



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Çatlak içeren bir çerçeve taşıyıcı sistemin zorlanmış titreşim analizi

Forced vibration analysis of a cracked frame

Yazar(lar) (Author(s)): Kemal KOÇYİĞİT¹, Şeref Doğuşcan AKBAŞ²

ORCID¹: 0000-0001-5430-0701

ORCID²: 0000-0001-5327-3406

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koçyiğit K. ve Akbaş Ş. D., “Çatlak içeren bir çerçeve taşıyıcı sistemin zorlanmış titreşim analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1059-1071, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.606499

Çatlak İçeren Bir Çerçeve Taşıyıcı Sistemin Zorlanmış Titreşim Analizi

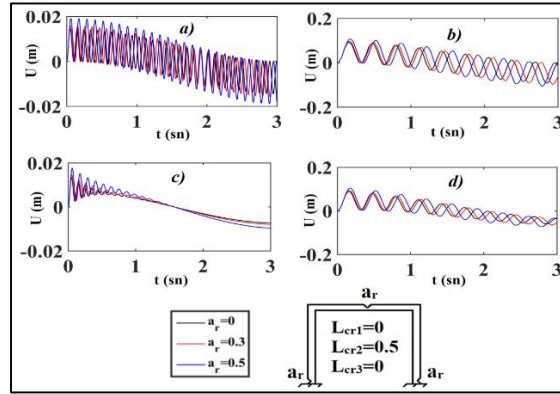
Forced Vibration Analysis of a Cracked Frame

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çatlak parametrelerinin ve sönümün çerçeve taşıyıcı sisteminin dinamik cevaplara olan etkisinin araştırılması/ (Effects of crack parameters and damping on the dynamic responses of the frame structure)
- ❖ Geometrik boyutların çerçevenin çatlak davranışına olan etkileri/ (Effects of geometry dimensions on the crack behavior of the frame structure)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumlarının ve çerçeve boyutlarının sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim cevaplarına olan etkileri sunulmuştur.



Şekil. Farklı çatlak konumları ve çatlak derinliği değerleri için zamana bağlı yer değiştirmeler
Figure. Time responses on the displacements for different crack locations and crack depth

Amaç (Aim)

Çalışmada, çatlak derinliğinin, çatlak konumunun, çerçeve boyutlarının yapının dinamik cevaplarına olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir./ (In this study, effects of crack depth, crack location and dimensions of frame structure on the dynamic responses of frames are investigated in detail.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada, çelikten yapılmış bir çerçeve taşıyıcı düşünülmüştür. Farklı çatlak durumları göz önüne alınmıştır. Problemin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır./ (In this study, the material of the frame structure is considered as Steel. Different crack cases are used. In the solution of the problem, the finite element method is used.)

Özgünlük (Originality)

Bu çalışmanın özgün değeri, literatürde eksik olan çatlaklı çerçeve yapıların sönümlü zorlanmış titreşim davranışlarının incelenmesidir./ The novelty of this study is investigate to damped forced vibration of cracked frame structures.

Bulgular (Findings)

Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir./ (It is observed that there are many differences between the results of damped and undamped properties in the cracked frames.)

Sonuç (Conclusion)

Çatlak konumunun, çatlak derinliğinin ve yapı boyutlarının, kırılma davranışa çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. (It is seen from results, the crack location, the crack depth and dimensions of structure have big influence on the fracture behavior of frame structure.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çatlak İçeren Bir Çerçeve Taşıyıcı Sistemin Zorlanmış Titreşim Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Kemal KOÇYİĞİT, Şeref Doğuşcan AKBAŞ*

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

(Geliş/Received : 19.08.2019 ; Kabul/Accepted : 21.10.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, kenarında çatlaklar bulunan tek açıklıklı bir çerçeve taşıyıcının sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim cevapları incelenmiştir. Çatlaklı çerçevenin titreşim analizleri, Euler-Bernoulli çubuk teorisi çerçevesinde incelenmiştir. Çatlak etkisinden dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, çatlak kesiti veya bölgesinde, kütsüz 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 salıveriminin oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Çatlak esnekliğinin tersi alınarak elde edilen çatlak rijitliğinin sonlu elemanlar modeline eklenmesiyle birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiştir.

Zorlanmış titreşim çözümlerinde zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumunun 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 kıyaslama çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çatlak, çerçeve yapı, zorlanmış titreşim, sonlu elemanlar metodu.

Forced Vibration Analysis of a Cracked Frame

ABSTRACT

In this study, 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 Euler-Bernoulli beam theory. 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 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 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, forced vibration, finite element method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

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 husus 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.

Bu çalışmada, kenarında çatlak içeren, tek açıklıklı bir çerçeve taşıyıcı sistemin dinamik davranışları incelenmiştir. Literatürde, çatlak içeren yapısal elemanların mekanik davranışlarının araştırılması pek çok araştırmacı tarafından yapılmıştır. Konu ile ilgili çalışmaların çoğu, kiriş elemanları üzerinde yapılmıştır. Kiriş, kolon, çerçeve gibi çubuk elemanların çatlak göz önüne bulundurulması yapılmış çalışmaların özeti izleyen aşamada verilmiştir. Tharp [1] kenarında tek çatlak içeren, dikdörtgen kesitli kolon ve kirişlerin sonlu elemanlar analizini incelemiştir. Ostachowicz ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : seref.akbas@btu.edu.tr

Krawczuk [2] kenar çatlaklı bir kirişin titreşim analizini yapmışlardır. Shen vd. [3] kenar çatlaklı, basit mesnetli bir kirişin serbest titreşimini Euler-Bernoulli kiriş teorisi çerçevesinde incelemişlerdir. Nikolakopoulos vd. [4] çerçeve taşıyıcı sistemlerin çatlak analizini yapmışlardır. Krawczuk vd. [5] çatlak içeren kompozit kiriş ve levha elemanların dinamik analizini yapmışlardır. Yokoyama ve Chen [6] kenarında tek çatlakla sahip, Euler-Bernoulli kirişinin titreşim karakteristiklerini, çizgi yayı modeli kullanarak incelemişlerdir. Saavedra ve Cuitino [7] enine çatlak içeren kirişlerin dinamik davranışlarını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Kuntiyawichai ve Burdekin [8] dinamik yükler etkisi altında çatlaklı yapıların kırılma tokluğu ve çatlak bağlantılarını incelemek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Zheng ve Kessissoglou [9] çatlaklı bir kirişin doğal frekanslarını ve mod şekillerini, sonlu eleman yöntemi ile elde etmişlerdir. Gürel ve Kısa [10] düşey yüklere maruz, çatlak içeren narin prizmatik kolonların burkulmasını incelemişlerdir. Gürel [11] birden çok çatlak içeren ince prizmatik dairesel sütunların burkulmasını, transfer matrisi yöntemi ile incelemiştir. Caddemi ve Calio [12] ile Caddemi vd. [13] birden fazla çatlak içeren kolonların stabilitesini incelemişlerdir. Challamel ve Xiang [14] çatlaklı çerçeve, kiriş ve kolonların burkulma analizi incelemişlerdir. Ibrahim vd. [15] kenar çatlaklı çerçeve taşıyıcı sistemlerin titreşim cevaplarını incelemiştir. Chatterjee [16] harmonik yükleme altındaki konsol kirişlerin, doğrusal olmayan titreşim cevaplarından faydalanarak kırılma analizini yapmıştır. Akbaş [17] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş, kenar çatlaklı konsol bir kirişin serbest titreşim analizi üzerine çalışmıştır. Labib vd. [18] birden çok çatlak içeren kiriş ve çerçevelerin serbest titreşim analizini yapmışlardır. Akbaş [19,20] kenar çatlaklı kirişlerin bir impulsif yük altındaki dalga yayılımını incelemiştir. Öztürk vd. [21] çok açıklıklı ve kenarında çatlak içeren çerçeve yapıların periyodik yükleme altındaki dinamik stabilitesini incelemişlerdir. Tan vd. [22] kenar çatlaklı ve değişken kesitli kirişlerin serbest titreşim analizini sonlu elemanlar yöntemi incelemişlerdir. Ayrıca Akbaş [23,24,25,26] nano ve mikro ölçekli çubuk elemanların çatlaklı durumları için dinamik analizlerini yapmıştır.

