BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇATLAK İÇEREN ÇERÇEVE YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kemal KOÇYİĞİT

İnşaat Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı

AĞUSTOS 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇATLAK İÇEREN ÇERÇEVE YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kemal KOÇYİĞİT
(171082913)

İnşaat Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ

AĞUSTOS 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171082913 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Kemal KOÇYİĞİT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ÇATLAK İÇEREN ÇERÇEVE YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI** Bursa Uludağ Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Melih SÜRMELİ Bursa Teknik Üniversitesi	.....

Savunma Tarihi : 19 Ağustos 2019

FBE Müdürü :	**Doç. Dr. Murat ERTAŞ** Bursa Teknik Üniversitesi	..../...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Kemal KOÇYİĞİT

İmzası:

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışması süresince her türlü desteği veren, yardım eden çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ'a yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans çalışmam süresince ve hayatımın her aşamasında bana maddi - manevi her türlü desteği veren aileme teşekkür ederim.

Tez çalışmamda, Bursa Teknik Üniversitesi'ne, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), Proje no: 172L06 kapsamında, maddi desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Ağustos 2019 Kemal KOÇYİĞİT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
SEMBOLLER ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Kırılma ve Çatlaklar 1
1.2 Çalışmanın Amacı ve İçeriği 4
1.3 Literatür Çalışması 4
1.4 Çalışmanın Özgün Değeri 7
2. FORMÜLASYONLAR VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ **8**
2.1 Çerçeve Sistemlerin Sonlu Elemanlar Formülasyonları 9
2.2 Çatlak Modelleme 17
2.3 Çatlaklı Çerçeve Sistemlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Çözümü 20
2.3.1 Serbest titreşim çözümü 20
2.3.2 Zorlanmış titreşim çözümü 21
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA **23**
3.1 Serbest Titreşim Sonuçları 27
3.2 Zorlanmış Titreşim Sonuçları 34
4. SONUÇ VE ÖNERİLER **56**
KAYNAKLAR **58**
ÖZGEÇMİŞ **62**

SEMBOLLER

A	: Kesit alanı
A_c	: Çatlak alanı
a_r	: Çatlak derinlik oranı
b,h	: Kesit boyutları (genişlik, yükseklik)
c	: Sönüm katsayısı
c_{ij}	: Çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayılar
E	: Elastisite modülü
$F(t)$	: Zamana bağlı dış yük
F_1, F_2, F_{II}	: Gerilme yığılma faktörleri için düzeltme faktörleri
f	: Sistemin frekansı
H	: Çerçeve yüksekliği
I	: Kesit atalet momentidir
L	: Çerçeve uzunluğu
L_c	: Çatlak mesafesi
L_e	: sonlu elemanın uzunluğu
L_{cr}	: Çatlak konum oranı
$P(t)$	: Yatay tekil yük
P_0	: Zorlayıcı dış yükün genliği
$\dot{q}_k^{(e)}$	: Düğüm yer değiştirmelerin hızı
$\ddot{q}_k^{(e)}$	: Düğüm yer değiştirmelerin ivmeleri
$\{q'\}$	: Yerel koordinat takımına göre yer değiştirme vektörü
$\{\dot{q}'\}$	: Yerel koordinat takımına göre hız vektörü
$\{\ddot{q}'\}$	: Yerel koordinat takımına göre yer ivme vektörü
$\{q\}$	: Global koordinat takımına göre yer değiştirme vektörü
$\{\dot{q}\}$	: Global koordinat takımına göre hız vektörü
$\{\ddot{q}\}$	: Global koordinat takımına göre ivme vektörü
${}^{t}\{q\}$	: *t* anı için yer değiştirme vektörü
${}^{t-\Delta t}\{q\}$	: *t*- Δt anı için yer değiştirme vektörü
${}^{t+\Delta t}\{q\}$	: *t*+ Δt anları için yer değiştirme vektörü
${}^{t}\{\dot{q}\}$	: *t* anı için hız vektörü
${}^{t}\{\ddot{q}\}$	: t anı için ivme vektörü
${}^{-\Delta t}\{q\}$	: t=0 çözümündeki özel başlangıç koşulu
${}^{0}\{q\}$	: *t*=0 anındaki yerdeğiştirme vektörü
${}^{0}\{\dot{q}\}$	: *t*=0 anındaki hız vektörü
${}^{0}\{\ddot{q}\}$	: t=0 anındaki ivme vektörü
T	: Periyot
T_{min}	: En küçük periyot değeri
t	: Zaman
U	: Yatay yerdeğiştirme
$\overline{X}$ ve $\overline{Y}$	: Yerel eksen takımı

$\boldsymbol{X}$ **ve** $\boldsymbol{Y}$	**:** Global eksen takımı
$\boldsymbol{x}$	**:** Çatlak derinliğinin çubuk elemanın derinliğine oranı
$\boldsymbol{\Delta t}$	**:** Zaman aralığı
$\boldsymbol{\eta}$	**:** Viskoz sönüm oranı
$\boldsymbol{\mu}$	**:** Poisson oranı
$\boldsymbol{\rho}$	**:** Çubuk elemanının kütle yoğunluğu
$\boldsymbol{\varphi_i^{(U)}}$, $\boldsymbol{\varphi_i^{(V)}}$	**:** Uzama ve yanal serbestliklerin şekil fonksiyonları
$\boldsymbol{\Omega}$	**:** Zorlayıcı dış yükün frekansı
$\boldsymbol{w}$	**:** Sistemin doğal frekansı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Karşılaştırma çalışması: tek açıklıklı çatlaklı bir çerçevenin farklı çatlak konumlarına göre frekans değerleri. **26**
Çizelge 3.2 : Karşılaştırma çalışması: tek açıklıklı bir çerçevenin farklı L/H oranlarına göre ilk üç moddaki frekans değerleri. **26**
Çizelge 3.3 : Kolon elemanında tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları **28**
Çizelge 3.4 : Kiriş elemanında tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları **29**
Çizelge 3.5 : Her iki kolon elemanında birer çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları **30**
Çizelge 3.6 : Her üç elemanda tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları **32**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Portland limanındaki Liberty gemisinin ikiye ayrılması (Yasuhisa, 2009, s. 319-333) **2**
Şekil 1.2 : Köprü kirişinde çatlak (Haghani ve diğ, 2012, s. 459)..... **2**
Şekil 1.3 : Japonya'daki Mashita Köprüsü'nün Askılarında Yorulma Çatlağı (Haghani ve diğ, 2012, s. 463) **3**
Şekil 2.1 : Dış dinamik bir yük etkisi altındaki çatlak içeren tek açıklı bir çerçeve ... **9**
Şekil 2.2 : Bir çubuk elemanın başlangıç ve şekil değiştirmiş konumları..... **10**
Şekil 2.3 : İki düğüm noktalı çubuk sonlu eleman **11**
Şekil 2.4 : Döndürülmüş çubuk bir eleman. **14**
Şekil 2.5 : Yerel eksen takımında serbestlikler **16**
Şekil 2.6 : Global eksen takımında serbestlikler **16**
Şekil 2.7 : Çatlaklı bir çubuk eleman ve kesiti **17**
Şekil 2.8 : Kırılma modları **18**
Şekil 2.9 : Çatlak sonlu eleman modeli **19**
Şekil 3.1 : Çatlaklı çerçevenin serbest titreşim çözümüne ait algoritma..... **24**
Şekil 3.2 : Çatlaklı çerçevenin zorlanmış titreşim çözümüne ait algoritma **25**
Şekil 3.3 : L_{cr1}=0 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m **35**
Şekil 3.4 : L_{cr1}=1 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m **36**
Şekil 3.5 : L_{cr2}=0.5 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m **37**
Şekil 3.6 : L_{cr2}=1 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m **38**
Şekil 3.7 : L_{cr1}=0 ve Lcr3=1 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m **39**
Şekil 3.8 : L_{cr1}=0 ve L_{cr3}=0 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m **40**
Şekil 3.9 : L_{cr1}=1 ve L_{cr3}=1 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m **41**
Şekil 3.10 : L_{cr1}=0, L_{cr2}=0.5 ve L_{cr3}=0 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m..... **42**

Şekil 3.11 : L_{cr1}=0, L_{cr2}=1ve L_{cr3}=0 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m..... **43**
Şekil 3.12 : L_{cr1}=1, L_{cr2}=0.5 ve L_{cr3}=1 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m..... **44**
Şekil 3.13 : L_{cr1}=0 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m **46**
Şekil 3.14 : L_{cr1}=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m **47**
Şekil 3.15 : L_{cr2}=0.5 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m **48**
Şekil 3.16 : L_{cr1}=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m. **49**
Şekil 3.17 : Lcr1=0 ve Lcr3=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m..... **50**
Şekil 3.18 : Lcr1=0 ve Lcr3=0 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m..... **51**
Şekil 3.19 : Lcr1=1 ve Lcr3=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m..... **52**
Şekil 3.20 : Lcr1=0, Lcr2=0.5 ve Lcr3=0 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m. **53**
Şekil 3.21 : Lcr1=0, Lcr2=1 ve Lcr3=0 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m. **54**
Şekil 3.22 : Lcr1=1, Lcr2=0.5 ve Lcr3=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi a) Sönümsüz durum ve H=3 m, b) Sönümsüz durum ve H=6 m, c) Sönümlü durum ve H=3 m, d) Sönümlü durum ve H=6 m. **55**

ÇATLAK İÇEREN ÇERÇEVE YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

İmalat hatalarından ve servis süresi boyunca oluşan yıkıcı etkilerden dolayı ortaya çıkan çatlaklar mühendislikte en önemli problemlerden biridir. Yapılarda ortaya çıkan çatlaklar yapıların dayanımını, stabilitesini ve dinamik davranışlarını oldukça değiştirip olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumda yapıların kullanım ömrü ve dayanımı oldukça düşmektedir. Bu yüzden yapıların yapısal analizinde oluşabilecek olası çatlakların göz önüne alınarak yapılması daha güvenli ve gerçekçi bir yaklaşım olabilir.

Bu çalışmada, çerçeve bir yapının çatlak olması durumunda dinamik davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla kenarında çatlak bulunan tek açıklıklı bir çerçeve taşıyıcının serbest titreşim, sönümsüz zorlanmış titreşim ve sönümlü zorlanmış titreşim cevapları detaylı bir biçimde incelenmiştir. Çatlaklı çerçevenin dinamik analizi Euler-Bernoulli çubuk teorisi çerçevesinde ele alınıp enerji tabanlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çerçeve yapının sönüm etkisinde Kelvin-Voigt viscoelastik model kullanılmıştır. Çatlak etkisinden dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, çatlak kesiti veya bölgesinde, kütlesiz ve boyutsuz bir çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Çatlaktan dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, lineer elastik kırılma mekaniği teorisi baz alınarak açılma modu (Mod1) ile düzlem içi kayma modu (Mod2) kullanılmasıyla birlikte elde edilen gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverininim oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Çatlak esnekliğinin tersi alınarak elde edilen çatlak rijitliğinin sonlu elemanlar modeline eklenmesiyle birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiştir. Problemin çözümünde Matlab programında algoritma ve kodları yazılarak sayısal sonuçlar ile grafikler elde edilmiştir. Probleme ait serbest titreşim çözümünde özdeğer-özvektör prosedürü uygulanarak frekanslar elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim çözümlerinde ise zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumunun, farklı çatlak sayısının ve farklı değerlerdeki çerçeve yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak dinamik cevaplar elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Elde edilen formülasyon ve sonuçların doğruluğu için, literatürdeki benzer çalışmaların özel sonuçları ile mevcut yapısal analiz programlarında kıyaslama çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Çatlak, Çerçeve Yapı, Serbest Titreşim, Zorlanmış Titreşim, Sonlu Elemanlar Metodu.

DYNAMIC BEHAVIOR OF CRACKED FRAME STRUCTURES

SUMMARY

Cracks in engineering structures due to manufacturing errors and destructive effects during the service period are one of the most important problems in engineering. Cracks change the strength, stability and dynamic behavior of the structures and considerably and the lifetime and strength of the structures are reduced significantly. In order to more safe desing of structures, the crack effects should be considered in the structural analysis.

In this study, free vibration, undamped and damped forced vibration responses of a single span frame with cracks are investigated. The vibration analysis of the cracked frame is examined by using the energy based finite element method within Euler - Bernoulli beam theory. The Kelvin-Voigt viscoelastic model is used for the damping effect. The local flexibility resulting from the crack effect is modeled with a massless and dimensionless finite element beam in the crack section. The local flexibility is obtained by using the stress intensity factor and strain energy release rates according to the opening mode (Mode 1) and the in-plane shear mode (Mode 2) based on the linear elastic fracture mechanics theory. The crack stiffness is obtained by taking the inverse of the flexibility of the crack. Assembly of global finite element matrices are obtained by adding the crack stiffness to the finite element model.

In the solution of the problem and obtaining of the results, algorithms and codes are written in Matlab program. The vibration frequencies are obtained by applying the eigenvalue-eigenvector procedure in the free vibration solution of the problem. In solution of the forced vibration problem, the central difference method is used in the time history. In the numerical results, the effects of the crack depth, the crack location, number of crack and dimension of the frame on the undamped and damped forced vibration responses of the cracked frame are investigated. Also, the validation studies are performed in order to accuracy of the presented method.

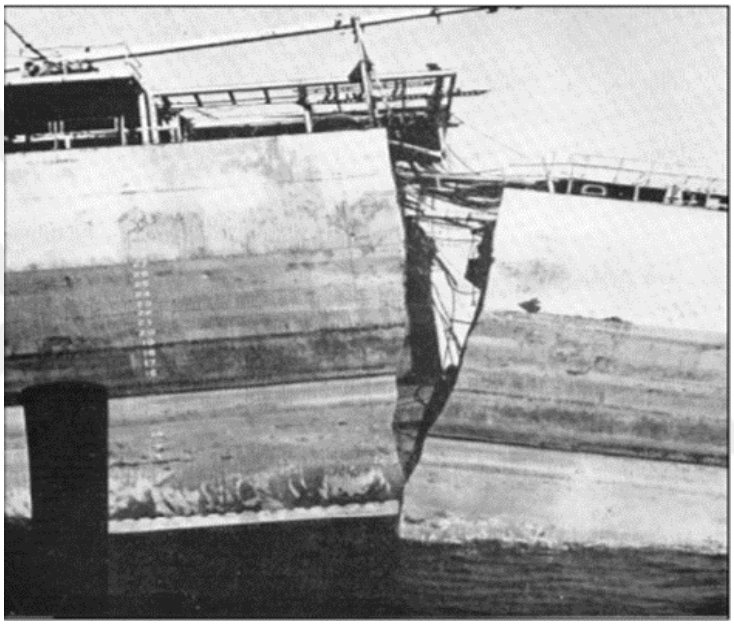
Keywords: Crack, Frame Structure, Free Vibraiton, Forced Vibraiton, Finite Element Method

1. GİRİŞ

1.1 Kırılma ve Çatlaklar

Mühendislik yapılarında servis ömrü boyunca karşılaşılan en büyük problemlerden biri çatlak problemidir. Çatlaklar, yapı bütünlüğünü, dayanımını ve stabilitesini olumsuz yönde etkilemekte ve yapı elemanlarında yerel esnekliklere yol açmaktadır. Bunun neticesinde, yapı elemanının mekaniksel davranışlarında önemli değişiklikler meydana gelmekte, dayanım ve kullanım ömrü oldukça düşmektedir. Çatlak içeren yapı elemanlarının incelenmesi, yapısal analiz içerisinde önemli bir problemdir. Çatlak içeren bir yapı elemanı ile çatlak içermeyen bir yapı elemanı arasında mekanik davranışlar açısından oldukça büyük farklılıklar olabilmektedir. Çatlakların belirli bir durumundan sonra, yapı elemanı ya kırılmakta yada kullanılabilirlik özelliğini kaybedebilmektedir. Bu durum, özellikle can ve mal güvenliğinin önem arz ettiği mühendislik yapılarının tasarımı ve yapımında daha önemli mesele olmaktadır. Mühendislik yapılarının servis ömrü göz önüne alınarak tasarımı ve boyutlandırılmasında, oluşabilecek kırılma ve çatlak durumlarının öngörülmesi ve tasarım analizlerinde göz önüne alınması, kırılma, çatlak ve hasarlardan kaçınabilecek önlemlerin alınması gereklidir. Genel olarak, mühendislik yapılarında oluşmuş hasarların sebepleri olarak, tasarım hatası, uygun olmayan malzeme tercihi, yapım hataları, uygun olmayan fiziki koşullar, yetersiz kontrol vs. sayılabilir. Kırılma olayının ayrıca bir başka önemli hususu ise, ülke ekonomilerinde ekonomik kayba sebep olmalarıdır. İmal edilen ürünlerin ya da inşaa edilen yapıların servis ömrü boyunca, sık sık hasara uğramaları ekonomik yönden ciddi bir kayıplara yol açmaktadır. Örnek olarak, şiddetli bir deprem sonucu yıkılan yapıların, can kayıplarına ilave olarak o ülke ekonomisi ve altyapısına önemli bir derecede zarar verdiğidir. Hatalı olarak tasarlanıp seri üretilen uçak, otomobil ya da gemi modellerinin, hatalarının sonradan fark edilip kullanıcılardan geri çağrılması, başlı başına büyük bir ekonomik zarardır. Bu durumlara örnek olarak, tarihte binlerce vaka olmuştur. Bunlardan en önemlilerden biri, II. Dünya Savaşı yıllarında üretilen Liberty türü gemilerde ortaya çıkan kırılmalardır. Seri üretilen 2700 Liberty gemilerinin yaklaşık 400 tanesinde kırılmalar sonucu hasarlar oluşmuş, yaklaşık 90

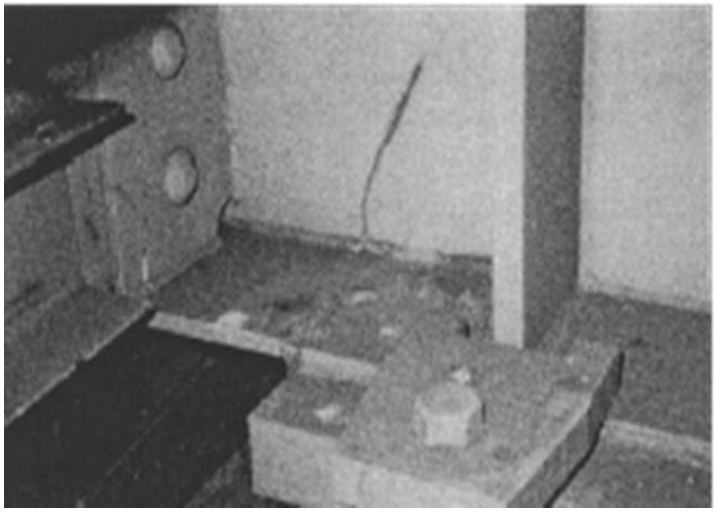
tanesinde yüksek düzeyde hasarlar oluşmuş ve yaklaşık 20 tanesinde ise gemiler ikiye ayrılmıştır (Şekil 1.1). Liberty gemilerinin bu ölçüde hasar oluşumlarını inceleyen araştırmacılar, hasarların yerel gerilme birikmelerinden, kalitesiz kaynak kullanılmasından, kalitesiz işçilik ve düşük kırılma tokluklu çelik malzemesi kullanılmasından olduğunu tespit etmişlerdir. Bir başka örnek olarak, köprülerde ortaya çıkan çatlak ve toptan göçmeye neden olan kırılmalardır. Özellikle köprü gibi, ülke ekonomisi ve stratejisi için önemli yapılarda oluşacak en ufak bir çatlağın onarımında bile, hem mali olarak hem de zaman kaybı bakımından pahalı bir fatura ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.2, Şekil 1.3).



Şekil 1.1 : Portland limanındaki Liberty gemisinin ikiye ayrılması (Yasuhisa, 2009, s. 319-333)



Şekil 1.2 : Köprü kirişinde çatlak (Haghani ve diğ, 2012, s. 459)



Şekil 1.3 : Japonya'daki Mashita Köprüsü'nün Askılarında Yorulma Çatlağı (Haghani ve diğ, 2012 s. 463).

Mühendislik yapılarının çatlak ve kırılmalarını daha gerçekçi incelemek için, kırılma mekaniği esaslarını bilmek ve yorumlamak gereklidir. Bilindiği gibi, cisimlerde var olan çatlağın ya da sonradan oluşan bir çatlağın, çeşitli iç ve dış etkilerden dolayı yeni parçalar oluşmak üzere parçalara ayrılmasına kırılma denir. Kırılma Mekaniği, gerilme analizine bağlı olarak kırılma direncini, uygulanan yüke ve hata içeren komponentlerin yapısal geometrisine bağlı olarak ortaya koyan kalitatif bir davranıştır (Yayla, 2007).

Mühendislikte kırılma olayı, literatürde farklı kategorilere göre sınıflandırılmıştır. Bunlar, kırılma yüzeyinin kristalografik yapısına, deformasyon durumuna ve kırılma yüzeyinin görünüşüne göre sınıflandırmalardır. Kırılma yüzeyinin kristalografik yapısına göre sınıflandırmada, kırılmayı atom düzlemlerinin ve bağlarının kırılmasına göre ele alır. Bu sınıflandırmada, atom düzlemlerinin kayması sırasında moleküler bağlarının ayrılmasından dolayı kayma kırılması ile klivaj düzlemine dik moleküler bağlarının koparılmasından dolayı ayrılma (klivaj) kırılması alt kategorilerde sınıflandırılır. Kayma kırılmasında, belirli bir kayma gerilmesinden sonra atom düzleminden kaymasından oluşup, kırılma olayından önce cisimde plastik şekil değiştirmeler oluşur. Deformasyona göre kırılmada, sünek kırılma ile gevrek kırılma olarak alt sınıflandırılır. Sünek kırılmada, kırılmadan önce cisimde bir miktar plastik şekil değiştirmeler oluşur ve cisimde ani kırılma ortaya çıkmaz. Örnek olarak, çelik malzemesinin kırılması sünek bir kırılmadır. Gevrek kırılmada, plastik şekil değiştirme olmadan cisimde aniden ortaya çıkan kırılmadır. Bu tür kırılan malzemelerin tokluk değerleri genelde düşüktür. Kırılma yüzeyinin görünüşüne göre

sınıflandırmada ise, kırılma lifli ve tanesel kırılmalar olarak alt katagorilendirilir. Ayrıca kırılma çeşitlilerine, sünme kırılması ve yorulma kırılmasıda eklenebilir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Bu çalışmada kenarında çatlak içeren, tek açıklıklı çerçeve taşıyıcı bir sistemin dinamik davranışları incelenmiştir. Çalışmada, çatlaklı çerçevelerin dinamik davranışları, Euler-Bernoulli çubuk teorisi çerçevesinde ele alınıp enerji tabanlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çatlak bölümün esnekliği, çatlaktan dolayı meydana gelen yerel esnekliğe bağlı olarak kütlesiz ve boyutsuz çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeline eklenen çatlak elemanı ve sonlu elemanların birleştirilmesi ile birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiştir. Yayın rijitliği, kırılma mekaniği teorileri kullanılarak açılma modu (Mod1) ve düzlem içi kayma modu (Mod2) ile hesaplanan gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverinim oranlarına ait esneklik matrisinin tersi alınarak türetilmiştir.

Çalışmada, çatlak derinliğinin, çatlak konumunun, çerçeve boyutlarının yapının dinamik cevaplarına olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Çatlaklı çerçeveli yapının frekansları, sönümlü ile sönümsüz zorlanmış titreşim sonuçları elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim probleminde, yapıya harmonik yük etkisi göz önüne bulundurularak, dinamik cevaplar elde edilmiştir. Söz konusu dinamik probleminin çözümünde, zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılarak çözüm yapılmıştır. Problemin çözümünde, çatlaklı durum göz önüne alınarak çerçeve sisteminin sonlu elemanlar formülasyonları zaman tanım aralığında elde edilip bununla birlikte Matlab programında algoritma ve kodları elde edilmiştir. Elde edilen formülasyon ve sonuçların doğruluğunu test etmek için ise, literatürdeki çalışmaların özel sonuçları ve mevcut yapısal analiz programlarından kıyaslama çalışmaları yapılmıştır.

