21
1.4.1.4. Model 4: Tek Serbestlik Dereceli Ana Sistem ve Paralel Bağlı AKS Sistemi (PAKS).....	23
1.4.1.5. Model 5: Tek Serbestlik Dereceli Ana Sistem ve Seri Bağlı AKS Sistemi (SAKS).....	26

1.5.	Hareketli Yük Katarı Etkisindeki Elastik Kiriş: Analitik Çözüm	27
1.5.1.	Kiriş Üzerinde Sönümleyici Olmaması Durumu	27
1.5.2.	Kiriş Üzerinde Paralel Bağlı AKS Sistemi Olması Durumu.....	30
1.5.3.	Kiriş Üzerinde Seri Bağlı AKS Sistemi Olması Durumu	32
1.6.	Hareketli Yük Katarı Etkisindeki Sürekli Kiriş: Analitik Çözüm.....	35
1.6.1.	Kiriş Üzerinde Sönümleyici Olmaması Durumu	35
1.6.2.	Kiriş Üzerinde Paralel Bağlı AKS Sistemi Olması Durumu.....	38
1.7.	Newmark Yöntemi	41
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	44
2.1.	Giriş.....	44
2.2.	YHT Etkisindeki Köprülerin Dinamik Davranışı	44
2.2.1.	Tek Açıklıklı Köprülere Ait Bulgular	47
2.2.2.	İki Açıklıklı Köprülere Ait Bulgular	57
2.3.	Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimum Tasarımı.....	72
2.3.1.	Sıralı Kuadratik Programlama (SKP) Metodu	72
2.3.2.	Matlab Programında Optimizasyon Probleminin Çözülmesi.....	74
2.3.3.	YHTK1-PAKS / SAKS Problemleri İçin Optimum Değerlerin <i>fmincon</i>	79
	Fonksiyonu ile Bulunması.....	
2.4.	Paralel Bağlı Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin (PAKS) Tasarımı İçin Yeni Bir Yöntem	88
2.4.1.	Tek Açıklıklı Köprülere Uygulama.....	89
2.4.2.	İki Açıklıklı Köprülere Uygulama	98
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
4.	KAYNAKLAR.....	109
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

YÜKSEK HIZLI TREN GEÇİŞLERİ ALTINDAKİ KÖPRÜLERDE REZONANS
TİTREŞİMLERİNİN AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERLE AZALTILMASI

Onur ARAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Volkan KAHYA
2017, 120 Sayfa

Bu tez çalışmasında, yüksek hızlı tren geçişleri altındaki demiryolu köprülerinin rezonans titreşimlerinin azaltılmasında paralel ve seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin kontrol performansları araştırılmıştır. Çalışmada bir ve iki açıklıklı köprüler için analitik çözümler yapılmıştır. Sunulan tez çalışması başlıca üç bölümden oluşmaktadır: Birinci bölümde, konuyla ilgili literatürde mevcut çalışmalar özetlendikten sonra, ayarlı kütle sönümleyiciler ve bunların matematik teorisi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, hareketli yük katarı etkisindeki bir ve iki açıklığa sahip kirişlerin analitik çözümü için formülasyon verilmiştir. İkinci bölümde, önce yüksek hızlı tren etkisindeki bir ve iki açıklıklı köprülerin dinamik davranışı incelenmiş, ardından rezonans titreşimlerinin kontrolü için paralel ve seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin uygulanması verilmiştir. Yine bu bölümde ayarlı kütle sönümleyicilerin optimum tasarımı için MATLAB programında *fmincon* araç kutusunun kullanımı açıklanmış ve çeşitli örnekler verilmiştir. Ayrıca, paralel bağlı ayarlı kütle sönümleyiciler için basit ve hızlı olarak optimum değerlerin elde edilmesini sağlayan yeni bir tasarım yöntemi önerilmiş ve yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir. Üçüncü bölümde, yapılan çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı ümit edilen öneriler sunulmaktadır. Çalışma sonucunda, yüksek hızlı tren etkisindeki köprülerde seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, paralel bağlı ayarlı kütle sönümleyiciler için önerilen yöntemin başarılı sonuçlar verdiği ve kısa ve orta açıklıklı köprülerde bu tip kontrol araçlarının tasarımı için kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ayarlı kütle sönümleyici, Yüksek hızlı tren, Rezonans, Demiryolu köprüleri, Titreşim kontrolü, Optimum tasarım

PhD. Thesis

SUMMARY

SUPPRESSION OF RESONANT VIBRATIONS OF RAILWAY BRIDGES UNDER
THE PASSAGE OF HIGH-SPEED TRAINS USING TUNED MASS DAMPERS

Onur ARAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineer Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Volkan KAHYA
2017, 120 Pages

In this thesis, control performance of parallel and series tuned mass dampers are investigated for suppressing resonant vibrations of railway bridges under high-speed trains. Analytical solutions for single and two-span bridges are given. The present thesis consists of mainly three chapters: In the first chapter, the related literature on the topic is shortly presented, and then the detailed information about tuned mass dampers and their mathematical theory are given. In addition, the formulation for analytical solutions for single and two-span bridges under moving train loads is given. In the second chapter, dynamic behavior of single and two-span bridges under high-speed trains is first investigated. Then, parallel and series multiple tuned mass dampers are applied for vibration control of bridges. *fmincon*, MATLAB toolbox, is explained for optimum design of tuned mass dampers, and some examples are given. In addition, a novel and simple method for optimum design of parallel multiple tuned mass dampers is presented, and verified with using available solutions. In the third chapter, the results obtained from the studies and some recommendations on the future studies are presented. As a result of the study, it is demonstrated that series multiple tuned mass tuned mass dampers can be effectively used in vibration control of high-speed bridges. Furthermore, the new method proposed for optimum design of parallel multiple tuned mass dampers gives good results, and can be used for design of such type control devices in short and medium span railway bridges.

Key Words: Tuned mass damper, High-speed train, Resonant, Railway bridges, Vibration control, Optimum design

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Hareketli taşıt modelleri	4
Şekil 2. Ayarlı kütle sönümleyiciler: (a) pasif sönümleyici, (b) aktif sönümleyici, (c) karma sönümleyici, (d) yarı-aktif sönümleyici	12
Şekil 3. Köprülerde ayarlı kütle sönümleyici uygulamaları	13
Şekil 4. Yüksek katlı yapılarda ayarlı kütle sönümleyici uygulamaları	13
Şekil 5. Model 1: Sönümsüz ana sistem ve sönümsüz AKS modelinin şematik gösterimi	15
Şekil 6. Model 1 için doğal frekansların kütle oranına bağlı olarak değişimi.....	17
Şekil 7. Model 1 için ana sistem genliğinin yük frekans oranı ile değişimi.....	18
Şekil 8. Model 2: Sönümsüz ana sistem ve sönümlü AKS modelinin şematik gösterimi	19
Şekil 9. Model 2 için ana sistem genliğinin sönün oranıyla değişimi	21
Şekil 10. Model 3: Sönümlü ana sistem ve sönümlü AKS modelinin şematik gösterimi	22
Şekil 11. Model 4: Tek serbestlik dereceli ana sistem ve PAKS modelinin şematik gösterimi	24
Şekil 12. Model 5: Tek serbestlik dereceli ana sistem ve SAKS modelinin şematik gösterimi	26
Şekil 13. Tren-tek açıklıklı köprü modeli.....	27
Şekil 14. YHTK1-PAKS sistemi	30
Şekil 15. YHTK1-SAKS sistemi	33
Şekil 16. Tren-iki açıklıklı köprü modeli	36
Şekil 17. YHTK2-PAKS sistemi	38
Şekil 18. Eurostar treninin fiziki özellikleri (uzunluklar: m)	45
Şekil 19. Sönüm oranının köprü açıklığıyla değişimi	46
Şekil 20. Temel frekansın köprü açıklığı ile değişimi.....	46
Şekil 21. Yer değiştirme-zaman eğrisi ($v_{1,1} = 644,58\text{km/sa}$, $L / d = 0,8$).....	47
Şekil 22. Yer değiştirme için etki faktörünün boyutsuz hız ile değişimi.....	48
Şekil 23. Köprü açıklık ortasındaki yer değiştirme için etki faktörünün L / d ve S	49

Şekil 24. Köprü açıklık ortasındaki moment için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	50
Şekil 25. Köprünün sol mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	51
Şekil 26. Köprünün sağ mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	52
Şekil 27. Köprü açıklık ortasında elde edilen maksimum ivmenin L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	53
Şekil 28. Yer değiştirme için etki faktörünün L / d ile değişimi.....	54
Şekil 29. Maksimum yer değiştirme için etki faktörünün L / d ile değişimi	55
Şekil 30. Maksimum moment için etki faktörünün L / d ile değişimi	55
Şekil 31. Maksimum kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ile değişimi	56
Şekil 32. Maksimum ivmenin L / d ile değişimi.....	56
Şekil 33. Yer değiştirmelerin zamanla değişimi ($v_{1,1} = 644,58\text{km/sa}$, $L / d = 0,8$)	58
Şekil 34. Açıklık ortasındaki yer değiştirmeler için etki faktörünün boyutsuz hız ile değişimi ($L / d = 0,8$)	58
Şekil 35. 1. açıklığın ortasındaki yer değiştirmeler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	59
Şekil 36. 2. açıklığın ortasındaki yer değiştirmeler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	60
Şekil 37. 1. açıklığın orta noktasındaki momentler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	61
Şekil 38. 2. açıklığın ortasındaki momentler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	62
Şekil 39. 1. açıklığın sol mesnetindeki kesme kuvveti için elde edilen etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	63
Şekil 40. 2. açıklığın sol mesnetindeki kesme kuvveti için elde edilen etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	64
Şekil 41. 1. açıklığın sağ mesnetindeki kesme kuvveti için elde edilen etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	65
Şekil 42. 2. açıklığın sağ mesnetindeki kesme kuvveti için elde edilen etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	66
Şekil 43. 1. açıklığın ortasındaki maksimum ivmelerin L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	67
Şekil 44. 2. açıklığın ortasındaki maksimum ivmelerin L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi	68
Şekil 45. İki açıklıklı köprüde maksimum yer değiştirme için etki faktörlerinin oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320\text{km/sa}$)	70

Şekil 46. İki açıklıklı köprüde maksimum moment için etki faktörlerinin oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320\text{km/sa}$).....	70
Şekil 47. İki açıklıklı köprüde maksimum kesme kuvveti için etki faktörlerinin oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320\text{km/sa}$).....	71
Şekil 48. İki açıklıklı köprüde maksimum ivmenin etki faktörlerinin oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320\text{km/sa}$).....	71
Şekil 49. Optimum frekans oranlarının karşılaştırılması (Model 2).....	76
Şekil 50. Optimum sönüm oranlarının karşılaştırılması (Model 2).....	76
Şekil 51. Ana sistemin maksimum genlik değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)	77
Şekil 52. Optimum ortalama frekans oranlarının karşılaştırılması (Model 4).....	77
Şekil 53. Optimum sönüm oranlarının karşılaştırılması (Model 4).....	78
Şekil 54. Optimum frekans aralığının karşılaştırılması (Model 4).....	78
Şekil 55. Ana sistemde maksimum genlik değerlerinin karşılaştırılması (Model 4).....	79
Şekil 56. Açıklık ortasındaki yer değiştirmelerin zamanla değişimi ($v_{1,1} = 240,12\text{km/sa}$)	82
Şekil 57. Genliğin frekans oranıyla değişimi	83
Şekil 58. Eğilme rijitliğindeki %10'luk azalmanın AKS sistemlerinin performansına etkisi	84
Şekil 59. Eğilme rijitliğindeki %10'luk artışın AKS sistemlerinin performansına etkisi ..	84
Şekil 60. Köprü kütleindeki %10'luk azalmanın AKS sistemlerinin performansına etkisi	85
Şekil 61. Köprü kütleindeki %10'luk artışın AKS sistemlerinin performansına etkisi	85
Şekil 62. Frekans oranındaki %10'luk azalmanın AKS sistemlerinin performansına etkisi	86
Şekil 63. Frekans oranındaki %10'luk artışın AKS sistemlerinin performansına etkisi	86
Şekil 64. Eğilme rijitliğindeki hatanın maksimum genlik değerleri üzerindeki etkisi	87
Şekil 65. Köprü kütleindeki hatanın maksimum genlik değerleri üzerindeki etkisi.....	87
Şekil 66. Frekans oranındaki hatanın maksimum genlik değerleri üzerindeki etkisi.....	88
Şekil 67. Fransız TGV treninin fiziksel özellikleri (Uzunluklar: m).....	90
Şekil 68. Ortalama frekans oranının kütle oranıyla değişimi	92
Şekil 69. Sönüm oranının kütle oranıyla değişimi.....	93
Şekil 70. Frekans genişliğinin kütle oranıyla değişimi.....	93
Şekil 71. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (AKS ($n = 1$)).....	94
Şekil 72. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (PAKS ($n = 3$))	94
Şekil 73. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (PAKS ($n = 5$))	95

Şekil 74. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (PAKS ($n = 7$))	95
Şekil 75. Çeşitli kütle oranları için maksimum genliğin frekans kaymasıyla değişimi (AKS ($n = 1$))	96
Şekil 76. Çeşitli kütle oranları için maksimum genliğin frekans kaymasıyla değişimi (AKS ($n = 7$))	97
Şekil 77. Önerilen yonteme göre tasarlanan PAKS ($n = 7$) sisteminin kontrol performansının literatürle karşılaştırılması.....	97
Şekil 78. İki açıklıklı köprü üzerinde PAKS sistemlerinin yerleştirilmesi.....	98
Şekil 79. İki açıklıklı köprüde açıklık ortasındaki yer değiştirmeler.....	99
Şekil 80. Farklı AKS sistemleri için elde edilen yer değiştirme değerleri	103
Şekil 81. Yer değiştirme-zaman eğrisi.....	104
Şekil 82. İvme-zaman eğrisi	104
Şekil 83. Frekans kaymasının PAKS sisteminin kontrol performansı üzerindeki etkisi..	105
Şekil 84. Çeşitli AKS sistemlerinin frekans kayması durumunda kontrol performanslarının karşılaştırılması.....	105

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Farklı ülkelerde kullanılan yüksek hız trenlerine ait hız sınırları (km/sa)	54
Tablo 2. Tek açıklıklı köprüler için önerilen eğrilere ait fonksiyonlar	57
Tablo 3. İki açıklıklı köprüler için önerilen eğrilere ait fonksiyonlar	69
Tablo 4. Göz önüne alınan AKS sistemleri için optimum parametreler ($\mu = \%2$)	81
Tablo 5. Köprü üzerinde farklı sayıda paralel bağlı AKS olması durumunda ilk sekiz doğal frekans (rad/sn)	90
Tablo 6. Model 4 üzerinde farklı sayıda paralel bağlı AKS olması durumunda ilk dört doğal frekans (rad/sn)	90
Tablo 7. PAKS ($n = 7$) sistemi için iki farklı yöntemle elde edilen optimum parametreler	98
Tablo 8. HSLM-A8 treni için rezonans hızları ve incelenen köprüye ait doğal frekanslar	98
Tablo 9. Köprü üzerinde farklı sayıda paralel bağlı AKS olması durumunda ilk on doğal frekans (rad/sn)	99
Tablo 10. Önerilen yöntem kullanılarak elde edilen optimum parametreler	102
Tablo 11. Luu vd. (2012) tarafından verilen optimum parametreler	103
Tablo 12. İkinci açıklıkta maksimum yer değiştirmeler	104

SEMBOLLER DİZİNİ

c_j	j . AKS elemanı için sönüm
d	Aks aralığı
E	Elastisite modülü
f_T	PAKS sistemine ait ortalama frekans
I	Atalet momenti (m^4)
k_j	j . AKS elemanı için rijitlik
L	Köprü açıklık uzunluğu (m)
m_b	Köprünün birim uzunluğunun kütlesi (kg/m)
m_j	j . AKS elemanının kütlesi
n	AKS sayısı
N	Mod sayısı
P	Dingil yükü
S	Boyutsuz hız parametresi
t	Zaman
v	Tren hızı
Δ_n	PAKS sistemine ait frekans genişliği
μ	PAKS sistemine ait kütle oranı
ξ_j	j . AKS elemanı için sönüm oranı
φ_i	Köprünün i . modu için mod şekil fonksiyonu
$\bar{\omega}_i$	Köprünün i . moduna karşılık gelen doğal frekans
ω_j	j . AKS elemanı için doğal frekans
ω_T	PAKS sistemine ait ortalama doğal frekans

Not: Bu listede verilmeyen bazı semboller metin içerisinde kullanıldıkları yerlerde tanımlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Köprüler, ulaşım sistemleri arasındaki bağlantının sağlanmasındaki işleviyle insan hayatında önemli bir yere sahiptir. Günümüzde ulaşım sistemlerine duyulan talebe paralel olarak işletme hızları ve taşınan yüklerde büyük artış görülmektedir. Bu durum, köprülerde hasar oluşmasına ve hatta hasarın ciddi boyutlarda artması neticesinde yapının kullanım dışı kalmasına sebep olabilir. Bu ise hem can kayıplarına hem de büyük maddi zararlara yol açabilecek ciddi bir durumdur. Bundan dolayı 100 yılı aşkın süredir araştırmacılar, hareketli yüklerin köprüler üzerindeki etkileri konusunda bir hayli çalışma yapmışlardır. Şüphesiz bunda Japonya, Çin, Fransa, Almanya ve İspanya gibi önemli miktarda yüksek hızlı ulaşım ağına sahip ülkelerin rolü büyüktür. Son yıllarda, teknoloji ve bilimde meydana gelen ilerlemeler, son derece güçlü bilgisayar programları ve analiz yöntemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuş ve böylece hareketli yük etkisindeki yapıların tasarım ve analizlerine ilişkin çalışmalar birçok alanda gelişme ve hız kazanmıştır.

Hareketli yük etkisindeki köprüler, doğal frekansları civarında bir titreşime maruz kaldıklarında rezonans adı verilen durumla karşı karşıya gelirler. Rezonans durumunda, köprünün doğal frekansı, dış yükün frekansı ile çakışır ve titreşimin genliği giderek artar. Herhangi bir önlem alınmadığında köprü üzerinde şiddetli titreşimler ve yıkılmaya sebep olabilecek dinamik tepkiler meydana gelebilir. Bu sebeple, dinamik yüklerin etkisindeki yapıların tasarımında rezonans olayı mutlaka dikkate alınmalı ve tasarım aşamasında statik analiz ile birlikte dinamik analiz de yapılmalıdır.

Rezonans tehlikesine karşı kullanılan yaygın yöntemlerin başında yapı sisteminin doğal frekansını veya dış yükün frekansını değiştirmek gelmektedir. Çoğunlukla dış yüklere müdahale edilemediğinden, yapının dinamik karakteristiklerini değiştirme yoluna gidilmektedir. Bu ise yapı sisteminin kütle ve rijitliğinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Ancak bazı yapı sistemlerinde bu değişiklikler son derece zor olabilir. Bu durumda ayarlı kütle sönümleyici (AKS) olarak adlandırılan titreşim sönümleme elemanları kullanılmaktadır. AKS'nin kullanılmasındaki amaç, yapı sisteminin doğal frekansı ile dış yükün frekansının birbirlerine eşit veya çok yakın olduğu ve bunlardan herhangi biri

üzerinde değişiklik yapılmasının söz konusu olmadığı durumlarda rezonans tehlikesini bertaraf etmektir.

Bir yapının hareketli yük etkisinde davranışının nasıl olacağını önceden kestirmek oldukça zordur. Özellikle, hareketli yüklerin en çok karşımıza çıktığı köprü ve demiryolları gibi önemli mühendislik yapılarının ihtiyaçlarımızı karşılamada devamlılığının sağlanabilmesi ancak bu yükler altında yapı titreşimlerinin kabul edilebilir seviyelerde tutulmasıyla mümkündür. Bu sebeple, köprü-taşıt etkileşim dinamiği ve köprülerde rezonans titreşimlerinin azaltılmasının üzerinde önemle durulması gereken konular olduğu aşıkardır.

1.2. Literatür Araştırması

Bu bölümde, öncelikle hareketli yük etkisinde köprü dinamik davranışını inceleyen çalışmalar gözden geçirilmiştir. Hareketli yük modelleri, çözüm yöntemleri ve elde edilen sonuçlar kısaca özetlenmiştir. Ardından, köprülerde rezonans titreşimlerinin azaltılmasında kullanılan Ayarlı Kütle Sönümleyici (AKS) sistemleriyle ilgili çalışmalar ele alınarak farklı tipteki AKS sistemlerinin kullanımı ve optimizasyonu üzerinde kısa değerlendirme yapılmıştır.

1.2.1. Köprülerin Hareketli Yük Altında Dinamik Davranışını İnceleyen Çalışmalar

Hareketli yük altında köprülerin dinamik davranışını ele alan çalışmaların temelleri, 1847 yılında İngiltere`de yıkılan Chester Demiryolu Köprüsü üzerine yapılan çalışmalarla atılmıştır (Stokes, 1849; Willis, 1849). Köprü atalet etkilerinin ihmal edildiği ve yükün tekil kütle olarak göz önüne alındığı bu çalışmayı Timoshenko (1922), Jeffcott (1929) ve Lowan`ın (1935) katkıları takip etmiştir. Inglis (1934), demiryolu köprülerinin dinamiği ile ilgili yapmış olduğu inceleme kendisinden sonraki pek çok çalışmanın temelini oluşturmuştur.

Timoshenko ve Young (1955) ve Biggs (1964) tarafından yapı dinamiği üzerine yazılan kitaplarda hareketli yük problemleri kısmen ele alınmıştır. Hareketli yük altında yapıların titreşimleri kapsamlı bir şekilde Frýba (1972) tarafından yazılan monografıta ele alınmıştır. Garg ve Dukkipati (1984) ve Frýba (1996), eserlerinde, demiryolu köprüleri

özelinde, hareketli yük problemlerini ele almışlardır. Yang ve çalışma arkadaşları, taşıt-köprü etkileşim dinamiği üzerine literatüre önemli katkılar sağlamışlardır (Yang ve Lin, 1995; Yang ve Yau, 1997; Yang vd., 1999; Yang ve Wu, 2001; Yang vd., 2004a; Yang ve Lin, 2005).

1.2.1.1. Hareketli Taşıt Modelleri

Köprülerin trafik yükleri altında dinamik davranışının incelenmesinde hareketli yük : (a) hareketli kuvvet modeli, (b) hareketli kütle modeli ve (c) hareketli kütle-yay-damper modeli olmak üzere literatürde üç farklı şekilde modellenmektedir (Şekil 1).

Hareketli kuvvet modelinde taşıtın atalet etkileri ve köprü ile taşıt arasındaki dinamik etkileşim ihmal edilmektedir. Bu model, hareketli yük etkisi altındaki köprü titreşimlerinin incelenmesinde kullanılan en basit model olup taşıt kütlelerinin köprü kütlelerine göre daha küçük olduğu durumlarda iyi sonuçlar vermektedir (Frýba, 1972; Hamada, 1981; Wu ve Dai 1987; Galdos vd.,1993; Dugush ve Eisenberger 2002).

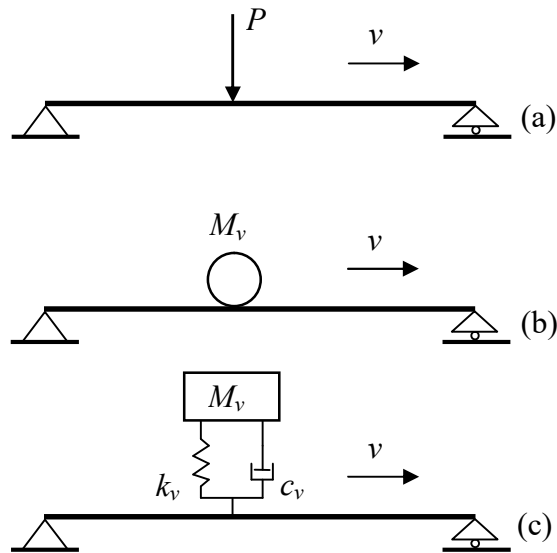
Taşıt kütlelerinin köprününkine göre küçük olmadığı ve ayrıca yük hızının yüksek olduğu durumlarda yükün atalet etkileri ihmal edilemez. Böyle durumlarda hareketli kütle modeli kullanılmaktadır. Bu model, taşıt-köprü etkileşimini dikkate alan en basit modeldir (Frýba, 1972; Stanisic ve Hardin, 1969; Ting vd., 1974; Akin ve Mofid, 1989; Mofid ve Akin, 1996; Yavari vd., 2002; Karimi ve Ziaei-Rad, 2015). Bu modelin zayıf tarafı, taşıt ile köprü yüzeyi arasındaki temasın sürekli olduğunu kabul etmesi ve dolayısıyla yol yüzeyindeki düzensizlikleri (pürüzlülük) dikkate almamasıdır.

Hareketli taşıt modelinde yük, kütle-yay-damper elemanları ile modellenir. Bu şekilde tek veya daha fazla serbestlik dercesine sahip taşıt modelleri elde edilebilmektedir (Biggs, 1964; Frýba, 1972; Genin vd., 1975; Wu ve Dai, 1987; Humar ve Kashif, 1993; Pesterev vd., 2001; Yang vd., 2004a). Bu model yardımıyla taşıt ile yol yüzeyi arasındaki etkileşim dikkate alınabilmekte ve ayrıca taşıtın yapabileceği tüm hareketler ifade edilebilmektedir. Literatürde düzlem problemler için yaygın olarak çeyrek taşıt modeli (Li vd., 2006; Seetapan ve Chucheepsakul, 2006; Wang vd., 2010; Wang vd., 2013) ve yarım taşıt modeli (Henchi vd., 1998; Yang vd., 1999; OBrien vd., 2006; Liu vd., 2009; Moghaddas vd., 2012) kullanılmaktadır. Üç boyutlu problemler için ise taşıtın tüm serbestliklerini dikkate alacak şekilde çeşitli özellikte modeller geliştirilmiştir (Song vd., 2003; Xia vd., 2008; Dinh vd., 2009; Dimitrakopoulos ve Zeng, 2015; Zeng vd., 2016).

Diğer iki modele göre daha karmaşık olmakla beraber taşıt-köprü etkileşim problemlerinin incelenmesinde en gerçekçi yaklaşım olarak hareketli taşıt modeli önemlidir.

1.2.1.2. Köprü Modelleri

Literatürde taşıt-köprü dinamiği ile ilgili çalışmalarda farklı tipte köprü modelleri kullanılmıştır. Taşıt geçişleri sebebiyle meydana gelen titreşimlerin incelenmesinde özellikle tek açıklıklı köprüler için basit kiriş modeli yaygın olarak tercih edilmektedir (Yang vd., 1997; Li ve Su, 1999; Frýba, 2001; Museros ve Alorcón, 2005; Xia vd., 2006; Yau ve Yang, 2006; Garinei ve Risitano, 2008). Kafes köprüler (Yau ve Yang, 2004a; Baeza ve Ouyang, 2009; Wang vd., 2014), çok açıklıklı sabit veya değişken kesitli kirişler (Wu ve Dai, 1987; Yang vd., 1995; Kou ve DeWolf, 1997; Cheung vd., 1999; Marchesiello vd., 1999; Yau, 2001; Martinez-Castro vd., 2006; Salvo vd., 2010; Johansson vd., 2013), kirişli köprüler (Chu vd., 1986; Hwang ve Nowak, 1991; Huang vd., 1993), sürekli kirişler (Wu ve Dai, 1987; Yang vd., 1995), eğri kirişli köprüler (Galdos vd., 1993; Yang vd., 2001; Zeng vd., 2016), çelik dolu gövdeli köprüler (Kawatani ve Kim, 2001) ve kemer köprüler (Chatterjee ve Datta, 1995; Ju ve Lin, 2003) kısa ve orta açıklıkların geçildiği köprüler için kullanılan diğer modellerdir.



Şekil 1. Hareketli taşıt modelleri

Büyük açıklıkların geçildiği eğik askılı ve asma köprülerin hareketli yük altında dinamik davranışları da çok sayıda araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Wang ve Huang, 1992; Yang ve Fonder, 1998; Au vd., 2001a,b; Guo ve Xu, 2001; Yau ve Yang, 2004b; Chatterjee vd., 1994; Xia vd., 2000). Bazı araştırmacılar, çalışmalarında trafik yükleriyle beraber rüzgâr ve deprem etkilerini de dikkate almışlardır (Xu vd., 2003; Li vd., 2013; Wang vd., 2015; Yang vd., 2016; Paraskeva vd., 2017).

1.2.1.3. Demiryolu Köprüleri ve Yüksek Hızlı Trenler

Trenlerin modellenmesinde genellikle sabit hızla hareket eden yük katarı kullanılmaktadır. Frýba (1972), birbirini takip eden iki teker yükünün geçişi için gereken zamanın köprünün titreşim periyotlarından birine veya bunun tam katlarından birine eşit olması durumunda rezonans olayının meydana geleceğini ifade etmiştir. Wu ve Dai (1987), çok açıklıklı ve değişken kesitli kirişlerin aynı veya birbirine ters yönde hareket eden hareketli yükler altındaki dinamik davranışını transfer matrisi yöntemiyle incelemişlerdir. Yang vd. (1997), aralarında sabit d mesafesi bulunan ve sabit hızla hareket bir yük katarı etkisindeki basit kiriş problemini ele almıştır. Bu problemde kiriş açıklığı/yük mesafesi (L/d) kiriş davranışı üzerinde anahtar rol oynayan parametre olarak belirtilmiştir. Cheung vd. (1999), hareketli yük etkisindeki çok açıklıklı köprülerin dinamik davranışını Lagrange yaklaşımını kullanarak çözmüşlerdir. Hareketli yük, iki serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenmiştir. Çalışmada, dinamik büyütme çarpanı (dinamik davranışının statik davranışa oranı) üzerinde hız parametresinin etkisi incelenmiştir. Savin (2001), hareketli yük katarı etkisindeki farklı sınır şartlarına sahip kirişlerde tepki spektrumunun ve dinamik büyütme çarpanının hız parametresiyle olan ilişkisini incelemiştir.

Yüksek hızlı demiryolu sistemlerinin dünyada hızla yayılması, demiryolu köprülerinin dinamiğine olan ilgiyi daha da arttırmıştır. Museros vd. (2002), Lin vd. (2005), Gu (2015), Rocha vd. (2015), farklı yüksek hızlı trenlerin etkisindeki çeşitli köprü kirişlerinin dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Tek ve iki açıklıklı kirişlerin yüksek hızlarda hareket eden hareketli yükler altındaki rezonans titreşimleri çok sayıda araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Seetapan ve Chuheepsakul, 2006; Hamidi ve Danshjoo, 2010; Wang vd., 2010; Kahya vd., 2013; Museros vd., 2013; Wang vd., 2013; Kahya vd., 2014a; Xia vd., 2014; Kahya vd., 2015; Cantero ve Karoumi, 2016).

Lokomotif ve kontrol teknolojilerindeki gelişmeler, 350 km/sa veya daha yüksek tren işletme hızlarına ulaşılmasını sağlamıştır. Yüksek hızlı trenler söz konusu olduğunda sadece köprü titreşimleri değil aynı zamanda yolcu seyahat konforu da önemli olmaktadır. Yolcuların yüksek hızlarda güvenli ve konforlu seyahati için trenin yatay veya düşey ivmelerinin belli sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir (Yau vd., 1999; Wu ve Yang, 2003; Lee vd., 2005; Jin vd., 2015).

Yau vd. (2001), deprem kuvvetlerini izole etmek amacıyla köprü kirişlerinde elastik mesnet kullanımının hareketli yük sebebiyle meydana gelen davranış üzerinde olumsuz etki yaptığını göstermişlerdir. Museros vd. (2002), travers ve balast tabakalarının kısa açıklıklı demiryolu köprülerinin dinamik davranışına etkilerini araştırmışlardır. Yang vd. (2004b) ve Museros vd. (2013), elastik mesnetli kirişlerde rezonans şartlarını detaylı bir şekilde incelemiştir.

Burulmalı eğilme titreşimleri, demiryolu köprüleriyle ilgili olarak ele alınan bir diğer konudur (Wu vd., 2001; Yang ve Wu; 2002; Wu ve Yang, 2003). Yapılan çalışmalarda, köprü kirişi üzerinde iki ayrı demiryolu hattı düşünülmüş ve trenlerin birbirlerine zıt yönlerde hareket ettiği kabul edilmiştir.

Son yıllarda, araç-köprü etkileşim probleminde köprü ve araç sistemi üç boyutlu modellenerek problemin gerçeğe daha uygun şekilde çözümü sağlanmıştır (Zakeri vd., 2014; Li vd., 2015; Li vd., 2016; Mao vd., 2016; Yang vd., 2016; Yu vd., 2016).

1.2.2. Köprülerde Rezonans Titreşimlerinin Azaltılmasını İnceleyen Çalışmalar

Hareketli yük etkisindeki köprülerde titreşimlerin azaltılmasıyla ilgili çalışmalar 1989 yılında Kajikawa ve arkadaşları tarafından yazılan yayın ile başlamıştır (Kajikawa vd., 1989). 2000'lerden itibaren bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin optimizasyon yöntemlerinde meydana getirdiği çeşitlilik ve ayrıca zaman içerisinde farklı kontrol sistemlerinin ortaya çıkmasıyla konu üzerinde yapılan çalışmalarda önemli artış meydana gelmiştir.

Hareketli yük etkisindeki sistemlerde meydana gelen rezonans titreşimlerinin azaltılmasında kullanılan en etkili yöntemlerden biri, köprüye ayarlı kütle sönümleyici (AKS) eklemektedir. Ayarlı kütle sönümleyiciler gerek bakım maliyetinin azlığı gerekse hizmet ömrü süresince herhangi bir enerjiye gereksinim duymamaları sebebiyle diğer sönümleyicilere göre daha yaygın kullanım alanına sahiptirler. Birçok önemli mühendislik

yapısında kendine uygulama alanı bulan ayarlı kütle sönümleyicilere çoğunlukla yüksek katlı kulelerde, silolarda, yaya köprülerinde ve trafik yüklerine maruz köprülerde rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra motorlar, pistonlu makineler, elektrik iletim hatları, telefon hatları, hava ve deniz araçlarında kullanılmaktadırlar.

AKS kavramı ilk olarak Watts (1883) tarafından gemi makinelerinin gemi omurgasında yarattığı titreşim tehlikesini ortadan kaldırmaya yönelik olarak ortaya atılmış, daha sonra Frahm (1911) tarafından aynı amaçla kullanılmak üzere tasarlanarak patenti alınmıştır. Frahm'ın tasarladığı sistemde herhangi bir sönüm elemanı bulunmamaktadır. Bu nedenle alet sadece ayarlı kütlelerin doğal frekansı ile yükün frekansı birbirlerine çok yakın ise etkili olmaktadır. Ayarlı kütle sönümleyicilerle ilgili ilk teorik çalışma, 1928 yılında Ormondroyd ve Den Hartog (1928) tarafından yapılmıştır. Ana sistemin sönümsüz olduğu bu çalışmada, ayarlı kütle sönümleyici sönümlü olarak tasarlanmıştır. İlave edilen sönüm elemanı, AKS'nin etkin çalışma frekans aralığının artmasını sağlamıştır. Böylece herhangi bir frekans kayması karşısında AKS'nin performansındaki düşüşün çok ani olması önlenmiştir. Ayarlı kütle sönümleyicilere ait optimum parametreler ilk olarak Den Hartog (1956) tarafından yazılan *Mechanical Vibrations* isimli kitapta yayımlanmıştır. Bu çalışmayı, Falcon vd. (1967), Warburton ve Ayorinde (1980), Thompson (1981), Randal vd. (1981), Soom ve Lee (1983) ve Tsai ve Lin'in (1993) katkıları takip etmiştir.

1.2.2.1. Klasik Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemlerini Konu Alan Çalışmalar

Hareketli yük etkisindeki köprülerde tek serbestlik dereceli AKS sistemi kullanılarak yalnızca bir moda ait titreşimler azaltılmaktadır. Bu nedenle söz konusu titreşim modu, köprünün dinamik davranışı üzerinde en etkili titreşim modu dikkate alınarak seçilmelidir. Hareketli yük etkisindeki tek açıklıklı kirişlerin dinamik davranışı göz önüne alındığında, birinci modun dinamik davranışı büyük oranda temsil ettiği bilinmektedir (Wang vd., 2003). Bundan dolayı, tek serbestlik dereceli AKS sistemi, çoğunlukla hareketli yük etkisindeki tek açıklıklı kiriş titreşimlerinin azaltılmasında kullanılmaktadır.

Lin ve Cho (1993), hareketli yüklerin etkisindeki basit mesnetli kiriş üzerindeki titreşimlerin azaltılmasında AKS'nin etkisini incelemişlerdir. Çözümde Laplace dönüşümünü kullanan yazarlar, AKS'ye ait kütle, sönüm ve frekans oranlarının titreşimin azaltılması üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Chen ve Chen (2004), Wu (2006), Ziyaeifer (2008), Pakrashi vd. (2004; 2010) ve Kahya vd. (2014b), aynı problemi rezonans

titreşimlerin azaltılmasında AKS'nin etkinliğini ele alarak incelemişlerdir. Kwon vd. (1998) ve Jo vd. (2001), hareketli araç etkisindeki üç açıklıklı köprüde titreşimlerin azaltılmasında AKS'nin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmalarda, AKS sisteminin optimum tasarımı için Den Hartog (1956) tarafından önerilen formüller kullanılmıştır. Yazarlar, rezonans hızı altında elde edilen yer değiştirme-zaman eğrisini AKS'siz durumla karşılaştırmışlardır. Samani ve çalışma arkadaşları, hareketli yük etkisindeki kiriş titreşimlerinin azaltılmasında lineer ve lineer olmayan AKS'nin etkisini incelemişlerdir (Samani ve Pellicano, 2009; Samani vd., 2011; Samani ve Pellicano, 2012 ; Samani vd., 2013). Soares vd. (2010; 2011), hareketli yük etkisindeki tek açıklıklı kirişin titreşimlerinin azaltılmasında hareketli AKS sisteminin performansını incelemişlerdir. Çözümde Galerkin metodunu kullanan yazarlar, AKS hızının hareketli yükün hızına oranının 0,9 civarında olması halinde titreşimde en büyük azalmanın elde edildiğini bulmuşlardır. Wang vd. (2003), Moghaddas vd. (2012) ve Turan vd. (2014), yüksek hızlı tren etkisindeki köprü titreşimlerinin azaltılmasında optimum AKS parametrelerinde meydana gelebilecek hataların AKS'nin kontrol performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yang vd. (2008), hareketli yük etkisindeki elastik mesnetli kirişin titreşimlerinin azaltılmasında AKS'nin etkisini incelemişlerdir.

1.2.2.2. Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemlerini Konu Alan Çalışmalar

Ayarlı kütle sönümleyicinin veya ana sistemin doğal frekansında meydana gelebilecek hatalar, ayarlı kütle sönümleyicinin kontrol performansını olumsuz etkilemektedir. Literatürde bu olay, frekans kayması (*detuning*) olarak adlandırılır. Xu ve Igusa (1992), frekans kaymasına karşı tek bir AKS yerine birden fazla AKS'nin paralel olarak birbirine bağlanmasıyla oluşturulan paralel bağlı ayarlı kütle sönümleyici (PAKS) modelini önermişlerdir. Literatürde frekans kaymasına karşı kullanılan diğer bir kontrol sistemi de seri bağlı ayarlı kütle sönümleyici (SAKS) modelidir. SAKS sistemi için detaylı bilgiler, Li ve Zhu (2006) ve Zuo (2009) tarafından yapılan yayınlarda mevcuttur.

Li vd. (2005) ve Lin vd. (2005), yüksek hızlı trenlerin etkisindeki tek açıklıklı demiryolu köprülerinin rezonans titreşimlerinin azaltılmasında PAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, farklı sayıda AKS elemanından meydana gelen PAKS sisteminin dinamik tepkilerin azaltılması üzerindeki performansını AKS sistemiyle karşılaştırmıştır. Stăncioiu ve Ouyang (2012), hareketli yük etkisindeki tek açıklıklı kiriş titreşimlerinin

azaltılmasında PAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, kirişin farklı yerlerine yerleştirmiş oldukları AKS sistemlerinin tasarımı için iteratif bir yöntem sunmuşlardır. Yau ve Yang (2004a;b) ve Luu vd. (2012), yüksek hızlı tren etkisindeki iki açıklığa sahip farklı köprü modelleri üzerinde gerçekleştirdikleri analizlerde, ilk iki moda ait rezonans titreşimlerinin azaltılmasında PAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, ayrıca frekans kayması durumunda PAKS sisteminin performansında meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Wang vd. (2014), yüksek hızlı tren etkisindeki üç açıklıklı çelik kafes köprünün titreşimlerinin azaltılmasında PAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Rostam vd. (2015), hareketli yük etkisindeki eğri kirişin eğilme ve burulma titreşimlerinin azaltılmasında farklı birleşime sahip PAKS sistemleri önermişlerdir. Yazarlar, hareketli yükü, kiriş eksenine dış merkezlik oluşturacak şekilde sisteme uygulamışlardır. Debnath vd. (2015), hareketli yük etkisindeki çelik köprünün titreşimlerinin azaltılmasında PAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, çalışmada enine, boyuna ve burulma modlarının etkisini dikkate almışlardır. Miguel vd. (2016), tasarım parametrelerinde meydana gelebilecek hataları göz önüne alarak AKS sisteminin optimum tasarımını yapmışlardır. Yazarlar, köprü ile araç arasındaki etkileşimi ve yol yüzeyindeki pürüzlülüğü dikkate alarak yaptıkları analizlerde, hareketli yük etkisindeki köprü titreşimlerinin azaltılmasında PAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Kahya ve Araz (2015; 2017), yüksek hızlı tren etkisindeki tek açıklıklı bir köprüde rezonans titreşimlerinin azaltılmasında SAKS sisteminin etkisini incelemişlerdir. Çözümde mod süperpozisyon yöntemini kullanan yazarlar, SAKS sistemi için elde ettikleri sayısal sonuçları AKS ve PAKS sistemleriyle karşılaştırmışlardır.

1.3. Tezin Kapsamı ve Önemi

Trenlerin rezonans hızı veya buna yakın hız değerlerinde hareket etmeleri halinde köprünün dinamik tepkilerinde önemli artışlar meydana gelmektedir. Bu artışlar sebebiyle, bazen köprü tasarım yönetmeliklerinde belirtilen sınır değerler aşılabilmektedir. Dolayısıyla hem köprülerdeki can güvenliğinin hem de yolcular için seyir konforunun sağlanmasında rezonans titreşimlerinin azaltılması büyük önem arz etmektedir. Literatüre bakıldığında köprülerdeki rezonans titreşimlerinin azaltılması amacıyla yapılan çalışmalarda sönümleme aracı olarak çeşitli AKS veya PAKS sistemlerinin kullanıldığı

görülmektedir. Bu çalışmalar, genellikle AKS sisteminin tasarımında kullanılan optimizasyon yöntemine göre farklılaşmaktadır.

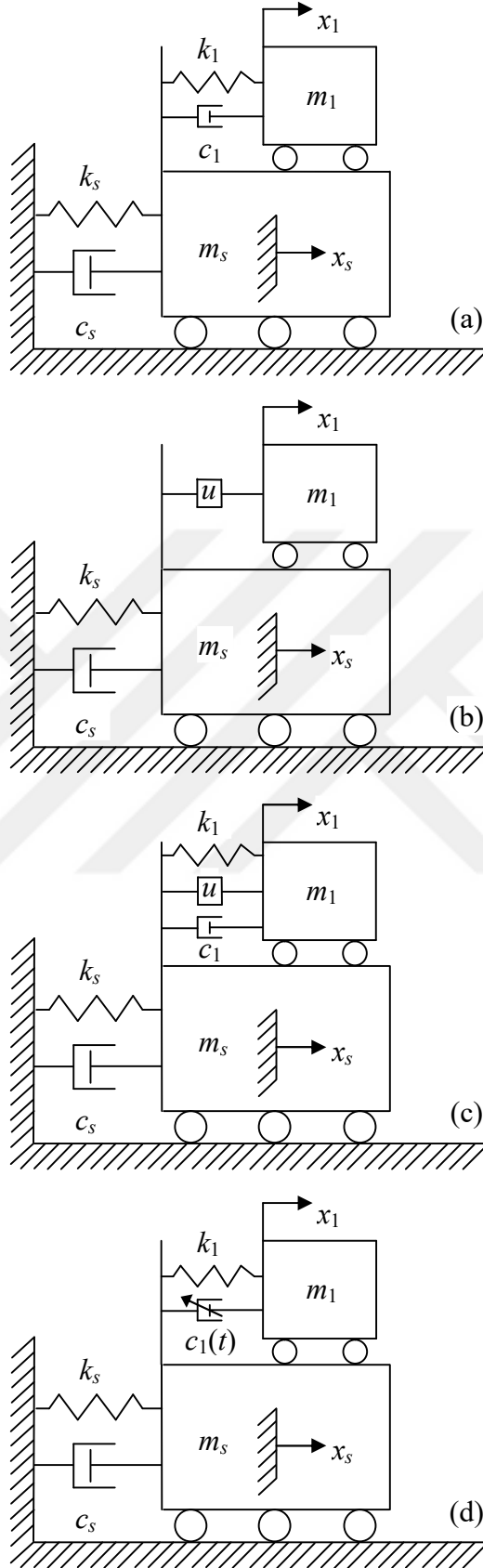
Bu tez çalışmasında, hızlı demiryolu köprülerinde rezonans titreşimlerinin ayarlı kütle sönümleyiciler kullanılarak azaltılması ele alınmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak burada, seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin (SAKS) tek açıklıklı köprülerin rezonans titreşimlerinin azaltılmasındaki etkinliği incelenmiştir. Ayrıca, PAKS sistemlerinin tasarımı için yeni bir tasarım yöntemi önerilerek, bu yöntemin bir ve iki açıklıklı köprülerin rezonans titreşimlerinin azaltılmasındaki etkinliği incelenmiştir. Bu yöntem, Den Hartog (1956) tarafından tek serbestlik dereceli sistemler için önerilen formüllerin çok serbestlik dereceli sistemlere genişletilmesini esas almaktadır.