Literatür çalışmasından görüldüğü üzere, çatlaklı çerçeve yapıların zorlanmış titreşim analizleri ile ilgili yapılmış çalışma sayısı oldukça azdır. Çatlak etkisi göz önüne alınarak yapılmış çalışmaların genelinde kiriş ve kolon elemanlar üzerinde yoğunlaşma görülmüştür. Çatlaklı çerçeve yapılar üzerine yapılmış çalışmaların çoğunda 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.

Çalışmada, çatlaklı çerçevelerin dinamik davranışları, Euler-Bernoulli çubuk teorisi çerçevesinde ele alınıp enerji tabanlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çatlaklı bölümün esnekliği, çatlaktan dolayı meydana gelen yerel esnekliğe bağlı olarak

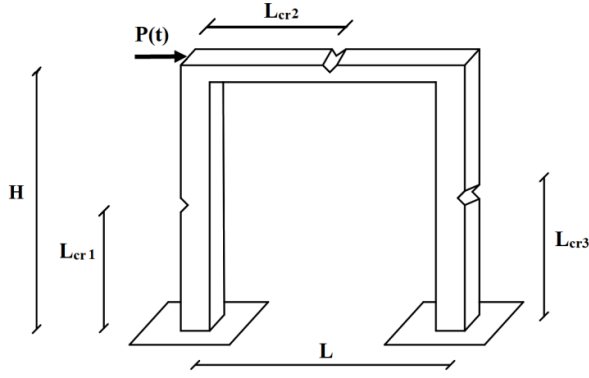
kütsüz ve boyutsuz çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeline eklenen çatlak elemanı eklenerek birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiştir. Yayın rijitliği, kırılma mekaniği teorileri kullanılması ile birlikte açılma modu (Mod1) ve düzlem içi kayma modu (Mod2) ile hesaplanan gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverimin oranlarına ait esneklik matrisinin tersi alınarak türetilmiştir.

Çalışmada, çatlak derinliğinin, çatlak konumunun, çerçeve boyutlarının yapının dinamik cevaplarına olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Sönüm etkileri göz önüne alınarak, çatlaklı çerçeve yapıların 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 alınmış, 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 ile kıyaslama çalışmaları yapılmıştır.

2. TEORİ VE FORMÜLASYONLAR (THEORY AND FORMULATIONS)

Şekil 1 de tek açıklıklı, mesnetleri ankastre, kenarında çatlak içeren H yüksekliğinde, L uzunluğunda, dikdörtgen kesitli bir çerçeve taşıyıcı sistem gösterilmiştir. Şekil 1 de, çatlakın çerçeve elemanlarının farklı yerlerde olması durumlarına göre durumları gösterilmiştir. Çatlakın sol kolonda olması durumundaki konumu sol ankastre mesnetten itibaren L_{c1} , kiriş elemanında olması durumunda sol kolon-kiriş birleşimden itibaren L_{c2} ve sağ kolon elemanında olması durumunda sağ kolon-kiriş birleşimden itibaren L_{c3} olarak tanımlanmıştır. Çatlak derinliği ise, a_r olarak ifade edilmiştir. Zorlanmış titreşim probleminin incelenmesinde, çerçeveye şekil 1 de görüldüğü gibi, sol kolon-kiriş birleşim bölgesine bir yatay tekil (P(t)) yük etkidiği düşünülmüştür.

Çalışmada, zorlayıcı P(t) kuvvetinin 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 sembollerin alt indisi numaralandırılarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Dış dinamik bir yük etkisi altındaki çatlak içeren tek açıklıklı bir çerçeve taşıyıcı sistem (A single span cracked frame structure under dynamic external load)

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 taşıyıcı sisteminin malzeme özelliği lineer-elastik, izotrop ve homojen olduğu kabul edilmiştir.

Probleme ait çatlaksız durum için sonlu elemanlar hareket denklemi izleyen şekilde verilmiştir:

$$[K']\{q'(t)\} + [D']\{\dot{q}'(t)\} + [M']\{\ddot{q}'(t)\} = \{F'(t)\} \quad (1)$$

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

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

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

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

$$\{F'(t)\} = \int_0^{L^e} \{\varphi\}^T F(t) dX \quad (5)$$

Burada, E Young Modülü, A kesit alanı, L çubuk uzunluğu, I kesit atalet momenti, ρ çubuk elemanın kütle yoğunluğu ve $F(t)$ zamana bağlı dış yük, φ şekil fonksiyonu, η viskoz sönüm oranı olup izleyen denklemde ifade edilmiştir.

$$\eta = \frac{c}{E} \quad (6)$$

Burada c sönüm katsayısıdır. Çerçeve taşıyıcı sistemleri oluşturan çubukların doğrultuları farklı olduğundan dolayı, her bir çubuk için kendi yerel eksen takımına göre (2-5) eşitliklerinde elde edilen sonlu elemanlar formülasyonları, global eksen takımına göre dönüştürülerek sonlu elemanlar birleştirme işlemleri yapılır. Global eksen takımına göre sonlu elemanlar ifadeleri izleyen şekilde elde edilir.

$$\{F\} = [T]\{F'\} \quad (7a)$$

$$[K] = [T]^T[K'] [T] \quad (7b)$$

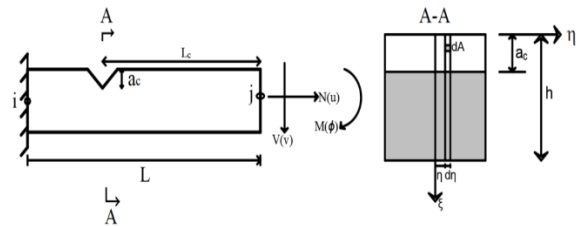
$$[M] = [T]^T[M'] [T] \quad (7c)$$

$$[D] = [T]^T[D'] [T] \quad (7d)$$

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

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

burada, θ her bir çubuk elemanın yatay eksen ile yaptığı açıdır. Şekil 2'de N aksenal kuvvet, V kesme kuvveti ve M eğilme momentine maruz uzunluğu L , alanı A , çatlak içeren, dikdörtgen kesitli bir çubuk elemanı gösterilmiştir. Burada L_c çatlak sağ uçdan itibaren mesafesidir (Zheng ve Kessissoglou, [9]).



