



İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BİNA TİTREŞİMLERİNİN TEORİK ANALİZİ

Mak. Yük. Müh. Cüneyt ERTAL
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Erol UZAL

Temmuz, 2011

İSTANBUL

ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlarken bana karşı göstermiş olduğu sabırdan dolayı eşime ve aileme teşekkür ederim. Tez süresince bilgi ve desteğini eksik etmeyen danışman hocam Doç. Dr. Erol Uzal 'a, tezin yazım aşamasında yaptığı değerli katkılardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Fazıl Nihat Bodur'a, tezi yazarken kullandığım latex programı ile ilgili yardımlarından dolayı arkadaşım Hüseyin Özdemir 'e, tezi hazırladığım süre boyunca bölümde üzerime düşen görevleri paylaşan asistan arkadaşlarıma tezime yapmış oldukları dolaylı katkılardan ötürü teşekkür ederim.

Temmuz, 2011

CÜNEYT ERTAL

İçindekiler

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1 GİRİŞ	1
2 GENEL KISIMLAR	4
3 MALZEME VE YÖNTEM	8
3.1 KONTROLCÜSÜZ KİRİŞİN ÖZFREKANS LARI VE MOD ŞEKİLLERİ	8
3.2 KONTROLCÜSÜZ DURUM ZAMAN CEVABI	13
3.3 KONTROL UYGULANAN KİRİŞİN ÖZFRE KANSLARI VE MOD ŞEKİLLERİ	17
3.4 KONTROL UYGULANAN KİRİŞİN ZORLAN MIŞ TİTREŞİM ZAMAN CEVABI	23
4 BULGULAR	29
4.1 KONTROL EDİLEN KİRİŞİN ÖZDEĞERLERİ	29

4.2	KONTROL EDİLEN KİRİŞİN MOD ŞEKİLLERİ	35
4.3	KONTROL EDİLEN KİRİŞİN ZAMAN CEVABI GRAFİKLERİ	49
5	TARTIŞMA VE SONUÇ	55
	KAYNAKLAR	57
	ÖZGEÇMİŞ	60

Şekil Listesi

Şekil 3.1	: Kontrolcüsüz giriş.	8
Şekil 3.2	: Kontrolcüsüz girişin mod şekilleri.	11
Şekil 3.3	: Kontrol uygulanan giriş.	17
Şekil 4.1	: Birinci özfrekansın x_1, x_2 ve K ile değişimi.	29
Şekil 4.2	: İkinci özfrekansın x_1, x_2 ve K ile değişimi.	30
Şekil 4.3	: Üçüncü özfrekansın x_1, x_2 ve K ile değişimi.	30
Şekil 4.4	: Dördüncü özfrekansın x_1, x_2 ve K ile değişimi.	31
Şekil 4.5	: Beşinci özfrekansın x_1, x_2 ve K ile değişimi.	32
Şekil 4.6	: Birinci özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.	32
Şekil 4.7	: İkinci özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.	33
Şekil 4.8	: Üçüncü özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.	33
Şekil 4.9	: Dördüncü özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.	34
Şekil 4.10	: Beşinci özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.	34
Şekil 4.11	: Kontrol edilen durumda girişin birinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	38
Şekil 4.12	: Kontrol edilen durumda girişin birinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	39
Şekil 4.13	: Kontrol edilen durumda girişin birinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	40
Şekil 4.14	: Kontrol edilen durumda girişin ikinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	41
Şekil 4.15	: Kontrol edilen durumda girişin ikinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	42
Şekil 4.16	: Kontrol edilen durumda girişin ikinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	43
Şekil 4.17	: Kontrol edilen durumda girişin üçüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	44

Şekil 4.18	: Kontrol edilen durumda kirişin üçüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	45
Şekil 4.19	: Kontrol edilen durumda kirişin üçüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	46
Şekil 4.20	: Kontrol edilen durumda kirişin dördüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	47
Şekil 4.21	: Kontrol edilen durumda kirişin dördüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	48
Şekil 4.22	: Kontrol edilen durumda kirişin dördüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	50
Şekil 4.23	: Kontrol edilen durumda kirişin beşinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	51
Şekil 4.24	: Kontrol edilen durumda kirişin beşinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	52
Şekil 4.25	: Kontrol edilen durumda kirişin beşinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.	53
Şekil 4.26	: Kontrol uygulanan kirişin zaman cevabının x_1, x_2 ve K ile değişimi.	54
Şekil 4.27	: Kontrol uygulanan kirişin zaman cevabının x_1, x_2 ve K ile değişimi.	54

Sembol Listesi

L	Kirişin uzunluğu.
b	Kiriş kesitinin eni.
h	Kiriş kesitinin yüksekliği.
K	Kontrol kazancı.
x_1	Sehim ölçümü yapılan nokta.
x_2	Kontrol kuvveti uygulanan nokta.
W, w, Q, Q_n	Sehim.
E	Elastiklik modülü.
I	Alan atalet momenti.
ρ	Kirişin birim uzunluk başına düşen ağırlığı.
t	Zaman.
ω	Doğal frekans.
C_n, D_n	Sınır şartları ile belirlenen katsayılar.
α	$\sqrt{\omega}$ yerine kullanılan kısaltma.
A	Katsayılar matrisi.
$f(x, t)$	Kirişe uygulanan zorlama kuvveti.
$F_n(t)$	Zorlama kuvvetin seri katsayısı.
$w_0(x), v_0(x)$	Zaman cevabının başlangıç koşulları.
k_n	Ortogonal katsayı.
$P(x)$	Katsayılar determinantı.
$g(x)$	Kontrol edilen giriş denkleminde kontrol kuvvetini içeren fonksiyon.
r_n	Karakteristik denklemin kökleri.
$W_{h_n}(t)$	Zaman denkleminin homojen çözümü.
$W_{p_n}(t)$	Zaman denkleminin özel çözümü
X_{h_n}	Zaman denklemi homojen çözüm katsayısı.
X_{p_n}	Zaman denklemi özel çözüm katsayısı.
a_n	Homojen çözüm denklem sistemi katsayı matrisi bileşenleri.

ÖZET

BİNA TİTREŞİMLERİNİN TEORİK ANALİZİ

Kirişler yapısal kontrol ile ilgilenen bir çok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Araştırmacıların bir kısmı farklı giriş modellerinin titreşim karakteristiklerini incelemişler, diğer bir kısmı ise kontrol mekanizmaları ve kontrol yöntemlerinin girişlerin titreşimleri nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bu çalışmada önerilen yöntem ile girişin doğal frekanslarının yeri değiştirilebilmektedir. Giriş sürekli bir sistem olduğu için sonsuz sayıda doğal frekansa sahiptir. Kirişe dışarıdan uygulanan bozucu etki girişin doğal frekanslarından bir veya bir kaçını ile titreşmeye başlamasına sebep olacaktır. Zaman içinde girişin titreşim genliği çok hızlı bir şekilde artacak ve sonuçta giriş rezonansa girerek tahrip olacaktır. Önerilen kontrol yöntemi kullanılarak girişin titreşimleri kontrol edilebilir.

Çalışmanın birinci bölümünde girişler ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci kısımda daha önce bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde kontrolsüz girişin özfrekansları, mod şekilleri ve zorlanmış titreşim zaman cevabı gözden geçirilmiş, kontrol edilen girişin özfrekansları ve mod şekilleri hesaplanmış, zorlanmış titreşim zaman cevabı elde edilmiştir. Bulgular kısmında önerilen kontrol metodunun etkinliği, kontrol kazancı ile girişin titreşim karakteristikleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler ile sunulmuştur.

Tartışma ve sonuç kısmında ileride yapılabilecek çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiştir.

SUMMARY

THEORETICAL ANALYSIS OF BUILDING VIBRATIONS

Beams has been the focus of attention for researchers who are interested in structural control. Some researchers studied the natural frequencies and mode shapes of the different beam models, some of the other researched the effects of control mechanisms and control methods on the vibration characteristics of the beams. Natural frequencies of beam can be moved by using proposed method in this study. Since beam is a continuous system, it has infinite natural frequencies. Disturbance will make beam started to vibrate by it's one or more natural frequencies. As time progresses magnitude of vibration of the beam will increase quickly, the beam will enter rezonans mode and this will make the beam destroy. Vibrations of the beam can be controlled by using proposed method.

In the first chapter general knowledge about beams is given. Previous studies about this subject that are done are summarized in the second chapter. Following this, natural frequencies, mode shapes and forced vibration response of uncontrolled beam is reviewed, natural frequencies and mode shapes of controlled beam is calculated, forced vibration response of controlled beam is obtained. In the next chapter, effectiveness of the proposed method is presented with graphical results which shows relation between the control gain and vibration characteristics of the beam.

In the conclusion and discussion part of the study, the knowledge is given about the future studies.

1 GİRİŞ

Kirişlerin modellenmesi ve kontrolü konusu günümüzün büyük ilgi gösterilen araştırma alanlarından birisidir. Özellikle hareketlendirici elemanlarda yaşanan gelişmeler ve piezoelektrik malzemeler, yapı hafızalı alaşımlar (shape memory alloys), elektro-relojik akışkanlardan (Electro-rheological Fluids) yapılmış hareketlendirici elemanların titreşim denetimi uygulamalarında kullanılmasının iyi sonuçlar vermesi bu alandaki çalışmaların artmasına neden olmuştur.

Yapıların temel elamanı olan kirişler yapısal titreşimlerin denetimi konusunda yapılacak çalışmalarda ana inceleme alanlarından birisidir. Kirişlerin modellenmesinde genel olarak iki farklı teori kullanılmaktadır. Bunlar Euler-Bernoulli kiriş teorisi ve Timoshenko kiriş teorisi. Timoshenko kiriş teorisi kesme kuvveti ve rotasyonel etki altındaki kalın kirişlerin hareketlerinin incelenmesinde kullanılır. Euler-Bernoulli kiriş teorisi ise üzerine yük etkileyen kirişlerin eğilme karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılır. Timoshenko kiriş teorisine göre basit olduğu için daha yaygın olarak kullanılır.

Yapısal sistemlerin aktif veya pasif yollarla titreşimlerinin kontrolü günümüzde güncel bir araştırma konusudur. Araştırmalarda amaç sistemlerdeki titreşimlerin genliklerinin düşürülmesi veya kısa süre içerisinde sönmülenererek baskılanmasıdır. Titreşim denetimi konusu iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar pasif titreşim denetimi ve aktif titreşim denetimidir. Pasif titreşim denetiminde titreşimin azaltılması veya kısa sürede yok edilmesi pasif sönmüleyiciler (amortisör v.s.) kullanılarak yapılır. Bu ise sistemin hacmini arttırır. Hafiflik, sınırlı yer ve hızlılık isteyen alanlarda kullanılamamaktadır. Aktif titreşim denetimi ise algılayıcıların titreşim büyüklüğünü ölçmesi bunun bir geri besleme sinyali olarak denetleyiciye verilmesi ile yapılır. Denetleyiciden elde edilecek olan denetim sinyali hareketlendiriciye gönderilerek sistemin titreşim hareketi kontrol edilir.

Modern hareketlendiricilerin ve algılayıcıların gelişmesi aktif titreşim denetimi uygulamalarının çok büyük oranda artmasına neden olmuştur. Hareketlendirici ve algılayıcı tasarımında kullanılan yeni nesil malzemeler piezoelektrik malzeme, elektro-

relojik akışkanlar, yapı hafızalı alaşımlardır. Bunlar hafif olmaları, az yer kaplamaları, yapısal sistemlere hemen uygulanabilmeleri ve hızlı cevap özelliklerinden dolayı aktif titreşim denetimi uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Piezoelektrik malzeme kendisine uygulanan elektrik gerilimini hareket değişimine dönüştüren bir yapıya sahiptir. Bunun nedeni iç yapısında oluşan gerinme nedeniyle malzemenin uzaması veya kısalması sonucu vermesindedir. Piezoelektrik malzemeler esnek yapı elemanlarının üzerine yapıştırılır veya içine gömülür ve hareketlendirici görevi yaparlar. Piezoelektrik malzemenin algılayıcı olarak çalışması ise malzemeye uygulanan kuvvetin oluşturduğu iç gerinmenin elektrik gerilimine dönüştürülmesi yoluyla olur. Hareketlendirici ve algılayıcı olarak en çok kullanılan piezoelektrik malzeme PZT (Lead-Zirconate-Titanate) olarak isimlendirilen piezoseramik malzemedir.

Bu çalışmada bir kirişin dağıtılmış parametreliliği olarak hareket denklemleri gözönüne alınmış ve kiriş üzerinde bir noktada sehimsiz ölçümü yapılarak başka bir noktada ölçülen sehimsiz ile orantılı bir kuvvet uygulanarak kirişin titreşimlerinin denetimi incelenmiştir. Kontrol kuvveti bir nokta kuvvet olup hareket sağlayıcı elemanlardan elde edilmiştir. Kiriş sehimsizinin algılayıcılar tarafından ölçüldüğü varsayılmıştır. Burada uygulanan kuvvet, ölçülen sehimsiz ile kontrol kazancının çarpılması ile elde edilir. Bulunan çözümler tamamıyla analitik çözümler olup parametrelerin birbirlerine göre değişimleri bu çözümlere dayalı eğriler vasıtasıyla gösterilmiştir.

Sehimsiz ölçümü doğrudan doğruya bir lazer yoluyla uzaklık ölçme olacağı gibi ivmeyi ölçerek sehimsiz elde edilmeside mümkündür. Gerekli denetim kuvveti bir elektro dinamik çalkalayıcı ile elde edilebileceği gibi buna benzer bir lineer hareketli bir eleman kullanılarak da elde edilebilir.

Kontrol teorisi görüşü açısından incelenen sistem dağıtılmış parametreliliği bir sistemdir dolayısı ile standart kontrol teknikleri lineer bir problem olmasına rağmen kullanılamaz. Bir yaklaşım tarzı problemi ayrıklaştırma ve esas yapının iyi bir modeli olarak bir toplu parametreliliği sistem elde etmektir. Bu takdirde standart kontrol yöntemleri uygulanabilir. Bu çalışmada ise dağıtılmış parametreliliği sistem doğrudan doğruya analitik olarak çözümlenmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest olan kirişin özfrekansları ve mod şekillerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde zorlama kuvveti altındaki kirişin zamanla değişimi incelenmiştir. Üçüncü bölümde kontrol uygulanan kirişin özfrekansları ve mod şekillerini veren denklemler çıkarılmıştır. Daha sonraki bölümde zorlama kuvveti etkisi altındaki kontrol edilen kirişin titreşimlerinin zamanla değişimini veren denklemler elde edilmiştir. Dördüncü bölümde kontrol edilen durumda kirişin özdeğerlerinin, kontrol parametreleri olan sehim ölçümü yapılan nokta (x_1), ölçülen sehim ile orantılı kuvvetin uygulama noktası x_2 ve geri besleme kontrol kazancı (K) ile değişimini gösteren grafikler çizdirilmiştir. Son bölümde ise tartışma ve sonuçlara varılmakta ve gelecekteki çalışmalara yol gösterilmektedir.

Yapılan çalışmada kirişin sehimi ölçülmüş uygulanan kontrol kuvvetinin büyüklüğü ölçülen sehim ile orantılı olarak seçilmiştir. İleriki çalışmalarda uygulanan kuvvetin büyüklüğü hız veya ivme ile orantılı seçilebileceği gibi bunların lineer kombinasyonlarında olabilir. Bu çalışmanın amacı en genel halde bir kirişin titreşim denklemlerinin analizi olduğu gibi geri beslemeli bir denetimle bu kirişin özfrekanslarının değiştirilebildiğini göstermektir. Kiriş sürekli bir sistem olduğu için sonsuz sayıda doğal frekansa sahiptir. Dışarıdan gelen bozucu etkiye göre bu sonsuz sayıdaki doğal frekanstan biri ile titreşmeye başlayabilir. Titreşmeye başladığı doğal frekansın yeri değiştirilmezse kiriş rezonansa girer ve tahrip olur. Bu çalışmada önerilen yöntem ile tek bir noktadan ölçülen sehim ile orantılı bir kuvvetin çubuk üzerinde başka bir noktada uygulanması ile kirişin doğal frekanslarının yeri değiştirilebilmekte ve kirişin rezonansa girmesi engellenmektedir.

2 GENEL KISIMLAR

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kirişler birçok farklı sistemin modellemesinde sıkça kullanılan yapısal kontrol elemanları olarak ortaya çıkmaktadır. Kwon ve diğ. üzerinden geçen yüksek hızlı tren (TGV) ve köprü arasındaki etkileşimi Euler-Bernoulli kiriş teorisi ile modellemişler ve ayarlı kütle sönümleyicinin TGV kaynaklı titreşimler üzerindeki etkisini incelemişler. Sayısal çalışma sonuçları, ayarlı kütle sönümleyicinin TGV'nin köprüyü geçerken yarattığı titreşimleri % 21 oranında azalttığını ve serbest titreşimlerde çok çabuk şekilde yok ettiğini göstermiştir [1]. Akış etkisindeki silindirin titreşimleri, akışkan kaynaklı kuvvetler ve bunlar arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmada, silindir Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen simulasyonlar, akışkan kuvveti ile silindir titreşimi rezonans durumunda olduğunda bu ilişkinin silindir uzunluğu boyunca devam ettiğini, aksi durumda akışkan kuvvetinin silindir titreşimi ve silindir titreşiminin fazı üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermiştir [2]. Çok katlı lineer olmayan binanın elastik olmayan hareketi lineer kiriş hareketleri cinsinden modellenmiş ve yapılan sayısal çalışmalar yer hareketi şiddetinin çok düşükten çok yükseğe doğru arttığında binanın hareketinin elastik durumdan elastik olmayan duruma geçtiğini ve önce binanın birinci mod şeklinde bir çalkalanma olduğunu ve aynı etkinin bir süre sonra binanın ikinci mod şeklinde gerçekleştiğini göstermiştir. Bu sonuç ileride bina tasarım kodlarının yüksek mod şekillerinin bina üzerindeki etkisini içine alacak şekilde geliştirilmesini sağlayabilir [3]. Wang ve Lin, üzerinde kontrol elemanı olarak ayarlı kütle sönümleyici yerleştirilmiş binayı bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan kiriş olarak modellemişlerdir. Bina modelinin titreşimlerinin kontrol edilmesi için değişken yapıli kontrol ve bulanık mantık kayan kipli kontrol olmak üzere 2 farklı kontrol metodu önermişlerdir. Binayı dağıtılmış parametrelili kiriş modeli olarak almışlar ve gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalar ile kontrol yöntemlerinin bina titreşimini azaltmadaki performanslarını karşılaştırmışlardır [4]. Uzun binaların özfrekanslarının belirlenmesinde, binanın ankastre mesnetli kiriş olarak modellenip klasik Euler-Bernoulli yaklaşımıyla en düşük rezonans frekansı hesaplanabilmektedir. Dym L. Cilve ve diğ. böyle özfrekansların belirlenmesi konusunu 2 farklı model kullanarak incelemişler ve modellemelerin hangi tip binalarda ne kadar uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Modellerden biri ankastre mesnetli bir kiriş olup diğeri buna bağlı kesme

kirişinden (shear beam) oluşmaktadır. Diğer model ise Euler-Bernoulli giriş modeline kesme kuvveti eklenmiş Timoshenko girişidir. Bu iki model karşılaştırıldığında Timoshenko giriş modelinin perde duvarlı binaların davranışına daha uygun olduğu buna mukabil iki girişli modelin perde-duvar-çerçeve binalarda daha uygun olduğu gözlenmiştir [5]. Robotlarda Euler-Bernoulli giriş teorisi kullanılarak modelleme yapılan endüstriyel alanlardan biridir. Robot kolu ve buna bağlı esnek girişin titreşiminin kontrol edilmesi için esnek giriş ucu deplasmanı ve titreşimi geri beslemesini kullanan Lyapunov tipi kontrolcü tasarlanmıştır. Uç deplasmanı geri beslemesi kullanıldığında önerilen kontrolcünün esnek girişin titreşimlerini azaltmanın yanında robotun pozisyon alma kesinliğinde arttırdığı görülmüştür [6]. Robot kollarının esnek sistem olarak incelenmesi ve denetleyici olarak Lyapunov tabanlı piezoelektrik denetleyici kullanan Dadfarnia ve diğ. yaptığı çalışmada, varsayılmış modlar yöntemi kullanılarak sayısal benzetim yapılmış giriş titreşimlerinin üstel olarak bastırılabilirliği gösterilmiştir [7].