1.3 Literatür Çalışması

Literatürde çatlak etkisi göz önünde bulundurularak yapısal elemanların mekanik davranışları ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Genelde, kiriş elemanların çatlak etkisi üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır. Literatürde kiriş, kolon, çerçeve gibi

çubuk elemanların çatlak gözönüne bulundurularak yapılmış çalışmaların özeti izleyen aşamada verilmiştir. Tharp (1987), kenarında tek çatlak içeren dikdörtgen kesitli kolon ve kirişlerin sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. Nikpour (1990), kenar çatlaklı izotrop ve anizotrop kompozit kolonların burkulma davranışlarını araştırmıştır. Ostachowicz ve Krawczuk (1990), kenar çatlaklı bir kirişin titreşim analizini yapmışlardır. Shen ve diğ. (1994) kenar çatlaklı, basit mesnetli bir kirişin serbest titreşimini Euler-Bernoulli kiriş teorisi çerçevesinde incelemişlerdir. Nikolakopoulos ve diğ. (1997), çerçeve taşıyıcı sistemlerin çatlak analizini yapmışlardır. Krawczuk ve diğ. (1997), çatlaklı kompozit malzemeli kiriş ve levha eleman elemanların dinamik karakteristikleri üzerinde çalışmışlardır. Yokoyama ve Chen (1998), kenarında tek çatlağa sahip Euler-Bernoulli kirişinin titreşim karakteristiklerini çizgi yayı modeli kullanarak incelemişlerdir. Saavedra ve Cuitino (2001), enine bir çatlak içeren kirişlerin dinamik davranışlarını teorik ve deneysel sonlu elemanlar analiziyle incelemiştir. Altay (2002), eksenel yük etkisi altındaki kirişlerin çeşitli çatlak türleri hallerinde titreşim karakteristiklerini sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir. Kuntiyawichai ve Burdekin (2003), dinamik yükler altında çatlaklı yapıların kırılma tokluğu ve deprem yükleri altındaki çelik çerçeveli yapılardaki çatlak bağlantıları incelemek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Kishen ve Kumar (2004), çatlaklı kiriş ve kolon elemanların farklı yükler altında kırılma davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Zheng ve Kessissoglou (2004), çatlaklı bir kirişin doğal frekansları ve mod şekilleri sonlu eleman yöntemi kullanılarak elde etmişlerdir. Gürel ve Kısa (2005), düşey yüklere maruz, çatlak içeren narin prizmatik kolonların burkulmasını incelemişlerdir. Kara ve Taşgetiren (2005), çentikli bir çelik plakada, mikro yapısında bulunan çatlağın çentik ucuna olan değişik mesafedeki gerilme şiddet faktörünü sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Özen (2007), düşey tekil yüklemelere maruz, ilerlemeyen çatlak içeren dikdörtgen ve kare kesitli kolonların stabilite ve titreşim davranışlarını araştırmıştır. Şahin (2007), üzerinde birden fazla çatlak bulunan ve sabit bir eksenel yüke maruz kiriş elemanlarının doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir. Gürel (2007), çok sayıda kenar çatlak içeren ince prizmatik dairesel kolonların burkulmasını transfer matrisi yöntemi kullanarak incelemiştir. Arboleda-Monsalve ve diğ. (2007), kiriş-kolonların stabilite ve serbest titreşim analizlerini çatlaklı durum göz önüne alarak Timoshenko kiriş teorisi çerçevesinde araştırmıştır. Bouboulas ve Anifantis (2008), çatlak içeren kirişlerin sonlu elemanlar

çözümü için bir formülasyon geliştirmişlerdir. Saltık (2008), eksenel yük etkisi altında, çatlak içeren dikdörtgen ve kare kesitli kirişlerin titreşim davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir bilgisayar programı ile araştırmıştır. Caddemi ve Calio (2008) ile Caddemi ve diğ. (2013), birden fazla çatlak kesite sahip kolonların stabilitesini incelemişlerdir. Skrinar (2009), çatlaklı kolon-kirişler için yeni bir geometrik rijitlik matrisi sunmuştur. Kitipornchai ve diğ. (2009) ile Ke ve diğ. (2009), fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin doğrusal olmayan titreşim ve burkulmasını Von Kármán doğrusal olmayan kinematik bağıntılar kullanarak incelemişlerdir. Bilgehan ve diğ. (2012), kenar çatlağı olan sabit dikdörtgen kesitli narin basınç çubuklarının burkulma problemini Transfer Matrisi Yöntemi ve Yapay Sinir Ağları ile incelenmiştir. Haskul (2010), çatlak içeren değişken kesitli kirişlere ait titreşim analizini yapmıştır. Challamel ve Xiang (2010, 2011), çatlaklı çerçeve, kiriş ve kolonların burkulma analizi incelemişlerdir. Ibrahem (2010,2013), kenar çatlaklı çerçeve taşıyıcı sistemlerin titreşim cevaplarını incelemiştir. Batıhan (2011), elastik mesnet üzerinde oturan ve çatlak içeren bir çubuğun yanal titreşimlerini incelemiş ve elastik mesnetin ve çatlak parametrelerinin çubuğun yanal titreşim doğal frekansları üzerindeki etkileri üzerine çalışmıştır. Chatterjee (2011), harmonik yükleme altındaki konsol kirişlerin, doğrusal olmayan titreşim cevaplarından faydalanarak kırılma analizini yapmıştır. Şakar ve diğ. (2012), çok açıklıklı çerçevelerin dinamik stabilite problemlerini incelemiştir. Tarih (2013), üzerinde çatlak bulunan tabakalı kompozit kirişlerin serbest titreşim analizlerini deneysel ve nümerik olarak yapmıştır. Akbaş (2013), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir konsol kirişin çatlamış bir kenarının serbest titreşim analizi üzerine çalışmıştır. Labib ve diğ. (2014), çoklu çatlaklı kiriş ve çerçevelerin serbest titreşim problemini incelemiş ve çatlakları temsil etmek için bir dönme yay modeli kullanarak doğal frekansları elde etmiştir. Örnek (2014), çatlak içeren dikdörtgen kesitli kirişlere ait serbest titreşim analizi Reddy-Bickford kiriş teorisi çerçevesinde teorik, nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Akbaş (2014a, 2014b), kenar çatlaklıkların, kirişlerin dalga yayılımına olan etkisini incelemiştir. Abolbashari ve diğ. (2014), fonksiyonel derecelendirilmiş çatlaklı kirişlerin, çatlak tespitlerinin farklı sayısal metodlar kullanarak incelemişlerdir. Moradi ve Moghadam (2014), çatlaklı kirişlerin burkulma sonrası titreşim analizini diferansiyel kuadratik yöntem ile ele almıştır. Yang ve diğ. (2015), Euler-Bernoulli kiriş teorisi dayanarak, kenar çatlakları içeren fonksiyonel dereceli malzemelerden yapılan dikdörtgen kesitli kirişlerin serbest titreşimini

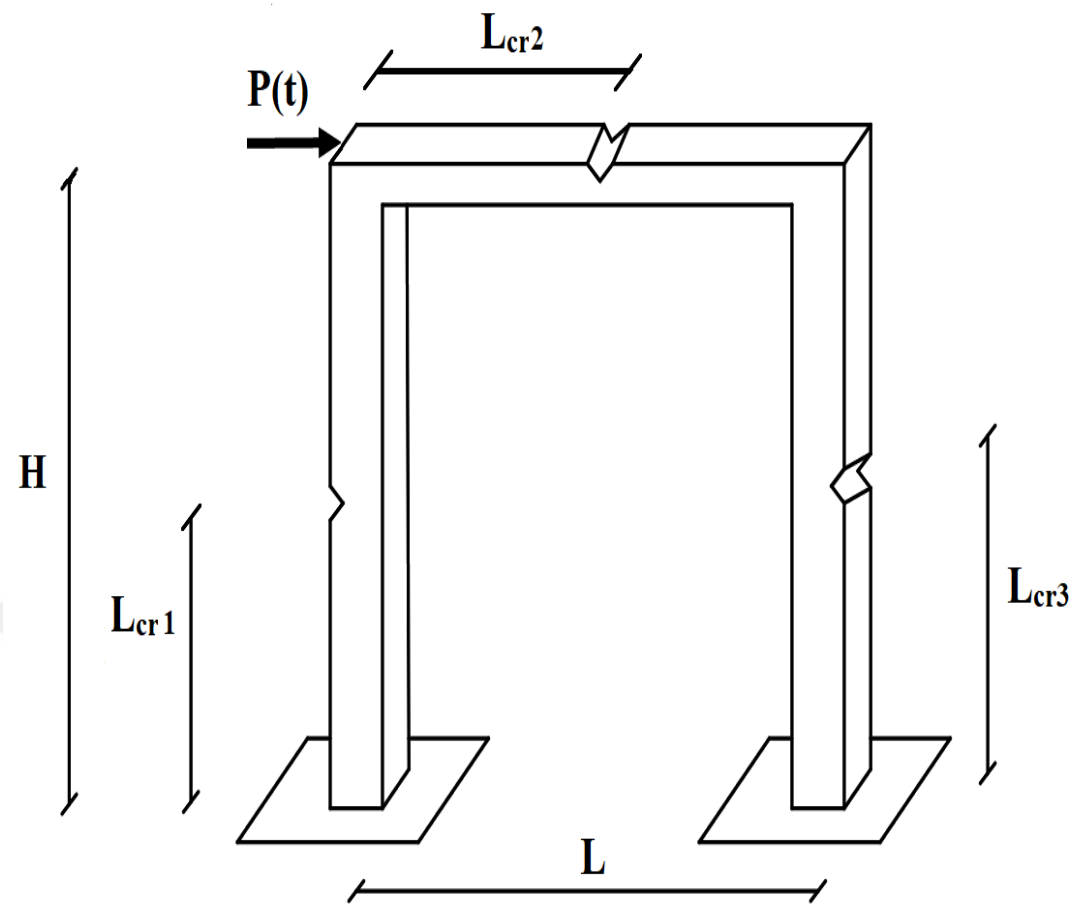
incelenmişlerdir. Eroglu ve Tufekci (2016), kesme deformasyonunun etkileri ve döner atalet dahil, kenar çatlağına sahip düz kirişler için yeni bir sonlu eleman formülasyonunu sunmuşlardır. Zhao ve diğ. (2016), harmonik kuvvet etkisi altında çatlaklı bir Euler-Bernoulli kirişinin kararlı durum tepkilerini Green'in fonksiyon metodu ile elde etmişlerdir. Yazdi ve Shooshtari (2016), kenar çatlağı olan kiriş-kolon elemanlarının statik davranışını, doğal frekanslarını ve burkulma yüklerini incelemişlerdir. Öztürk ve diğ. (2016), çatlak derinliğinin ve çatlak yerinin, periyodik yükleme işlemine tabi tutulmuş çok katlı çerçeve yapılarının düzlem içi statik ve dinamik kararlılığı üzerindeki etkileri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelemişlerdir. Caddemi ve diğ. (2017), rasgele bir sayıda açık çatlakların varlığındaki Euler-Bernoulli kiriş ve kolonların dinamik rijitlik matrisinin frekansa bağlı olarak olarak açık ifadesini sunmuştur. Mia ve diğ. (2017), çatlak ve çatlak olmayan konsol kiriş için doğal titreşim ve enine titreşim modu şekillerini ilk üç mod için elde etmişlerdir. Lien ve diğ. (2017), Timoshenko kiriş modeline dayanan çoklu çatlamış fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeli kirişin serbest titreşim denklemini, çatlakları dönen yay modeli ile dinamik rijitlik yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Tan ve diğ. (2017), çatlaklı düzgün olmayan kirişlerin serbest titreşim analizini sonlu elemanlar yöntemi incelemiştir. Özkan (2017), sonlu eleman analiz yöntemi kullanarak, yapılarda çatlak tespit edebilme kabiliyetini, çatlak pozisyonunun, çatlak derinliğinin, uyarma frekansının, konumunun, genliğinin ve sınır şartlarının çatlaktan kaynaklanan belirtiler üzerindeki etkisini belirlemiştir. Rezaiee-Pajand ve Gharaei-Moghaddam (2018), çatlaklı çerçevelerin geometrik doğrusal olmayan davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir.

1.4 Çalışmanın Özgün Değeri

Literatür özetinden de görüldüğü üzere çerçeve yapıların çatlak etkisi göz önüne alınarak yapılmış zorlanmış titreşim çalışma sayısı oldukça azdır. Çatlak etkisi göz önüne alınarak yapılmış çalışmaların genelinde kiriş ve kolon elemanlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çerçeve yapıların çatlak göz önüne alınarak yapılmış çalışmalarında serbest titreşim analizi incelenmiş olup zorlanmış titreşim analizi etraflıca yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgün değeri ve literatüre katkısı literatürde eksik olan çatlaklı çerçeve yapıların sönümlü zorlanmış titreşim davranışlarının incelenmesidir.

2. FORMÜLASYONLAR VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bu bölümde çatlaklar içeren çerçeve bir yapının sonlu elemanlar formülasyonlarının elde edilmesi, çatlaktan dolayı meydana gelen yerel esnekliğe ait formülasyonlarının elde edilmesi ve dinamik problemin çözümü sunulmuştur. Şekil 2.1'de tek açıklıklı, kenarlarında birer çatlak içeren H yüksekliğinde, L uzunluğunda, dikdörtgen kesitli bir çerçeve taşıyıcı sistem gösterilmiştir. Çerçeve taşıyıcının mesnetlerinin her biri ankastre mesnet olarak düşünülmüştür. Şekil 2.1'de, çatlağın çerçeve elemanlarının farklı yerlerde olması durumlarına göre şekilleri gösterilmiştir. Çatlağın, sol kolon, kiriş ve sağ kolon elemanlarında bulunması durumları ile çatlak konumlarının her bir elemandaki uzunlukları gösterilmiştir. Çatlağın sol kolonda olması durumundaki konumu sol ankastre mesnetden itibaren L_{cr1}, kiriş elemanında olması durumunda sol kolon-kiriş birleşiminden itibaren L_{cr2} ve sağ kolon elemanında olması durumunda sağ kolon ankastre birleşiminden itibaren L_{cr3} olarak tanımlanmıştır. Çatlak derinliği ise, a_r olarak ifade edilmiştir. Çalışmada, çatlağın çerçeveye olan dinamik etkileri incelenmiştir. Dinamik etkilerin incelenmesinde, serbest titreşim, sönümsüz zorlanmış titreşim ile sönümlü zorlanmış titreşim sonuçları elde edilmiş, yorumlanmıştır. Zorlanmış titreşim probleminin incelenmesinde, çerçeveye şekil 2.1'de görüldüğü gibi, sol kolon-kiriş birleşim bölgesine bir yatay tekil (P(t)) yük etkitildiği düşünülmüştür. Çalışmada, zorlayıcı P(t) kuvveti bir harmonik özellikte olduğu düşünülmüş ve $P(t)=P_0\cos(\Omega t)$ olarak ele alınmıştır. Burada, P_0 zorlayıcı dış yükün genliği, Ω yükün frekansı ve t ise zamanı gösterir. Çerçeve elemanlarından sol kolon "1" nolu, kiriş "2" nolu ve sağ kolon ise "3" nolu eleman olarak gösterilmiştir. Çerçeve elemanın en kesit boyutları *b* genişlik, *h* yükseklik olarak gösterilmiş olup, her bir elemanın en kesit boyutları bu sembolların alt indisi numaralandırılarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.1 : Dış dinamik bir yük etkisi altındaki çatlak içeren tek açıklı bir çerçeve taşıyıcı sistem

Çatlaklı çerçevenin dinamik davranışlarının incelenmesinde, çerçeve sistemini oluşturan elemanlar çubuk sonlu elemanlar ile modellenip, çubuklar Euler-Bernoulli kiriş teorisi çerçevesinde incelenmiştir. Çalışmada yapılan kabullerde, yer değiştirme ve dönmelerin 1. Mertebe teorisinde incelendiği ve çerçeve taşıyıcı malzemenin lineer-elastik, izotrop ve homojen özelliklerde olduğu kabul edilmiştir.

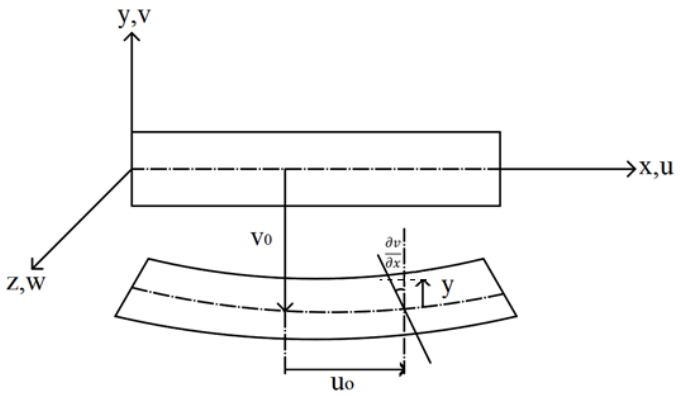
2.1 Çerçeve Sistemlerin Sonlu Elemanlar Formülasyonları

Euler-Bernoulli çubuk teorisine göre, şekil 2.2'de gösterilen çubuk yer değiştirme alanı (u,v,w) X,Y,Z koordinat takımına göre izleyen şekilde verilmiştir:

$$u(X,Y,t) = u_0(X,t) - Y\frac{\partial v(x,t)}{\partial X}(X,t) \tag{2.1}$$

$$v(X,Y,t) = v_0(X,t) \tag{2.2}$$

$$w(X,Y,t) = 0 \tag{2.3}$$



Şekil 2.2 : Bir çubuk elemanın başlangıç ve şekil değiştirmiş konumları.

Burada u_0, v_0, w_0 sırasıyla X, Y ve Z koordinatlardaki yer değiştirmeleri göstermektedir. t ise zamanı gösterir.

(2.1), (2.2) ve (2.3) denklemlerini kullanarak şekil değiştirme ile yer değiştirme arasındaki ilişki izleyen şekilde bulunur:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial X} = \frac{\partial u_0(X,t)}{\partial X} - Y\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial X^2} \tag{2.4}$$

Burada ε_{xx} eksenel şekil değiştirmesidir. Bünye denklemlerini kullanarak, gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki izleyen şekilde olur:

$$\sigma_{xx} = E\left(\frac{\partial u_0(X,t)}{\partial X} - Y\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial X^2}\right) \tag{2.5}$$

Euler-Bernoulli çubuk teorisine göre elastik şekil değiştirme enerjisi (U_i) izleyen şekilde ifade edilir:

$$U_i = \frac{1}{2}\int_0^L \int_A \left(\sigma_{ij}\,\varepsilon_{ij}\right) dA\, dX \tag{2.6}$$

(2.4) ile (2.5) denklemleri, (2.6)'da yerlerine yazılırsa, elastik şekil değiştirme enerjisinin son hali izleyen şekildedir:

$$U_i = \frac{1}{2}\int_0^L \left[EA\left(\frac{\partial u_0(X,t)}{\partial X}\right)^2 + EI\left(\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial X^2}\right)^2\right] \tag{2.7}$$

Burada A kesit alanı, I kesit atalet momentidir. Çubuk elemanının, Euler-Bernoulli çubuk teorisine göre kinetik enerjisi (K) izleyen şekilde ifade edilmiştir:

$$K = \frac{1}{2}\int_0^L \int_A \rho\left[\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2\right] dA\, dX \tag{2.8}$$

(2.1)-(2.3) denklemleri, (2.8)'de yerine yazılması kinetik enerjinin son hali izleyen şekildedir:

$$K = \frac{1}{2}\int_0^L \left[\rho A\left(\frac{\partial u_0}{\partial t}\right)^2 + \rho A\left(\frac{\partial v_0}{\partial t}\right)^2 + \rho I\left(\frac{\partial^2 v_0 \emptyset}{\partial X\,\partial t}\right)^2\right] dX \tag{2.9}$$

Burada ρ çubuk elemanının kütle yoğunluğudur. Dış kuvvetlerin potansiyel enerjisi (U_e) izleyen şekilde ifade edilmiştir.

$$U_e = -\int_0^L [F(x,t)\, v(x,t)]\, dX \tag{2.10}$$

Burada F(t) zamana bağlı dış yüktür. Çubuk elemanının sönüm etkisinde, Kelvin-Voigt viscoelastik modeli kullanılmıştır. Kelvin-Voigt modeline göre malzeme bünye denklemi izleyen şekilde verilmiştir:

$$\sigma_{xx} = E\left(\varepsilon_{xx} + \eta\frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t}\right) \tag{2.11}$$

Burada η viskoz sönüm oranı olup, izleyen denklemde ifade edilmiştir.

$$\eta = \frac{c}{E} \tag{2.12}$$

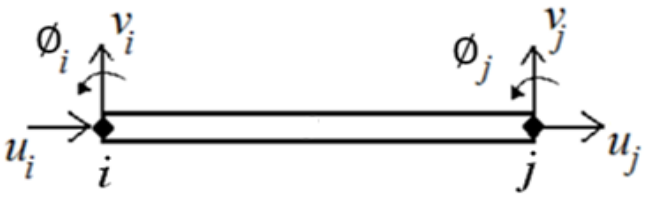
Burada *c* sönüm katsayısıdır. Çubuk elemanına ait sönüm fonksiyonu izleyen denklemde verilmiştir:

$$R = \frac{1}{2}\int_0^L E\left(\eta\frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t}\right)^2 dV \tag{2.13}$$

Probleme ait Lagrange fonksiyoneli izleyen şekilde verilmiştir:

$$I = K - (U_i + U_e) \tag{2.14}$$

Ele alınan problemin sonlu elemanlar çözümünde Euler-Bernoulli çubuk elemanı kullanılmış olup, her noktasında üç serbestliği olan 2 düğüm noktalı çubuk sonlu elemanlar kullanılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : İki düğüm noktalı çubuk sonlu eleman

Çubuk sonlu elemanın düğüm noktası yer değiştirmeleri cinsinden yer değiştirme alanı aşağıda verilmiştir:

$$u^{(e)}(X,t) = \varphi_1^{(U)}(X)\, u_i(t) + \varphi_2^{(U)}(X)\, u_j(t)$$

$$= \left[\varphi^{(U)}\right]\begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \left[\varphi^{(U)}\right]\{q\}_U \tag{2.15}$$

$$v^{(e)}(X,t) = \varphi_1^{(V)}(X)\, v_i(t) + \varphi_2^{(V)}(X)\, \emptyset_i(t) + \varphi_3^{(V)}(X)\, v_j(t) + \varphi_4^{(V)}(X)\, \emptyset_j(t)$$

$$\left[\varphi^{(V)}\right]\begin{Bmatrix} v_i \\ \emptyset_i \\ v_j \\ \emptyset_j \end{Bmatrix} = \left[\varphi^{(V)}\right]\{q\}_V \tag{2.16}$$

Burada u_i, v_i ve $\emptyset_i$ düğüm noktalarının sırasıyla eksenel yer değiştirme, yanal yer değiştirme ve dönmelerdir. $\varphi_i^{(U)}$ ve $\varphi_i^{(V)}$ uzama ve yanal serbestliklerin şekil fonksiyonları olup Euler-Bernoulli çubuk elemanı için izleyen şekilde verilmiştir: Uzama serbestliği için şekil fonksiyonları;

$$\varphi^{(U)}(X) = \left[\varphi_1^{(U)}(X)\ \ \varphi_2^{(U)}(X)\right]^T \tag{2.17}$$

Burada

$$\varphi_1^{(U)}(X) = \left(-\frac{X}{L_e} + 1\right), \tag{2.18a}$$

$$\varphi_2^{(U)}(X) = \left(\frac{X}{L_e}\right), \tag{2.18b}$$

yanal yerdeğiştirme serbestliği için şekil fonksiyonları;

$$\varphi^{(V)}(X) = \left[\varphi_1^{(V)}(X)\ \ \varphi_2^{(V)}(X)\ \ \varphi_3^{(V)}(X)\ \ \varphi_4^{(V)}(X)\right]^T, \tag{2.19}$$

Burada

$$\varphi_1^{(V)}(X) = 1 - 3(X/L_e)^2 + 2(\frac{X}{L_e)^3}$$

$$\varphi_2^{(V)}(X) = L_e(-(X/L_e) + 2(X/L_e)^2 - (X/L_e)^3)$$

$$\varphi_3^{(V)}(X) = 3(X/L_e)^2 - 2(X/L_e)^3$$

$$\varphi_4^{(V)}(X) = L_e((X/L_e)^2 - (X/L_e)^3) \tag{2.20}$$

Burada L_e sonlu elemanın uzunluğudur. (2.15) ve (2.16) eşitliklerini (2.7) ve (2.9) eşitliklerine yerleştirildiğinde, enerji fonksiyonları yeni hali izleyen şekilde yazılabilir;

$$U_i = \frac{1}{2}\int_0^L \left[EA\left(\frac{\partial\varphi^{(U)}}{\partial X}\{q\}_U\right)^2 + EI\left(\frac{\partial^2\varphi^{(\emptyset)}}{\partial X^2}\{q\}_V\right)^2\right] \tag{2.21}$$

$$\mathrm{T} = \frac{1}{2}\int_0^{\mathrm{L}} \left[\rho \mathrm{A} \left(\frac{\partial(\varphi^{(\mathrm{U})}\{\mathrm{q}\}_{\mathrm{U}})}{\partial \mathrm{t}} \right)^2 + \rho \mathrm{A} \left(\frac{\partial(\varphi^{(\mathrm{V})}\{\mathrm{q}\}_{\mathrm{V}})}{\partial \mathrm{t}} \right)^2 \right] \mathrm{dX} \tag{2.22}$$

$$R = \frac{1}{2}\int_0^L [\, \eta E \; I(\frac{\partial^2}{\partial X^2}([\frac{\partial \varphi}{\partial t}]\{q\}))^2] dX \tag{2.23}$$

(2.21), (2.22) ve (2.23) eşitliklerini (2.14) eşitliğindeki yerlerine yerleştirildikten sonra Lagrange denklemleri izleyen eşitliği verir:

$$\frac{\partial \mathrm{I}}{\partial \mathrm{q}_{\mathrm{k}}^{(\mathrm{e})}} - \frac{\partial}{\partial \mathrm{t}} \frac{\partial \mathrm{I}}{\partial \dot{\mathrm{q}}_{\mathrm{k}}^{(\mathrm{e})}} + \mathrm{Q}_{\mathrm{D_k}} = 0, \;\; k\text{=1,2,3,4,5,6} \tag{2.24}$$

Burada

$$\mathrm{Q}_{\mathrm{D_k}} = -\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \dot{\mathrm{q}}_{\mathrm{k}}^{(\mathrm{e})}} \tag{2.25}$$

Burada $\mathrm{Q}_{\mathrm{D_k}}$ genelleştirilmiş sönüm yükü olmuş olup, sönüm fonksiyonunun (R) $\dot{\mathrm{q}}_{\mathrm{k}}^{(\mathrm{e})}$ 'e göre kısmi türevinden elde edilir. Burada $\dot{\mathrm{q}}_{\mathrm{k}}^{(\mathrm{e})}$ düğüm yer değiştirmelerin zamana göre türevini yani hızını gösterir. $\ddot{q}_{\mathrm{k}}^{(\mathrm{e})}$ ise düğüm yer değiştirmelerin ivmelerini gösterir. (26) denkleminin son hali sonlu elemanlar için problemin hareket denklemlerini vermiş olur. Elde edilen sonlu elemanlar hareket denklemi izleyen şekilde verilmiştir:

$$[\mathrm{K}']\{\mathrm{q}'(\mathrm{t})\} + [\mathrm{D}']\{\dot{\mathrm{q}}'(\mathrm{t})\} + [\mathrm{M}']\{\ddot{\mathrm{q}}'(\mathrm{t})\} = \{\mathrm{F}'(\mathrm{t})\} \tag{2.26}$$

Burada $[\mathrm{K}']$ rijitlik matrisi, $[\mathrm{D}']$ sönüm matrisi, $[\mathrm{M}']$ kütle matrisi ve $\{\mathrm{F}'(\mathrm{t})\}$ yük vektörüdür. Sonlu elemanlar formülasyonlarının açılımı izleyen şekilde verilmiştir.