Şekil 2. Çatlaklı bir çubuk eleman ve kesiti (A cracked bar element and cross section)

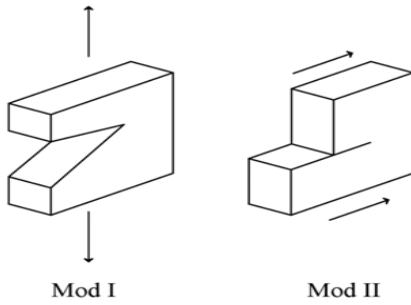
Çatlardan dolayı elemenda oluşan ek şekil değiştirme enerjisi ya da kırılma enerjisi (U_k) izleyen şekilde verilmiştir.

$$U_k = \int_{A_c} G dA \quad (9)$$

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.

$$G = \frac{1}{E'} [(K_{IN} + K_{IV} + K_{IM})^2 + K_{IV}^2] \quad (10)$$

Burada, düzlem gerilme problemi için $E'=E$, düzlem şekil değiştirme için ise $E'=E/(1-\nu^2)$ '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_{IV} ise kesme kuvveti (V) tesirinden kaynaklanan mod 2 gerilme yığılma faktörüdür. Açılma modu (mod 1) ile düzlem içi kayma modu (Mod 2), şekil 3 de gösterilmiştir. Çatlak içeren dikdörtgen kesitli bir eleman için gerilme yığılma faktörlerinin formülasyonları izleyen bağıntılarda verilmiştir (Zheng ve Kessissoglou [9]).



Şekil 3. Kırılma modları (Fracture mods)

$$\begin{aligned} K_{IN} &= \frac{N}{bh} \sqrt{\pi \zeta} F_1 \left(\frac{\zeta}{h} \right), \\ K_{IV} &= \frac{6VL_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left(\frac{\zeta}{h} \right), \quad K_{IM} = \frac{6ML_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left(\frac{\zeta}{h} \right), \\ K_{IIV} &= \frac{V}{bh} \sqrt{\pi \zeta} F_{II} \left(\frac{\zeta}{h} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

(11) eşitliğinde yer alan F_1 , F_2 ve F_{II} fonksiyonlarının açılımı izleyen eşitlikte verilmiştir.

$$F_1(s) = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\frac{\pi s}{2}) 0.752 + 2.02s + 0.37(1 - \sin(\frac{\pi s}{2}))^3}{\pi s \cos(\frac{\pi s}{2})}} \left(s = \frac{\zeta}{h} \right) \quad (12)$$

$$F_2(s) = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\frac{\pi s}{2}) 0.923 + 0.199(1 - \sin(\frac{\pi s}{2}))^4}{\pi s \cos(\frac{\pi s}{2})}} \left(s = \frac{\zeta}{h} \right) \quad (13)$$

$$F_{II}(s) = \frac{1.122 - 0.561s + 0.085s^2 + 0.180s^3}{\sqrt{1-s}} \left(s = \frac{\zeta}{h} \right) \quad (14)$$

Burada ζ çatlak derinliğidir. Paris denkleminin kullanımı ile çatlaktan dolayı oluşan ilave yer değiştirme izleyen şekilde bulunur [9].

$$\delta_i = \frac{\partial \pi_c}{\partial P_i} \quad (i = N, V, M) \quad (15)$$

Çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayıları izleyen eşitlikte bulunur.

$$c_{ij} = \frac{\partial \delta_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2 \pi_c}{\partial P_i \partial P_j} \quad (i = N, V, M) \quad (16)$$

(11) eşitliklerini, eşitlik (9) ile (10)'da yerlerine yazıldığında, çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayıları izleyen şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned} c_{ij} &= \frac{b}{E'} \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \int_0^a \left[\frac{N}{bh} \sqrt{\pi \zeta} F_1 \left(\frac{\zeta}{h} \right) + \frac{6VL_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left(\frac{\zeta}{h} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{6ML_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left(\frac{\zeta}{h} \right) \right]^2 \\ &\quad + \frac{V^2}{b^2 h^2} \pi \zeta F_{II}^2 \left(\frac{\zeta}{h} \right) \} d\zeta \quad (i = N, T, M) \end{aligned} \quad (17)$$

(17) eşitliğin açılımı sonucu, izleyen şekilde esneklik katsayıları elde edilir (Zheng ve Kessissoglou [9]).

$$F(1,1) = c_{11} E' b = 2\pi \int_0^a x F_1^2(x) dx \quad (18)$$

$$F(1,2) = \frac{c_{12} E' b h}{L_c} = 12\pi \int_0^a x F_1(x) F_2(x) dx \quad (19)$$

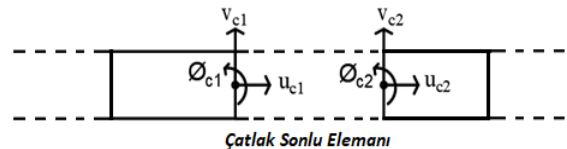
$$F(1,3) = c_{13} E' b h = F(1,2) \quad (20)$$

$$F(2,2) = c_{22} E' b = 2\pi \left[\frac{36L_C^2}{h^2} \int_0^a x F_2^2(x) dx + \int_0^a x F_{II}^2(x) dx \right] \quad (21)$$

$$F(2,3) = \frac{c_{23} E' b h}{L_c} = 72\pi \int_0^a x F_2^2(x) dx \quad (22)$$

$$F(3,3) = c_{33} E' b h^2 = F(2,3) \quad (23)$$

Burada $(x = \frac{\zeta}{h})$ olarak tanımlanmıştır. Çatlak kesitinin çubuk sonlu elemanlar modelinde, çatlak kesitinin olduğu yere uygun, kütleless ve uzunluğu olmayan bir sonlu eleman şekil 4'de gösterildiği gibi ilave edilir.



Şekil 4. Çatlak sonlu eleman modeli (Crack finite element model)

Çatlak elemanın her bir düğüm noktasının esneklik matrisi, (18)-(23) eşitliklerinden elde edilen değerler ile birlikte izleyen matris formunda elde edilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

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.

$$[K_{cr}] = \begin{bmatrix} [C^{-1}] & [-C^{-1}] \\ [-C^{-1}] & [C^{-1}] \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (25)$$

$$[M_{cr}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (26)$$

$$[D_{cr}] = \eta[K_{cr}] \quad (27)$$

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.

$$[K] = [K'] + [K_{cr}] \quad (28)$$

$$[M] = [M'] + [M_{cr}] \quad (29)$$

$$[D] = [D'] + [D_{cr}] \quad (30)$$

$$[K]\{q(t)\} + [D]\{\dot{q}(t)\} + [M]\{\ddot{q}(t)\} = \{F(t)\} \quad (31)$$

Eşitlikler 28-31'de verilen formülasyonlar, çatlak sonlu eleman modelinin eklenmesi ile elde edilen sonlu elemanlar formülasyonlarıdır.