Wong ve diğ. dağılmış ve noktasal yükler altındaki çubukların titreşim izolasyonu için bir dinamik titreşim sönümleyici tasarımında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sistemi modellemişlerdir. Çalışmada kullandıkları dinamik sönümleme sistemi bir yay ve kütlede oluşan geleneksel öteleme sönümleyicisine ek olarak çubuğun eksenini etrafında rotasyonel sönümleme yapan bir elemandan oluşmaktadır. Yapılan sayısal ve deneysel testler önerilen sönümleyicinin geleneksel sönümleyiciye göre titreşim kontrolünü daha iyi gerçekleştirdiğini göstermiştir [8].

Teknolojinin ilerlemesi ile beraber hareketlendirici elemanlarda gelişmeye başlamıştır. Elektro-relojik (ER) sıvı yada Manyetik-relojik (MR) sıvı tabanlı sönümleyiciler, iki elastik katman arasına yerleştirilen ER yada MR sıvıdan oluşmaktadır ve sıvı üzerine elektrik alanı uygulandığında katı hale geçmektedir [9]. Yarı-iletken, nano-teknoloji, lazer ve görme ile ilgili, üretim aşamaları yüksek hassasiyet gerektiren ve titreşim karşı hassas olan yüksek teknoloji ürünlerinin imal edildiği tesisler gibi mikron seviyesinde titreşimlerin dahi istenmediği ortamlarda kullanılırlar [10]. Tasarım şekli yada çalışma prensibine göre üç grup altında toplanabilir: kesme modlu, akış modlu ve sıkıştırma modlu. ER sıvıya uygulanan elektrik alanı için kullanılacak gerilimin ER sıvının özelliklerini bozmayacak seviyede olması önemli bir tasarım parametresidir [11]. Amaç ER sıvıya uygulanan gerilimi kontrol ederek içine yerleştirildikleri

yapının titreşim karakteristiklerini değiştirebilmektir [12]. Bu konudaki bilgi birikimi arttıkça farklı tasarım modelleri gelişmektedir [13, 14]. Piezoelektrik malzemeler, elektrik gerilimi uygulandığında kuvvet ve kuvvet uygulandığında elektrik üretme özelliklerinden dolayı yapısal sistemlerin kontrolünde hem algılayıcı hemde hareketlendirici olarak kullanılmaktadır [15, 16, 17, 18]. Piezoelektrik malzemenin iki özelliği birarada kullanılabilirdiği gibi ayrı ayrıda kullanılabilir. Hu ve diğ. piezoelektrik algılayıcı kullanarak karbon lifleri ile güçlendirilmiş plakaların üzerine küçük alanlara uygulanan büyük kuvvetler ile bu kuvvetlerin oluşturduğu hasarlar arasındaki ilişkiyi modellemek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem ile plakanın kenarlara yakın yerler ve serbest uçlar haric diğer yerlerde hasar tahminini başarılı bir şekilde yapabilmişlerdir [19]. Esnek malzemelerden yapılan robot kollarının titreşim ve pozisyon kontrolünde de piezoelektrik hareketlendiriciler kullanılmaya başlanmıştır [20]. Ölçekli bina modelinin titreşimlerinin piezoelektrik hareketlendiriciler ile kontrolü ile ilgili yapılan çalışma, kontrol mekanizmasının bir kontrol yöntemi ile beraber kullanıldığında bina katlarının titreşim genliklerinin kolon eğilme momentleri kontrol edilerek azaltabildiğini göstermiştir [21]. Piezoelektrik hareketlendiriciler küçük deplasmanlar üretebildiği için [22] gerçek binaların titreşim kontrolü için uygun değildir. Bu çalışmada önerilen kontrol yöntemi bir kirişe uygulanmıştır. Binalar, kirişler kullanılarak modellenebileceği için önerilen kontrol yöntemi binaların titreşim kontrolü içinde kullanılabilir. Önerilen kontrol yönteminin gerçek bir binaya uygulanması için büyük kontrol kuvvetleri gereklidir. Bu kuvvetler MR ve ER sıvı kullanan sönümleyiciler ile elde edilebilir. ER sıvı, toz gibi sıvının saflığını azaltacak etkenlere karşı hassastır bundan dolayı MR sönümleyiciler tercih edilir [23]. Laboratuvar ortamında MR sönümleyicinin gerçek bir binayı kontrol edecek kuvvetler üretebileceğini gösteren çalışmalar vardır [24]. Gerçek bina titreşimlerini kontrol eden bir sönümleyici Kurino ve diğ. tarafından üretilmiştir [25]. Çok serbestlik dereceli yapıların aktif kontrolünü elektro-relojik sıvı ile sağlayan sönümleyiciler kullanılarak incelenmesi Ribakov ve Gluck tarafından yapılmış ve 7 katlı bir binanın deplasmanları, temeldeki kesme kuvveti ve ivme değeri arttırılmaksızın % 65 oranında azaltılmıştır [26].

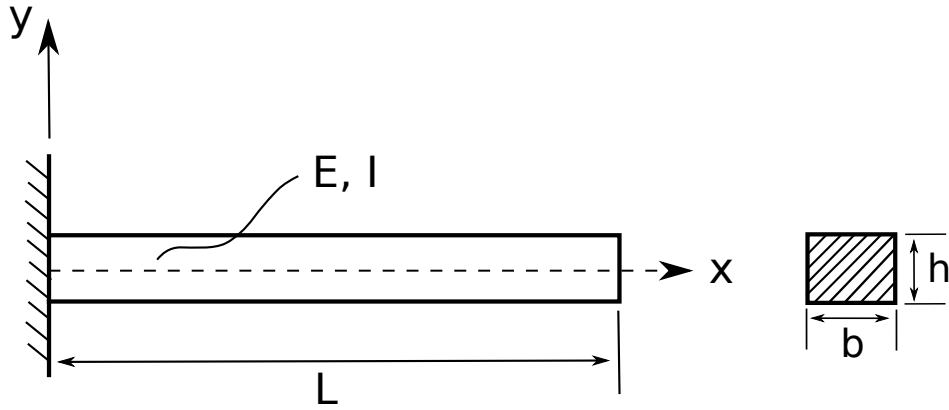
Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak kirişlerin titreşim karakteristiklerinin incelendiği çalışmalara bakıldığında araştırmacıların, kiriş denklemlerini sayısal yöntemler kullanarak çözdüğü çalışmalar mevcuttur. Sayısal yöntemler kullanılarak yapılan

özümleer yaklaşık özümleerdir. Yaklaşıklık oranı sayısal yöntem kullanılırken sistemin kaç noktaya ayrılarak çözüm yapıldığı ile doğru orantılıdır. Yaklaşıklık oranını arttırmak için hesaplama yapılan nokta sayısı arttırıldığında hesap süresi uzamakta ve daha güçlü bilgisayar sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. özümün analitik olarak bulunduğu çalışmalarda elde edilen sonuçlar daha kesin olmaktadır. Bu çalışmada olduğu gibi, giriş titreşim karakteristiklerini ifade eden hareket denklemlerinin tam analitik olarak elde edildiği çalışmalar mevcuttur [27, 28, 29, 30, 31].

3 MALZEME VE YÖNTEM

3.1 KONTROLCÜSÜZ KİRİŞİN ÖZFREKANS LARI VE MOD ŞEKİLLERİ

Şekil 3.1 'de görülen kirişin bir ucu ankstre mesnetli diğer ucu serbesttir. L kirişin uzunluğunu, b kiriş kesitinin genişliğini ve h kesit yüksekliğini göstermektedir. Kirişin eğilme titreşimleri Euler-Bernoulli kiriş denklemi ile ifade edilir.



Şekil 3.1: Kontrolcüsüz kiriş.

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.1)$$

Denk.(3.1) 'de E kirişin elastiklik modülünü, I alan atalet momentini ve ρ 'da birim uzunluk başına düşen kütleyi göstermektedir.

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{L} \\ w^* &= \frac{w}{L} \\ t^* &= \sqrt{\frac{E}{\rho}} t \end{aligned} \quad (3.2)$$

(3.2) 'deki dönüşümler kullanılarak Denk.(3.1) boyutsuz hale çevrilir. Boyutsuzlaştırma yapabilmek için öncelikle birim analizi yapılır ve bu birim analizi ile denklemin

boyutsuzlaştırılması sırasında kullanılacak dönüşümler belirlenir. (3.2) 'de görüldüğü üzere konum (x) ve kirişin sehimini (w) boyutsuzlaştırmak için çubuğun boyu (L) kullanılmıştır. Zamanı boyutsuzlaştırmak için ise elastiklik modülü ve birim uzunluk başına düşen kütle kullanılmıştır. Denk.(3.1) boyutsuzlaştırıldığında aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{\partial^4 w^*(x^*, t^*)}{\partial x^{*4}} + k^4 \frac{\partial^2 w^*(x^*, t^*)}{\partial t^{*2}} = 0 \quad (3.3)$$

Bundan sonra boyutsuz değişkenleri kullanacağımız için Denk.(3.3) 'deki “ * ” ları kaldırabiliriz. Harmonik titreşimleri incelemek için Denk.(3.3) 'te,

$$w(x, t) = W(x) e^{i\omega t} \quad (3.4)$$

yazılırsa,

$$W''''(x) - k^4 \omega^2 W(x) = 0 \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu denklemin genel çözümü,

$$W(x) = C_1 \sin(k x \alpha) + C_2 \cos(k x \alpha) + C_3 \sinh(k x \alpha) + C_4 \cosh(k x \alpha) \quad (3.6)$$

dır. Burada

$$\alpha = \sqrt{\omega} \quad (3.7)$$

dır. Kirişin hareketi 4. dereceden diferansiyel denklem ile ifade edildiği için bu denklemin çözümünü bulabilmek için 4 adet koşula ihtiyacımız var. Bu koşulları kirişin uçlarında sınır şartlarını yazarak elde edebiliriz. Kirişin sabit ucunda sehim ve eğilme açısı, serbest uçta ise kesme kuvveti ve eğilme momenti sıfıra eşittir. Sınır şartları Denk.(3.6) 'e uygulanırsa, ankastre uç için

$$W(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_2 + C_4 = 0 \quad (3.8)$$

$$W'(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad k \alpha C_1 + k \alpha C_3 = 0 \quad (3.9)$$

serbest uç için,

$$\begin{aligned} W''(L) = 0 \quad \Rightarrow \quad & -k^2 \alpha^2 C_2 \cos(k L \alpha) + k^2 \alpha^2 C_4 \cosh(k L \alpha) \\ & -k^2 \alpha^2 C_1 \sin(k L \alpha) + k^2 \alpha^2 C_3 \sinh(k L \alpha) = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} W'''(L) = 0 \quad \Rightarrow \quad & -k^3 \alpha^3 C_1 \cos(k L \alpha) + k^3 \alpha^3 C_3 \cosh(k L \alpha) \\ & + k^3 \alpha^3 C_2 \sin(k L \alpha) + k^3 \alpha^3 C_4 \sinh(k L \alpha) = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

olur. (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) denklemlerinin katsayılar matrisi

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ k \alpha & 0 & k \alpha & 0 \\ -k^2 \alpha^2 \sin(k L \alpha) & -k^2 \alpha^2 \cos(k L \alpha) & k^2 \alpha^2 \sinh(k L \alpha) & k^2 \alpha^2 \cosh(k L \alpha) \\ -k^3 \alpha^3 \cos(k L \alpha) & k^3 \alpha^3 \sin(k L \alpha) & k^3 \alpha^3 \cosh(k L \alpha) & k^3 \alpha^3 \sinh(k L \alpha) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

dir. Katsayılar matrisinin determinatıda,

$$\text{Det}(A) = 2 k^6 \alpha^6 (1 + \cos(k L \alpha) \cosh(k L \alpha)) \quad (3.13)$$

$\text{Det}(A) = 0$ yanlış pozisyon yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözümlenerek kirişin özdeğerleri elde edilir. Özfrenslardan ilk beş tanesi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0.01865 \\ \omega_2 &= 0.11686 \\ \omega_3 &= 0.3272 \\ \omega_4 &= 0.64118 \\ \omega_5 &= 1.05992 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Bir sistemin bütünü sinüzoidal olarak aynı frekans ve fazda hareket ettiği durumu gösteren mod şekli aynı zamanda matematiksel olarak Denk.(3.5) 'in özfonksiyonudur. Kirişin sonsuz adet özfrenansı olduğu için sistemin bu özfrenans ile titreşim yaptığı durumda aldığı şekilleri gösteren sonsuz adet mod şekli vardır. Mod şekli, hareket denkleminin genel çözümündeki (Denk.(3.6)) katsayılarından bir tanesi keyfi seçilerek diğerlerinin bu keyfi sabite bağlı olarak bulunması ile elde edilir. (3.8),

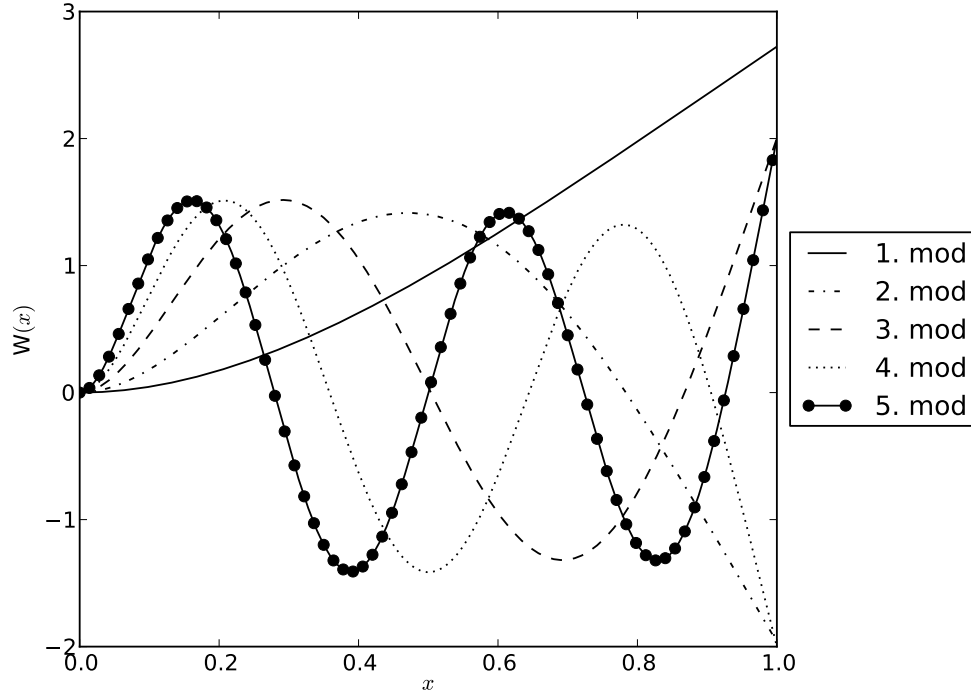
(3.9), (3.10) ve (3.11) numaralı sınır şartı denklemlerinden,

$$C_2 = C_1 \frac{\cos(k L \alpha) + \cosh(k L \alpha)}{\sin(k L \alpha) - \sinh(k L \alpha)} \quad (3.15)$$

elde edilir. (3.8),(3.9) ve (3.15), Denk(3.6)' de yerine yazılırsa mod şeklini veren ifade elde edilir.

$$W(x) = C_1 \left(\sin(k x \alpha) - \sinh(k x \alpha) + \frac{\cos(k L \alpha) + \cosh(k L \alpha)}{\sin(k L \alpha) - \sinh(k L \alpha)} (\cos(k x \alpha) - \cosh(k x \alpha)) \right) \quad (3.16)$$

Özfonksiyon (mod şekli) bir faktöre kadar belli olduğundan C_1 sabitini 1 alabiliriz. Kontrolcüsüz kirişin mod şekilleri Şekil.(3.1) 'de görülmektedir. Karışıklığı önlemek



Şekil 3.2: Kontrolcüsüz kirişin mod şekilleri.

için bundan sonra mod şekli için W yerine Q kullanacağız.

$$Q(x) = C_1 \left(\sin(k x \alpha) - \sinh(k x \alpha) + \frac{\cos(k L \alpha) + \cosh(k L \alpha)}{\sin(k L \alpha) - \sinh(k L \alpha)} (\cos(k x \alpha) - \cosh(k x \alpha)) \right) \quad (3.17)$$

Özfrekanslar ve öz fonksiyonlar ayrık olduğundan α_n ve $Q_n(\alpha)$ sembollerini kullanacağız. Özfonksiyonlar ortogonaldır.

$$\int_0^L Q_n(x) Q_m(x) dx = k_n \delta_{mn} \quad (3.18)$$

Çözüm yapılırken ortogonalite şartı önemli olacak.

3.2 KONTROLCÜSÜZ DURUM ZAMAN CEVABI

Kirişin zorlanmış titreşim cevabını bulmak için,

$$\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + k^4 \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = f(x, t) \quad (3.19)$$

denklemi çözülür. Burada $f(x, t)$ sisteme uygulanan zorlama kuvvetini göstermektedir. Modal analiz için kirişin sehim cevabı ve zorlama kuvveti modal fonksiyonlar cinsinden seriye açılır.