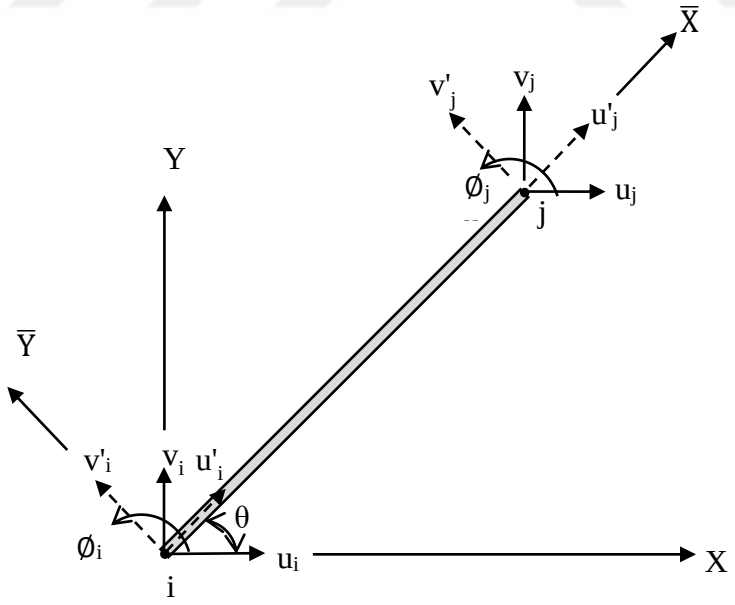
$$[K']^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

$$[M']^e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

$$[D']^e = \eta \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\{F'(t)\} = \int_0^{Le} \{\varphi(X)\}^T \; F(X,t)dX \quad (2.30)$$

Çerçeve taşıyıcı sistemleri oluşturan çubukların doğrultuları farklı olduğundan, her bir çubuk için kendi yerel eksen takımına göre (2.27-2.30) eşitliklerinde elde edilen sonlu elemanlar formülasyonları global eksen takımına göre dönüştürülerek sonlu elemanlar birleştirme işlemleri yapılır. Çerçeve taşıyıcı sistemi oluşturan çubukların konumlarını belirtmek için Şekil 2.4'de gösterilen, X ekseni ile θ açısı yapan herhangi bir çubuk elemanının $\overline{X}$ ve $\overline{Y}$ yerel ile X ve Y global eksen takımlarına göre yer değiştirme, hız, ivme ile düğüm kuvvetleri arasındaki bağıntılar elde edilmiştir.



Şekil 2.4 : Döndürülmüş çubuk eleman

Yerel koordinat takımına göre yer değiştirme, hız ve ivme vektörleri izleyen eşitlikte verilmiştir.

$$\{q'\} = \begin{Bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ \emptyset_i \\ u_j' \\ v_j' \\ \emptyset_j \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{q}'\} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_i' \\ \dot{v}_i' \\ \dot{\emptyset}_i \\ \dot{u}_j' \\ \dot{v}_j' \\ \dot{\emptyset}_j \end{Bmatrix}, \quad \{\ddot{q}'\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i' \\ \ddot{v}_i' \\ \ddot{\emptyset}_i \\ \ddot{u}_j' \\ \ddot{v}_j' \\ \ddot{\emptyset}_j \end{Bmatrix}, \tag{2.31}$$

Global koordinat takımına göre yer değiştirme, hız ve ivme vektörleri izleyen eşitlikte verilmiştir.

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \emptyset_i \\ u_j \\ v_j \\ \emptyset_j \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{q}\} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{\emptyset}_i \\ \dot{u}_j \\ \dot{v}_j \\ \dot{\emptyset}_j \end{Bmatrix}, \quad \{\ddot{q}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{v}_i \\ \ddot{\emptyset}_i \\ \ddot{u}_j \\ \ddot{v}_j \\ \ddot{\emptyset}_j \end{Bmatrix} \tag{2.32}$$

Global yer değiştirmeler ile yerel yer değiştirmeler arasındaki bağıntı izleyen şekilde verilmiştir.

$$\{q'\} = [T]\{q\} \tag{2.33}$$

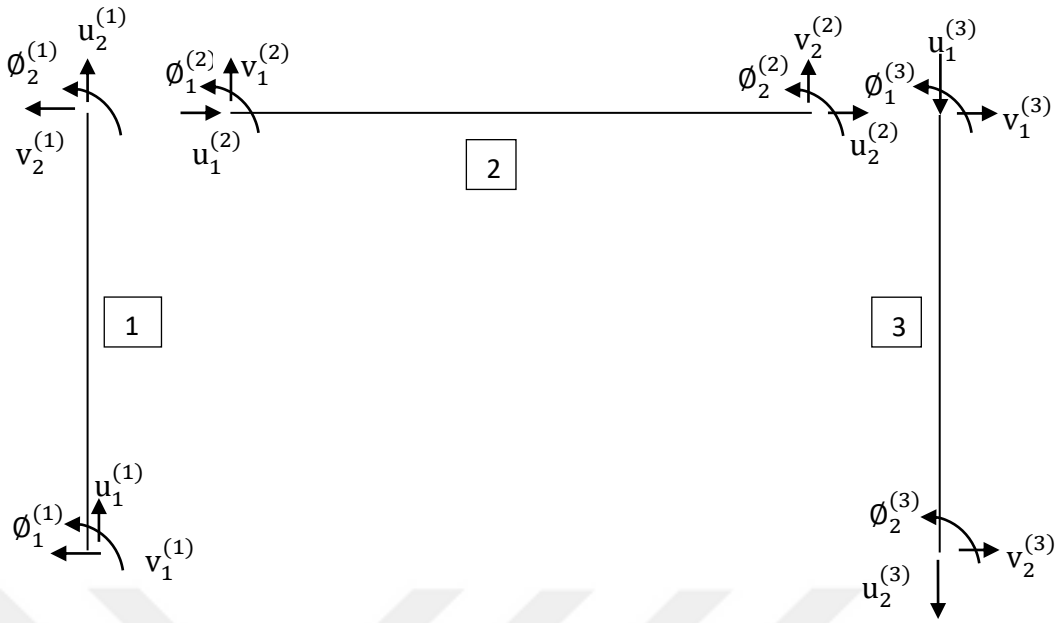
Benzer şekilde global hız ve ivmeler ile yerel hız ve ivmeler arasındaki bağıntı izleyen şekilde verilmiştir.

$$\{\dot{q}'\} = [T]\{\dot{q}\}, \qquad \{\ddot{q}'\} = [T]\{\ddot{q}\} \tag{2.34}$$

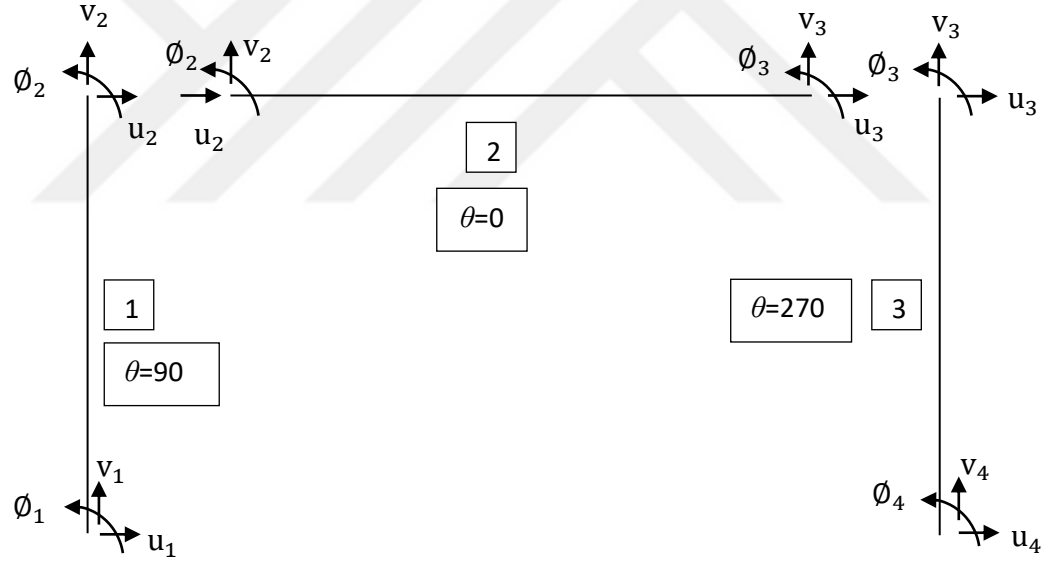
burada, $[T]$ transformasyon matrisi olup, izleyen şekilde detaylı açılımı verilmiştir.

$$[T] = \begin{bmatrix} cos\,\theta & sin\,\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ sin\,\theta & -cos\,\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & cos\,\theta & sin\,\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & sin\,\theta & -cos\,\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

Tek açıklıklı bir çerçevenin yerel ile global eksen takımlarına göre durumunu görebilmek amacıyla, şekil 2.5 ve şekil 2.6 yerel ile global eksen takımlarındaki serbestlikler, elemanların numaraları ile döndürme açıları sunulmuştur.



Şekil 2.5 : Yerel eksen takımında serbestlikler



Şekil 2.6 : Global eksen takımında serbestlikler

Global yük vektörü ile yerel yük vektörü arasındaki bağıntı izleyen şekilde verilmiştir.

$$\{\mathrm{F}\} = [T]\{\bar{F}\} \tag{2.36}$$

(2.31-2.36) eşitlikleri (2.26) eşitliğinde verilen sonlu elemanlar denklemine yerine yazılması durumunda, izleyen şekilde global sonlu elemanlar formülasyonları elde edilir.

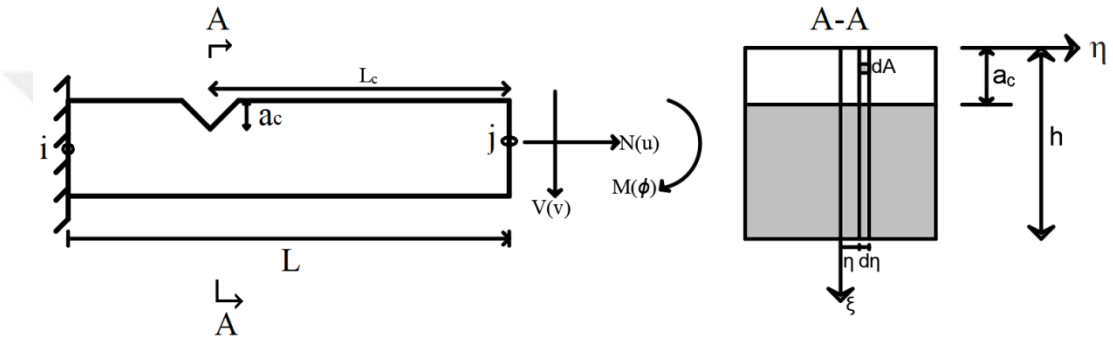
$$[\mathrm{K}] = [T]^{\mathrm{T}}[\mathrm{K}'][T] \tag{2.37}$$

$$[\mathrm{M}] = [T]^{\mathrm{T}}[\mathrm{M}'][T] \tag{2.38}$$

$$[\mathrm{D}] = [T]^{\mathrm{T}}[\mathrm{D}'][T] \tag{2.39}$$

2.2 Çatlak Modeli

Şekil 2.7'de N eksenel kuvvet, V kesme kuvveti ve M eğilme momentine maruz uzunluğu *L*, alanı *A*, çatlak içeren, dikdörtgen kesitli bir çubuk elemanı gösterilmiştir. Burada L_c çatlağın sağ uçdan itibaren mesafesidir (Zheng ve Kessissoglou, 2004).



Şekil 2.7 : Çatlaklı bir çubuk eleman ve kesiti

Çatlaktan dolayı elemanda oluşan ek şekil değiştirme enerjisi yada kırılma enerjisi (U_k) izleyen şekilde verilmiştir.

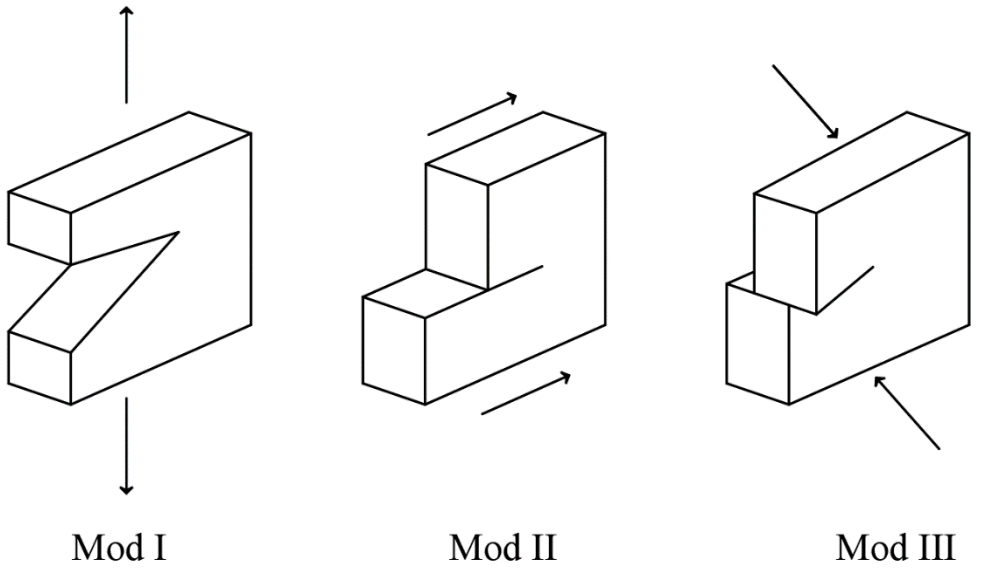
$$U_k = \int_{A_c} G dA \tag{2.40}$$

Burada *G* enerji salıverme oranıdır ve A_c ise çatlak alanıdır. *G* enerji salıverme oranı, açılma modu (mod 1) ile düzlem içi kayma modu (Mod 2) cinsinden ifadesi izleyen şekilde verilmiştir.

$$G = \frac{1}{E'}[(K_{IN} + K_{IV} + K_{IM})^2 + K_{IIV}^2] \tag{2.41}$$

Burada, düzlem gerilme problemi için *E*'=*E*, düzlem şekil değiştirme için ise $E' = E/\left(1-\mu^2\right)$'dir. Burada *K* değerleri gerilme yığılma faktörü olup mod 1 ve mod 2 cinsinden ifade edilmiştir. K_{IN}, K_{IV} ve K_{IM} sırasıyla normal kuvvet (*N*), kesme kuvveti (*V*) ile eğilme momenti (*M*) tesirlerinden kaynaklanan mod 1 gerilme yığılma faktörleridir. K_{IIV} ise kayma etkisinden dolayı kesme kuvveti (*V*) kaynaklanan mod 2 gerilme yığılma faktörüdür. Ele alınan problemde, burulma etkisi göz önüne alınmadığında düzlem dışı kayma modu (mod 3) eklenmemiştir. Açılma modu (mod

1), düzlem içi kayma modu (Mod 2) ile düzlem dışı kayma modu (mod 3) şekil 2.8 da gösterilmiştir. Çatlak içeren dikdörtgen kesitli bir eleman için gerilme yığılma faktörlerinin formülasyonları izleyen bağıntılarda verilmiştir (Zheng ve Kessissoglou, 2004).



Şekil 2.8: Kırılma modları.

$$K_{IN} = \frac{N}{bh}\sqrt{\pi\zeta}F_1\left(\frac{\xi}{h}\right) \tag{2.42}$$

$$K_{IV} = \frac{6VL_C}{bh^2}\sqrt{\pi\zeta}F_2\left(\frac{\xi}{h}\right) \tag{2.43}$$

$$K_{IM} = \frac{6ML_C}{bh^2}\sqrt{\pi\zeta}F_2\left(\frac{\xi}{h}\right) \tag{2.44}$$

$$K_{IIV} = \frac{V}{bh}\sqrt{\pi\zeta}F_{II}\left(\frac{\xi}{h}\right) \tag{2.45}$$

Burada,

$$F_1(s) = \sqrt{\frac{tg(\frac{\pi s}{2})}{\pi s}}\frac{0.752+2.02s+0.37\left(1-sin\left(\frac{\pi s}{2}\right)\right)^3}{cos\left(\frac{\pi s}{2}\right)} \quad \left(s = \frac{\xi}{h}\right) \tag{2.46}$$

$$F_2(s) = \sqrt{\frac{tg(\frac{\pi s}{2})}{\pi s}}\frac{0.923+0.199\left(1-sin\left(\frac{\pi s}{2}\right)\right)^4}{cos\left(\frac{\pi s}{2}\right)} \left(s = \frac{\xi}{h}\right) \tag{2.47}$$

$$F_{II}(s) = \frac{1.122-0.561s+0.085s^2+0.180s^3}{\sqrt{1-s}} \left(s = \frac{\xi}{h}\right) \tag{2.48}$$

Burada ξ çatlak derinliğidir. Paris denkleminin kullanılmasıyla çatlaktan dolayı oluşan ilave yer değiştirme izleyen şekilde bulunur.

$$\delta_i = \frac{\partial U_k}{\partial P_i} \ (i = N, V, M) \tag{2.49}$$

Çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayıları izleyen eşitlikte bulunur.

$$c_{ij} = \frac{\partial \delta_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2 U_k}{\partial P_i P_j} \ (i, j = N, V, M) \tag{2.50}$$

(2.42-2.45) eşitliklerini, eşitlik (2.40) ile (2.41)'de yerlerine yazıldığında, çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayıları izleyen şekilde elde edilir.

$$c_{ij} = \frac{b}{E'} \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \int_0^a \left[\frac{N}{bh} \sqrt{\pi\zeta} F_1\left(\frac{\xi}{h}\right) + \frac{6VL_C}{bh^2} \sqrt{\pi\zeta} F_2\left(\frac{\xi}{h}\right) + \frac{6ML_C}{bh^2} \sqrt{\pi\zeta} F_2\left(\frac{\xi}{h}\right) \right]^2$$
$$+ \frac{V^2}{b^2 h^2} \pi\zeta F_{II}^2\left(\frac{\xi}{h}\right) \Big\} d\zeta \qquad (i, j = N, V, M) \tag{2.51}$$

(2.51) eşitliğin açılımı sonucu, izleyen şekilde esneklik katsayıları elde edilir (Zheng ve Kessissoglou, 2004).

$$F(1,1) = c_{11} E' b = 2\pi \int_0^{\frac{a}{h}} x F_1^2 \ (x) dx \tag{2.52}$$

$$F(1,2) = \frac{c_{12} E' bh}{L_c} = 12\pi \int_0^{\frac{a}{h}} x F_1 \ (x) F_2(x) dx \tag{2.53}$$

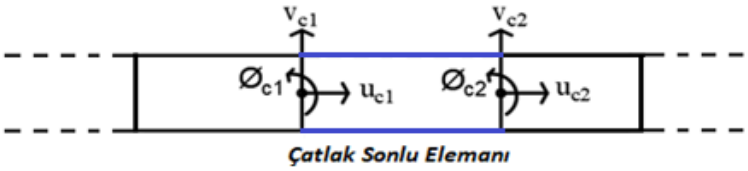
$$F(1,3) = c_{13} E' bh = F(1,2) \tag{2.54}$$

$$F(2,2) = c_{22} E' b = 2\pi \left[\frac{36 L_C^2}{h^2} \int_0^{\frac{a}{h}} x F_2^2 \ (x) dx + \int_0^{\frac{a}{h}} x F_{II}^2 \ (x) dx \right] \tag{2.55}$$

$$F(2,3) = \frac{c_{23} E' bh}{L_c} = 72\pi \int_0^{\frac{a}{h}} x F_2^2 \ (x) dx \tag{2.56}$$

$$F(3,3) = c_{33} E' bh^2 = F(2,3) \tag{2.57}$$

Burada $\left(x = \frac{\xi}{h}\right)$ olarak tanımlanmıştır. Çatlak kesitinin çubuk sonlu elemanlar modelinde, çatlak kesitinin olduğu yere uygun kütlesiz ve uzunluğu olmayan bir sonlu eleman şekil 2.9'da gösterildiği gibi ilave edilir.



Şekil 2.9 : Çatlak sonlu eleman modeli.

Çatlak elemanın her bir düğüm noktasının esneklik matrisi, (2.52)-(2.57) eşitliklerinden elde edilen değerler ile birlikte izleyen matris formunda elde edilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \tag{2.58}$$

İki düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip çatlak sonlu elemana ait rijitlik matrisinin bulunmasında, esneklik matrisinin tersi alınarak izleyen şekilde elde edilir.

$$[K_{cr}] = \begin{bmatrix} [C^{-1}] & [-C^{-1}] \\ [-C^{-1}] & [C^{-1}] \end{bmatrix}_{6\times6} \tag{2.59}$$

$$[M_{cr}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6\times6} \tag{2.60}$$

$$[D_{cr}] = \eta[K_{cr}] \tag{2.61}$$

Kütlesiz çatlak sonlu elemana ait rijitlik, kütle matrislerinin ve sönüm matrislerinin çatlaksız duruma ait matrislere eklenmesi ile birlikte, çatlaklı durum için sonlu elemanlar matrisleri elde edilir. Çatlak sonlu elemanın eklenmesi ile birlikte istenilen sayıdaki sonlu eleman sayısına bağlı olarak, sonlu elemanların birleştirme işlemleri yapılır.

$$[\mathrm{K}] = [\mathrm{K}'] + [K_{cr}{}'] \tag{2.62a}$$

$$[\mathrm{M}] = [\mathrm{M}'] + [M_{cr}{}'] \tag{2.62b}$$

$$[\mathrm{D}] = [\mathrm{D}'] + [D_{cr}{}'] \tag{2.62c}$$

$$[\mathrm{K}]\{\mathrm{q(t)}\} + [\mathrm{D}]\{\dot{\mathrm{q}}\mathrm{(t)}\} + [\mathrm{M}]\{\ddot{\mathrm{q}}\mathrm{(t)}\} = \{\mathrm{F(t)}\} \tag{2.62d}$$

Eşitlik 2.62'de verilen formülasyonlar, çatlak sonlu eleman modelinin eklenmesi ile elde edilen sonlu elemanlar formülasyonlarıdır.

2.3 Çatlaklı Çerçeve Sistemlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Çözümü

2.3.1 Serbest titreşim çözümü

Elde edilen sistem sonlu elemanlar matrislerine, sonlu elemanlar çözüm prosedürlerinin uygulanması ile söz konusu problemler çözülmüş olur. Çatlaklı çerçevenin serbest titreşim çözümlerinin bulunmasında, özdeğer-özvektör işlemleri uygulanarak, sisteme ait frekans ve periyotlar hesaplanmış olur. Eşitlik (2.62d) de

verilen çatlaklı duruma ait sonlu elemanlar formülasyonlarına, serbest titreşim problemi uygulandığında, [D] matrisi ile {F} vektörü sıfır olup izleyen eşitlikteki serbest titreşim denklemi elde edilir.

$$([K] - w^2[M])\{\Phi\}=\{0\} \tag{2.63}$$

Burada w sistemin doğal frekansını '*rad/sn'* cinsinden ve {Φ} sistemin titreşim mod vektörünü göstermektedir. Sistemin frekansı *f* ise w değerini (2π) değerine bölünmesi ile elde edilir ve birimi Hertz'dir (Hz). Periyot ise T=1/*f* dir. Eşitlik (2.63) denkleminin trivial olmayan çözümü izleyen titreşim denklemini verir.

$$([K]-w^2[M]) =0 \tag{2.64}$$

(2.64) denkleminden de görüleceği üzere, w^2, $[M]^{-1}$ve [K] matrislerinin çarpımıyla elde edilen matrisin özdeğerlerini göstermektedir. Elde edilen en küçük özdeğer değeri sistemin birinci doğal frekansını vermektedir.