Şekil 1 de yüklemesi ve geometrisi gösterilen çatlaklı çerçevenin, yatay harmonik bir etki altındaki sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim cevapları elde edilmiştir. (31) 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, (31) eşitliğinde verilen hareket denkleminin ivme, hız ve yer değiştirme değerlerini merkezi sonlu farklar yöntemini uygulatarak yaklaşık olarak çözer. Herhangi bir t anında, (31) eşitliği izleyen şekilde ifade edilebilir.

$$[K] {}^t\{q\} + [D] {}^t\{\dot{q}\} + [M] {}^t\{\ddot{q}\} = {}^t\{F\} \quad (32)$$

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

$${}^t\{\ddot{q}\} = \frac{1}{\Delta t^2} ({}^{t-\Delta t}\{q\} - 2 {}^t\{q\} + {}^{t+\Delta t}\{q\}) \quad (33)$$

$${}^t\{\dot{q}\} = \frac{1}{2\Delta t} (-{}^{t-\Delta t}\{q\} + {}^{t+\Delta t}\{q\}) \quad (34)$$

Burada ${}^t\{q\}$, ${}^{t-\Delta t}\{q\}$ ve ${}^{t+\Delta t}\{q\}$ sırasıyla t , $t - \Delta t$ ve $t + \Delta t$ anları için yer değiştirme vektörünü, ${}^t\{q\}$ ile ${}^t\{\ddot{q}\}$ ise sırasıyla t anı için hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. (33) ve (34) eşitliklerinde verilen t anındaki ivme ve hız değerleri (32) eşitliğindeki hareket denklemindeki yerlerine yazılırsa, hareket denklemi yer değiştirme cinsinden izleyen şekilde elde edilir.

$$[M] \frac{({}^{t+\Delta t}\{q\} - 2 {}^t\{q\} + {}^{t-\Delta t}\{q\})}{\Delta t^2} + [C] \frac{({}^{t+\Delta t}\{q\} - {}^{t-\Delta t}\{q\})}{2\Delta t} + [K] {}^t\{q\} = {}^t\{F\} \quad (35)$$

(35) denklemin çözümünde bilinmeyen değer olan ${}^{t+\Delta t}\{q\}$ elde edilip, bir sonraki zaman aralığı için kullanılacak başlangıç değeri olarak işleme devam edilir. (35) 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, (32) denkleminde ${}^0\{\ddot{q}\}$ değeri hesaplanır. Elde edilen ${}^0\{q\}$, ${}^0\{\dot{q}\}$ ve ${}^0\{\ddot{q}\}$ değerleri, (33) ile (34) eşitliklerine yerlerine yazılırsa, ${}^{-\Delta t}\{q\}$ izleyen ifade elde edilir.

$${}^{-\Delta t}\{q\} = \frac{\Delta t^2}{2} {}^0\{\ddot{q}\} - \Delta t {}^0\{\dot{q}\} + {}^0\{q\} \quad (36)$$

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.

$$\Delta t \leq \frac{T_{min}}{\pi} \quad (37)$$

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

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu bölümde farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumlarının ve çerçeve boyutlarının sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim cevaplarına olan etkileri sunulmuştur. Daha önce de şekil 1'de gösterildiği gibi, çatlaklı çerçevenin her bir elemanında ayrı ayrı bulunması durumuna göre etkileri incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda çerçevenin malzeme parametreleri; $E=210$ GPa, $\mu=0.3$, $\rho=7800$ kg/m³ alınmıştır. Çerçevenin geometrik özelliklerinin belirlenmesinde, çerçeve yüksekliği belirli durumlara göre $H=3$ ve 6 m ve seçilmiş olup çerçeve açıklığı ise farklı durumlara göre $L=3$ 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. Özel olarak sönümsüz zorlanmış titreşim cevaplarının elde edilmesinde, formülasyonlardaki viskoz sönüm katsayısı $\eta=0$ alınarak sonuçlara ulaşılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar formülasyonlarının çözümü, MATLAB programında kodları yazılıp sayısal sonuçlar ve grafikler elde edilmiştir. Her bir kiriş ve kolon elemanları 10 sonlu elemana bölünerek, çatlak sonlu elemanı ile birlikte sayısal işlemler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda, çatlak konumunu belirlemek amacıyla, L_{cr} çatlak konum oranı ifadesi kullanılmıştır. Bu ifade çatlak referans konumundan uzaklığının bulunduğu elemana bölümüne denir. Örneğin, L_{cr1} 1. Kolondaki çatlak sol ankastre mesnetten uzaklığının 1. kolon yüksekliğine bölümüne denir. Benzer şekilde L_{cr2} ve L_{cr3} sırasıyla kiriş ve 2. Kolon elemanlardaki çatlak konum oranlarıdır.

Çalışmada elde edilen formülasyonlar ve Matlab programında yazılan kodların doğruluğunu test etmek amacıyla birkaç kıyaslama çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, Ibrahim vd. [15] tarafından yapılmış olan tek açıklıklı çatlaklı bir çerçevenin serbest titreşim analizi çalışmasından elde edilen özel sonuçlar, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile çizelge 1'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma çalışmasında, Ibrahim ve diğ. [15] tarafından kullanılan malzeme ve geometrik parametreler; $a_r=0.5$, $E=200$ GPa, $\rho=7900$ kg/m³, $b=20$ mm, $h=5$ mm, $L=100$ mm ve $H=200$ mm'dir. Çizelge 1'de görüldüğü üzere, Ibrahim vd. [15] sunulan frekans değerleri ile bu çalışmada elde edilen sonuçların yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 1. Karşılaştırma çalışması (Comparison study)

	Frekanslar (Hz)	
	Ibrahim vd. [15]	Sunulan
Çatlaksız	117.2300	117.2582
$L_{cr}=0$	112.3300	110.8418
$L_{cr}=1$	115.3000	114.4427

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

Şekil 5-6 da kolon elemanında tek çatlak için, şekil 7-8 de kiriş elemanında tek çatlak için, şekil 9-11 de her iki kolon elemanında birer çatlak için, şekil 12-14 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 $\eta=0.002$ alınmıştır.

Zorlanmış titreşim grafiklerinden görüldüğü üzere, çatlak konumun ankastre mesnette olması durumunda, çerçevenin daha fazla yer değiştirdiğinin görüldüğü ve çatlak yapıya olan etkisinin daha fazla arttığı görülmüştür. Çerçeve taşıyıcı sistemin en çok zorlandığı yer olan ankastre mesnet bölgesi olduğundan ve en büyük gerilmelerin bu bölgelerde meydana geldiğinden dolayı çatlak en çok etkisi bu bölgelerde bulunması durumunda ortaya çıkmaktadır. Çatlak konumunun ankastre mesnetten üst kısımlara doğru gidildikçe, zorlanmış titreşim yer değiştirmelerinin önemli bir oranda azaldığı ve çatlak 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 görülmektedir. Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Sönüm etkisindeki çerçeve yapıda ortaya çıkan yer değiştirmelerin sönümsüz duruma göre azaldığı belirlenmiştir. Çerçeve yüksekliğinin artmasıyla yükün sönümlemesinin tam olarak gerçekleşmediği görülmüştür. Bunun nedeni olarak, yüksekliğin artması ile birlikte çerçevenin esnekliğinin arttığı ve doğal olarak titreşimi daha uzun sürede sönümlemeye yapacağıdır. Kiriş uzunluğunun artmasıyla yer değiştirme az miktarda artmaktadır. Kiriş elemanında uzunluğun artmasıyla birlikte yükün sönümlemesi gerçekleşmektedir. Ayrıca kiriş elemanının ortasında çatlak olması durumu yer değiştirmeye herhangi bir değişiklik getirmemiştir.