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n(t) Q_n(x) \quad (3.20)$$

$$f(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) Q_n(x) \quad (3.21)$$

Denk.(3.19) 'in başlangıç koşulları aşağıda verilmiştir.

$$w(x, 0) = w_0(x) \quad , \quad \dot{w}(x, 0) = v_0(x) \quad (3.22)$$

(3.20) ve (3.21) eşitlikleri Denk.(3.19) 'de yerine yazılırsa

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{d^4 Q_n(x)}{dx^4} W_n(t) + k^4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial^2 W_n(t)}{dt^2} Q_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) Q_n(x) \quad (3.23)$$

olur. Denk.(3.23) $Q_m(x)$ ile çarpılıp integre edilirse,

$$\begin{aligned} W_n(t) \int_0^L \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d^4 Q_n(x)}{dx^4} Q_m(x) dx + k^4 \frac{\partial^2 W_n(t)}{dt^2} \int_0^L \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(x) Q_m(x) dx \\ = F_n(t) \int_0^L \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(x) Q_m(x) dx \end{aligned} \quad (3.24)$$

elde edilir. Burada $Q_m(x)$ ve $Q_n(x)$ 'in ortogonal oldukları için (3.18) kullanılırsa

$$\int_0^L \frac{\partial^4 Q_n(x)}{\partial x^4} Q_m(x) dx = \omega_n^2 k^4 k_n \delta_{mn} \quad (3.25)$$

olur.

$$k^4 \omega_n^2 W_n(t) + k^4 \frac{\partial^2 W_n(t)}{dt^2} = F_n(t) \quad (3.26)$$

Burada $F_n(t)$ zorlama kuvvetin seri katsayısıdır yani,

$$F_n(t) = \frac{1}{k_n \delta_{mn}} \int_0^L f(x, t) Q_m(x) dx$$

Sisteme uygulanan bozucu etkiyi $f(x, t) = Q_1(x) \text{Cos}(\omega_1 t)$ olarak seçelim. Bu bozucu etki kirişin maruz kalabileceği en kötü durumdur çünkü kirişin 1. mod şekli zamanla periyodik olarak değişen bir biçimde kirişe uygulanmaktadır. Bu bozucu etki zaman ilerledikçe kirişi rezonansa sokar ve kiriş kırılır. Denklemdaki $n = 1$ terimi çubuğun uygulanan $f(x, t)$ kuvveti karşısındaki zaman cevabını vermektedir;

$$\ddot{W}_1(t) + \omega_1^2 W_1(t) = \frac{1}{k^4} \cos(\omega_1 t) \quad (3.27)$$

Denk.(3.27)'in homojen çözümünü,

$$W_1(t) = C_1 \cos(\omega_1 t) + C_2 \sin(\omega_1 t) \quad (3.28)$$

şeklinde yazabiliriz. Parametrelerin değişimi yöntemini kullanacağımız için Denk.(3.28)'in katsayıları değişken hale getirilir

$$W_1(t) = C_1(t) \cos(\omega_1 t) + C_2(t) \sin(\omega_1 t) \quad (3.29)$$

Parametrelerin değişimi yöntemi uygulandığında $C_1(t)$ ve $C_2(t)$ katsayıları aşağıdaki gibi elde edilir

$$C_1(t) = -\frac{\sin^2(\omega_1 t)}{2 k^4 \omega_1^2} + D_1 \quad (3.30)$$

$$C_2(t) = \frac{\sin(2\omega_1 t) + 2\omega_1 t}{4 k^4 \omega_1^2} + D_2 \quad (3.31)$$

(3.30) ve (3.31), (3.29) 'de yerine yazılır.

$$W_1(t) = \left(-\frac{\sin^2(\omega_1 t)}{2k^4\omega_1^2} + D_1 \right) \cos(\omega_1 t) + \left(\frac{\sin(2\omega_1 t) + 2\omega_1 t}{4k^4\omega_1^2} + D_2 \right) \sin(\omega_1 t) \quad (3.32)$$

Başlangıç şartlarını $W_1(0) = w_{10}$ ve $\dot{W}_1(0) = \dot{w}_{10}$ şeklinde seçelim. Bu şartları, (3.22) ile beraber Denk.(3.20) 'ye uygulayalım. Başlangıç şartları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w_{10} = \frac{1}{k_1} \int_0^L w_0(x) Q_1(x) dx \quad (3.33)$$

$$\dot{w}_{10} = \frac{1}{k_1} \int_0^L v_0(x) Q_1(x) dx \quad (3.34)$$

Başlangıç şartları (3.32) 'ye uygulanırsa D_1 ve D_2 katsayıları elde edilir.

$$W_1(0) = w_{10} \quad \Rightarrow \quad D_1 = w_{10} \quad (3.35a)$$

$$\dot{W}_1(0) = \dot{w}_{10} \quad \Rightarrow \quad D_2 = \frac{\dot{w}_{10}}{\omega_1} \quad (3.35b)$$

(3.35a) ve (3.35b), Denk.(3.32) 'de yerine yazılarak çözümün zaman bileşeni elde edilir.

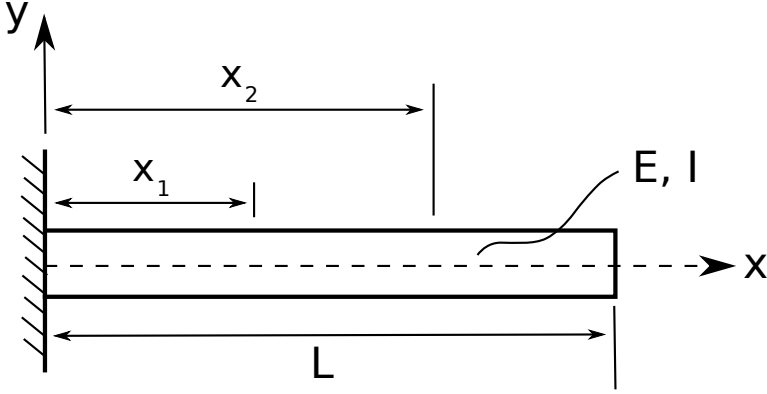
$$W_1(t) = \left(-\frac{\sin^2(\omega_1 t)}{2k^4\omega_1^2} + w_{10} \right) \cos(\omega_1 t) + \left(\frac{\sin(2\omega_1 t) + 2\omega_1 t}{4k^4\omega_1^2} + \frac{\dot{w}_{10}}{\omega_1} \right) \sin(\omega_1 t) \quad (3.36)$$

(3.36) 'de $w_0 = 0$ ve $\dot{v}_0 = 0$ alırsak ve bunu (3.20) 'de yerine yazarsak zaman cevabını elde etmiş oluruz.

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(-\frac{\sin^2(\omega_1 t)}{2 k^4 \omega_1^2} \right) \cos(\omega_1 t) + \left(\frac{\sin(2\omega_1 t) + 2\omega_1 t}{4 k^4 \omega_1^2} \right) \sin(\omega_1 t) \right) \left(\sin(k x \sqrt{\omega_n}) - \sinh(k x \sqrt{\omega_n}) + \frac{\cos(k L \sqrt{\omega_n}) + \cosh(k L \sqrt{\omega_n})}{\sin(k L \sqrt{\omega_n}) - \sinh(k L \sqrt{\omega_n})} (\cos(k x \sqrt{\omega_n}) - \cosh(k x \sqrt{\omega_n})) \right) \quad (3.37)$$

(3.37) 'u incelediğimizde ikinci terimde payda “ $2\omega_1 t$ ” bileşeni gözükmektedir. Bu bileşen rezonansı temsil etmektedir. Zaman arttığında bu bileşen çok hızlı bir şekilde büyüyeceğinden sehim de büyüyecek ve kiriş tahrip olacaktır.

3.3 KONTROL UYGULANAN KİRİŞİN ÖZFRE KANSLARI VE MOD ŞEKİLLERİ



Şekil 3.3: Kontrol uygulanan kiriş.

Kirişin titreşimleri dağıtılmış parametrelili bir sistem olarak düşünülerek kontrol edilecektir. Bunun için kiriş üzerinde belirli bir noktada (x_1) ölçülen sehim ile orantılı noktasal bir kuvvet başka bir noktada (x_2) uygulanacaktır.

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + K W(x_1) \delta(x - x_2) = 0 \quad (3.38)$$

Burada $K W(x_1) \delta(x - x_2)$ ifadesi kontrol kuvvetini göstermektedir. K geri besleme kontrol kazancıdır. K, x_1 ve x_2 kontrol yönteminin parametreleridir. Kirişin bozucu etki altında rezonansa girmesini engelleyecek parametre değerleri araştırılacaktır. Denk.(3.2) 'ye benzer şekilde Denk.(3.38) 'de boyutsuzlaştırılır.

$$W''''(x^*) - k^4 \omega^2 W^*(x^*) + K^* W^*(x_1^*) \delta(x^* - x_2^*) = 0 \quad (3.39)$$

Burada,

$$K^* = \frac{K}{EI L^2} \quad (3.40)$$

boyutsuz kontrol kazancıdır. Yine kolaylık olması açısından yukarıdaki denklemdeki * ları kaldırabiliriz. Kontrolcülü durumda çubuğun öz değerlerinin elde edilmesi için parametrelerin değişimi yönteminden faydalanılır. Bu yöntemde homojen çözümün

katsayıları değişken hale getirilir. O zaman homojen çözümler aşağıdaki gibi yazılır.

$$W(x) = C_1(x) \cosh(kx\alpha) + C_2(x) \sinh(kx\alpha) + C_3(x) \cos(kx\alpha) + C_4(x) \sin(kx\alpha) \quad (3.41)$$

$C_1(x)$, $C_2(x)$, $C_3(x)$ ve $C_4(x)$ katsayıları Cramer kuralı kullanılarak hesaplanır.

$$C'_n(x) = \frac{g(x) P_n(x)}{P(x)} \quad (3.42)$$

Burada $P(x)$,

$$P(x) = \begin{vmatrix} \cosh(kx\alpha) & \sinh(kx\alpha) & \cos(kx\alpha) & \sin(kx\alpha) \\ k\alpha \sinh(kx\alpha) & k\alpha \cosh(kx\alpha) & -k\alpha \sin(kx\alpha) & k\alpha \cos(kx\alpha) \\ k^2\alpha^2 \cosh(kx\alpha) & k^2\alpha^2 \sinh(kx\alpha) & -k^2\alpha^2 \cos(kx\alpha) & -k^2\alpha^2 \sin(kx\alpha) \\ k^3\alpha^3 \sinh(kx\alpha) & k^3\alpha^3 \cosh(kx\alpha) & k^3\alpha^3 \sin(kx\alpha) & -k^3\alpha^3 \cos(kx\alpha) \end{vmatrix} \\ = 4k^6\alpha^6 \quad (3.43)$$

$P_n(x)$ ise $P(x)$ determinantındaki "n." kolonun yerine $[0, 0, 0, 1]^T$ yazılması ile elde edilen determinanttır. $g(x)$ ise Denk.(3.39) 'nin sağ tarafı yani,

$$g(x) = -K W(x_1) \delta(x - x_2)$$

dır. (3.42) 'de $n = 1, 2, 3, 4$ yazılarak,

$$C'_1(x) = \frac{K \delta(x - x_2) \sinh(kx\alpha) W(x_1)}{2k^3\alpha^3} \quad (3.44)$$

$$C'_2(x) = -\frac{K \cosh(kx\alpha) \delta(x - x_2) W(x_1)}{2k^3\alpha^3} \quad (3.45)$$

$$C'_3(x) = -\frac{K \delta(x - x_2) \sin(kx\alpha) W(x_1)}{2k^3\alpha^3} \quad (3.46)$$

$$C'_4(x) = \frac{K \cos(kx\alpha) \delta(x - x_2) W(x_1)}{2k^3\alpha^3} \quad (3.47)$$

elde edilir. İntegral alınarak,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0) f(x) dx = f(x_0)$$

olduğundan katsayılar aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$C_1(x) = D_1 + \frac{K h(x - x_2) \sinh(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \quad (3.48)$$

$$C_2(x) = D_2 - \frac{K h(x - x_2) \cosh(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \quad (3.49)$$

$$C_3(x) = D_3 - \frac{K h(x - x_2) \sin(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \quad (3.50)$$

$$C_4(x) = D_4 + \frac{K h(x - x_2) \cos(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \quad (3.51)$$

Burada $h(x - x_2)$ birim basamak fonksiyonudur. Böylece

$$\begin{aligned} W(x) = & \cosh(k x \alpha) \left(D_1 + \frac{K h(x - x_2) \sinh(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \right) \\ & + \sinh(k x \alpha) \left(D_2 - \frac{K h(x - x_2) \cosh(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \right) \\ & + \cos(k x \alpha) \left(D_3 - \frac{K h(x - x_2) \sin(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \right) \\ & + \sin(k x \alpha) \left(D_4 + \frac{K h(x - x_2) \cos(k x_2 \alpha) W(x_1)}{2 k^3 \alpha^3} \right) \end{aligned} \quad (3.52)$$

olur. (3.48), (3.49), (3.50) ve (3.51), Denk.(3.41) yerlerine yazılır. Elde edilen denkleme sınır şartları uygulanır.

$$W(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad D_1 + D_3 = 0 \quad (3.53)$$

$$W'(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad D_2 k \alpha + D_4 k \alpha = 0 \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned}
W''(L) = 0 \quad \Rightarrow \quad & -\frac{K W(x_1)}{2 k \alpha} \left(\sin(k L \alpha) \left(D_4 + \cos(k x_2 \alpha) \right) \right. \\
& + \sinh(k L \alpha) \left(D_2 - \cosh(k x_2 \alpha) \right) \\
& - \cos(k L \alpha) \left(D_3 - \sin(k x_2 \alpha) \right) \\
& \left. + \cosh(k L \alpha) \left(D_1 + \sinh(k x_2 \alpha) \right) \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.55}$$

$$\begin{aligned}
W'''(L) = 0 \quad \Rightarrow \quad & -\frac{K W(x_1)}{2} \left(\cos(k L \alpha) \left(D_4 + \cos(k x_2 \alpha) \right) \right. \\
& + \cosh(k L \alpha) \left(D_2 - \cosh(k x_2 \alpha) \right) \\
& + \sin(k L \alpha) \left(D_3 - \sin(k x_2 \alpha) \right) \\
& \left. + \sinh(k L \alpha) \left(D_1 + \sinh(k x_2 \alpha) \right) \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.56}$$

(3.53), (3.54), (3.55) ve (3.56) ortak çözümlere D_1 , D_2 , D_3 ve D_4 katsayıları bulunur.

$$\begin{aligned}
D_1 = -R \left(\sin(k x_2 \alpha) + \sinh(k x_2 \alpha) + \cosh(k L \alpha) \left(\cosh(k x_2 \alpha) \sin(k L \alpha) \right. \right. \\
\left. \left. - \sin(k (L - x_2) \alpha) + \cos(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right) + \sinh(k L \alpha) \right. \\
\left. \left(\cos(k (L - x_2) \alpha) - \cos(k L \alpha) \cosh(k x_2 \alpha) - \sin(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right) \right)
\end{aligned} \tag{3.57}$$

$$\begin{aligned}
D_2 = & R \left(\cos(k x_2 \alpha) - \cos(k x_2 \alpha) \sin(k L \alpha) \sinh(k L \alpha) \right. \\
& + \cos(k L \alpha) \sin(k x_2 \alpha) \sinh(k L \alpha) + \cosh(k x_2 \alpha) \\
& \left. (1 + \sin(k L \alpha) \sinh(k L \alpha)) - \cos(k L \alpha) \sinh(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right. \quad (3.58) \\
& + \cosh(k L \alpha) \left(\cos(k (L - x_2) \alpha) + \cos(k L \alpha) \cosh(k x_2 \alpha) \right. \\
& \left. \left. - \sin(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_3 = & R \left(\sin(k x_2 \alpha) + \sinh(k x_2 \alpha) + \cosh(k L \alpha) \left(\cosh(k x_2 \alpha) \sin(k L \alpha) \right. \right. \\
& \left. \left. - \sin(k (L - x_2) \alpha) + \cos(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right) + \sinh(k L \alpha) \left(\cos(k (L - x_2) \alpha) \right. \right. \\
& \left. \left. - \cos(k L \alpha) \cosh(k x_2 \alpha) - \sin(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right) \right) \quad (3.59)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_4 = & - R \left(\cos(k x_2 \alpha) - \cos(k x_2 \alpha) \sin(k L \alpha) \sinh(k L \alpha) \right. \\
& + \cos(k L \alpha) \sin(k x_2 \alpha) \sinh(k L \alpha) + \cosh(k x_2 \alpha) \\
& \left. (1 + \sin(k L \alpha) \sinh(k L \alpha)) - \cos(k L \alpha) \sinh(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right. \quad (3.60) \\
& + \cosh(k L \alpha) \left(\cos(k (L - x_2) \alpha) \right. \\
& \left. \left. + \cos(k L \alpha) \cosh(k x_2 \alpha) - \sin(k L \alpha) \sinh(k x_2 \alpha) \right) \right)
\end{aligned}$$

Burada,

$$R = \frac{K W(x_1)}{4 k^3 \alpha^3 (1 + \cos(k L \alpha) \cosh(k L \alpha))}$$

olarak tanımlanmıştır. Denk.(3.52)'nin sağ tarafı $W(x_1)$ terimini içerdiğinden açık bir çözüm değildir. Ancak Denk.(3.52)'de $x = x_1$ yapılırsa $W(x_1)$ düşer ve K, x_1, x_2, L, ω ve k 'yi içeren cebirsel bir denklem elde edilir.

$$f(K, x_1, x_2, L, \omega, k) = 1 \tag{3.61}$$

Burada K, x_1 ve x_2 değiştirilerek kontrol edilen durum için özdeğerler elde edilir. Denk.(3.52)'de $W(x_1)$ sabit bir sayı olduğu için, $W(x_1)$ 'in önündeki $g(K, x, x_2)$ fonksiyonu ile kontrol uygulanan kirişin mod şekilleri elde edilir.

3.4 KONTROL UYGULANAN KİRİŞİN ZORLAN MIŞ TİTREŞİM ZAMAN CEVABI

Kontrol uygulanan durumda çubuğun titreşimleri,

$$\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + k^4 \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + K w(x_1) \delta(x - x_2) = f(x, t) \quad (3.62)$$

denklemini ile tanımlanır. Bunu çözmek için çözüm $Q_n(x)$ 'lerin süperpozisyonu olarak ifade edilir ve yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} W_n(t) \frac{\partial^4 Q_n(x)}{\partial x^4} + k^4 \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(x) \frac{\partial^2 W_n(t)}{\partial t^2} + \sum_{n=1}^{\infty} W_n(t) Q_n(x_1) \delta(x - x_2) K \\ = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) Q_n(x) \end{aligned} \quad (3.63)$$

(3.63) 'nın her iki tarafını $Q_m(x)$ ile çarpalım ve çubuğun uzunluğu ($[0, L]$) boyunca integralini alalım. O zaman,

$$\ddot{W}_m(t) + \omega_m^2 W_m(t) + \frac{K}{k_m k^4} Q_m(x_2) \sum_{n=1}^{\infty} W_n(t) Q_n(x_1) = \frac{1}{k_m k^4} \int_0^L f(x, t) Q_m(x) dx \quad (3.64)$$

olur. En kötü durumda kontrolcünün nasıl çalıştığını görmek için sistemi birinci doğal frekansı ile zorlayalım yani $f(x, t) = Q_1(x) \cos(\omega_1 t)$ olarak seçelim. O zaman denkleminiz aşağıdaki şekli alır

$$\begin{aligned} \ddot{W}_m(t) + \omega_m^2 W_m(t) + \frac{K}{k_m k^4} Q_m(x_2) \sum_{n=1}^m W_n(t) Q_n(x_1) \\ = \frac{1}{k_m k^4} \cos(\omega_1 t) k_{m1} \delta_{m1} \end{aligned} \quad (3.65)$$

Birinci mod için denklem ayrı olarak yazılırsa,

$$\ddot{W}_1(t) + \left(\omega_1^2 + \frac{K}{k_1 k^4} Q_1(x_1) Q_1(x_2) \right) W_1(t) = \frac{1}{k^4} \cos(\omega_1 t) \quad (3.66)$$

elde edilir. Denk.(3.66) 'yı çözmek için $W_1(t) = e^{r t}$ yazılır,

$$\begin{aligned} r_1 &= -i \sqrt{\omega_1^2 + \frac{K}{k_1 k^4} Q_1(x_1) Q_1(x_2)} \\ r_2 &= i \sqrt{\omega_1^2 + \frac{K}{k_1 k^4} Q_1(x_1) Q_1(x_2)} \\ z &= \sqrt{\omega_1^2 + \frac{K}{k_1 k^4} Q_1(x_1) Q_1(x_2)} \end{aligned} \quad (3.67)$$

Ve homojen çözüm

$$W(t) = C_1 \cos(z t) + C_2 \sin(z t) \quad (3.68)$$

olarak bulunur. Homojen olmayan denklem için yine çözüm yöntemi olarak parametrelerin değişimi yöntemi kullanılır.

$$W(t) = C_1(t) \cos(z t) + C_2(t) \sin(z t) \quad (3.69)$$

(3.69), Denk.(3.66) 'de yerine yazılır ve $\dot{C}_1(t)$ ve $\dot{C}_2(t)$ bulunur

$$\dot{C}_1(t) = -\frac{\cos(\omega_1 t) \sin(z t)}{k^4 z} \quad (3.70)$$

$$\dot{C}_2(t) = \frac{\cos(z t) \cos(\omega_1 t)}{k^4 z} \quad (3.71)$$

(3.70) ve (3.71) integrali alınarak $C_1(t)$ ve $C_2(t)$ bulunur.

$$C_1(t) = D_1 + \frac{z (\cos(z t) \cos(\omega_1 t) - 1) + \sin(z t) \sin(\omega_1 t) \omega_1}{k^4 (z^3 - z \omega_1^2)} \quad (3.72)$$

$$C_2(t) = D_2 + \frac{z \cos(\omega_1 t) \sin(z t) - \cos(z t) \sin(\omega_1 t) \omega_1}{k^4 (z^3 - z \omega_1^2)} \quad (3.73)$$

Başlangıç şartları,

$$W(0) = w_0 \quad (3.74)$$

$$\dot{W}(0) = v_0 \quad (3.75)$$

(3.72) ve (3.73), (3.75) ile beraber (3.69) 'de yerlerine yazılarak,

$$D_1 = w_0 \quad (3.76)$$

$$D_2 = \frac{v_0}{z} \quad (3.77)$$

elde edilir. İlk şartlar $w_0 = 0$ ve $v_0 = 0$ alınır. (3.67), (3.69) 'de yerine yazılır ve bir mod için zaman cevabı elde edilmiş olur.