Bu tez çalışması başlıca üç bölümden oluşmaktadır: Birinci bölümde, hareketli yük altındaki köprülerin dinamik davranışı ile köprülerde rezonans titreşimlerinin azaltılmasını ele alan çalışmalar özetlenmiş ve ayarlı kütle sönümleyiciler ve bunların matematik teorisi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, hareketli yük katarı etkisindeki bir ve iki açıklığa sahip kirişlerin analitik çözümü ve dinamik davranışın elde edilmesinde kullanılan Newmark yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular verilmiştir. Bu bölüm dört kısma ayrılmıştır: İlk kısımda, köprü açıklığı, aks mesafesi ve tren hızının bir ve iki açıklıklı köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkileri ile ilgili sayısal bulgular sunulmuştur. İkinci kısımda, Sıralı Kuadratik Programlama (SKP) yöntemi ve işlem adımları açıklanarak, incelenen her bir optimizasyon probleminin Matlab ortamında analiz edilebilmesi için gerekli amaç fonksiyonu ve tasarım değişkenlerine ait alt ve üst sınır değerler belirlenmiştir. Üçüncü kısımda, PAKS ve SAKS sistemlerinin etkisindeki bir ve iki açıklıklı köprülerin dinamik davranışı analitik olarak elde edilerek ve her iki sistemin kontrol performansları, frekans kayması olup olmaması hali için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Dördüncü kısımda ise PAKS sistemi için önerilen yeni yöntemin bir ve iki açıklıklı köprüler üzerinde uygulanabilirliği literatürle karşılaştırılarak gösterilmiştir. Üçüncü bölümde, bulgular ışığında çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı ümit edilen bazı öneriler sunulmuştur. Bu bölümü, kaynaklar ve özgeçmiş takip etmektedir.

1.4. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler ve Teorik Esasları

Ayarlı kütle sönümleyiciler (AKS), yapılarda deprem, rüzgâr, trafik ve insan hareketi gibi çevresel etkilerden kaynaklanan titreşimlerin azaltılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sistemler, pasif, aktif, karma ve yarı aktif sönümleyiciler olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır.

Pasif sönümleyiciler, yapının temel moduna göre ayarlanmış rijitlik ve sönüm elemanına sahip ikinci bir kütleden oluşup, istenmeyen titreşimleri herhangi enerjiye ihtiyaç duymadan azaltmaktadır (Şekil 2a). Dinamik yüklerin zaman içerisinde değişkenlik gösterdiği yapı sistemlerinde, pasif sönümleyicilere alternatif olması amacıyla geliştirilen aktif sönümleyiciler, yapıların istenmeyen titreşimlere karşı korunmasında çok daha üstün bir performans göstermektedir (Şekil 2b). Aktif sönümlemede, dış yük altındaki yapıda meydana gelen yer değiştirmeler, sensorlar yardımıyla hesaplanır ve bu veriler oluşturulan algoritma tarafından kullanılarak kontrol kuvvetleri elde edilir. Yalnız burada, ihtiyaç duyulan enerji dışarıdan hazır olarak temin edilmektedir. Şiddetli depremlerin etkisindeki yapılarda, ihtiyaç duyulan enerjinin sağlanmasında birtakım aksaklıklar meydana gelmektedir. Bu nedenle, bu tip yapılarda aktif ve pasif sönümleyicili kontrol elemanlarının aynı anda kullanılması önerilmektedir. Bu kontrol sistemi karma sönümleyicili model olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2c). Yarı aktif sönümleyiciler ise kontrol edilebilen pasif elemanlar ya da enerji ihtiyaçları aktif kontrol sistemlerine göre daha az olan kontrol sistemi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2d). Yarı aktif sönümleyiciler, diğer kontrol sistemlerine göre daha yüksek performans göstermektedirler. Bununla birlikte, enerjinin karşılanması için sağlanan maliyetin yanı sıra bakım ve onarım masrafları göz önüne alındığında, pasif sönümleyiciler diğer sönümleyici türlerine göre daha fazla tercih edilmektedir. Şekil 3 ve 4'te ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanıldığı çeşitli mühendislik yapıları görülmektedir. Ayarlı kütle sönümleyiciler, rastgele yaya yürüyüşleri nedeniyle köprü tabliyesinde meydana gelen aşırı titreşimlerin azaltılmasında kullanılan en etkin çözüm yöntemlerinin başında gelmektedir. (Millennium Bridge, London). Ayarlı kütle sönümleyicilerin yaygın olarak kullanıldıkları diğer mühendislik yapılarının başında ise rüzgar ve deprem kuvvetlerinin etkisindeki yüksek katlı yapılar gelmektedir (Şekil 4).



Şekil 2. Ayarlı kütle sönümleyiciler: (a) pasif, (b) aktif, (c) karma, (d) yarı-aktif sönümleyici modelleri

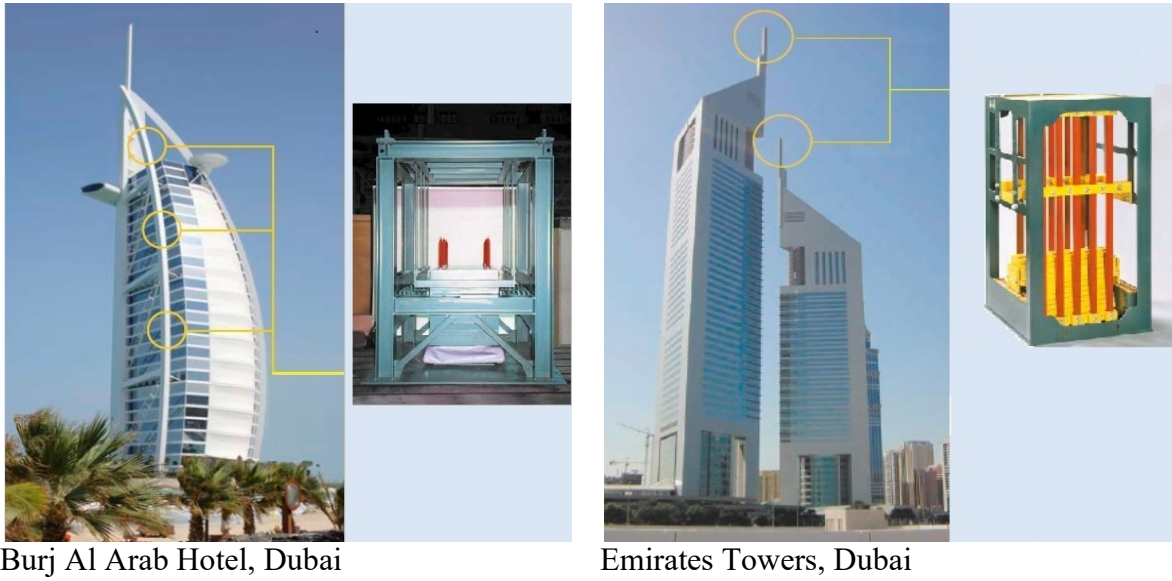


Millennium bridge, London



Schwedter Straße, Berlin

Şekil 3. Köprülerde ayarlı kütle sönümleyici uygulamaları (URL-1, 2017)



Burj Al Arab Hotel, Dubai

Emirates Towers, Dubai

Şekil 4. Yüksek katlı yapılarda ayarlı kütle sönümleyici uygulamaları (URL-1, 2017)

1.4.1. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde İncelenmesi

1.4.1.1. Model 1: Sönümsüz Ana Sistem ve Sönümsüz AKS

Şekil 5’de m_s kütlelerine ve k_s rijitliğine sahip kütle-yay sistemi ile buna bağlı sönümsüz AKS elemanı gösterilmiştir. Burada, harmonik kuvvetin etkisindeki m_s kütle ana sistem olarak adlandırılmaktadır. Ana sisteme m_1 kütle ve k_1 rijitliğine sahip ikinci bir sistemin bağlanması ile ana sistemin serbestlik derecesi ikiye çıkmaktadır. İlave edilen ikinci sistem ise sönümsüz AKS olarak adlandırılmaktadır. Bu AKS sistemi ilk olarak Frahm (1911) tarafından önerilmiştir. Ana sistem ve AKS için hareket denklemleri sırasıyla (Den Hartog, 1956)

$$m_s \ddot{x}_s + (k_s + k_1)x_s - k_1 x_1 = P_o \sin \omega t \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_s) = 0 \quad (2)$$

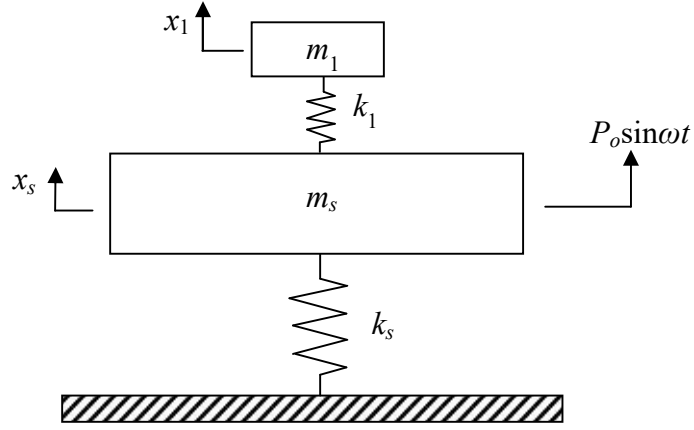
şeklindedir. Hareket denklemleri matris formda

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_o \sin \omega t \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

olarak yazılır. Burada, x_s ve x_1 ana sistem ve AKS ait düşey yer değiştirmeleri, \ddot{x}_s ve \ddot{x}_1 ise ivmeleri göstermektedir. ω yükün frekansı, P_o ise şiddetidir. Ele alınan problemin çözümü

$$x_s = a_s \sin \omega t, \quad x_1 = a_1 \sin \omega t \quad (4)$$

şeklinde kabul edilir. Burada, a_s ve a_1 zorlanmış harekete ait yer değiştirme genlikleridir. (4) ifadesi (1) ve (2) denklemlerinde yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa,



Şekil 5. Model 1: Sönümsüz ana sistem ve sönümsüz AKS modelinin şematik gösterimi

$$a_s(-m_s \omega^2 + k_s + k_1) - k_1 a_1 = P_o \quad (5)$$

$$-k_1 a_s + a_1(-m_1 \omega^2 + k_1) = 0 \quad (6)$$

elde edilir. (5) ve (6) ifadeleri sırasıyla k_s ve k_1 ile sadeleştirilerek

$$a_s \left(1 + \frac{k_1}{k_s} - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) - a_1 \frac{k_1}{k_s} = x_{st} \quad (7)$$

$$a_s = a_1 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2} \right) \quad (8)$$

elde edilir. Burada $x_{st} = P_o / k_s$ statik yer değıştirme, $\omega_1 = \sqrt{k_1 / m_1}$ AKS sisteminin doğal frekansı ve $\omega_s = \sqrt{k_s / m_s}$ ana sistemin doğal frekansdır. (7) ve (8) ifadelerinden

$$\frac{a_s}{x_{st}} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) \left(1 + \frac{k_1}{k_s} - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) - \frac{k_1}{k_s}} \quad (9)$$

$$\frac{a_1}{x_{st}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) \left(1 + \frac{k_1}{k_s} - \frac{\omega^2}{\omega_s^2}\right) - \frac{k_1}{k_s}} \quad (10)$$

elde edilir. (9) ifadesinde $\omega_1 = \omega$ koşulunun sağlanması durumunda ana sistemde hareket yoktur, yani genlik sıfırdır. Benzer koşulun (10) ifadesinde yerine yazılmasıyla

$$a_1 = -\frac{k_s}{k_1} x_{st} = -\frac{P_o}{k_1} \quad (11)$$

elde edilir. Buna göre AKS tarafından ana sisteme P_o kuvvetinin zıt yönünde ve aynı genlikte bir kuvvetin uygulandığı anlaşılmaktadır. Bu durum, ω/ω_s oranının bütün değerleri için geçerlidir.

Şimdi ana sistemin doğal frekansının AKS'nin doğal frekansına eşit olması hali ($\omega_s = \omega_1$) ele alınacaktır. $\omega_s = \omega_1$ için

$$\omega_s = \omega_1 \rightarrow \frac{k_1}{k_s} = \frac{m_1}{m_s} = \mu \quad (12)$$

ile verilen eşitliklerin (9) ve (10) ifadelerinde yazılmasıyla

$$\frac{a_s}{x_{st}} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) \left(1 + \mu - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) - \mu} \quad (13)$$

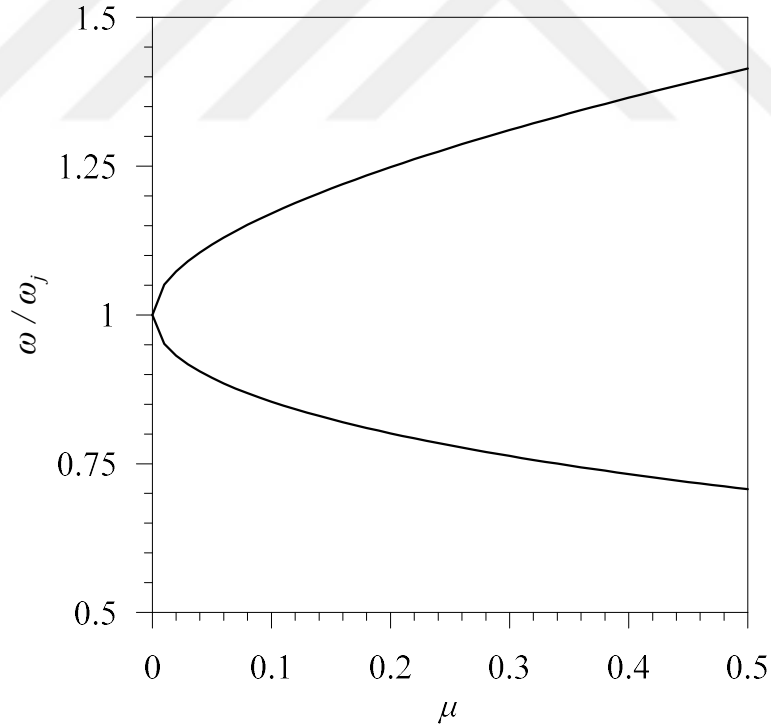
$$\frac{a_1}{x_{st}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) \left(1 + \mu - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) - \mu} \quad (14)$$

elde edilir.

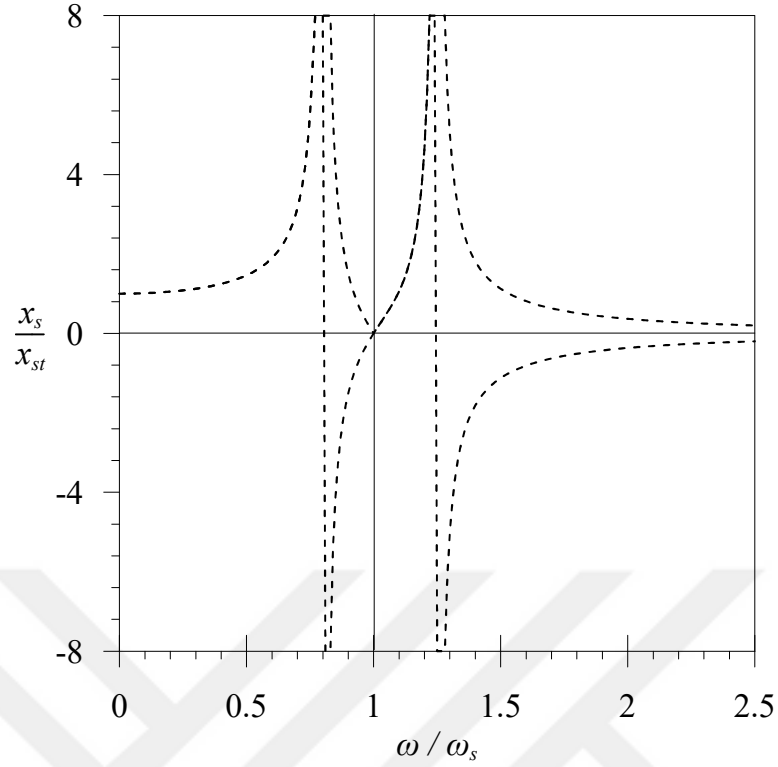
Tek serbestlik dereceli ana sistem üzerine AKS eklenmesiyle oluşan yeni sistem, ana sistemin doğal frekansının altında ve üstünde olmak üzere iki doğal frekansa sahiptir. Yeni sistemin doğal frekansları aşağıdaki bağıntı ile elde edilir.

$$\frac{\omega^2}{\omega_j^2} = \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) \pm \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}}, \quad j = 1, 2 \quad (15)$$

Şekil 6’da Model 1 için doğal frekansların kütle oranı ile değişimi gösterilmiştir. Kütle oranı arttıkça yeni sistemin doğal frekans aralığının arttığı görülmektedir. Şekil 7’de ise ana sistemin genliğinin yük frekans oranı ile değişimi verilmiştir. Görüleceği üzere, zorlanma frekansının yeni sistemin doğal frekanslarına eşit olması durumunda genlik hızla büyümektedir. $\omega = \omega_1 = \omega_2$ iken genlik değerinin sıfır olduğu görülmektedir. Her iki şekil için kütle oranı $\mu = 0,2$ alınmıştır.



Şekil 6. Model 1 için doğal frekansların kütle oranına bağlı olarak değişimi (Den Hartog, 1956)



Şekil 7. Model 1 için ana sistem genliğinin yük frekans oranı ile değişimi (Den Hartog, 1956)

1.4.1.2. Model 2: Sönümsüz Ana Sistem ve Sönümlü AKS

Den Hartog (1956) tarafından önerilen sönümlü AKS modeli için şematik gösterim Şekil 8’de verilmiştir. Ele alınan problem için hareket denklemleri (Den Hartog, 1956)

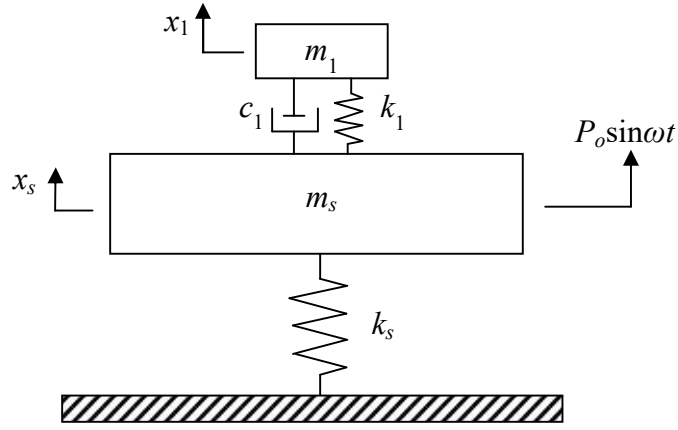
$$m_s \ddot{x}_s + k_s x_s + k_1(x_s - x_1) + c_1(\dot{x}_s - \dot{x}_1) = P_o \sin \omega t \quad (16)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_s) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_s) = 0 \quad (17)$$

şeklindedir. Burada m_s ve k_s ana sisteme ait kütle ve rijitliği; m_1 , c_1 ve k_1 AKS’ye ait kütle, sönüm ve rijitliği; x_s ve x_1 ise ana sistem ve AKS için yer değiştirmeyi göstermektedir.

Hareket denklemleri matris formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_o \sin \omega t \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (18)$$



Şekil 8. Model 2: Sönümsüz ana sistem ve sönümlü AKS modelinin şematik gösterimi

Ele alınan problemin çözümü

$$x_s = a_s e^{i\omega t}, \quad x_1 = a_1 e^{i\omega t} \quad (19)$$

şeklinde kabul edilir. Burada a_s ve a_1 zorlanmış harekete ait yer değiştirme genlikleri olup $i = \sqrt{-1}$ dir. (19) ifadesi, (16) ve (17)'de yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$-m_s \omega^2 a_s + k_s a_s + k_1 (a_s - a_1) + i\omega c_1 (a_s - a_1) = P_o \quad (20)$$

$$-m_1 \omega^2 a_1 + k_1 (a_1 - a_s) + i\omega c_1 (\dot{a}_1 - \dot{a}_s) = P_o \quad (21)$$

elde edilir. (20) ve (21) ifadeleri a_s ve a_1 ortak parantezine alınır

$$(-m_s \omega^2 + k_s + k_1 + i\omega c_1) a_s - (k_1 + i\omega c_1) a_1 = P_o \quad (22)$$

$$-(k_1 + i\omega c_1) a_s + (-m_1 \omega^2 + k_1 + i\omega c_1) a_1 = 0 \quad (23)$$

elde edilir.

(22) ve (23) ifadelerinde gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$a_s = P_o \frac{(k_1 - m_1 \omega^2) + i \omega c_1}{\{(-m_s \omega^2 + k_s)(-m_1 \omega^2 + k_1) - m_1 \omega^2 k_1\} + i \omega c_1 \{-m_s \omega^2 + k_s - m_1 \omega^2\}} \quad (24)$$

elde edilir. (24) ifadesinin pay ve paydası, paydanın eşleniği ile çarpılır ve elde edilen yeni karmaşık sayının reel ve sanal kısımlarının karelerinin toplamının karekökü alınır

$$\left| \frac{a_s}{P_o} \right| = \sqrt{\frac{(k_1 - m_1 \omega^2)^2 + (\omega c_1)^2}{\{(-m_s \omega^2 + k_s)(-m_1 \omega^2 + k_1) - m_1 \omega^2 k_1\}^2 + (\omega c_1)^2 \{-m_s \omega^2 + k_s - m_1 \omega^2\}^2}} \quad (25)$$

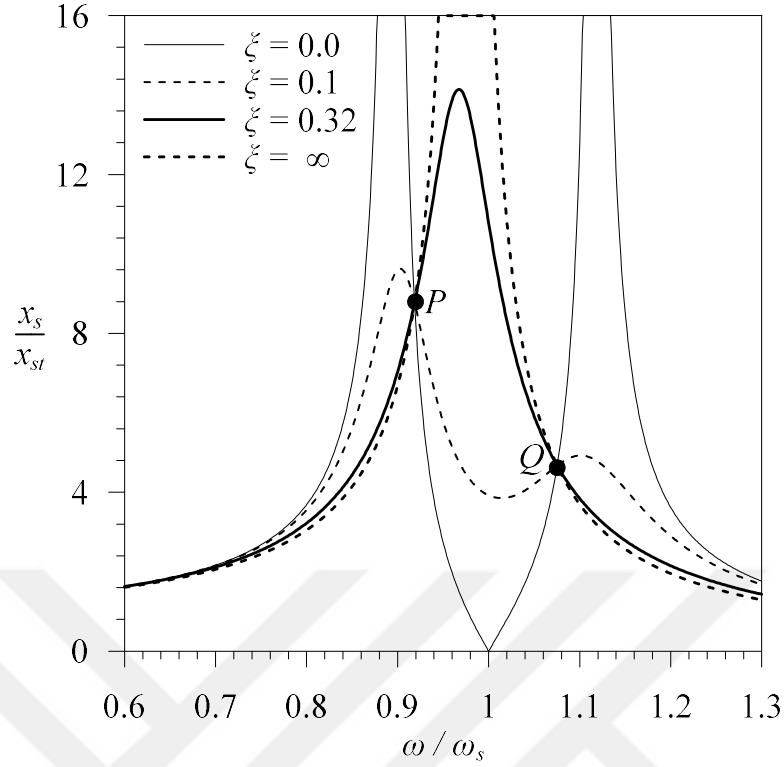
elde edilir. Bu ifade

$$\text{DBC} = \left| \frac{a_s}{x_{st}} \right| = \sqrt{\frac{(2\xi\Omega)^2 + (\Omega^2 - f^2)^2}{(2\xi\Omega)^2 (\Omega^2 - 1 + \mu\Omega^2)^2 + (\mu f^2 \Omega^2 - (\Omega^2 - 1)(\Omega^2 - f^2))^2}} \quad (26)$$

şeklinde boyutsuz olarak yeniden yazılabilir. Burada, $x_{st} = P_o / k_s$ statik yer değiştirme, $\mu = m_1 / m_s$ kütle oranı, $f = \omega_1 / \omega_s$ doğal frekansların oranı, $\Omega = \omega / \omega_s$ yük frekans oranı ve $\xi = c_1 / 2m_1\omega_s$ kritik sönüm oranıdır.

Şekil 9'da ana sisteme ait genlik değerinin çeşitli sönüm oranlarına bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. $\xi = 0$ için, ele alınan problem sönümsüz AKS modeline dönüşmektedir. Diğer yandan $\xi = \infty$ hali ise AKS sisteminin ana sistemle yekpare olmasına karşılık gelip, bu durumda bir adet rezonans frekansı oluşmaktadır. Bu şekil üzerinde elde edilen en çarpıcı sonuç, tüm eğrilerin P ve Q noktalarında kesişiyor olmasıdır. Den Hartog (1956), P ve Q noktalarının sahip olduğu bu özellikten faydalanarak AKS için optimum frekans oranı ve sönüm oranını aşağıdaki şekilde elde etmiştir.

$$\omega_1 = \frac{\omega_s}{1 + \mu}, \quad \xi_1 = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (27)$$



Şekil 9. Model 2 için ana sistem genliğinin sönüm oranıyla değişimi (Den Hartog, 1956)

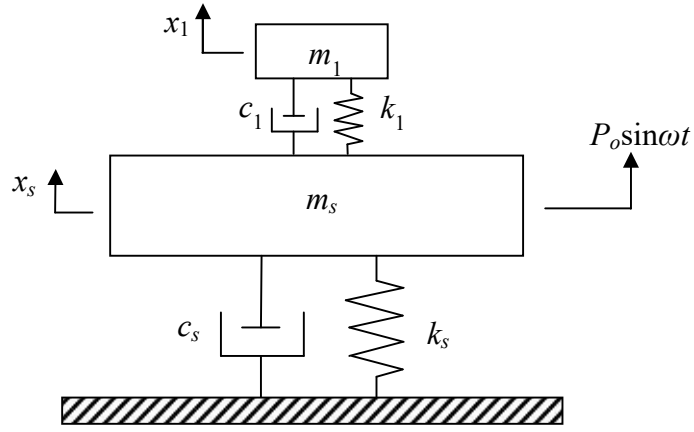
Burada, ω_1 AKS'nin doğal frekansı, ω_s ana sistemin doğal frekansı, μ AKS kütlelerinin ana sistemin kütlesine oranı, ξ_1 AKS için sönüm oranıdır.

1.4.1.3. Model 3: Sönümlü Ana Sistem ve Sönümlü AKS

Gerçek sistemler belli sönüm oranlarına sahiptir. Bu sebeple, ele alınan problemin gerçek sistemleri temsil etmesi bakımından ana sisteme sönüm elemanı eklemek gereklidir (Şekil 10). Bu modele ait hareket denklemleri (Wu, 2006)

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + k_1 (x_s - x_1) + c_1 (\dot{x}_s - \dot{x}_1) = P_o \sin \omega t \quad (28)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 (x_1 - x_s) + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_s) = 0 \quad (29)$$



Şekil 10. Model 3: Sönümlü ana sistem ve sönümlü AKS modelinin şematik gösterimi

Burada, m_s , c_s ve k_s sırasıyla ana sisteme ait kütle, sönüm ve rijitliği; m_1 , c_1 ve k_1 ise sırasıyla AKS sistemine ait kütle, sönüm ve rijitliği göstermektedir. Hareket denklemleri matris formda

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_o \sin \omega t \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (30)$$

şeklinde yazılabilir. Çözüm

$$x_s = a_s e^{i\omega t}, \quad x_1 = a_1 e^{i\omega t} \quad (31)$$

şeklinde kabul edilir. Burada, a_s ve a_1 zorlanmış harekete ait yer değiştirme genlikleridir. Önceki kısımda verilen işlem adımları takip edildiğinde

$$\text{DBC} = \left| \frac{a_s}{x_{st}} \right| = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{C^2 + D^2}} \quad (32)$$

elde edilir. Burada,

$$A = f^2 - \Omega^2, \quad B = 2\Omega f \xi_1, \quad C = (f^2 - \Omega^2)(1 - \Omega^2) - \mu f^2 \Omega^2 - 4\xi_s \xi_1 f \Omega^2, \quad (33)$$

$$D = 2\xi_1 f \Omega [1 - \Omega^2 (1 + \mu)] + 2\xi_s \Omega (f^2 - g^2)$$

şeklindedir. Burada, $x_{st} = P_o / k_s$ statik yer değiştirme, $\mu = m_1 / m_s$ kütle oranı, $f = \omega_1 / \omega_s$ doğal frekansların oranı, $\Omega = \omega / \omega_s$ yük frekans oranı ve $\xi = c_1 / 2m_1 \omega_s$ ana sistemin kritik sönüm oranı ve $\xi_s = c_s / 2m_s \omega_s$ AKS sisteminin sönüm oranıdır.

1.4.1.4. Model 4: Tek Serbestlik Dereceli Ana Sistem ve Paralel Bağlı AKS Sistemi (PAKS)

Şekil 11'de ana sisteme paralel olarak bağlanmış n tane AKS'den oluşan PAKS sistemi görülmektedir. PAKS sisteminin eklenmesiyle oluşan yeni sistemin serbestlik derecesi $(n+1)$ olmaktadır. Probleme ait hareket denklemi (Li ve Ni, 2007)

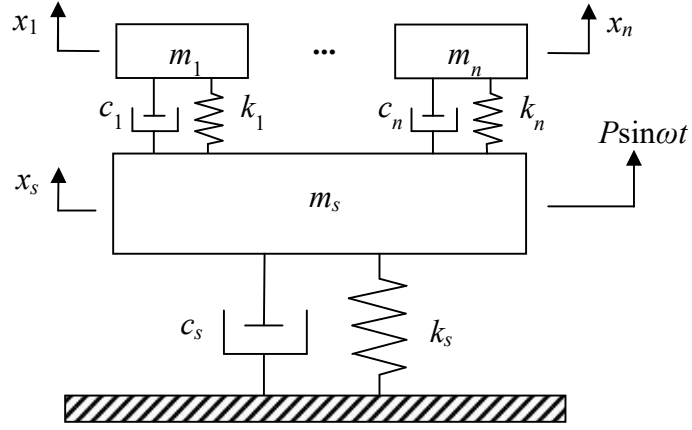
$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + \sum_{j=1}^n c_j (\dot{x}_s - \dot{x}_j) + k_j (x_s - x_j) = P \sin \omega t \quad (34)$$

$$m_j \ddot{x}_j + c_j (\dot{x}_j - \dot{x}_s) + k_j (x_j - x_s) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (35)$$

şeklindedir. Burada, m_s , c_s ve k_s ana sisteme ait kütle, sönüm ve rijitliği; m_j , c_j ve k_j ise PAKS sistemi içerisindeki j . AKS için kütle, sönüm ve rijitliği göstermektedir. (34) ve (35) ifadeleri matris formda

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (36)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, \mathbf{M} , \mathbf{C} ve \mathbf{K} sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\ddot{\mathbf{X}}$, $\dot{\mathbf{X}}$ ve \mathbf{X} ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini, \mathbf{F} ise kuvvet vektörünü göstermekte olup aşağıda tanımlanmışlardır.



Şekil 11. Model 4: Tek serbestlik dereceli ana sistem ve PAKS modelinin şematik gösterimi

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & & & & \\ & m_1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & & m_n \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_s + \sum_{j=1}^n c_j & -c_1 & -c_2 & \cdots & -c_n \\ -c_1 & c_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_2 & 0 & c_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_n & 0 & 0 & \cdots & c_n \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s + \sum_{j=1}^n k_j & -k_1 & -k_2 & \cdots & -k_n \\ -k_1 & k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_2 & 0 & k_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_n & 0 & 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{X} = \{x_s \quad x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n\}^T, \quad \mathbf{F} = \{P \sin \omega t \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0\}^T \quad (40)$$

Problemin çözümü

$$x_s = a_s e^{i\omega t}, \quad x_j = a_j e^{i\omega t} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (41)$$

şeklinde kabul edilir. Burada a_s ve a_j sırasıyla ana sistem ve j . AKS için zorlanmış harekete ait yer değiştirme genlikleri olup $i = \sqrt{-1}$ dir. (41) ifadesi (36) ifadesinde yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa ana sistem için dinamik büyütme çarpanı (DBÇ)

$$\text{DBÇ} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (42)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadede,

$$A = 1 - \beta^2 - \beta^2 \sum_{j=1}^n \mu_j \frac{\frac{\beta_j^2}{\beta^2} - 1 + 4\xi_j^2}{\left(\frac{\beta_j}{\beta} - \frac{\beta}{\beta_j}\right)^2 + 4\xi_j^2} \quad (43)$$

$$B = 2\beta\xi_s + \beta^2 \sum_{j=1}^n \mu_j \frac{\frac{2\beta\xi_j}{\beta_j}}{\left(\frac{\beta_j}{\beta} - \frac{\beta}{\beta_j}\right)^2 + 4\xi_j^2} \quad (44)$$

şeklinde tanımlıdır. Burada, $\beta = \omega / \omega_s$ dış yükün frekansının ana sistemin doğal frekansına oranı, $\xi_s = c_s / 2m_s\omega_s$ ana sistemin sönüm oranı, n PAKS sistemi içindeki toplam AKS sayısı, $\mu = m_j / m_s j$. AKS kütlelerinin ana sistemin kütlelerine oranı, $\beta_j = \omega_j / \omega_s$ j . AKS doğal frekansının ana sistemin doğal frekansına oranı, $\xi_j = c_j / 2m_j\omega_j$ ise j . AKS sönüm oranıdır. Ana sistem ve j . AKS için doğal frekanslar $\omega_s = \sqrt{k_s / m_s}$ ve $\omega_j = \sqrt{k_j / m_j}$ ile elde edilmektedir.

1.4.1.5. Model 5: Tek Serbestlik Dereceli Ana Sistem ve Seri Bağlı AKS Sistemi (SAKS)

Şekil 12’de tek serbestlik dereceli ana sistem ve ana kütleyle bağlı SAKS sistemi gösterilmiştir. SAKS sisteminin eklenmesiyle oluşan yeni sistemin serbestlik derecesi 3 olmaktadır. Ele alınan problemin hareket denklemleri (Li ve Zhu, 2006)

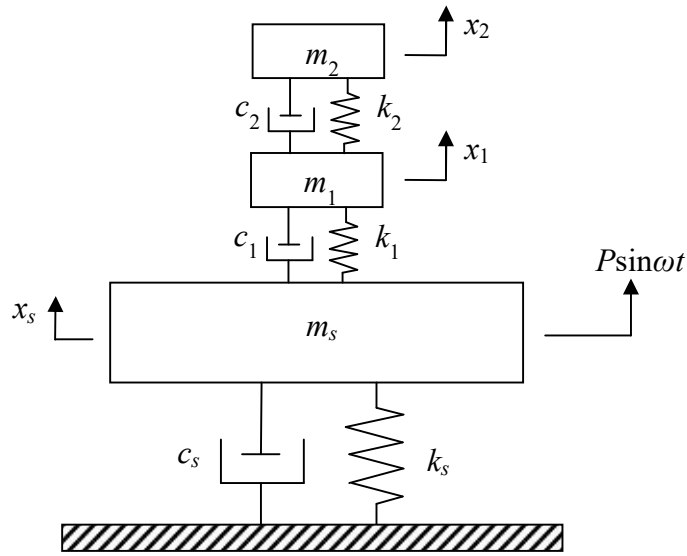
$$m_s \ddot{x}_s + [c_s \dot{x}_s + c_1(\dot{x}_s - \dot{x}_1)] + [k_s x_s + k_1(x_s - x_1)] = P \sin \omega t \quad (45)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_s) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_s) + k_2(x_1 - x_2) = 0 \quad (46)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (47)$$

şeklindedir. Burada, m_s , c_s ve k_s ana sisteme ait kütle, sönüm ve rijitliği; m_j , c_j ve k_j SAKS sistemi içerisindeki j . AKS için kütle, sönüm ve rijitliği göstermektedir.

SAKS sistemi literatürde genellikle tek serbestlik dereceli sistemlerde uygulanmıştır (Li ve Zhu, 2006; Zuo, 2009). Bu tez kapsamında, SAKS sistemi yüksek hızlı tren etkisindeki köprülere ilk kez uygulanmıştır. Köprü-SAKS sisteminin çözümü ileriki bölümlerde verilecektir.



Şekil 12. Model 5: Tek serbestlik dereceli ana sistem ve SAKS modelinin şematik gösterimi

1.5. Hareketli Yük Katarı Etkisindeki Elastik Kiriş: Analitik Çözüm

1.5.1. Kiriş Üzerinde Sönümleyici Olmaması Durumu

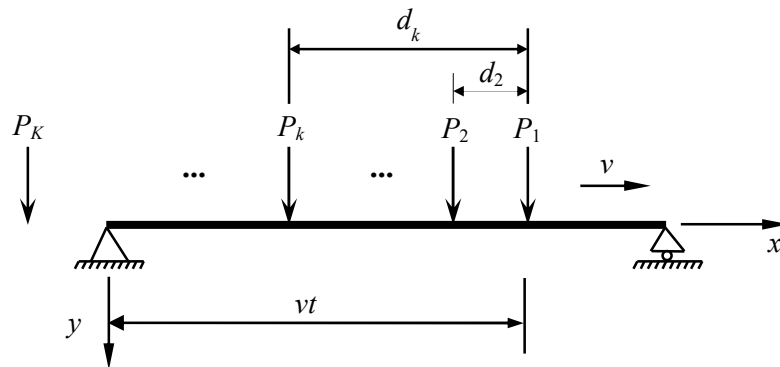
Tren-köprü sistemi için genel olarak basit kiriş üzerinde hareket eden yük katari modeli kullanılmaktadır. Problemin şematik gösterimi Şekil 13'de verilmiştir. Yük katarının kiriş üzerinde sabit hızla hareket ettiği kabul edilmektedir. Probleme ait hareket denklemini

$$EIy^{iv}(x,t) + m_b \ddot{y}(x,t) + c_b \dot{y}(x,t) = F_T(x,t) \quad (48)$$

şeklinde verilmektedir. Bu ifadelerde, $y(x,t)$, EI , m_b ve c_b sırasıyla kirişin yer değiştirmesini, eğilme rijitliğini, birim uzunluğa gelen kütesini ve açılal sönümünü göstermektedir. İfadelerde $\dot{y} = \partial y / \partial t$ ve $y^{iv} = \partial^4 y / \partial x^4$ şeklinde türev operatörleridir. İfadenin sağ tarafındaki yük terimi ise

$$F_T(x,t) = \sum_{k=1}^K P_k \delta[x - (vt - d_k)] \left[H\left(t - \frac{d_k}{v}\right) - H\left(t - \frac{d_k + L}{v}\right) \right] \quad (49)$$

şeklinde olup v tren hızı, d_k k . tekerlek yükü ile birincisi arasındaki mesafe ($d_1 = 0$), K tekerlek yüklerinin sayısı, P_k k . tekerlek yükü, $\delta(\cdot)$ Dirac delta fonksiyonu ve $H(\cdot)$ Heaviside birim adım fonksiyonudur.



Şekil 13. Tren-tek açıklıklı köprü modeli

$\varphi_i(x)$ ve $q_i(t)$ sırasıyla i . moda ait mod fonksiyonu ve genelleştirilmiş koordinatlar, N ise hesaba katılan mod sayısı olmak üzere çözüm

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^N q_i(t)\varphi_i(x) \quad (50)$$

şeklinde kabul edilip (48) denkleminde yazılırsa

$$EI \sum_{i=1}^N \varphi_i^{iv}(x)q_i(t) + m_b \sum_{i=1}^N \varphi_i(x)\ddot{q}_i(t) + c_b \sum_{i=1}^N \varphi_i(x)\dot{q}_i(t) = F_T(x,t) \quad (51)$$

elde edilir. Bu ifadenin her iki tarafı $\varphi_m(x)$ ile çarpılır ve kiriş uzunluğu boyunca integrali alınır

$$EI \sum_{i=1}^N \int_0^L \varphi_i^{iv}(x)\varphi_m(x)q_i(t)dx + m_b \sum_{i=1}^N \int_0^L \varphi_i(x)\varphi_m(x)\ddot{q}_i(t)dx + c_b \sum_{i=1}^N \int_0^L \varphi_i(x)\varphi_m(x)\dot{q}_i(t)dx = \int_0^L \varphi_m(x)F_T(x,t)dx \quad (52)$$

elde edilir. Basit kirişte $\varphi_i(x) = \sin(i\pi x/L)$ şeklindedir. (52) ifadesinin bütün terimleri m_b ile bölünür ve modal ortogonalite şartları dikkate alınır (52) ifadesi

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = \frac{2F_i^T}{m_bL} \quad (53)$$

şeklinde son haline getirilir. Burada, ξ_i i . moda ait sönüm oranını göstermektedir. ω_i ise kirişin i . moda ait doğal açısal frekansı olup aşağıdaki ifadeyle

$$\omega_i = \frac{i^2\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_b}} \quad (54)$$

elde edilmektedir.

Yüksek hızlı tren etkisiyle köprüye uygulanan kuvvetler ise

$$F_i^T = \sum_{k=1}^N P_k \varphi_i(vt - d_k) \left[H\left(t - \frac{d_k}{v}\right) - H\left(t - \frac{d_k + L}{v}\right) \right] \quad (55)$$

şeklinde dir. (55) ifadesi edilirken bir $f(x)$ fonksiyonu için

$$\int f(x) \delta(x - a) dx = f(a) \quad (56)$$

olduğu dikkate alınmıştır (Fryba, 1972).

(53) ifadesi matris formda

$$\mathbf{m}_b \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_b \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_b \mathbf{u} = \mathbf{f}_T \quad (57)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$\mathbf{m}_b = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_b = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & & & \\ & 2\xi_2 \omega_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 2\xi_N \omega_N \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_b = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \omega_N^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \{q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_N\}^T, \quad (58)$$

$$\mathbf{f}_T = \frac{2}{m_b L} \{F_1^T \quad F_2^T \quad \dots \quad F_N^T\}^T$$

şeklinde tanımlıdır. (57) ile verilen hareket denkleminin sayısal çözümü Newmark metodu yardımıyla yapılacaktır.

1.5.2. Kiriş Üzerinde Paralel Bağlı AKS Olması Durumu

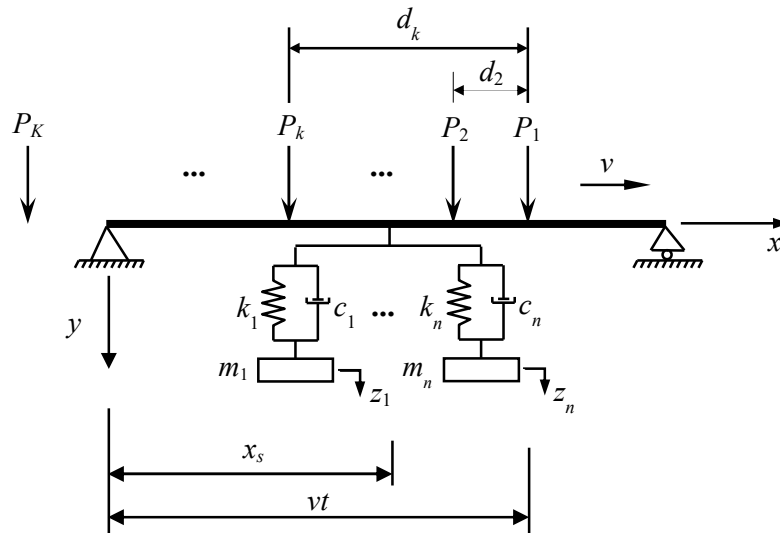
Problemin şematik gösterimi Şekil 14’de verilmiştir. PAKS sisteminde n adet AKS paralel olarak bağlanmıştır. Problemin hareket denklemleri

$$EIy^{iv}(x,t) + m_b\ddot{y}(x,t) + c_b\dot{y}(x,t) = F_T(x,t) + F_A(x_s,t) \quad (59)$$

$$m_j\ddot{z}_j(t) + c_j[\dot{z}_j(t) - \dot{y}(x_s,t)] + k_j[z_j(t) - y(x_s,t)] = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (60)$$

şeklinde verilmektedir. Bu ifadelerde, $y(x,t)$, EI , m_b ve c_b sırasıyla kirişin yer değiştirmesini, eğilme rijitliğini, birim uzunluğa gelen kütesini ve açılal sönümünü göstermektedir. $z_j(t)$, m_j , c_j ve k_j ($j = 1, 2, \dots, n$) ise sırasıyla j . AKS’nin yer değiştirmesi, kütesi, sönümü ve rijitliğidir. (59) ifadesinde, $F_T(x,t)$ trenden köprüye uygulanan yük olup (49)’da tanımlandığı gibidir. $F_A(x_s,t)$ ise sönümleyiciden köprüye uygulanan dış yük olup aşağıdaki şekilde tanımlıdır.

$$F_A(x_s,t) = \sum_{j=1}^n \delta(x-x_s) \left[c_j (\dot{z}_j(t) - \dot{y}(x_s,t)) + k_j (z_j(t) - y(x_s,t)) \right] \quad (61)$$



Şekil 14. YHTK1-PAKS sistemi

(50) ifadesi (59)'da yazılır ve Bölüm 1.5.1'deki işlem adımları takip edilirse köprüye ait hareket denklemi

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = \frac{2}{m_bL}(F_i^T + F_i^A), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (62)$$

şeklinde elde edilir. Burada F_i^T (55)'de tanımlandığı gibidir. AKS'nin köprüye uyguladığı dış yük F_i^A ise

$$F_i^A = \sum_{j=1}^n \varphi_j(x_s) \left[c_j \left(\dot{z}_j(t) - \sum_{m=1}^N \dot{q}_m \varphi_m(x_s) \right) + k_j \left(z_j(t) - \sum_{m=1}^N q_m \varphi_m(x_s) \right) \right] \quad (63)$$

şeklindedir. (50) çözümü (60) ifadesinde yazılırsa

$$m_j \ddot{z}_j(t) + c_j \left[\dot{z}_j(t) - \sum_{m=1}^N \dot{q}_m(t) \varphi_m(x_s) \right] + k_j \left[z_j - \sum_{m=1}^N q_m(t) \varphi_m(x_s) \right] = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (64)$$

elde edilir. (62) ve (64) ifadeleri matris formda

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (65)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{c}_a \end{bmatrix} + \Phi_1, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{k}_a \end{bmatrix} + \Phi_1,$$

$$\mathbf{u} = \{q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_N \quad z_1 \quad \dots \quad z_n\}^T, \quad (66)$$

$$\mathbf{F} = \{F_1^T \quad F_2^T \quad \dots \quad F_N^T \quad 0 \quad \dots \quad 0\}^T$$

şeklinde tanımlıdır. Bu ifadelerde \mathbf{m}_b , \mathbf{k}_b ve \mathbf{c}_b alt matrisleri (58)'de verilmiştir. Diğer matrisler ise

$$\mathbf{m}_a = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_a = \begin{bmatrix} c_1 & & & \\ & c_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_a = \begin{bmatrix} k_1 & & & \\ & k_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & k_n \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$\Phi_1 = \left[\begin{array}{c|c} a_1 \begin{bmatrix} \varphi_1 \varphi_1 & \cdots & \varphi_1 \varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N \varphi_1 & \cdots & \varphi_N \varphi_N \end{bmatrix} & a_2 \begin{bmatrix} c_1 \varphi_1 & \cdots & c_n \varphi_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1 \varphi_N & \cdots & c_n \varphi_N \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} c_1 \varphi_1 & \cdots & c_1 \varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n \varphi_1 & \cdots & c_n \varphi_N \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (68)$$

$$\Phi_2 = \left[\begin{array}{c|c} b_1 \begin{bmatrix} \varphi_1 \varphi_1 & \cdots & \varphi_1 \varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N \varphi_1 & \cdots & \varphi_N \varphi_N \end{bmatrix} & b_2 \begin{bmatrix} k_1 \varphi_1 & \cdots & k_n \varphi_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_1 \varphi_N & \cdots & k_n \varphi_N \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} k_1 \varphi_1 & \cdots & k_1 \varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_n \varphi_1 & \cdots & k_n \varphi_N \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (69)$$

$$a_1 = a_2 \sum_{j=1}^n c_j, \quad b_1 = b_2 \sum_{j=1}^n k_j, \quad a_2 = b_2 = -\frac{2}{m_b L} \quad (70)$$

olarak tanımlıdır. (65) denkleminin sayısal çözümü Newmark metodu ile yapılacaktır.