2.3.2 Zorlanmış titreşim çözümü

Şekil 2.1'de yüklemesi ve geometrisi gösterilen çatlaklı çerçevenin, yatay harmonik bir etki altındaki sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim cevapları elde edilmiştir. (2.62d) eşitliğinde verilen çatlaklı çerçevenin sönümlü zorlanmış dinamik denkleminin çözümünde, zaman tanım alanında çözüm yapılmıştır. Zaman tanım alanındaki çözümde, doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerde problemde istenilen zaman belirli bir Δt zaman dilimlerine bölünerek, her bir zaman aralığında bulunan değerleri bir sonraki zaman değerlerine birleştirerek dinamik sonuçlar elde edilir. Merkezi farklar yöntemi, (2.62d) eşitliğinde verilen hareket denkleminin ivme, hız ve yer değiştirme değerlerini merkezi sonlu farklar yöntemini uygulatarak yaklaşık olarak çözer. Herhangi bi *t* anında, (2.62d) eşitliği izleyen şekilde ifade edilebilir.

$$[K]\ {}^{t}\{q\} + [D]\ {}^{t}\{\dot{q}\} + [M]\ {}^{t}\{\ddot{q}\} = {}^{t}\{F\} \tag{2.65}$$

Herhangi bi *t* anı için probleme ait ivme ve hız değerlerinin merkezi farklar cinsinden yaklaşık değeri izleyen şekilde gösterilmiştir.

$${}^{t}\{\ddot{q}\} = \frac{1}{\Delta t^2}\left({}^{t-\Delta t}\{q\} - 2\ {}^{t}\{q\} + {}^{t+\Delta t}\{q\}\right) \tag{2.66}$$

$${}^{t}\{\dot{q}\} = \frac{1}{2\,\Delta t}\left(-{}^{t-\Delta t}\{q\} + {}^{t+\Delta t}\{q\}\right) \tag{2.67}$$

Burada ${}^{t}\{q\}$, ${}^{t-\Delta t}\{q\}$ ve ${}^{t+\Delta t}\{q\}$ sırasıyla *t* , *t*- Δt ve *t*+ Δt anları için yer değiştirme vektörünü, ${}^{t}\{\dot{q}\}$ ile ${}^{t}\{\ddot{q}\}$ ise sırasıyla *t* anı için hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. (2.66) ve (2.67) eşitliklerinde verilen *t* anındaki ivme ve hız değerleri (2.65) eşitliğindeki hareket denklemindeki yerlerine yazılırsa, hareket denklemi yer değiştirme cinsinden izleyen şekilde elde edilir.

$$[M]\frac{({}^{t+\Delta t}\{q\}-2\ {}^{t}\{q\}+{}^{t-\Delta t}\{q\})}{\Delta t^2}+[C]\frac{({}^{t+\Delta t}\{q\}-{}^{t-\Delta t}\{q\})}{2\ \Delta t}+[K]\ {}^{t}\{q\}=\ {}^{t}\{F\} \qquad (2.68)$$

(2.68) denklemin çözümünde bilinmeyen değer olan ${}^{t+\Delta t}\{q\}$ elde edilip, bir sonraki zaman aralığı için kullanılacak başlangıç değeri olarak işleme devam edilir. (2.68) denkleminin başlangıç *t*=0 çözümünde özel olarak ${}^{t-\Delta t}\{q\}$ yani ${}^{-\Delta t}\{q\}$ değerini bulmak için özel bir başlangıç işlemi gereklidir. Bunun için, *t*=0 anında probleme ait yer değiştirme ${}^{0}\{q\}$ ve hız değeri ${}^{0}\{\dot{q}\}$ bilindiğinde, (2.65) denkleminden ${}^{0}\{\ddot{q}\}$ değeri hesaplanır. Elde edilen ${}^{0}\{q\}$, ${}^{0}\{\dot{q}\}$ ve ${}^{0}\{\ddot{q}\}$ değerleri, (2.66) ile (2.67) eşitliklerinde yerlerine yazılırsa, ${}^{-\Delta t}\{q\}$ izleyen ifadede elde edilir.

$${}^{-\Delta t}\{q\}=\frac{\Delta t^2}{2}\ {}^{0}\{\ddot{q}\}-\Delta t\ {}^{0}\{\dot{q}\}+\ {}^{0}\{q\} \qquad (2.69)$$

Sönümsüz zorlanmış titreşim probleminin merkezi farklar yöntemi ile çözümünde, yukarıdaki işlemlerde sönüm matrisi sıfır alınarak işlemler yapılır. Merkezi farklar yönteminde elde edilecek sonuçların gerçekçi ve anlamlı olabilmesi için işlemlerde seçilecek zaman aralığının aşağıda belirtilen değerden küçük olması gereklidir.

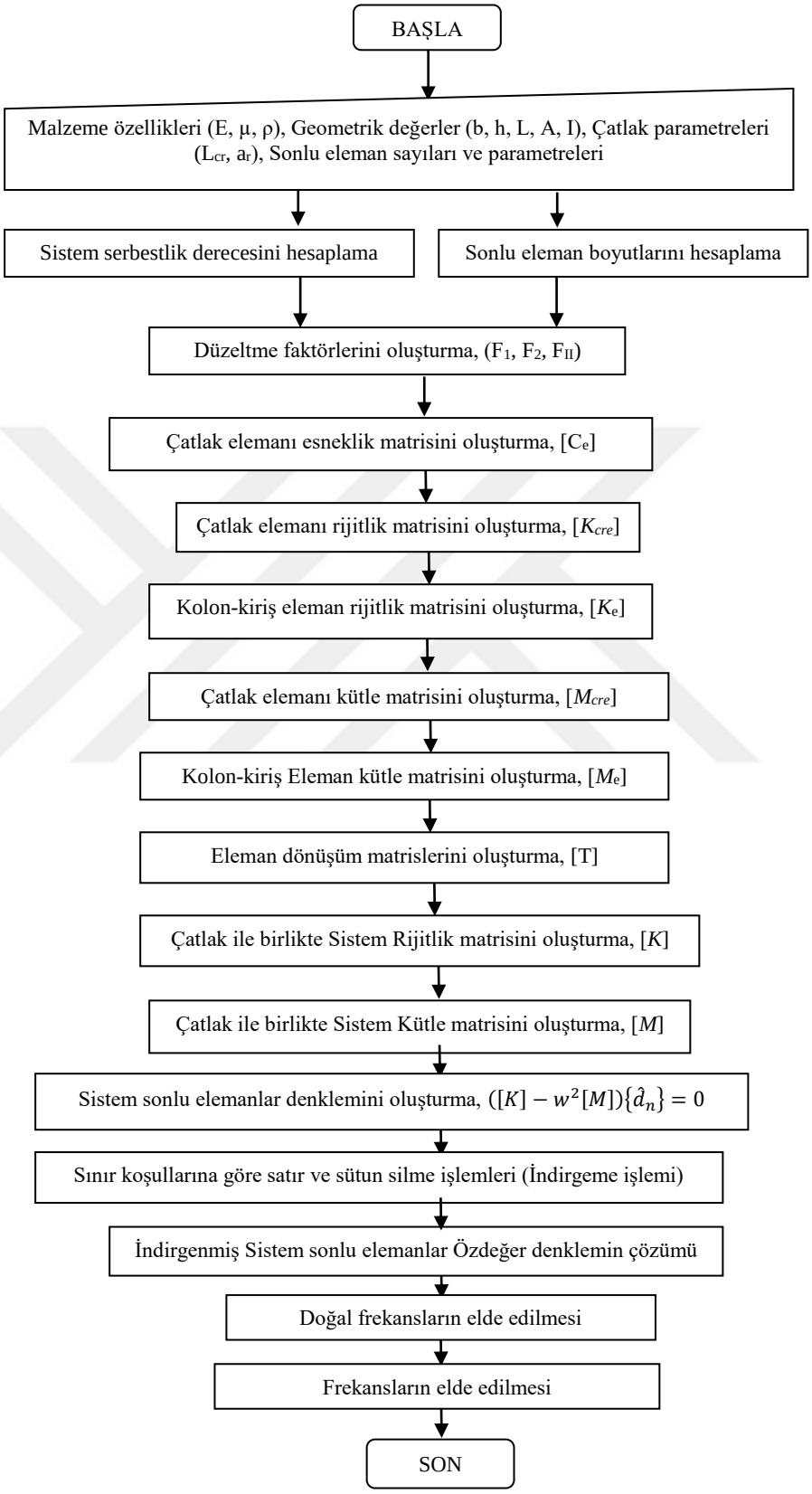
$$\Delta t \leq \frac{T_{min}}{\pi} \qquad (2.70)$$

Burada T_{min}, sistemin en küçük periyot değeridir.

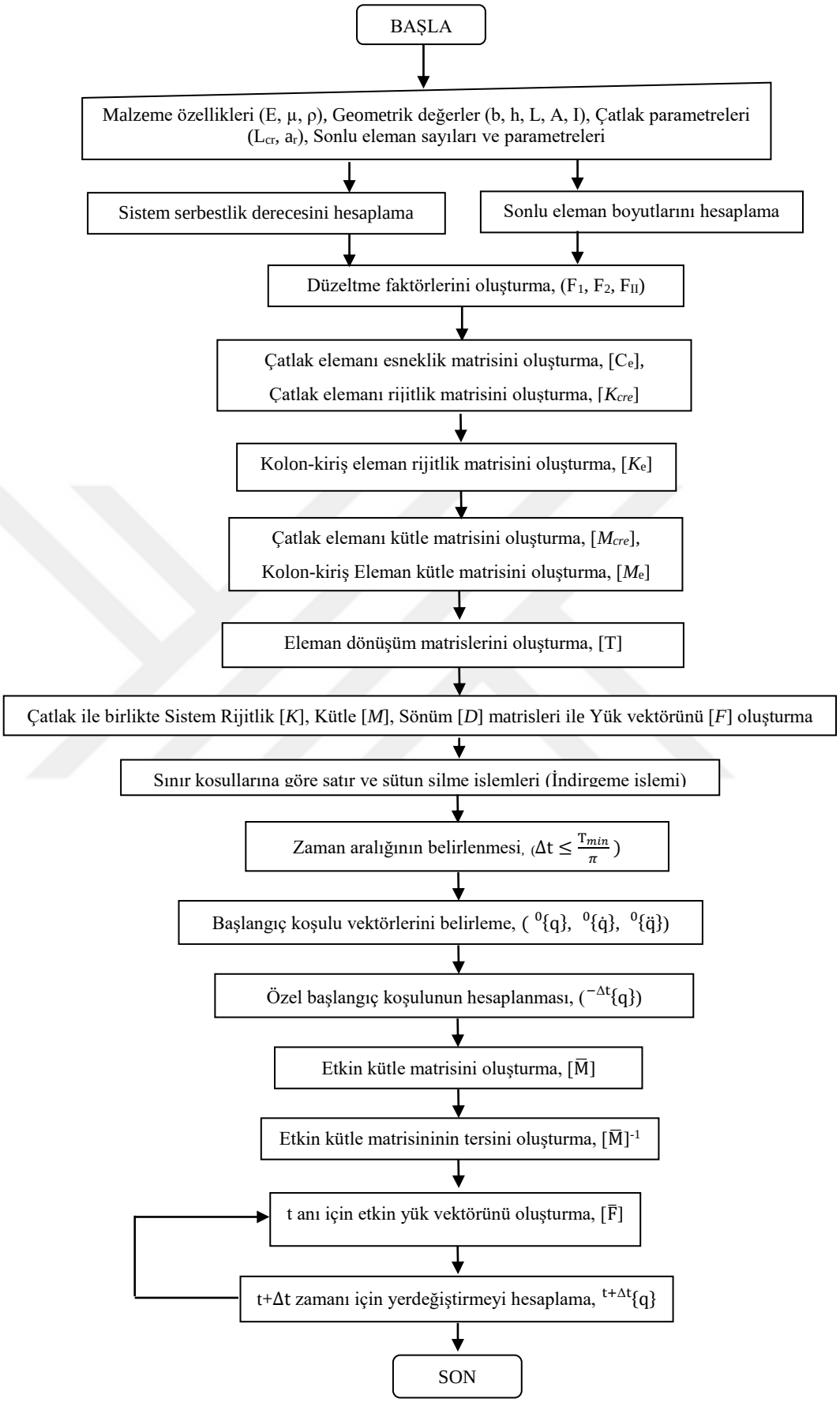
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumlarının ve çerçeve boyutlarının serbest titreşim, sönümsüz zorlanmış titreşim ve sönümlü zorlanmış titreşim cevaplarına olan etkileri sunulmuştur. Daha önce de şekil 2.1'de gösterildiği gibi, çatlağın çerçeve sistemin elemanlarında bulunması durumuna göre etkileri incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda çerçevenin malzeme parametreleri; E=210 GPa, μ=0.3, ρ=7800 kg/m^3 alınmıştır. Çerçevenin geometrik özelliklerinin belirlenmesinde çerçeve yüksekliği belirli durumlara göre H=3 m, 4.5 m ve 6 m seçilmiş olup çerçeve açıklığı ise farklı durumlara göre L=3 m, 4.5 m ve 6 m seçilmiştir. Kolon kesit boyutları, b=12 cm, h=12 cm ve kiriş kesit boyutları b=8 cm, h=8 cm olarak alınmıştır. Probleme ait serbest titreşim sonuçlarının bulunmasında (2.64) eşitliğindeki denklemin özdeğer çözümü sonucunda frekanslar elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim sonuçlarının bulunmasında ise (2.62d) eşitliğinde sunulan sonlu elemanlar denkleminin zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi ((2.65-2.70) eşitlikleri) kullanılmıştır. Özel olarak sönümsüz zorlanmış titreşim cevaplarının elde edilmesinde formülasyonlardaki viskoz sönüm katsayısı η=0 alınarak sonuçlara ulaşılmıştır. Her bir kiriş ve kolon elemanları 4 sonlu elemana bölünerek, çatlak sonlu elemanı ile birlikte sayısal işlemler gerçekleştirilmiştir. Her bir titreşim problemin çözümü şekil 3.1 ile şekil 3.2'de verilen algoritmalara göre elde edilmiştir. Elde edilen sonlu elemanlar formülasyonlarının çözümü, MATLAB programında kodları yazılıp sayısal sonuçlar ve grafikler elde edilmiştir. Çatlağın yapıya olan etkisinde açılma (Mod1) ve düzlem içi kayma (Mod2) modları göz önüne alınmıştır. Malzeme, geometrik ve çatlak parametrelerine bağlı olarak (2.59) eşitliğine göre elde edilen çatlak rijitliğine bağlı olarak çatlak sonlu eleman modeli, global sonlu eleman formülasyonuna eklenmiştir. Sayısal çalışmalarda, çatlak konumunu belirlemek amacıyla, L_{cr} çatlak konum oranı ifadesi kullanılmıştır. Bu ifade çatlağın referans konumundan uzaklığının bulunduğu elemana bölümüne denir. Örneğin, L_{cr1} 1. kolondaki çatlağın sol ankastre mesnetten uzaklığının 1. kolon yüksekliğine bölümüne denir. Benzer şekilde L_{cr2} ve L_{cr3} sırasıyla kiriş ve 2. kolon elemanlardaki

çatlağın konum oranlarıdır. MATLAB programında yazılan serbest ve zorlanmış titreşim programlarına ait algoritmalar şekil 3.1 ve şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.1 : Çatlaklı çerçevenin serbest titreşim çözümüne ait algoritma



Şekil 3.2 : Çatlaklı çerçevenin zorlanmış titreşim çözümüne ait algoritma

Çalışmada elde dilen formülasyonlar ve Matlab programında yazılan kodların doğruluğunu test etmek amacıyla birkaç kıyaslama çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, Ibrahim ve diğ. (2003) tarafından yapılmış olan tek açıklıklı çatlaklı bir çerçevenin serbest titreşim analizi çalışmasından elde edilen özel sonuçlar, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile çizelge 3.1'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma çalışmasında, Ibrahim ve diğ. (2003) tarafından kullanılan malzeme ve geometrik parametreler; a_r=0.5, E=200 GPa, ρ=7900 kg/m^3, kolon ve kiriş en kesitleri b=20 mm, h=5 mm, kiriş uzunluğu L=100 mm ve kolon yüksekliği H=200 mm'dir. Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere, Ibrahim ve diğ. (2003) sunulan frekans değerleri ile bu çalışmada elde edilen sonuçların yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.1 : Karşılaştırma çalışması: tek açıklıklı çatlaklı bir çerçevenin farklı çatlak konumlarına göre frekans değerleri.

Frekans	Ibrahim vd. (2013)	Sunulan
Çatlaksız	117.2300	117.2582
L_{cr}=0	112.3300	110.8418
L_{cr}=1	115.3000	114.4427

Bir başka karşılaştırma çalışmasında, çatlaksız tek açıklıklı bir çerçevenin farklı L/H oranlarına göre ilk üç modlardaki frekans değerleri SAP2000 paket programı kullanılarak elde edilmiş ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile çizelge 3.2'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma çalışmasında, 3. bölümün başında belirtilen malzeme ve geometrik parametrelere göre elde edilmiştir. Çizelge 3.2'de, bu çalışmadan elde edilen frekans değerleri ile SAP2000 programı ile elde edilen sonuçların çok yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.2: Karşılaştırma çalışması: tek açıklıklı bir çerçevenin farklı L/H oranlarına göre ilk üç moddaki frekans değerleri.

	SAP2000			Sunulan		
L/H	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
0.5	12.5013	50.5550	67.1360	12.6358	50.6464	70.0441
1	10.0746	37.2853	58.1465	10.1881	37.3820	58.3104
2	7.6146	10.8016	28.5993	7.6802	10.8506	29.7349

3.1 Serbest Titreşim Sonuçları

Çizelge 3.3'de kolon elemanında tek çatlak, Çizelge 3.4'de kiriş elemanında tek çatlak, Çizelge 3.5'de her iki kolon elemanında birer çatlak ve Çizelge 3.6'de her üç elemanda birer çatlak olması durumlarına göre farklı kolon–kiriş boyutları, farklı çatlak konum oranları (L_{cr}), farklı çatlak sayısı ve farklı çatlak derinlik oranlarına (a_r) bağlı olarak ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları verilmiştir.

Çatlağın kolon-kiriş birleşim bölgesindeki kolon üzerinde olması durumu L_{cr1}=1 (Çizelge 3.3) ile kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş üzerinde olması durumunda L_{cr2}=1 (Çizelge 3.4) ortaya çıkan sonuçlar birbirinden farklıdır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kirişte oluşan çatlağın, kolonda oluşan çatlağa göre yapıya daha az esneklik kattığı görülmüştür. Çizelge 3.4'de görülmektedir ki, çatlağın kiriş ortasında olması durumunda çerçevenin 1. titreşim modundaki frekans değerleri çatlak derinliğinin artması ile birlikte herhangi bir değişim göstermemektedir. Bunun nedeni olarak, kirişin orta noktasının çerçevenin 1. titreşim modunun düğüm noktası olduğudur. Bununla birlikte her üç elemanda çatlağın bulunması durumunda, kiriş elemanında çatlağın kirişin orta bölgesinde olması her iki kolonda elde edilen serbest titreşim frekanslarını (Çizelge 3.6) değiştirmemektedir yani çatlağın kiriş orta bölgesinde olması serbest titreşim frekanslarına etki etmemektedir. Bununla beraber kiriş uzunluğu arttığında sistemin serbest titreşim frekanslarının azaldığı ve çatlak derinlik oranının (a_r) artmasıyla yapının serbest titreşim frekansları üzerine etkisinin azaldığı belirlenmiştir. (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.3-3.5'de görülmektedir ki çerçevenin yüksekliği ve çatlak derinlik oranı (a_r) arttıkça, yapının rijitliğinde azaltıcı bir etki yaptığından dolayı yapının titreşim frekanslarının önemli derecede azalmaktadır. Çatlağın ankastre mesnetlerde bulunması durumunda (Çizelge 3.3, Çizelge 3.5-3.6), çerçeveye olan etkisinin en üst düzeyde olduğu ve çatlak derinliğinin yapının titreşim frekansına olan etkilerininde en fazla olduğu belirlenmiştir. Çatlak konumu ankastre mesnetten kolonun orta bölgesine doğru gidildikçe, çatlak etkisinin ciddi bir oranda azaldığı, orta bölgeden kolon kiriş birleşim bölgesinde doğru gidildikçe ise çatlağın etkisinin arttığı ve kiriş elemanında olması durumunda ise etkisinin olmadığı görülmüştür.

Ayrıca çizelge 3.3 ve çizelgeler 3.5-3.6'da, çerçeve yüksekliğinin artmasıyla çatlağın titreşime olan etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Düşük çerçeve yükseklik

değerlerinde, çatlak derinliğinin artması, frekans değerlerinde daha fazla değişiklik yaparken, büyük kolon yükseklik değerlerinde ise çatlak derinliğinin artışı frekanslarda daha az değişiklik yaratmaktadır.

Her iki kolonun ankastre mesnetlerinde çatlakların bulunması durumunda çatlakların çerçeve sistemin serbest titreşim frekansları üzerine etkisi en fazladır (Çizelge 3.5). Çatlakların kolonun ankastre mesnetinde ve kolon kiriş birleşim bölgelerinde birlikte olması durumu her iki kolonda da kolon kiriş birleşim bölgesinde olması durumuna göre yapının rijitliğine daha fazla azaltıcı etkide bulunur (Çizelge 3.5). Her iki kolonun kolon ortası bölgelerinde çatlakların olması çatlakların çerçeve sistemin esnekliğine etkisi sınırlıdır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.6'da elde edilen sonuçlar çizelgeler 3.3-3.5'i destekler niteliktedir. Her üç elemanda birer çatlak olması durumunda çatlağın kolon elemanlarda ankastre mesnetlerde bulunması yapının rijitliğini fazlaca düşürmektedir (Çizelge 3.6). Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde olması kolon ortası bölgelerinde olmasına göre sistemin esnekliğini daha fazla arttırmaktadır. Kiriş ortasında olmasında ise herhangi bir etkisi söz konusu değildir.

Buradan görüldüğü üzere, çatlak konumunun, çatlak derinliğinin, çatlak sayısının ve yapı boyutlarının, kırılma davranışına çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Çatlağın kolonlarda bulunması durumu, kirişlerde bulunması durumunda çerçeveli yapıya daha fazla etkidiği görülmüştür. Çatlak sayısı arttıkça sistemin serbest titreşim frekansları azalmış, esnekliği artmıştır.