Birden fazla mod kullanılarak zaman cevabı elde edilmek istendiğinde, her bir mod için Denk.(3.65) yazılır ve oluşan denklem sistemi çözümlenerek zaman cevabı elde edilir.

“M” adet mod kullanıldığında denklem sistemi aşağıdaki gibi yazılır

$$\begin{aligned} \ddot{W}_1(t) + \left(\omega_1^2 + \frac{K}{k_1 k^4} Q_1(x_2) Q_1(x_1) \right) W_1(t) &= \frac{1}{k^4} \cos(\omega_1 t) \\ \ddot{W}_2(t) + \left(\omega_2^2 + \frac{K}{k_2 k^4} Q_2(x_2) Q_2(x_1) \right) W_2(t) + \frac{K}{k_2 k^4} Q_2(x_2) Q_1(x_1) W_1(t) &= 0 \\ &\vdots \\ \ddot{W}_{M-1}(t) + \left(\omega_{M-1}^2 + \frac{K}{k_{M-1} k^4} Q_{M-1}(x_2) Q_{M-1}(x_1) \right) W_{M-1}(t) \\ &+ \frac{K}{k_{M-1} k^4} Q_{M-1}(x_2) \left(W_1(t) Q_1(x_1) + W_2(t) Q_2(x_1) + \dots + W_{M-2}(t) Q_{M-2}(x_1) \right) = 0 \\ \ddot{W}_M(t) + \left(\omega_M^2 + \frac{K}{k_M k^4} Q_M(x_2) Q_M(x_1) \right) W_M(t) + \frac{K}{k_M k^4} Q_M(x_2) \\ &\left(W_1(t) Q_1(x_1) + W_2(t) Q_2(x_1) + \dots + W_{M-1}(t) Q_{M-1}(x_1) \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.78)$$

Kirişin hareketinin zamana bağlı değişimini tanımlayan denklem sisteminin ilk denkleminin sağ tarafında zorlama fonksiyonu olduğundan, çözüm homojen çözüm ile özel çözümün toplanmasıyla elde edilecektir. Denklem sistemindeki her bir denklemin

homojen çözümünün,

$$W_{h_n}(t) = X_{h_n} e^{rt} \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (3.79)$$

şeklinde olduğunu farz edelim. Bu homojen çözümler denklem sistemindeki yerlerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılarak katsayılar matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,M-1} & a_{1,M} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,M-1} & a_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{M-1,1} & a_{M-1,2} & \dots & a_{M-1,M-1} & a_{M-1,M} \\ a_{M,1} & a_{M,2} & \dots & a_{M,M-1} & a_{M,M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{h_1}(t) \\ X_{h_2}(t) \\ \vdots \\ X_{h_{M-1}}(t) \\ X_{h_M}(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= r^2 + \omega_1^2 + \frac{K}{k_1 k^4} Q_{1,1} Q_{1,2} \\ a_{1,2} &= \frac{K}{k_1 k^4} Q_{1,2} Q_{2,1} \\ a_{1,M-1} &= \frac{K}{k_1 k^4} Q_{M-1,1} Q_{M-1,2} \\ a_{1,M} &= \frac{K}{k_1 k^4} Q_{M,1} Q_{M,2} \\ a_{2,1} &= \frac{K}{k_2 k^4} Q_{2,1} Q_{1,2} \\ a_{2,2} &= r^2 + \omega_2^2 + \frac{K}{k_2 k^4} Q_{2,1} Q_{2,2} \\ a_{2,M-1} &= \frac{K}{k_2 k^4} Q_{2,1} Q_{M-1,2} \\ a_{2,M} &= \frac{K}{k_2 k^4} Q_{2,1} Q_{M,2} \\ a_{M-1,1} &= \frac{K}{k_{M-1} k^4} Q_{1,1} Q_{M-1,2} \\ a_{M-1,2} &= \frac{K}{k_{M-1} k^4} Q_{2,1} Q_{M-1,2} \\ a_{M-1,M-1} &= r^2 + \omega_{M-1}^2 + \frac{K}{k_{M-1} k^4} Q_{M-1,1} Q_{M-1,2} \\ a_{M-1,M} &= \frac{K}{k_{M-1} k^4} Q_{M,1} Q_{M-1,2} \\ a_{M,1} &= \frac{K}{k_M k^4} Q_{1,1} Q_{M,2} \\ a_{M,2} &= \frac{K}{k_M k^4} Q_{2,1} Q_{M,2} \\ a_{M,M-1} &= \frac{K}{k_M k^4} Q_{M-1,1} Q_{M,2} \\ a_{M,M} &= r^2 + \omega_M^2 + \frac{K}{k_M k^4} Q_{M,1} Q_{M,2} \end{aligned}$$

Matris elemanları yazılırken kolaylık olması açısından $Q_{i,j} = Q_i(x_j)$ kısaltması kullanılmıştır. Katsayılar matrisinin determinatı sıfıra eşitlenir ve r için çözümlerse kirişin hareketini tanımlayan denklem sisteminin çözüm kümesi elde edilir. Bu çözüm kümesi denklem sistemindeki her bir denklemi sağladığından, denklemlerin homojen

çözümünü aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\begin{aligned}
W_{h_1}(t) &= a_{1,1} X_{h_1} e^{rt} + a_{1,2} X_{h_2} e^{rt} + \dots + a_{1,M} X_{h_M} e^{rt} \\
W_{h_2}(t) &= a_{2,1} X_{h_1} e^{rt} + a_{2,2} X_{h_2} e^{rt} + \dots + a_{2,M} X_{h_M} e^{rt} \\
&\vdots \\
W_{h_{M-1}}(t) &= a_{M-1,1} X_{h_1} e^{rt} + a_{M-1,2} X_{h_2} e^{rt} + \dots + a_{M-1,M} X_{h_M} e^{rt} \\
W_{h_M}(t) &= a_{M,1} X_{h_1} e^{rt} + a_{M,2} X_{h_2} e^{rt} + \dots + a_{M,M} X_{h_M} e^{rt} \quad (3.81)
\end{aligned}$$

Denklem sistemi indirgeme metodu kullanılarak eşelon formuna dönüştürülür. Denklem sistemindeki “M” adet denklemden bir tanesi denklem sisteminden çıkartılır. Bu durumda geriye “M” adet değişkene bağlı “M-1” adet denklem kalır. Değişken sayısı denklem sayısından fazla olduğu için sistemin sonsuz çözümü vardır. Sistemin tek çözümünü bulabilmek için fazla değişken X_{h_t} sabit bir değer farz edilir. Böylece “M-1” adet değişkenden oluşan “M-1” adet denklem çözülür ve $X_{h_1}, X_{h_2}, \dots, X_{h_{M-1}}$ değişkenleri X_t ye bağlı olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned}
X_{h_1} &= f_1(r) X_{h_t} \\
X_{h_2} &= f_2(r) X_{h_t} \\
&\vdots \\
X_{h_{M-1}} &= f_{M-1}(r) X_{h_t} \quad (3.82)
\end{aligned}$$

(3.82) 'deki eşitlikler (3.81) 'de yerlerine yazılır ve homojen çözüm denklemleri elde edilmiş olur. (3.78) 'deki denklem sisteminin özel çözümlerinin aşağıdaki gibi olduğunu kabul edelim.

$$W_{p_n}(t) = X_{p_n} \cos(\omega_n t) \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (3.83)$$

(3.83), (3.78) 'deki denklem sisteminde yerlerine yazılır ve özel çözüm denklemleri elde edilir

$$\begin{aligned}
& \frac{K Q_{1,2} \cos(\omega_1 t)}{k^4 k_1} \left(X_{p_1} Q_{1,1} + X_{p_2} Q_{2,1} + \dots + X_{p_M} Q_{M,1} \right) - \frac{\cos(\omega_1 t)}{k^4} = 0 \\
& \frac{K Q_{2,2} \cos(\omega_1 t)}{k^4 k_2} \left(X_{p_1} Q_{1,1} + X_{p_2} Q_{2,1} + \dots + X_{p_M} Q_{M,1} \right) \\
& \quad + X_{p_2} (\omega_2^2 - \omega_1^2) \cos(\omega_1 t) = 0 \\
& \quad \vdots \\
& \frac{K Q_{M,2} \cos(\omega_1 t)}{k^4 k_M} \left(X_{p_1} Q_{1,1} + X_{p_2} Q_{2,1} + \dots + X_{p_M} Q_{M,1} \right) \\
& \quad + X_{p_M} (\omega_M^2 - \omega_1^2) \cos(\omega_1 t) = 0
\end{aligned} \tag{3.84}$$

(3.84) 'deki denklem sistemi $X_{p_1}, X_{p_2}, \dots, X_{p_M}$ için çözülür ve bulunan çözüm kümesi (3.83) 'de yerlerine yazılarak özel çözüm denklemleri elde edilir. Bu denklem sisteminin genel çözüm denklemleri her bir denklem için homojen ve özel çözüm denklemlerinin toplanmasıyla elde edilir

$$W_n(t) = W_{h_n}(t) + W_{p_n}(t) \quad n = 1, 2, \dots, M \tag{3.85}$$

(3.85) 'de her bir denklemin başlangıç şartlarının aşağıdaki gibi olduğunu farz edelim.

$$W_n(0) = \dot{W}_n(0) = 0 \quad n = 1, 2, \dots, M \tag{3.86}$$

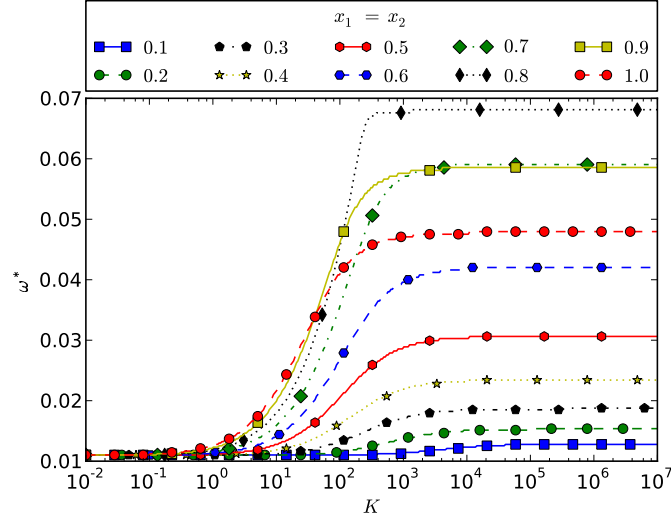
(3.86) (3.85) 'de yerine yazılır ve denklem sistemi $X_{h_1}, X_{h_2}, \dots, X_{h_{M-1}}$ için çözülür. Bulunan çözümler (3.82) 'de yerlerine yazılarak her bir moda karşılık gelen zaman cevapları bulunmuş olur. (3.85) (3.20) 'de yerine yazılarak girişin zaman cevabı elde edilir.

4 BULGULAR

4.1 KONTROL EDİLEN KİRİŞİN ÖZDEĞERLERİ

Kiriş sürekli bir sistem olduğu için sonsuz sayıda doğal frekansa sahiptir. Dışarıdan uygulanan zorlamaya göre bu sonsuz sayıdaki doğal frekanstan biri veya birkaçı ile titreşmeye başlayabilir. Zaman ilerledikçe rezonansa girerek tahrip olur. Bu tezde önerilen yöntem ile tek bir noktadan ölçülen sehim ile orantılı bir kuvvetin çubuk üzerinde başka bir noktada uygulanması ile kirişin doğal frekansları değiştirilebilmekte ve kirişin rezonansa girmesi engellenmektedir.

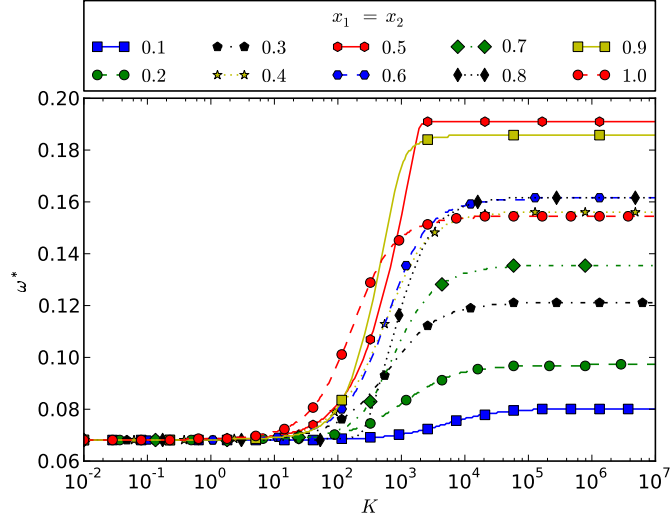
Yapılan sayısal çalışmalarda $L=1$, $b=0.1$ ve $h=0.1$ olarak alınmıştır. Şekil.(4.1)'de



Şekil 4.1: Birinci özfrekansın x_1 , x_2 ve K ile değişimi.

birinci özfrekansın kontrol parametreleri ile değişimi görülmektedir. Sehim ölçümü yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta aynı olmak kaydıyla ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletildiğinde birinci özfrekans daha küçük bir kontrol kazancı ile değiştirilebilmektedir. Birinci özfrekansın değerindeki en büyük artış $K = 1000$ ve $x_1 = x_2 = 0.8$ için elde edilmektedir.

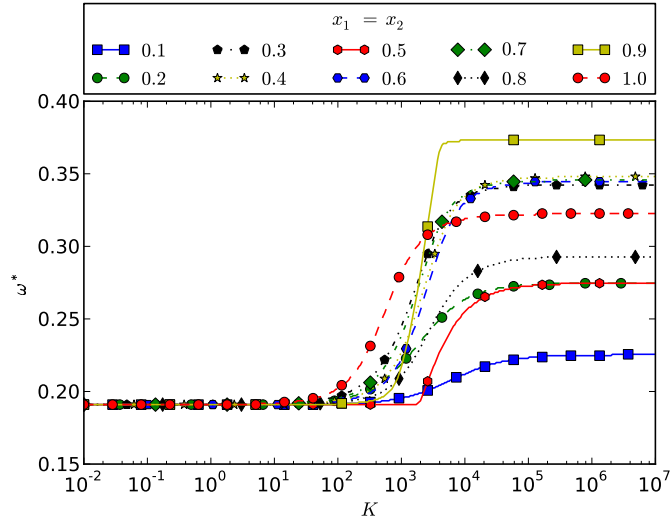
İkinci özfrekansın kontrol parametreleri ile değişimi Şekil(4.1)'de verilmiştir. Sehim ölçülen nokta ve kuvvet uygulanan nokta ankastre uçtan çubuğun boyunun %10



Şekil 4.2: İkinci özfrekansın x_1 , x_2 ve K ile değişimi.

kadar uzak olduğunda ikinci özdeğeri değiştirmek için gerekli kontrol kazancı 200000 iken, çubuğun ortasına geldiğinde gerekli kontrol kazancı 2000 olmaktadır ve bu değer için ikinci özdeğer maksimum olarak arttırılmaktadır.

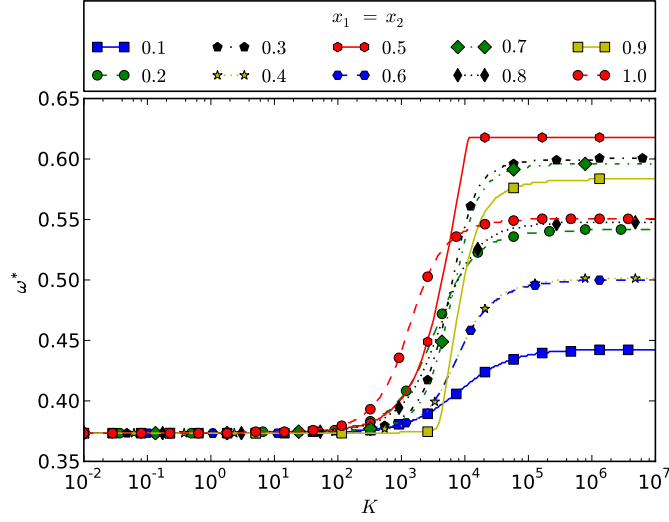
Şekil(4.1)'de üçüncü özfrekansın K , x_1 ve x_2 ile değişimi gösterilmiştir. Grafik ince-



Şekil 4.3: Üçüncü özfrekansın x_1 , x_2 ve K ile değişimi.

lendiğinde $x_1 = x_2 = 0.2$ ve $x_1 = x_2 = 0.5$ için özdeğer aynı miktarda arttırılmaktadır. Benzer şekilde $x_1 = x_2 = 0.3, 0.4, 0.6$ değerleri içinde özdeğer aynı miktarda arttırılmaktadır. Üçüncü özfrekanstaki en büyük artış $x_1 = x_2 = 0.9$ için elde edilmektedir.

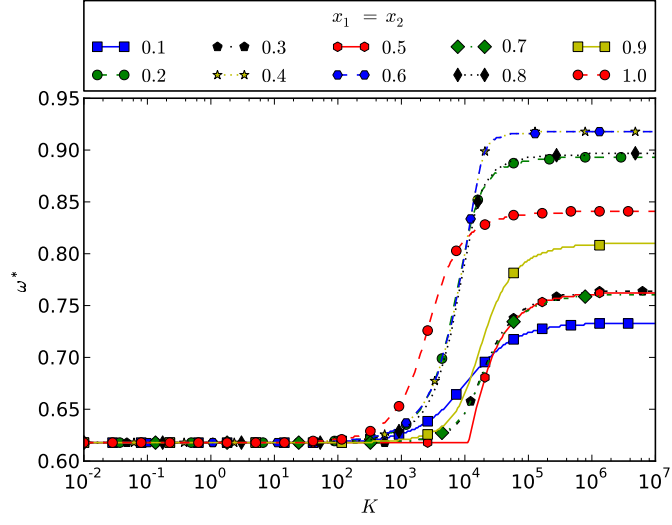
Şekil(4.1)'de dördüncü özfrekansın kontrol parametreleri ile değişimi görülmekte-



Şekil 4.4: Dördüncü özfrekansın x_1, x_2 ve K ile değişimi.

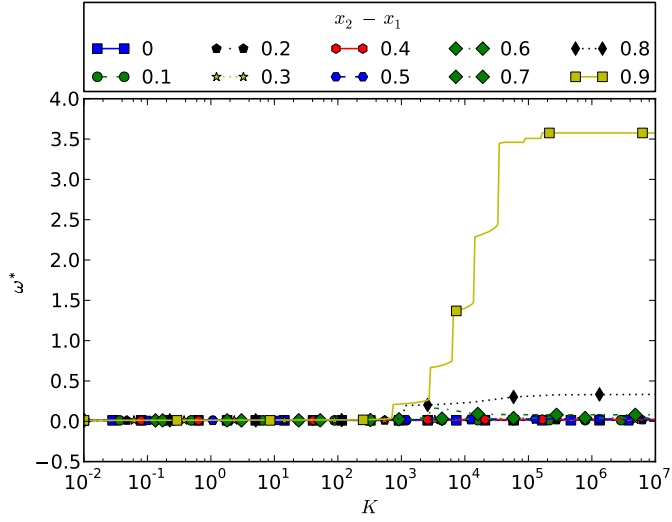
dir. $x_1 = x_2 = 0.4, 0.6$ için dördüncü özfrekans aynı miktarda arttırılmaktadır. Dördüncü özfrekanstaki en büyük artış sehim ölçülen nokta ve kontrol kuvveti uygulanan nokta çubuğun serbest ucuna ulaştığında elde edilmektedir.