1.5.3. Kiriş Üzerinde Seri Bağlı AKS Olması Durumu

Problemin şematik gösterimi Şekil 15'de verilmiştir. Görüleceği üzere, SAKS sistemi iki adet AKS'nin uç uca eklenmesiyle oluşmuştur. Problemin hareket denklemleri

$$EIy^{iv}(x,t) + m_b \ddot{y}(x,t) + c_b \dot{y}(x,t) = F_T(x,t) + F_A(x_s,t) \quad (71)$$

$$m_1 \ddot{z}_1(t) + c_1 [\dot{z}_1(t) - \dot{y}(x_s,t)] + k_1 [z_1(t) - y(x_s,t)] - m_2 \ddot{z}_2(t) = 0 \quad (72)$$

$$m_2 \ddot{z}_2(t) + c_2 [\dot{z}_2(t) - \dot{z}_1(t)] + k_2 [z_2(t) - z_1(t)] = 0 \quad (73)$$

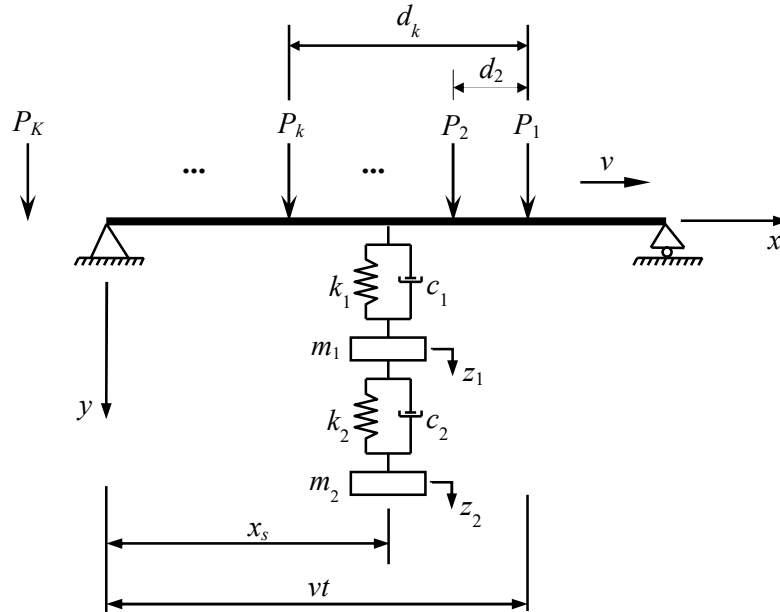
şeklindedir. Bu ifadelerde, $y(x,t)$, EI , m_b ve c_b sırasıyla kirişin yer değiştirmesini, eğilme rijitliğini, birim uzunluğa gelen kütesini ve açısal sönümünü göstermektedir. $z_j(t)$, m_j , c_j ve k_j ($j=1,2$) ise sırasıyla j . AKS'nin yer değiştirmesi, kütesi, sönümü ve rijitliğidir. (71) ifadesinde görülen $F_T(x,t)$ daha önce tanımlanmıştır. $F_A(x_s,t)$ ise

$$F_A(x_s,t) = \delta(x-x_s) [c_1 (\dot{z}_1(t) - \dot{y}(x_s,t)) + k_1 (z_1(t) - y(x_s,t))] \quad (74)$$

şeklindedir.

Kısım 1.5.2'deki işlem sırası takip edilirse hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{2}{m_b L} (F_i^T + F_i^A), \quad i=1,2,\dots,N \quad (75)$$



Şekil 15. YHTK1-SAKS sistemi

$$m_1 \ddot{z}_1(t) + c_1 [\dot{z}_1(t) - \sum_{m=1}^N \dot{q}_m(t) \varphi_m(x_s)] + k_1 [z_1(t) - \sum_{m=1}^N q_m(t) \varphi_m(x_s)] - c_2 [\dot{z}_2(t) - \dot{z}_1(t)] - k_2 [z_2(t) - z_1(t)] = 0 \quad (76)$$

$$m_2 \ddot{z}_2(t) + c_2 [\dot{z}_2(t) - \dot{z}_1(t)] + k_2 [z_2(t) - z_1(t)] = 0 \quad (77)$$

Burada

$$F_i^A = \varphi_i(x_s) \left[c_1 \left(\dot{z}_1(t) - \sum_{m=1}^N \dot{q}_m \varphi_m(x_s) \right) + k_1 \left(z_1(t) - \sum_{m=1}^N q_m \varphi_m(x_s) \right) \right] \quad (78)$$

olup F_i^T daha önce tanımlandığı gibidir. (75)-(77) ifadeleri matris formda

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (79)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{c}_a \end{bmatrix} + \Phi_1, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{k}_a \end{bmatrix} + \Phi_2,$$

$$\mathbf{u} = \{q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_N \quad z_1 \quad \cdots \quad z_n\}^T, \quad (80)$$

$$\mathbf{F} = \{F_1^T \quad F_2^T \quad \cdots \quad F_N^T \quad 0 \quad \cdots \quad 0\}^T$$

olup daha önce tanımlanmayan matrisler aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{m}_a = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_a = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_a = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (81)$$

$$\Phi_1 = \left[\begin{array}{c|c} \frac{2c_1}{m_b L} \begin{bmatrix} \varphi_1 \varphi_1 & \cdots & \varphi_1 \varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N \varphi_1 & \cdots & \varphi_N \varphi_N \end{bmatrix} & \frac{2c_1}{m_b L} \begin{bmatrix} -\varphi_1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -\varphi_N & 0 \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} -c_1 \varphi_1 & \cdots & -c_1 \varphi_N \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (82)$$

$$\Phi_2 = \left[\begin{array}{c|c} \frac{2k_1}{m_b L} \begin{bmatrix} \varphi_1 \varphi_1 & \cdots & \varphi_1 \varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N \varphi_1 & \cdots & \varphi_N \varphi_N \end{bmatrix} & \frac{2k_1}{m_b L} \begin{bmatrix} -\varphi_1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -\varphi_N & 0 \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} -k_1 \varphi_1 & \cdots & -k_1 \varphi_N \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (83)$$

(79) denkleminin sayısal çözümü Newmark metodu ile yapılacaktır.

1.6. Hareketli Yük Katarı Etkisindeki Sürekli Kiriş: Analitik Çözüm

1.6.1. Kiriş Üzerinde Sönümleyici Olmaması Durumu

Şekil 16'da görülen hareketli yük katarı etkisindeki iki açıklıklı sürekli kiriş için hareket denklemi

$$EI y^{iv}(x, t) + m_b \ddot{y}(x, t) + c_b \dot{y}(x, t) = F_T(x, t) \quad (84)$$

şeklindedir. Bu ifadelerde, $y(x, t)$, EI , m_b ve c_b sırasıyla kirişin yer değiştirmesini, eğilme rijitliğini, birim uzunluğa gelen kütesini ve açılmalı sönümünü göstermektedir. (84) ifadesindeki $F_T(x, t)$ yük fonksiyonu olup

$$F_T(x, t) = \sum_{k=1}^K P_k \delta[x - (vt - d_k)] \left[H\left(t - \frac{d_k}{v}\right) - H\left(t - \frac{d_k + 2L}{v}\right) \right] \quad (85)$$

şeklinde elde edilmektedir.

(86) diferansiyel denkleminin çözümü

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^N q_i(t)\varphi_i(x) \quad (86)$$

şeklinde alınsın. Burada $q_i(t)$ genelleştirilmiş koordinatları, $\varphi_i(x)$ ise titreşimin modal şekil fonksiyonlarını göstermektedir. İki açıklıklı bir kirişte mod fonksiyonları, simetrik olmayan modlar ($i = 1,3,5,\dots$) için

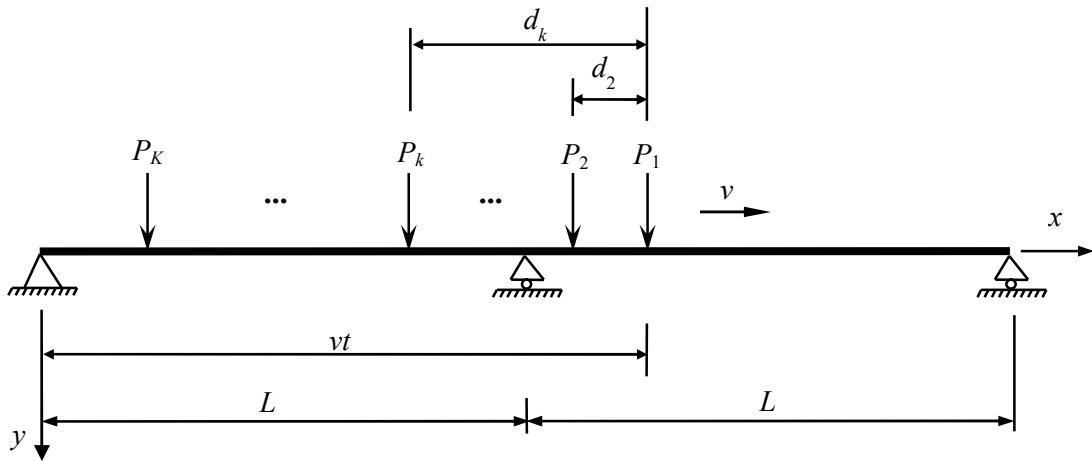
$$\varphi_i(x) = \sin(\lambda_i x), \quad x \in [0, 2L] \quad (87)$$

ve simetrik modlar ($i = 2,4,6,\dots$) için ise

$$\varphi_i(x) = \frac{\sin(\lambda_i x)}{\sin(\lambda_i L)} - \frac{\sinh(\lambda_i x)}{\sinh(\lambda_i L)}, \quad x \in [0, L] \quad (88)$$

$$\varphi_i(x) = \cos(a_i) - \cosh(a_i) - [\sin(a_i) - \sinh(a_i)] \cot(\lambda_i L), \quad x \in [L, 2L] \quad (89)$$

şeklinde dir. Burada $a_i = \lambda_i(x - L)$ olarak tanımlıdır.



Şekil 16. Tren-iki açıklıklı köprü modeli

(86) çözümü (84)'de yerine yazılır, elde edilen ifadenin her iki tarafı $\varphi_m(x)$ ile çarpılır ve 0 dan $2L$ ye kadar integrali alınırsa

$$EI \sum_{i=1}^N \int_0^{2L} \varphi_i^{iv}(x) \varphi_m(x) q_i(t) dx + m_b \sum_{i=1}^N \int_0^{2L} \varphi_i(x) \varphi_m(x) \ddot{q}_i(t) dx + c_b \sum_{i=1}^N \int_0^{2L} \varphi_i(x) \varphi_m(x) \dot{q}_i(t) dx = \int_0^{2L} \varphi_m(x) F_T(x, t) dx \quad (90)$$

elde edilir. Bu ifadede modal ortogonalite şartları dikkate alınır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{F_i^T}{M_i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (91)$$

elde edilir. Burada, M_i i . moda ait modal kütle, ω_i titreşimin doğal frekansı, F_i^T ise kuvvet vektörü olup

$$M_i = \int_0^{2L} m_b \varphi_i^2(x) dx \quad (92)$$

$$\omega_i = \lambda_i^2 \sqrt{\frac{EI}{m_b}} = \begin{cases} \left(\frac{i+1}{2L} \pi \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m_b}}, & i = 1, 3, 5, \dots \\ \left(\frac{0.25 + 0.5i}{L} \pi \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m_b}}, & i = 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (93)$$

$$F_i^T = \sum_{k=1}^K P_k \varphi_i(vt - d_k) \left[H\left(t - \frac{d_k}{v}\right) - H\left(t - \frac{d_k + 2L}{v}\right) \right] \quad (94)$$

şeklinde tanımlıdırlar.

(91) ifadesi matris formda

$$\mathbf{m}_b \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_b \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_b \mathbf{u} = \mathbf{f}_T \quad (95)$$

şeklinde yazılabilir. Bu diferansiyel denklemin terimleri (58) ifadesinde tanımlandığı gibidir. Sadece yük vektöründe $2 / m_b L$ yerine $1 / M_i$ gelecektir.

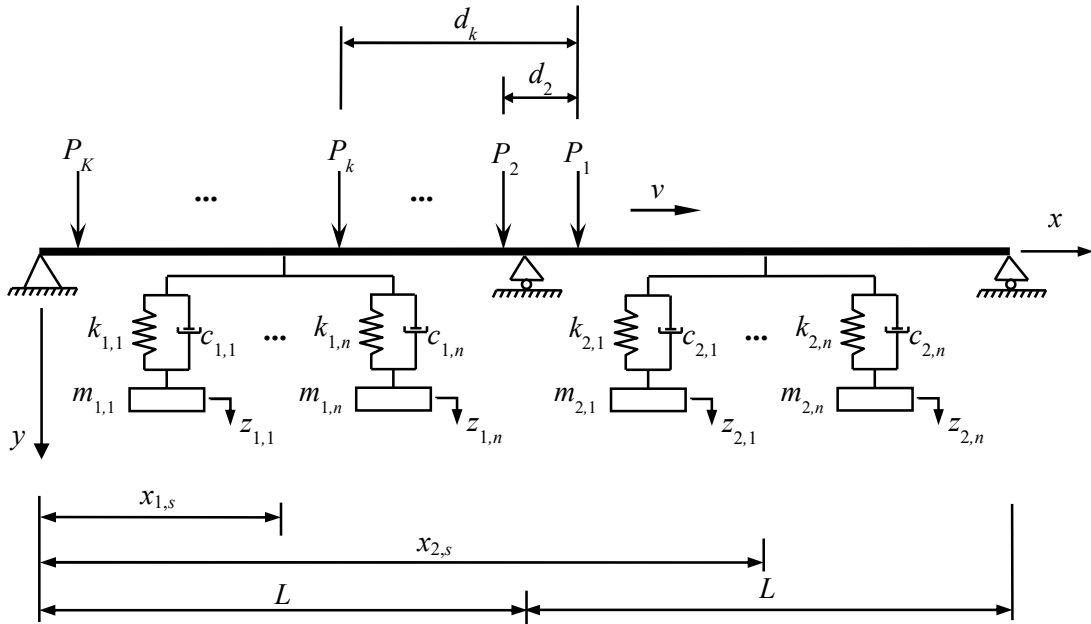
1.6.2. Kiriş Üzerinde Paralel Bağlı Sönümleyici Olması Durumu

Problemin şematik gösterimi Şekil 17’de verilmiştir. Kirişin sol ve sağ açıklığında bulunan sönümleyiciler sırasıyla PAKS-1 ve PAKS-2 olarak adlandırılmıştır. Birleşik sistemin hareket denklemleri

$$EIy^{iv}(x,t) + m_b \ddot{y}(x,t) + c_b \dot{y}(x,t) = F_T(x,t) + F_A(x_s,t) \quad (96)$$

$$m_{r,j} \ddot{z}_{r,j}(t) + c_{r,j} [\dot{z}_{r,j}(t) - \dot{y}(x_{r,s},t)] + k_{r,j} [z_{r,j}(t) - y(x_{r,s},t)] = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (97)$$

şeklinindedir. Yukarıdaki ifadelerde, $y(x,t)$ kirişin yer değiştirmesini; EI eğilme rijitliğini; m_b birim uzunluğa gelen kütesini; c_b açısız sönümünü; $r = 1, 2$ indisleri açıklık numaralarını göstermektedir.



Şekil 17. YHTK2-PAKS modeli

(96) ifadesindeki $F_T(x,t)$ daha önce (85)'de tanımlanmıştır. Birinci açıklığın orta noktasına yerleştirilen PAKS-1 ve ikinci açıklığın orta noktasına yerleştirilen PAKS-2 sistemi tarafından köprüye uygulanan dış yük fonksiyonu $F_A(x_s,t)$

$$F_A(x_s,t) = \sum_{j=1}^n \delta(x-x_{1,s}) \left[c_{1,j} (\dot{z}_{1,j}(t) - \dot{y}(x_{1,s},t)) + k_{1,j} (z_{1,j}(t) - y(x_{1,s},t)) \right] \\ + \sum_{j=1}^n \delta(x-x_{2,s}) \left[c_{2,j} (\dot{z}_{2,j}(t) - \dot{y}(x_{2,s},t)) + k_{2,j} (z_{2,j}(t) - y(x_{2,s},t)) \right] \quad (98)$$

şeklindedir. (98) ifadesinde $z_{1,j}(t)$, $z_{2,j}(t)$, $m_{1,j}$, $m_{2,j}$, $c_{1,j}$, $c_{2,j}$, $k_{1,j}$ ve $k_{2,j}$ sırasıyla PAKS-1 ve PAKS-2 sistemlerine ait yer değiştirme, kütle, sönüm ve rijitliktir. Ayrıca, n ise PAKS-1 ve PAKS-2 sistemleri içindeki toplam AKS sayısıdır.

Problemin çözümü için Bölüm 1.5.2 ve 1.6.1 ile daha önceki iki problemde anlatılan işlem sırası takip edilirse

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (99)$$

matris denklemi elde edilir. (99) diferansiyel denklemi Newmark yöntemiyle sayısal olarak çözülecektir. Burada

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{c}_a \end{bmatrix} + \mathbf{\Phi}_1, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{k}_a \end{bmatrix} + \mathbf{\Phi}_2, \\ \mathbf{u} = \{q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_N \quad z_{1,1} \quad z_{1,2} \quad \cdots \quad z_{1,n} \quad z_{2,1} \quad z_{2,2} \quad \cdots \quad z_{2,n}\}^T, \quad (100) \\ \mathbf{F} = \{F_1^T \quad F_2^T \quad \cdots \quad F_N^T \quad 0 \quad \cdots \quad 0\}^T$$

şeklindedir. Bu ifadelerde daha önce tanımlanmayan matrisler (101)-(109) ifadelerinde verilmiştir.

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{C}_2 \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (106)$$

$$\mathbf{A}_2 = (c+d) \begin{bmatrix} \frac{\varphi_1\varphi_1}{M_1} & \dots & \frac{\varphi_1\varphi_N}{M_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\varphi_N\varphi_1}{M_N} & \dots & \frac{\varphi_N\varphi_N}{M_N} \end{bmatrix}, \quad c = \sum_{j=1}^n k_{1,j}, \quad d = \sum_{j=1}^n k_{2,j} \quad (107)$$

$$\mathbf{B}_2 = \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{ccc} -\frac{k_{1,1}\varphi_1}{M_1} & \dots & -\frac{k_{1,n}\varphi_1}{M_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{k_{1,1}\varphi_N}{M_N} & \dots & -\frac{k_{1,n}\varphi_N}{M_N} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{ccc} -\frac{k_{2,1}\varphi_1}{M_1} & \dots & -\frac{k_{2,n}\varphi_1}{M_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{k_{2,1}\varphi_N}{M_N} & \dots & -\frac{k_{2,n}\varphi_N}{M_N} \end{array} \right] \\ \hline \end{array} \right] \quad (108)$$

$$\mathbf{C}_2 = \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{ccc} -k_{1,1}\varphi_1 & \dots & -k_{1,1}\varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{1,1}\varphi_1 & \dots & -k_{1,1}\varphi_N \end{array} \right] & \left[\begin{array}{ccc} -k_{2,1}\varphi_1 & \dots & -k_{2,1}\varphi_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{2,1}\varphi_1 & \dots & -k_{2,1}\varphi_N \end{array} \right] \\ \hline \end{array} \right] \quad (109)$$

1.7. Newmark Yöntemi

Dinamik yükler etkisindeki bir sistem için $t + \Delta t$ anındaki hareket denklemi (Chopra, 2006)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} \quad (110)$$

şeklinde kabul edilsin. Burada \mathbf{M} , \mathbf{C} ve \mathbf{K} sırasıyla ana sisteme ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, \mathbf{U} , $\dot{\mathbf{U}}$, $\ddot{\mathbf{U}}$ ve \mathbf{F} ise yer değiştirme, hız, ivme ve kuvvet vektörlerini göstermektedir.

Newmark yönteminde $t + \Delta t$ anında hız ve yer değiştirmeler

$$\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{U}}_t + \left[(1-\gamma)\ddot{\mathbf{U}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t \quad (111)$$

$$\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{U}_t + \dot{\mathbf{U}}_t \Delta t + \left[(0,5 - \beta) \ddot{\mathbf{U}}_t + \beta \ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} \right] (\Delta t)^2 \quad (112)$$

şeklinde elde edilmektedir (Chopra, 2006). Burada \mathbf{U}_t , $\dot{\mathbf{U}}_t$ ve $\ddot{\mathbf{U}}_t$ sırasıyla t anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini, $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$, $\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}$ ve $\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}$ ise sırasıyla $t + \Delta t$ anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemlerde β ve γ integrasyon parametreleridir. Bu tez çalışmasında $\beta = 0,25$ ve $\gamma = 0,5$ olarak alınmıştır (Chopra, 2006). (111) ve (112) ifadeleri kullanılarak ana sistemde $t + \Delta t$ anında meydana gelen ivme ve hız değerleri

$$\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = a_0 (\mathbf{U}_{t+\Delta t} - \mathbf{U}_t) - a_2 \dot{\mathbf{U}}_t - a_3 \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (113)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{U}}_t + a_6 \ddot{\mathbf{U}}_t + a_7 \ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} \quad (114)$$

şeklinde elde edilir. (113) ve (114) ifadeleri (110) nolu ifadede yerine yazılırsa

$$\mathbf{K}_{\text{eff}} \mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{P}_{\text{eff}} \quad (115)$$

elde edilir. Burada

$$\mathbf{K}_{\text{eff}} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C} + \mathbf{K} \quad (116)$$

$$\mathbf{P}_{\text{eff}} = \mathbf{P}_{t+\Delta t} + \mathbf{M} (a_0 \mathbf{U}_t + a_2 \dot{\mathbf{U}}_t + a_3 \ddot{\mathbf{U}}_t) + \mathbf{C} (a_1 \mathbf{U}_t + a_4 \dot{\mathbf{U}}_t + a_5 \ddot{\mathbf{U}}_t) \quad (117)$$

olarak tanımlıdır. Bu ifadelerde

$$a_0 = \frac{1}{\beta \Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{\gamma}{\beta \Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{\beta \Delta t}, \quad a_3 = \frac{1}{2\beta} - 1, \quad (118)$$

$$a_4 = \frac{\gamma}{\beta} - 1, \quad a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\gamma}{\beta} - 2 \right), \quad a_6 = \Delta t (1 - \gamma), \quad a_7 = \gamma \Delta t$$

şeklinde verilmektedir. $t + \Delta t$ anında meydana gelen yer değiştirmeler (115) nolu ifade yardımıyla

$$\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{K}_{\text{eff}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{eff}} \quad (119)$$

şeklinde elde edilir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu bölümde, yüksek hızlı tren (YHT) geçişleri altındaki demiryolu köprülerinin rezonans titreşimlerinin azaltılmasında paralel bağlı (PAKS) ve seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin (SAKS) kullanılması ile ilgili analitik çözümler ve elde edilen bulgular sunulmuştur. Yüksek hızlı demiryolu köprülerinde titreşimlerin azaltılmasında SAKS sisteminin kullanılması ilk kez bu çalışmada ele alınmıştır. PAKS ve SAKS sistemleri için tanımlanmış optimizasyon problemi, Sıralı Kuadratik Programlama (SKP) algoritması kullanılarak MATLAB programında *fmincon* araç kutusu yardımıyla çözülmüştür. Uygulama olarak tek açıklıklı köprü modeli (YHTK1) kullanılmış, PAKS ve SAKS sistemleri için sayısal çözümler elde edilmiştir. Ayrıca, PAKS sisteminin optimum değerlerini elde etmek üzere yeni bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde, Den Hartog (1956) tarafından tek serbestlik dereceli sistemler için verilen (27) nolu ifadeler çok serbestlik dereceli sistemlere genişletilmektedir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği, tek açıklıklı (YHTK1) ve iki açıklıklı (YHTK2) köprü modelleri üzerinde gösterilmiştir.

2.2. YHT Etkisindeki Köprülerin Dinamik Davranışı

Burada, Kısım 1.5.1 ve 1.6.1’de verilen analitik çözümler kullanılarak yüksek hızlı tren etkisindeki köprülerde, açıklık uzunluğunun tren aks aralığına oranı (L/d) ve hızdaki (v) değişimin dinamik davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için köprünün kritik kesitlerinde yer değiştirme, moment ve kesme kuvveti için elde edilen etki faktörü (*impact factor*) değerleri ile açıklık orta noktasındaki maksimum ivme değerleri kullanılmıştır. Hareketli yük için Eurostar YHT kullanılmıştır. Bu trenin fiziki özellikleri Şekil 18’de şematik olarak verilmiştir. Trenin her bir aksından köprüye uygulanan kuvvet 170kN dur.

Etki faktörü matematik olarak

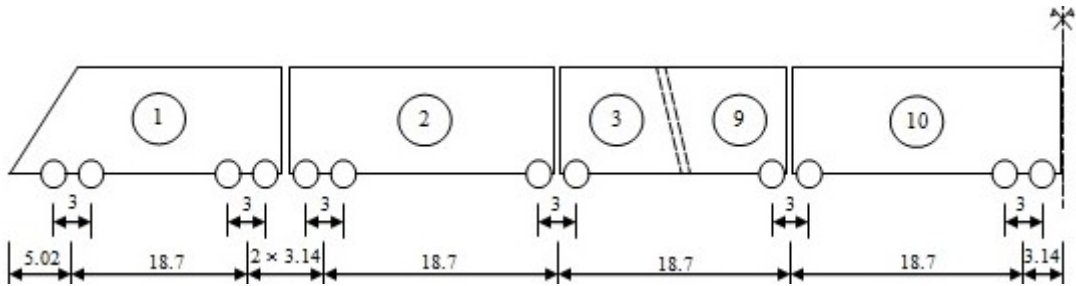
$$I = \frac{R_D - R_S}{R_S} \quad (120)$$

şeklinde tanımlıdır (Yang vd., 2004). Burada, R_D ve R_S sırasıyla köprüde meydana gelen maksimum dinamik yer ve statik tepkilerdir. Yer değiştirme, moment ve kesme kuvveti için dinamik etki faktörleri sırasıyla I_D , I_M ve I_V sembolleri ile gösterilmektedir.

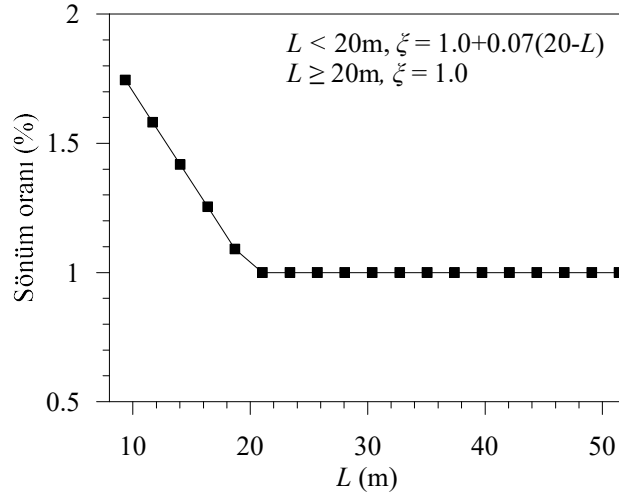
YHT etkisindeki köprüler göz önüne alındığında kısa ve orta açıklıklı köprülerde açıklık uzunluğu 10m ila 50m arasında değişmektedir (Museros ve Alorcón, 2005). Bu nedenle, köprü açıklığının tren aks aralığına oranı (L/d), 0,5 ila 2,75 arasında seçilmiştir. Dinamik analizlerde bu oran üzerinde 0,125 lik artım yapılarak 19 farklı açıklığa sahip köprü dikkate alınmıştır. Ele alınan ön gerilmeli betonarme köprülerin doğal açısal frekansı $\omega_1 = 900/L$ (rad/sn), birim uzunluğunun kütlesi de $m_b = 30 + 0,2L$ (t/m) bağıntıları yardımıyla pratik olarak elde edilmiştir (Yang vd., 1997). Bu değerler kullanılarak köprü sönüm oranları Eurocode'da (2002) verilen kriterlerle belirlenmiştir (Şekil 19). Şekil 20'de seçilen köprülerin temel doğal frekanslarının L 'ye bağlı değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere, dinamik analizler için seçilen bütün köprülerde doğal frekanslar, Eurocode'da (2002) belirlenen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Hareketli yük katarı etkisindeki köprülerde iki türlü rezonans söz konusudur. Birincisi, köprü doğal frekansı ile trenin frekansının çakışmasından kaynaklanan klasik rezonans durumudur. Bunu meydana getirecek hız değerleri genelde güncel tren işletme hızlarına göre çok büyük olup ulaşılması zordur. İkincisi ise, iki aks arasını kat etmek için geçen sürenin köprünün titreşim periyodunun tam katlarına eşit olması durumunda ortaya çıkar. Bu ise tekrarlı yük altındaki sistemlerde daha küçük hızlarda da rezonansın ortaya çıkabileceği anlamına gelmektedir. Bu duruma ait rezonans hızları aşağıdaki bağıntıyla elde edilmektedir (Frýba, 2001).

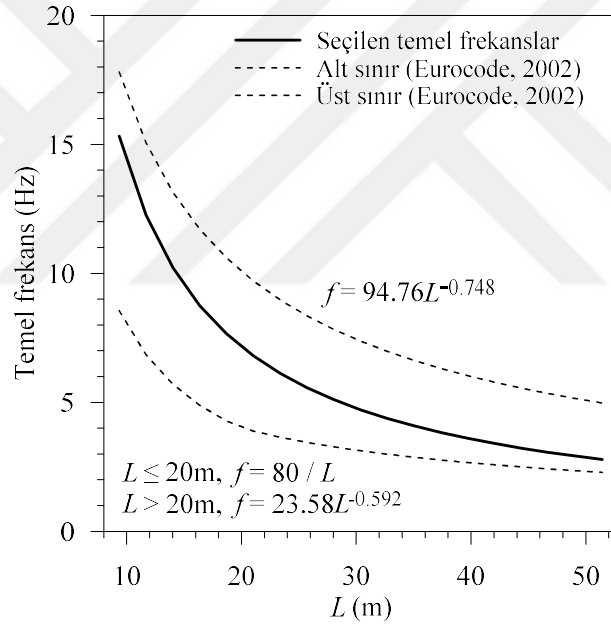
$$v_{i,j} = \frac{\omega_i d}{2\pi j}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (121)$$



Şekil 18. Eurostar treninin fiziki özellikleri (uzunluklar: m)



Şekil 19. Sönüm oranının köprü açıklığıyla değişimi



Şekil 20. Temel frekansın köprü açıklığı ile değişimi

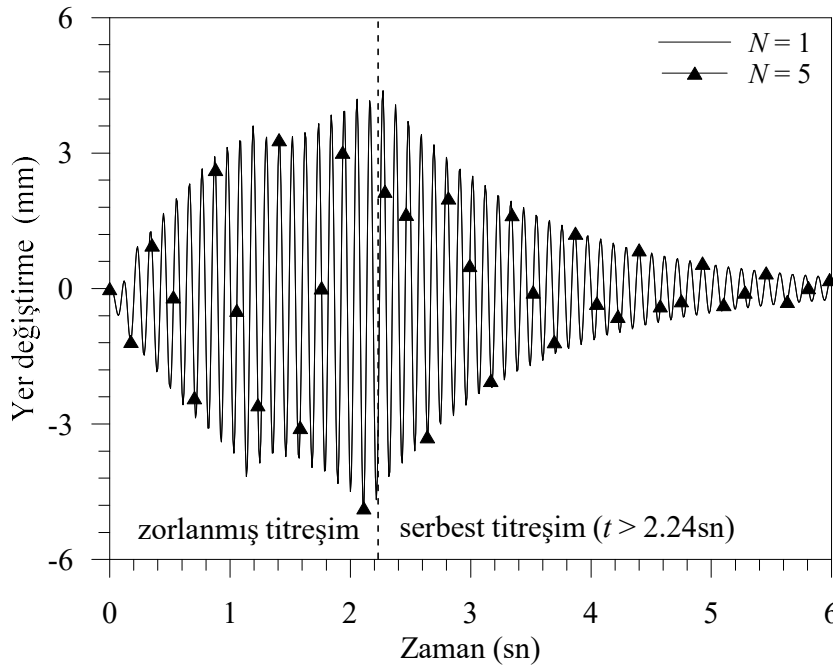
Burada ω_i i . moda karşılık gelen doğal açılmalık frekansı, d aks aralığını $v_{i,j}$ i . moda karşılık gelen j . rezonans hızını göstermektedir. Görüleceği üzere tekrarlı yüklerde yükler arası mesafe önem kazanmaktadır. Tek ve iki açıklıklı köprüler için boyutsuz hız değeri aşağıdaki ifadeyle elde edilmektedir.

$$S_{i,j} = \frac{v}{v_{1,j}} = \frac{2\pi j v}{\omega_1 d}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (122)$$

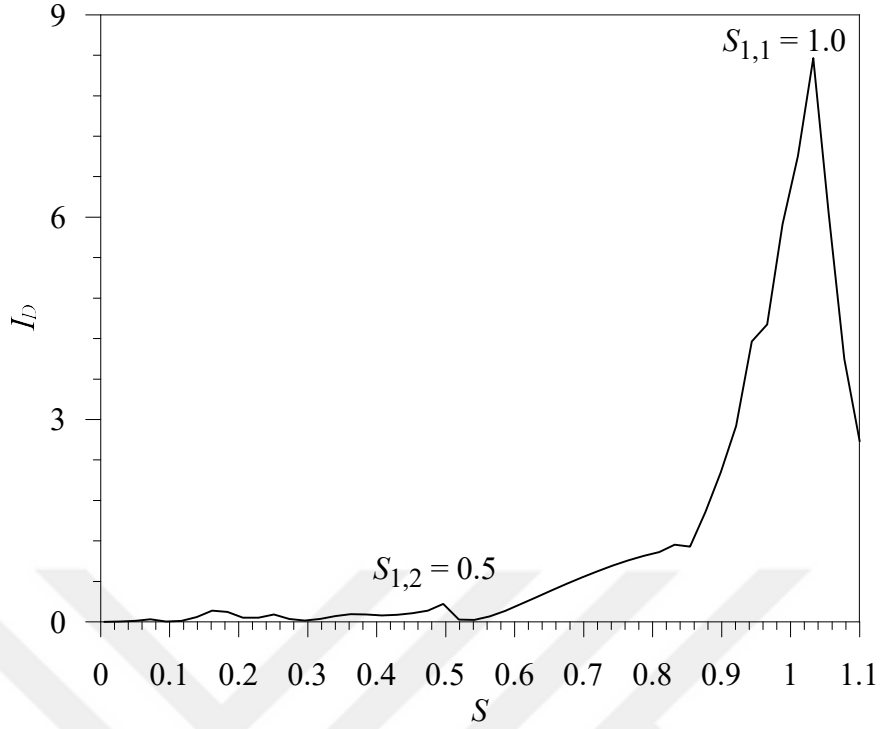
2.2.1. Tek Açıklıklı Köprülere Ait Bulgular

(57) ifadesi Newmark metoduyla sayısal olarak çözülmüş ve çeşitli hız değerleri ve L/d oranları için etki faktörü (I) ve maksimum ivme değerlerinin değişimi incelenmiştir. Etki faktörleri, yer değiştirme ve moment için açıklık ortasında, kesme kuvveti için sol ve sağ mesnette, maksimum ivme değerleri ise açıklık ortasında hesaplanmıştır.

Şekil 21’de trenin rezonans hızıyla ($v_{1,1}$) hareket etmesi durumunda, köprü açıklık orta noktasında farklı modlar için elde edilen yer değiştirmelerin zamanla değişimi verilmiştir. Görüleceği üzere, yer değiştirmeler trenin geçi sırasında sürekli artmaktadır. Bu durum, köprüyü terk eden her bir yükün ardından sistemde meydana gelen serbest titreşim bitmeden diğer yükün sisteme girmesi sebebiyle olmaktadır. Şekil 21’de, ayrıca birinci mod için elde edilen yer değiştirme eğrisinin ilk beş mod için elde edilen yer değiştirme eğrisiyle büyük oranda benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu durum, tek açıklıklı köprülerin dinamik davranışı üzerinde birinci modun çok etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 22’de $L/d = 0,8$ durumunda açıklık ortasındaki yer değiştirme için elde edilen etki faktörünün boyutsuz hıza bağlı değişimi verilmiştir. Görüleceği üzere yer değiştirmeler en çok $S_{1,1} = 1$ halinde büyümektedir. Eğri üzerindeki pik noktaları rezonans hızlarına karşılık gelen etki faktörlerini göstermektedir.

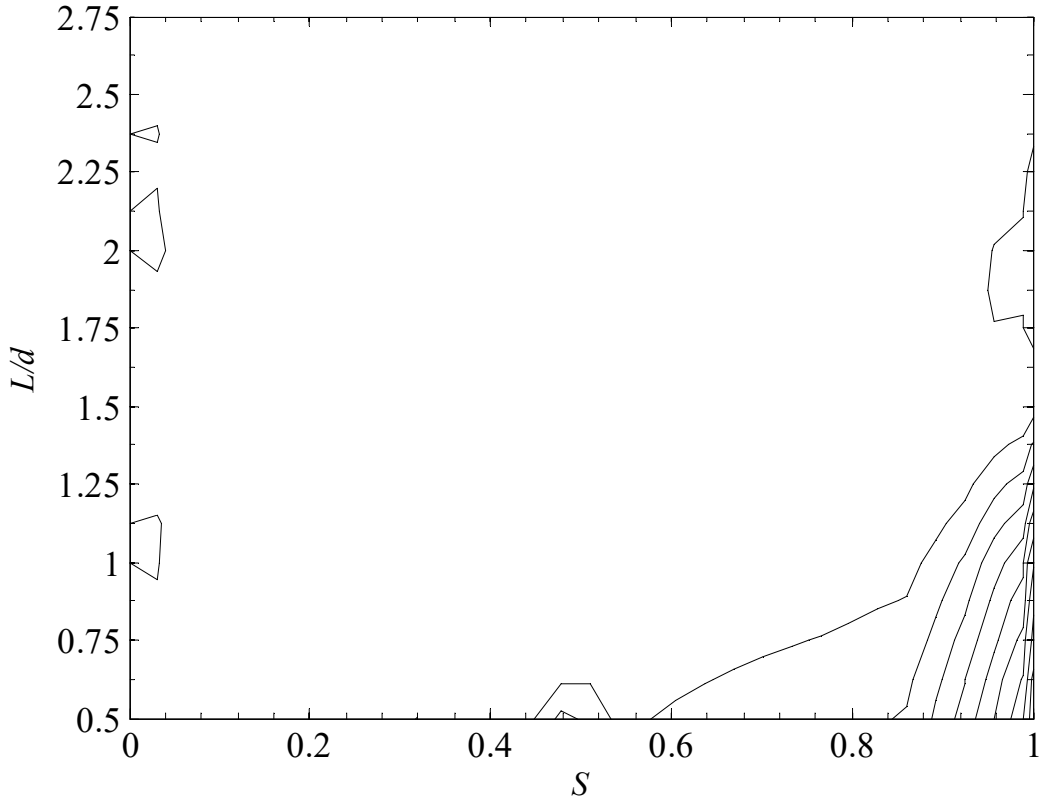
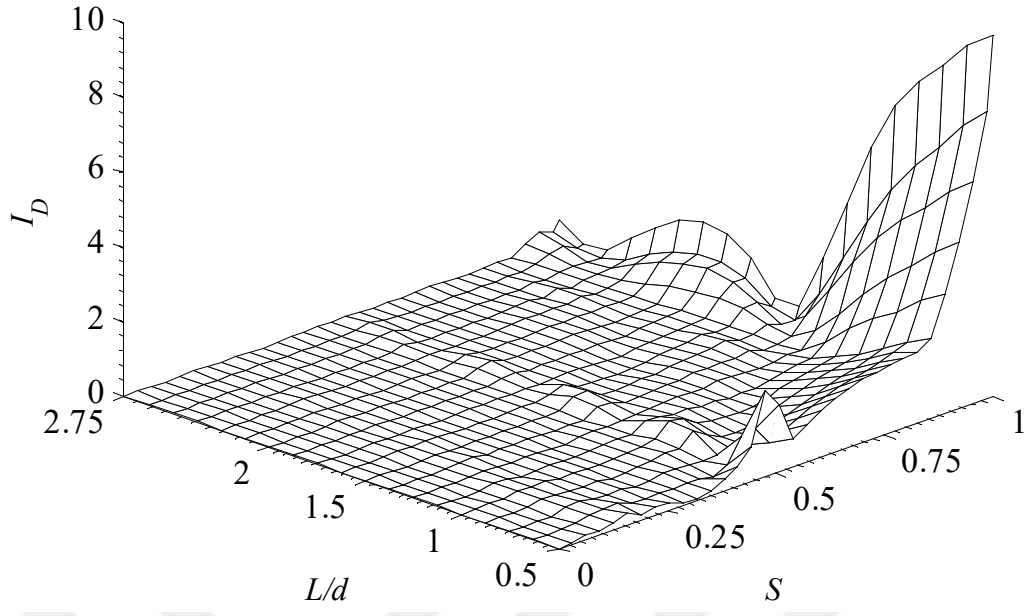


Şekil 21. Yer değiştirme-zaman eğrisi ($v_{1,1} = 644,58\text{km/sa}$, $L/d = 0,8$)

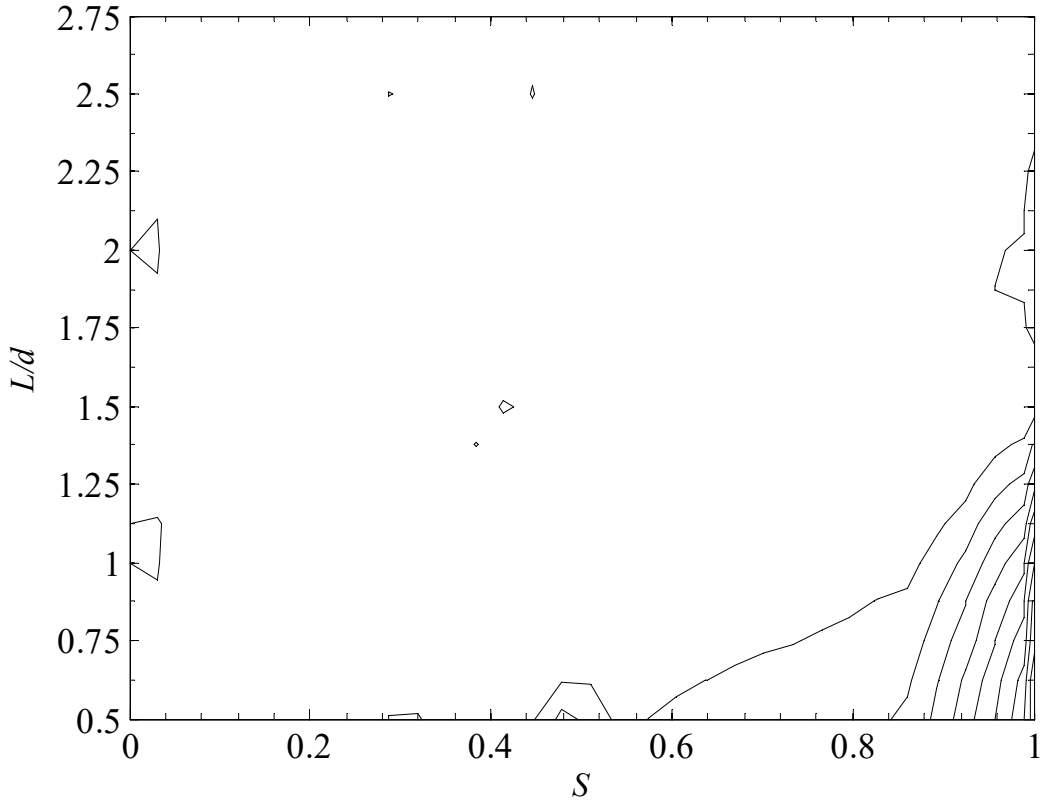
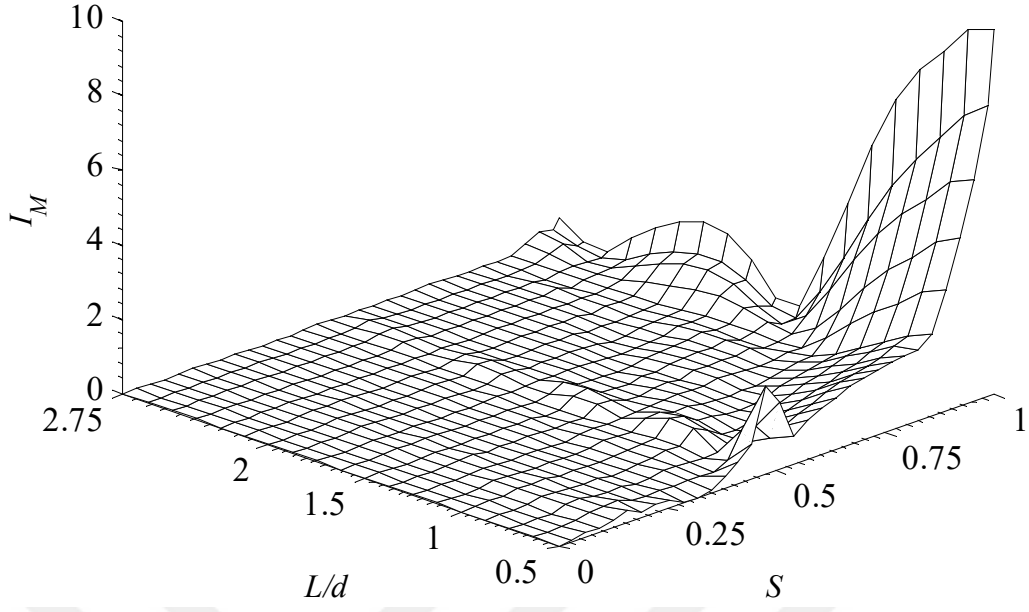


Şekil 22. Yer değiştirme için etki faktörünün boyutsuz hız ile değişimi

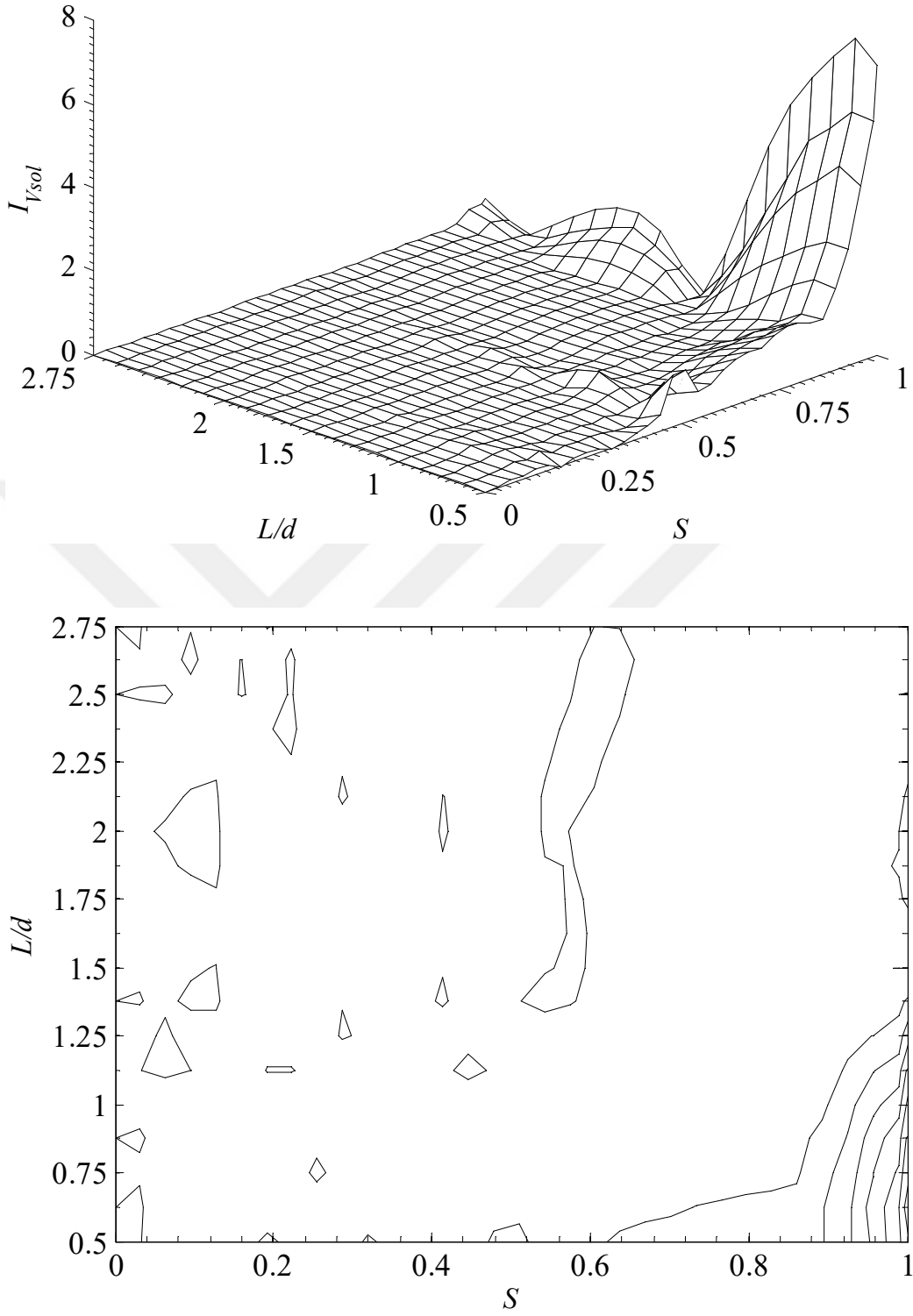
Şekil 23-27'de, S ve L/d ye bağlı olarak yer değiştirme, moment ve kesme kuvveti için etki faktörlerinin ve açıklık ortasında maksimum ivmenin değişimi üç boyutlu grafiklerle verilmiştir. Bu grafiklerin $S - L/d$ düzlemindeki projeksiyonları da şeklin altında ayrıca görölmektedir. Görüleceği üzere, $S > 0,5$ ve $0,5 < L/d < 1,5$ için maksimum yer değiştirme, moment ve kesme kuvvetleri için etki faktörleri büyük değerler almaktadır. Belirtilen bu aralıklarda, S artıp L/d azalırken etki faktörleri artmaktadır. Tek açıklıklı köprülerde birinci modun birinci rezonans hızında en büyük dinamik tepkiler ortaya çıkmaktadır. Benzer yorumlar maksimum ivme değerleri için de söz konusudur. Bu nedenle, tek açıklıklı köprülerin tasarımında ilk moda karşılık gelen 1. rezonans hızının ($S = 1$) dikkate alınması son derece önemlidir. Şekillerden ayrıca $L/d = 1,5$ ve $2,5$ durumlarında dinamik tepkilerin en küçük değerlerini aldıkları görölmektedir. Bu durum Şekil 28'de daha net görölmektedir. Dolayısıyla, köprü veya trenlerin tasarımında mümkünse bu hususun dikkate alınması titreşimlerin kontrol altına alınması açısından önemli olabilir.