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

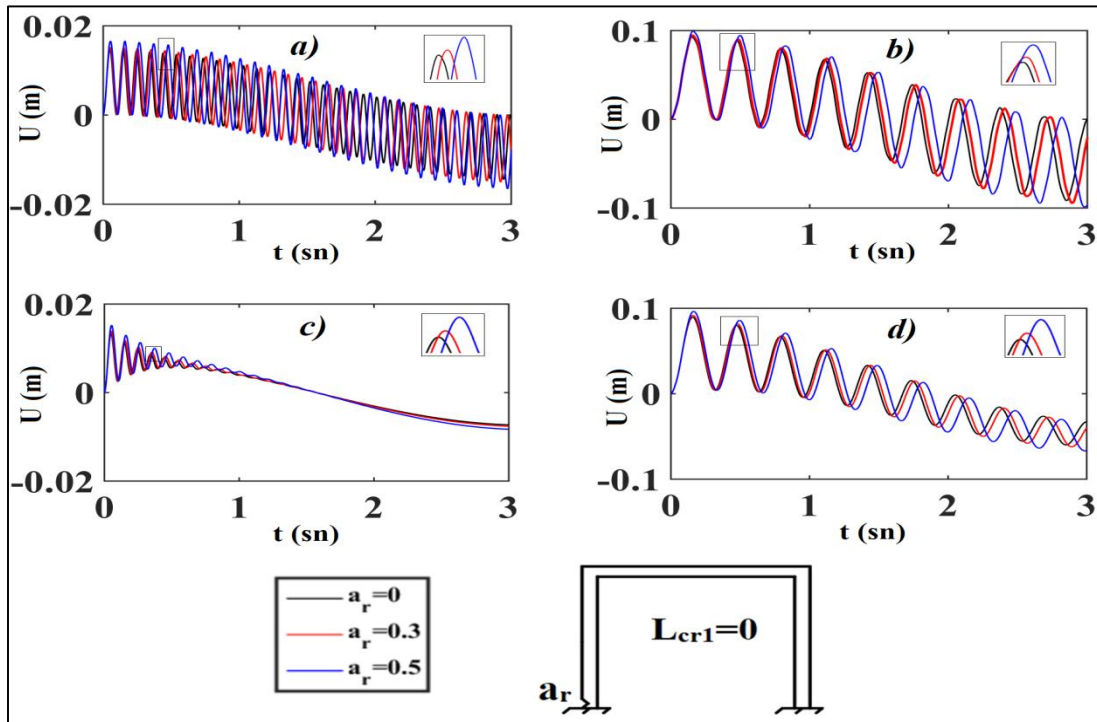
Zorlanmış titreşim sonuçlarında elde edilen bir başka bulgu ise, kolon yüksekliğinin artması ile yer değiştirmelerin oldukça arttığı ve çatlak derinlik oranının (a_r) çatlak davranışına olan etkisidir. Çerçeve yüksekliği arttığında oluşan çatlakların etkisinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak,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

4. SONUÇ (CONCLUSION)

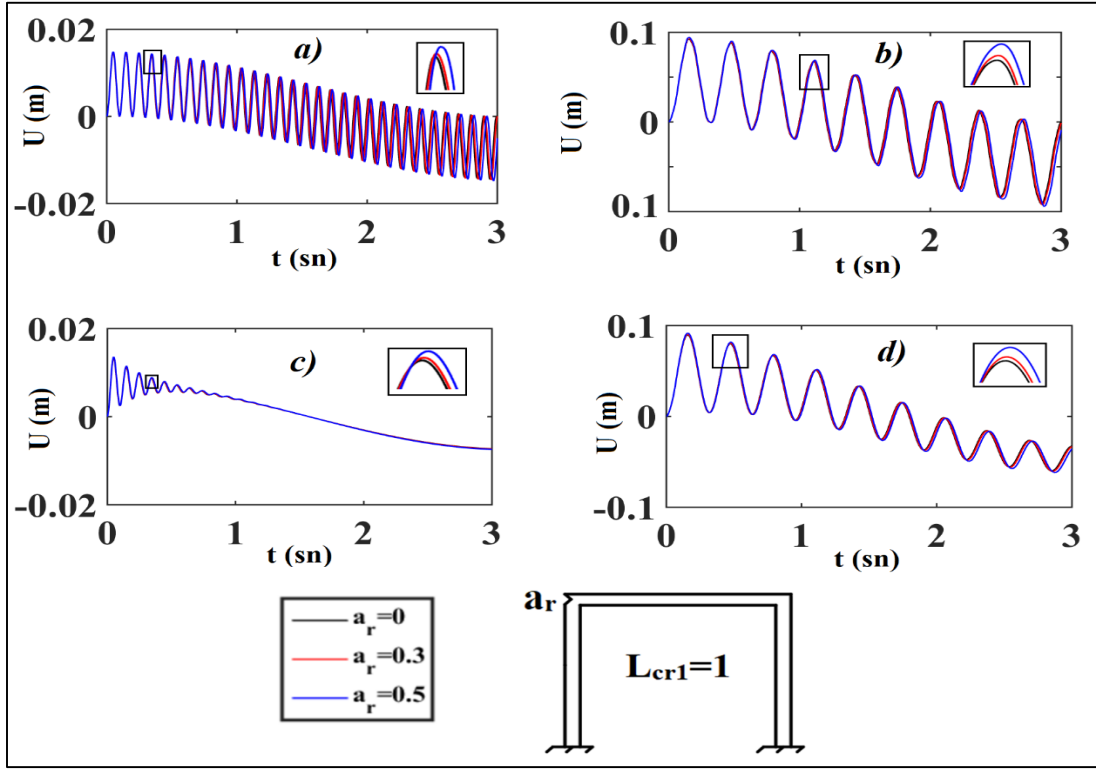
Çalışmada çatlaklı, tek açıklıklı bir çerçevenin dinamik cevapları incelenmiştir. Dinamik cevapların incelenmesinde, sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim sonuçları çatlak derinlikleri, çatlak konumları ve çerçeve geometrisine bağlı olarak elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Çatlaklı çerçevenin dinamik incelenmesinde, Euler-Bernoulli çubuk teorisi kullanılıp, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çatlak etkisinden dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, çatlak kesiti veya bölgesinde, kütleli ve boyutsuz bir çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Çatlaktan dolayı ortaya çıkan yerel esneklik Mod1 ile Mod2 kırılma modları kullanılmış ve elde edilen gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverinin oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Çatlak sonlu eleman modeli, sistem sonlu elemanlar modeline eklenmesi ile birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiş 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 ve farklı değerlerdeki çerçeve yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak dinamik cevaplar elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

Sayısal sonuçlar ve şekillerden elde edilen verilerden şu sonuçlara varılmıştır;