Beşinci özfrekansın kontrol parametreleri ile değişimi Şekil(4.1)'de verilmiştir. Sehim ölçülen nokta ve kuvvet uygulanan nokta çubuğun ortasında ve ortasına eşit mesafede olduğunda ($x_1 = x_2 = 0.3, 0.7$) özfrekans aynı miktarda arttırılmaktadır. $x_1 = x_2 = 0.4, 0.6$ için özfrekans maksimum değerine ulaşmaktadır. Birinci özfrekansın kuvvet uygulanan nokta ve ölçüm yapılan nokta arasındaki farktan nasıl etkilendiği Şekil 4.1'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde iki nokta arasındaki fark 0.8 olana kadar özfrekansta bir artış olmamaktadır. Fark 0.8 ve üzerinde bir değer olduğunda özfrekanstaki değişim belirgin olmaktadır. İkinci özfrekansın iki nokta arasındaki farktan nasıl etkilendiği incelendiğinde (Şekil 4.1)), fark 0.5 ve üzerinde bir değer olduğunda özfrekans artmaktadır. Şekil 4.1 incelendiğinde üçüncü özfrekansın kuvvet uygulanan nokta ve ölçüm yapılan nokta arasındaki çok küçük farklardan ($x_2 - x_1 =$

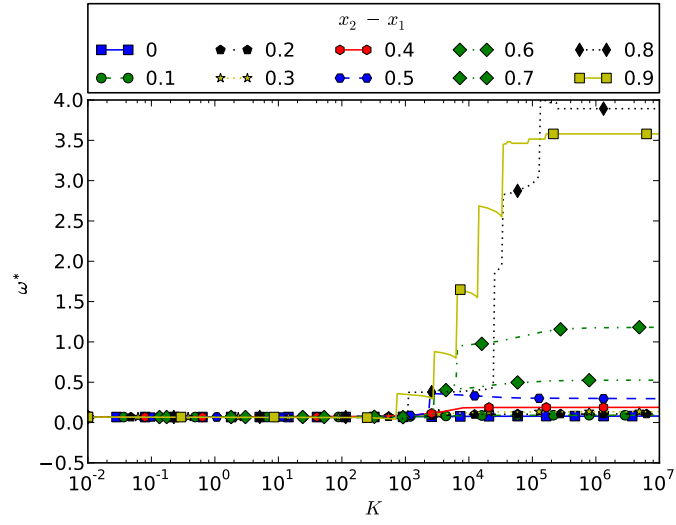


Şekil 4.5: Beşinci özfrekansın x_1 , x_2 ve K ile değişimi.

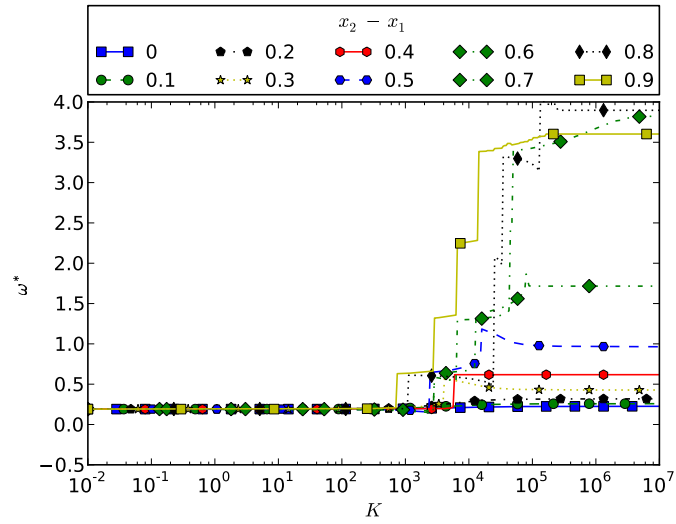
0.3) bile etkilendiği görülmektedir. Dördüncü özfrekans iki nokta arasındaki fark 0.2 olduğundan itibaren değişmektedir. Beşinci özfrekans ise kuvvet uygulanan nokta ile ölçüm yapılan nokta üst üste çakıştığı durum hariç aradaki fark ile değişmektedir.



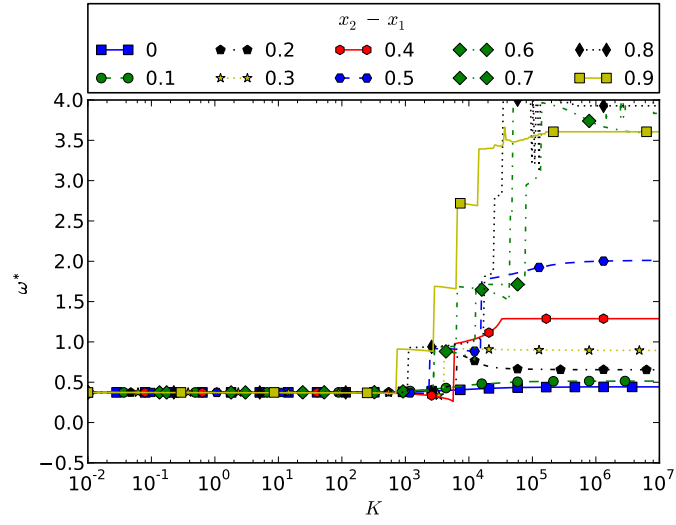
Şekil 4.6: Birinci özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.



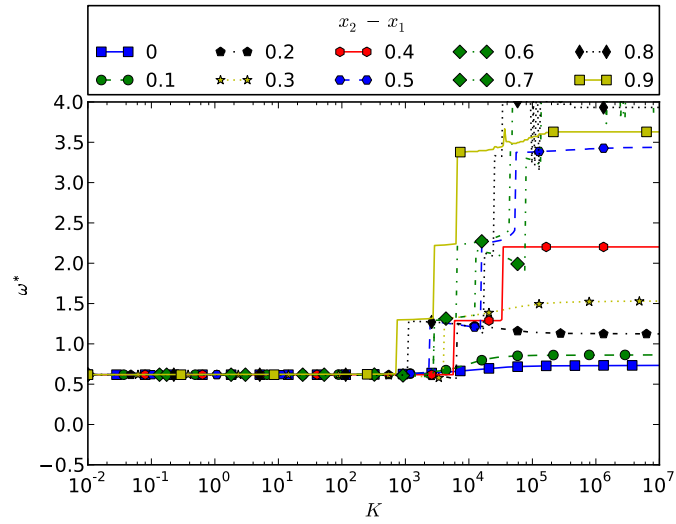
Şekil 4.7: İkinci özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.



Şekil 4.8: Üçüncü özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.



Şekil 4.9: Dördüncü özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.



Şekil 4.10: Beşinci özfrekansın $(x_2 - x_1)$ ve K ile değişimi.

4.2 KONTROL EDİLEN KİRİŞİN MOD ŞEKİLLERİ

Şekil 4.11 'de birinci mod şeklinin K , x_1 ve x_2 ile değişimi görülmektedir. Ölçüm yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta aynı olmak kaydıyla ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletilerek ve kontrol kazancı arttırılarak çizdirilen mod şekilleri incelendiğinde, ölçüm yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta ankastre uca yakın olduğunda kontrol kazancı artışının mod şeklini çok az miktarda değiştirdiği görülmektedir. Kirişin orta noktasına yaklaştıkça bu değişim daha belirgin bir hal almakta ve serbest uca yaklaştığında değişim net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.12'de kuvvet uygulanan nokta kirişin serbest ucunda sabit tutulmuş ve ölçüm yapılan nokta ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletilerek birinci mod şeklinin kontrol kazancı ile değişimi grafikleri çizdirilmiştir. Grafikler incelendiğinde birinci mod şeklinin bu ilerlemeden kontrol kazancının 10 değeri hariç diğer bütün kontrol kazancı değerleri ile değiştiği görülmektedir. Ölçüm yapılan nokta kirişin orta noktasına geldiğinde kontrol kazancının 100-100000 aralığındaki değerleri için mod şekli aynı şekilde değiştiği görülmektedir. Şekil 4.13'de ölçüm yapılan nokta kirişin serbest ucunda sabit tutulmuş ve kuvvet uygulanan nokta ankastre uçtan serbest uca doğru hareket ettirilmiştir. Kuvvet uygulanan nokta kirişin ortasına geldiğinde yine kontrol kazancının 10 değeri hariç mod şeklinin diğer kontrol kazancı değerleri için yaklaşık olarak benzer formu aldığı görülmüştür.

İkinci mod şeklinin kontrol parametrelerinden ölçüm yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta birbirine eşit olduğu ve kiriş boyunca ilerletildiği durumlardaki değişimi Şekil 4.14'de verilmiştir. Kiriş ortasına gelene kadar mod şeklindeki değişim kontrol parametrelerinden minimal oranda etkilenmektedir. Ortaya noktaya ulaştığında kontrol kazancının 1000 değerine kadar mod şekli formu çok değişmemekle beraber kontrol kazancından etkilendiği görülmekte ve kontrol kazancı dahada arttırıldığında ($K = 10000$, $K = 100000$) değişim net bir şekilde görülmekle beraber mod şeklinin formu değişmemektedir. Şekil 4.15 incelendiğinde ölçüm yapılan nokta ankastre uca ve kuvvet uygulanan noktada serbest uca yakın olduğunda yani aradaki fark maksimuma yaklaştığında kontrol kazancının 100000 değeri için ikinci mod şekli keskin bir değişim göstermektedir. İki nokta arasındaki fark azaldığında mod şeklinin formu daha yumuşak bir değişim göstermektedir. Ölçüm yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta serbest uca yaklaştığında mod şeklinin kontrol kazancının 10 olduğu

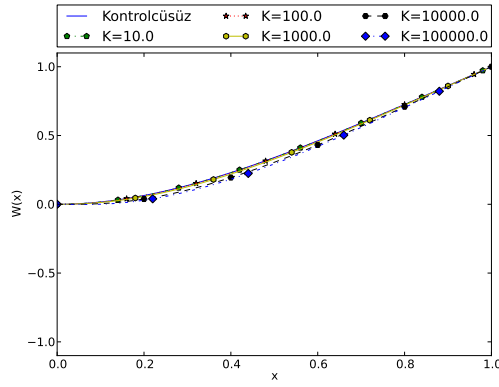
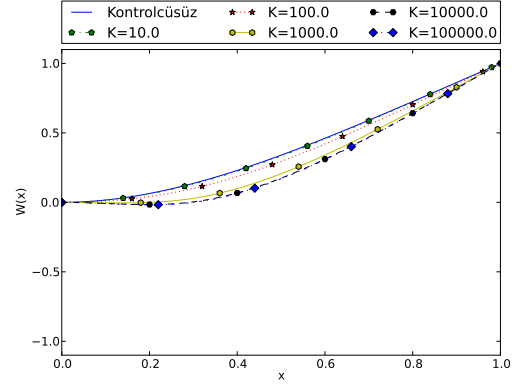
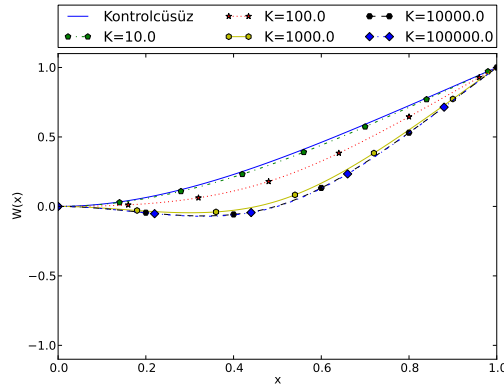
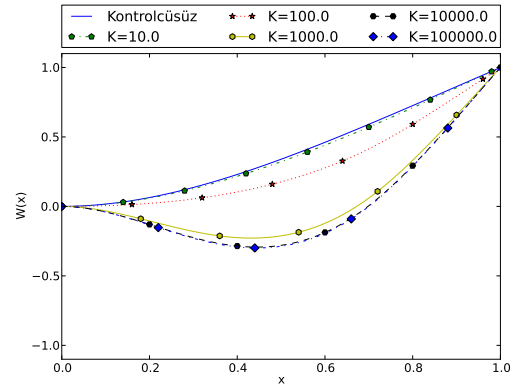
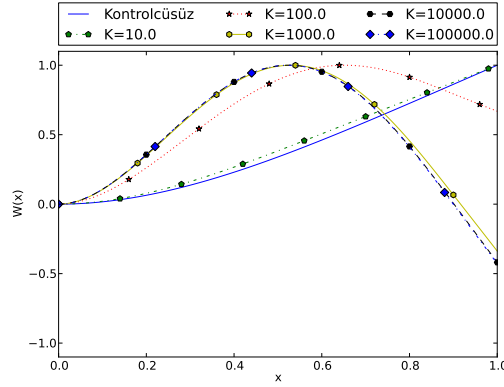
durum içinde belirgin bir şekilde değiştiği görülmektedir. Şekil 4.16 incelendiğinde ölüm yapılan nokta serbest uçta sabit tutulup kuvvet uygulanan nokta ankastre uçtan serbest uca ilerletildiğinde kontrol kazancının çizdirilen bütün değerleri için ikinci mod Şeklinin formunun değiştiği görülmektedir.

nc mod Şeklinin kontrol parametreleri ile değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sehim ölümü ve kuvvet uygulaması kirişin orta noktasında yapıldığında mod Şeklinin kontrol kazancının 10,100,1000 değerleri için değişmiği görülmektedir. Orta noktayı geçtikten sonra kontrol kazancının mod Şeklinin belirgin oranda değiştirdiği gözlemlenmiştir. Ölüm ve uygulama kirişin uç noktasında yapıldığında kontrol kazancı 1000 olana kadar mod Şeklinde bir değişim olmamakta, 1000,10000 ve 10000 değerleri için mod Şeklinde belirgin bir değişim görülmektedir. Kuvvet uygulanan nokta serbest uçta sabit tutulup ölüm yapılan nokta ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletildiğinde bu iki nokta arasındaki fark 0.5'den büyük olduğunda kontrol kazancı çok büyük değerleri ($K = 100000$) için mod Şeklindeki değişim çok keskin olmaktadır. Aradaki fark azaldıkça değişim miktarıda doğru orantılı olarak azalmaktadır. Ölüm yapılan nokta serbest uçta sabit tutulup kuvvet uygulanan nokta kiriş boyunca ilerletildiğinde kontrol kazancının 10 değeri için mod Şekli kontrolcüsüz durumdaki aynı kalmaktadır yani kontrol parametrelerinden etkilenmemektedir. Kontrol kazancının 10'dan büyük değerleri için mod Şeklindeki değişim belirgin olmaktadır.

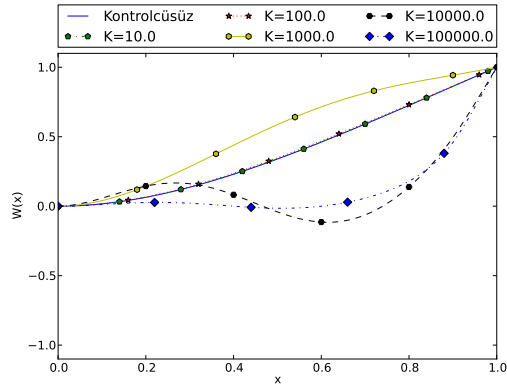
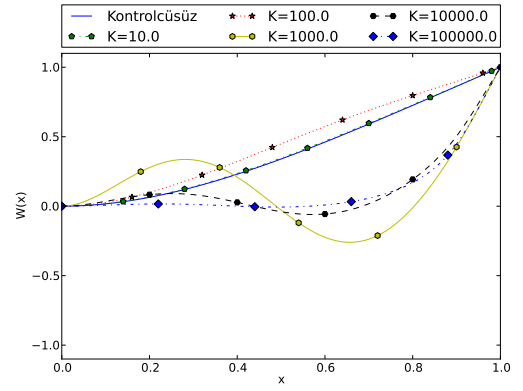
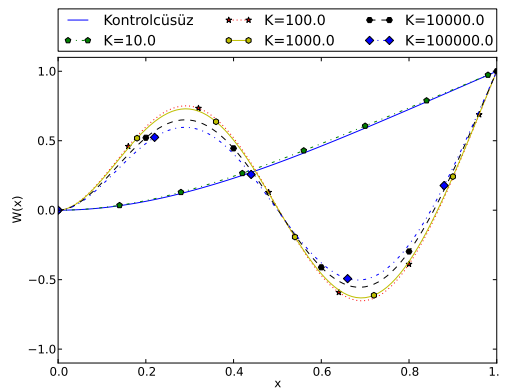
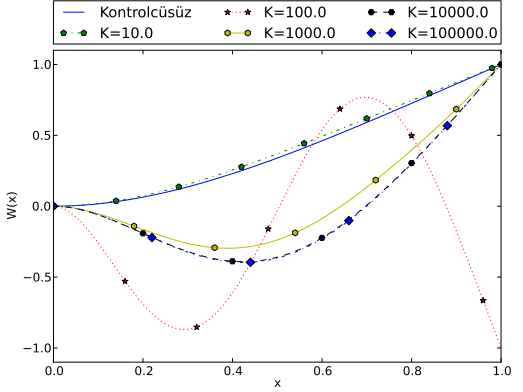
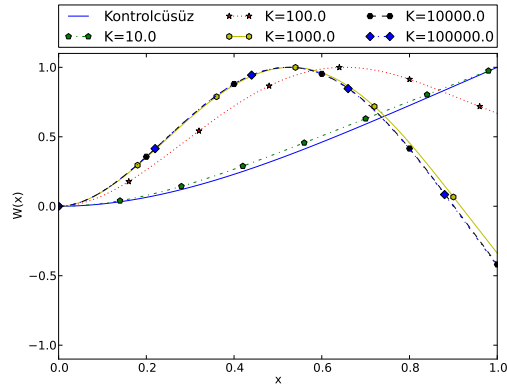
Dördüncü mod Şeklinin kontrol parametreleri ile değişimi incelendiğinde (Şekil 4.20) lm yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta aynı yerde olmak kaydıyla sabit uçtan serbest uca doğru ilerletildiğinde, sabit uç ile kirişin orta noktası ve kirişin orta noktası ile serbest uç arasında mod Şekli kontrol kazancının çok yüksek değerleri için değişim göstermektedir. Ölüm ve uygulama kirişin ortasında yapıldığında bütün kontrol değerleri için belirgin bir değişim gözlenmektedir. Kuvvet uygulanan nokta serbest uçta sabit tutulup ölüm yapılan nokta sabit uçtan serbest uca hareket ettirildiğinde, ölüm noktası kirişin orta noktasını geçene kadar kontrol kazancının 100000 değeri için mod Şeklindeki değişim çok keskin olmaktadır. Bunun haricindeki değerler için mod Şeklindeki değişim daha yumuşak olmaktadır. Ölüm yapılan nokta serbest uçta olduğunda ve kuvvet kirişin orta noktasından uygulandığında mod Şeklindeki değişim çok sert olmaktadır. Kuvvet kirişin orta noktası haricinde

bir yerden uygulandığında mod şeklindeki değişimler daha yumuşak olmaktadır.