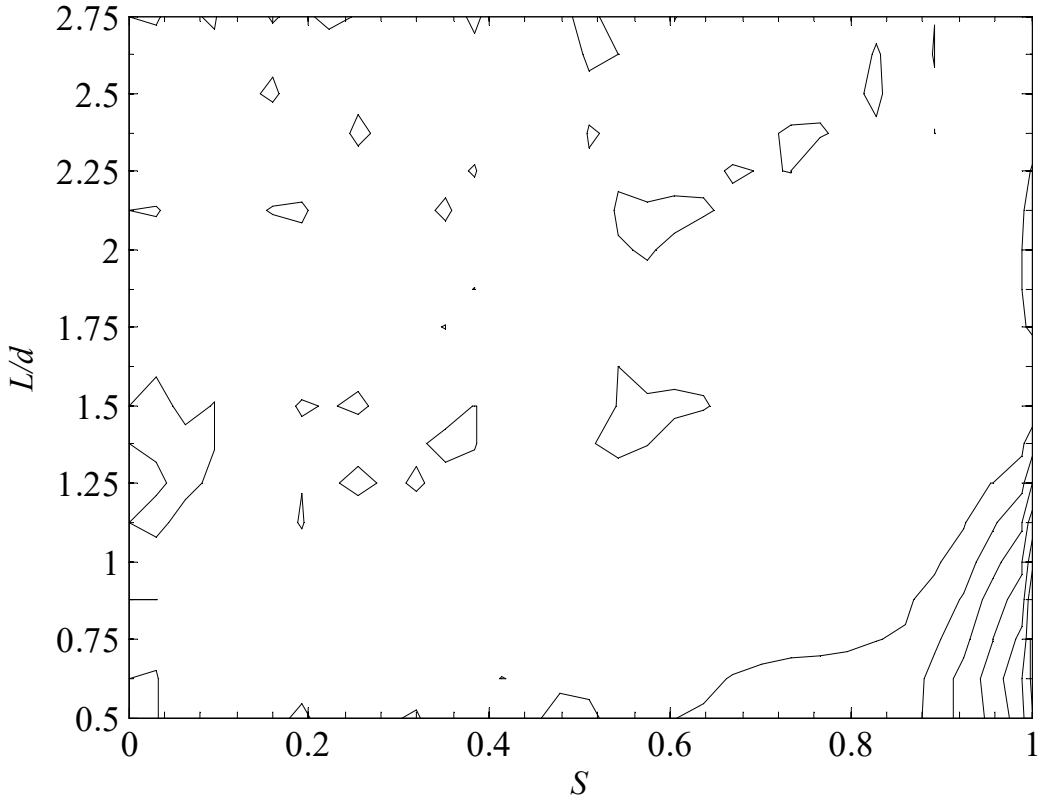
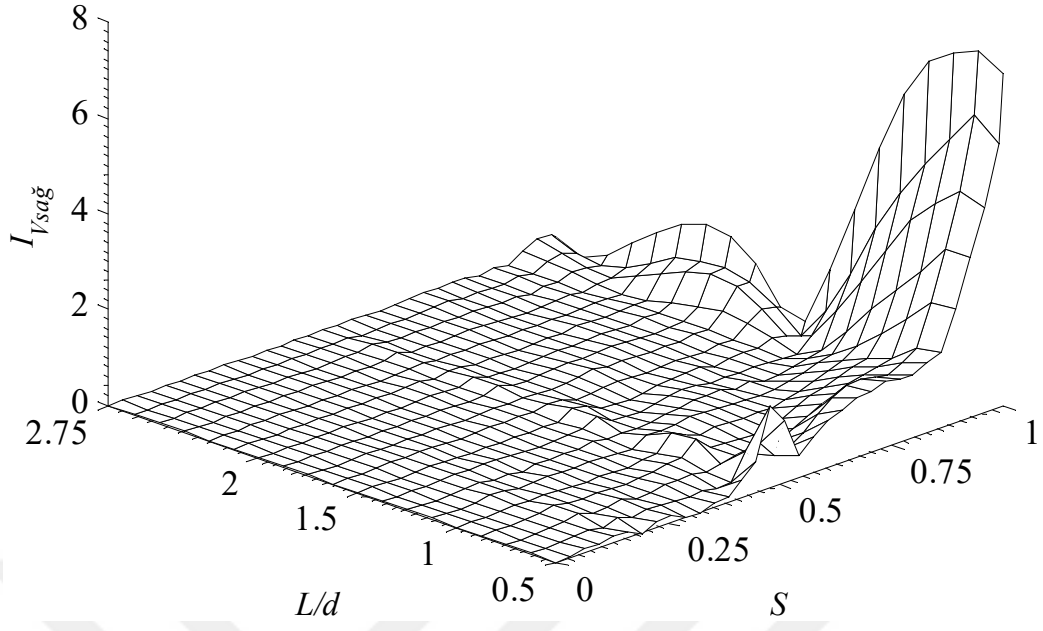
Şekil 23. Köprü açıklık ortasındaki yer değiştirme için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



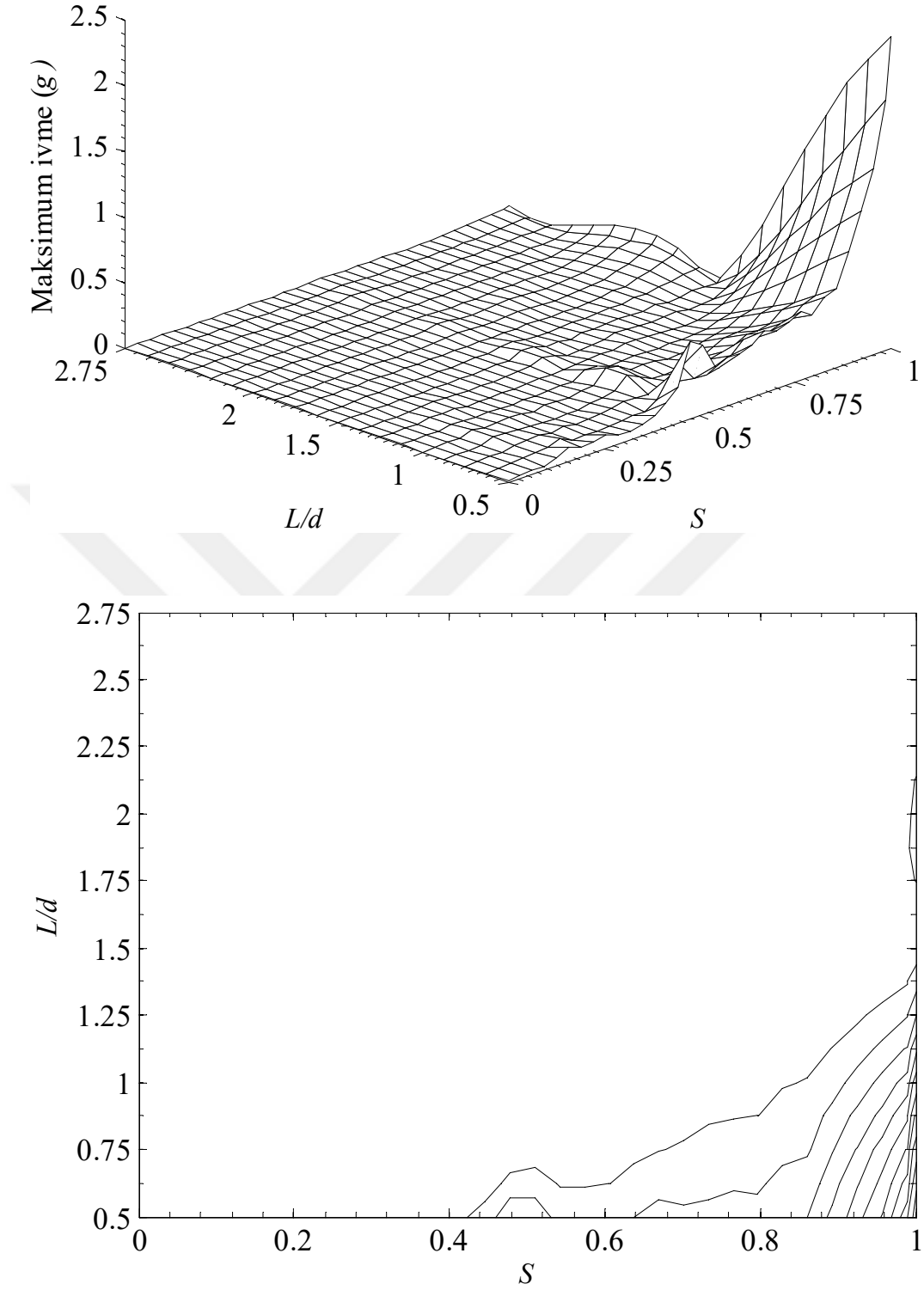
Şekil 24. Köprü açıklık ortasındaki moment için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



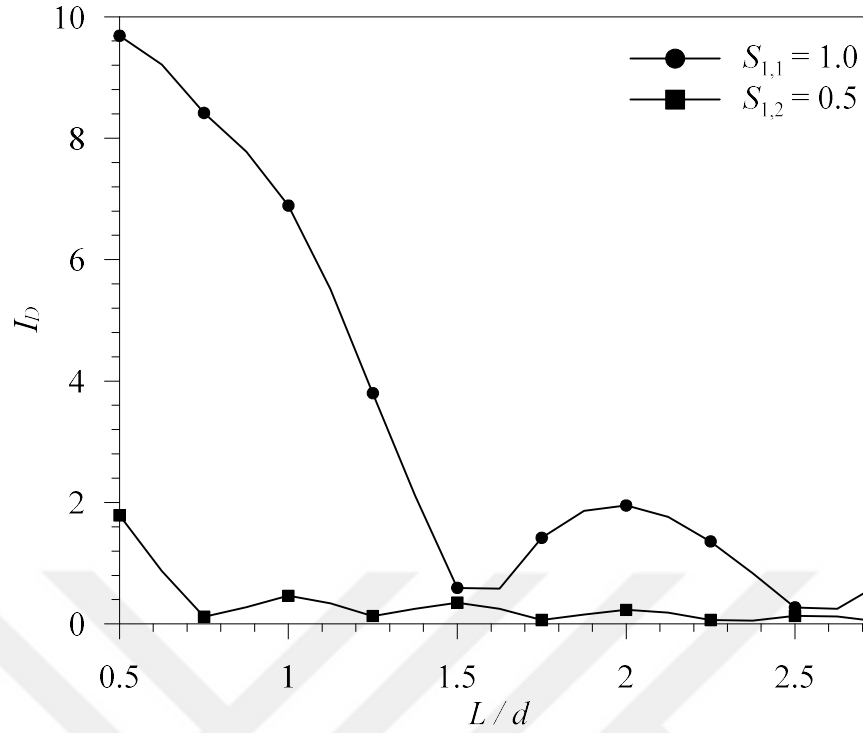
Şekil 25. Köprünün sol mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



Şekil 26. Köprünün sağ mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



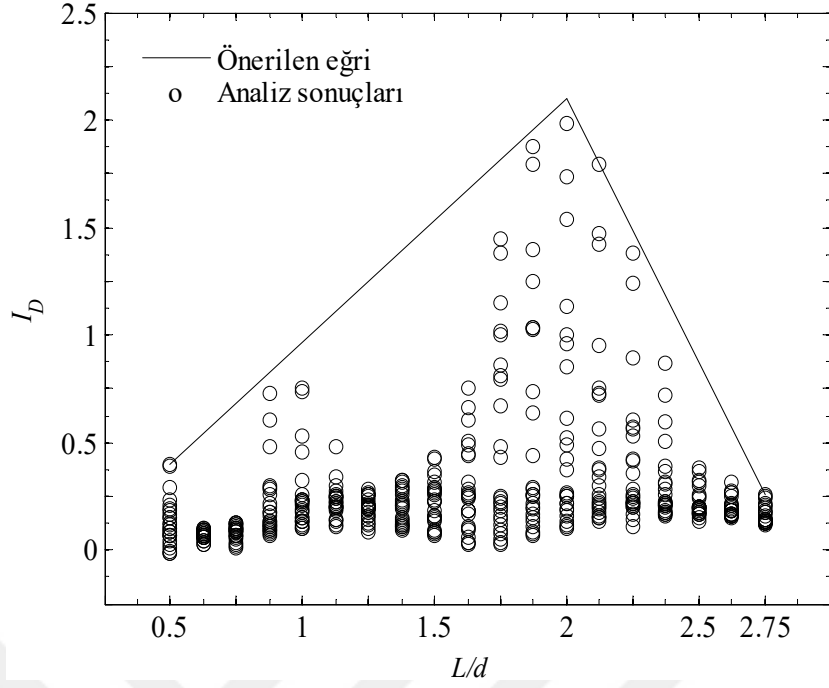
Şekil 27. Köprü açıklık ortasında elde edilen maksimum ivmenin L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



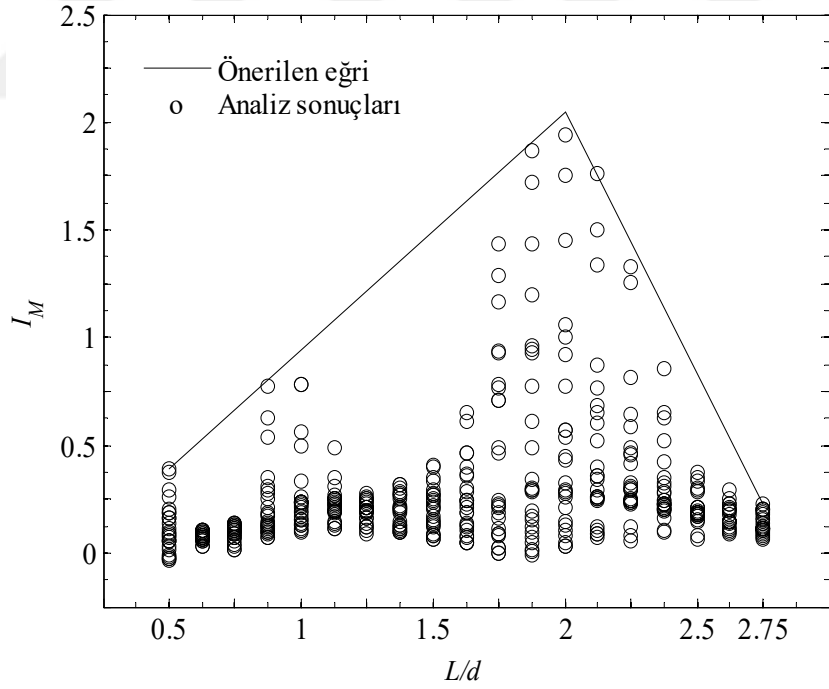
Şekil 28. Yer değiştirme için etki faktörünün L / d ile değişimi

Tablo 1. Farklı ülkelerde kullanılan yüksek hız trenlerine ait hız sınırları (km/sa) (URL-2)

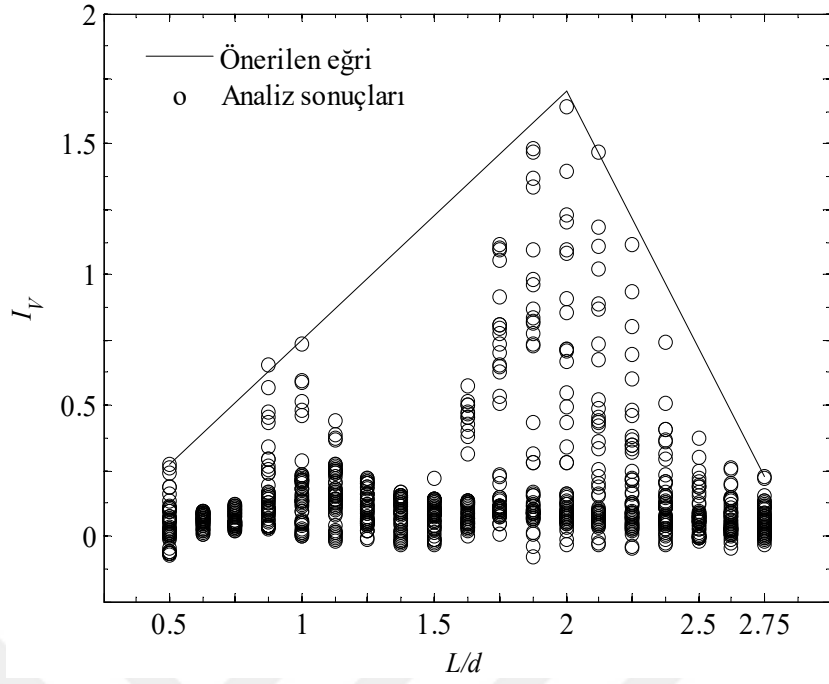
Ülke	YHT	İşletme hızı	Tasarım hızı
Almanya	ICE-1	280	280
Almanya	ICE-3	320	330
Amerika	BR Class 91	200	225
Amerika	BR Class 395	225	225
Çin	CRH2C	300	350
Çin	CRH380B	300	380
Fransa	Eurostar e320	320	320
Fransa	TGV Duplex	320	320
İspanya	AVE Class 102	300	350
İspanya	AVE Class 103	310	350
İtalya	AGV 575	300	360
İtalya	ETR 500	300	300
Japonya	500 Series Shinkansen	300	320
Japonya	N700 Series Shinkansen	300	330
Kore	KTX-I	305	330
Kore	KTX-III	305	370
Norveç	NSB Class 73	210	210
Portekiz	Alfa Pendular	220	220
Türkiye	TCDD HT65000	250	250
Türkiye	TCDD HT80000	250	300



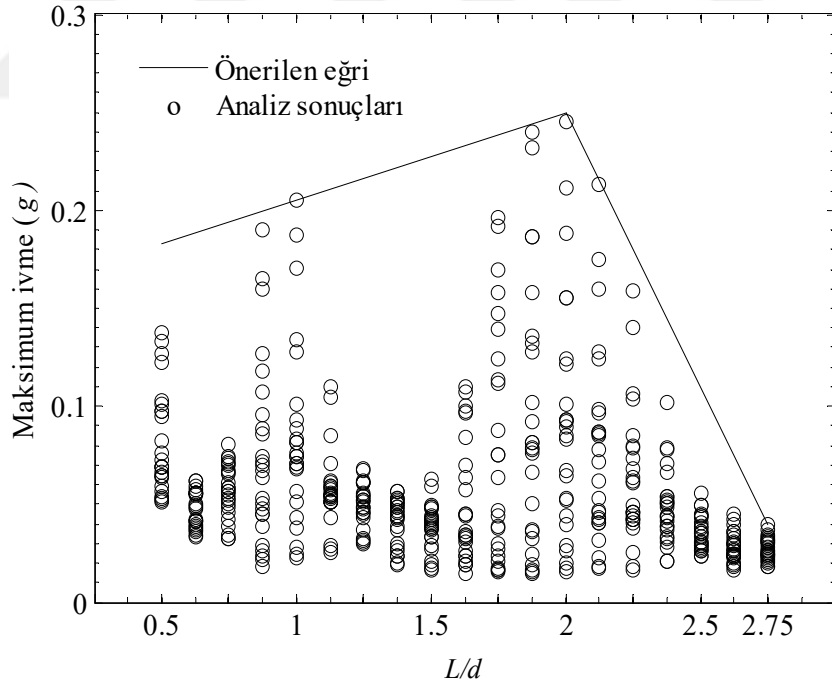
Şekil 29. Maksimum yer değiştirme için etki faktörünün L / d ile değişimi



Şekil 30. Maksimum moment için etki faktörünün L / d ile değişimi



Şekil 31. Maksimum kesme kuvveti için etki faktörünün L/d ile değişimi



Şekil 32. Maksimum ivmenin L/d ile değişimi

Tablo 2. Tek açıklıklı köprüler için önerilen eğrilere ait fonksiyonlar

Etki faktörü, I	Önerilen eğrinin fonksiyonu	
	$L / d \leq 2,0$	$L / d > 2,0$
Yer değiştirme (I_D)	$1,1365 (L / d) - 0,1729$	$-2,4597 (L / d) + 7,0195$
Moment (I_M)	$1,1061 (L / d) - 0,1623$	$-2,4329 (L / d) + 6,9159$
Kesme kuvveti (I_V)	$0,9491 (L / d) - 0,1981$	$-1,9615 (L / d) + 5,6229$
İvme (a)	$0,0446 (L / d) + 0,1608$	$-0,2807 (L / d) + 0,8114$

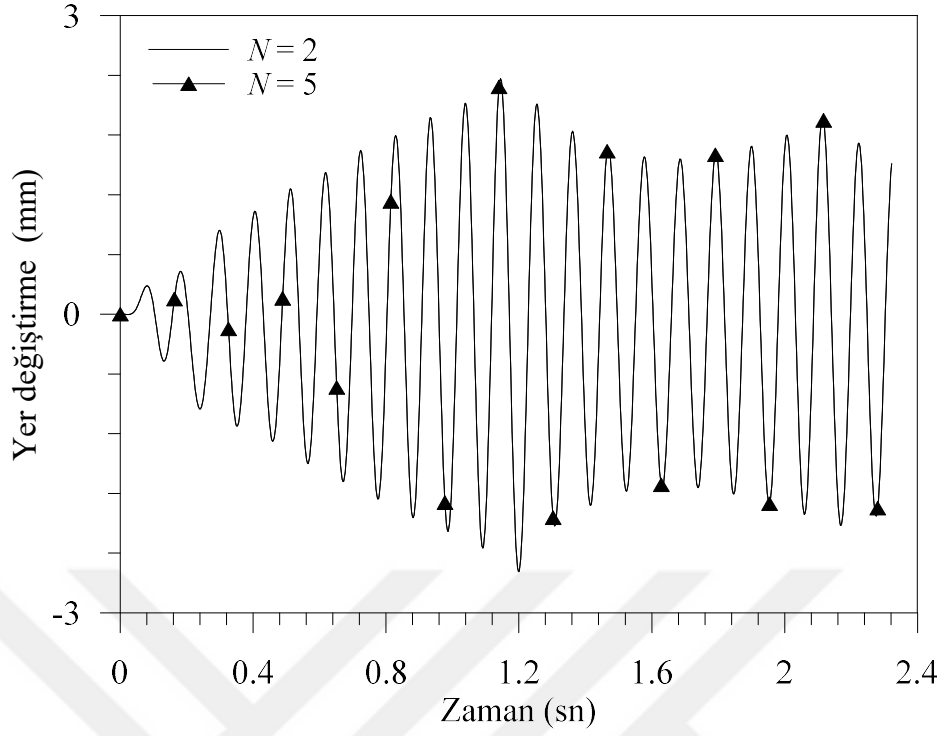
Tablo 1’de, dünyanın değişik ülkelerinde kullanımda olan yüksek hız trenlerinin işletme ve tasarım hızları verilmiştir. Görüleceği üzere, mevcut trenler için minimum işletme hızı 200 km/sa, maksimum işletme hızı ise 320 km/sa tır. Bu sebeple, dinamik analizlerde tren hızları 200 ila 320 km/sa arasında kalacak şekilde seçilmiştir.

Şekil 29-32’de sırasıyla yer değiştirme, moment ve kesme kuvveti için etki faktörlerinin ve açıklık orta noktasındaki maksimum ivmenin L / d ile değişimi verilmiştir. Dinamik analizlerde, 200 ila 320 km/sa arasında 5 km/sa artımlarla 25 farklı tren hızı dikkate alınmıştır. Dikkate alınan hız değerlerine karşılık elde edilen etki faktörleri ve maksimum ivmeler için geçirilen zarf eğrilerinin açık ifadeleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu eğriler, sadece L / d değişkeninin fonksiyonu olup pratikteki uygulamalar için güvenli tarafta kalan sonuçlar vermektedirler.

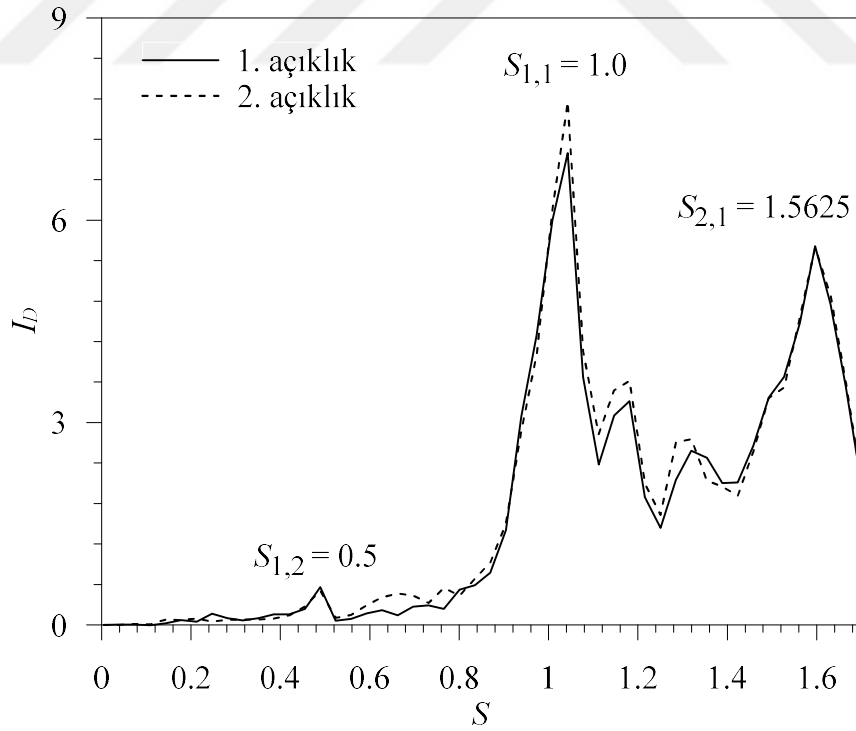
2.2.2. İki Açıklıklı Köprülere Ait Bulgular

(95) ifadesi Newmark metoduyla sayısal olarak çözülmüş ve çeşitli hız değerleri ve L / d oranlarına bağlı olarak etki faktörlerinin (I) ve maksimum ivme değerlerinin değişimi incelenmiştir. Dinamik etki faktörleri yer değiştirme ve moment için her bir açıklığın ortasında, kesme kuvveti için açıklıkların solundaki ve sağındaki mesnetlerde hesaplanmıştır. Maksimum ivme değerlerinin değişimi ise her bir açıklığın ortasında incelenmiştir.

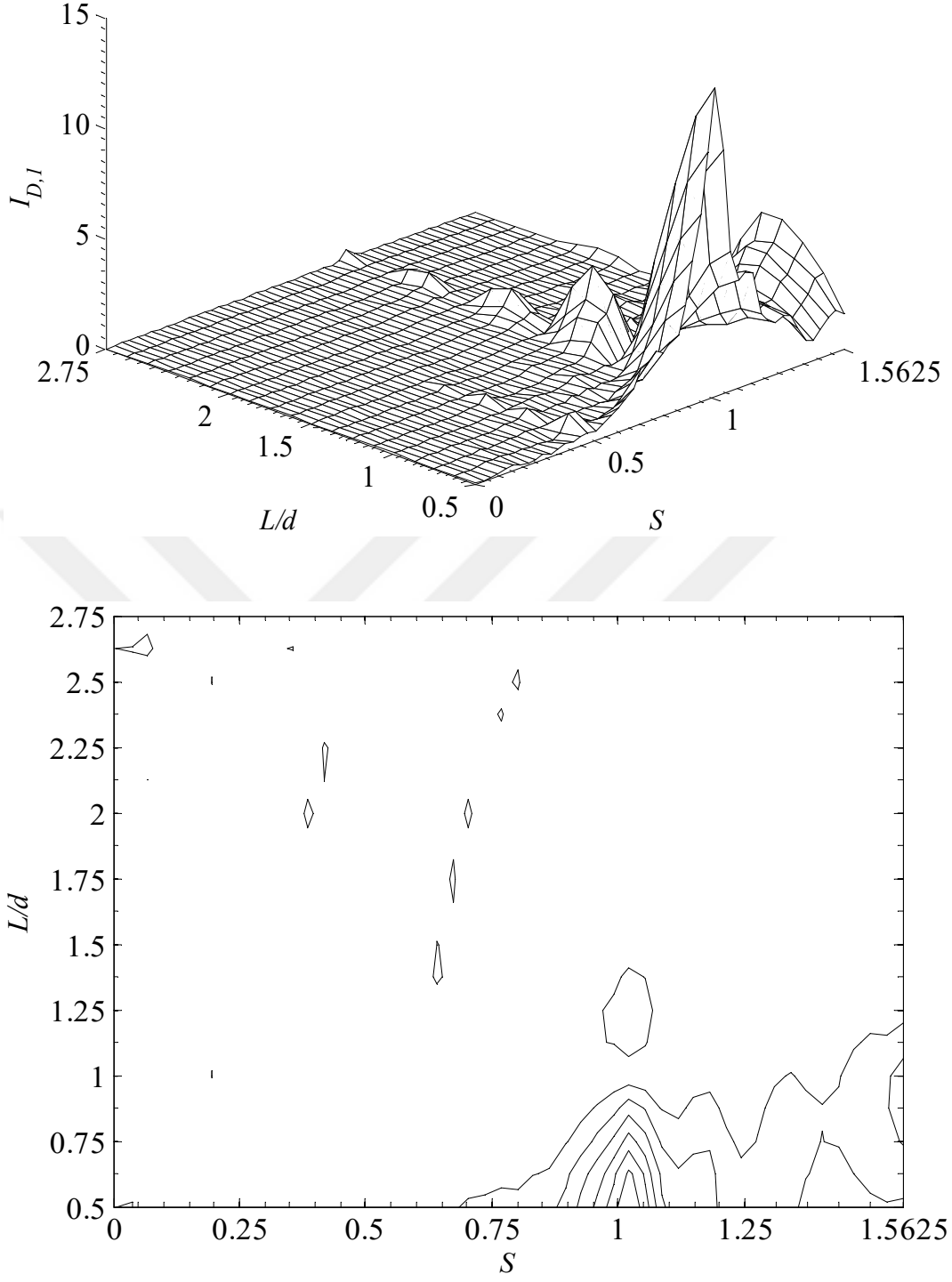
Şekil 33’de trenin rezonans hızıyla ($v_{1,1}$) hareket etmesi durumunda, 2. açıklığın orta noktasında farklı modlar için elde edilen yer değiştirmelerin zamanla değişimi verilmiştir. Görüleceği üzere, ilk iki mod için elde edilen yer değiştirme eğrisinin ilk beş mod için elde edilen yer değiştirme eğrisiyle büyük oranda benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu durum, iki açıklıklı köprülerin dinamik davranışı üzerinde ilk iki modun çok etkili olduğunu göstermektedir.



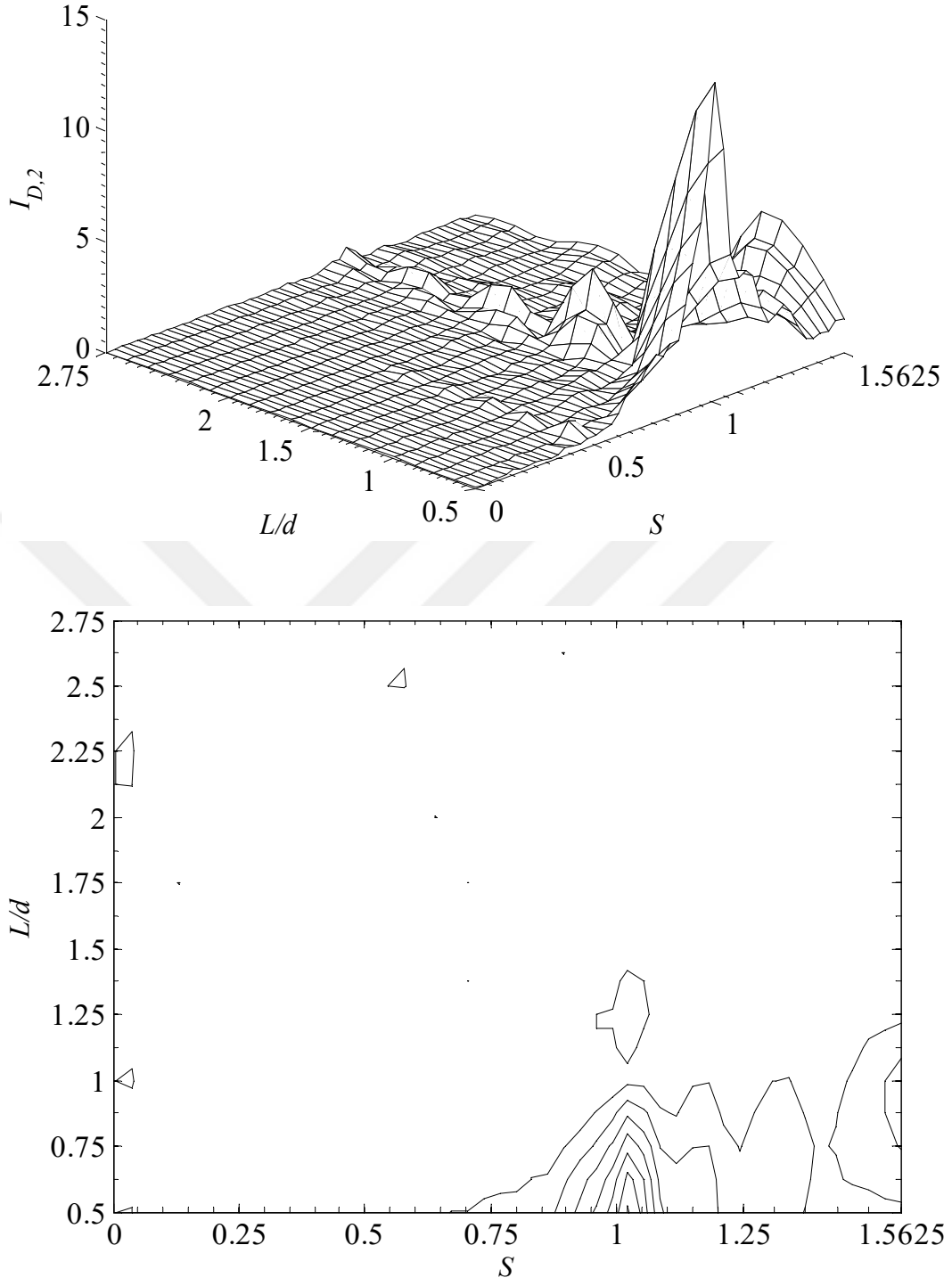
Şekil 33. Yer değiştirme-zaman eğrisi ($v_{1,1} = 644,58 \text{ km/sa}$, $L/d = 0,8$)



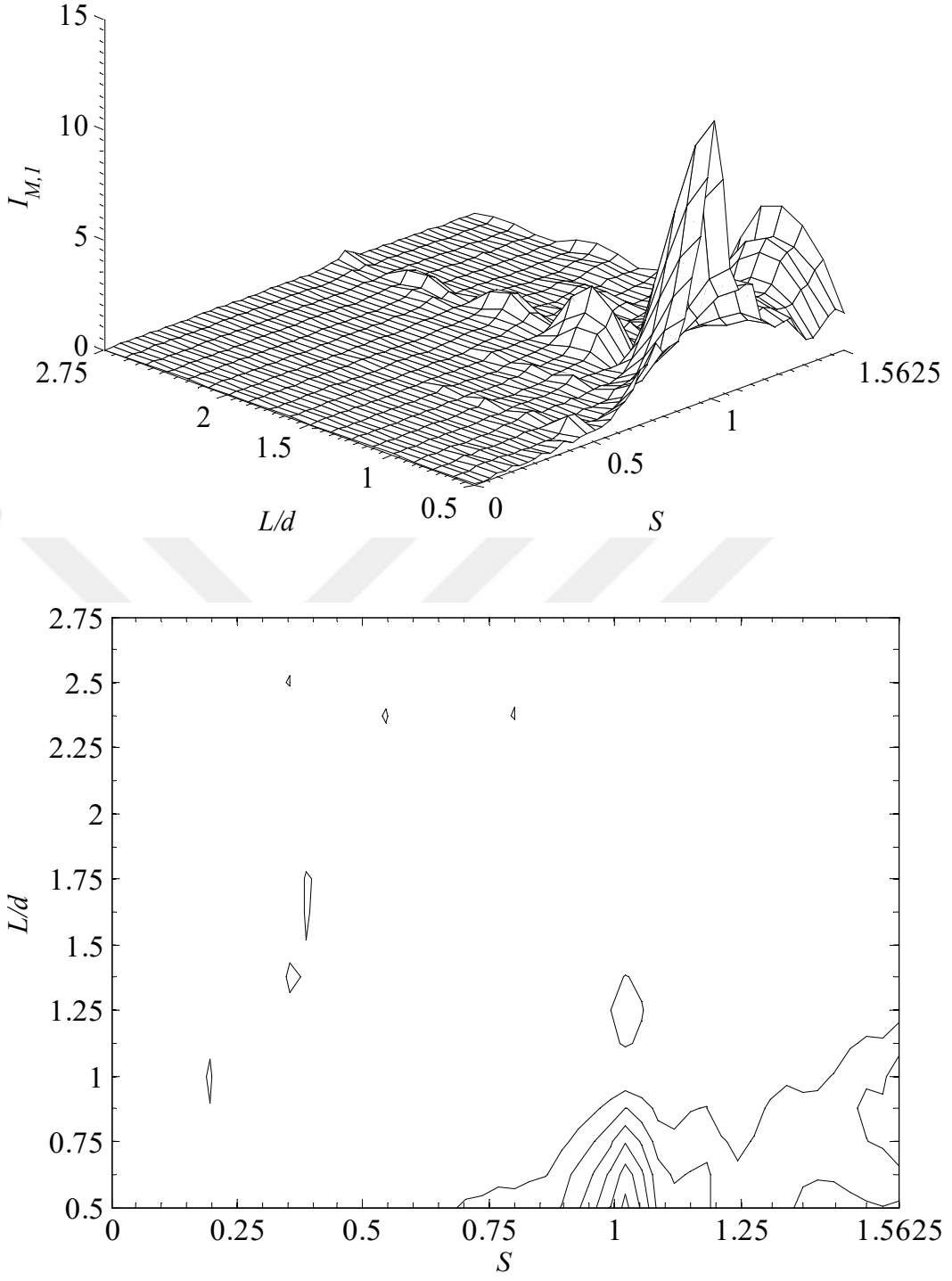
Şekil 34. Açıklık ortasındaki yer değiştirmeler için etki faktörünün boyutsuz hız ile değişimini ($L/d = 0,8$)