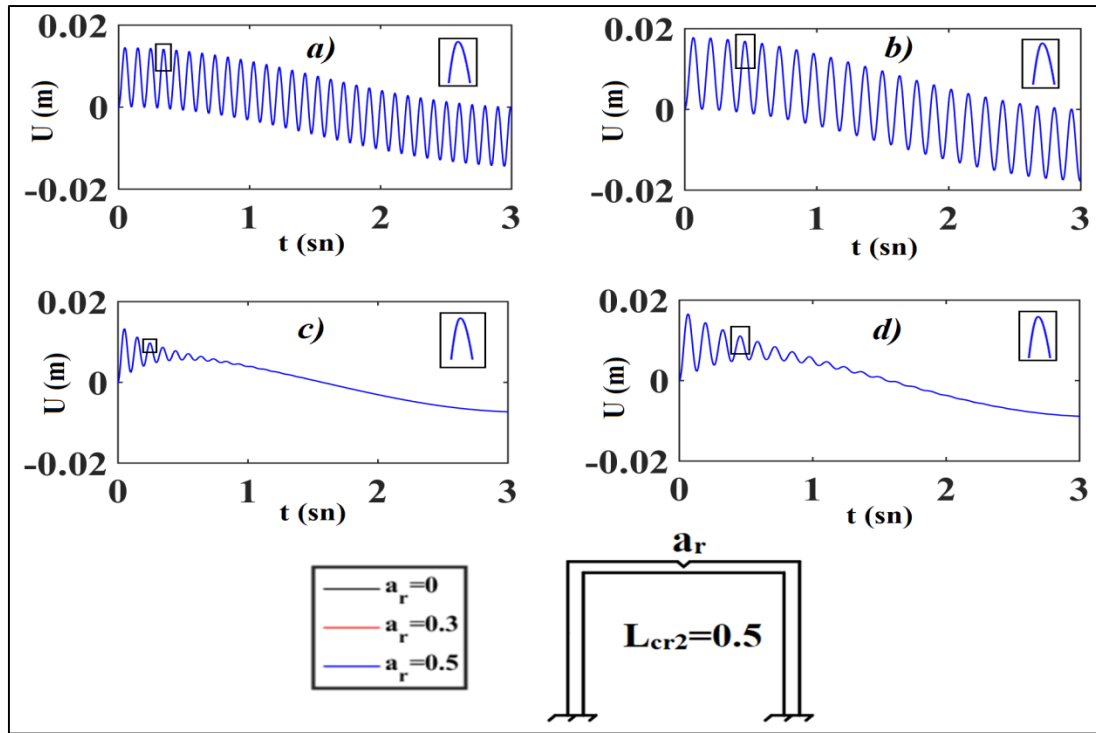
- Çatlak konumunun ankastre mesnetten üst kısımlara doğru gidildikçe, dinamik sonuçların önemli bir oranda azaldığı görülmüştür.
- Çatlağın kolonlarda bulunması, kirişlerden bulunmasından daha fazla çerçeve yapıya etkidiği görülmüştür.
- Farklı çatlak derinlik oranları arasındaki farklar, çatlak konumlarına ve yapı boyutlarına bağlı olarak göre gözle görülür bir şekilde değişmektedir.
- Kolon yüksekliğinin artmasıyla çatlağın titreşime olan etkisinin daha az olduğu görülmektedir.
- Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşturan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir.
- Çatlak sayısının artması, yapının frekanslarına azaltıcı ve dinamik yerdeğiştirmelere artırıcı etkisi olduğu görülmüştür.
- Çatlak konumunun ve yapı boyutlarının, kırılma davranışa çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.



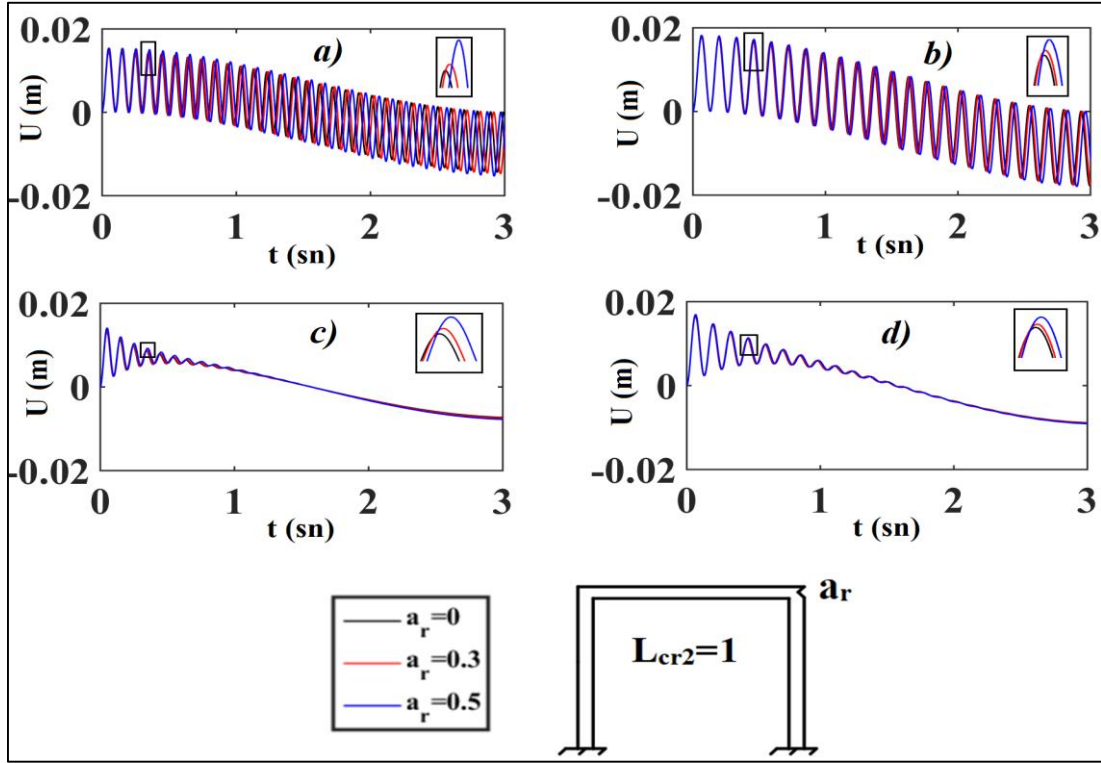
Şekil 5. $L_{cr1}=0$ çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve $H=3$ m, b) Sönümsüz durum ve $H=6$ m, c) Sönümlü durum ve $H=3$ m, d) Sönümlü durum ve $H=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=0$ a) undamped and $H=3$ m, b) undamped and $H=6$ m, c) damped and $H=3$ m, d) damped and $H=6$ m)