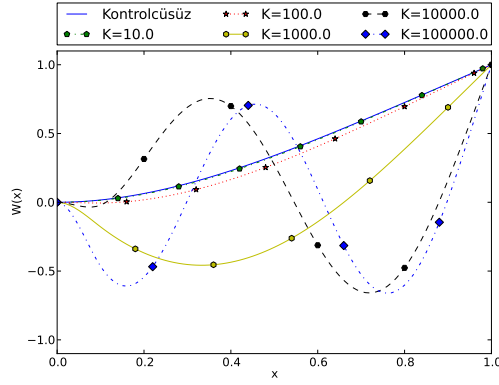
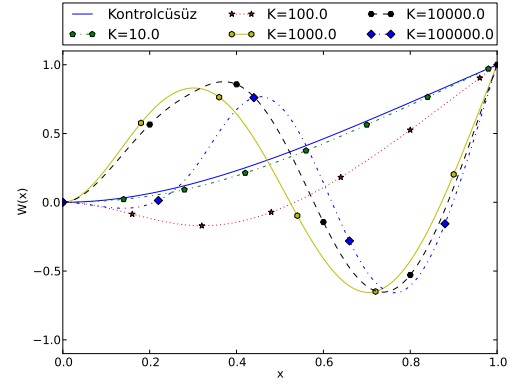
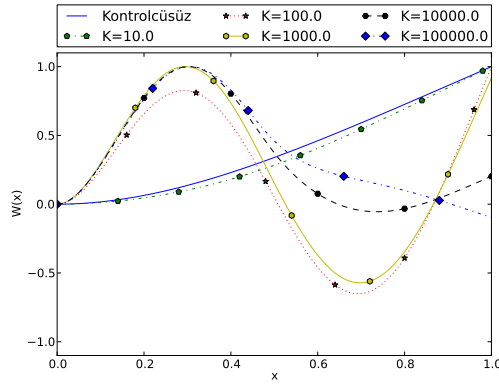
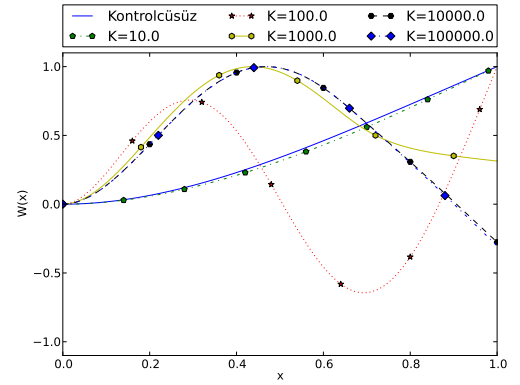
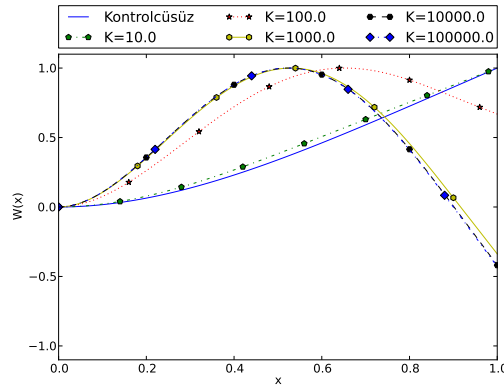
Beşinci mod şeklinin kontrol parametreleri ile değişimi Şekil 4.23'deki grafiklerde çizdirilmiştir. Grafikler incelendiğinde ölçüm noktası ve uygulama noktası ankastre uca yakın olduğunda mod şekli kontrol kazancı değişimlerinden etkilenmemektedir. Serbest uç ve orta nokta arasında bütün kontrol kazançları için değişim gözlenmektedir. Ölçüm ve uygulama kirişin orta noktasında yapıldığında mod şekli yalnızca kontrol kazancının 100000 değeri için değişmektedir. Kirişin orta noktası ile serbest uç arasında yine kontrol kazancının bütün değerleri için mod şekli değişmektedir. Kuvvet serbest uca yakın uygulandığında ve ölçüm yapılan nokta ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletildiğinde, orta noktaya gelene kadar kontrol kazancının çok yüksek değerleri mod şeklini keskin bir şekilde değiştirmekte, orta nokta geçildikten sonra kontrol kazancının en küçük değeri hariç bütün değerler mod şeklini keskin bir şekilde değiştirmektedir. Ölçüm yapılan nokta kirişin serbest ucuna ulaştığında mod şeklindeki değişimler belirgin ama daha yumuşak bir hal almaktadır. Ölçüm yapılan nokta serbest uçta olduğunda ve kuvvet kirişin orta noktasında uygulandığında ve kontrol kazancı en düşük değeri ($K = 10$) beşinci mod şeklindeki değişim keskin bir hal almaktadır.

(a) $x_1 = x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = x_2 = 0.9$

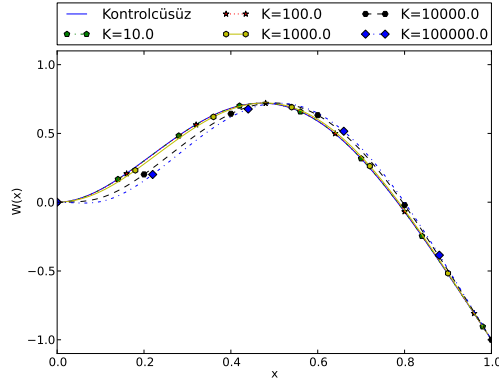
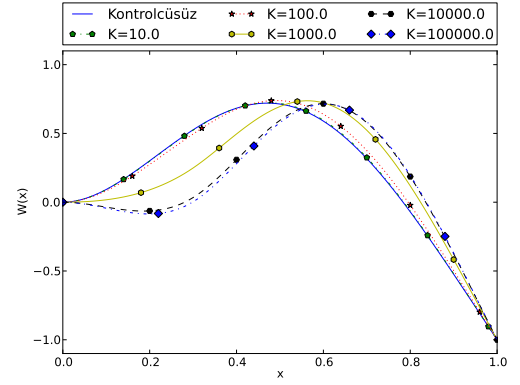
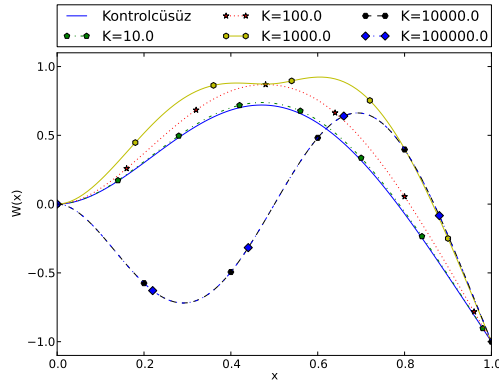
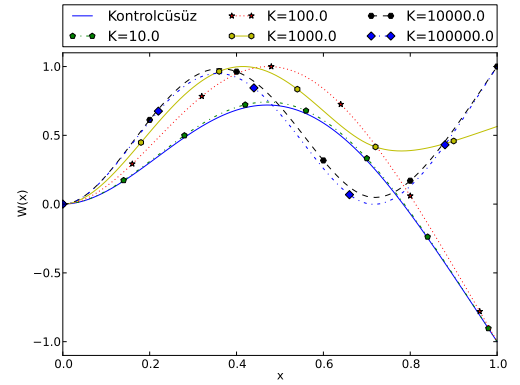
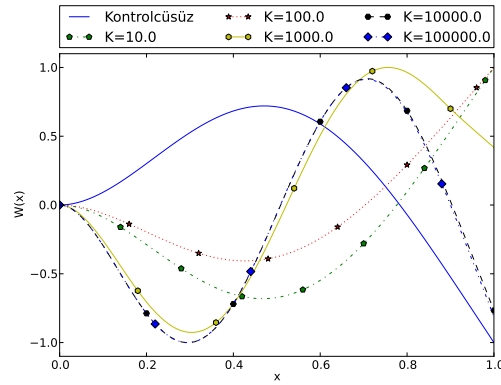
Şekil 4.11: Kontrol edilen durumda kirişin birinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.1, x_2 = 0.9$ (b) $x_1 = 0.3, x_2 = 0.9$ (c) $x_1 = 0.5, x_2 = 0.9$ (d) $x_1 = 0.7, x_2 = 0.9$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

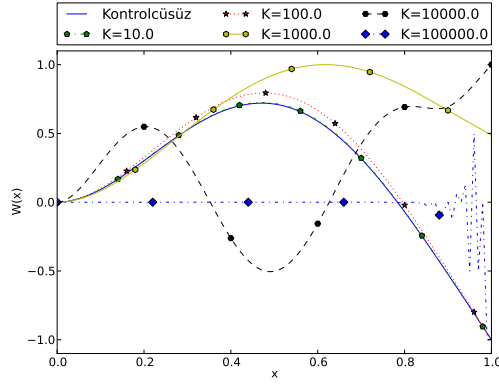
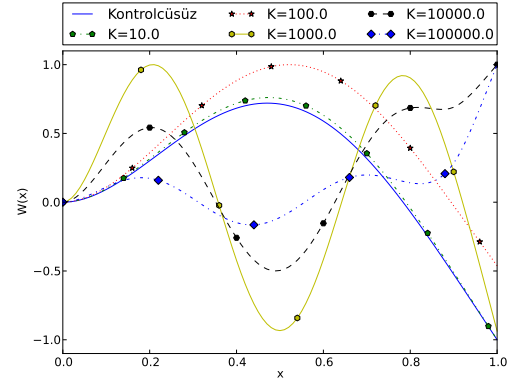
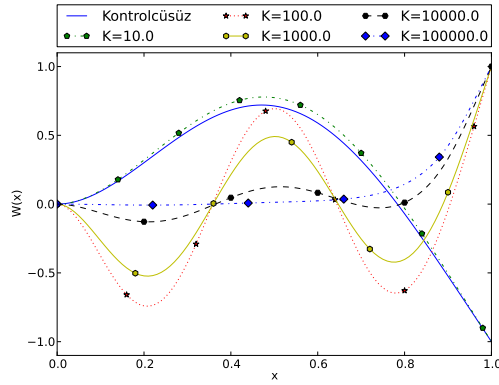
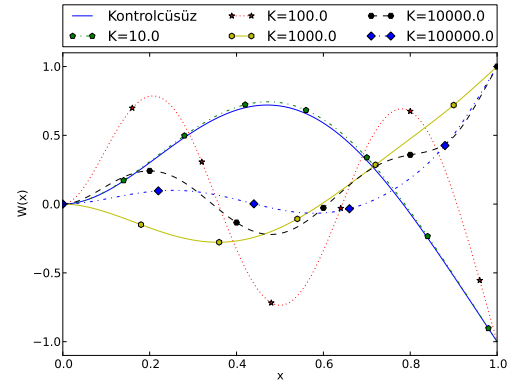
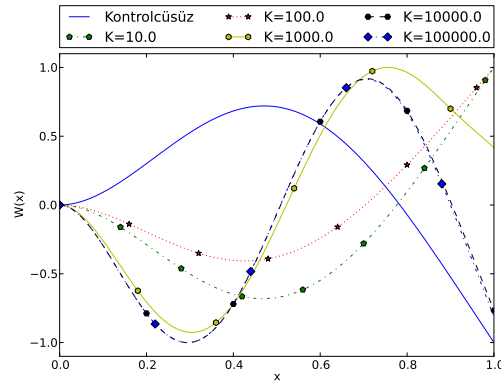
Şekil 4.12: Kontrol edilen durumda kirişin birinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

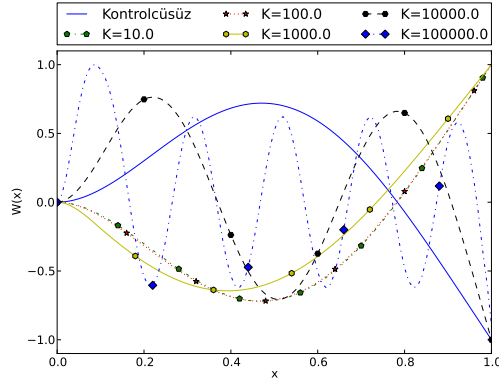
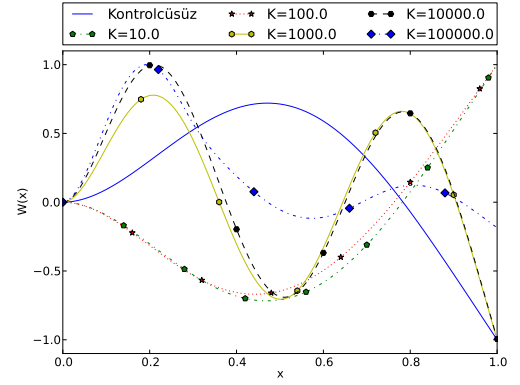
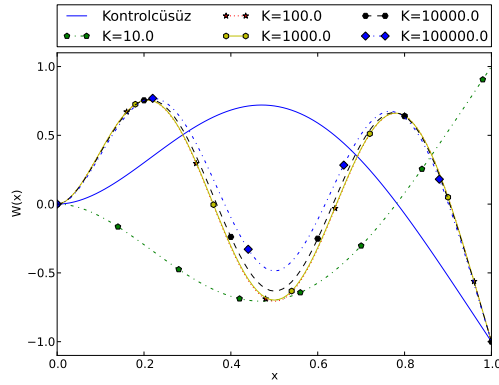
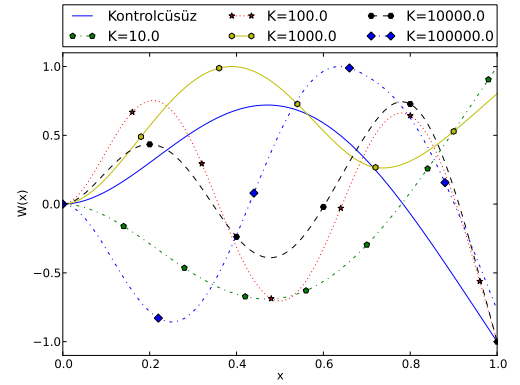
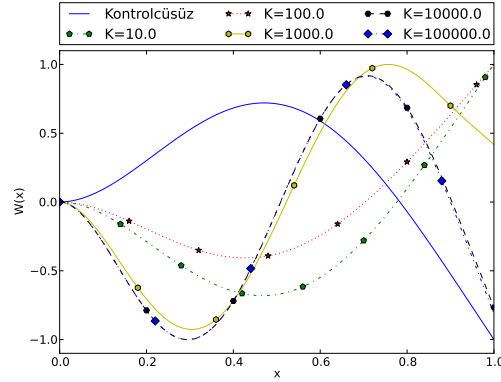
Şekil 4.13: Kontrol edilen durumda kirişin birinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = x_2 = 0.9$

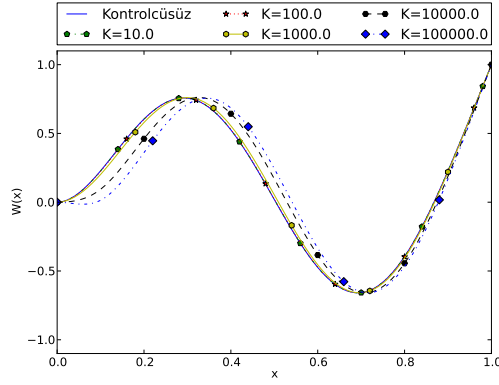
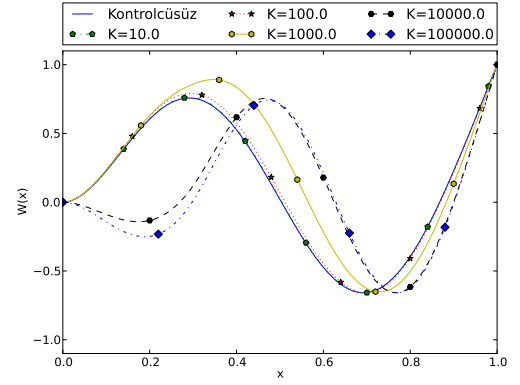
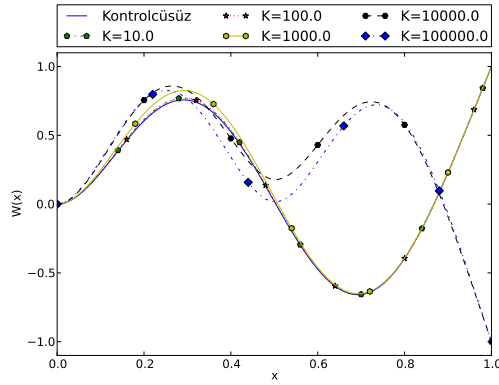
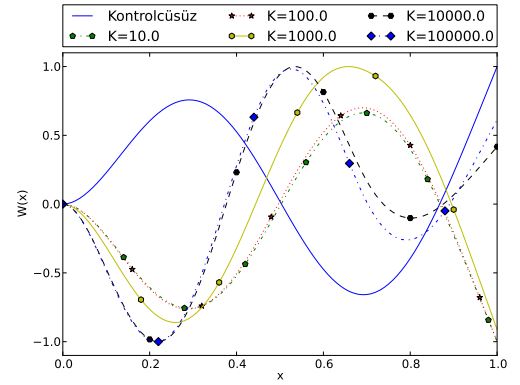
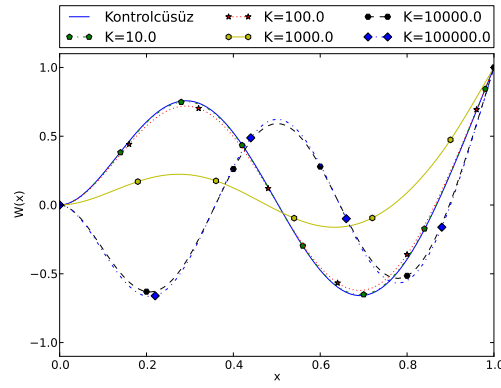
Şekil 4.14: Kontrol edilen durumda kirişin ikinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.1, x_2 = 0.9$ (b) $x_1 = 0.3, x_2 = 0.9$ (c) $x_1 = 0.5, x_2 = 0.9$ (d) $x_1 = 0.7, x_2 = 0.9$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

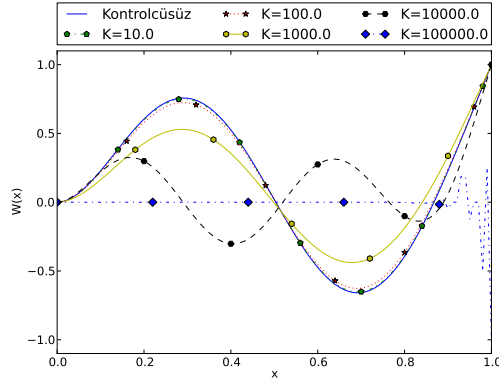
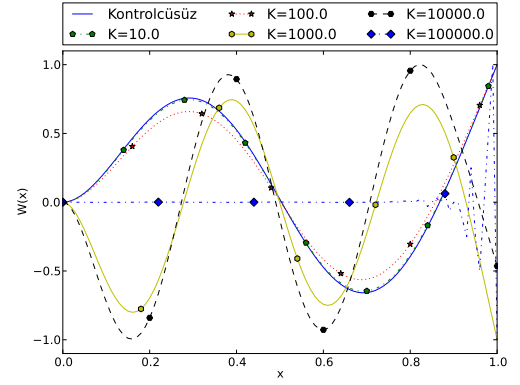
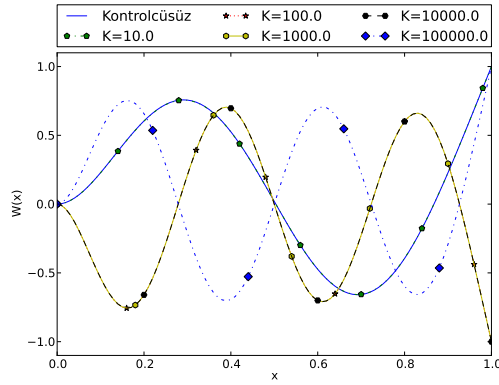
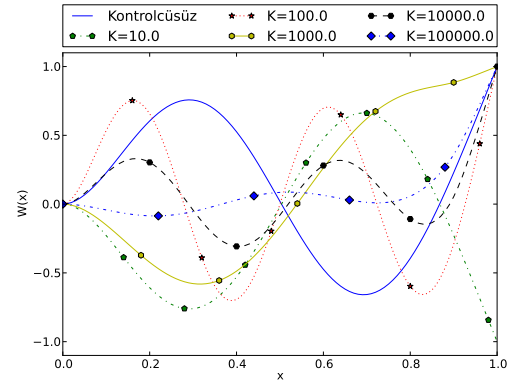
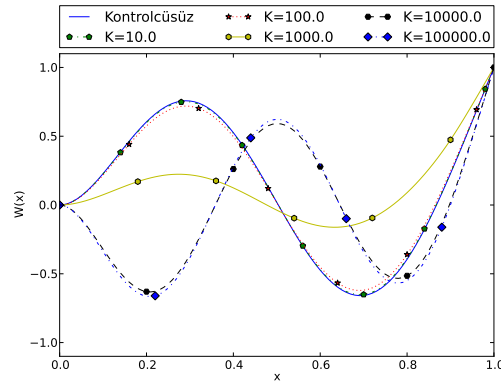
Şekil 4.15: Kontrol edilen durumda kirişin ikinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