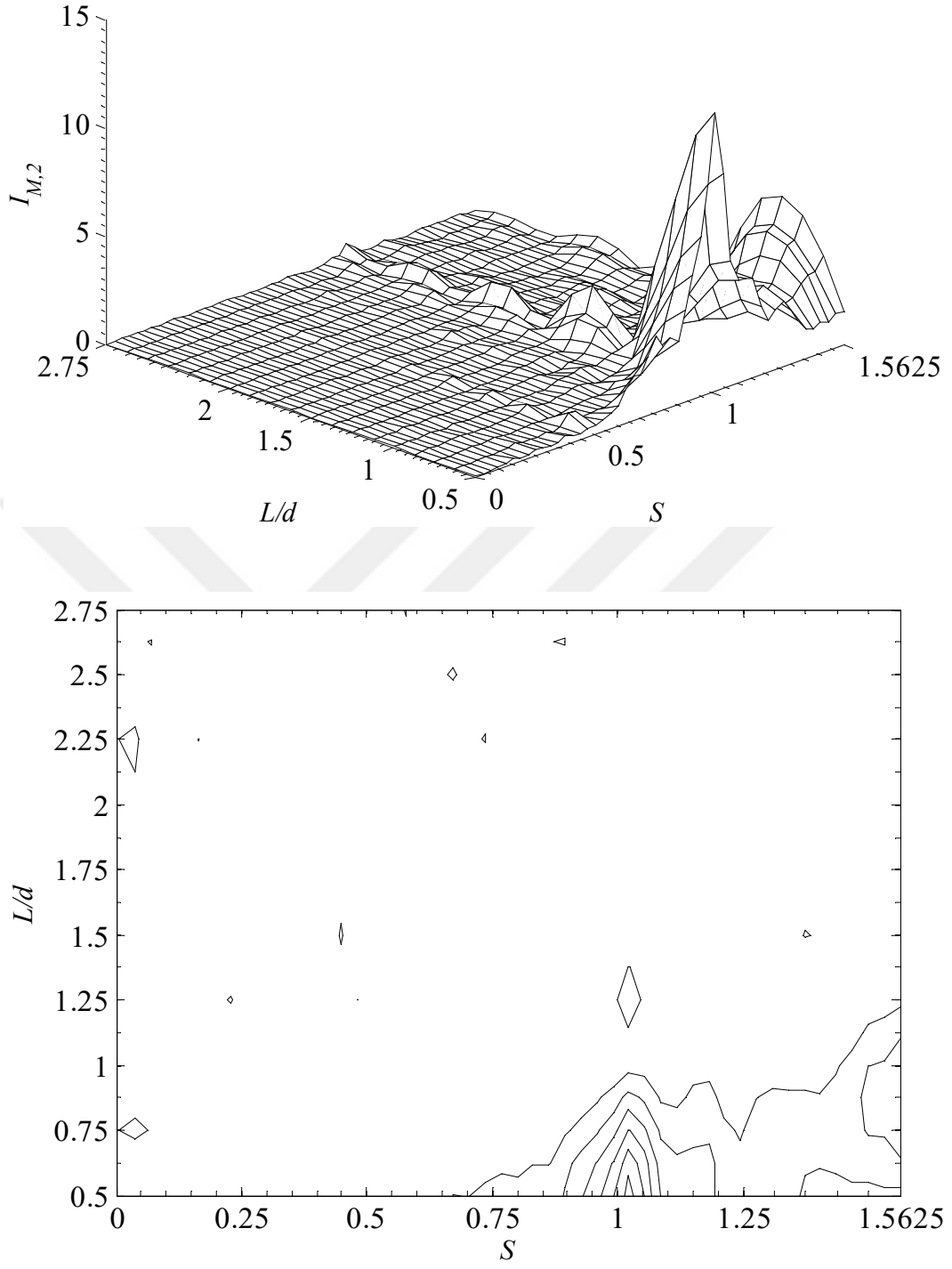
Şekil 35. 1. açıklığın ortasındaki yer değiştirmeler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



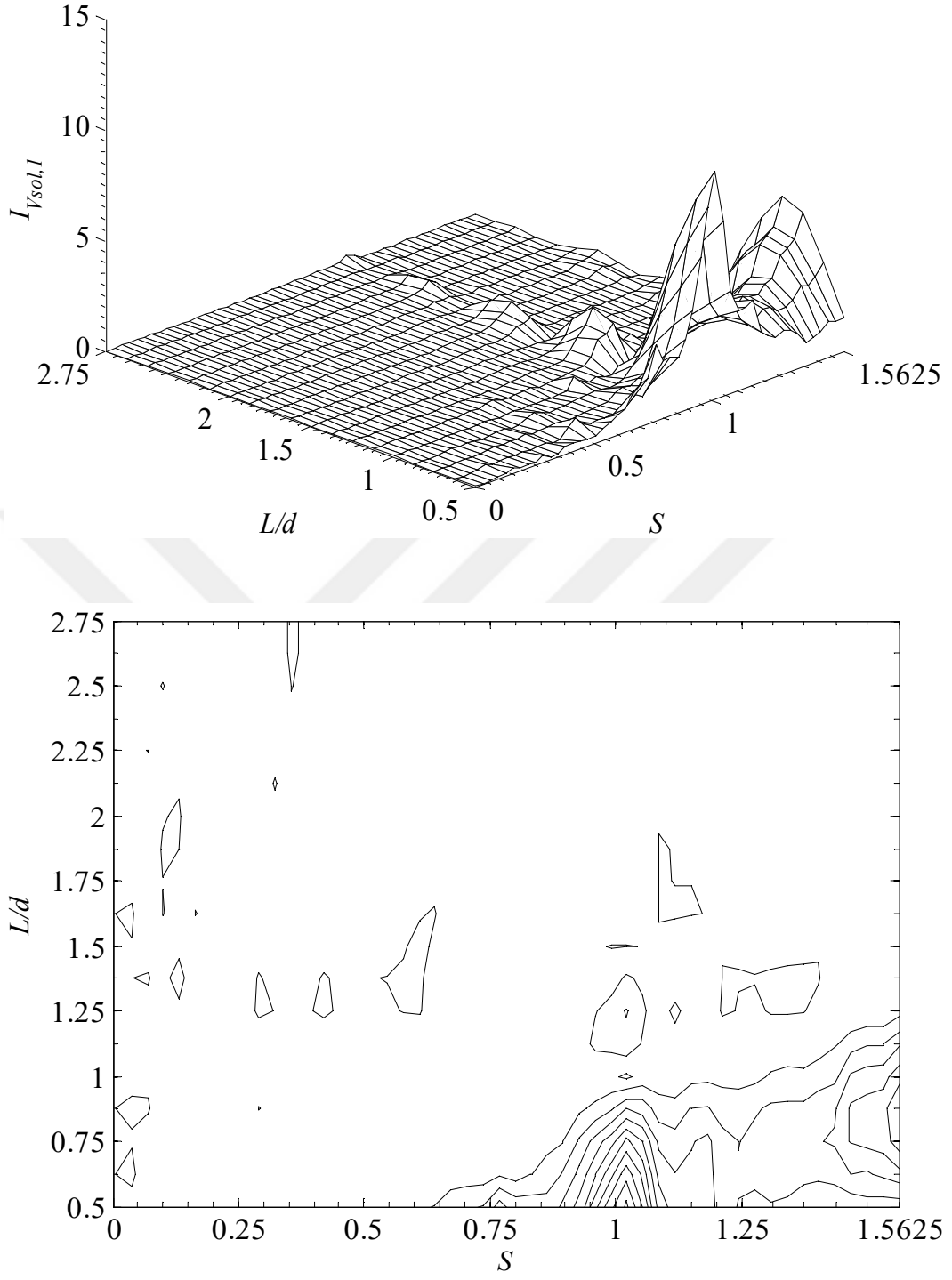
Şekil 36. 2. açıklığın ortasındaki yer değiştirmeler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



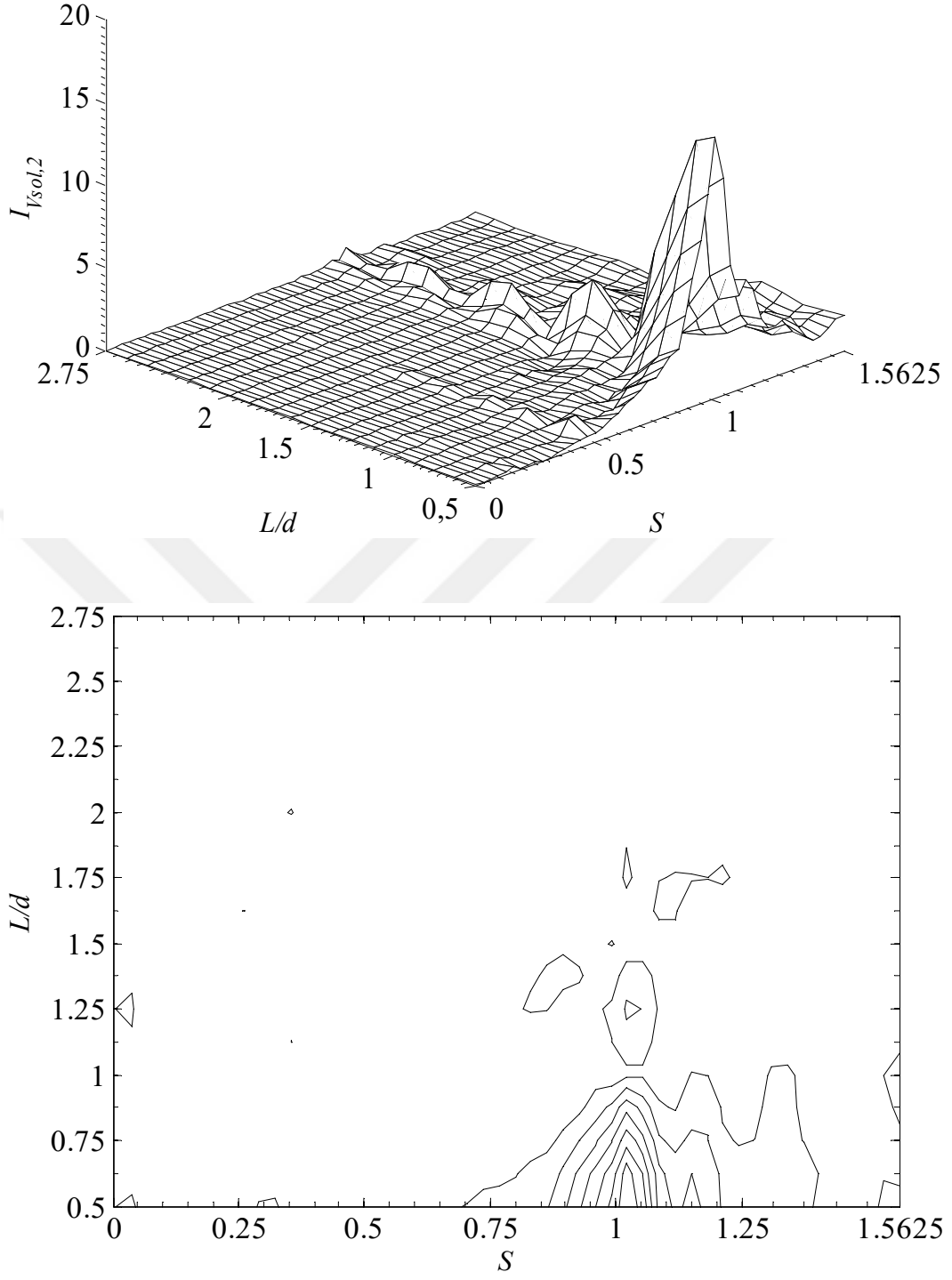
Şekil 37. 1. açıklığın ortasındaki momentler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



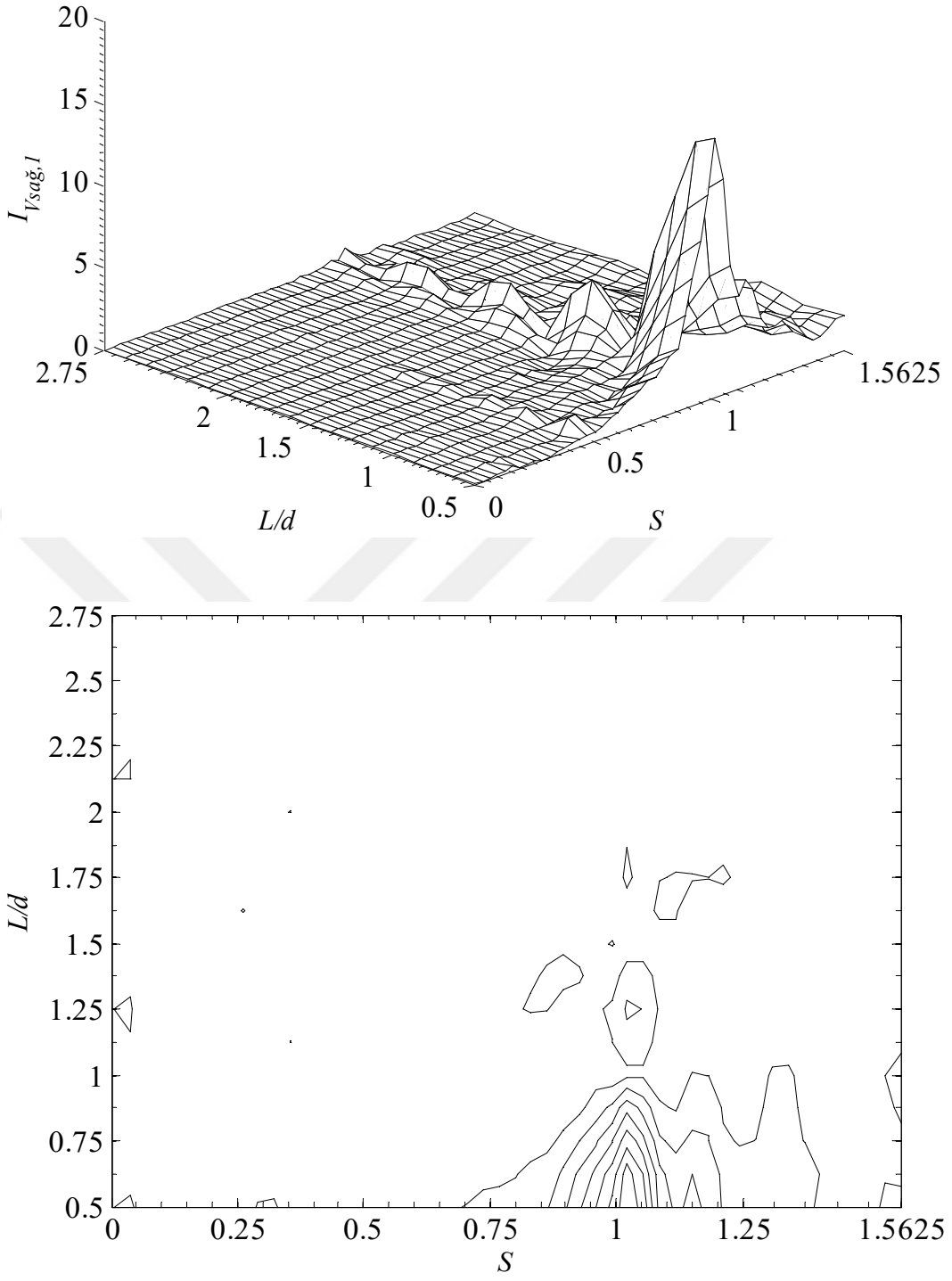
Şekil 38. 2. açıklığın ortasındaki momentler için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



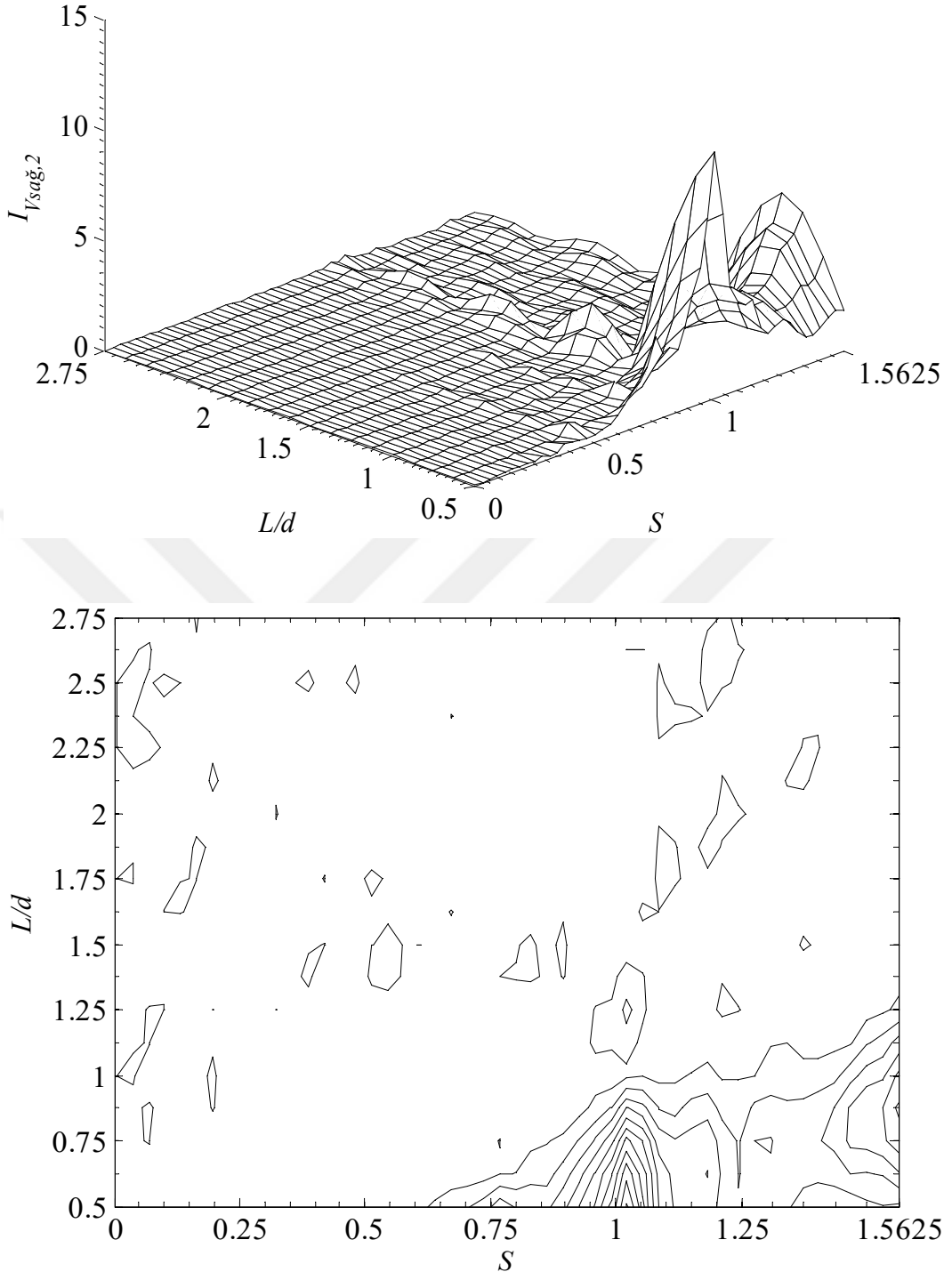
Şekil 39. 1. açıklığın sol mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



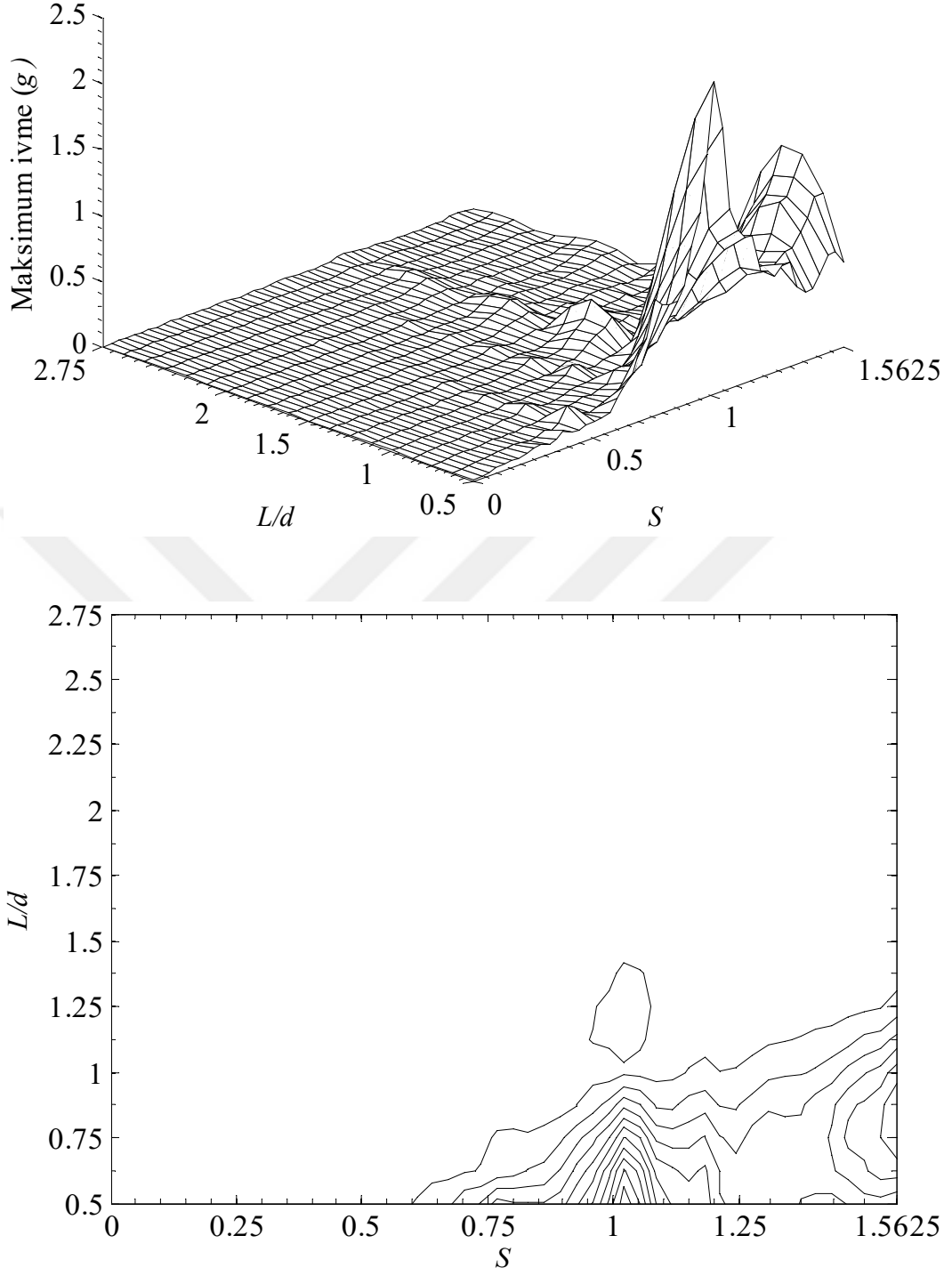
Şekil 40. 2. açıklığın sol mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



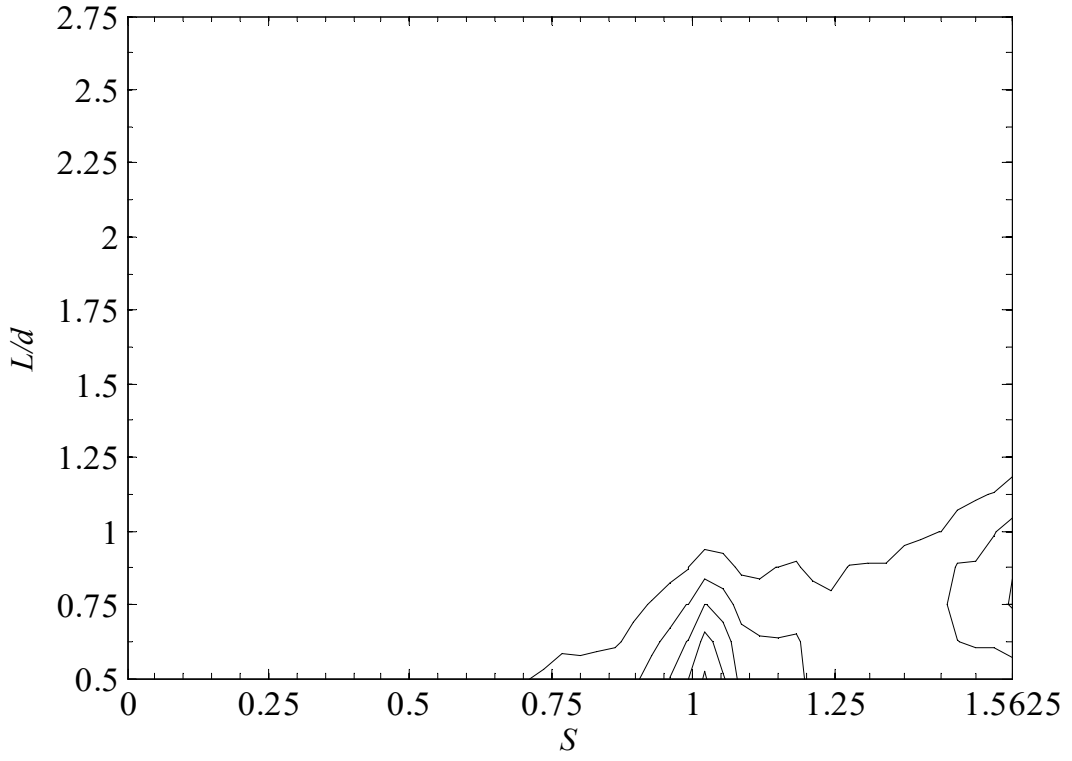
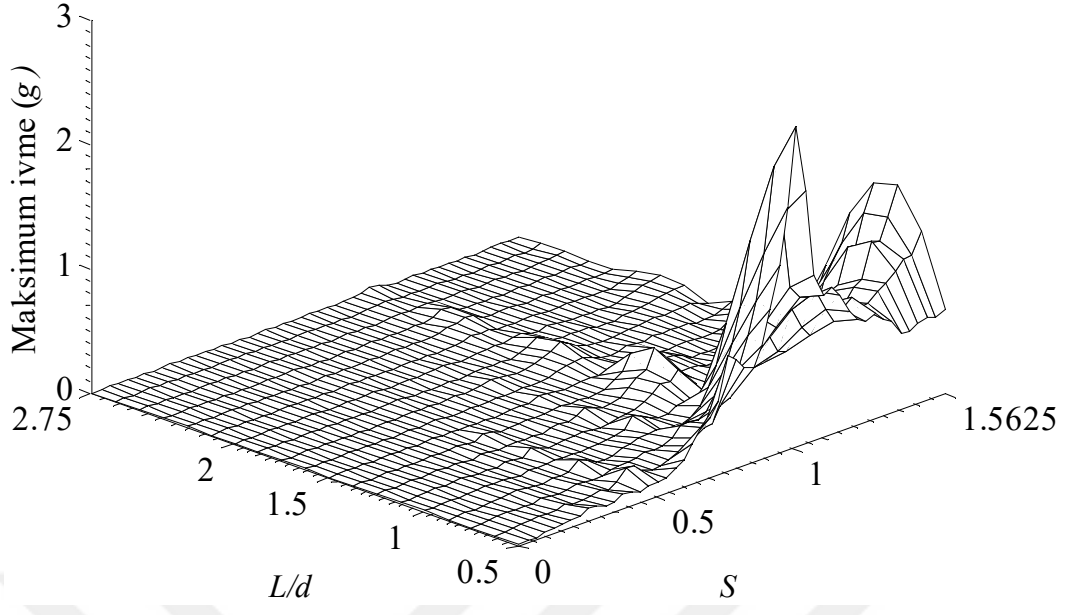
Şekil 41. 1. açıklığın sağ mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



Şekil 42. 2. açıklığın sağ mesnedindeki kesme kuvveti için etki faktörünün L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



Şekil 43. 1. açıklığın ortasındaki maksimum ivmelerin L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi



Şekil 44. 2. açıklığın ortasındaki maksimum ivmelerin L / d ve S değişkenlerine bağlı değişimi

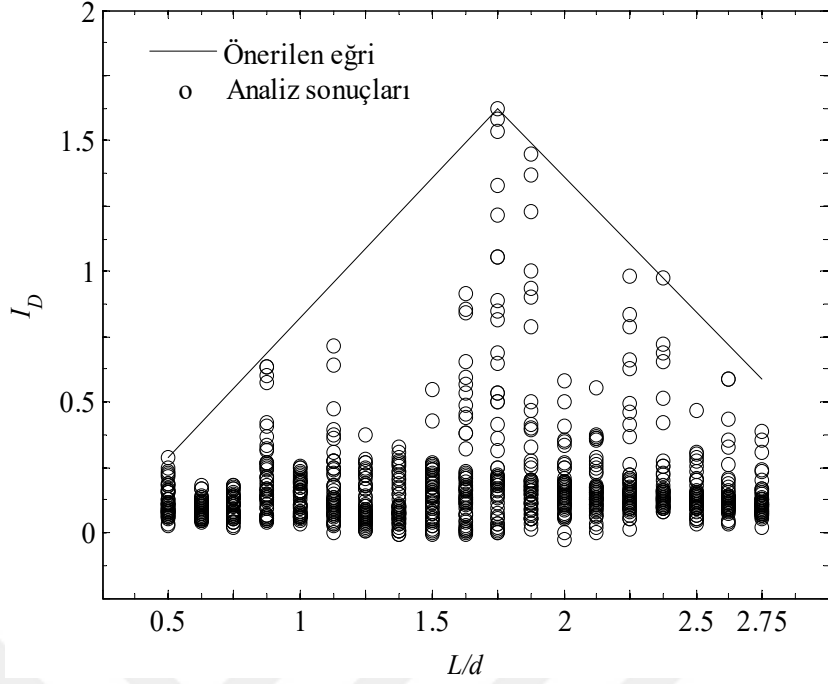
Şekil 34’de $L / d = 0,8$ için birinci ve ikinci açıklığın ortasındaki yer değiştirmeye ait etki faktörlerinin boyutsuz hız (S) ile değişimi verilmiştir. Görüleceği üzere her iki eğri üzerinde $S = 1$ ve $1,5625$ için iki adet pik meydana gelmektedir. $1,5625$ değeri, köprünün 2. doğal frekansının köprünün temel frekansına oranı olup (122) ifadesiyle hesaplanmaktadır. Yine bu şekilden ikinci açıklık için elde edilen etki faktörlerinin birinci açıklığa göre daha büyük olduğu görülmektedir.

Boyutsuz hız (S) ve L / d değerlerine bağlı olarak iki açıklıklı köprüde yer değiştirme, moment ve kesme kuvvetin için etki faktörlerinin ve maksimum ivmelerin değişimi Şekil 35-44’de verilmiştir. Etki faktörlerini gösteren semboldeki 1 ve 2 indisleri değerlerin sırasıyla 1. ve 2. açıklığa ait olduklarını ifade etmektedir. Şekillerden görüleceği üzere, $0,60 \leq S \leq 1,5625$ ve $0,5 \leq L / d \leq 1,25$ aralığında her iki açıklıkta elde edilen dinamik tepkiler genelde daha büyük olmaktadır. $v_{1,1}$ ve $v_{2,1}$ rezonans hızlarının davranış üzerinde en etkili hızlar olduğu görülmektedir. Bu nedenle, iki açıklıklı YHT köprülerinin tasarımında 1. ve 2. moda karşılık gelen 1. rezonans hızlarının ($S = 1$ ve $1,5625$) dikkate alınması son derece önemlidir. Yine şekillerden $L / d = 1,5$ ve $2,5$ durumlarında etki faktörlerinin ve maksimum ivmelerin en küçük değerlerini aldıkları görülmektedir. Benzer değerlendirmeler, tek açıklıklı köprüler için de daha önce (Kısım 2.2.1) yapılmıştır.

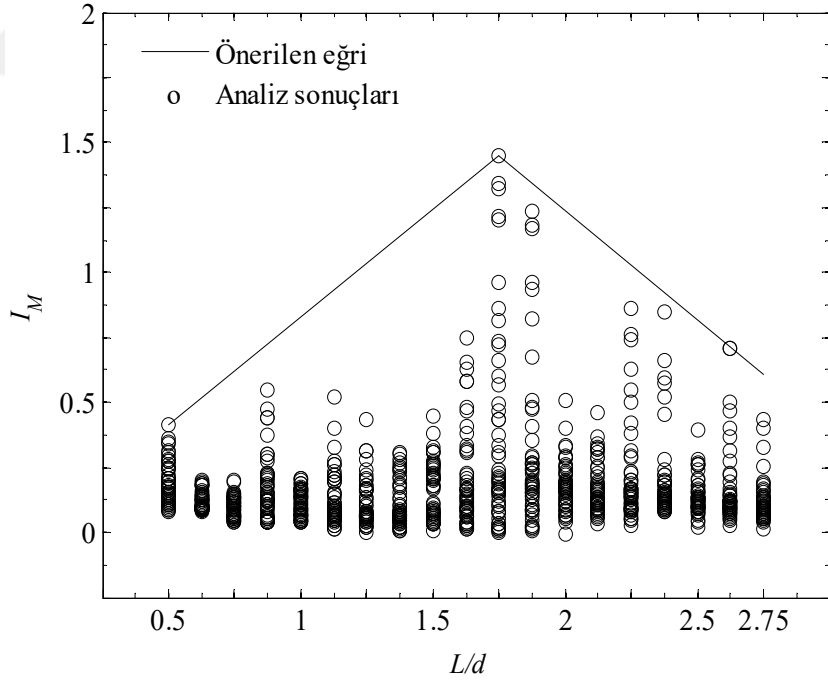
Şekil 45-48’de iki açıklıklı köprüde sırasıyla maksimum yer değiştirme, moment ve kesme kuvveti için etki faktörlerinin ve maksimum ivmelerin L/d oranına bağlı değişimi verilmiştir. Dinamik analizlerde tren hızları 200km/sa ila 320km/sa arasında kalacak şekilde seçilmiş ve elde edilen etki faktörleri şekil üzerinde gösterilmiştir. Dinamik analizlerde 200 ila 320 km/sa arasında 5 km/sa artımlarla 25 farklı tren hızı dikkate alınmıştır. Dikkate alınan hız değerlerine karşılık elde edilen etki faktörleri ve maksimum ivmeler için geçirilen zarf eğrilerinin açık ifadeleri Tablo 3’te verilmiştir. Bu eğriler, sadece L/d değişkeninin fonksiyonu olup pratikteki uygulamalar için güvenli tarafta kalan sonuçlar vermektedirler.

Tablo 3. İki açıklıklı köprüler için önerilen eğrilere ait fonksiyonlar

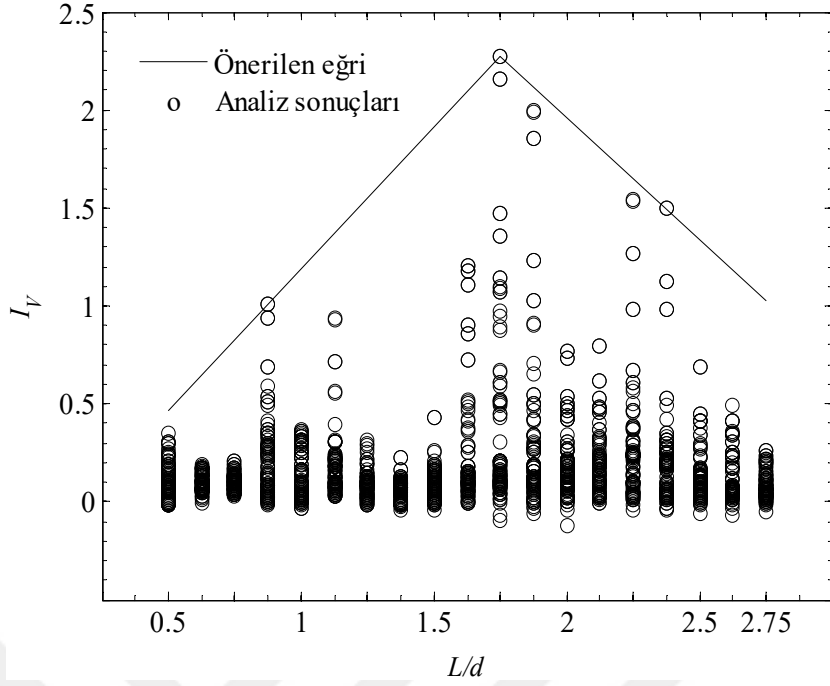
Etki faktörü (I)	Önerilen eğrinin fonksiyonu	
	$L / d \leq 1,75$	$L / d > 1,75$
Yer değiştirme (I_D)	$1,0646 (L / d) - 0,2430$	$-1,0310 (L / d) + 3,4243$
Moment (I_M)	$0,8300 (L / d) - 0,0005$	$-0,8464 (L / d) + 2,9332$
Kesme kuvveti (I_V)	$1,4434 (L / d) - 0,2570$	$-1,2384 (L / d) + 4,4362$
Maksimum ivme	$0,0156 (L / d) + 0,1324$	$-0,0844 (L / d) + 0,3074$



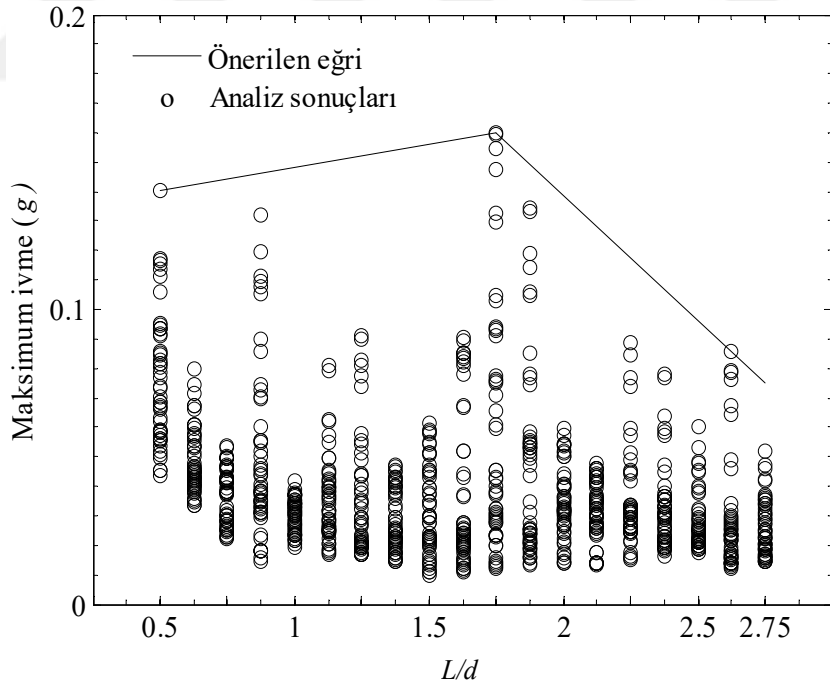
Şekil 45. İki açıklıklı köprüde maksimum yer değiştirme için etki faktörlerinin L/d oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320 \text{ km/sa}$)



Şekil 46. İki açıklıklı köprüde maksimum moment için etki faktörlerinin L/d oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320 \text{ km/sa}$)



Şekil 47. İki açıklıklı köprüde maksimum kesme kuvveti için etki faktörlerinin L/d oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320$ km/sa)



Şekil 48. İki açıklıklı köprüde maksimum ivmenin L/d oranına bağlı değişimi ($200 \leq v \leq 320$ km/sa)

2.3. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimum Tasarımı

2.3.1. Sıralı Kuadratik Programlama (SKP) Metodu

Sıralı Kuadratik Programlama (SKP) yöntemi, doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılmaktadır. Burada yapılan, en genel ifadeyle, kuadratik bir amaç fonksiyonunun, doğrusal kısıtlar (eşitlik ya da eşitsizlik şeklinde olabilir) altında iteratif minimizasyonudur.

SKP metoduyla çözümde temel fikir

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(x) \quad (123)$$

şeklinde verilen Lagrange fonksiyonunun kuadratik yaklaşımını esas alan bir KP alt problemi tanımlamaktır. Burada $f(x)$, λ_i ve $g_i(x)$ sırasıyla amaç fonksiyonu, Langrange çarpanı ve sınırlayıcı fonksiyonudur. KP alt problemi

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d,$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e, \quad (124)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m$$

şeklinde tanımlıdır. Bu problem, herhangi bir kuadratik programlama (KP) algoritması kullanılarak çözülebilir. Elde edilen çözüm ise

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (125)$$

şeklinde bir sonraki iterasyon için kullanılır. Burada α_k adım uzunluğu parametresi olup amaç fonksiyonunda yeterli azaltmayı sağlamak için doğrusal arama işlemi ile hesaplanır. SKP yöntemi üç adımlı bir işlemdir:

1. *Lagrange fonksiyonunun Hessian matrisinin güncellenmesi*: Her bir ana iterasyonda Lagrange fonksiyonu için pozitif tanımlı Hessian matrisi, quasi-Newton yaklaşımıyla

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (126)$$

şeklinde hesaplanır. Burada λ_i ($i = 1, \dots, m$) Lagrange çarpanları olup ayrıca

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (127)$$

$$q_k = \left(\nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1}) \right) - \left(\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_k) \right) \quad (128)$$

şeklinde tanımlıdırlar.

2. *SKP yönteminin her bir ana iterasyonunda KP alt probleminin çözülmesi*: A_i , $m \times n$ boyutundaki bir A matrisinin i . satırı olmak üzere KP probleminin çözümü

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} q(d) = \frac{1}{2} d^T H d + c^T d, \quad (129)$$

$$A_i d = b_i, \quad i = 1, \dots, m_e,$$

$$A_i d \leq b_i, \quad i = m_e + 1, \dots, m$$

şeklinde elde edilmektedir.

3. *Doğrusal arama ve değer fonksiyonunun belirlenmesi*: KP alt probleminin çözümüyle bir d_k vektörü elde edilir. Bu vektör ise (125) ifadesinde kullanılarak sonraki iterasyon için x değeri elde edilir. Değer fonksiyonu ise

$$\Psi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m_e} r_i \cdot g_i(x) + \sum_{i=m_e+1}^m r_i \cdot \max[0, g_i(x)] \quad (130)$$

şeklindedir.

(130) ifadesindeki hata fonksiyonu

$$r_i = (r_{k+1})_i = \max_i \left\{ \lambda_i, \frac{(r_k)_i + \lambda_i}{2} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (131)$$

şeklinde tanımlıdır.

2.3.2. Matlab Programında Optimizasyon Probleminin Çözülmesi

Matlab programında *fmincon* fonksiyonu Sıralı Kuadratik Programla (SKP) algoritması kullanılmaktadır. Optimizasyon problemi, *fmincon* fonksiyonu kullanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\min_x f(x) \left\{ \begin{array}{l} c(x) \leq 0 \\ c_{eq}(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x \leq b_{eq} \\ l_b \leq x \leq u_b \end{array} \right\} \quad (132)$$

Burada, $f(x)$ amaç fonksiyonu, A ve A_{eq} sırasıyla lineer eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarıdır. $c(x)$ ve $c_{eq}(x)$ ise sırasıyla lineer olmayan eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarını ifade etmekte olup bu kısıtlayıcılar alt programda verilmektedir. İfadelerde görülen x , tasarım değişkenlerine ait bir vektör olup bu vektörü oluşturan değişkenlerin alt ve üst sınır değerleri l_b ve u_b ile verilmektedir.

Uygulama olarak Kısım 1.4.1'de verilen problemlerin ikisi için optimum değerler *fmincon* fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır. Ele alınan problemler: (i) Model 2: Sönümsüz Ana Sistem ve Sönümlü AKS (Kısım 1.4.1.2) ve (ii) Model 4: Tek Serbestlik Dereceli Ana Sistem ve PAKS (Kısım 1.4.1.4).

Model 2 için oluşturulan optimizasyon problemi

$$\min_x f(x) \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \xi_1 \leq 0,5 \\ 0,8 \leq f \leq 1,2 \end{array} \right\} \quad (133)$$

şeklindedir. Burada amaç fonksiyonu (26) ifadesinde tanımlanmış olup tasarım parametreleri

$$f = \frac{\omega_1}{\omega_s}, \quad \xi_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_1}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad (134)$$

şeklindedir. İfadelerde, m_1 , c_1 ve k_1 sırasıyla AKS için kütle, rijitlik ve sönümü, ω_1 ve ω_s ise sırasıyla AKS ve ana sisteme ait doğal frekansları göstermektedir.

Model 4 için oluşturulan optimizasyon problemi

$$\min_x f(x) \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \Delta_n \leq 0,5 \\ 0,8 \leq f_T \leq 1,2 \\ 0 \leq \xi_T \leq 0,5 \end{array} \right\} \quad (135)$$

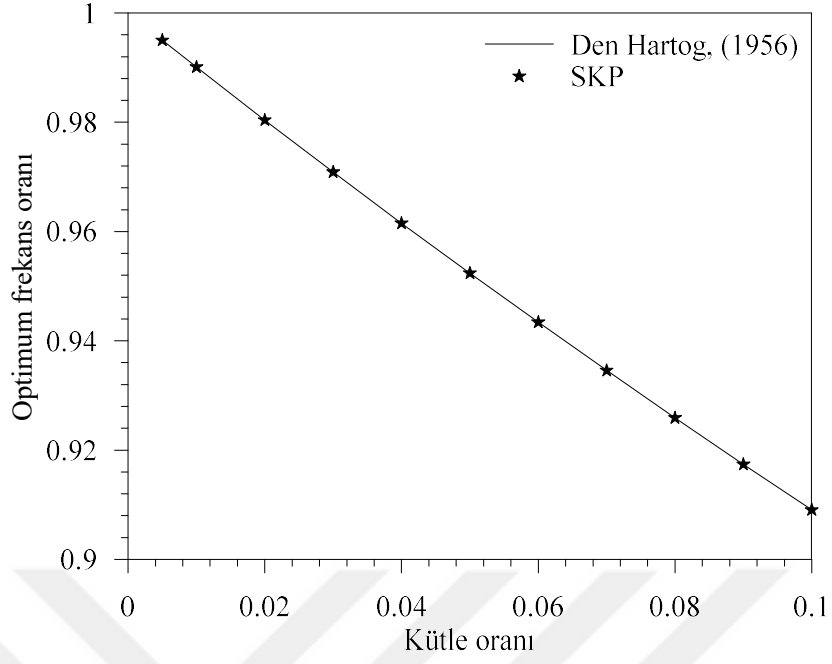
şeklindedir. Burada amaç fonksiyonu (42) ifadesinde tanımlanmış olup optimizasyon problemine ait tasarım parametrelerini gösteren f_T , Δ_n ve ξ_T değerleri

$$f_T = \frac{\omega_T}{\omega_s}, \quad \Delta_n = \frac{\omega_n - \omega_1}{\omega_T}, \quad \xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n = \xi_T$$

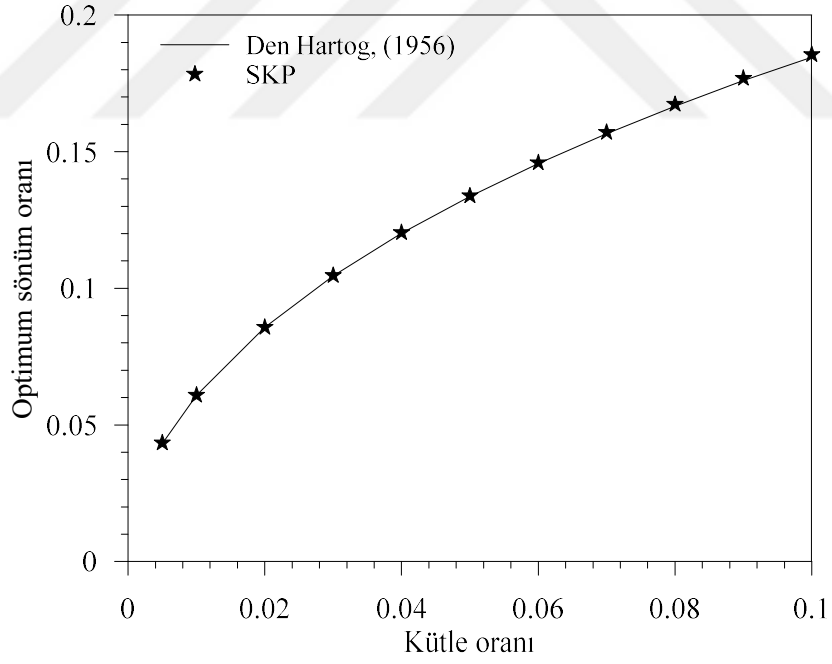
$$\xi_j = \frac{c_j}{2m_j\omega_j}, \quad \omega_j = \omega_T \left[1 + \left(j - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\Delta_n}{n-1} \right], \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (136)$$

$$\omega_T = \sum_{j=1}^n \frac{\omega_j}{n}$$

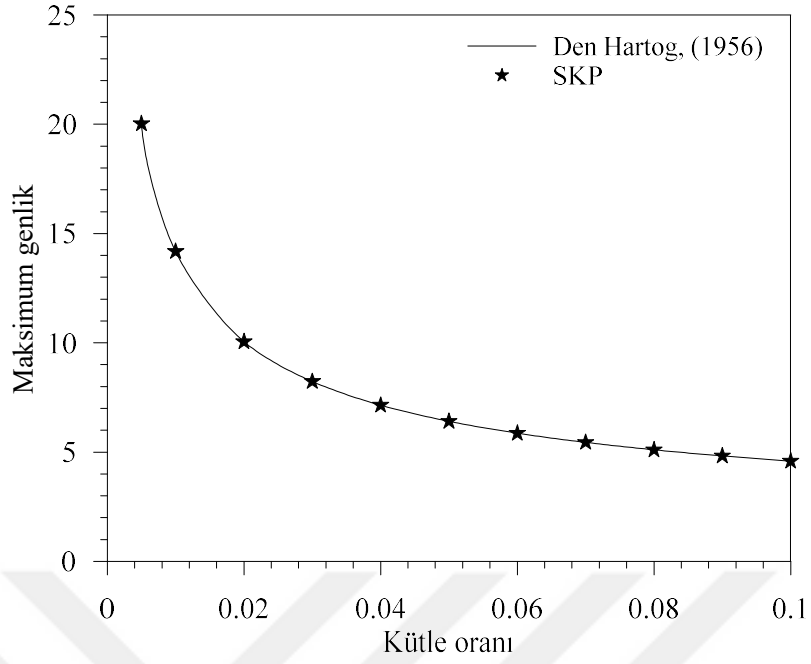
ifadeleri yardımıyla elde edilmektedir. Burada, ω_j j . AKS'nin doğal frekansını, ω_T ortalama frekansı, f_T ortalama frekans oranını, ω_s ana sistemin doğal frekansını, Δ_n frekans genişliğini, ξ_T sönüm oranını ve n ise PAKS sistemi içerisindeki toplam AKS sayısını göstermektedir.