Çizelge 3.3 : Kolon elemanında tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

L_{cr}	H	a_r	f_1	f_2	f_3
L_{cr1}=0	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1559	37.3347	58.1455
		0.3	9.9252	36.9804	56.5339
		0.5	9.4203	36.1335	53.0854
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1694	21.6439	29.4150
		0.3	5.0856	21.2691	28.9712
		0.5	4.8864	20.3855	28.1975

Çizelge 3.3 (devam): Kolon elemanında tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1551	12.6504	17.4871
		0.3	3.1151	12.4753	17.2804
		0.5	3.0155	12.0464	16.8809
L_{cr1}=0.5	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1865	37.3693	58.2485
		0.3	10.1737	37.2714	57.6378
		0.5	10.1384	36.9956	55.4513
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1804	21.6774	29.4507
		0.3	5.1781	21.5457	29.2185
		0.5	5.1712	21.1694	28.6519
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1604	12.6657	17.5030
		0.3	3.1597	12.6029	17.3957
		0.5	3.1579	12.4232	17.1242
L_{cr1}=1	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1852	37.3639	58.2745
		0.3	10.1624	37.2268	58.0030
		0.5	10.1003	36.8599	57.2977
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1792	21.6943	29.4772
		0.3	5.1676	21.6942	29.4406
		0.5	5.1357	21.6941	29.3362
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1596	12.6735	17.5139
		0.3	3.1528	12.6719	17.4883
		0.5	3.1343	12.6674	17.4181

Çizelge 3.4: Kiriş elemanında tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

L_{cr}	L	a_r	f_1	f_2	f_3
L_{cr2}=0	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1780	37.3149	58.1925
		0.3	10.1037	36.8161	57.3703
		0.5	9.9251	35.6245	55.7467
	4.5	0	8.7052	18.6919	47.3182
		0.1	8.7002	18.6490	47.2870
		0.3	8.6620	18.3361	47.0483
		0.5	8.5633	17.6156	46.4393

Çizelge 3.4 (devam): Kiriş elemanında tek çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

	6	0	7.6802	10.8506	29.7349
		0.1	7.6775	10.8296	29.6920
		0.3	7.6564	10.6756	29.3797
		0.5	7.5956	10.3113	28.6696
L_{cr2}=0.5	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1881	37.3328	58.2730
		0.3	10.1881	36.9581	57.9878
		0.5	10.1881	35.9676	57.2729
	4.5	0	8.7052	18.6919	47.3182
		0.1	8.7052	18.6694	47.3182
		0.3	8.7052	18.4967	47.3180
		0.5	8.7052	18.0347	47.3176
	6	0	7.6802	10.8506	29.7349
		0.1	7.6802	10.8405	29.7349
		0.3	7.6802	10.7625	29.7348
		0.5	7.6802	10.5490	29.7347

Çizelge 3.5: Her iki kolon elemanında birer çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

L_{cr}	H	a_r	f_1	f_2	f_3
L_{cr1}=0 L_{cr3}=0	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1238	37.2874	58.0081
		0.3	9.6623	36.5831	56.0954
		0.5	8.6477	34.9527	53.0345
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1580	21.5942	29.3475
		0.3	4.9908	20.8894	28.4211
		0.5	4.5944	19.4275	26.5996
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1498	12.6272	17.4569
		0.3	3.0700	12.2929	17.0290
		0.5	2.8724	11.5538	16.1190
	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1848	37.3565	58.1914
		0.3	10.1592	37.1627	57.3075
		0.5	10.0882	36.6340	55.1985

Çizelge 3.5 (devam): Her iki kolon elemanında birer çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

L_{cr1}=0.5 L_{cr3}=0.5	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1801	21.6607	29.4195
		0.3	5.1753	21.4062	28.9479
		0.5	5.1617	20.7453	27.7403
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1603	12.6577	17.4887
		0.3	3.1590	12.5354	17.2713
		0.5	3.1554	12.2106	16.6970
L_{cr1}=1 L_{cr3}=1	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1822	37.3458	58.2388
		0.3	10.1370	37.0693	57.7135
		0.5	10.0168	36.3139	56.4548
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1777	21.6943	29.4725
		0.3	5.1546	21.6941	29.4010
		0.5	5.0923	21.6938	29.2113
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1587	12.6733	17.5105
		0.3	3.1453	12.6701	17.4600
		0.5	3.1087	12.6610	17.3255
L_{cr1}=0 L_{cr3}=0.5	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1543	37.3220	58.0950
		0.3	9.9100	36.8743	56.4491
		0.5	9.3622	35.8004	53.0802
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1691	21.6273	29.3836
		0.3	5.0827	21.1412	28.6909
		0.5	4.8751	20.0500	27.2093
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1550	12.6424	17.4728
		0.3	3.1143	12.4119	17.1523
		0.5	3.0124	11.8684	16.4230
	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1530	37.3167	58.1115
		0.3	9.8997	36.8318	56.3511
		0.5	9.3345	35.6795	52.6646

Çizelge 3.5 (devam): Her iki kolon elemanında birer çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

L_{cr1}=0 L_{cr3}=1	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1679	21.6439	29.4104
		0.3	5.0725	21.2688	28.9331
		0.5	4.8419	20.3829	28.0800
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1542	12.6502	17.4838
		0.3	3.1075	12.4741	17.2514
		0.5	2.9895	12.0447	16.7810

Çizelge 3.6: Her üç elemanda çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

L_{cr}	H	a_r	f_1	f_2	f_3
	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1238	37.2388	57.9703
		0.3	9.6623	36.2009	55.7371
		0.5	8.6477	33.9141	51.7514
L_{cr1}=0 L_{cr3}=0 L_{cr2}=0.5	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1580	21.5893	29.3475
		0.3	4.9908	20.8506	28.4211
		0.5	4.5944	19.3163	26.5996
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1498	12.6254	17.4569
		0.3	3.0700	12.2780	17.0290
		0.5	2.8724	11.5072	16.1190
	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1137	37.2216	57.8891
		0.3	9.5817	36.1030	55.0707
		0.5	8.4160	33.8579	49.8054
L_{cr1}=0 L_{cr3}=0 L_{cr2}=1	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
		0.1	5.1529	21.5942	29.3321
		0.3	4.9487	20.8892	28.2894
		0.5	4.4712	19.4274	26.1737
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1468	12.6267	17.4457
		0.3	3.0452	12.2881	16.9364
		0.5	2.7987	11.5375	15.8363

Çizelge 3.6 (devam): Her üç elemanda çatlak bulunması durumu için ilk üç moddaki serbest titreşim frekansları

	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1848	37.3075	58.1539
		0.3	10.1592	36.7516	56.9770
		0.5	10.0881	35.3540	54.0798
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
L_{cr1}=0.5		0.1	5.1801	21.6557	29.4195
L_{cr3}=0.5		0.3	5.1753	21.3652	28.9479
L_{cr2}=0.5		0.5	5.1617	20.6190	27.7402
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1603	12.6559	17.4887
		0.3	3.1590	12.5202	17.2713
		0.5	3.1553	12.1617	16.6969
	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1747	37.2898	58.0732
		0.3	10.0731	36.6249	56.3421
		0.5	9.8074	35.1326	52.3656
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
L_{cr1}=0.5		0.1	5.1749	21.6606	29.4040
L_{cr3}=0.5		0.3	5.1311	21.4058	28.8151
L_{cr2}=1		0.5	5.0184	20.7450	27.3047
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1573	12.6571	17.4775
		0.3	3.1333	12.5307	17.1777
		0.5	3.0719	12.1952	16.4079
	3	0	10.1881	37.3820	58.3104
		0.1	10.1822	37.2964	58.2018
		0.3	10.1370	36.6378	57.4167
		0.5	10.0168	34.8263	55.6702
	4.5	0	5.1808	21.6943	29.4819
L_{cr1}=1		0.1	5.1777	21.6893	29.4725
L_{cr3}=1		0.3	5.1546	21.6514	29.4010
L_{cr2}=0.5		0.5	5.0923	21.5476	29.2112
	6	0	3.1604	12.6737	17.5172
		0.1	3.1587	12.6715	17.5105
		0.3	3.1453	12.6550	17.4600
		0.5	3.1087	12.6123	17.3255

3.2 Zorlanmış Titreşim Sonuçları

Probleme ait zorlanmış titreşim çözümünde, zorlayıcı kuvvet sol kolon-kiriş birleşim bölgesine şekil 2.1'de gösterildiği gibi yatay bir şekilde etkitilmiştir. Zorlayıcı kuvveti P(t)=P0cos(Ωt) şeklindedir. Burada P_0 zorlayıcı kuvvetin genliği (N), Ω zorlayıcı kuvvetin frekansıdır (rad/s). Problemin çözümünde P_0=10 kN, Ω =1 rad/sn alınmıştır. Zorlanmış titreşim problemlerinde zorlayıcı kuvvetin uygulandığı noktanın yatay yerdeğiştirmeleri (U), sönümsüz ve sönümlü durumlara göre hesaplanmış ve grafikleri elde edilmiştir.

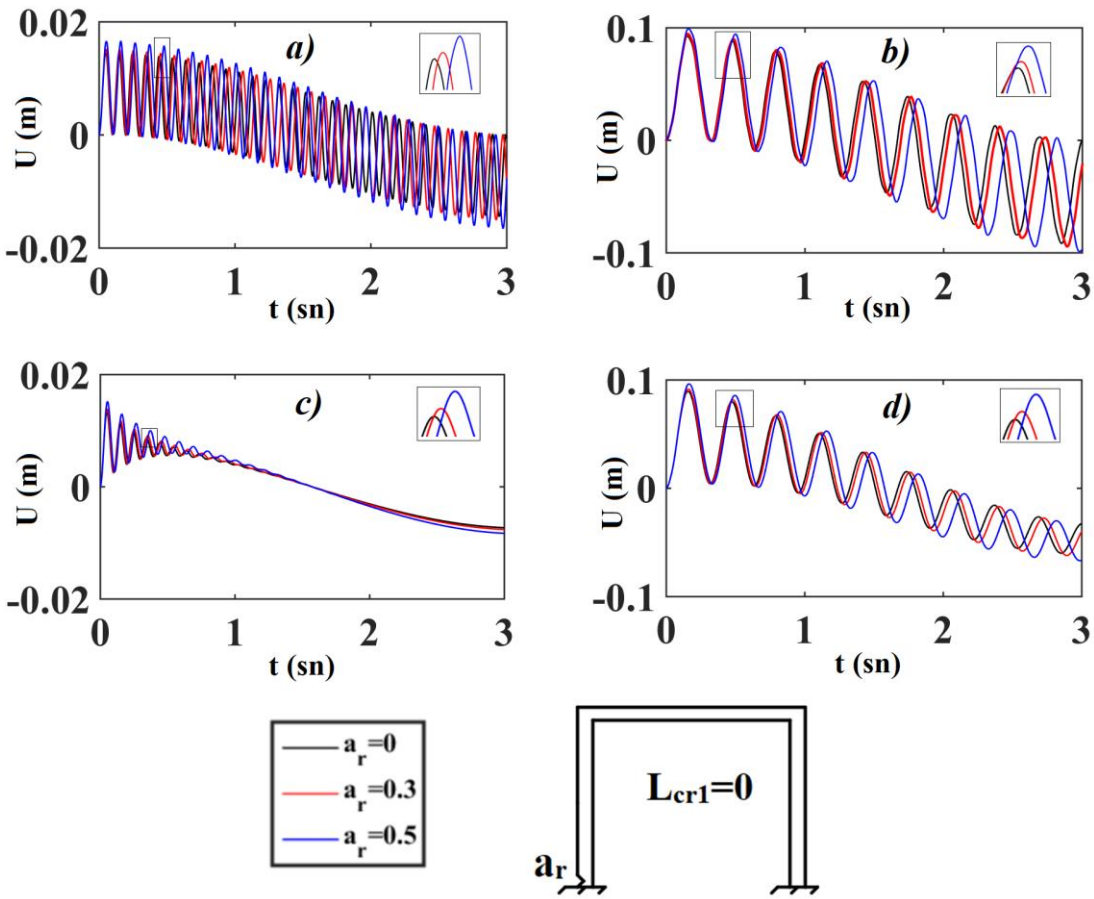
Şekil 3.3-3.4'de kolon elemanında tek çatlak için, şekil 3.5-3.6'da kiriş elemanında tek çatlak için, şekil 3.7-3.9'da her iki kolon elemanında birer çatlak için, şekil 3.10-3.12'de her üç elemanda birer çatlak için, farklı geometrik değerler, farklı çatlak konum oranları (L_{cr}) ve çatlak derinlik oranlarına (a_r) bağlı olarak zamana bağlı, sol kolon-kiriş birleşim noktasının yatay yer değiştirmeleri sönümlü ve sönümsüz durumlar için elde edilmiş ve sunulmuştur. Sönümün dikkate alınarak elde edilen sonuçlarda, viskoz sönüm katsayısı η=0.002 alınmıştır.

Zorlanmış titreşim grafiklerinden görüldüğü üzere, çatlak konumunun ankastre mesnette olması durumunda, çerçevenin daha fazla yer değiştirdiği ve çatlağın yapıya olan etkisinin daha fazla arttığı belirlenmiştir. Çatlak konumunun ankastre mesnetten üst kısımlara doğru gidildikçe, zorlanmış titreşim yer değiştirmelerinin önemli bir oranda azaldığı ve çatlağın kiriş elemanında olması durumunda yer değiştirmelerin diğer çatlak konumlarına göre çok küçük olduğu görülmüştür.

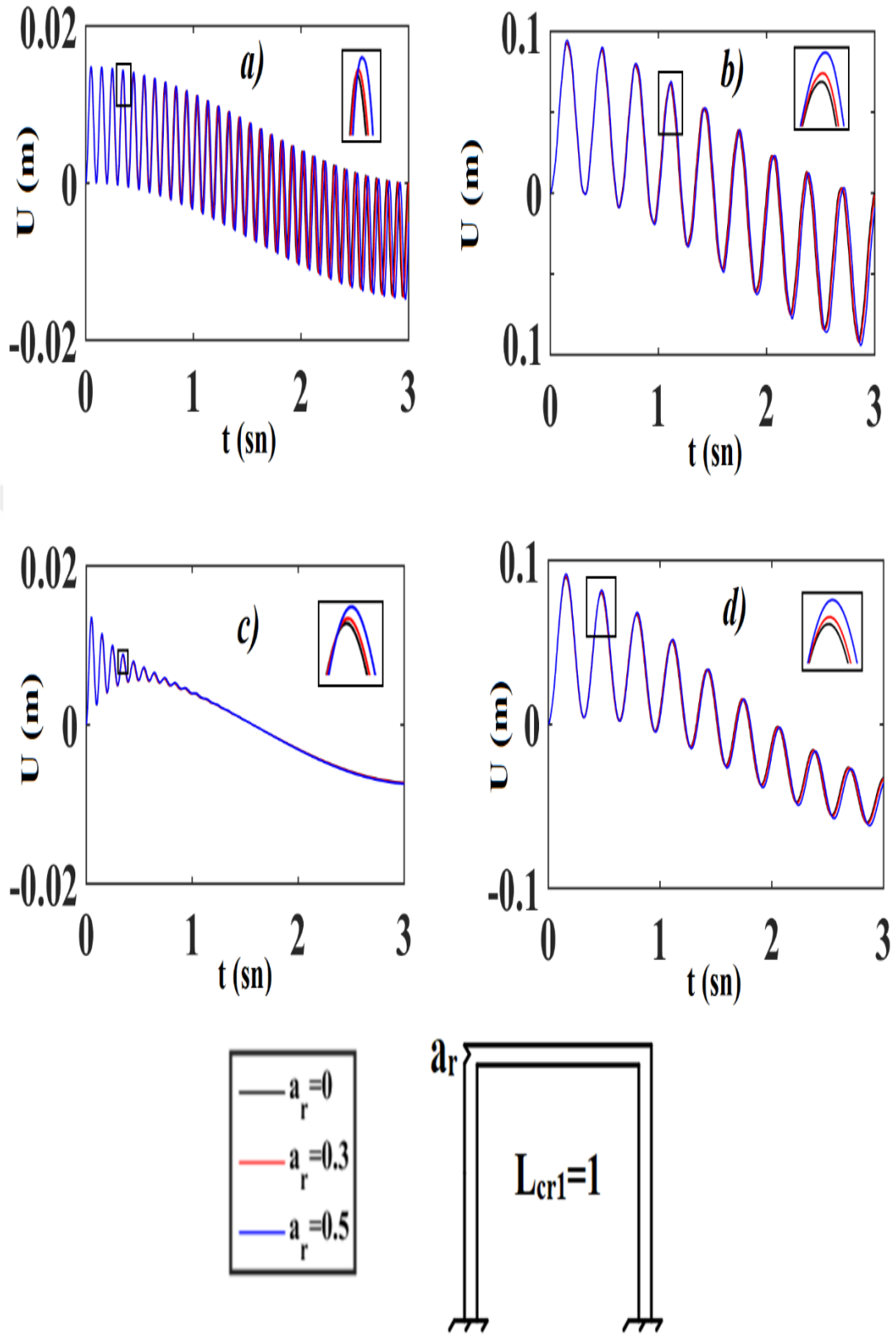
Bu grafiklerde, sönümlü ile sönümsüz durumlar arasındaki farkın oldukça büyük olduğu farkedilmiştir. Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşan dinamik cevaplardan oldukça farklıdır. Sönüm etkisindeki çerçeve yapıda ortaya çıkan yer değiştirmelerin sönümsüz duruma göre azaldığı belirlenmiştir. Çerçeve yüksekliğinin artmasıyla yükün sönümlenmesinin tam olarak gerçekleşmediği ortaya konmuştur. Kiriş uzunluğunun artmasıyla yer değiştirme az miktarda artmaktadır. Kiriş elemanında uzunluğun artmasıyla birlikte yükün sönümlenmesi gerçekleşmektedir. Ayrıca kiriş elemanının ortasında çatlak olması durumu yer değiştirmeye herhangi bir değişiklik meydana getirmemiştir.

Farklı çatlak derinlik oranları arasındaki farklar, çatlak konumlarına göre gözle görülür bir şekilde değişmektedir. Özellikle çatlağın ankastre mesnette olması durumunda, çatlak derinlik oranları arasındaki farklar çok belirgin olmaktadır. Halbuki çatlakların kiriş elemanında olması durumunda bu farklar çok küçük olmaktadır.

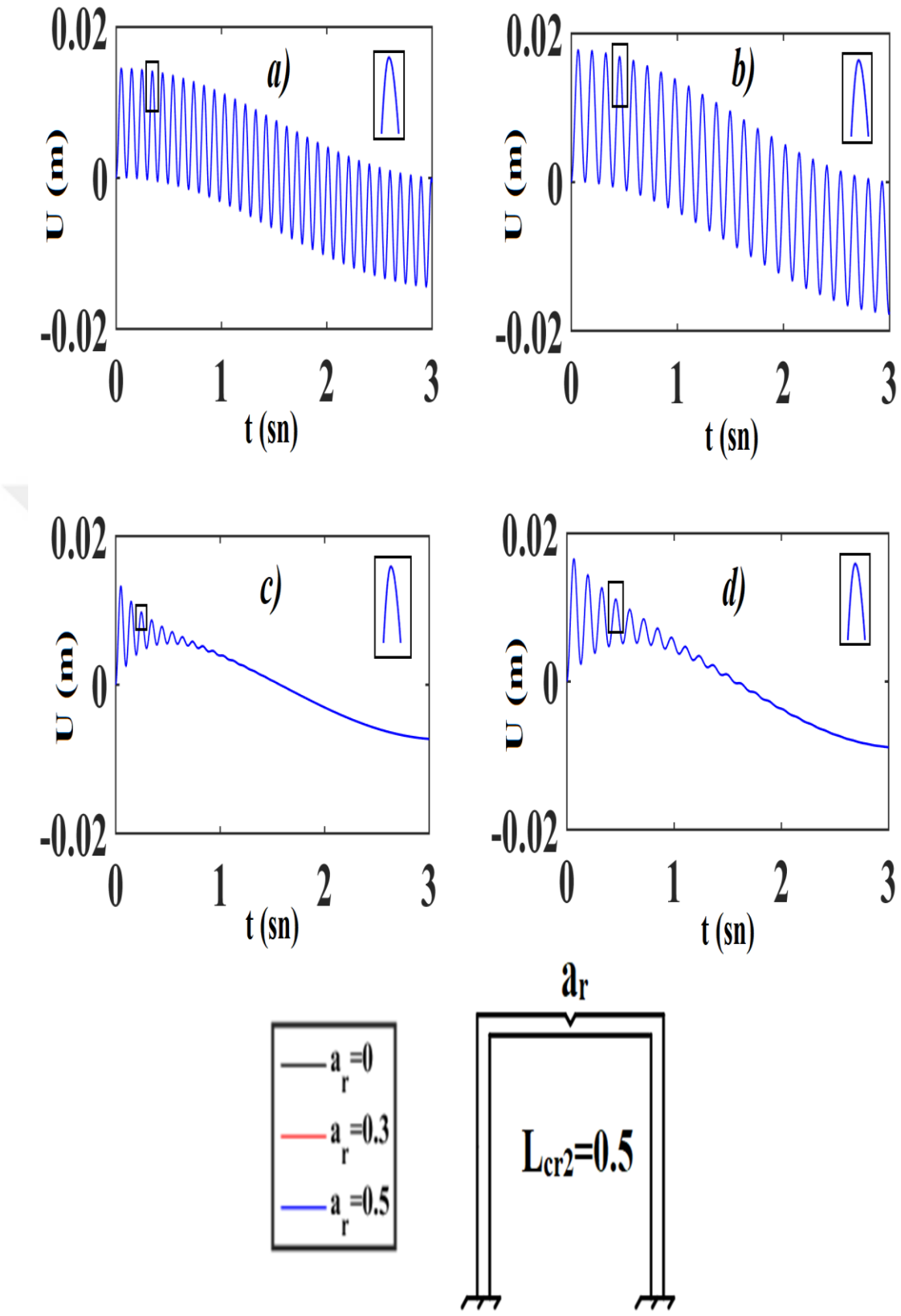
Zorlanmış titreşim sonuçlarında elde edilen bir başka bulgu ise, kolon yüksekliğinin artması ile yer değiştirmelerin oldukça arttığı ve çatlak derinlik oranının (a_r) çatlak davranışına olan etkisidir. Çerçeve yüksekliği arttığında oluşan çatlakların etkisinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak, yüksekliğin artması ile birlikte yapının narinliğin artması ve beraberinde yapının şekil değiştirme kapasitesinin atması ile birlikte çatlağın etkisinin göreceli olarak azaldığıdır. Özellikle küçük değerlerdeki kolon yüksekliğinde, çatlağın etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çatlak sayısı arttıkça ortaya çıkan yer değiştirmelerin doğal olarak arttığı gözlenmiştir.



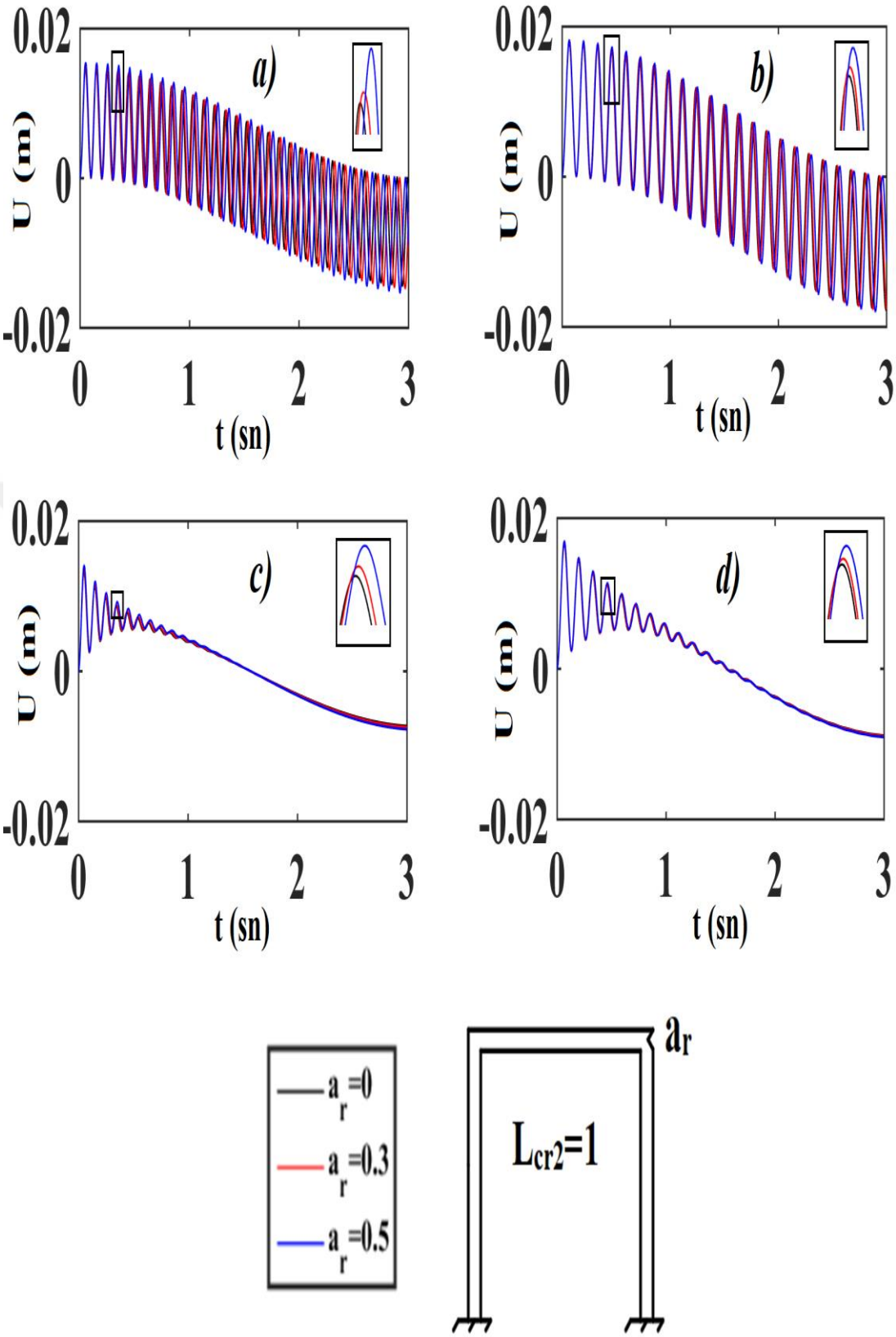
Şekil 3.3: L_{cr1}=0 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



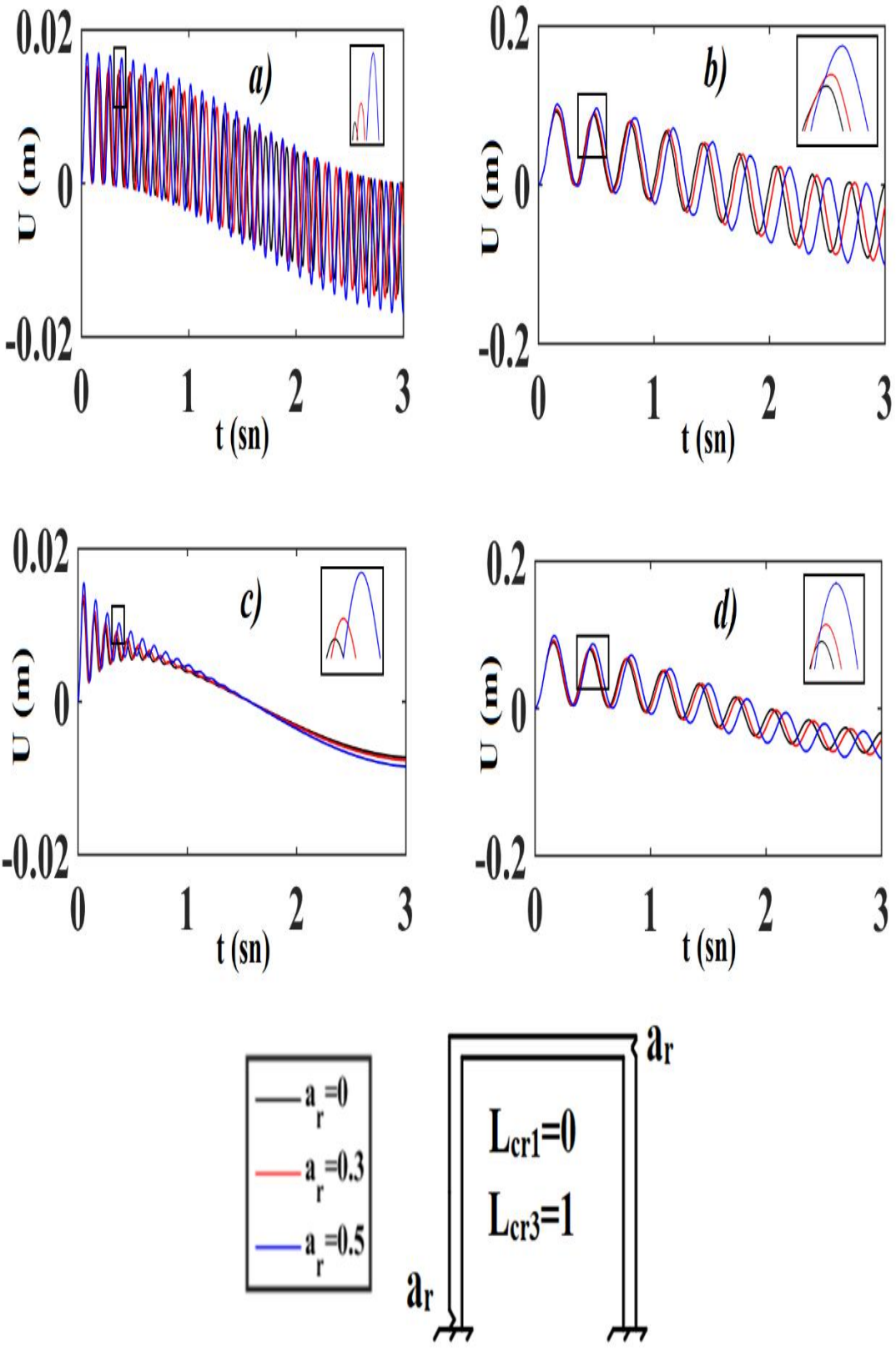
Şekil 3.4: L_{cr1}=1 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