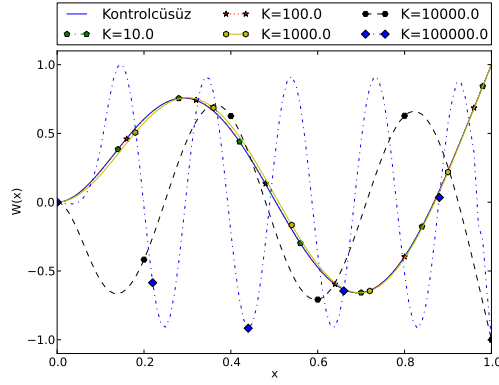
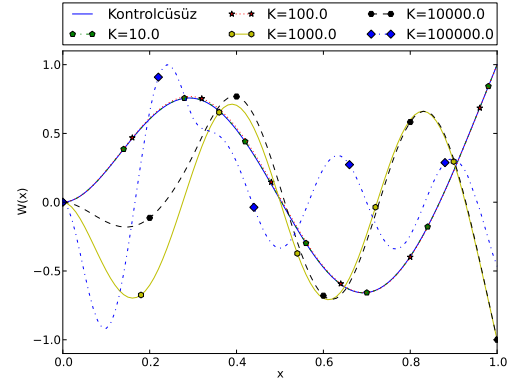
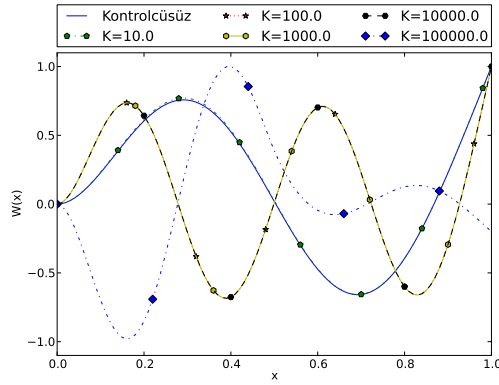
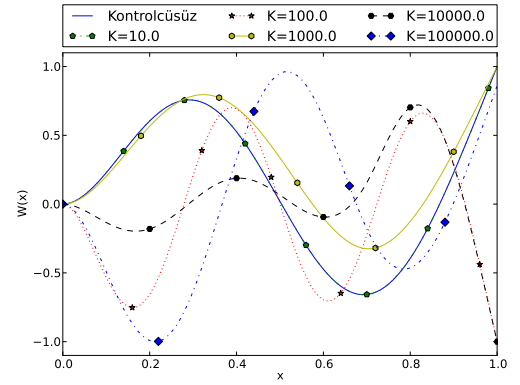
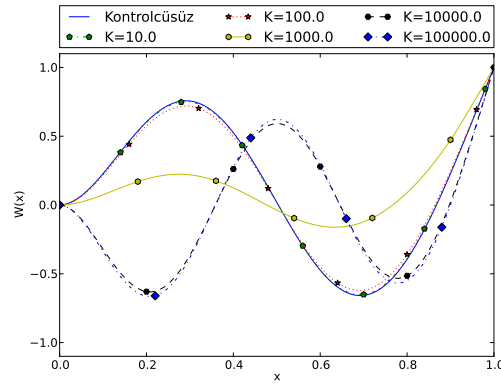
Şekil 4.16: Kontrol edilen durumda kirişin ikinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = x_2 = 0.9$

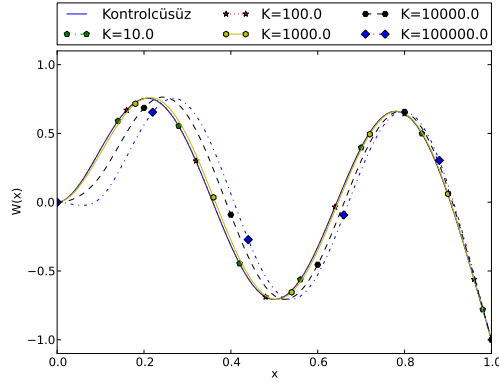
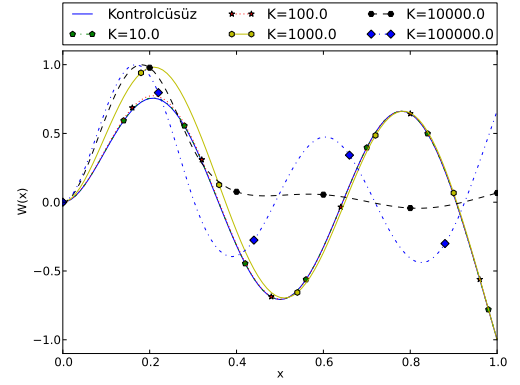
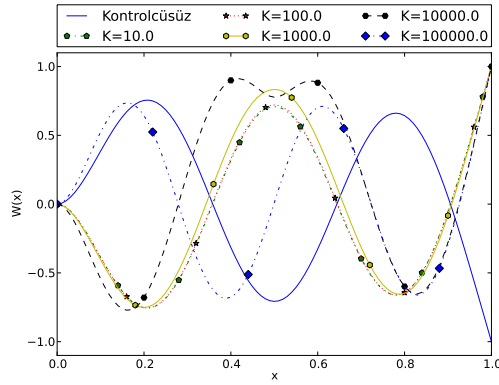
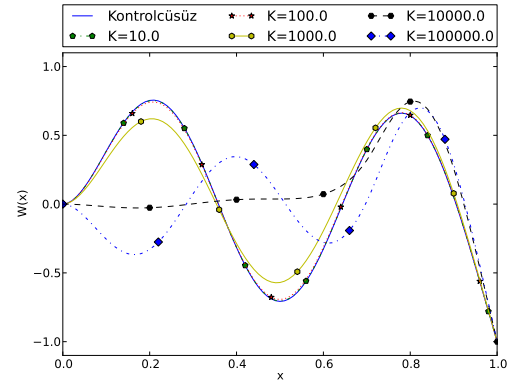
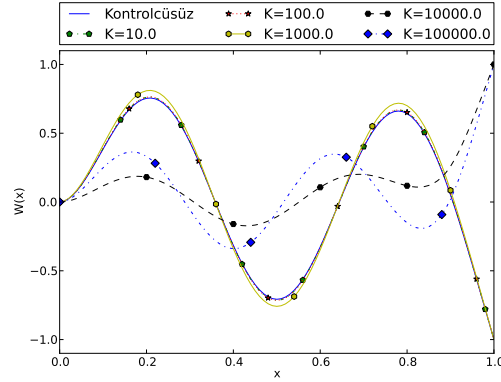
Şekil 4.17: Kontrol edilen durumda kirişin üçüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.1, x_2 = 0.9$ (b) $x_1 = 0.3, x_2 = 0.9$ (c) $x_1 = 0.5, x_2 = 0.9$ (d) $x_1 = 0.7, x_2 = 0.9$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

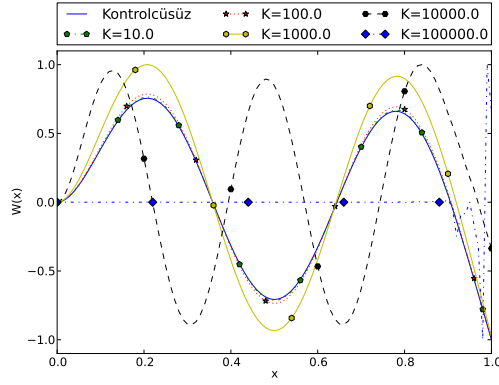
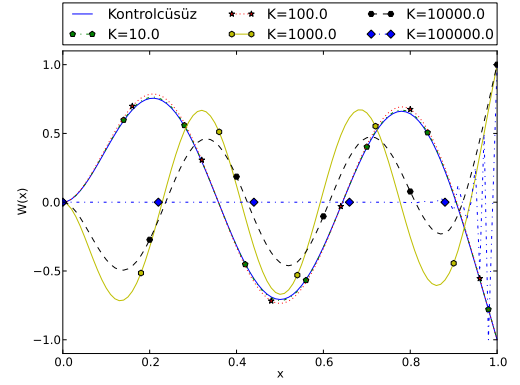
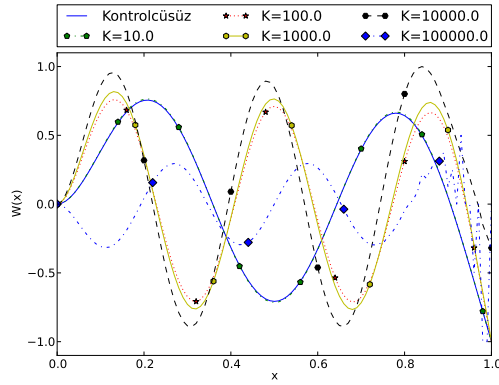
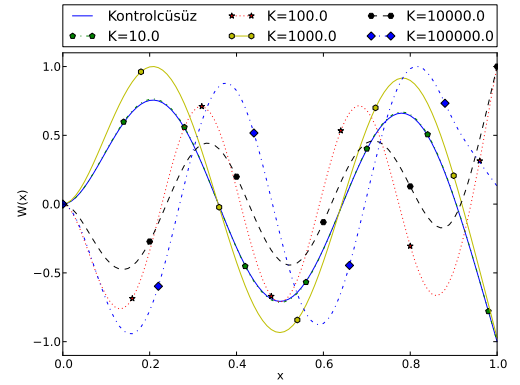
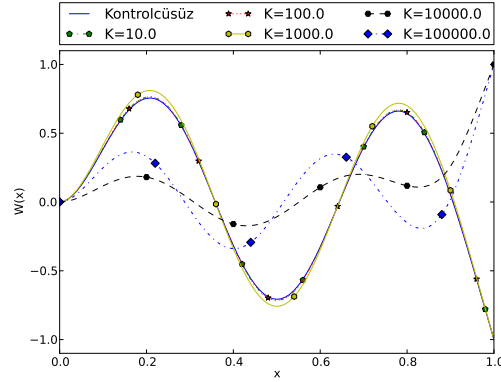
Şekil 4.18: Kontrol edilen durumda kirişin üçüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

Şekil 4.19: Kontrol edilen durumda kirişin üçüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = x_2 = 0.9$

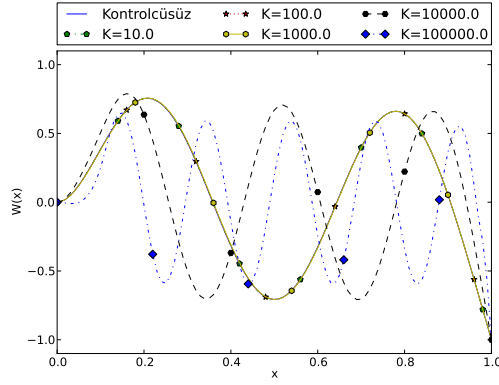
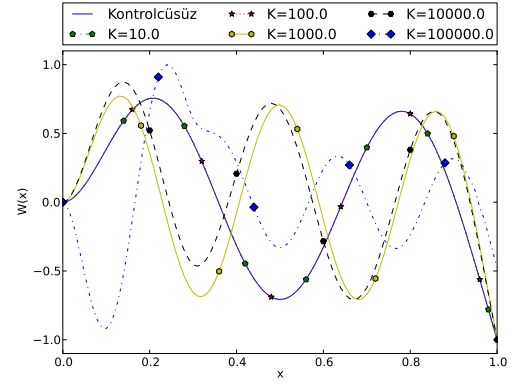
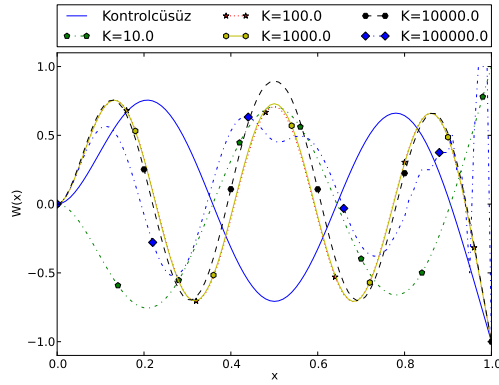
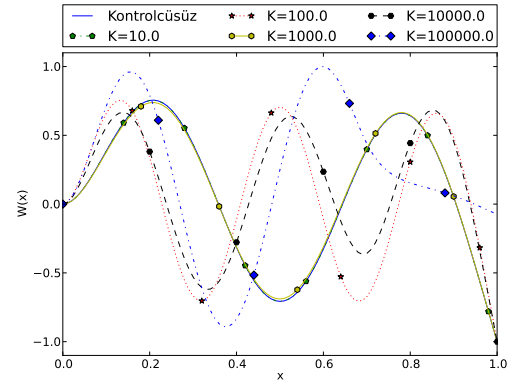
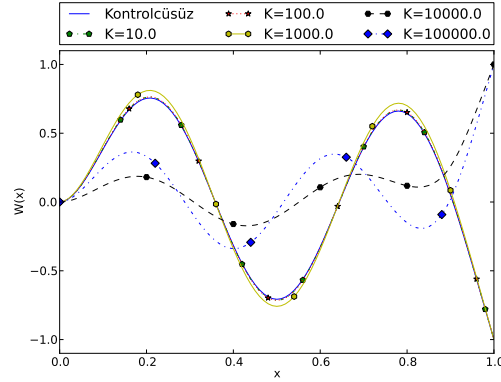
Şekil 4.20: Kontrol edilen durumda kirşin dördüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.1, x_2 = 0.9$ (b) $x_1 = 0.3, x_2 = 0.9$ (c) $x_1 = 0.5, x_2 = 0.9$ (d) $x_1 = 0.7, x_2 = 0.9$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

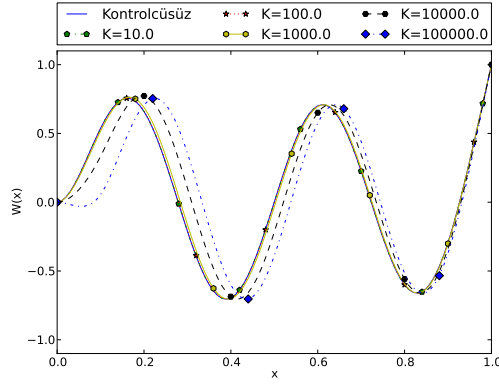
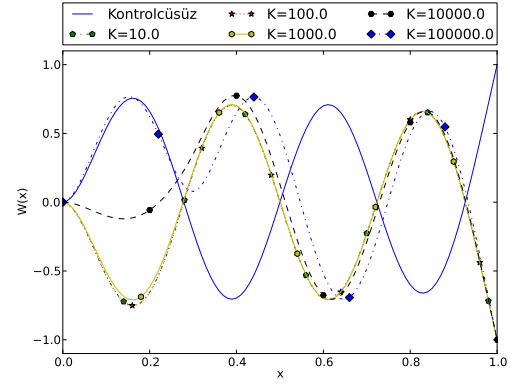
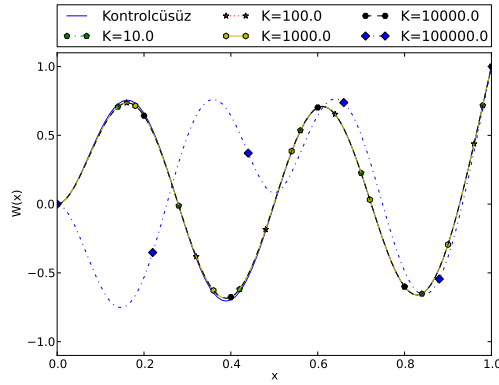
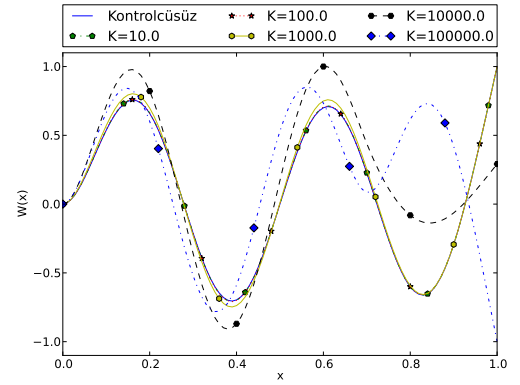
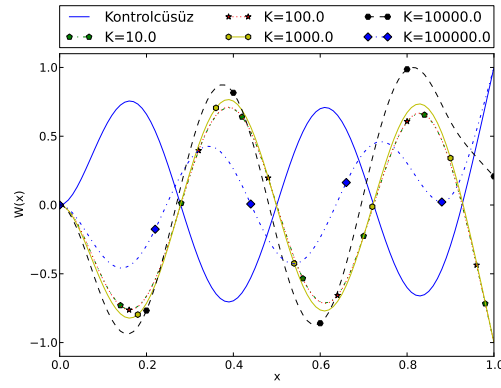
Şekil 4.21: Kontrol edilen durumda kirşin dördüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

4.3 KONTROL EDİLEN KİRİŞİN ZAMAN CEVABI GRAFİKLERİ

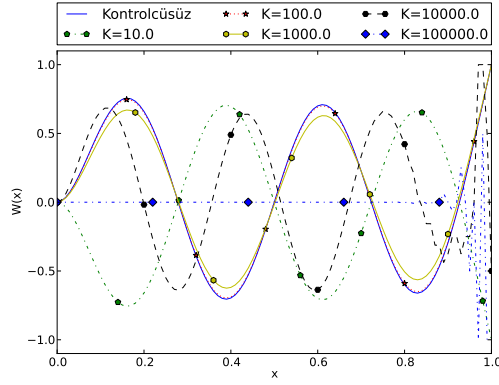
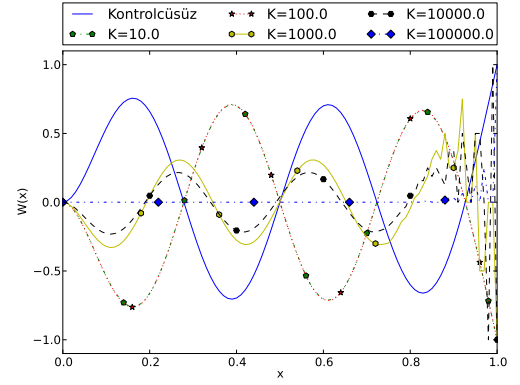
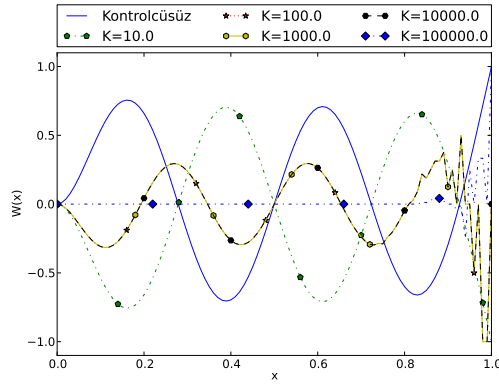
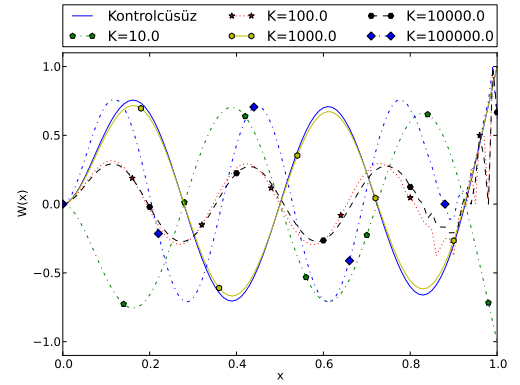
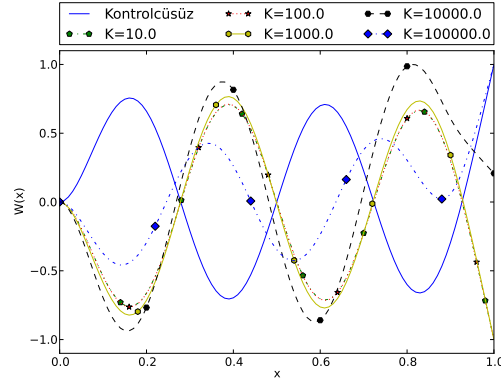
Kontrolcüsüz durumda $t = 151$ olduğunda $\frac{w(x, t)}{L}$ değeri 0.3 'den büyük olmaktadır ve bu durumda kirişin tahrip olduğu varsayılmıştır. Bundan sonra çizdirilen grafikler kontrolcüsüz kirişin tahrip olduğu t anı için çizdirilmiştir. Şekil.(4.3) 'de kontrolcüsüz ve kontrolcülü kirişin zaman cevabı karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde kuvvet uygulanan nokta (x_2) kirişin serbest ucunda sabit tutulmuş ve sehim ölçümü yapılan nokta (x_1) ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletilmiştir. Eğriler, sehim ölçümü yapılan nokta değiştikçe kontrolcülü durumdaki zaman cevabının nasıl değiştiğini göstermektedir. Önerilen kontrol metodu ile kiriş üzerinde ölçüm nerede yapılırsa yapılsın kirişin sehiminin kontrolcüsüz durumdakine göre çok düşük olduğu görülmektedir. Ölçüm yapılan nokta ankastre uçtan kirişin orta noktasına doğru ilerlediğinde kontrol kazancının azaldığı, kirişin orta noktasından serbest uca doğru ilerlerken önce arttığı daha sonra bir miktar azalarak sabitlendiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.3 incelendiğinde yapılan sayısal çalışmalarda kullanılan değerler arasında en iyi kontrolü sağlayan kontrol parametresi değerlerinin $x_1 = 0.3$, $x_2 = 1veK = 100$ olduğu anlaşılmıştır.