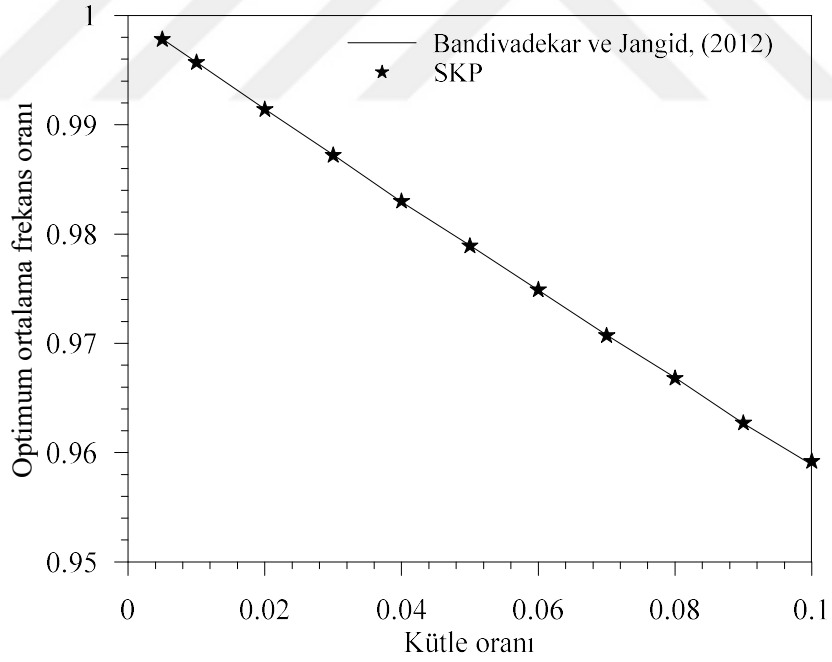
Şekil 49. Optimum frekans oranlarının karşılaştırılması (Model 2)



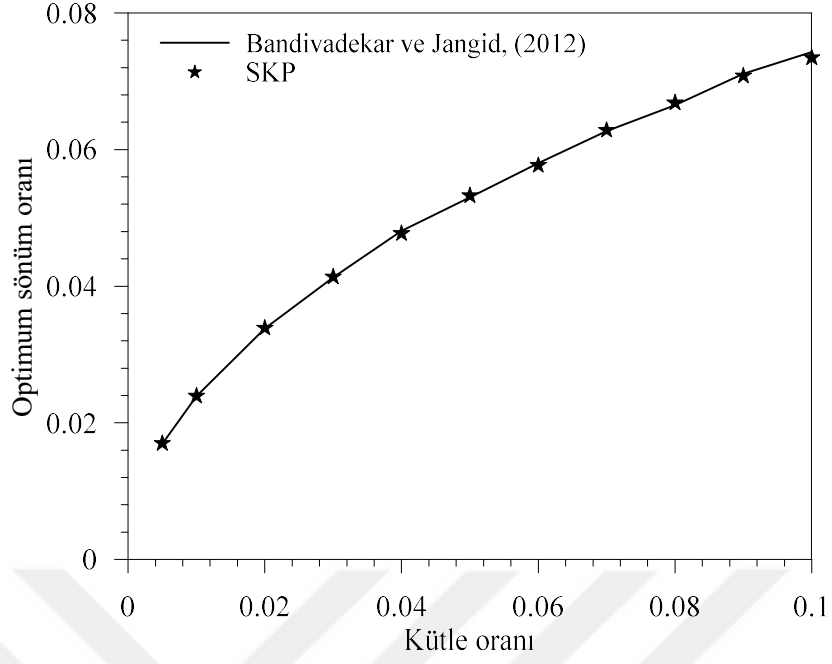
Şekil 50. Optimum sönüm oranlarının karşılaştırılması (Model 2)



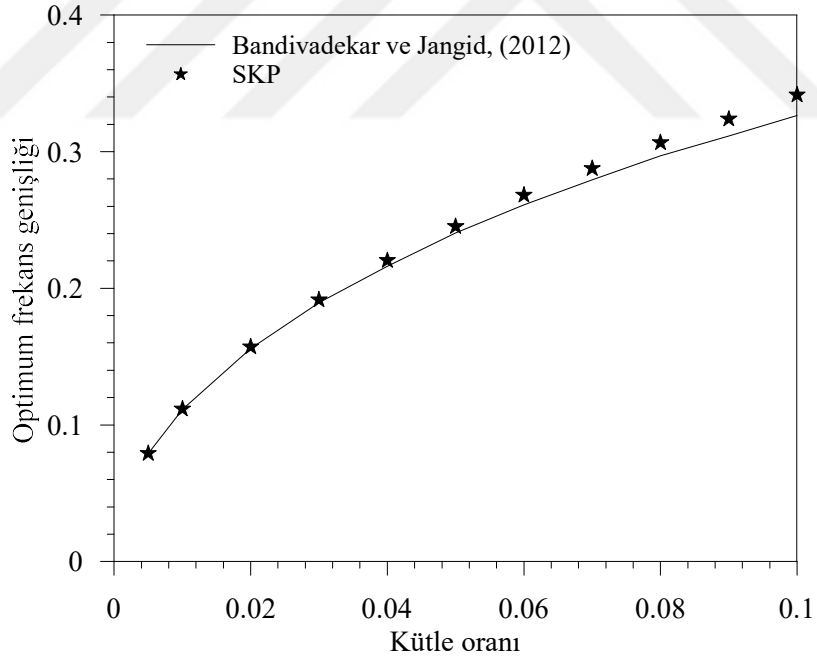
Şekil 51. Ana sistemin maksimum genlik değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)



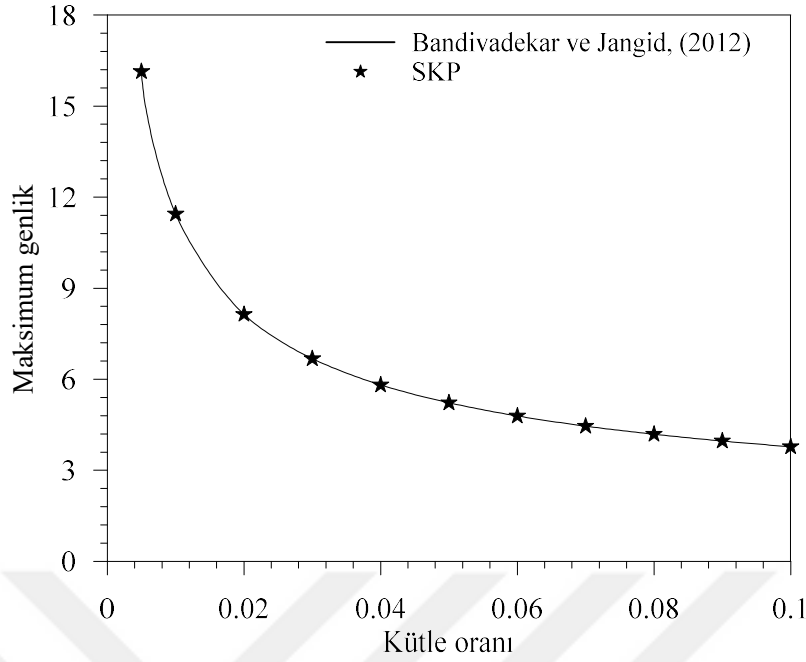
Şekil 52. Optimum ortalama frekans oranlarının karşılaştırılması (Model 4)



Şekil 53. Optimum sönüm oranlarının karşılaştırılması (Model 4)



Şekil 54. Optimum frekans aralığının karşılaştırılması (Model 4)



Şekil 55. Ana sistemde maksimum genlik değerlerinin karşılaştırılması (Model 4)

Şekil 49-51'de Model 2 için elde edilen optimizasyon sonuçları verilmektedir. Karşılaştırma için Den Hartog (1956) tarafından önerilen formüller kullanılmıştır. Görüldüğü üzere, SKP yöntemini kullanan *fmincon* fonksiyonu ile elde edilen sonuçlar literatürle uyum içindedir. Şekil 52-55'te ise Model 4 için elde edilen optimizasyon sonuçları verilmiştir. PAKS sisteminde $n = 5$ AKS olduğu düşünülmüştür. Karşılaştırma için Bandivadekar ve Jangid (2012) tarafından verilen analitik sonuçlar kullanılmıştır. Görüleceği üzere *fmincon* ile elde edilen ortalama frekans oranları, sönüm oranları ve ana sistemin genlik değerleri literatürle son derece uyum içindedir. Optimum frekans aralığı değerlerinde ise kütle oranının 0,05 değerinden büyük olması durumunda az da olsa fark meydana gelmektedir. Elde edilen en büyük fark %4,42 dir.

2.3.3. YHTK1-PAKS / SAKS Problemleri İçin Optimum Değerlerin *fmincon* Fonksiyonu ile Bulunması

Bu kısımda, tek açıklı köprü üzerinde yüksek hızlı tren etkisiyle medyana gelen dinamik titreşimlerin azaltılmasında farklı AKS sistemlerinin etkinliği araştırılmıştır. Bu amaçla, dinamik analizlerde kütle oranı %2 olan 4 farklı AKS sistemi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar için $L = 40\text{m}$, $E = 28,2\text{GPa}$, $I = 17,9\text{m}^4$, $m_b = 38,24\text{t/m}$ ve $\xi = \%2,5$ olarak

alınmıştır (Lin vd., 2005). Kullanılan tren modeli Eurostar YHT'dir. Sönümleyici sistemlerinin optimum tasarım değerleri *fmincon* fonksiyonu yardımıyla elde edilmiştir.

YHTK1-PAKS probleminde optimum sönümleyici parametrelerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan optimizasyon problemi

$$\min_x f(x) \begin{cases} 0 \leq \Delta_n \leq 0,5 \\ 0,8 \leq f_T \leq 1,2 \\ 0 \leq \xi_T \leq 0,5 \end{cases} \quad (137)$$

şeklindedir. Optimizasyon problemine ait tasarım parametreleri olan toplam kütle oranı μ , ortalama frekans oranı f_T , frekans genişliği Δ_n ve sönüm oranı ξ_T sırasıyla

$$\mu = \frac{1}{m_b L} \sum_{j=1}^n m_j, \quad f_T = \frac{\omega_T}{\omega_s}, \quad \Delta_n = \frac{\omega_n - \omega_1}{\omega_T}, \quad \xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n = \xi_T \quad (138)$$

ifadelerinden elde edilmektedir. Burada, m_j j . AKS'nin kütlesini, ω_s ana sistemin doğal frekansını ve n ise toplam AKS sayısını göstermektedir. (138) ifadesinde ω_j ve ω_T

$$\omega_j = \omega_T \left[1 + \left(j - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\Delta_n}{n-1} \right], \quad \omega_T = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (139)$$

şeklinde tanımlıdır.

YHTK1-SAKS probleminde optimum sönümleyici parametrelerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan optimizasyon problemi ise

$$\min_x f(x) \begin{cases} 0 \leq \mu_s \leq 1 \\ 0,8 \leq f_1 \leq 1,2 \\ 0,8 \leq f_2 \leq 1,2 \\ 0 \leq \xi_1 \leq 0,5 \\ 0 \leq \xi_2 \leq 0,5 \end{cases} \quad (140)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Optimizasyon problemine ait tasarım parametreleri

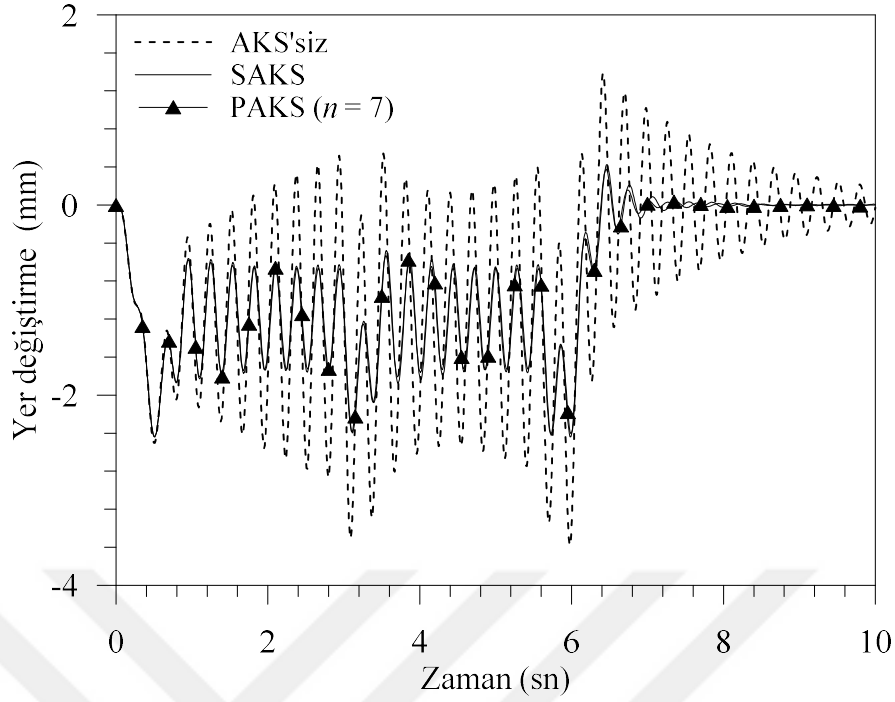
$$\mu = \frac{m_1 + m_2}{m_b L}, \quad \mu_s = \frac{m_1}{m_2}, \quad f_1 = \frac{\omega_1}{\omega_s}, \quad f_2 = \frac{\omega_2}{\omega_s}, \quad \xi_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_1}, \quad \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2} \quad (141)$$

şeklindedir. Burada m_j ($j = 1,2$) her bir AKS'nin kütlesini, ω_j her bir AKS'nin doğal frekansını ve c_j her bir AKS'nin sönümünü göstermektedir.

Yukarıda tanımlanan optimizasyon problemlerinde amaç, köprünün orta noktasındaki maksimum yer değiştirmenin azaltılmasıdır. Göz önüne alınan AKS sistemleri için *fmincon* yardımıyla elde edilen optimum tasarım parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Görüleceği üzere, PAKS sistemlerinde sistemdeki AKS sayısının artması sönüm oranının azalmasına sebep olmaktadır. Bununla beraber, daha fazla AKS'nin paralel bağlanması kontrol edilebilen frekans aralığını arttırmaktadır. Bütün AKS sistemlerinde kontrol edilmek istenen frekans (köprü temel frekansı), frekans aralığının içine düşmektedir. Optimum SAKS sisteminde birinci kütle sadece yay elemanına bağlıken ikinci kütle yay-viskoz damper elemanlarına bağlıdır. Optimum SAKS sisteminde birinci AKS elemanı için $\zeta = 0$ iken ikinci AKS elemanı için $\zeta = 0,205$ olarak elde edilmektedir. SAKS sisteminde ikinci AKS elemanı için büyük sönüm oranları elde edilmektedir.

Tablo 4. Göz önüne alınan AKS sistemleri için optimum parametreler ($\mu = \%2$)

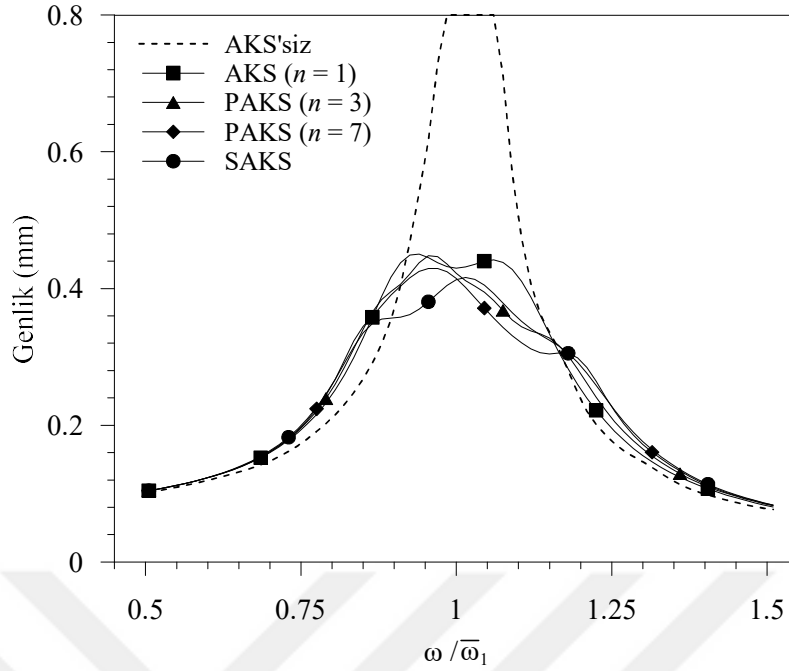
Sönümleyici	j	μ_s	ξ_j (%)	f_j
AKS	1	-	13,5	0,958
PAKS ($n = 3$)	1	-	7,2	0,879
	2	-		0,980
	3	-		1,081
PAKS ($n = 7$)	1	-	4,1	0,843
	2	-		0,891
	3	-		0,939
	4	-		0,988
	5	-		1,036
	6	-		1,085
	7	-		1,133
SAKS	1	0,118	0,0	1,046
	2	-	20,5	0,941



Şekil 56. Açıklık ortasındaki yer değiştirmelerin zamanla değişimi ($v_{1,1} = 240,12 \text{ km/sa}$)

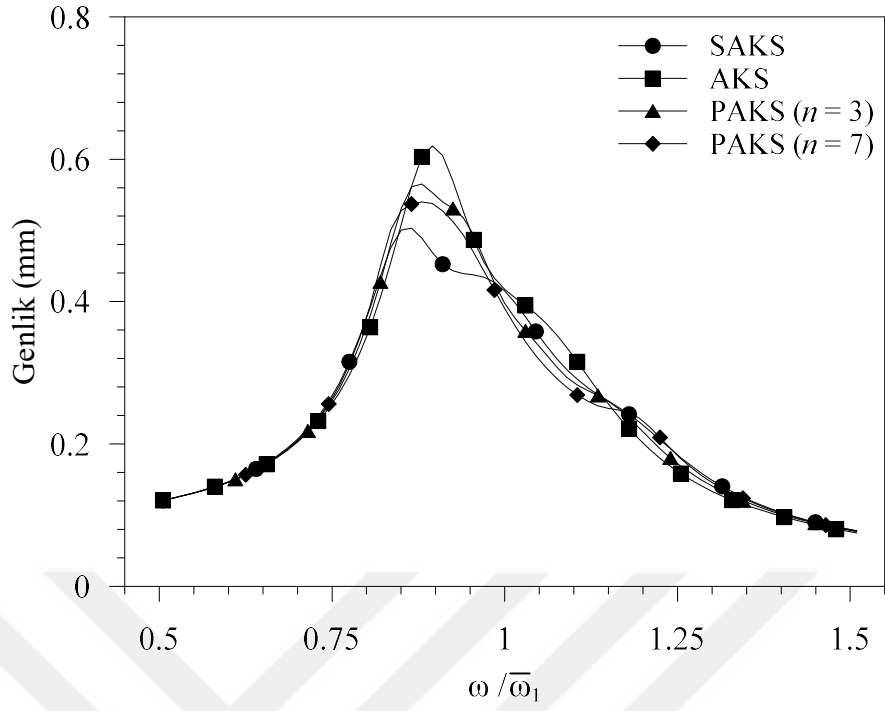
Şekil 56'da trenin rezonans hızıyla ($v_{1,1}$) hareket etmesi durumunda, köprü açıklık ortasında meydana gelen yer değiştirmelerin zamanla değişimi verilmiştir. Köprüde AKS olmaması durumu ile PAKS ($n = 7$) ve SAKS sistemleri olması durumlarında yer değiştirmeler incelenmiştir. Köprü orta noktasındaki en büyük yer değiştirme değeri AKS'siz durumda 3,53mm, SAKS olması durumunda 2,45mm ve PAKS olması durumunda 2,44mm olarak elde edilmiştir. Maksimum yer değiştirmedeki azalma SAKS sistemi için %30,59 iken PAKS sistemi için %30,88 dir. SAKS ve PAKS ($n = 7$) sistemleri hemen hemen aynı kontrol performansını göstermişlerdir.

Göz önüne alınan AKS sistemleri kullanılarak köprü ortasında elde edilen yer değiştirme için genlik değerinin frekans oranı ile değişimi Şekil 57'de verilmiştir. Frekans oranı, yük frekansının köprü temel frekansına oranı olarak tanımlanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi bütün AKS sistemleri, rezonans halinde ($\omega/\bar{\omega}_1 = 1$) titreşimlerin azaltılmasında etkili olmaktadır. Literatürden bilindiği üzere AKS'ler rezonans frekansı ve civarı frekanslarda en etkili olmaktadır. Şekil 57, bu bilgiyi teyit etmektedir.

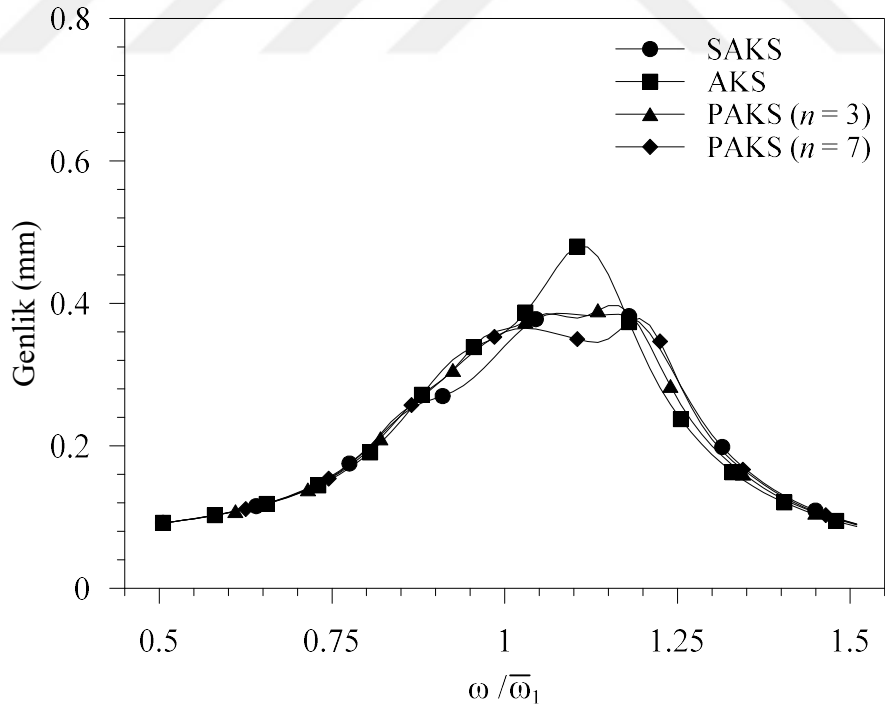


Şekil 57. Genliğin frekans oranıyla değişimi

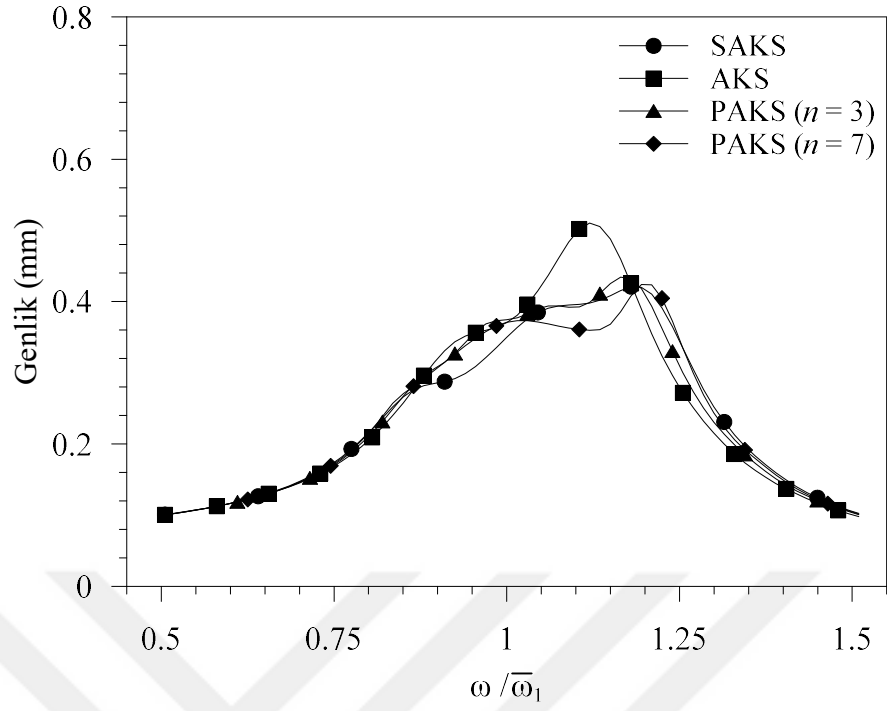
Köprüye ait tasarım parametrelerinin ve ayrıca AKS sistemlerinin optimum parametrelerinde meydana gelebilecek olası hatalar, AKS'lerin kontrol performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun en belirgin örneği, tek AKS sistemi üzerinde görülmektedir (Lin vd., 2005). Köprünün tasarım parametrelerinde meydana gelebilecek olası hataların AKS sistemlerinin performansı üzerindeki etkisi Şekil 58-61'te verilmiştir. Burada kullanılan tüm AKS sistemleri için kütle oranı μ aynıdır. Köprü kütleesindeki artma veya eğilme rijitliğindeki azalma, köprünün doğal frekansını azaltırken aksi durum doğal frekansta artmaya sebep olmaktadır. Şekillerden görüleceği üzere, köprünün temel frekansının büyümesine sebep olan durumlarda en iyi kontrol performansını SAKS sistemi göstermektedir. Köprünün temel frekansının azalmasına sebep olan durumlarda ise PAKS ($n = 7$) sistemi en iyi titreşim kontrol performansını göstermektedir. Yine görüleceği üzere klasik tekli AKS sistemi, optimum değerlerden sapmalar olması durumunda, titreşim kontrolünde çoklu sistemler kadar başarılı olamamaktadır. Şekil 62 ve 63'te ise tasarımda göz önüne alınan optimum frekans oranındaki hataların AKS sistemlerinin kontrol performansları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Frekans oranında azalma olması durumunda PAKS sistemleri, artma olması durumunda ise SAKS sistemi daha iyi kontrol performansı göstermektedir.



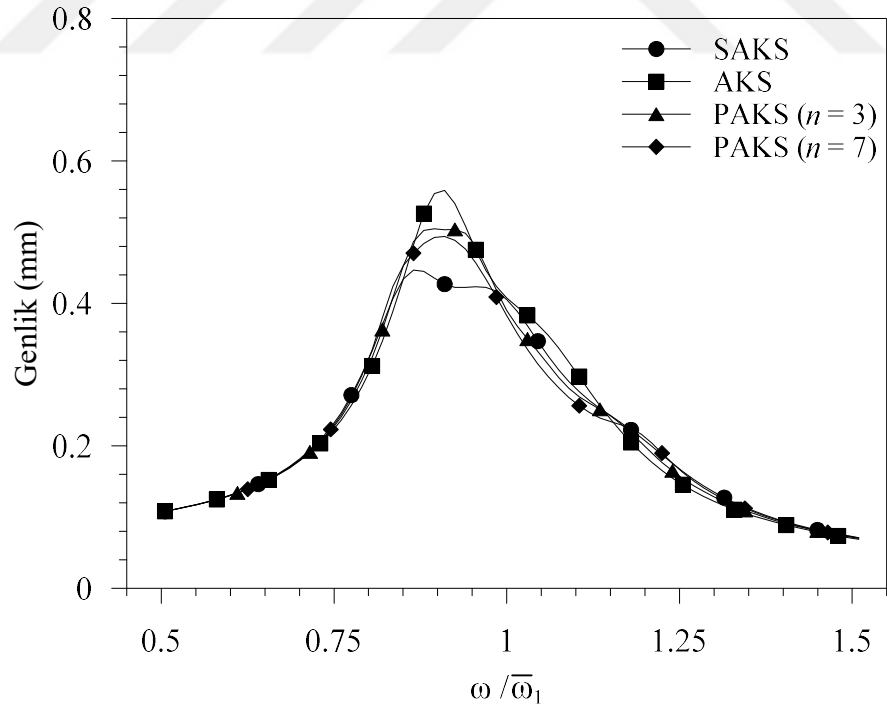
Şekil 58. Eğilme rijitliğindeki %10'luk azalmanın AKS sistemlerinin performansına etkisi



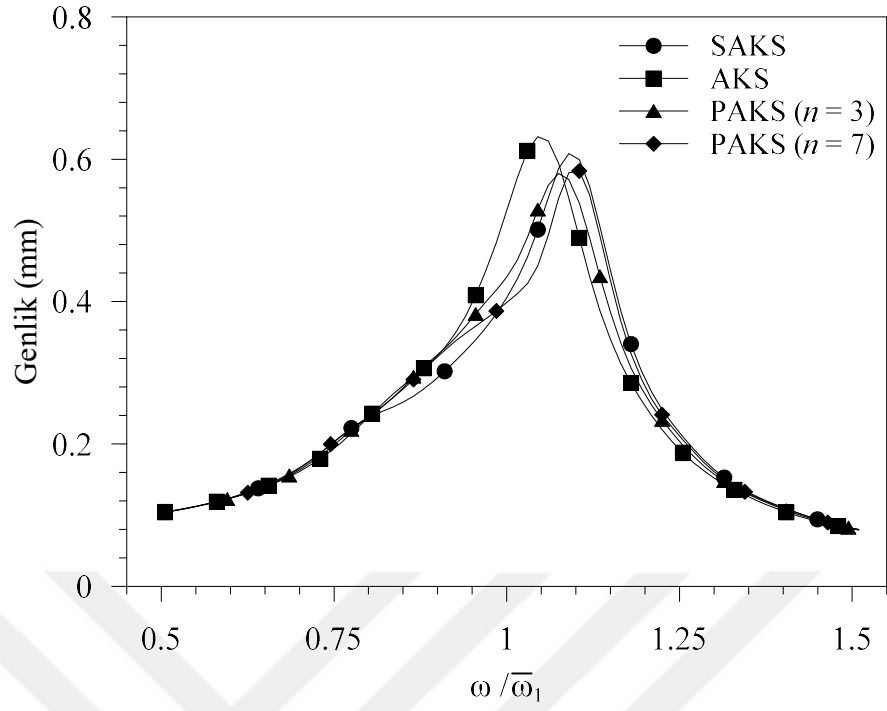
Şekil 59. Eğilme rijitliğindeki %10'luk artışın AKS sistemlerinin performansına etkisi



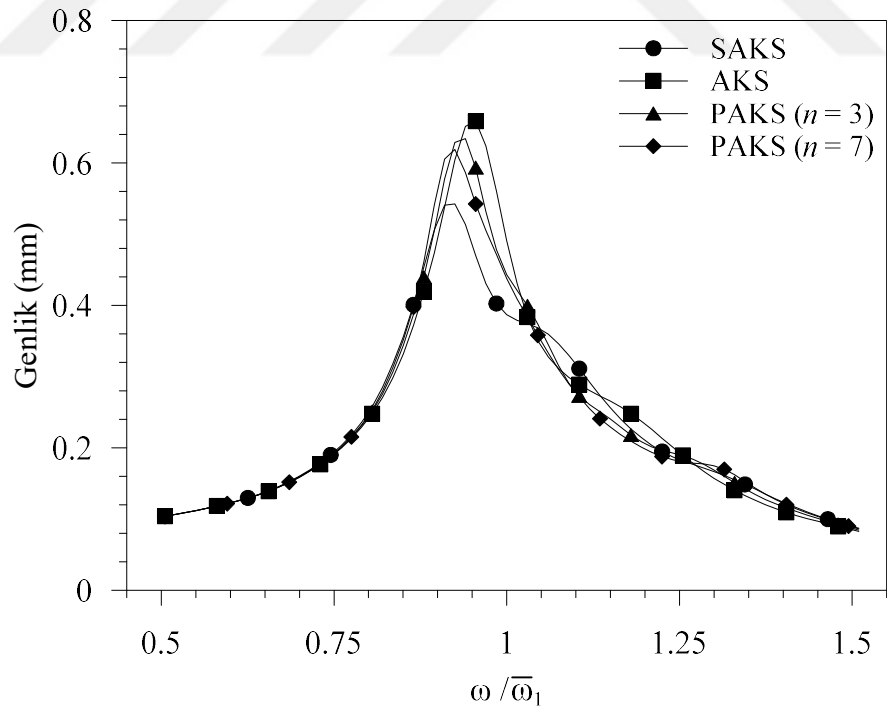
Şekil 60. Köprü kütlesindeki %10'luk azalmanın AKS sistemlerinin performansına etkisi



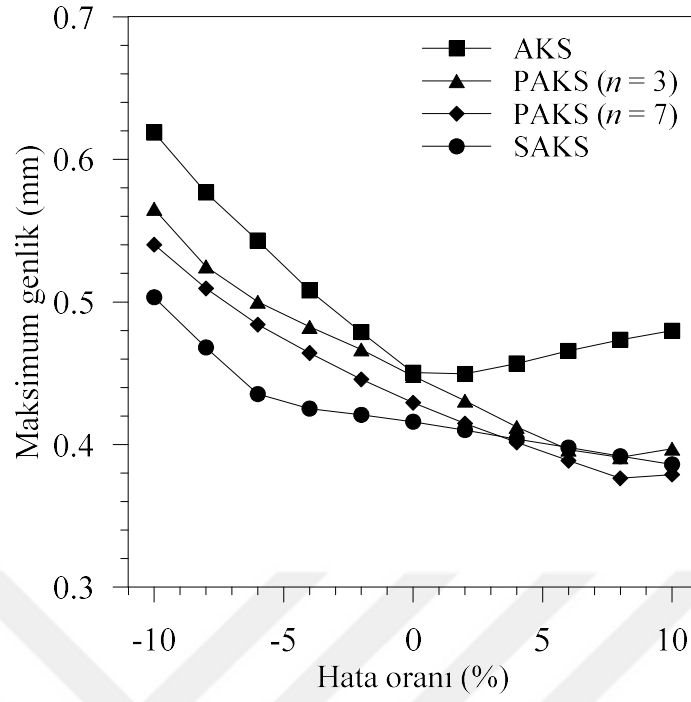
Şekil 61. Köprü kütlesindeki %10'luk artışın AKS sistemlerinin performansına etkisi



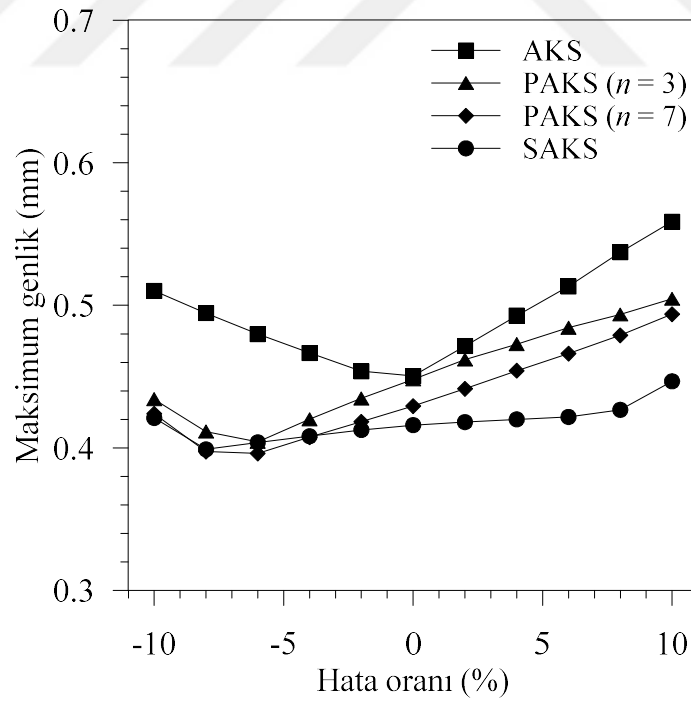
Şekil 62. Frekans oranındaki %10'luk azalmanın AKS sistemlerinin performansına etkisi



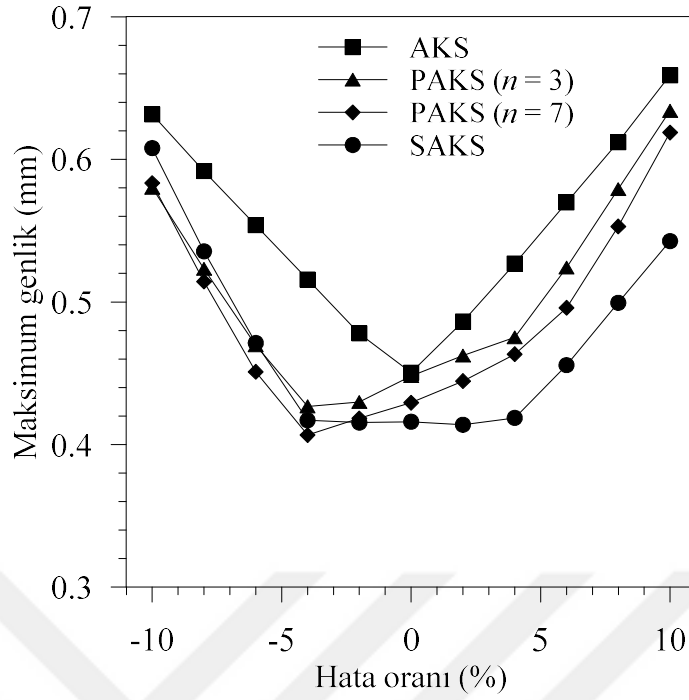
Şekil 63. Frekans oranındaki %10'luk artışın AKS sistemlerinin performansına etkisi



Şekil 64. Eğilme rijitliğindeki hatanın maksimum genlik değerleri üzerindeki etkisi



Şekil 65. Köprü kütlesindeki hatanın maksimum genlik değerleri üzerindeki etkisi



Şekil 66. Frekans oranındaki hatanın maksimum genlik değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 64-66'da köprü parametrelerindeki ve AKS frekans oranındaki sapmalardan dolayı göz önüne alınan AKS sistemlerinin kontrol performansları maksimum genlik değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu şekillerden de daha önceki iki paragrafta belirtilen sonuçlara ulaşılmaktadır. Genelleştirme yapmak gerekirse, optimum değerlerden sapmalar olması durumunda PAKS ve SAKS sistemlerinin kontrol performansları bundan çok etkilenmemektedir. Tekli AKS sistemi ise bu tip sapmalara karşı son derece hassastır. Özellikle hata yüzdesinin $[-5,5]$ aralığı içinde kaldığı durumlarda SAKS sisteminin bundan en az etkilendiği ve bu aralıkta genlik eğrisinin yataya yakın olduğu görülmektedir.

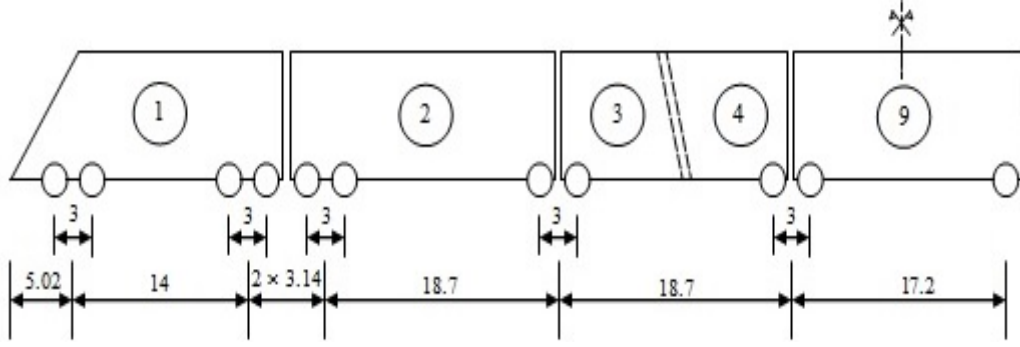
2.4. Paralel Bağlı Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin (PAKS) Tasarımı İçin Yeni Bir Yöntem

Bu çalışmada, paralel bağlı çoklu ayarlı kütle sönümleyiciler için optimizasyon yöntemlerini kullanmaya gerek kalmadan basit bir şekilde optimum parametrelerin elde edilmesini sağlayan yeni bir yol önerilmiştir. Yöntem, esasen Den Hartog (1956) tarafından tek serbestlik dereceli sistemler için önerilen formüllerin (Bkz. Kısım 1.4.1.2) çok serbestlik dereceli sistemlere genişletilmesidir.

2.4.1. Tek Açıklıklı Köprülere Uygulama

Bu problem için hareketli yük modeli olarak Fransız TGV treni düşünülmüştür. Bu trene ait şematik gösterim Şekil 67’te verilmiştir. Toplamda 42 aksı olan trenin her bir aksından köprüye gelen kuvvet 170kN dur. Trenin toplam uzunluğu 331,09m dir. Ele alınan köprü için $L = 40m$, $m_b = 38240kg/m$, $EI = 5,048 \times 10^{11} Nm^2$ ve $\xi = \%2$ dir (Lin vd., 2005).

Tablo 5’te, köprü üzerinde AKS olmaması ($n = 0$) ve olması ($n = 1, 2$ ve 3) durumlarında ilk sekiz doğal frekans ve bunlara ait modal kütle katılım oranları verilmiştir. Hesaplarda $\mu = \%2$ olarak alınmıştır. Köprü üzerinde AKS yok iken temel doğal frekans 22,41rad/sn ve bu modun modal kütle katılım oranı ise %83’tür. Bu durum, dinamik davranış üzerinde en etkili modun 1. mod olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Şekil 21’de daha net görülmektedir. Sisteme bir AKS eklendiğinde, bu yeni sistemin ilk iki doğal frekansı 20,68rad/sn ve 23,82rad/sn olup, AKS’siz sistemin 1. doğal frekansı bu iki değer arasında kalmaktadır. Bu iki modun modal kütle katılım oranları toplamı ise AKS’siz halde 1. modun modal kütle katılım oranını vermektedir. Yani, davranış üzerinde bu iki mod etkili olmaktadır. Böylece eklenen her yeni AKS için davranış üzerinde etkili modların sayısının bir tane daha arttığı, Tablo 5’te italik olarak verilen sonuçlar incelendiğinde kolayca görülebilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, AKS’li bütün sistemlerde davranışta etkili modlara ait frekansların AKS’siz haldeki temel frekansı kapsıyor olmalarıdır. Tablo 5’ten ulaşılan bu sonuç genelleştirildiğinde, köprü üzerine n adet paralel AKS yerleştirilmesi durumunda AKS’siz köprünün 1. doğal frekansını kapsayacak şekilde davranış üzerinde etkili $n+1$ adet frekans elde edilmektedir. Benzer sonuca, farklı sayıda AKS elemanı taşıyan tek serbestlik dereceli ana sistem (Model 4) için de ulaşılmaktadır (Tablo 6). Burada, M ve K sırasıyla ana sisteme ait kütle ve rijitliktir. Ayrıca, köprü üzerine yerleştirilen AKS’lerin AKS’siz haldeki 2. ve üzeri doğal frekanslarını değiştirmedeği, sadece mod numarasını ötelediği görülmektedir. Tablo 5’ten çıkarılacak en önemli sonuç, köprü üzerinde AKS olmadığı durumda modal kütle katılım oranının büyük bir kısmı 1. modda elde edilirken, n adet AKS olması durumunda ilk $n+1$ modda elde edilmektedir. Bu sebeple, AKS etkisindeki köprülerde optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesinde bu modların tamamının etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum önerilen tasarım yönteminin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 67. Fransız TGV treninin fiziksel özellikleri (Uzunluklar: m)

Tablo 5. Köprü üzerinde farklı sayıda paralel bağlı AKS olması durumunda ilk sekiz doğal frekans (rad/sn)

Mod.	AKS'siz	AKS ($n = 1$)	PAKS ($n = 2$)	PAKS ($n = 3$)
1	22,41 (83)	20,68 (42)	20,00 (20)	19,61 (12)
2	89,65 (0)	23,82 (41)	22,14 (41)	21,35 (28)
3	201,71 (9,2)	89,65 (0)	24,44 (22)	22,88 (30)
4	358,59 (0)	201,73 (9,1)	89,65 (0)	24,81 (14)
5	560,29 (3,3)	358,59 (0)	201,73 (9,1)	89,65 (0)
6	806,82 (0)	560,30 (3,2)	358,59 (0)	201,73 (9,1)
7	1098,17 (1,6)	806,82 (0)	560,30 (3,2)	358,59 (0)
8	1434,34 (0)	1098,17 (1,6)	806,82 (0)	560,30 (3,21)

Parantez içerisindeki sayılar, SAP2000 programıyla elde edilen modal kütle katılım oranlarıdır.