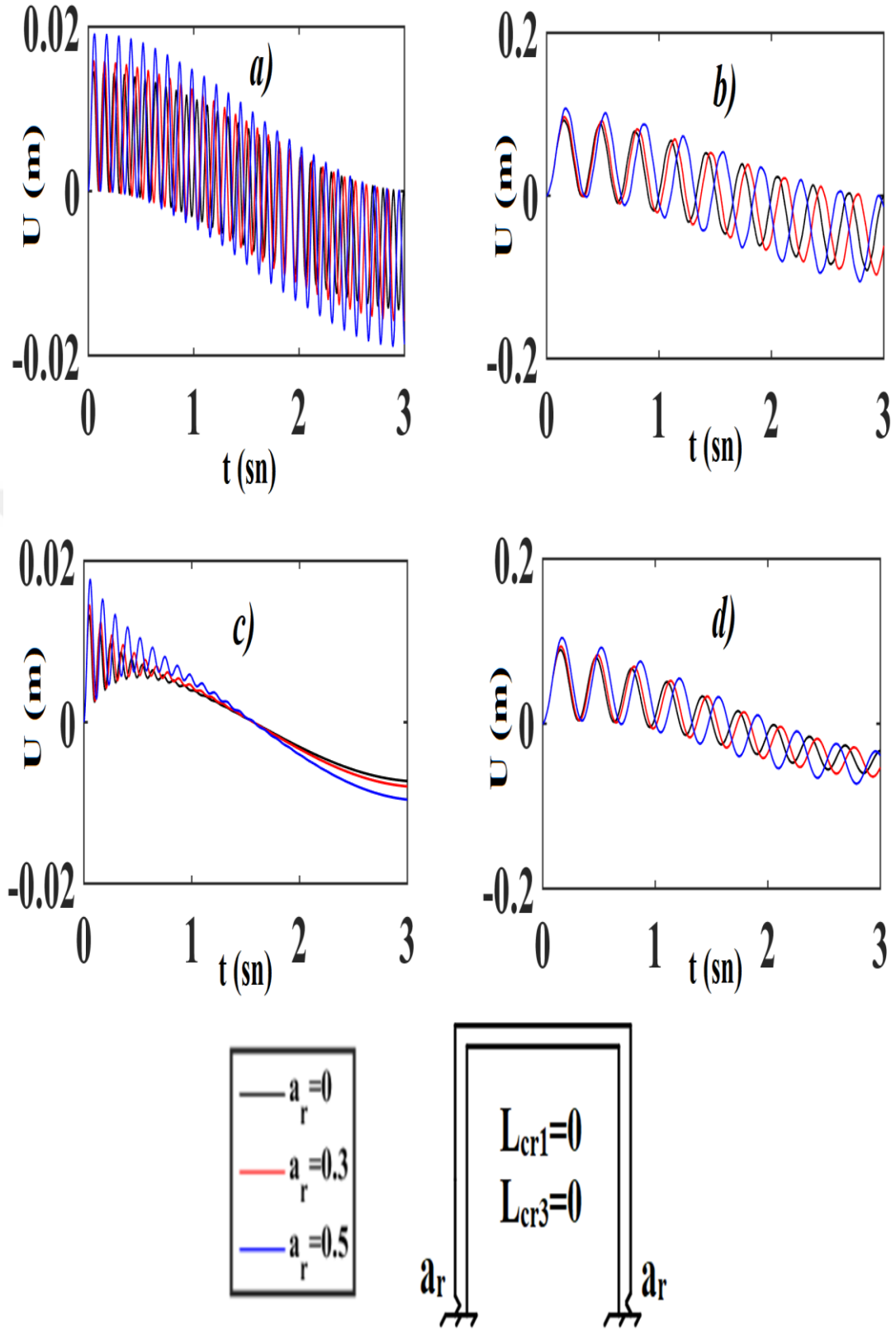
Şekil 3.5: L_{cr2}=0.5 çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve L=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve L=6 m, **c)** Sönümlü durum ve L=3 m, **d)** Sönümlü durum ve L=6 m



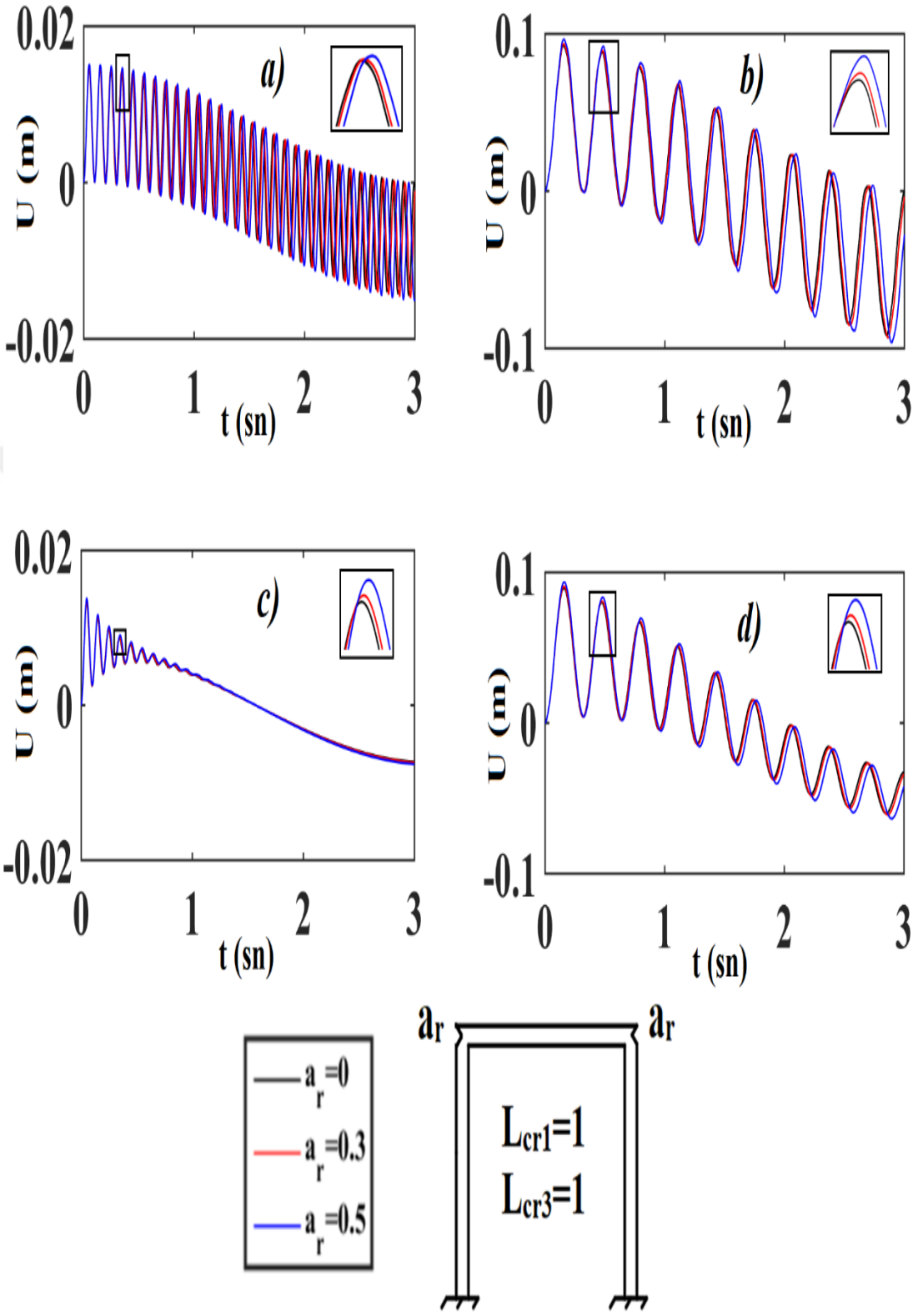
Şekil 3.6: L_{cr2}=1 çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve L=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve L=6 m, **c)** Sönümlü durum ve L=3 m, **d)** Sönümlü durum ve L=6 m



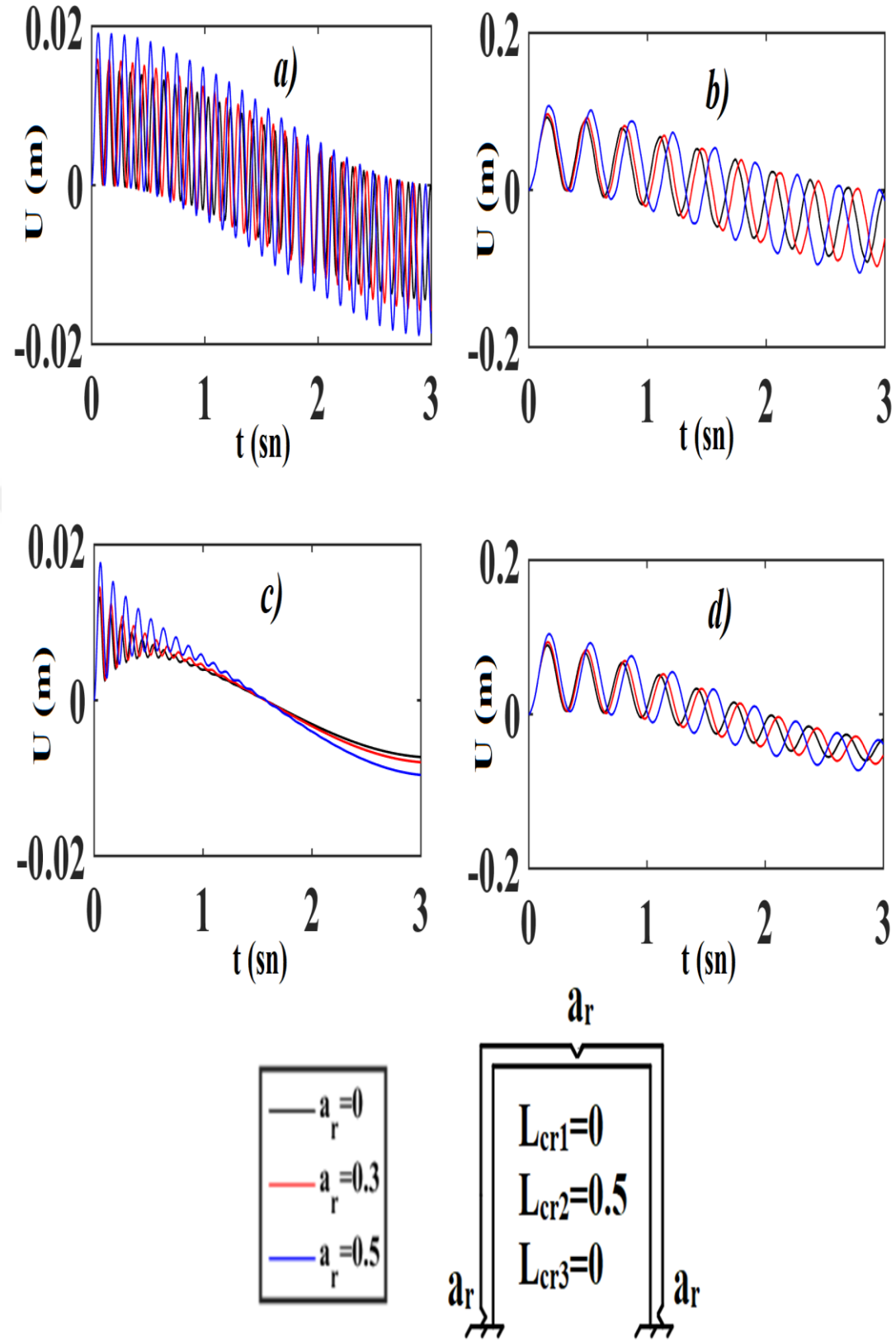
Şekil 3.7: L_{cr1}=0 ve L_{cr3}=1 çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



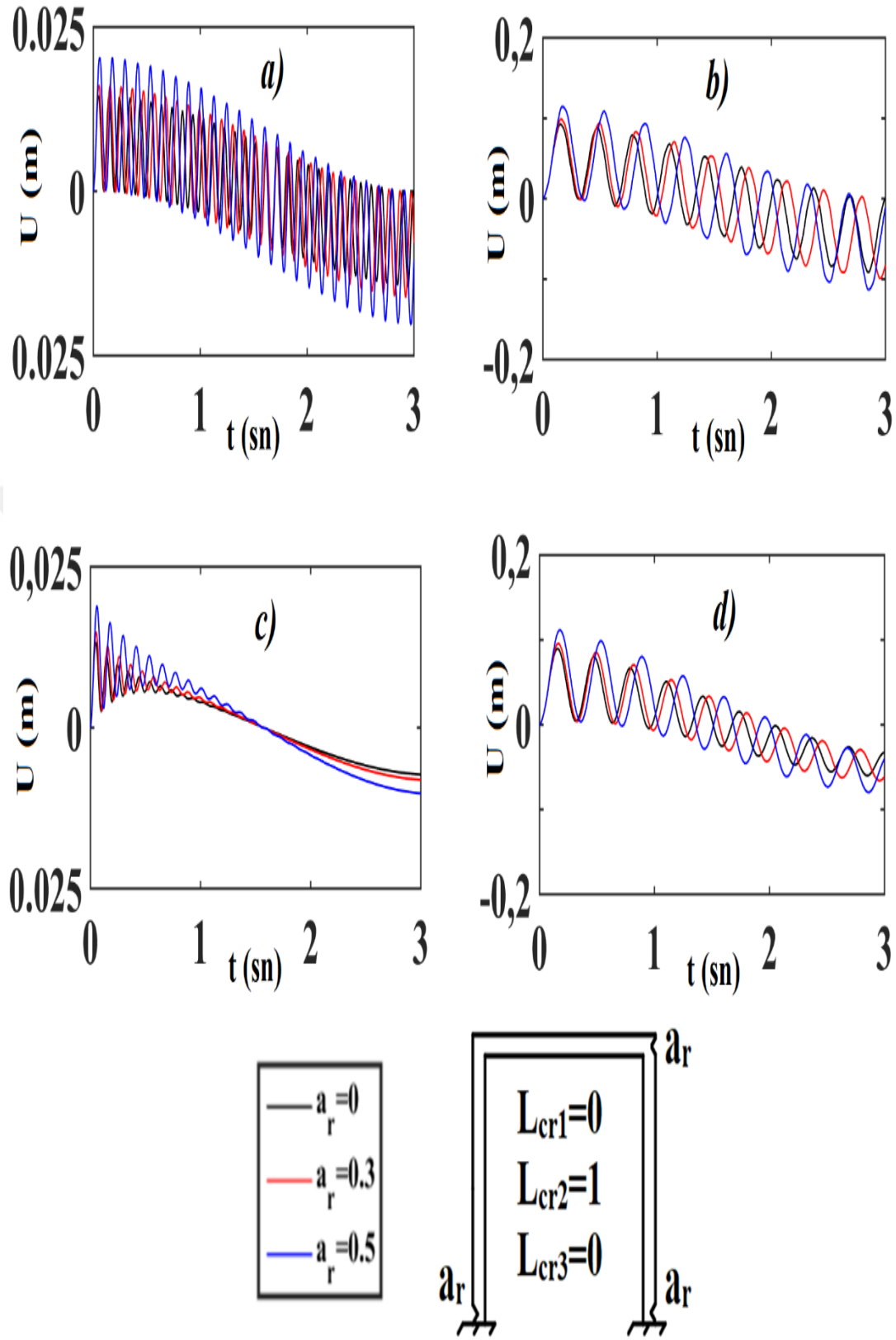
Şekil 3.8: $L_{cr1}=0$ ve $L_{cr3}=0$ çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



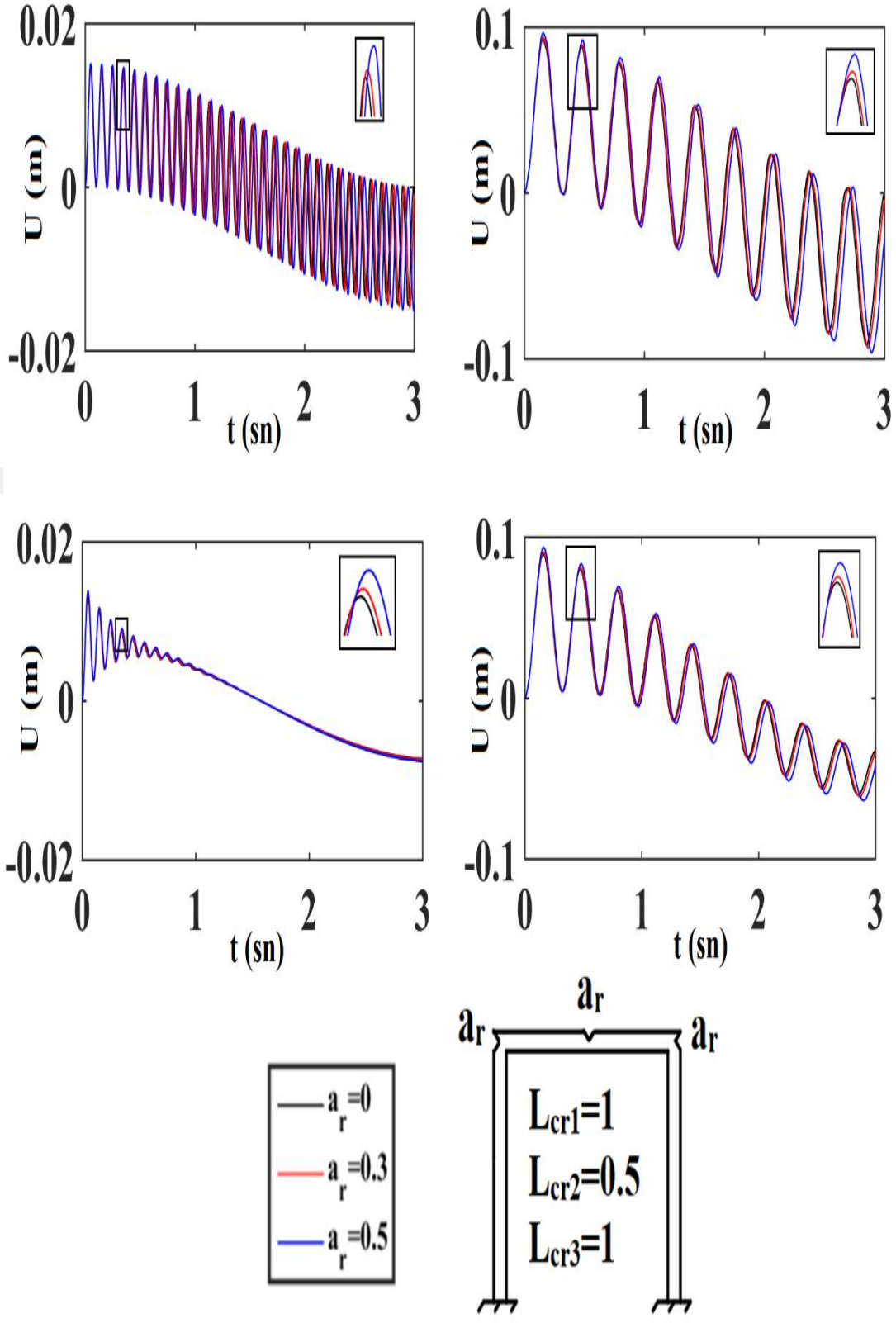
Şekil 3.9: L_{cr1}=1 ve L_{cr3}=1 çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



Şekil 3.10: L_{cr1}=0, L_{cr2}=0.5 ve L_{cr3}=0 çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



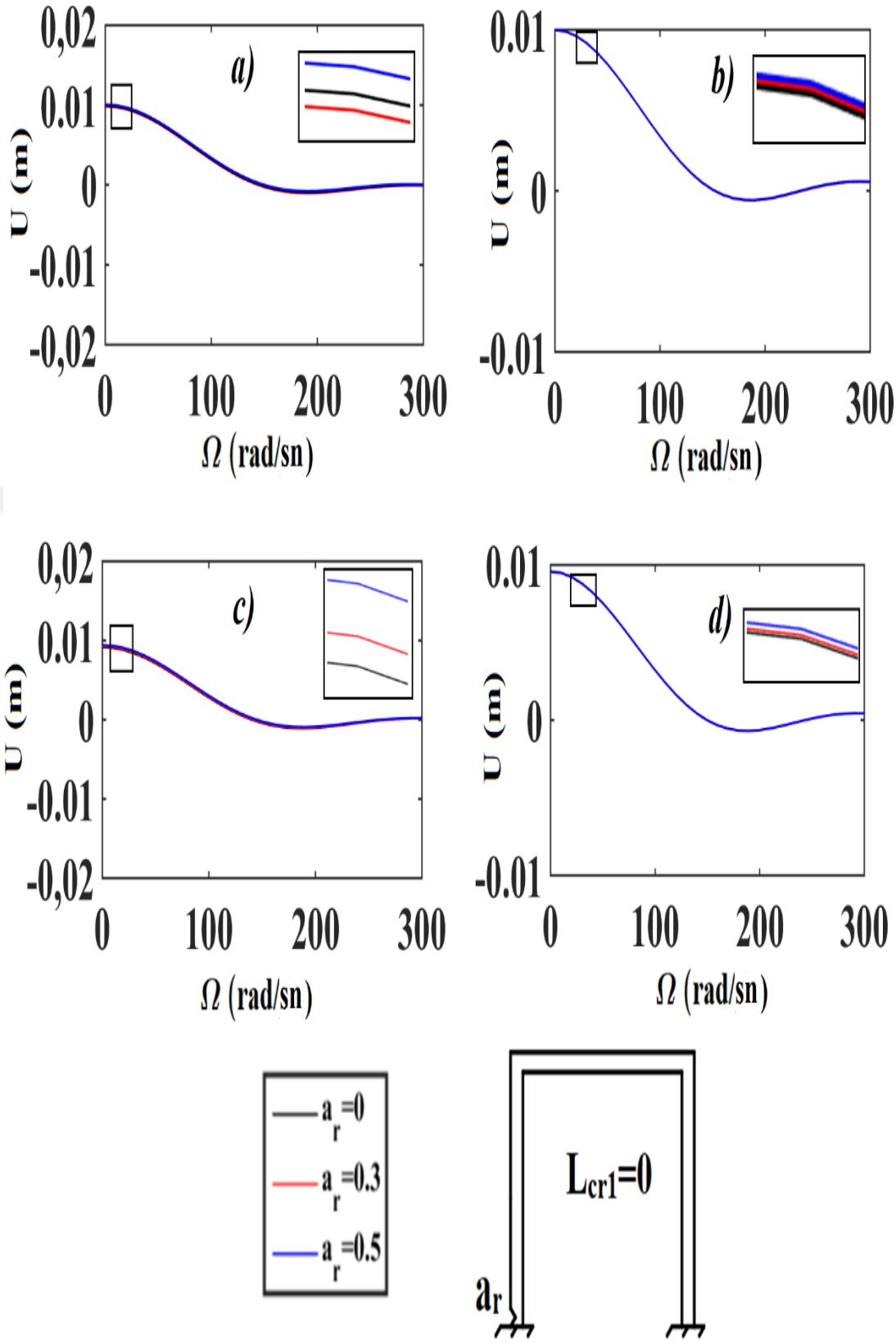
Şekil 3.11: L_{cr1}=0, L_{cr2}=1 ve L_{cr3}=0 çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