(a) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

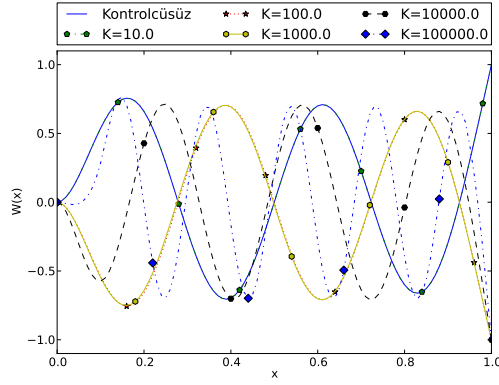
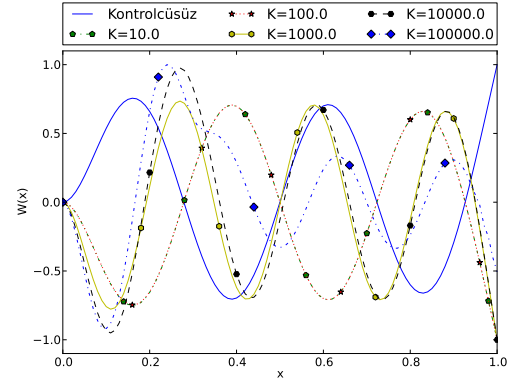
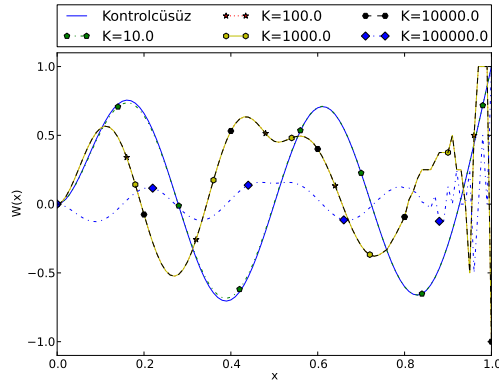
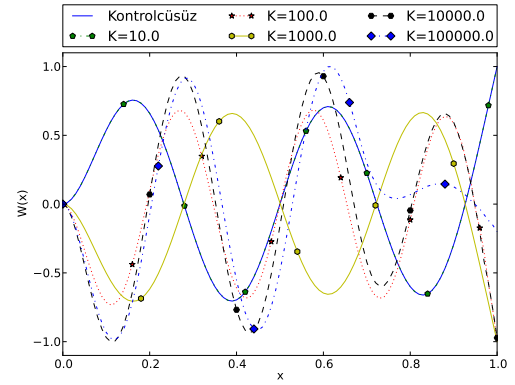
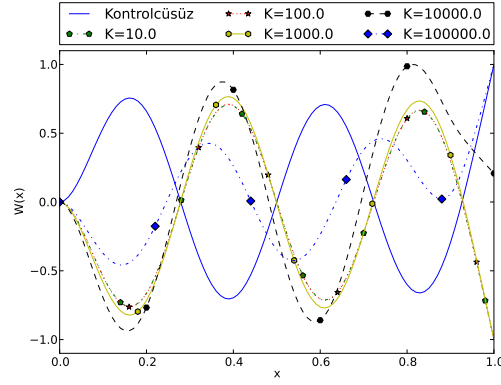
Şekil 4.22: Kontrol edilen durumda kirşin dördüncü mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = x_2 = 0.9$

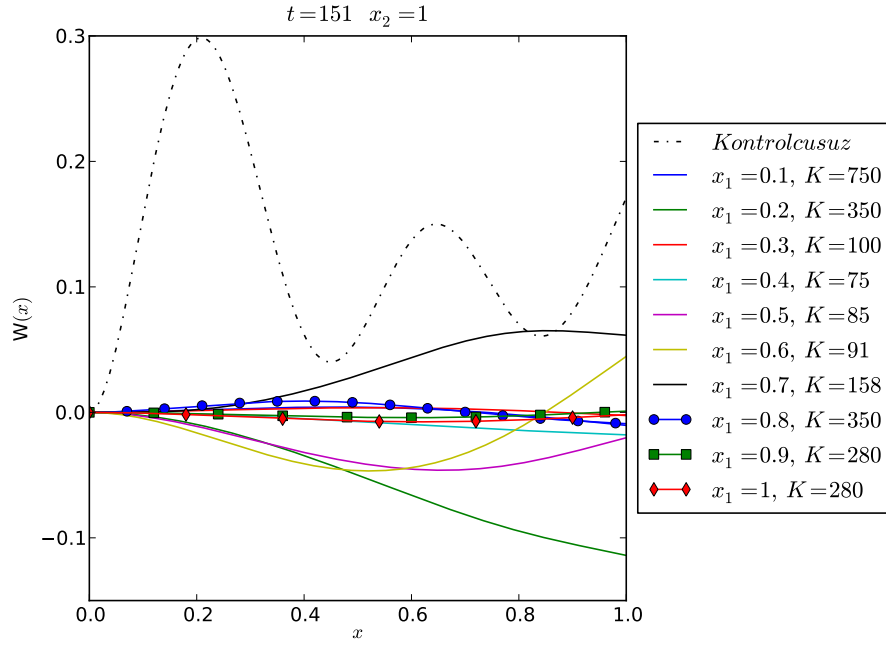
Şekil 4.23: Kontrol edilen durumda kirişin beşinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.1, x_2 = 0.9$ (b) $x_1 = 0.3, x_2 = 0.9$ (c) $x_1 = 0.5, x_2 = 0.9$ (d) $x_1 = 0.7, x_2 = 0.9$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

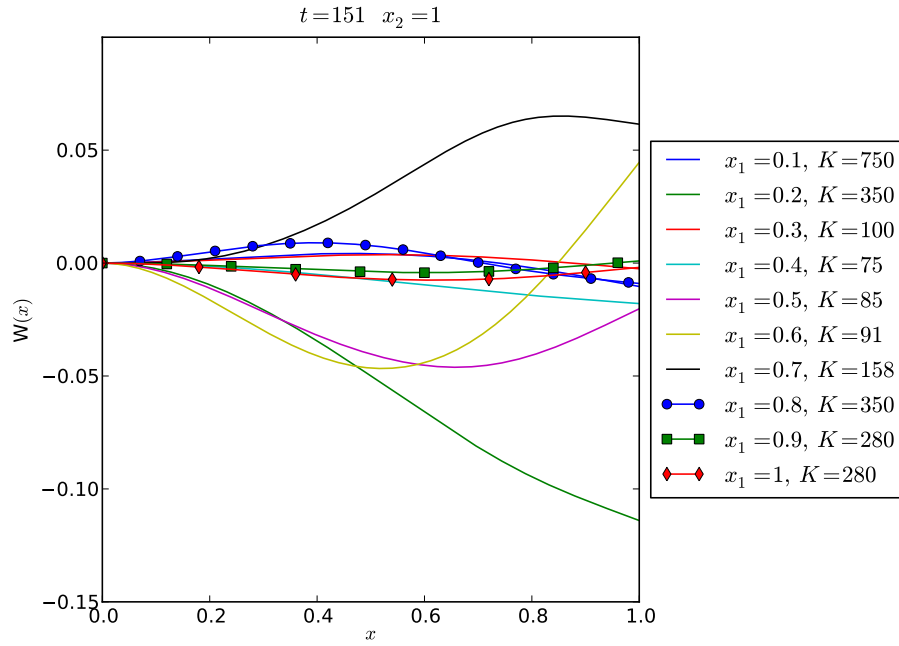
Şekil 4.24: Kontrol edilen durumda kirişin beşinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.

(a) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.1$ (b) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.3$ (c) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.5$ (d) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.7$ (e) $x_1 = 0.9, x_2 = 0.9$

Şekil 4.25: Kontrol edilen durumda kirişin beşinci mod şeklinin x_1, x_2 ve K ile değişimi.



Şekil 4.26: Kontrol uygulanan kirişin zaman cevabının x_1 , x_2 ve K ile değişimi.



Şekil 4.27: Kontrol uygulanan kirişin zaman cevabının x_1 , x_2 ve K ile değişimi.

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada sehimi x_1 noktasında ölçülmekte, hareketlendiricinin ürettiği kuvvet x_2 noktasında uygulanmaktadır. Bunlar noktasal ölçüm ve noktasal kuvvet uygulama şeklindedir. Sehim ölçme ve kuvveti uygulama giriş üzerinde ayrı noktalarladır. Bu çalışmada tam bir analitik çözümdür ve ayrı noktalarda sehim ölçerek ve kuvvet uygulayarak girişin özfrekanslarını ve mod şekillerini değiştirilebildiği gösterilmiştir. Bir başka deyişle girişin zaman cevabı şekillendirilebilmiş ve pratik olarak uygulanabilme imkanı elde edilmiştir. Sehim ölçümü yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta aynı olmak kaydıyla ankastre uçtan serbest uca doğru ilerletildiğinde ilk beş özfrekansın yeri değiştirilebilmektedir. Sehim ölçümü yapılan nokta ve kuvvet uygulanan nokta birbirinden uzaklaşmaya başladığında özfrekansların yerinin değiştirilebilme imkanı azalmaktadır. Kuvvet uygulanan nokta serbest uçta sabit kalmak şartıyla sehim ölçümü yapılan nokta ankastre uçtan girişin orta noktasına yaklaştıkça daha küçük kontrol kazancı ile girişin titreşimleri kontrol edilebilmektedir. Ölçüm yapılan nokta girişin orta noktasını geçtiğinde titreşimi kontrol etmek için gerekli kontrol kazancı artmaktadır.

Önerilen kontrol yöntemi bir binaya uygulanan deprem girişleri sonucu oluşan titreşimleri kontrol etmekte kullanılabilir ve pratik uygulama imkanı mevcuttur. Bunun için binanın deplasmanları ölçülür ve binaya kontrol kuvvetleri uygulanabilir. Kontrol kuvvetleri büyük ölçeklerde olacağı için hidrolik hareketlendiriciler vasıtasıyla binaya uygulanabilir. Piezoelektrik hareketlendiriciler çok büyük kuvvetler üretmediği için bina titreşim kontrolün de kullanılamaz.

Çalışmada kontrol kuvvetinin değeri ölçülen deplasmanla orantılı olduğu ve girişe belli bir noktadan uygulandığı için K kontrol kazancı ana kontrol parametresi olarak görülebilir. Kontrol kazancının optimum değeri ileriki durumlar için bir açık problemdir. Diğer parametreler ölçüm yapılan nokta x_1 ve kuvvet uygulanan nokta x_2 gözönüne alınması gereken kontrol parametreleridir. K , x_1 ve x_2 parametrelerinin optimum değerleri ileriki çalışmalara bırakılmıştır.

Kontrol kuvvetinin büyüklüğü ölçülen sehim ve kontrol kazancı ile orantılı olarak seçilmiştir. Bu seçim kolaylıkla ölçüm noktasındaki hız veya ivme yada bunların lineer kombinasyonu ile orantılı olarak seçilebilir. Bu da ileri çalışmaların konusudur. Çalışma sehim ölçüm elemanları ve kontrol kuvvetini uygulayan hareketlendiricinin

dinamiği için içine katılarak genişletilebilir. Bu ilginç bir kontrol problemi olarak önümüzde durmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Kwon H., Kim M., Lee I., 1998, Vibration control of bridges under moving loads, *Computers & structures*, 66, 473-480.
- [2] Wang X. Q., So R. M., Liu Y., 2001, Flow-induced vibration of an euler-bernoulli beam, *Journal of sound and vibration*, 243(2), 241-268.
- [3] Sangarayakul C., Warnitchai P., 2004, Approximate modal decomposition of inelastic dynamic responses of wall buildings, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 33, 999-1022.
- [4] Wang A. P., Lin Y. H., 2007, Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation, *Journal of sound and vibration*, 299, 757-773.
- [5] Dym C. L., Williams H. E., 2007, Estimating fundamental frequencies of tall buildings, *Journal of structural engineering*, ASCE, 1479-1483.
- [6] Tso S. K., Yang T. W., Xu W. L., Sun Z. Q., 2003, Vibration control for a flexible-link robot arm with deflection feedback, *International journal of non-linear mechanics*, 38, 51-62.
- [7] Dadfarnia M., Jalili N., Xian B., Dawson M. D., 2004, A lyapunov-based piezoelectric controller for flexible cartesian robot manipulators, *Journal of dynamic systems, measurement and control*, ASME, 126, 347-358.
- [8] Wong W. O., Tang S. L., Cheung Y. L., Cheng L., 2007, Design of a dynamic vibration absorber for vibration isolation of beams under point or distributed loading, *Journal of sound and vibration*, 301, 898-908.
- [9] Hirunyaruk C., Brennan M. J., Mace B. R., Li W. H., 2010, A tunable magneto-rheological fluid-filled beam-like vibration absorber, *Smart mater. struct.*, 19, 1-10.
- [10] Ni Y. Q., Ying Z. G., Chen Z. H., 2010, Magneto-rheological elastomer (MRE) based composite structures for micro-vibration control, *Earthquake eng & eng vib*, 9, 345-356.
- [11] Pahlavan L., Rezaeepazhand, 2007, Dynamic response analysis and vibration control of a cantilever beam with a squeeze-mode electrorheological damper, *Smart mater. struct.*, 16, 2183-2189.
- [12] Harland N. R., Mace B. R., Jones R. W., 2001, Wave propagation, reflection and transmission in tunable fluid-filled beams, *Journal of sound and vibration*, 241(5), 735-754.

- [13] Yalcintas M., Coulter J. P., Don D. L., 1995, Structural modeling and optimal control of electrorheological material based adaptive beams, *Smart mater. struct.*, 4, 207-214.
- [14] Yalcintas M., Coulter J. P., 1998, Electrorheological material based non-homogeneous adaptive beams, *Smart mater. struct.*, 7, 128-143.
- [15] Gani A., Salami M. J. E., Khan Md. R., 2003, Active vibration control of a beam with piezoelectric patches: real-time implementation with xpc target, *IEEE*, 538-544.
- [16] Gaudenzi P., Carbonaro R., Benzi E., 2000, Control of beam vibrations by means of piezoelectric devices: theory and experiments, *Composite structures*, 50, 373-379.
- [17] Foutsitzi G., Marinova D. G., Hadjigeorgiou E., Stavroulakis G. E., 2003, Robust H_2 vibration control of beams with piezoelectric sensors and actuators. *PhysCon 2003*, St Petersburg, Russia, 157-161.
- [18] Collet M., Walter V., Delobelle P., 2003, Active damping of a micro-cantilever piezo-composite beam, *Journal of sound and vibration*, 260, 453-476.
- [19] Hu N., Fukunaga H., Matsumoto S., Yan B., Peng X. H., 2007, An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors, *International journal of impact engineering*, 34, 1258-171.
- [20] Kim H. K., Choi S. B., Thompson B. S., Compliant control of a two-link flexible manipulator featuring piezoelectric actuators, *Mechanism and machine theory*, 36, 411-424.
- [21] Takayoshi K., Fujita T., Takayoshi H., Arikabe T., Murai N., Aizawa S., Tohyama K., 1997, Active vibration control of frame structures with smart structures using piezoelectric actuators (vibration control by control of bending moments of columns), *Smart mater. struct.*, 6, 448-456.
- [22] Song G., Sethi V., Li H. N., 2006, Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: a review, *Engineering structures*, 28, 1513-1524.
- [23] Soong T. T., Spencer B. F., Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, *Engineering structures*, 24, 243-259.
- [24] Spencer B. F., 1998, Yang G., Carlson J. D., Sain M. K., Smart dampers for seismic protection of structures: a full-scale study, *Second world conference on structural control*, Kyoto, Japan.

- [25] Kurino H., Tagami J., Shimizu K., Kobori T., 2003, Switching oil damper with built-in controller for structural control, *Journal of structural engineering*, 895-904.
- [26] Ribakov Y., Gluck J., 1999, Active control of mdof structures with supplemental electrorheological fluid dampers, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 28, 143-156.
- [27] Sorrentino S., Marchesiello S., Piombo B. A. D., 2003, A new analytical technique for vibration analysis of non-proportionally damped beams, *Journal of sound and vibration*, 265, 765-782.
- [28] Vu H. V., Ordonez A. M., Karnopp B. H., Vibration of double beam system, *Journal of sound and vibration*, 229(4), 807-822.
- [29] Qiao H., Li Q. S., Li G. Q., Vibratory characteristics of flexural non-uniform euler-bernoulli beams carrying an arbitrary number of spring-mass systems, *International journal of mechanical sciences*, 44, 725-743.
- [30] Barboni R., Mannini A., Fantini E., Gaudenzi P., 2000, Optimal placement of pzt actuators for the control of beam dynamics, *Smart mater. struct.*, 9, 110-120.
- [31] Balas M. J., 1978, Feedback control of flexible systems, *IEEE*, 673-679.

ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt Ertal, 1973 yılında İstanbul'da doğdu. Orta öğrenimini Kabataş Erkek Lisesi'nde tamamladı. 1996 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilimdalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

1997 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Makina Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı'nda Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı bölümde görev yapmaktadır.