Tablo 6. Model 4 üzerinde farklı sayıda paralel bağlı AKS olması durumunda ilk dört doğal frekans (rad/sn)

Mod	AKS'siz	AKS ($n = 1$)	PAKS ($n = 2$)	PAKS ($n = 3$)
1	10,00	9,2261	8,9246	8,7487
2	-	10,6263	9,8769	9,5252
3	-	-	10,9031	10,2106
4	-	-	-	11,0721

Bu değerler, $M = 10\text{kg}$ ve $K = 1000\text{N}$ için elde edilmiştir.

Den Hartog tarafından verilen formüllerin esas alındığı yeni tasarım yönteminde PAKS ($n = N$) sistemi için optimum değerlerin bulunmasında şu işlem adımları takip edilir:

Adım 1: AKS'siz halde köprünün temel frekansı $\bar{\omega}_1^{(0)}$ elde edilir.

Adım 2: AKS ($n = 1$) için frekans

$$\omega_1^{(1)} = \frac{\bar{\omega}_1^{(0)}}{1 + \mu_T}$$

olacak şekilde ayarlanır ve bu durum için köprünün ilk iki doğal frekansı $\bar{\omega}_1^{(1)}$ ve $\bar{\omega}_2^{(1)}$ elde edilir. Bu ifadede

$$\mu_T = \frac{\mu}{n}, \quad \mu = \frac{m_T}{m_s}, \quad m_T = \sum_{j=1}^n m_j^{(n)}$$

olarak tanımlıdır. Burada $m_j^{(n)}$ PAKS sistemi içerisindeki j . AKS elemanının, $m_s = m_b L / 2$ ise köprünün kütlesidir.

Adım 3: PAKS ($n = 2$) sistemindeki AKS'ler sırasıyla

$$\omega_1^{(2)} = \frac{\bar{\omega}_1^{(1)}}{1 + \mu_T}, \quad \omega_2^{(2)} = \frac{\bar{\omega}_2^{(1)}}{1 + \mu_T}$$

frekanslarına ayarlanır ve bu durum için köprünün ilk üç doğal frekansı $\bar{\omega}_1^{(2)}$, $\bar{\omega}_2^{(2)}$ ve $\bar{\omega}_3^{(2)}$ elde edilir.

Adım 4: PAKS ($n = 3$) sistemindeki AKS'ler için frekanslar

$$\omega_1^{(3)} = \frac{\bar{\omega}_1^{(2)}}{1 + \mu_T}, \quad \omega_2^{(3)} = \frac{\bar{\omega}_2^{(2)}}{1 + \mu_T}, \quad \omega_3^{(3)} = \frac{\bar{\omega}_3^{(2)}}{1 + \mu_T}$$

olacak şekilde ayarlanır ve bu durum için köprünün ilk dört doğal frekansı $\bar{\omega}_1^{(3)}$, $\bar{\omega}_2^{(3)}$, $\bar{\omega}_3^{(3)}$ ve $\bar{\omega}_4^{(3)}$ elde edilir.

⋮

Adım N: PAKS ($n = N$) sistemindeki AKS'ler için optimum frekans değerleri sırasıyla

$$\omega_1^{(N)} = \frac{\bar{\omega}_1^{(N-1)}}{1 + \mu_T}, \quad \omega_2^{(N)} = \frac{\bar{\omega}_2^{(N-1)}}{1 + \mu_T}, \quad \dots, \quad \omega_N^{(N)} = \frac{\bar{\omega}_N^{(N-1)}}{1 + \mu_T}$$

şeklinde elde edilir. Önerilen yöntemde optimum sönüm oranları tüm AKS elemanları için aynı alınmış olup

$$\xi_T = \sqrt{\frac{8\mu_T}{3(1 + \mu_T)}}$$

formülüyle hesaplanmaktadır.

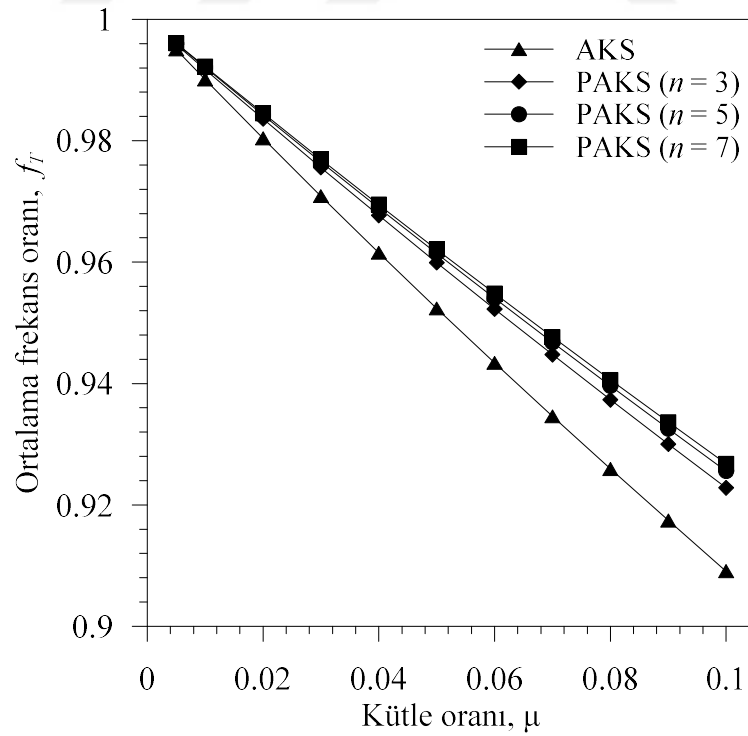
Yukarıda işlem sırası özetlenen yeni tasarım yöntemi kullanılarak elde edilen bazı sonuçlar aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur. Bu grafiklerde

$$\beta_j^{(n)} = \frac{\omega_j^{(n)}}{\bar{\omega}_1^{(0)}}, \quad f_T = \frac{\omega_T}{\bar{\omega}_1^{(0)}}, \quad \Delta_n = \frac{\omega_n^{(n)} - \omega_1^{(n)}}{\omega_T}, \quad \omega_T = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j^{(n)} \quad (142)$$

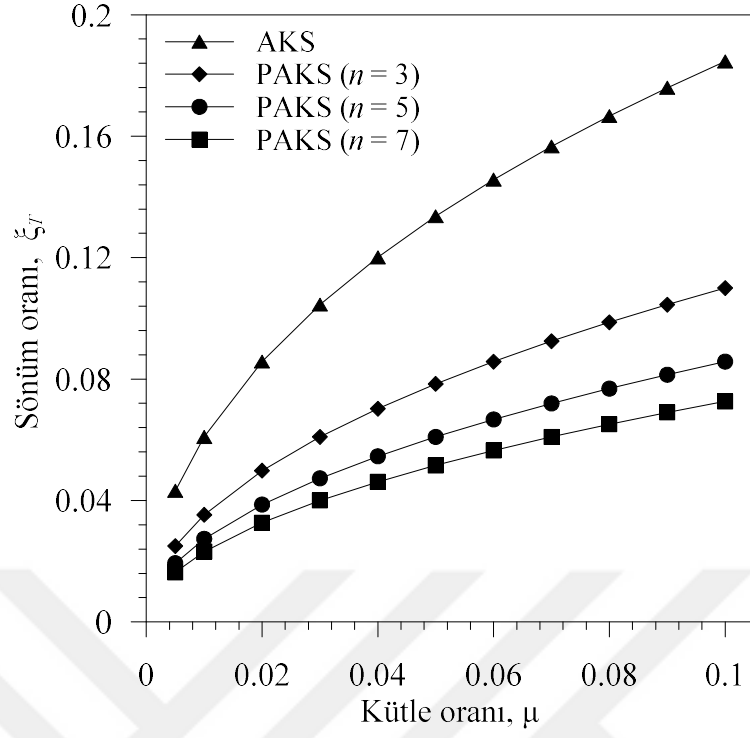
şeklinde tanımlı olup n sönümleyici sistemdeki AKS elemanı sayısı, $\beta_j^{(n)}$ PAKS(n) içerisindeki j . AKS için frekans oranı, ω_T doğal frekansların ortalaması, f_T ortalama frekans oranı, Δ_n frekans genişliğidir.

Şekil 68’de çeşitli AKS sistemleri için ortalama frekans oranının kütle oranıyla değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere kütle oranı arttıkça ortalama frekans oranı azalmaktadır. PAKS sistemindeki eleman sayısı (n) arttıkça ortalama frekans oranı artmaktadır, ancak bu artış miktarı giderek azalmakta ve eğriler birbirine yaklaşmaktadır. Şekil 69’da sönüm oranının kütle oranıyla değişimi verilmiştir. Kütle oranı arttıkça sönüm oranı artmaktadır. Sönümleyici sistemdeki eleman sayısı arttıkça sönüm oranı azalmaktadır. Şekil 70’de frekans genişliğinin kütle oranıyla değişimi verilmiştir. Kütle oranı ve AKS sayısı arttıkça frekans genişliğinin arttığı görülmektedir.

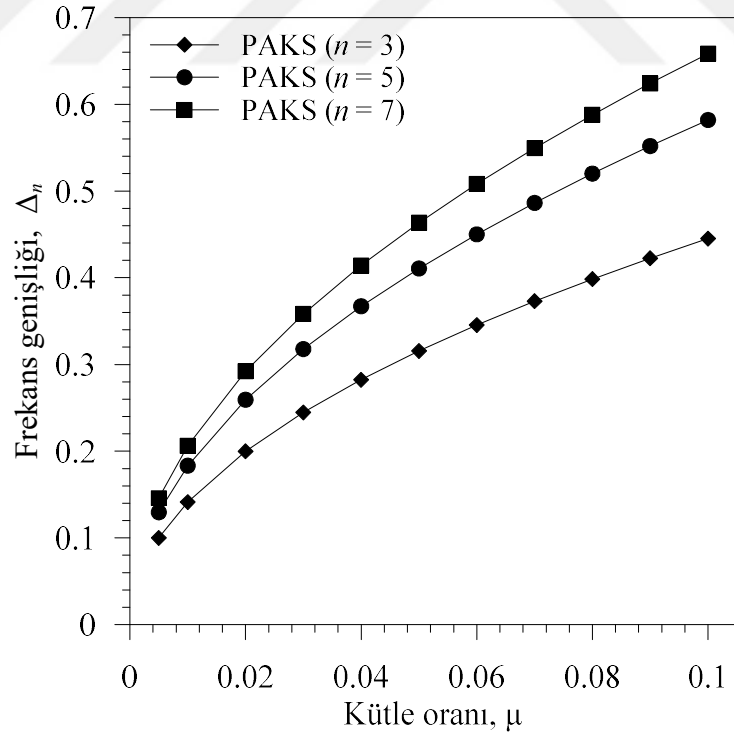
Şekil 71-74’de sırasıyla $n = 1, 3, 5$ ve 7 AKS elemanlı sönümleyicilerde her bir eleman için frekans oranının kütle oranıyla değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere klasik AKS’de kütle oranı arttıkça frekans oranı azalmakta, PAKS sistemlerinde ise bazı AKS elemanları için frekans oranı azalmakta, bazıları için artmaktadır.



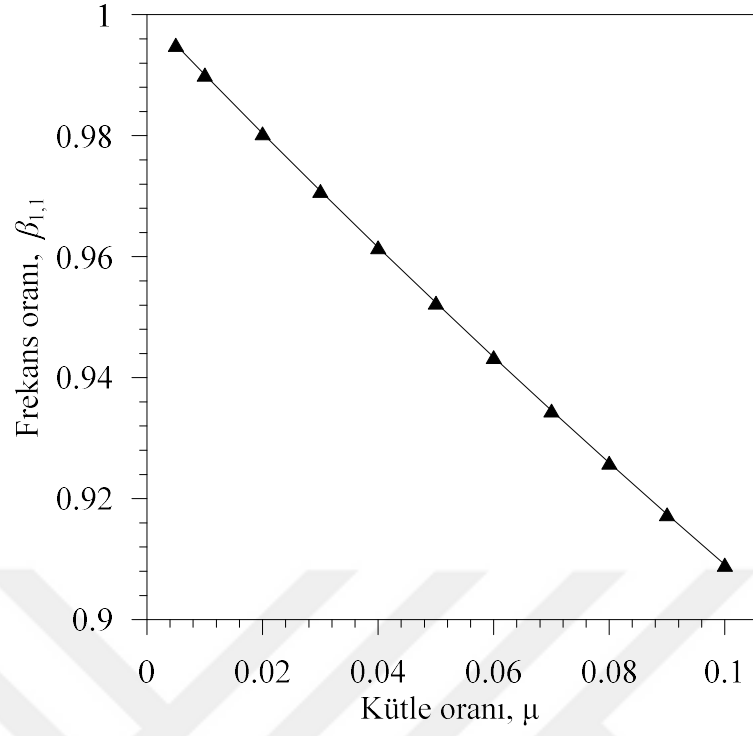
Şekil 68. Ortalama frekans oranının kütle oranıyla değişimi



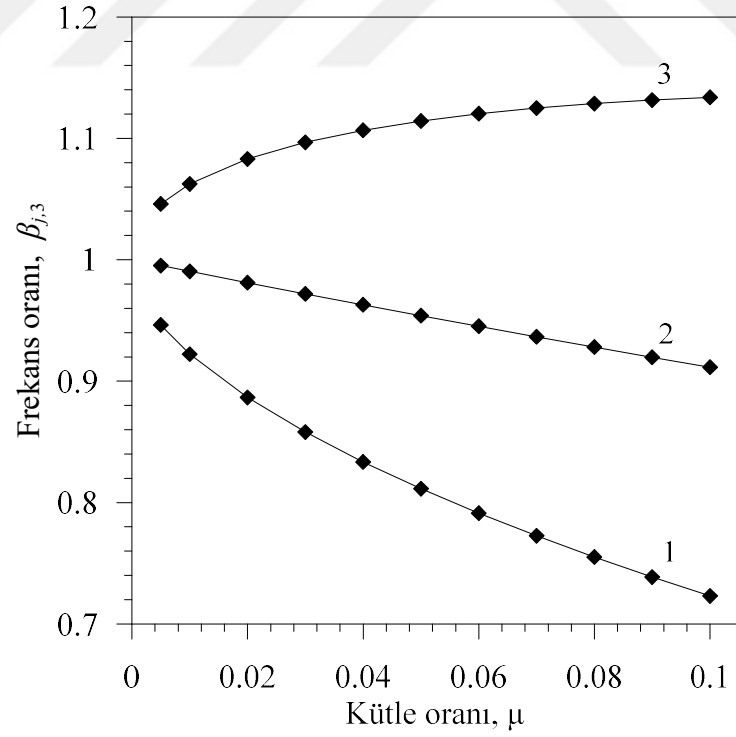
Şekil 69. Sönüm oranının kütle oranıyla değişimi



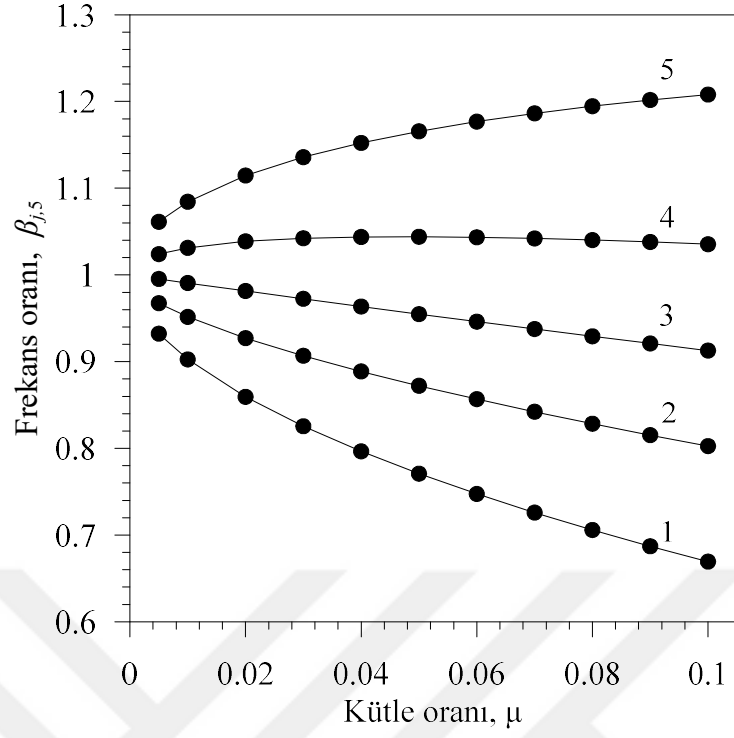
Şekil 70. Frekans genişliğinin kütle oranıyla değişimi



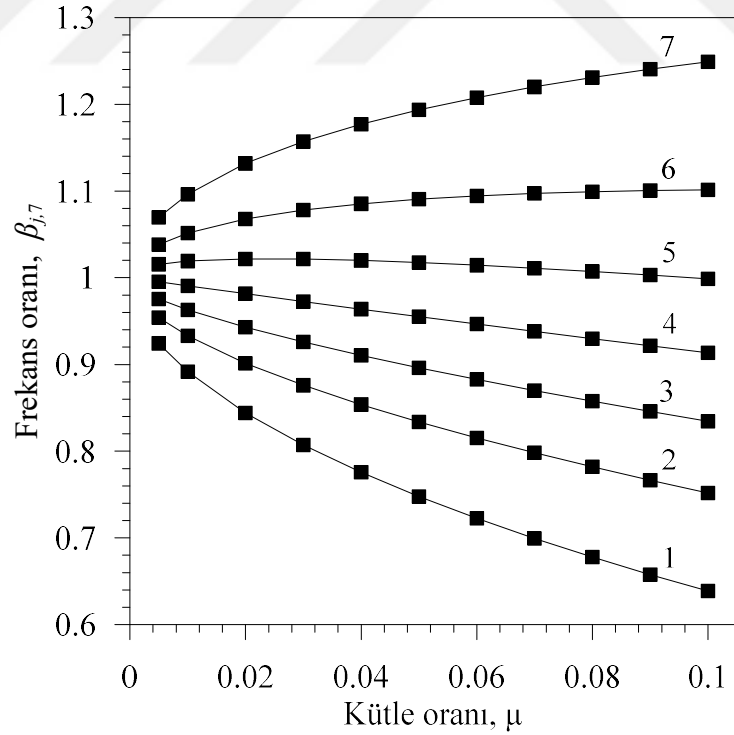
Şekil 71. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (AKS ($n = 1$))



Şekil 72. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (PAKS ($n = 3$))



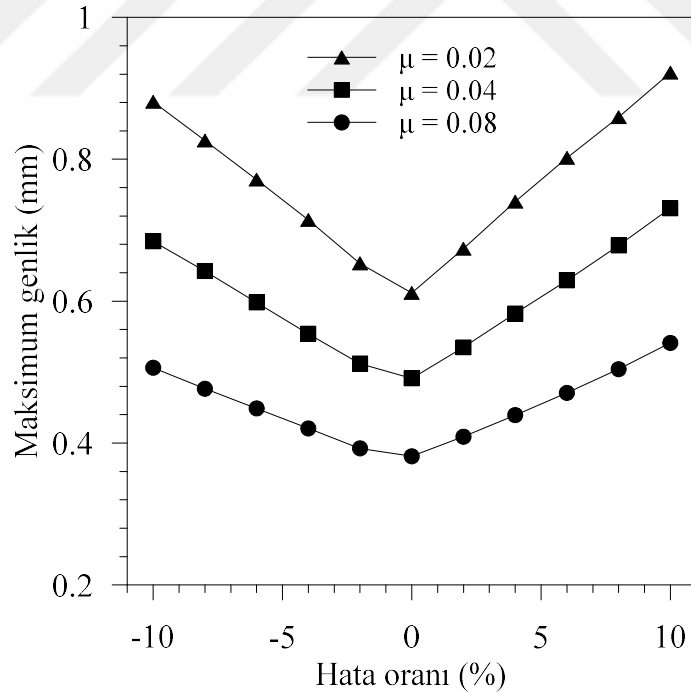
Şekil 73. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (PAKS ($n = 5$))



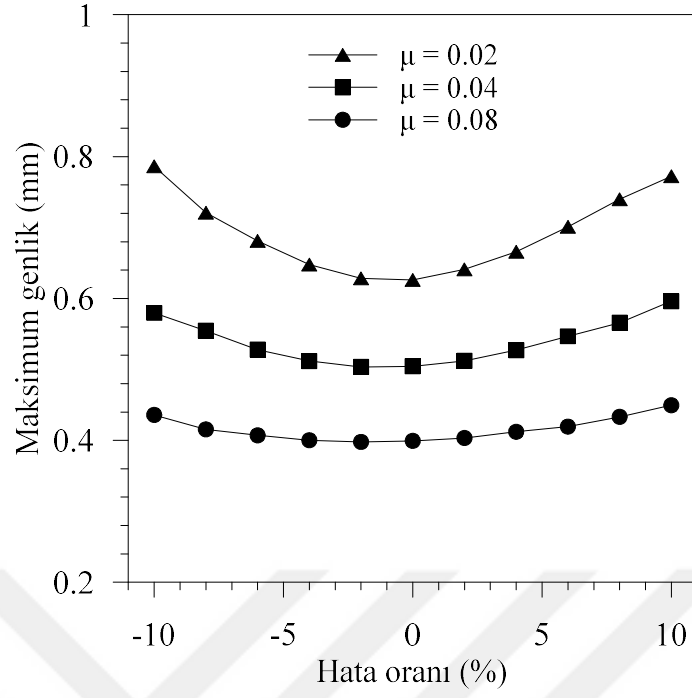
Şekil 74. Frekans oranının kütle oranıyla değişimi (PAKS ($n = 7$))

Şekil 75 ve 76’da frekans kayması durumunda AKS ve PAKS ($n = 7$) sistemlerinin kontrol performansları farklı kütle oranları için verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere, önerilen yöntemle tasarlanan PAKS ($n = 7$) sistemi için elde edilen maksimum genlik eğrileri daha düzdür. Özellikle kütle oranı arttıkça bu daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu durum, PAKS sisteminin frekans kaymasına karşı daha az hassas olduğunu göstermektedir. Yine şekillerden, klasik AKS’nin frekans kaymasına karşı son derece hassas olduğu görülmektedir.

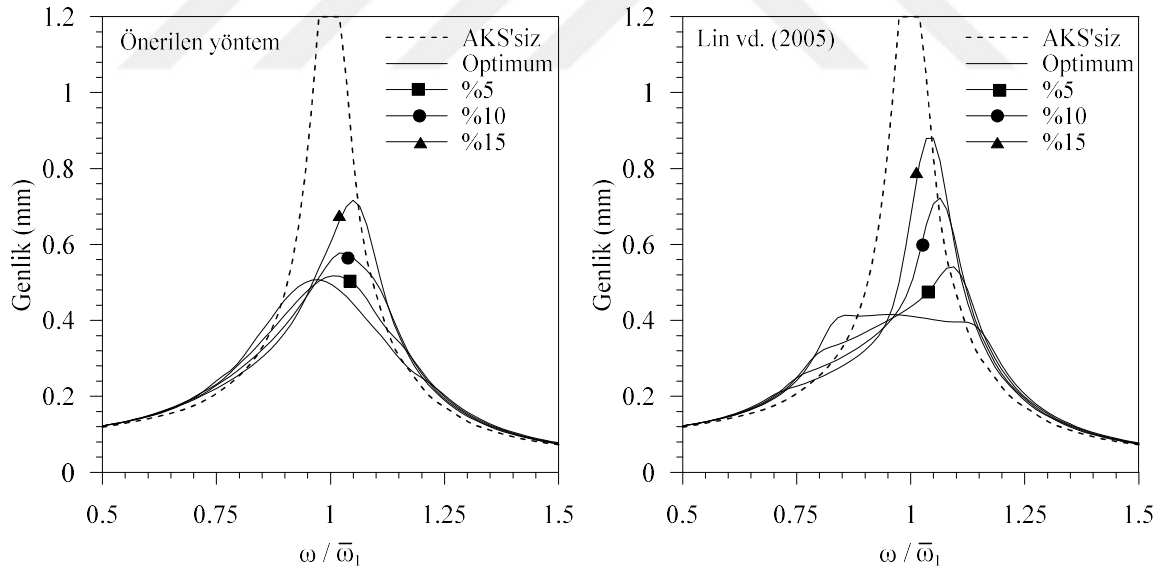
Şekil 77’de, önerilen yöntemle tasarlanan PAKS ($n = 7$) sisteminin kontrol performansı literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntemle elde edilen optimum tasarımda parametreleri ile Lin vd. (2005) tarafından optimizasyon yardımıyla elde edilenler Tablo 7’de sunulmuştur. Tablodan görüleceği üzere, burada önerilen yöntemle elde edilen optimum sönüm oranı daha büyük ve ayrıca frekans aralığı da daha geniştir. Şekle dikkat edilirse, bu çalışmada önerilen yöntemle tasarlanan AKS sistemi, frekans kayması durumunda diğerine göre titreşim kontrolünde daha başarılıdır.



Şekil 75. Çeşitli kütle oranları için maksimum genliğin frekans kaymasıyla değişimi (AKS($n = 1$))



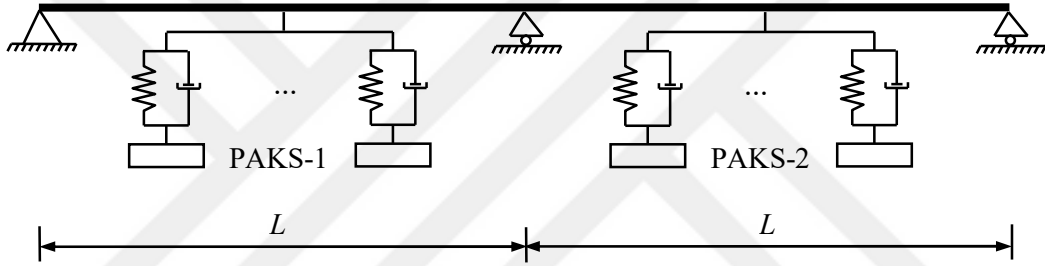
Şekil 76. Çeşitli kütle oranları için maksimum genliğin frekans kaymasıyla değişimi (PAKS ($n = 7$))



Şekil 77. Önerilen yöntemle tasarlanan PAKS ($n = 7$) sisteminin kontrol performansının literatürle karşılaştırılması

2.4.2. İki Açıklıklı Köprülere Uygulama

Bu problem için hareketli yük modeli olarak Eurocode (2002)'de tanımlı HSLM-A8 treni dikkate alınmıştır. Bu tren için aks genişliği 25m, trenin toplam uzunluğu 387,5m ve her bir akstan köprüye aktarılan yük 190kN dur. İncelenen iki açıklıklı köprü için $L = 20m$, $EI = 2,5 \times 10^{10} Nm^2$, $m_b = 34088 kg/m$ ve $\xi = \%2,5$ olarak alınmıştır (Luu vd., 2012). Tablo 8'de trenin rezonans hızları ile köprünün doğal frekansları verilmiştir. Burada i mod numarasını, j ise i . moda karşılık gelen rezonans hızını göstermektedir. Köprünün her iki açıklığına yerleştirilen sönümleyiciler sırasıyla PAKS-1 ve PAKS-2 olarak adlandırılmışlardır (Şekil 78).



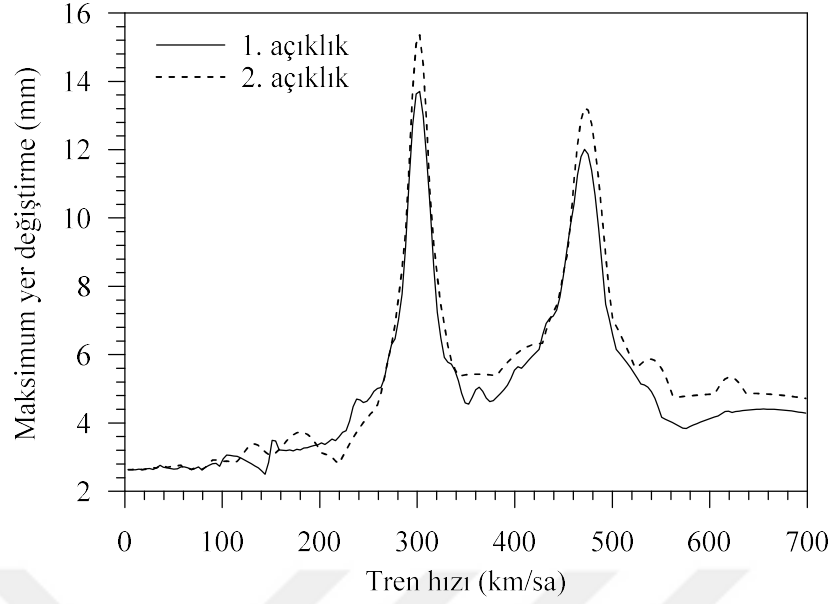
Şekil 78. İki açıklıklı köprü üzerinde PAKS sistemlerinin yerleştirilmesi

Tablo 7. PAKS ($n = 7$) sistemi için iki farklı yöntemle elde edilen optimum parametreler

j	Önerilen yöntem		Lin vd. (2005)	
	$\beta_{j,7}$	ξ_T (%)	$\beta_{j,7}$	ξ_T (%)
1	0,776		0,850	
2	0,854		0,884	
3	0,911		0,920	
4	0,964	4,616	0,959	3,9
5	1,020		1,001	
6	1,085		1,048	
7	1,177		1,104	

Tablo 8. HSLM-A8 treni için rezonans hızları ve incelenen köprüye ait doğal frekanslar

Mod (i)	$\bar{\omega}_i$ (rad/sn)	Rezonans hızları (km/sa)		
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
1	21,1305	302,672	151,336	100,891
2	33,0163	472,924	236,462	157,641
3	84,5218	1210,686	605,343	403,562



Şekil 79. İki açıklıklı köprüde açıklık ortasındaki yer değiştirmeler

Tablo 9. Köprü üzerinde farklı sayıda paralel bağlı AKS olması durumunda ilk on doğal frekans (rad/sn)

Mod.	AKS'siz	AKS ($n = 1$)	PAKS ($n = 2$)
1	21,13 (0)	19,59 (1,3)	18,98 (1,1)
2	33,01 (76)	22,22 (1,5)	20,84 (0)
3	84,52 (0)	32,14 (36)	22,68 (1,7)
4	106,97 (0,7)	34,15 (37)	31,80 (19)
5	190,17 (0)	84,52 (0)	33,13 (36)
6	223,19 (11)	106,98 (0,7)	34,65 (18)
7	338,09 (0)	190,20 (0)	84,53 (0)
8	381,67 (0,2)	223,21 (11)	106,99 (0,7)
9	528,25 (0)	338,09 (0)	190,17 (0)
10	582,40 (4,3)	381,67 (0,2)	223,18 (11)

Parantez içerisindeki sayılar, SAP2000 programıyla elde edilen modal kütle katılım oranlarıdır. n ise her bir açıklık üzerindeki toplam AKS sayısıdır.

Şekil 79'da iki açıklıklı köprünün her bir açıklığının ortasındaki yer değiştirmelerin tren hızıyla değişimi verilmiştir. Şekle dikkat edilirse, eğriler üzerinde iki pik noktası bulunmaktadır. Bu pik noktalardan birincisi, yaklaşık 300km/sa hız değerinde elde edilmiş olup bu değer Tablo 8'de 1. moda karşılık gelen 1. rezonans hızıdır. İkinci pik nokta ise yaklaşık 470km/sa hız değerinde elde edilmiştir. Bu değer ise 2. moda karşılık gelen 1. rezonans hızıdır. Yine şekilden, ikinci açıklıktaki yer değiştirmelerin birinci açıklıktakilerden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu sebeple, bu kısımda 2. açıklığa ait bulgulara yer verilmiştir.

Tablo 9’da, köprü üzerinde AKS olmaması ($n = 0$) ve her bir açıklık üzerinde sırasıyla 1 ve 2 adet AKS olması durumlarında ilk on doğal frekans ve bunlara ait modal kütle katılım oranları verilmiştir. Hesaplarda $\mu = \%2$ olarak alınmıştır. Köprü üzerinde AKS yok iken ilk iki doğal frekans 21,13 ve 33,01rad/sn ve bu modlara ait toplam modal kütle katılım oranı ise %76’dır. Bu durum dinamik davranış üzerinde en etkili modların ilk iki mod olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Şekil 33’de daha açık görülmektedir. Her iki açıklığa bir AKS eklendiğinde, bu yeni sistemin ilk dört doğal frekansı 19,59, 22,22, 32,14 ve 34,15rad/sn olup, AKS’siz sistemin 1. ve 2. doğal frekansları bu dört değer arasında kalmaktadır. Bu dört modun modal kütle katılım oranları toplamı ise AKS’siz haldeki 1. ve 2. modların toplam modal kütle katılım oranını vermektedir. Yani, davranış üzerinde bu dört mod etkili olmaktadır. Böylece köprü açıklıklarına eklenen her yeni AKS için davranış üzerinde etkili modların sayısının iki tane daha arttığı, Tablo 9’da italik olarak verilen sonuçlar incelendiğinde kolayca görülebilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, AKS’li bütün sistemlerde davranışta etkili modlara ait frekansların AKS’siz haldeki ilk iki doğal frekansı kapsıyor olmalarıdır. Tablo 9’dan ulaşılan bu sonuç genelleştirildiğinde, her bir açıklık üzerine n adet paralel AKS yerleştirilmesi durumunda AKS’siz köprünün 1. ve 2. doğal frekanslarını kapsayacak şekilde davranış üzerinde etkili $2n+2$ adet mod elde edilmektedir.

İki açıklıklı köprülerde, önerilen yöntem kullanılarak PAKS sistemlerinin optimum değerlerinin bulunmasında aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir:

Adım 1: PAKS-1 ve PAKS-2 sistemleri için kütle oranlarının belirlenmesi (Yang ve Yau, 2004a)

$$\mu_1 = \frac{m_1}{M_1} = \frac{\mu M_1}{M_1 + r M_2}, \quad \mu_2 = \frac{m_2}{M_2}, \quad \mu = \frac{m_1 + m_2}{M_1}, \quad r = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

Burada, m_1 ve m_2 sırasıyla 1. ve 2. açıklıklardaki AKS elemanlarının toplam kütlelerini göstermekte olup bilinmemektedir. Optimum değerlerin elde edilmesinde, PAKS-1 ve PAKS-2 sistemlerinin toplam kütleleri ($m_1 + m_2$) 13635kg alınmıştır (Luu vd., 2012). Bu değer, köprünün 1. moduna karşılık gelen modal kütlelerin (M_1) %2 sine eşittir (Luu vd., 2012). $M_1 = m_b L$, $M_2 = 2 m_b L$ dir. m_1 ve m_2 değerleri, 1. ve 2. modda yer değiştirme için bulunan pik değerlerini yaklaşık olarak eşit yapacak şekilde seçilmiştir (Yau ve Yang, 2004a).

Adım 2: AKS-1 ve AKS-2 için tasarım ($n = 1$): Önce AKS'siz köprünün ilk iki doğal frekansı $\bar{\omega}_1^{(0)}$ ve $\bar{\omega}_2^{(0)}$ hesaplanır. Ardından, AKS-1 ve AKS-2 sırasıyla $\bar{\omega}_1^{(0)}$ ve $\bar{\omega}_2^{(0)}$ göre ayarlanır. Bu iki sönümleyici için optimum frekans ve sönüm oranları

$$\omega_1^{(1)} = \frac{\bar{\omega}_1^{(0)}}{1 + \mu_{1T}}, \quad \omega_2^{(1)} = \frac{\bar{\omega}_2^{(0)}}{1 + \mu_{2T}}, \quad f_1^{(1)} = \frac{\omega_1^{(1)}}{\bar{\omega}_1^{(0)}}, \quad f_2^{(1)} = \frac{\omega_2^{(1)}}{\bar{\omega}_1^{(0)}},$$

$$\xi_1^{(1)} = \sqrt{\frac{3\mu_{1T}}{8(1 + \mu_{1T})}}, \quad \xi_2^{(1)} = \sqrt{\frac{3\mu_{2T}}{8(1 + \mu_{2T})}}, \quad \mu_{1T} = \frac{\mu_1}{n}, \quad \mu_{2T} = \frac{\mu_2}{n}$$

şeklinde elde edilir. Bu durum için köprünün ilk dört doğal frekansı $\bar{\omega}_i^{(1)}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) hesaplanır.

Adım 3: PAKS-1 ve PAKS-2 için tasarım ($n = 2$): PAKS-1 sistemi $\bar{\omega}_1^{(1)}$ ve $\bar{\omega}_2^{(1)}$ frekanslarına göre, PAKS-2 sistemi ise $\bar{\omega}_3^{(1)}$ ve $\bar{\omega}_4^{(1)}$ frekanslarına göre ayarlanır. Buna göre optimum frekans ve sönüm oranları

$$\omega_j^{(2)} = \frac{\bar{\omega}_j^{(1)}}{1 + \mu_{1T}}, \quad \xi_j^{(2)} = \sqrt{\frac{3\mu_{1T}}{8(1 + \mu_{1T})}}, \quad \mu_{1T} = \frac{\mu_1}{n} \quad (j = 1, 2) \text{ PAKS-1 için,}$$

$$\omega_j^{(2)} = \frac{\bar{\omega}_j^{(1)}}{1 + \mu_{2T}}, \quad \xi_j^{(2)} = \sqrt{\frac{3\mu_{2T}}{8(1 + \mu_{2T})}}, \quad \mu_{2T} = \frac{\mu_2}{n} \quad (j = 3, 4) \text{ PAKS-2 için,}$$

$$f_j^{(2)} = \frac{\omega_j^{(2)}}{\bar{\omega}_1^{(0)}} \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

şeklinde elde edilir. Ardından, bu durum için köprünün ilk altı doğal frekansı $\bar{\omega}_i^{(2)}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) hesaplanır.

⋮

Adım N: PAKS-1 ve PAKS-2 için tasarım ($n = N$): Her iki açıklıktaki sönümleyici sistemleri için optimum frekanslar ve sönüm oranları

$$\omega_j^{(N)} = \frac{\bar{\omega}_j^{(N-1)}}{1 + \mu_{1T}}, \quad \xi_j^{(N)} = \sqrt{\frac{3\mu_{1T}}{8(1 + \mu_{1T})}} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \text{ PAKS-1 için,}$$

$$\omega_j^{(N)} = \frac{\bar{\omega}_j^{(N-1)}}{1 + \mu_{2T}}, \quad \xi_j^{(N)} = \sqrt{\frac{3\mu_{2T}}{8(1 + \mu_{2T})}} \quad (j = N + 1, N + 2, \dots, 2N) \text{ PAKS-2 için,}$$

$$\mu_{1T} = \frac{\mu_1}{N}, \quad \mu_{2T} = \frac{\mu_2}{N},$$

$$f_j^{(N)} = \frac{\omega_j^{(N)}}{\bar{\omega}_1^{(0)}} \quad (j = 1, 2, \dots, 2N)$$

şeklinde elde edilir.

Yukarıda işlem sırası özetlenen yeni tasarım yöntemi kullanılarak iki açıklıklı bir köprü için elde edilen bazı sonuçlar aşağıdaki sunulmuştur. Tablo 10’da çeşitli AKS sistemleri için önerilen yöntem kullanılarak hesaplanan optimum değerler verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, Luu vd. (2012) tarafından optimizasyon tekniği kullanılarak elde edilen optimum değerler ise Tablo 11’de verilmiştir. Çalışmada önerilen yöntemde, tasarım kolaylığı açısından her bir açıklıktaki PAKS sistemleri için sönüm oranları kendi içerisinde eşit alınmaktadır. Ayrıca, PAKS sistemini meydana getiren AKS elemanlarının kütleleri de kendi içerisinde eşit alınmıştır. Dikkat edilirse, bu çalışmada önerilen yöntemle elde edilen sönüm oranları, 1. açıklıkta Luu vd. (2012) çalışmasında elde edilenlerden daha büyük iken 2. açıklıkta daha küçüktür. Frekans oranlarının ise son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Buna göre çalışmada önerilen ve herhangi bir optimizasyon tekniği kullanmadan basit formüllerle optimum değerlerin elde edilebildiği yöntemin son derece kullanışlı ve güvenli olduğu görülmektedir.

Şekil 80’de sırasıyla çeşitli PAKS sistemleri için ikinci açıklıktaki maksimum yer değiştirmelerin tren hızıyla değişimi görülmektedir. Burada sonuçlar, Luu vd. (2012) tarafından verilenlerle karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere, sonuçlar gayet uyumludur. Tablo 12’de yer değiştirmeler için verilen pik değerlerin karşılaştırılmasından da bu durum açık olarak görülebilir. Ayrıca PAKS sistemlerinin yer değiştirmelerdeki azaltma yüzdeleri de Tablo 12’de verilen değerlerden görüleceği üzere oldukça yakındır.