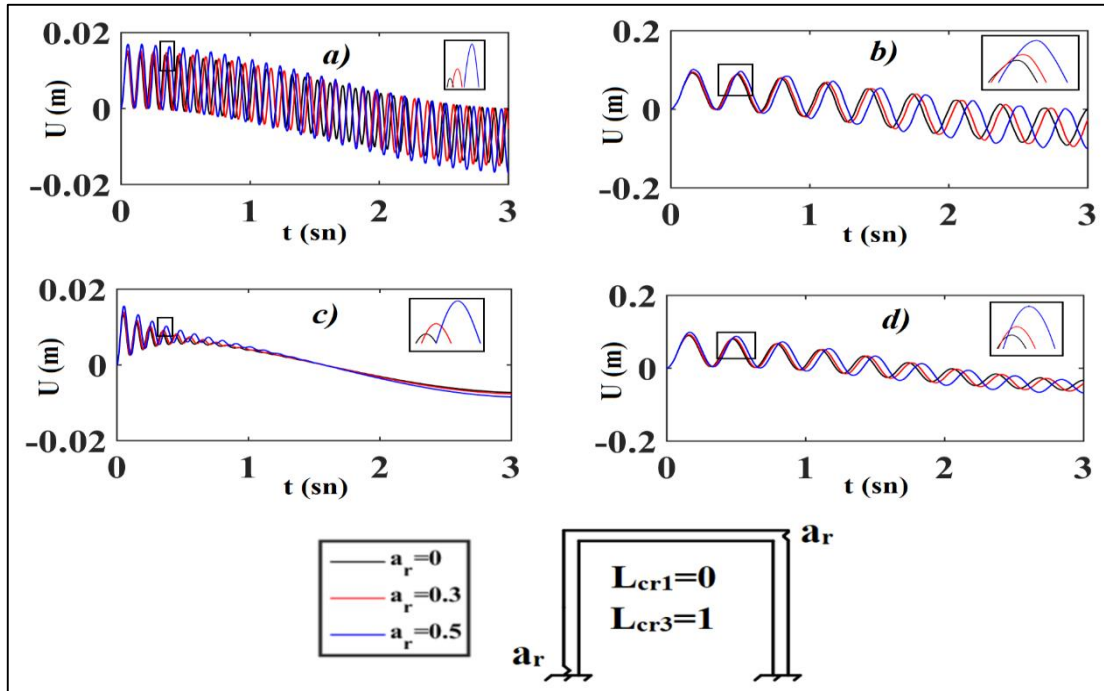
Şekil 6. $L_{cr1}=1$ çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve $H=3$ m, b) Sönümsüz durum ve $H=6$ m, c) Sönümlü durum ve $H=3$ m, d) Sönümlü durum ve $H=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=1$ a) undamped and $H=3$ m, b) undamped and $H=6$ m, c) damped and $H=3$ m, d) damped and $H=6$ m)



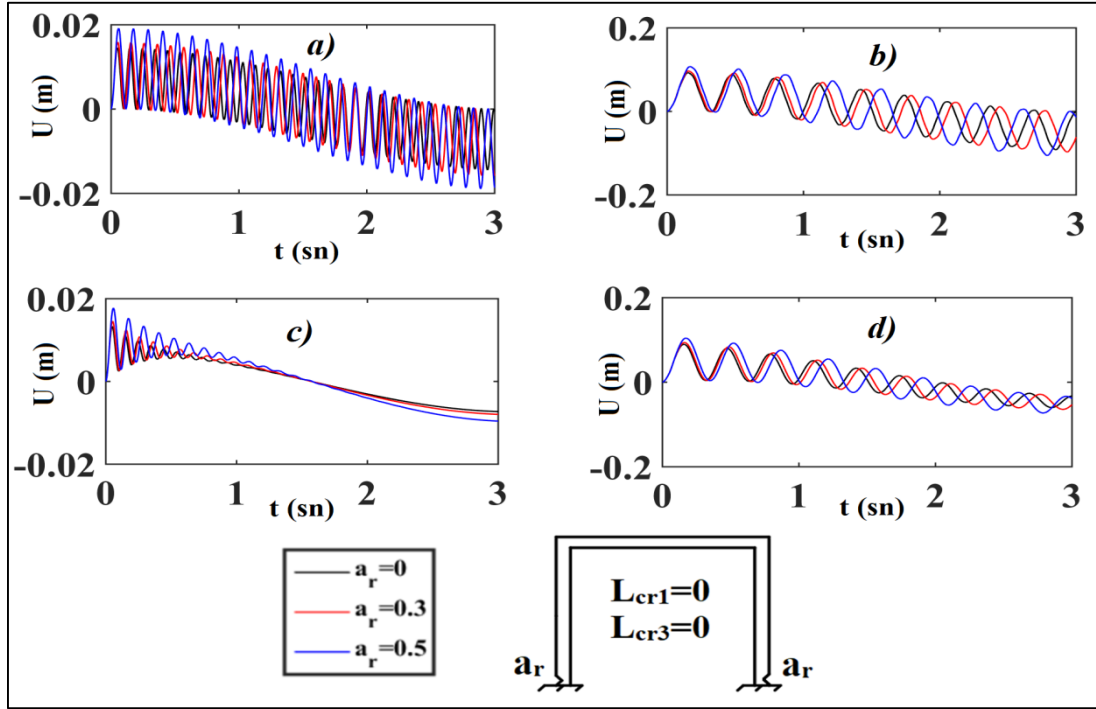
Şekil 7. $L_{cr2}=0.5$ çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve $L=3$ m, b) Sönümsüz durum ve $L=6$ m, c) Sönümlü durum ve $L=3$ m, d) Sönümlü durum ve $L=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr2}=0.5$ a) undamped and $L=3$ m, b) undamped and $L=6$ m, c) damped and $L=3$ m, d) damped and $L=6$ m)



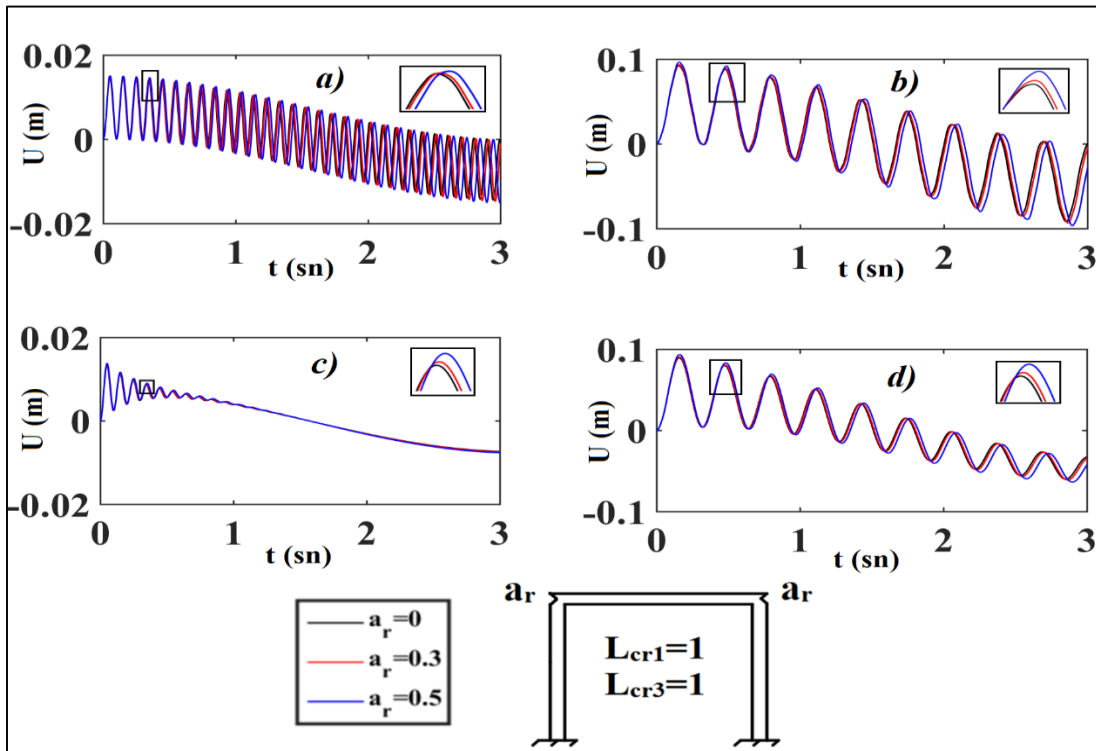
Şekil 8. $L_{cr2}=1$ çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve $L=3$ m, **b)** Sönümsüz durum ve $L=6$ m, **c)** Sönümlü durum ve $L=3$ m, **d)** Sönümlü durum ve $L=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr2}=1$ **a)** undamped and $L=3$ m, **b)** undamped and $L=6$ m, **c)** damped and $L=3$ m, **d)** damped and $L=6$ m)