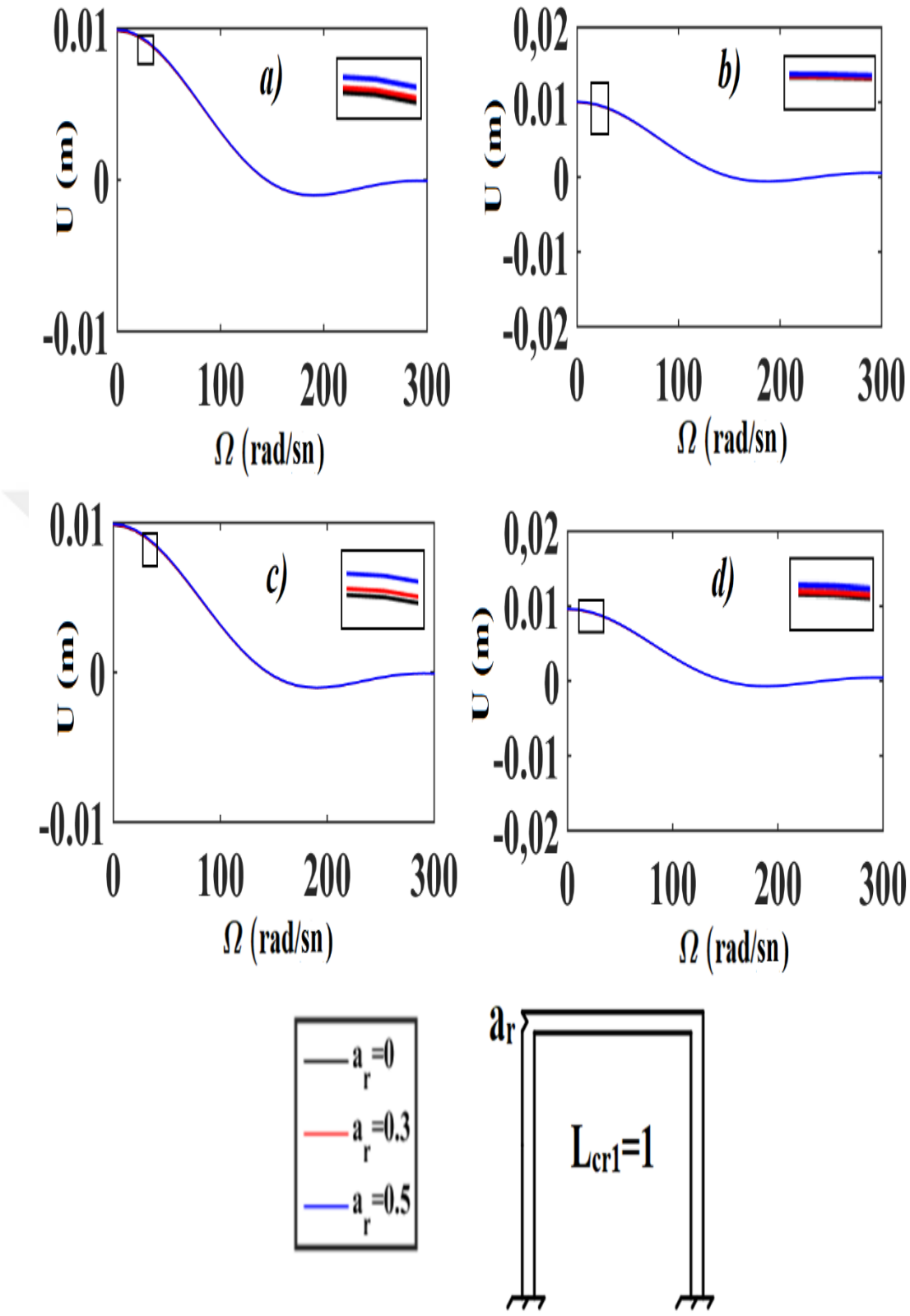
Şekil 3.12: L_{cr1}=1, L_{cr2}=0.5 ve L_{cr3}=1 çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m

Çatlak etkisini farklı bir bakış açısıyla görebilmek için, belirli bir zaman için zorlayıcı kuvvet frekansı-yerdeğiştirme ilişkileri şekiller 3.13-3.22'de sunulmuştur. Bu grafiklerde, t=0.03 sn için zorlayıcı kuvvetin frekansı (Ω rad/s)-zorlayıcı kuvvetin uygulandığı noktanın yatay yerdeğiştirmeleri (U) arasındaki ilişkiler farklı geometrik değerler , farklı çatlak konum oranları (L_{cr}), farklı çatlak sayısı ve çatlak derinlik oranlarına (a_r) bağlı olarak sönümlü ve sönümsüz durumlar için elde edilmiştir. P_0=10 kN ve sönümün dikkate alınarak elde edilen sonuçlarda, viskoz sönüm katsayısı η=0.002 alınmıştır.

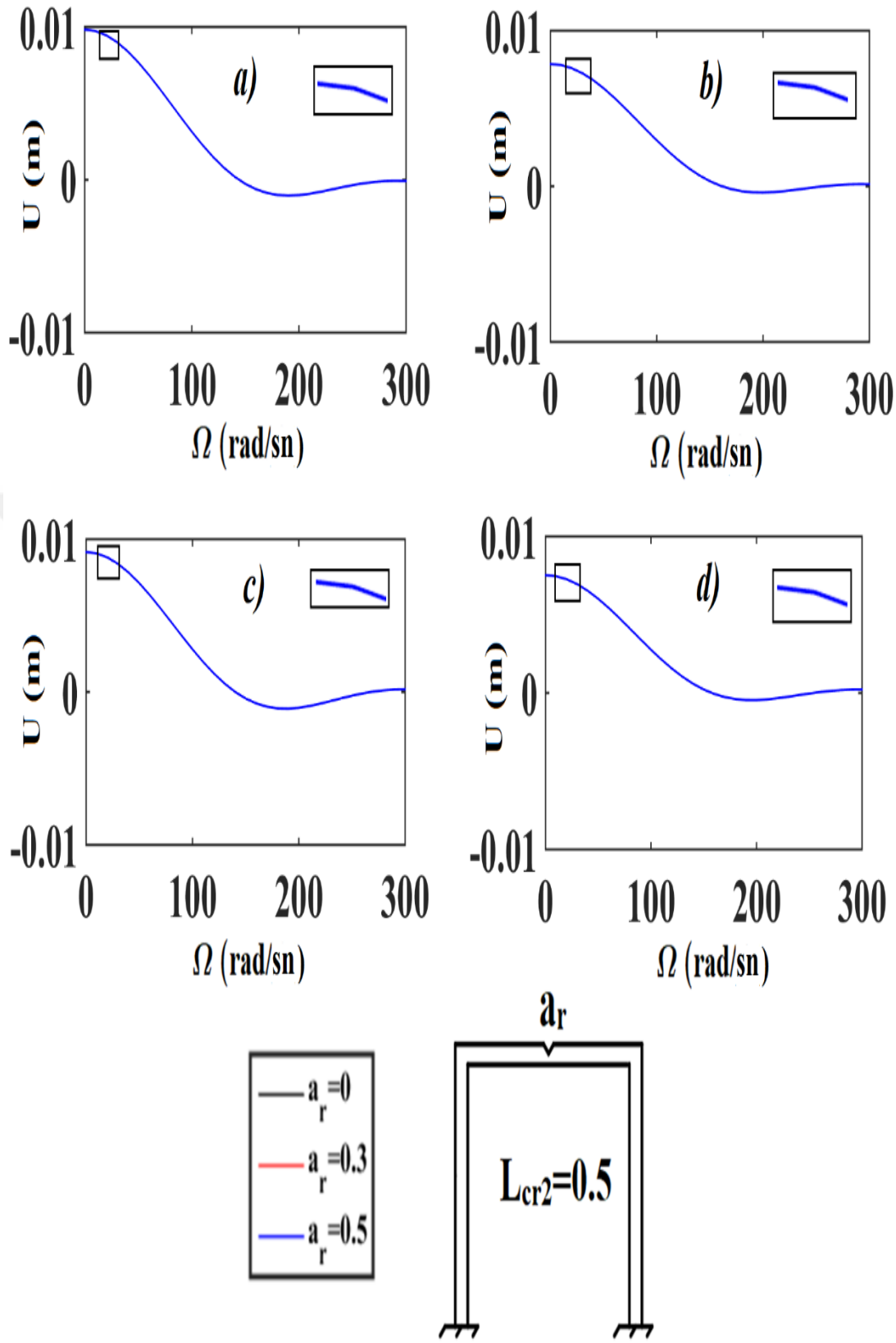
Şekiller 3.13-3.22'de zorlayıcı kuvvet frekansının dinamik cevaplara önemli bir etkisinin olduğu ve yapının dinamik davranışlarını gözle görülür bir şekilde etkilediği görülmüştür. Her ne kadar bu grafiklerdeki gerek çatlak derinliği gerekse çatlak sayısı ve konumu etkisinin, zamana bağlı yerdeğiştirme grafik sonuçlarındakine nazaran gözle görülür değişim yapmamasına karşın, zorlayıcı kuvvet frekansının çatlaklı yapıya önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Zorlayıcı kuvvet frekans değerinin artması ile yer değiştirmelerin monoton bir şekilde azaldığı ve belli bir frekans değerinden sonra ise yakınsadığı belirlenmiştir. Bu duruma neden olan etkenler, yapının rijitlik ve kütlesi, çatlak parametreleri ile yük türü ve konumu olarak sayılabilir. Bu grafiklerde zorlayıcı kuvvet frekansının üst limiti 300 rd/s alınmış fakat daha büyük üst limit değerlerinde alınması durumunda grafiğin değişeceği aşikardır. Bu grafiklerde üst limit değeri daha fazla alınmasına karşın sonuçların okunmasında sıkıntı olduğu düşünülerek 300 rd/s bırakılmıştır. Zorlayıcı kuvvet frekansı-yerdeğiştirme grafiklerinde, çatlak derinliği, çatlak konumu, çatlak sayısı ve çerçeve boyutlarının etkisine bağlı olarak elde edilen sonuçlar, zamana bağlı grafik sonuçlarındakine benzer olduğu görülmüştür.



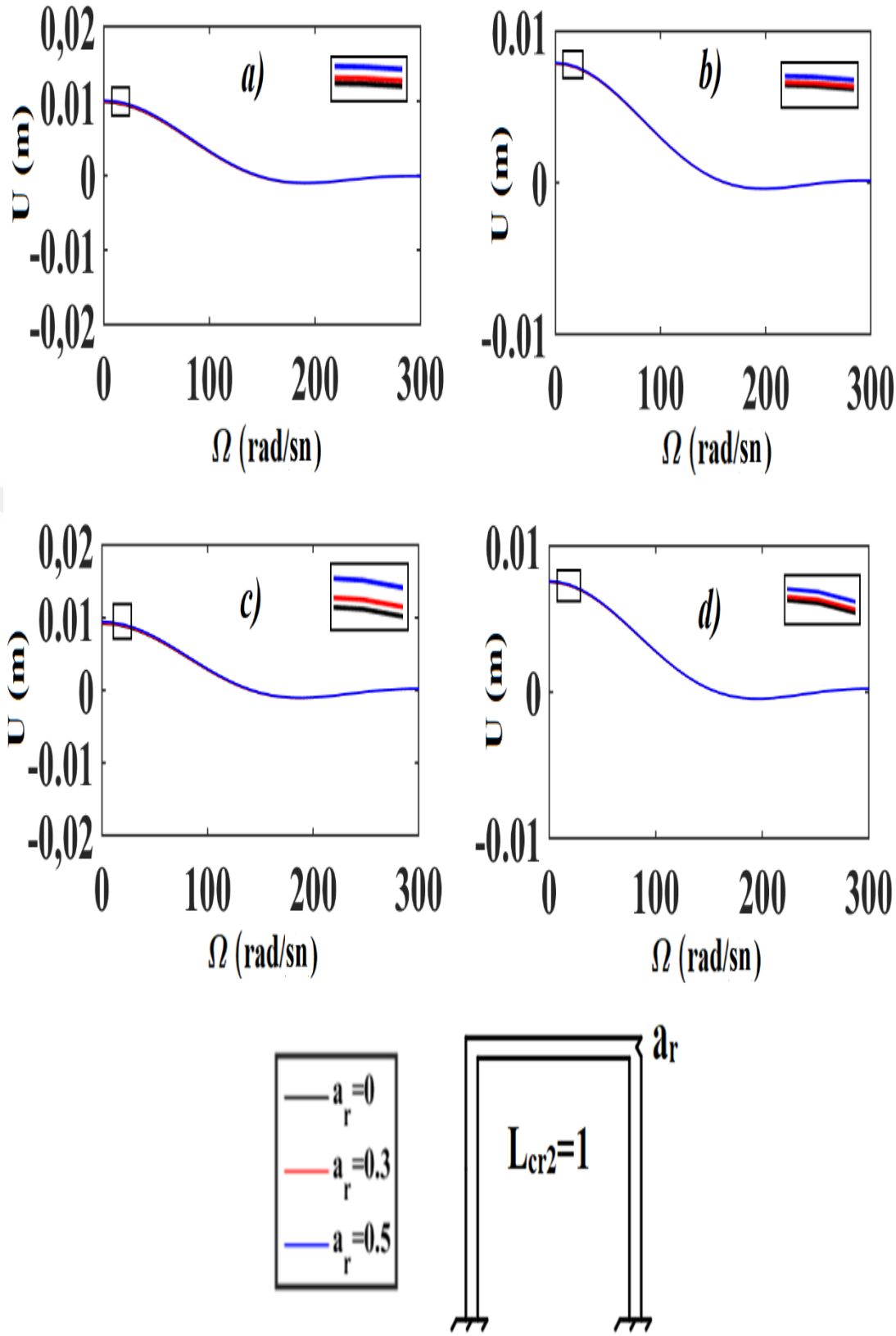
Şekil 3.13: L_{cr1}=0 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



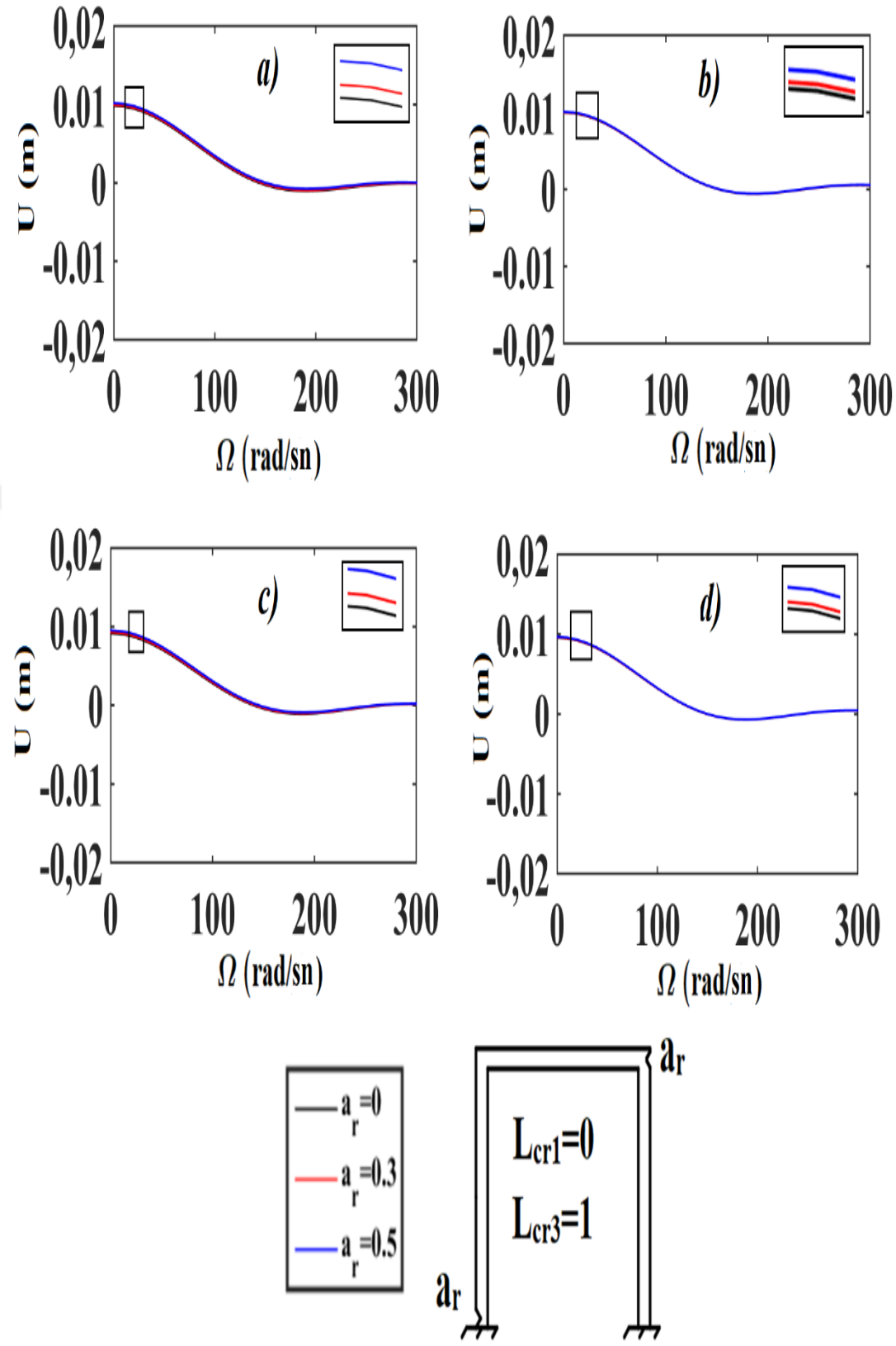
Şekil 3.14: L_{cr1}=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



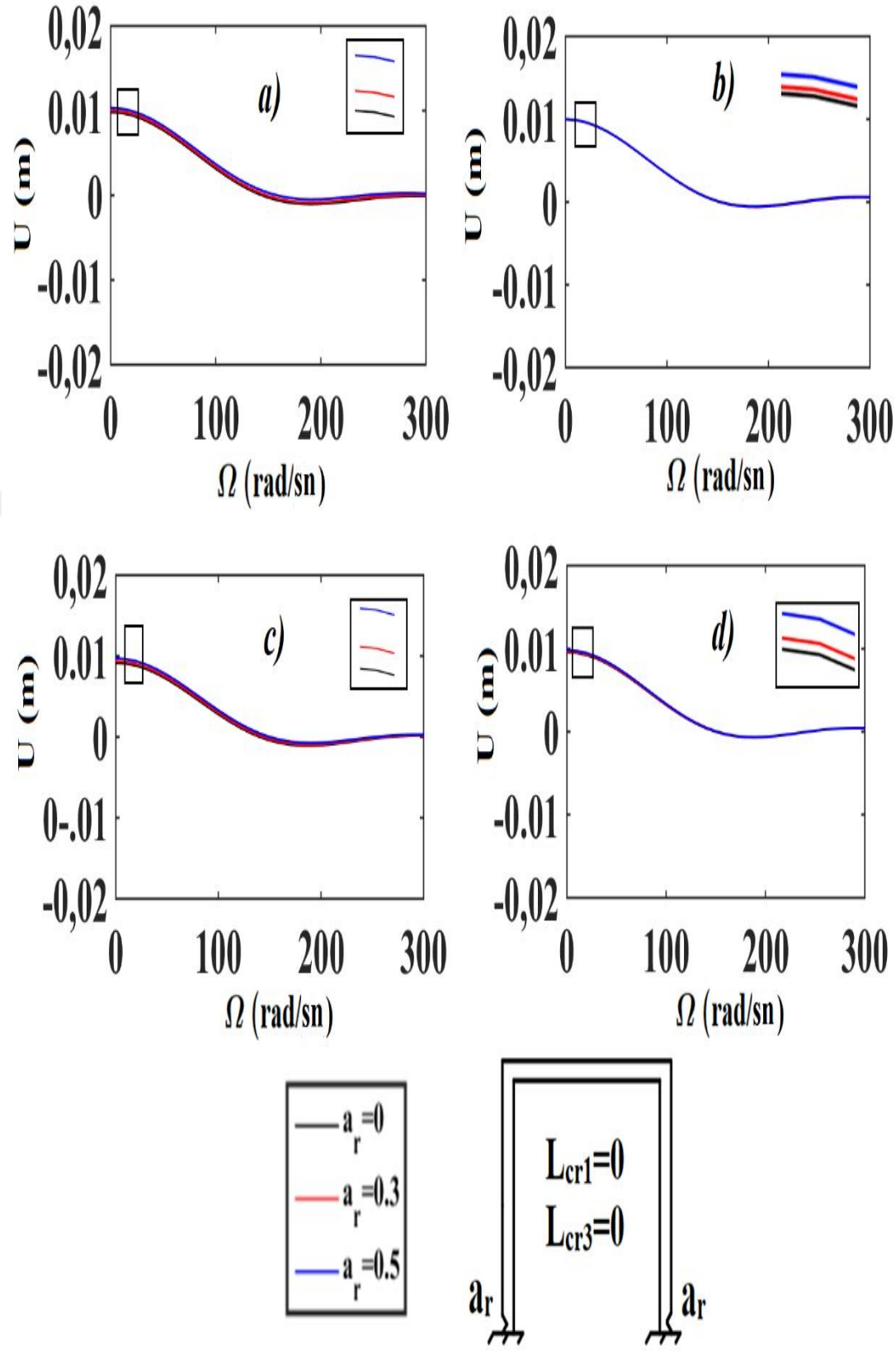
Şekil 3.15: L_{cr2}=0.5 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve L=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve L=6 m, **c)** Sönümlü durum ve L=3 m, **d)** Sönümlü durum ve L=6 m



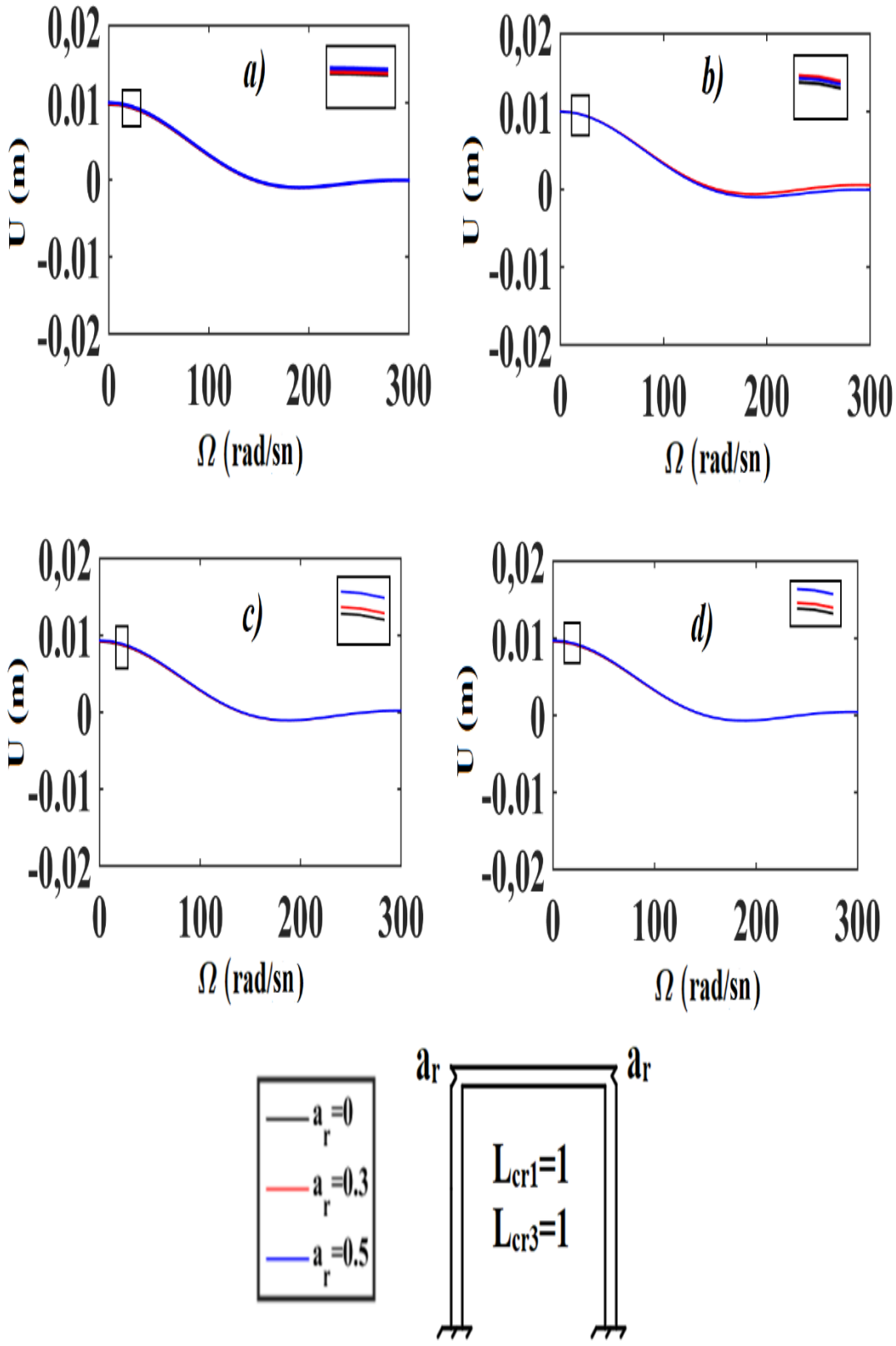
Şekil 3.16: L_{cr2}=1 çatlak konumu için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve L=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve L=6 m, **c)** Sönümlü durum ve L=3 m, **d)** Sönümlü durum ve L=6 m