Tablo 10. Önerilen yöntem kullanılarak elde edilen optimum parametreler

Sönümleyici	j	PAKS-1			PAKS-2		
		$\mu_T(\%)$	f	$\xi(\%)$	$\mu_T(\%)$	f	$\xi(\%)$
AKS ($n = 1$)	1	0,0163	0,9840	7,750	0,0037	1,5596	2,640
PAKS ($n = 2$)	1	0,0081	0,9197	5,500	0,0019	1,5199	1,870
	2	0,0081	1,0432	5,500	0,0019	1,6148	1,870
PAKS ($n = 3$)	1	0,0054	0,8936	4,500	0,0013	1,5041	1,520
	2	0,0054	0,9808	4,500	0,0013	1,5673	1,520
	3	0,0054	1,0674	4,500	0,0013	1,6385	1,520
PAKS ($n = 5$)	1	0,0033	0,8671	3,490	0,0007	1,4887	1,180
	2	0,0033	0,9306	3,490	0,0007	1,5320	1,180
	3	0,0033	0,9805	3,490	0,0007	1,5686	1,180
	4	0,0033	1,0303	3,490	0,0007	1,6084	1,180
	5	0,0033	1,0908	3,490	0,0007	1,6630	1,180

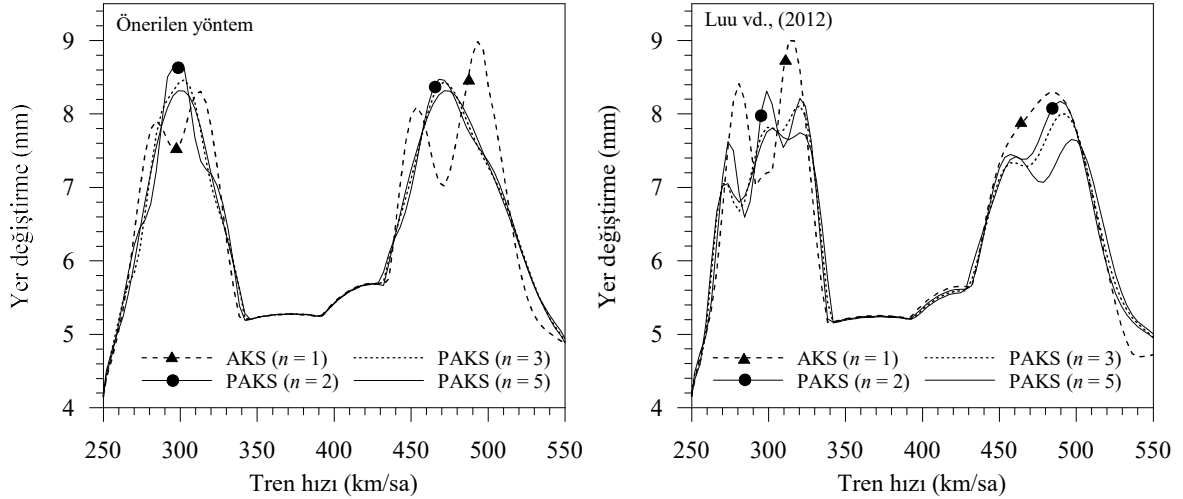
Tablo 11. Luu vd. (2012) tarafından verilen optimum parametreler

Sönümleyici	j	PAKS-1			PAKS-2		
		μ_T (%)	f	ξ (%)	μ_T (%)	f	ξ (%)
AKS ($n = 1$)	1	1,421	0,987	4,553	0,579	1,546	7,128
PAKS ($n = 2$)	1	0,775	0,949	2,872	0,289	1,553	4,699
	2	0,651	1,035	3,132	0,285	1,566	4,737
PAKS ($n = 3$)	1	0,536	0,933	2,007	0,202	1,518	3,265
	2	0,472	0,995	2,139	0,191	1,563	3,361
	3	0,419	1,056	2,271	0,181	1,608	3,457
PAKS ($n = 5$)	1	0,333	0,915	1,252	0,125	1,497	2,049
	2	0,306	0,954	1,306	0,119	1,531	2,095
	3	0,283	0,993	1,359	0,114	1,564	2,141
	4	0,262	1,032	1,413	0,109	1,598	2,187
	5	0,243	1,071	1,466	0,105	1,632	2,233

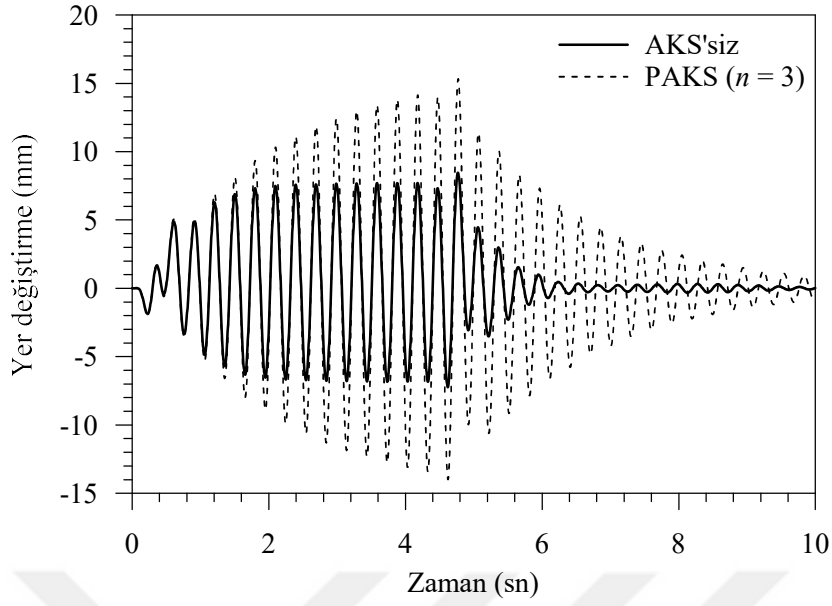
Tablo 12. İkinci açıklıkta maksimum yer değiştirmeler

Sönümleyici	Önerilen yöntem	Luu vd. (2012)
AKS ($n = 1$)	9,0022 (41,381)	8,9843 (41,497)
PAKS ($n = 2$)	8,3121 (45,875)	8,6667 (43,565)
PAKS ($n = 3$)	8,1145 (47,161)	8,4650 (44,879)
PAKS ($n = 5$)	7,8036 (49,186)	8,3169 (45,843)

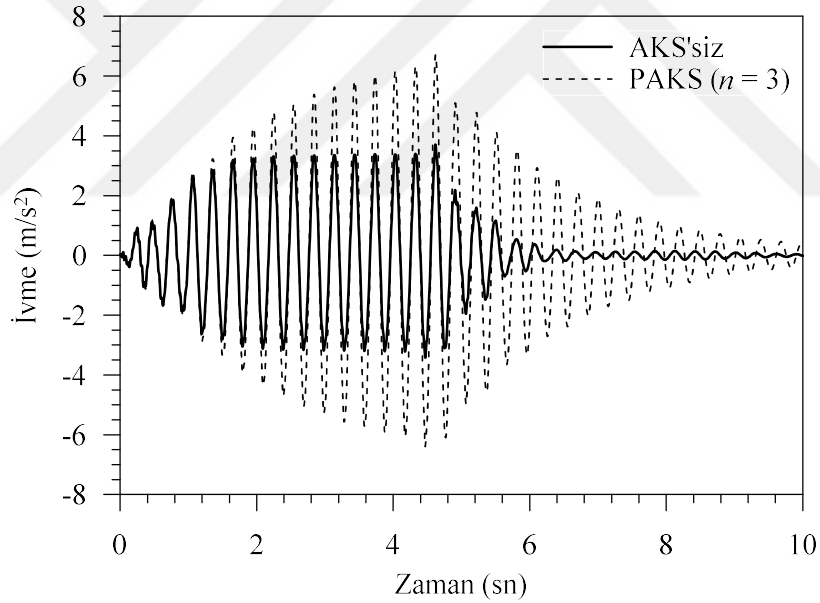
Parantez içindeki sayılar, yer değiştirmelerdeki azalma oranlarını (%) göstermektedir



Şekil 80. Farklı AKS sistemleri için elde edilen yer değiştirme değerleri

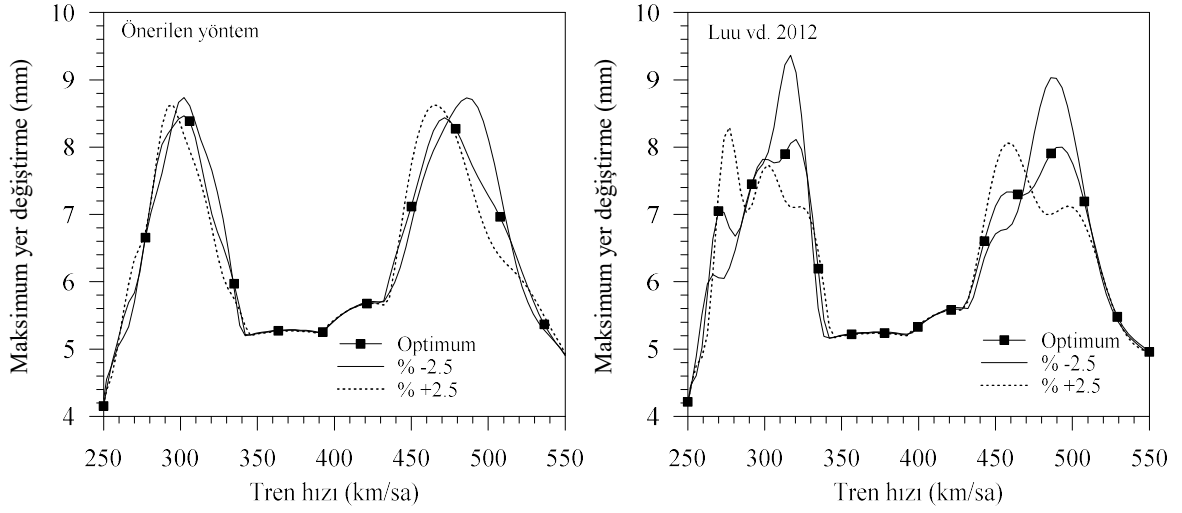


Şekil 81. Yer değiştirme-zaman eğrisi

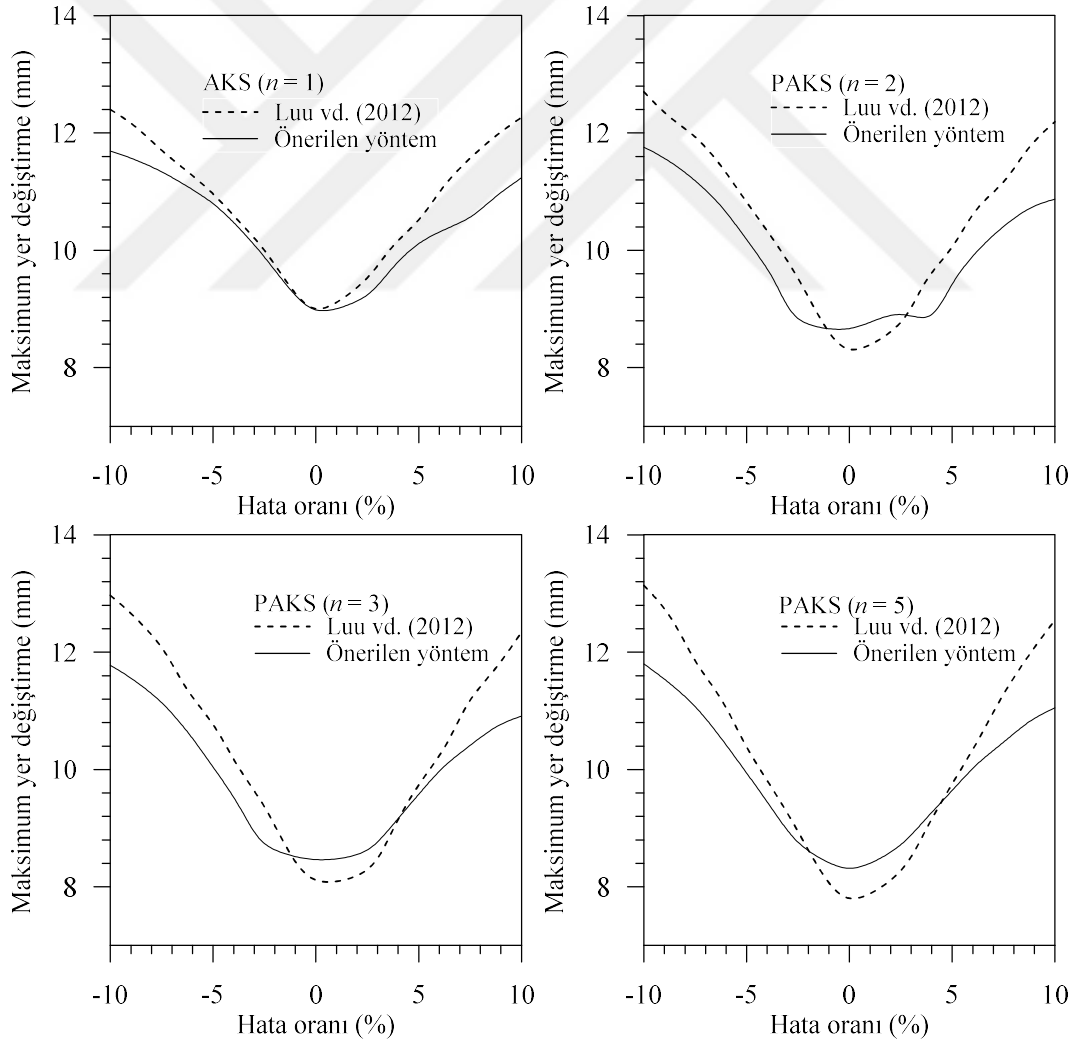


Şekil 82. İvme-zaman eğrisi

Şekil 81 ve 82'de, trenin $v_{1,1} = 302,672$ km/sa rezonans hızıyla hareket etmesi durumunda ikinci açıklığın ortasındaki yer değiştirme ve ivmenin zamanla değişimi verilmiştir. PAKS ($n = 3$) sisteminin kullanılmasıyla maksimum ivme değeri %44,71 ve maksimum yer değiştirme değeri de %44,81 azalmıştır. Bu sonuç, önerilen yonteme göre tasarlanan AKS sisteminin yer değiştirmenin yanında ivme değerlerinin de azaltılmasında da etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 83. Frekans kaymasının PAKS sisteminin kontrol performansı üzerindeki etkisi



Şekil 84. Çeşitli AKS sistemlerinin frekans kayması durumunda kontrol performanslarının karşılaştırılması

Şekil 83'te, frekans kayması durumunda önerilen yöntemle tasarlanmış PAKS sisteminin kontrol performansındaki değişim literatürle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüleceği üzere, bu çalışmada önerilen yöntemle tasarlanan AKS sistemi frekans kayması durumundan çok az etkilenmektedir.

Şekil 84'de önerilen yöntemle tasarlanan çeşitli AKS sistemlerinin frekans kayması durumundaki kontrol performansları Luu vd. (2012) ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüleceği üzere, hata oranının %2.5 ten büyük olması durumunda bu yöntemle göre tasarlanmış AKS sistemleri daha iyi kontrol performansı göstermektedirler.



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek hızlı tren (YHT) geçişleri altındaki demiryolu köprülerinin rezonans titreşimlerinin azaltılmasında paralel bağlı (PAKS) ve seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin (SAKS) kontrol performansları araştırılmıştır. Çalışmada tek açıklıklı ve iki açıklıklı köprüler için analitik çözümler yapılmıştır. Tren modeli olarak gerçek hayatta kullanımda olan Eurostar ve TGV trenleri ile Eurocode'da verilen HSLM-A8 treni kullanılmıştır. Ele alınan sönümleyici sistemlerinin optimum tasarım değerleri, Matlab programının *fmincon* fonksiyonu yardımıyla elde edilmiştir. Bu fonksiyon, optimizasyon işlemi Sıralı Kuadratik Programlama (SKP) algoritmasını kullanmaktadır. Ayrıca, PAKS sistemleri için yeni ve basit bir tasarım yöntemi önerilmiş ve doğruluğu hem tek açıklıklı hem de iki açıklıklı köprülerde test edilmiştir. Bu yöntem, Den Hartog (1956) tarafından tek serbestlik dereceli sistemler için verilen basit formülleri esas almaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar sıralanabilir:

1. Kısa ve orta açıklıklı ve tek açıklığa sahip köprülerin dinamik davranışı üzerinde 1. modun, iki açıklığa sahip köprülerinkinde ise ilk iki modun etkili olduğu görülmüştür. Bu sebeple, AKS tasarımlarında buna dikkat etmek gerekmektedir.
2. Tren geçişleri etkisindeki köprülerin dinamik davranışı üzerinde köprü açıklığının vagon uzunluğuna (veya karakteristik aks mesafesi) oranı L / d son derece etkilidir. Köprüde rezonans titreşimlerine sebep olan tren hızları, bu orana bağlı olarak elde edilmektedir. Bu oranın belli değerlerde olması ($L / d = 1,5$ ve $2,5$) halinde köprüde rezonans titreşimlerinin meydana gelmesi önlenmektedir.
3. Tren hızlarının 200 ila 320km/sa arasında olması durumunda köprüde maksimum yer değiştirmeler, eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve ivmelere ait etki faktörlerinin kolay hesabı için L / d değişkenine bağlı formüller önerilmiştir. Bu formüller, dinamik analiz sonuçları yardımıyla türetildiğinden güvenilir tarafta kalmaktadır.
4. PAKS sistemlerinde, sistemdeki AKS sayısının artması sönüm oranını azaltmakta, kontrol edilebilen frekans aralığını ise arttırmaktadır. Bütün AKS sistemlerinde kontrol edilmek istenen frekans (köprü temel frekansı), AKS sistemiyle kontrol edilebilen frekans aralığının içine düşmektedir.

5. SAKS ve PAKS ($n = 7$) sistemleri hemen hemen aynı kontrol performansını göstermektedirler.
6. Optimum değerlerden sapmalar olması durumunda PAKS ve SAKS sistemlerinin kontrol performansları çok etkilenmemektedir. Klasik AKS sistemi ise bu tip sapmalara karşı son derece hassastır. Özellikle hata yüzdesinin $[-5,5]$ aralığı içinde kaldığı durumlarda SAKS sisteminin bundan en az etkilendiği ve bu aralıkta genlik eğrisinin yataya yakın olduğu görülmektedir.
7. PAKS sistemlerinin optimum tasarımı için basit ve kullanımı kolay bir yöntem önerilmiş ve doğruluğu test edilmiştir. Yöntem, tek açıklıklı köprüler için literatürdeki yöntemlere göre daha büyük sönüm oranları ve daha geniş frekans aralığı sağlamaktadır. İki açıklıklı köprülerde ise sonuçlar literatürle gayet uyumludur. Önerilen yöntemle tasarlanan PAKS sistemleri, frekans kayması halinde titreşim kontrolünde daha başarılı performans göstermektedirler. Kütle oranı arttıkça, önerilen yöntemle tasarlanan PAKS sistemlerinin frekans kaymalarından daha az etkilendikleri görülmüştür.
8. Literatürle yapılan karşılaştırmalarda, önerilen yöntemle yapılan tasarımın, ana sistemin sönümünden bağımsız yapılması sebebiyle, hem sönümlü hem de sönümsüz sistemlerde başarıyla kullanılabilceği görülmüştür.

Tezden elde edilen sonuçlar ışığında ileride ele alınabilecek çalışmalar için şu önerilerde bulunulabilir:

1. Bu çalışmada kısa ve orta açıklıklı köprüler dikkate alınmıştır. Büyük açıklıklı köprüler (asma köprü, eğik kablolu köprü) için çalışma tekrarlanabilir.
2. Tren modelinde kütle atalet etkileri dikkate alınmamıştır. Bunlar dikkate alınabilir. Bu şekilde yol yüzeyindeki pürüzlülükler de hesaba katılmış olur.
3. Çalışma, üç boyutlu tren-köprü modeli üzerinde tekrarlanabilir. Bu şekilde olası tüm serbestlik dereceleri dikkate alınmış olur.
4. Çalışmada analitik çözümler yapılmıştır. Araç-köprü-AKS sistemi sonlu elemanlar metoduyla modellenerek sayısal çözüm yapılabilir.
5. Optimum PAKS tasarımı için önerilen yöntem, daha geniş yelpazede farklı optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılabilir.

4. KAYNAKLAR

- Akin, J., E. ve Mofid, M., 1989. Numerical Solution for Response of Beams with Moving Mass, Journal of Structural Engineering, 115, 1, 120-131.
- Araz, O. ve Kahya, V., 2015. Hızlı Tren Köprülerinin Rezonans Titreşimlerinin Azaltılmasında Seri Bağlı Ayarlı Kütle Sönümleyiciler, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Trabzon, 105-112.
- Au, F., T., K., Wang, J., J. ve Cheung, Y., K., 2001a. Impact Study of Cable-Stayed Bridge under Railway Traffic using Various Models, Journal of Sound and Vibration, 240, 3, 447-465.
- Au, F., T., K., Cheng, Y., S. ve Cheung, Y., K., 2001b. Effects of Random Road Surface Roughness and Long-Term Deflection of Prestressed Concrete Girder and Cable-Stayed Bridges on Impact due to Moving Vehicles, Computers and Structures, 79, 853-872.
- Baeza, L. ve Ouyang, H., 2009. Vibration of a Truss Structure Excited by a Moving Oscillator, Journal of Sound and Vibration, 321, 721-734.
- Bandivadekar, T., P. ve Jangid, R., S., 2012. Optimization of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control of System under External Excitation, Journal of Vibration and Control, 19, 12, 1854-1871.
- Biggs, J., M., 1964. Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York.
- Cantero, D. ve Karoumi, R., 2016. Numerical Evaluation of the Mid-Span Assumption in the Calculation of Total Load Effects in Railway Bridges, Engineering Structures, 107, 1-8.
- Chatterjee, P., K., Datta, T., K. ve Surana, C., S., 1994. Vibration of Suspension Bridges under Vehicular Movement, Journal of Structural Engineering, 120, 3, 681-703.
- Chatterjee, P., K. ve Datta, T., K., 1995. Dynamic Analysis of Arch Bridges under Travelling Loads, Int. J. Solids Structures, 32, 11, 1585-1594.
- Chen, Y., H. ve Chen, D., S., 2004. Timoshenko Beam with Tuned Mass Dampers to Moving Loads, J. Bridge Eng., 9, 167-177.
- Cheung, Y., K., Au, F., T., K., Zheng, D., Y. ve Cheng, Y., S., 1999. Vibration of Multi-Span Non-Uniform Bridges under Moving Vehicles and Trains by using Modified Beam Vibration Functions, Journal of Sound and Vibration, 228, 3, 611-628.
- Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.

- Chu, K., H., Garg, V., K. ve Wang, T., L., 1986. Impact in Railway Prestressed Concrete Bridges, J. Struct. Eng., 112, 5, 1036-1051.
- Debnath, N., Deb, S., K. ve Dutta, A., 2015. Multi-Modal Vibration Control of Truss Bridges with Tuned Mass Dampers under General Loading, Journal of Vibration and Control, 22, 20, 4121-4140.
- Den Hartog, J., P., 1956. Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, New York.
- Dimitrakopoulos, E., G. ve Zeng, Q., 2015. A Three-Dimensional Dynamic Analysis Scheme for the Interaction between Trains and Curved Railway Bridges, Computers and Structures, 149, 43-60.
- Dinh, V., N., Kim, K., D. ve Warnitchai, P., 2009. Dynamic Analysis of Three-Dimensional Bridge High-Speed Train Interactions using a Wheel-Rail Contact Model, Engineering Structures, 31, 3090-3106.
- Dugush, Y., A. ve Eisenberger, M., 2002. Vibrations of Non-Uniform Continuous Beams under Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 254, 5, 911-926.
- EN1991-2, 2003 Part 2: Traffic loads on bridges, European Committee for Standardization, European Union.
- Falcon, K., C., Stone, B., J., Simcock, W., D. ve Andrew, C., 1967. Optimization of Vibration Absorbers: a Graphical Method for use on Idealized Systems with Restricted Damping, Journal of Mechanical Engineering Science, 9, 5, 374-381.
- Frahm, H., 1911. Device for Damping Vibrations of Bodies, United States, Patent No. 989958.
- Frýba, L., 1972. Vibration of Solids and Structures under Moving Loads, Noordhoff International Publishing, Groningen, The Netherlands.
- Frýba, L., 1996. Dynamic of Railway Bridges, Thomas Telford House, London, England.
- Frýba, L., 2001. A Rough Assessment of Railway Bridges for High Speed Trains, Engineering Structures, 23, 548-556.
- Galdos, N., H., Schelling, D., R. ve Sahin, M., A., 1993. Methodology for Impact Factor of Horizontally Curved Box Bridges, J. Struct. Eng., 119, 6, 1917-1934.
- Garg, V., K. ve Dukkipati, R., V., 1984. Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press, Canada.
- Garinei, A. ve Risitano, G., 2008. Vibrations of Railway Bridges for High Speed Trains under Moving Loads Varying in Time, Engineering Structures, 30, 724-732.

- Genin, J., Ginsberg, J., H. ve Ting, E., C., 1975. A Complete Formulation of Inertial Effects in the Guideway-Vehicle Interaction Problem, Journal of Sound and Vibration, 38, 1, 15-26.
- Gu, G., 2015. Resonance in Long-Span Railway Bridges Carrying TGV Trains, Computers and Structures, 152, 185-199.
- Guo, W., H. ve Xu, Y., L., 2001. Fully Computerized Approach to Study Cable-Stayed Bridge-Vehicle Interaction, Journal of Sound and Vibration, 248, 4, 745-761.
- Hamada, T., R., 1981. Dynamic Analysis of a Beam under a Moving Force: a Double Laplace Transform Solution, Journal of Sound and Vibration, 74, 2, 221-233.
- Hamidi, S., A. ve Danshjo, F., 2010. Determination of Impact Factor for Steel Railway Bridges Considering Simultaneous Effects of Vehicle Speed and Axle Distance to Span Length Ratio, Engineering Structures, 32, 1369-1376.
- Henchi, K., Fafard, M., Talbot, M. ve Dhatt, G., 1998. An Efficient Algorithm for Dynamic Analysis of Bridges under Moving Vehicles using a Coupled Modal and Physical Components Approach, Journal of Sound and Vibration, 212, 4, 663-683.
- Huang, D., Wang, T., L. ve Shahawy, M., 1993. Impact Studies of Multi Girder Concrete Bridges, J. Struct. Eng., 119, 8, 2387-2402.
- Humar, J., L. ve Kashif, A., M., 1993. Dynamic Response of Bridges under Travelling Loads, Can. J. Civ. Eng., 20, 287-298.
- Hwang, E., S. ve Nowak, A., S., 1991. Simulation of Dynamic Load for Bridges, J. Struct. Eng., 117, 5, 1413-1434.
- Inglis, C., E., 1934. A Mathematical Treatise on Vibration in Railway Bridges, The University Press, Cambridge, England.
- Jeffcott, H., H., 1929. On the Vibrations of Beams under the Action of Moving Loads, Phil. Magazine, 8, 48, 66-97.
- Jin, Z., Pei, S., Li, X. ve Qiang, S., 2015. Probabilistic Evaluation Approach for Nonlinear Vehicle-Bridge Dynamic Performances, Journal of Sound and Vibration, 339, 143-156.
- Jo, B., W., Tae, G., H. ve Lee, D., W., 2001. Structural Vibration of Tuned Mass Damper Installed Three-Span Steel Box Bridge, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 78, 677-675.
- Johansson, C., Pacoste, C. ve Karoumi, R., 2013. Closed-Form Solution for the Mode Superposition Analysis of the Vibration in Multi-Span Beam Bridges Caused by Concentrated Moving Loads, Computers and Structures, 119, 85-94.

- Ju, S., H. ve Lin, H., T., 2003. Numerical Investigation of a Steel Arch Bridge and Interaction with High-Speed Trains, Engineering Structures, 25, 241-250.
- Kahya, V., Araz, O. ve Turan, M., 2013. Parametric Study on Dynamic Response of Bridges Subjected to High Speed Trains, IATS, 7th International Advanced Technologies Symposium, İstanbul, 129-132.
- Kahya, V., Araz, O. ve Turan, M., 2014a. The Resonant Vibration for Two Span Bridges under High-Speed Trains, International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, Antalya, 91-97.
- Kahya, V., Araz, O. ve Turan, M., 2014b. A Study on Vibration Reduction of Railway Bridges under High-Speed Trains using Tuned Mass Dampers, International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, Antalya, 1-7.
- Kahya, V., Araz, O. ve Turan, M., 2015. Resonant Vibrations of Two-Span Railway Bridges under High-Speed Trains, Journal of Engineering and Natural Sciences, 188-199.
- Kahya, V. ve Araz, O., 2017. Series Tuned Mass Dampers in Train-Induced Vibration Control of Railway Bridges, Structural Engineering and Mechanics, 61, 4, 453-461.
- Kajikawa, Y., Okino, M., Uto, S., Matsuura, Y. ve Iseki, J., 1989. Control of Traffic Vibration on Urban Viaduct with Tuned Mass Dampers, Journal of Structural Engineering, 35, 585-595.
- Karimi, A., H. ve Ziaei-Rad, S., 2015. Nonlinear Coupled Longitudinal-Transverse Vibration Analysis of a Beam Subjected to a Moving Mass Traveling with Variable Speed, Archive of Applied Mechanics, 85, 1941-1960.
- Kawatani, M. ve Kim, C., W., 2001. Computer Simulation for Dynamic Wheel Loads of Heavy Vehicles, Structural Engineering and Mechanics, 12, 4, 409-428.
- Kuo, J., W. ve DeWolf, J., T., 1997. Vibrational Behavior of Continuous Span Highway Bridge-Influencing Variables, J. Struct. Eng., 123, 3, 333-344.
- Kwon, H., C., Kim, M., C. ve Lee, I., W., 1998. Vibration Control of Bridges under Moving Loads, Computers & Structures, 66, 4, 473-480.
- Lee, C., H., Kim, C., W., Kawatani, M. Nishimura, N. ve Kamizono, T., 2005. Dynamic Response Analysis of Monorail Bridges under Moving Trains and Riding Comfort of Trains, Engineering Structures, 27, 1999-2013.
- Li, C. ve Zhu, B., 2006. Estimating Double Tuned Mass Dampers for Structures under Ground Acceleration using a Novel Optimum Criterion, Journal of Sound and Vibration, 298, 280-297.

- Li, H., Xia, H., Soliman, M. ve Frangopol, D., M., 2015. Bridge Stress Calculation based on the Dynamic Response of Coupled Train-Bridge System, Engineering Structures, 99, 334-345.
- Li, H., Frangopol, D., M., Soliman, M. ve Xia, H., 2016. Fatigue Reliability Assessment of Railway Bridges Based on Probabilistic Dynamic Analysis of a Coupled Train-Bridge System, J. Struct. Eng., 142, 3, 1-16.
- Li, H., N. ve Ni, X., L., 2007. Optimization of Non-Uniformly Distributed Multiple Tuned Mass Damper, Journal of Sound and Vibration, 308, 80-97.
- Li, J. ve Su, M., 1999. The Resonant Vibration for a Simply Supported Girder Bridge under High-Speed Trains, Journal of Sound and Vibration, 224, 5, 897-915.
- Li, J., Su, M. ve Fan, L., 2005. Vibration Control of Railway Bridges under High-Speed Trains using Multiple Tuned Mass Dampers, J. Bridge Eng., 10, 312-320.
- Li, Y., OBrien, E. ve Gonzalez, A., 2006. The Development of a Dynamic Amplification Estimator for Bridges with Good Road Profiles, Journal of Sound and Vibration, 293, 125-137.
- Li, Y., L., Xiang, H., Y., Wang, B., Xu, Y., L. ve Qiang, S., Z., 2013. Dynamic Analysis of Wind-Vehicle-Bridge Coupling System during the Meeting of Two Trains, Advances in Structural Engineering, 16, 10, 1663-1670.
- Lin, C., C., Wang, J., F. ve Chen, B., L., 2005. Train-Induced Vibration Control of High-Speed Railway Bridges Equipped with Multiple Tuned Mass Dampers, Journal of Bridge Engineering, 10, 4, 398-414.
- Lin, Y., H. ve Cho, C., H., 1993. Vibration Suppression of Beam Structures Traversed by Multiple Moving Loads using a Damped Absorber, Journal of Marine Science and Technology, 1, 1, 39-48.
- Liu, K., De Roeck, G. ve Lombaert, G., 2009. The Effect of Dynamic Train-Bridge Interaction on the Bridge Response During a Train Passage, Journal of Sound and Vibration, 325, 240-251.
- Lowan, A., N., 1935. On Transverse Oscillations of Beams under the Action of Moving Variable Loads, Phil. Magazine, 19, 127, 708-715.
- Luu, M., Zabel, V. ve Könke, C., 2012. An Optimization Method of Multi-Resonant Response of High-Speed Train Bridges using TMDs, Finite Elements in Analysis and Design, 53, 13-23.
- Mao, J., Yu, Z., Xiao, Y., Jin, C. ve Bai, Y., 2016. Random Dynamic Analysis of a Train-Bridge Coupled System Involving Random System Parameters based on Probability Density Evolution Method, Probabilistic Engineering Mechanics, 46, 48-61.

- Marchesiello, S., Fasana, A., Garibaldi, L. ve Piombo, B., A., D., 1999. Dynamics of Multi-Span Continuous Straight Bridges Subject to Multi-Degrees of Freedom Moving Vehicle Excitation, Journal of Sound and Vibration, 224, 3, 541-561.
- Martinez-Castro, A., E., Museros, P. ve Castillo-Linares, A., 2006. Semi-Analytic Solution in the Time Domain for Non-Uniform Multi-Span Bernoulli-Euler Beams Traversed by Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 294, 278-297.
- MATLAB, 2011. Optimization Toolbox, The Mathworks, Massachusetts, ABD.
- Miguel, L., F., F., Lopez, R., H., Torii, A., J., Miguel, L., F., F. ve Beck, A., T., 2016. Robust Design Optimization of TMDs in Vehicle-Bridge Coupled Vibration Problems, Engineering Structures, 126, 703-711.
- Mofid, M. ve Akin, J., E., 1996. Discrete Element Response of Beams with Traveling Mass, Advances in Engineering Software, 25, 2-3, 321-331.
- Moghaddas, M., Esmailzadeh, E., Sedaghati, R. ve Khosravi, P., 2012. Vibration Control of Timoshenko Beam Traversed by Moving Vehicle using Optimized Tuned Mass Damper, Journal of Vibration and Control, 18, 6, 757-773.
- Museros, P., Romero, M., L., Poy, A. ve Alarcon, E., 2002. Advances in the Analysis of Short Span Railway Bridges for High-Speed Lines, Computers and Structures, 80, 2121-2132.
- Museros, P. ve Alarcon, E., 2005. Influence of the Second Bending Mode on the Response of High-Speed Bridges at Resonance, Journal of Structural Engineering, 131, 3, 1-11.
- Museros, P., Moliner, E. ve Martinez-Rodrigo, M., D., 2013. Free Vibrations of Simply-Supported Beam Bridges under Moving Loads: Maximum Resonance, Cancellation and Resonant Vertical Acceleration, Journal of Sound and Vibration, 332, 326-345.
- O'Brien, E., Li, Y. ve Gonzalez, A., 2006. Bridge Roughness Index as an Indicator of Bridge Dynamic Amplification, Computers and Structures, 84, 759-769.
- Ormondroyd, J. ve Den Hartog, J., P., 1928. Theory of the Dynamic Vibration Absorber, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 50, 9-22.
- Pakrashi, V., O'Connor, A. ve Basu, B., 2004. Reliability Analysis of Bridges Retrofitted with Tuned Mass Dampers, Bridge Engineering Research in Ireland (BEI) Second Symposium on Bridge Engineering, Belfast, Ireland, 4-5 Nov.
- Pakrashi, V., O'Connor, A. ve Basu, B., 2010. Effect of Tuned Mass Damper on the Interaction of a Quarter Car Model with a Damaged Bridge, Structure and Infrastructure Engineering, 6, 4, 409-421.

- Paraskeva, T., S., Dimitrakopoulos, E., G. ve Zeng, Q., 2017. Dynamic Vehicle-Bridge Interaction under Simultaneous Vertical Earthquake Excitation, Bulletin of Earthquake Engineering, 15, 1, 71-95.
- Pesterev, A., V., Yang, B., Bergman, L., A. ve Tan, C., A., 2001. Response of Elastic Continuum Carrying Multiple Moving Oscillators, J. Eng. Mech., 127, 3, 260-265.
- Randall, S., E., Halsted, D., M. ve Taylor, D., L., 1981. Optimum Vibration Absorber for Linear Damped Systems, Journal of Mechanical Design, 103, 4, 908-913.
- Rocha, J., M., Henriques, A., A., Calçada, R. ve Rönquist, A., 2015. Efficient Methodology for the Probabilistic Safety Assessment of High-Speed Railway Bridges, Engineering Structures, 101, 138-149.
- Rostam, M., R., Javid, F., Esmailzadeh, E. ve Younesian, D., 2015. Vibration Suppression of Curved Beams Traversed by off-center Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 352, 1-15.
- Salvo, V., D., Muscolino, G. ve Palmeri, A., 2010. A Substructure Approach Tailored to the Dynamic Analysis of Multi-Span Continuous Beams under Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 329, 3101-3120.
- Samani, F., S. ve Pellicano, F., 2009. Vibration Reduction on Beams Subjected to Moving Loads using Linear and Nonlinear Dynamic Absorbers, Journal of Sound and Vibration, 325, 742-754.
- Samani, F., S., Pellicano, F. ve Masoumi, A., 2011. Performance of Nonlinear Vibration Absorbers for Beams under Moving Vehicles, ENOC, 24-29 July, Rome, Italy.
- Samani, F., S. ve Pellicano, F., 2012. Vibration Reduction of Beams under Successive Traveling Loads by Means of Linear and Nonlinear Dynamic Absorbers, Journal of Sound and Vibration, 331, 2272-2290.
- Samani, F., S., Pellicano, F. ve Masoumi, A., 2013. Performances of Dynamic Vibration Absorbers for Beams Subjected to Moving Loads, Nonlinear Dynamics, 72, 1-15.
- Savin, E., 2001. Dynamic Amplification Factor and Response Spectrum for the Evaluation of Vibrations of Beams under Successive Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 248, 2, 267-288.
- Seetapan, P. ve Chucheepsakul, S., 2006. Dynamic Responses of a Two-Span Beam Subjected to High Speed 2DOF Sprung Vehicles, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 6, 3, 413-430.
- Soares, R., M., Del Prado, Z., J., G., N. ve Gonçalves, P., B., 2010. On the Vibration Control of Beams using a Moving Absorber and Subjected to Moving Loads, Mecánica Computacional Vol XXIX, Noviembre, Buenos Aires, 1829-1840.

- Soares, R., M., Del Prado, Z., J., G., N. ve Gonçalves, P., B., 2011. Study of Energy Dissipation in Beams Subjected to Moving Loads, *DINCON*, Agosto-Setembro, Brasileira, 442-445.
- Song, M., K., Noh, H., C. ve Choi, C., K., 2003. A New Three-Dimensional Finite Element Analysis Model of High-Speed Train-Bridge Interactions, *Engineering Structures*, 25, 1611-1626.
- Soom, A. ve Lee, M., S., 1983. Optimal Design of Linear and Nonlinear Vibration Absorbers for Damped Systems, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 105, 1, 112-119.
- Stancioiu, D. ve Ouyang, H., 2012. Structural Modification Formula and Iterative Design Method using Multiple Tuned Mass Dampers for Structures Subjected to Moving Load, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 542-560.
- Stanisic, M., M. ve Hardin, J., C., 1969. On the Response of Beams to an Arbitrary Number of Concentrated Moving Masses, *Journal of the Franklin Institute*, 287, 2, 115-123.
- Stokes, G., G., 1849. Discussion of a Differential Equation Relating to the Breaking of Railway Bridges, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8, 5, 707-735.
- Thompson, A., G., 1981. Optimum Damping and Tuning of a Dynamic Vibration Absorber Applied to a Force Excited and Damped Primary System, *Journal of Sound and Vibration*, 77, 3, 403-415.
- Timoshenko, S., P., 1922. On the Forced Vibrations of Bridges, *Phil. Magazine*, 43, 1018-1019.
- Timoshenko, S., P. ve Young, D., H., 1955. *Vibration Problems in Engineering*, D. Van Nostrand, New York.
- Ting, E., C., Genin, J. ve Ginsberg, J., H., 1974. A General Algorithm for the Moving Mass Problems, *Journal of Sound and Vibration*, 33, 1, 49-58.
- Tsai, H., C. ve Lin, G., C., 1993. Optimum Tuned Mass Dampers for Minimizing Steady-State Response of Support Excited and Damped Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 22, 11, 957-973.
- Turan, M., Araz, O. ve Kahya, V., 2014. Effects of Construction Errors in Bridges on Performance of TMDs in Vibration Reduction, 11. International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, 1-6.
- URL-1. <http://www.totalvibrationsolutions.com/pdf/GERB%20Tuned%20Mass%20Damper%20Brochure.pdf>, 10.02.2017.
- URL-2. https://readtiger.com/wkp/en/List_of_high-speed_trains, 08.01.2017.

- Wang, B., Xu, Y., L. ve Li, Y., 2015. Dynamic Analysis of Wind-Vehicle-Bridge Systems using Mutually-Affected Aerodynamic Parameters, Wind and Structures, 20, 2, 191-211.
- Wang, H., Tao, T., Cheng, H. ve He, X., 2014. Simulation Study on Train-Induced Vibration Control of a Long-Span Steel Truss Girder Bridge by Tuned Mass Dampers, Mathematical Problems in Engineering, 2014, 1-12.
- Wang, J., F., Lin, C., C. ve Chen, B., L., 2003. Vibration Suppression for High-Speed Railway Bridges using Tuned Mass Dampers, International Journal of Solids and Structures, 40, 465-491.
- Wang, T., L. ve Huang, D., 1992. Cable-Stayed Bridge Vibration due to Road Surface Roughness, J. Struct. Eng., 118, 5, 1354-1374.
- Wang, Y., Wei, Q., C., Shi, J. ve Long, X., 2010. Resonance Characteristics of Two-Span Continuous Beam under Moving High Speed Trains, Latin American Journal of Solids and Structures, 7, 185-199.
- Wang, Y., J., Wei, Q., C. ve Yau, J., D., 2013. Interaction Response of Train Loads Moving over a Two-Span Continuous Beam, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 13, 1, 1-18.
- Warburton, G., B. ve Ayorinde, E., O., 1980. Optimum Absorber Parameters for Simple Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 8, 3, 197-217.
- Watts, P., 1883. On a Method of Reducing the Rolling of Ship at Sea, Transactions of the Institute of Naval Architects, 24, 165-190.
- Willis, R., 1849. Appendix to the Report of the Commissioners Appointed to Inquire into the Application of Iron to Railway Structures, H. M. Stationary Office, London, England.
- Wu, J., J., 2006. Study on the Inertia Effect of Helical Spring of the Absorber on Suppressing the Dynamic Responses of a Beam Subjected to a Moving Load, Journal of Sound and Vibration, 297, 981-999.
- Wu, J., S. ve Dai, C., W., 1987. Dynamic Responses of Multispan Nonuniform Beam due to Moving Loads, J. Struct. Eng., 113, 3, 458-474.
- Wu, Y., S., Yang, Y., B. Yau, J., D., 2001. Three-Dimensional Analysis of Train-Rail-Bridge Interaction Problems, Vehicle System Dynamics, 36, 1, 1-35.
- Wu, Y., S. ve Yang, Y., B., 2003. Steady-State Response and Riding Comfort of Trains Moving over a Series of Simply Supported Bridges, Engineering Structures, 25, 251-265.
- Xia, H., Xu, Y., L. ve Chan, T., H., T., 2000. Dynamic Interaction of Long Suspension Bridges with Running Trains, Journal of Sound and Vibration, 237, 2, 263-280.

- Xia, H., Zhang, N. ve Guo, W., W., 2006. Analysis of Resonance Mechanism and Conditions of Train-Bridge System, Journal of Sound and Vibration, 297, 810-822.
- Xia, H., Guo, W., W., Wu, X., Pi, Y., L. ve Bradford, M., A., 2008. Lateral Dynamic Interaction Analysis of a Train-Girder-Pier System, Journal of Sound and Vibration, 318, 927-942.
- Xia, H., Li, H., L., Guo, W., W. ve De Roeck, G., 2014. Vibration Resonance and Cancellation of Simply Supported Bridges under Moving Train Loads, J. Eng. Mech., 140, 1-11.
- Xu, K. ve Igusa, T., 1992. Dynamic Characteristics of Multiple Substructures with Closely Spaced Frequencies, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 12, 1059-1070.
- Xu, Y., L., Xia, H. ve Yan, Q., S., 2003. Dynamic Response of Suspension Bridge to High Wind and Running Train, J. Bridge Eng., 8, 1, 46-55.
- Yang, F. ve Fonder, G., A., 1998. Dynamic Response of Cable-Stayed Bridges under Moving Loads, J. Eng. Mech., 124, 7, 741-747.
- Yang, X., Wang, H. ve Jin, X., 2016. Numerical Analysis of a Train-Bridge System Subjected to Earthquake and Running Safety Evaluation of Moving Train, Shock and Vibration, 2016, 1-15.
- Yang, Y., B., Liao, S., S. ve Lin, B., H., 1995. Impact Formulas for Vehicles Moving over Simple and Continuous Beams, J. Struct. Eng., 121, 11, 1644-1650.
- Yang, Y., B. ve Lin, B., H., 1995. Vehicle-Bridge Interaction Analysis by Dynamic Condensation Method, J. Struct. Eng., 121, 11, 1636-1643.
- Yang, Y., B. ve Yau, J., D., 1997. Vehicle-Bridge Interaction Element for Dynamic Analysis, J. Struct. Eng., 123, 11, 1512-1518.
- Yang, Y., B., Yau, J., D. ve Hsu, L., C., 1997. Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds, Engineering Structures, 19, 11, 936-944.
- Yang, Y., B., Chang, C., H. ve Yau, J., D., 1999. An Element for Analysing Vehicle-Bridge Systems Considering Vehicle's Pitching Effect, Int. J. Numer. Meth. Engng., 46, 1031-1047.
- Yang, Y., B., Wu, C., M. ve Yau, J., D., 2001. Dynamic Response of a Horizontally Curved Beam Subjected to Vertical and Horizontal Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 242, 3, 519-537.
- Yang, Y., B. ve Wu, Y., S., 2001. A Versatile Element for Analyzing Vehicle-Bridge Interaction Response, Engineering Structures, 23, 452-469.

- Yang, Y., B. ve Wu, Y., S., 2002. Dynamic Stability of Trains Moving over Bridges Shaken by Earthquakes, Journal of Sound and Vibration, 258, 1, 65-94.
- Yang, Y., B., Lin, C., W. ve Yau, J., D., 2004a. Extracting Bridge Frequencies from the Dynamic Response of a Passing Vehicle, Journal of Sound and Vibration, 272, 471-493.
- Yang, Y., B., Lin, C., L., Yau, J., D. ve Chang, D., W., 2004b. Mechanism of Resonance and Cancellation for Train-Induced Vibrations on Bridges with Elastic Bearings, Journal of Sound and Vibration, 269, 345-360.
- Yang, Y., B. ve Lin, C., W., 2005. Vehicle-Bridge Interaction Dynamics and Potential Applications, Journal of Sound and Vibration, 284, 205-226.
- Yang, Y., B., Lin, C., L. ve Yau, J., D., 2008. Vibration Reduction of Elastically Supported Beams under Moving Loads by Tuned Mass Devices, The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 1, 1, 55-67.
- Yau, J., D., Yang, Y., B. ve Kuo, S., R., 1999. Impact Response of High Speed Rail Bridges and Riding Comfort of Rail Cars, Engineering Structures, 21, 836-844.
- Yau, J., D., 2001. Resonance of Continuous Bridges due to High Speed Trains, Journal of Marine Science and Technology, 9, 1, 14-20.
- Yau, J., D., Wu, Y., S. ve Yang, Y., B., 2001. Impact Response of Bridges with Elastic Bearings to Moving Loads, Journal of Sound and Vibration, 248, 1, 9-30.
- Yau, J., D. ve Yang, Y., B., 2004a. A wideband MTMD System for Reducing the Dynamic Response of Continuous Truss Bridges to Moving Train Loads, Engineering Structures, 26, 1795-1807.
- Yau, J., D. ve Yang, Y., B., 2004b. Vibration Reduction for Cable-Stayed Bridges Traveled by High-Speed Trains, Finite Elements in Analysis and Design, 40, 341-359.
- Yau, J., D. ve Yang, Y., B., 2006. Vertical Accelerations of Simple Beams due to Successive Loads Traveling at Resonant Speeds, Journal of Sound and Vibration, 289, 210-228.
- Yavari, A., Nouri, M. ve Mofid, M., 2002. Discrete Element Analysis of Dynamic Response of Timoshenko Beams under Moving Mass, Advances in Engineering Software, 33, 143-153.
- Yu, Z., W., Mao, J., F., Guo, F., Q. ve Guo, W., 2016. Non-Stationary Random Vibration Analysis of a 3D Train-Bridge System using the Probability Density Evolution Method, Journal of Sound and Vibration, 366, 173-189.

- Zakeri, J., A., Shadfar, M. ve Feizi, M., M., 2014. Sensitivity Analysis of Bridge-Track-Train System to Parameters of Railway, Latin American Journal of Solids and Structures, 11, 598-612.
- Zeng, Q., Yang, Y., B. ve Dimitrakopoulos, E., G., 2016. Dynamic Response of High Speed Vehicles and Sustaining Curved Bridges under Conditions of Resonance, Engineering Structures, 114, 61-74.
- Ziyaeifar, M., 2008. Vibration Control in Train-Bridge-Track Systems, Vehicle System Dynamics, 46, 5, 355-384.
- Zuo, L., 2009. Effective and Robust Vibration Control using Series Multiple Tuned-Mass Dampers, Journal of Vibration and Acoustics, 131, 3, 1-11.



ÖZGEÇMİŞ

Onur ARAZ, 1984 yılında Gümüşhane’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Gümüşhane’de tamamladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü ikincilik ile tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu “Yüksek Lisans” eğitimini 2009 yılında tamamlamasının ardından aynı yerde “Doktora” eğitimine başladı. 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki görevine devam eden ARAZ, İngilizce bilmektedir.

Bu tez çalışmasından üretilen uluslararası makaleler aşağıda listelenmiştir.

- 1) Kahya, V. ve Araz, O., 2017. Series Tuned Mass Dampers in Train-Induced Vibration Control of Railway Bridges, Structural Engineering and Mechanics, 61, 4, 453-461.