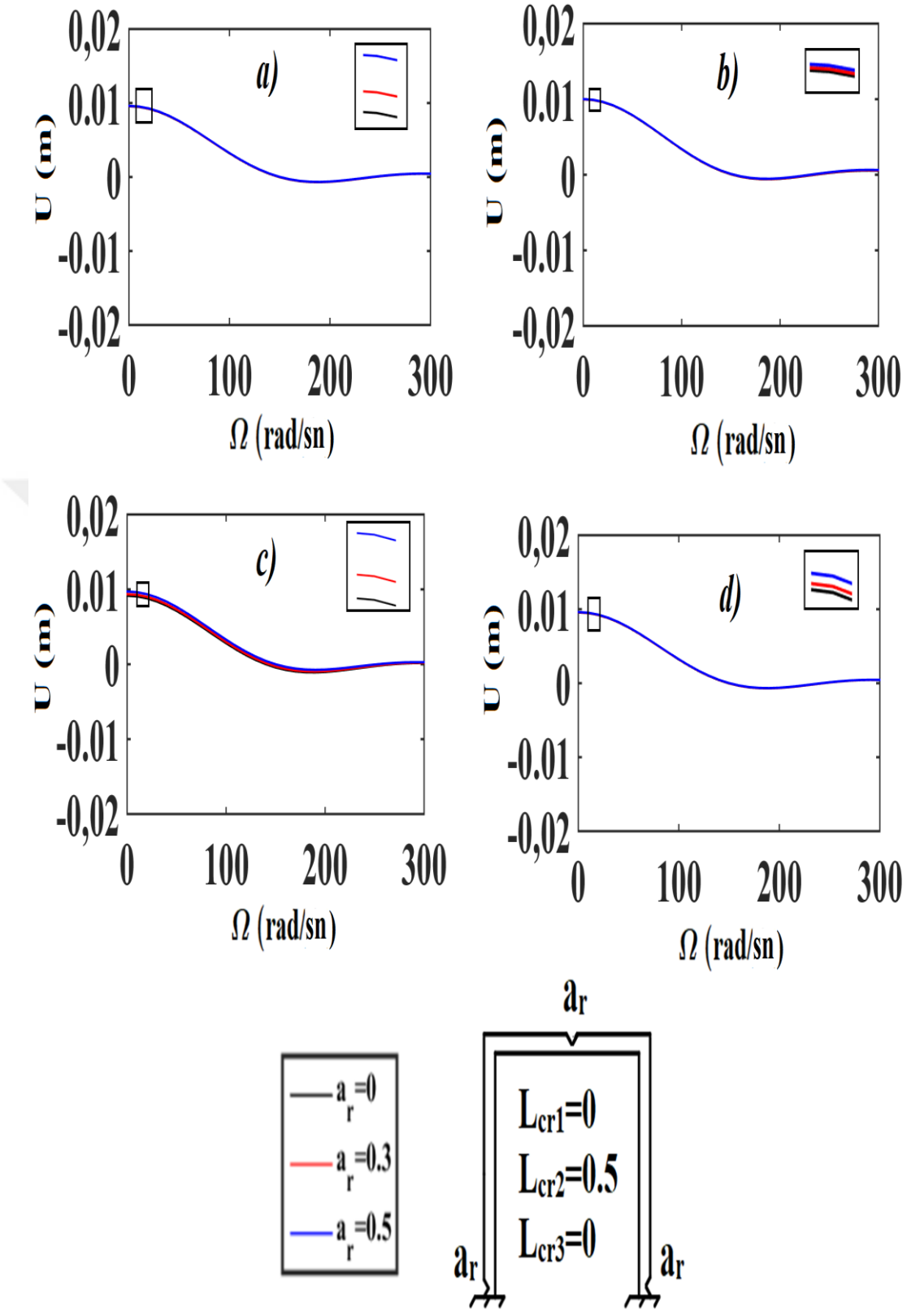
Şekil 3.17: L_{cr1}=0, L_{cr3}=1 çatlak konumları için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



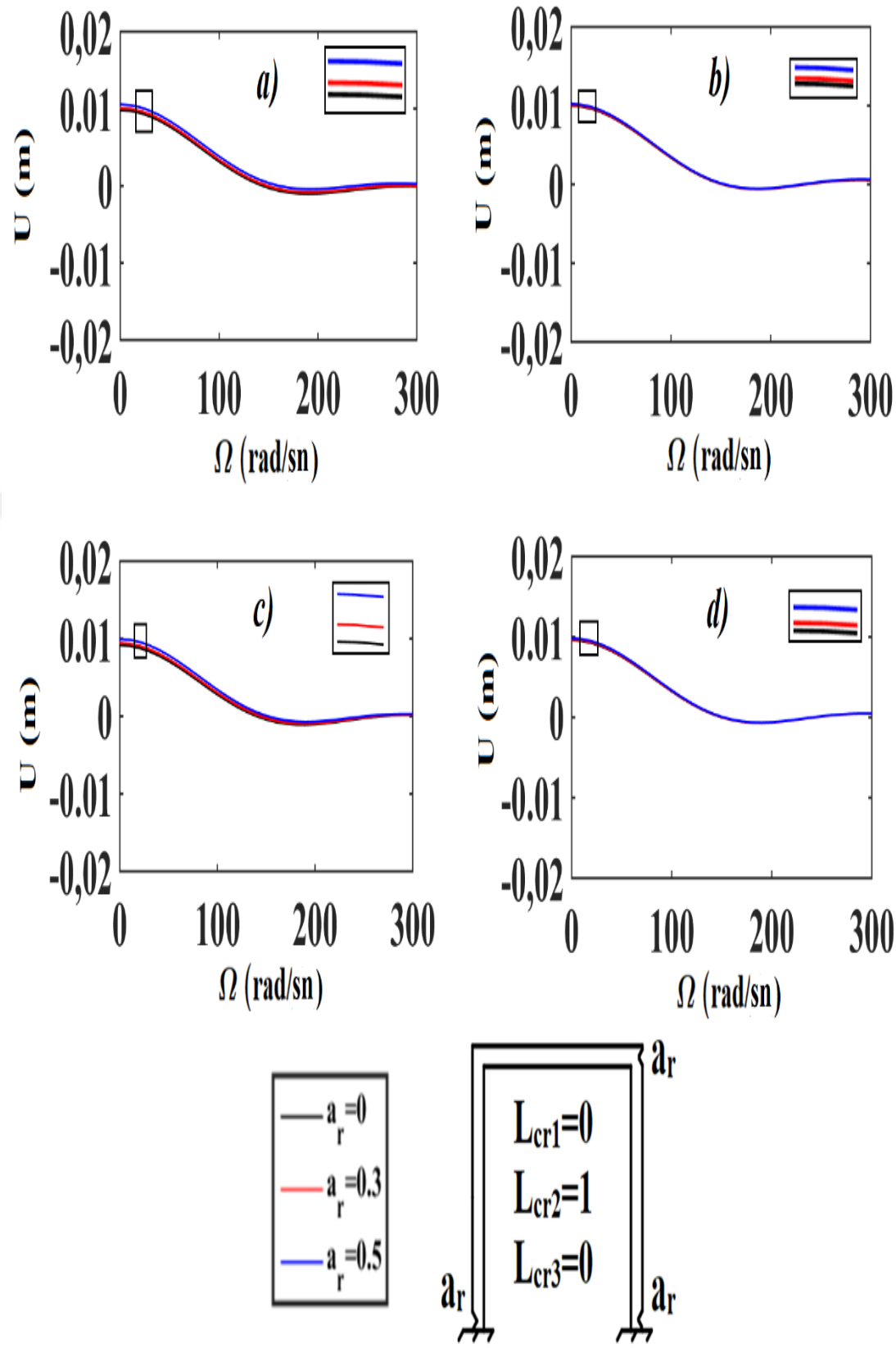
Şekil 3.18: L_{cr1}=0, L_{cr3}=0 çatlak konumları için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



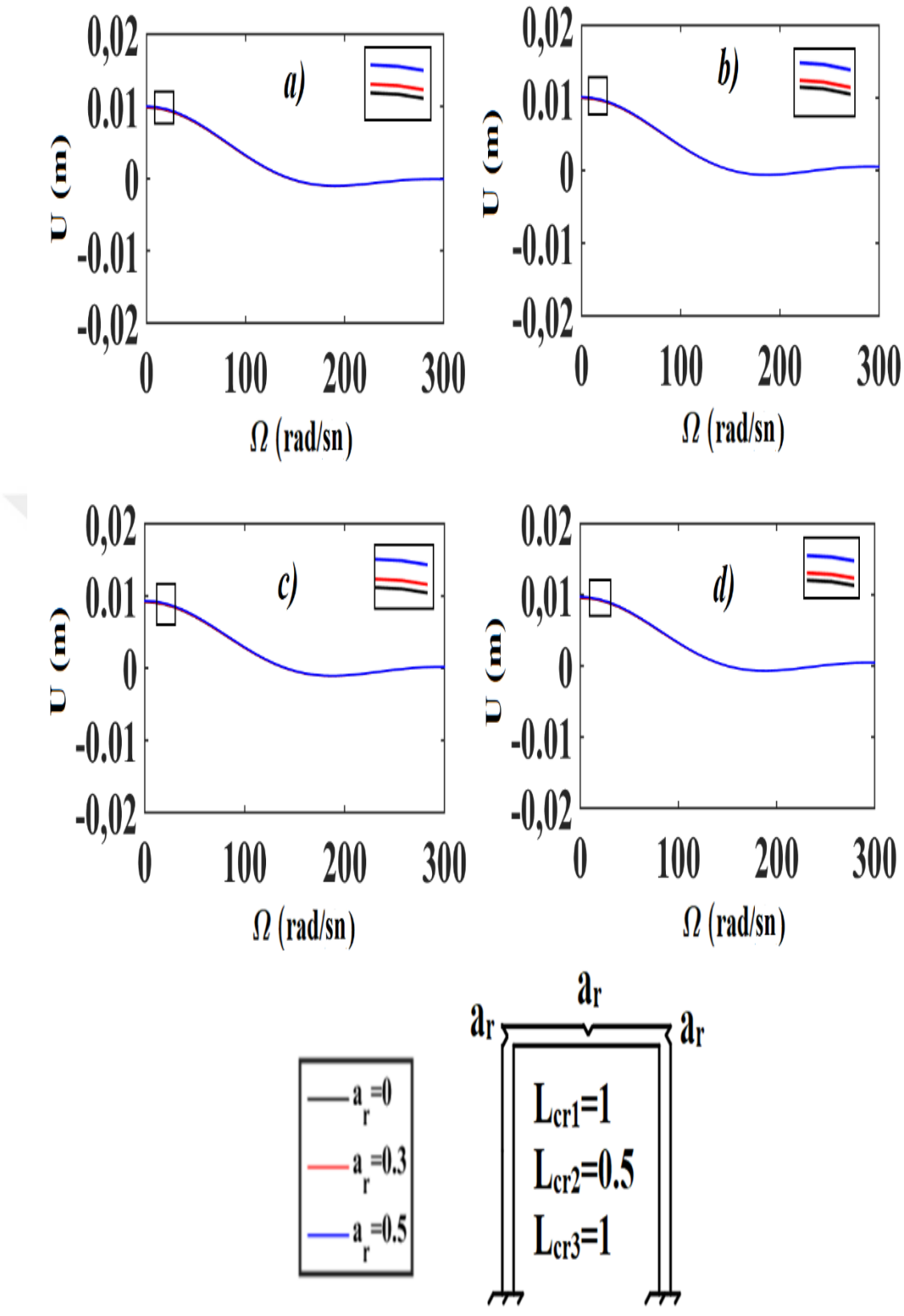
Şekil 3.19: L_{cr1}=1, L_{cr3}=1 çatlak konumları için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



Şekil 3.20: L_{cr1}=0, L_{cr2}=0.5 ve L_{cr3}=0 çatlak konumları için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



Şekil 3.21: L_{cr1}=0, L_{cr2}=1 ve L_{cr3}=0 çatlak konumları için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m



Şekil 3.22: L_{cr1}=1, L_{cr2}=0.5 ve L_{cr3}=1 çatlak konumları için zorlayıcı frekans-yer değiştirme ilişkisi **a)** Sönümsüz durum ve H=3 m, **b)** Sönümsüz durum ve H=6 m, **c)** Sönümlü durum ve H=3 m, **d)** Sönümlü durum ve H=6 m

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada çatlaklı, tek açıklıklı bir çerçevenin dinamik cevapları incelenmiştir. Dinamik cevapların incelenmesinde, serbest titreşim, sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim sonuçları çatlak derinlikleri, çatlak konumları, çatlak sayıları ve çerçeve geometrisine bağlı olarak elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Çatlaklı çerçevenin dinamik incelenmesinde, Euler-Bernoulli çubuk teorisi, Kelvin-Voigt viscoelastik model kullanılıp, enerji tabanlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çatlak etkisinden dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, çatlak kesiti veya bölgesinde, kütlesiz ve boyutsuz bir çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Çatlaktan dolayı ortaya çıkan yerel esneklik Mod1 ile Mod2 kırılma modları kullanılarak ve elde edilen gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverininim oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Çatlak sonlu eleman modelinin, sistem sonlu elemanlar modeline eklenmesi ile birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları bulunmuş ve Matlab programında algoritma ve kodları yazılarak sayısal sonuçlar ile grafikler elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim çözümlerinde ise zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlarda, farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumunun, farklı çatlak sayısının ve farklı değerlerdeki çerçeve yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak dinamik cevaplar alınmış ve yorumlanmıştır.

Sayısal sonuçlar ve şekillerden elde edilen verilerden şu sonuçlara varılmıştır;

1) Çatlak konumunun ankastre mesnetden üst kısımlara doğru gidildikçe, dinamik sonuçların önemli bir oranda azaldığı görülmüştür.
2) Çatlağın kolonlarda bulunması durumunda, kirişlerde bulunması durumuna göre çerçeveli yapıya daha fazla etkisinin olduğu belirlenmiştir.
3) Farklı çatlak derinlik oranları arasındaki farklar, çatlak konumlarına, çatlak sayılarına ve yapı boyutlarına bağlı olarak göre gözle görülür bir şekilde değişmektedir.

4) Kolon yüksekliğinin artmasıyla çatlağın titreşime olan etkisinin daha az olduğu ortaya konmuştur.
5) Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevapların, sönümlü durumdaki sonucu oluşan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir.
6) Çatlak sayısının artması, yapının frekanslarına azaltıcı ve dinamik yerdeğiştirmelere artırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.
7) Yük frekansının etkisiyle yerdeğiştirmelerin zamanla azaldığı ve belli bir frekans değerinden sonra yok denecek kadar azaldığı elde edilmiştir.
8) Çatlak konumunun ve yapı boyutlarının, kırılma davranışa çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Abolbashari, M.H. Nazari, F. ve Rad, J.S. (2014). A Multi-Crack Effects Analysis and Crack Identification in Functionally Graded Beams Using Particle Swarm Optimization Algorithm and Artificial Neural Network, Structural Engineering and Mechanics, 51(2): 299-313.

Akbaş, Ş. D. (2013). Free Vibration Characteristics of Edge Cracked Functionally Graded Beams by Using Finite Element Method. International Journal of Engineering Trends and Technology, 4(10), 4590-4597.

Akbaş, Ş.D., (2014a), Wave Propagation Analysis of Edge Cracked Circular Beams under Impact Force, Plos One, 9(6), 1-8, e100496.

Akbaş, Ş.D., (2014b), Wave Propagation in Edge Cracked Functionally Graded Beams Under Impact Force, Journal of Vibration and Control, DOI: 10.1177/1077546314547531.

Altay, K. (2002). Eksenel Yük Altındaki Çeşitli Çatlaklı ve Yay Ekli Kirişlerde Titreşimlerin Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Arboleda-Monsalve, L. G., Zapata-Medina, D. G., & Aristizabal-Ochoa, J. D. (2007). Stability and Natural Frequencies of a Weakened Timoshenko Beam-Column with Generalized end Conditions Under Constant Axial Load. Journal of Sound and Vibration, 307(1-2), 89-112.

Batıhan, A. (2011). Vibration Analysis of Cracked Beams on Elastic Foundation Using Timoshenko Beam Theory. (Phd Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.

Bilgehan, M., Gürel, M.A., Pekgökgöz, R.K. ve Kısa, M. (2012), Buckling Load Estimation of Cracked Columns using Artificial Neural Network Modeling Technique", Journal of Civil Engineering and Management, 18(4):568-579.

Bouboulas, A. S., & Anifantis, N. K. (2008). Formulation of Cracked Beam Element for Analysis of Fractured Skeletal Structures. Engineering Structures, 30(4), 894-901.

Caddemi S. ve Caliò', I. (2008), Exact Solution of the Multi-Cracked Euler-Bernoulli Column, International Journal of Solids and Structures,45(5):1332-1351.

Caddemi, S., Caliò', I. ve Cannizzaro, F. (2013), The Influence of Multiple Cracks on Tensile and Compressive Buckling of Shear Deformable Beams, International Journal of Solids and Structures, 50(20-21):3166-3183

Caddemi, S., Calio, I., & Cannizzaro, F. (2017). The Dynamic Stiffness Matrix (DSM) of Axially Loaded Multi-cracked Frames. Mechanics Research Communications, 84, 90-97.

Challamel, N., & Xiang, Y. (2010). On the Influence of the Unilateral Damage Behaviour in the Stability of Cracked Beam/Columns. Engineering Fracture Mechanics, 77(9), 1467-1478.

Chatterjee, A. (2011). Nonlinear Dynamics and Damage Assessment of a Cantilever Beam with Breathing Edge Crack. Journal of Vibration and Acoustics, 133(5), 051004.

Eroglu, U., & Tufekci, E. (2016). Exact Solution Based Finite Element Formulation of Cracked Beams for Crack Detection. International Journal of Solids and Structures, 96, 240-253.

Gurel, M. A. (2007). Buckling of Slender Prismatic Circular Columns Weakened by Multiple Edge Cracks. Acta Mechanica, 188(1-2), 1-19

Gürel, M.A. ve Kisa, M. (2005), Buckling of Slender Prismatic Columns with a Single Edge Crack Under Concentric Vertical Loads, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 29,185- 193.

Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012). Fatigue-Prone Details in Steel Bridges. Buildings, 2(4), 456-476.

Haskul, M., (2010). Çatlak İçeren Değişken Kesitli Kirişlerde Titreşim Probleminin Sonlu Elemanlar Metoduyla Modellenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Ibrahem, A.M. (2010). Vibration Analysis of Cracked Frame Structures. (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Ibrahem, A.M., Öztürk, H. And Sabuncu, M. (2013). Vibration Analysis of Cracked Frame Structures. Structural Engineering and Mechanics, 45(1): 33-52.

Kara, R , Taşgetiren, S . (2005). Çekme Etkisindeki Çelik Levhada V-Çentik ve Çatlak Etkileşimi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1 (2), 29-35.

Ke, L.L., Yang, J. ve Kitipornchai, S. (2009), Postbuckling Analysis of Edge Cracked Functionally Graded Timoshenko Beams Under End Shortening. Composite Structures, 90(2), 152-160

Kishen, C.J.M. ve Kumar, A. (2004), "Finite Element Analysis for Fracture Behavior of Cracked Beam- Columns", Finite Elements in Analysis and Design, 40(13-14), 1773-1789.

Kitipornchai, S., Ke, L. L., Yang, J., & Xiang, Y. (2009). Nonlinear Vibration of Edge Cracked Functionally Graded Timoshenko Beams. Journal of Sound and Vibration, 324(3-5), 962-982.

Krawczuk, M., Ostachowicz, W., & Zak, A. (1997). Dynamics of Cracked Composite Material Structures. Computational Mechanics, 20(1-2), 79-83

Kuntiyawichai, K., & Burdekin, F. M. (2003). Engineering Assessment of Cracked Structures Subjected to Dynamic Loads Using Fracture Mechanics Assessment. Engineering Fracture Mechanics, 70(15), 1991-2014.

Labib, A., Kennedy, D., & Featherston, C. (2014). Free Vibration Analysis of Beams and Frames with Multiple Cracks for Damage Detection. Journal of Sound and Vibration, 333(20), 4991-5003.

Lien, T. V., Duc, N. T., & Khiem, N. T. (2017). Free Vibration Analysis of Multiple Cracked Functionally Graded Timoshenko Beams. Latin American Journal of Solids and Structures, 14(9), 1752-1766.

Mia, M. S., Islam, M. S., & Ghosh, U. (2017). Modal Analysis of Cracked Cantilever Beam by Finite Element Simulation. Procedia engineering, 194, 509-516.

Moradi, S., & Moghadam, P. J. (2014). Vibration Analysis of Cracked Post-Buckled Beams. Applied Mathematical Modelling, 38(13), 3281-3294.

Nikpour, K. (1990). Buckling of Cracked Composite Columns. International Journal of Solids and Structures, 26(12), 1371-1386.

Nikolakopoulos, P. G., Katsareas, D. E., & Papadopoulos, C. A. (1997). Crack Identification in Frame Structures. Computers & structures, 64(1-4), 389-406.

Ostachowicz, W. M., & Krawczuk, M. (1990). Vibration Analysis of a Cracked Beam. Computers & Structures, 36(2), 245-250.

Ozkan, B. (2017). Dynamic Analysis of Beam with Breathing Crack Using Finite Element Method. (Master Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

Öztürk, H., Yashar, A., & Sabuncu, M. (2016). Dynamic Stability of Cracked Multi-Bay Frame Structures. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 23(6), 715-726.

Örnek, M. (2014). Reddy - Bickford Çatlaklı Kiriş Titreşiminin Teorik, Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özen, M. (2007). Kusurlu Yapılarda Burkulma ve Titreşim Probleminin Nümerik Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Rezaiee-Pajand, M., & Gharaei-Moghaddam, N. (2018). Using co-rotational method for cracked frame analysis. Meccanica, 53(8), 2121-2143.

Saavedra, P. N., & Cuitino, L. A. (2001). Crack Detection and Vibration Behavior of Cracked Beams. Computers & Structures, 79(16), 1451-1459.

Saltık, O. (2008). Çatlak İçeren ve Eksenel Yük Taşıyan Kirişlerde Titreşim Probleminin Nümerik Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Shen, M. H., & Pierre, C. (1994). Free Vibrations of Veams with a Single-Edge Crack. Journal of Sound and Vibration, 170(2), 237-259

Skrinar, M. (2009). Improved Beam Finite Element for the Stability Analysis of Slender Transversely Cracked Beam-Columns. Computational Materials Science, 45(3), 663-668.

Şahin, F. (2007). Üzerinde Çatlak Bulunan Euler-Bernoulli Kirişlerinin Sabit Eksenel Yük Altındaki Titreşim Frekansları. (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Şakar, G., Öztürk, H., & Sabuncu, M. (2012). Dynamic Stability of Multi-Span Frames Subjected to Periodic Loading. Journal of Constructional Steel Research, 70, 65-70.

Tada, H., Paris, P.C., Irwin, G.R. (2000). The Stress Analysis of Cracks Handbook, ASME Press, New York.

Tan, G., Liu, Z., Shan, J., & Wu, C. (2017). Direct and Inverse Problems on Free Vibration Analysis of Cracked Non-Uniform Beams Carrying Spring-Mass Systems by Finite Element Method. Journal of Vibroengineering, 19.

Tarih, Y. S., & Şakar, G. (2013). Üzerinde Çatlak Bulunan Tabakalı Kompozit Kirişlerin Dinamik Analizi. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, (ss.580-585). Erzurum: Atatürk Üniversitesi, Eylül 12-13.

Tharp, T. M. (1987). A Finite Element for Edge-Cracked Beam Columns. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 24(10), 1941-1950

Yang, E. C., Zhao, X., & Li, Y. H. (2015). Free Vibration Analysis for Cracked FGM Beams by Means of a Continuous Beam Model. Shock and Vibration, 2015.

Yasuhisa, O., Yu, T., Mano, M., Okada, T. (2009) Design of Ship Hull Structures: A Practical Guide for Engineers; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; London, UK; pp. 319–333.

Yayla, P. (2007). Kırılma Mekaniği, Birinci Baskı. İstanbul, Türkiye: Çağlayan Kitabevi.

Yazdi, A. K., & Shooshtari, A. (2016). Analysis of Cracked Skeletal Structures by Utilizing a Cracked Beam-Column Element. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 85, 276-282.

Yokoyama, T., & Chen, M. C. (1998). Vibration Analysis of Edge-Cracked Beams Using a Line-Spring Model. Engineering Fracture Mechanics, 59(3), 403-409.

Zhao, X., Zhao, Y. R., Gao, X. Z., Li, X. Y., & Li, Y. H. (2016). Green's Functions for the Forced Vibrations of Cracked Euler–Bernoulli Beams. Mechanical Systems and Signal Processing, 68, 155-175.

Zheng, D. Y., & Kessissoglou, N. J. (2004). Free Vibration Analysis of a Cracked Beam by Finite Element Method. Journal of Sound and vibration, 273(3), 457-475.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Kemal KOÇYİĞİT

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 24/02/1994

E-posta **:** kkocyigit94@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2017, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (İngilizce)
- **Yüksek Lisans** **:** 2019 - Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **Şantiye Şefi:** 2017-2018, Tunç Yapı Ege Taahhüt Ltd. Şti.
- **Şantiye Şefi:** 2018-Halen, At-Il Modern Yapı İnşaat Tic. VE San. Ltd. Şti.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Koçyiğit, K. & Akbaş, Ş.D. (2019), "Free Vibration Analysis of a Cracked Frame Structure", *3rd International Engineering Research Symposium*, 5-7 Eylül, Düzce-Türkiye.