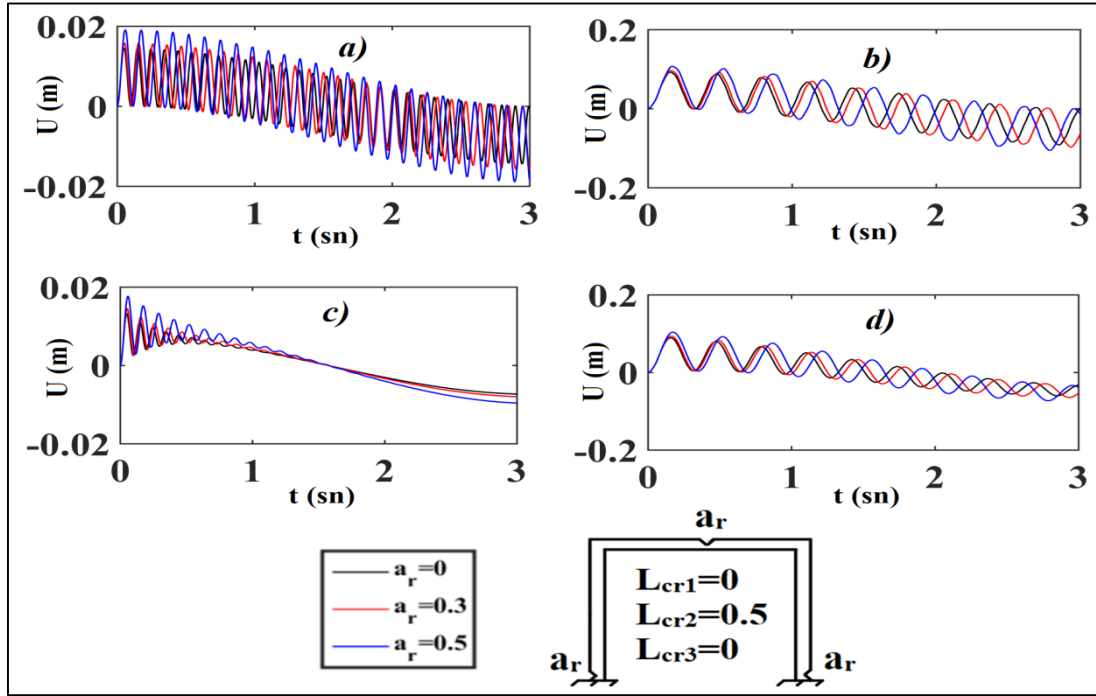
Şekil 9. $L_{cr1}=0$ ve $L_{cr3}=1$ çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve $H=3$ m, **b)** Sönümsüz durum ve $H=6$ m, **c)** Sönümlü durum ve $H=3$ m, **d)** Sönümlü durum ve $H=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=0$ and $L_{cr3}=1$ **a)** undamped and $H=3$ m, **b)** undamped and $H=6$ m, **c)** damped and $H=3$ m, **d)** damped and $H=6$ m)



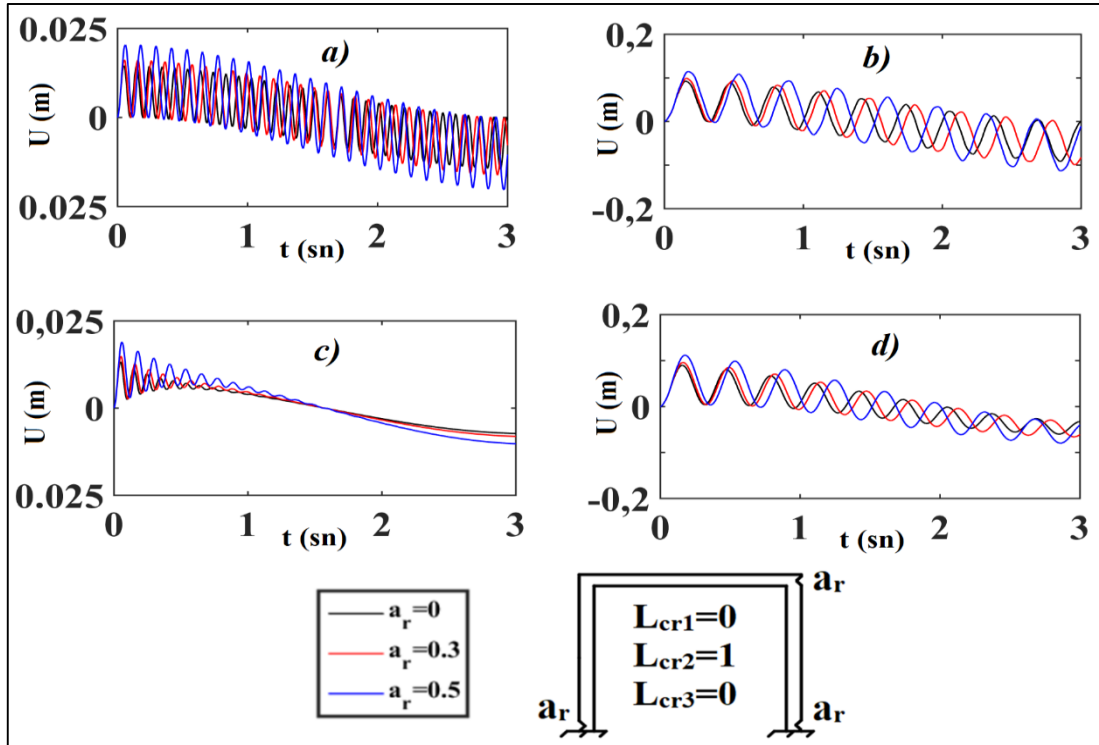
Şekil 10. $L_{cr1}=0$ ve $L_{cr3}=0$ çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve $H=3$ m, b) Sönümsüz durum ve $H=6$ m, c) Sönümlü durum ve $H=3$ m, d) Sönümlü durum ve $H=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=0$ and $L_{cr3}=0$ a) undamped and $H=3$ m, b) undamped and $H=6$ m, c) damped and $H=3$ m, d) damped and $H=6$ m)



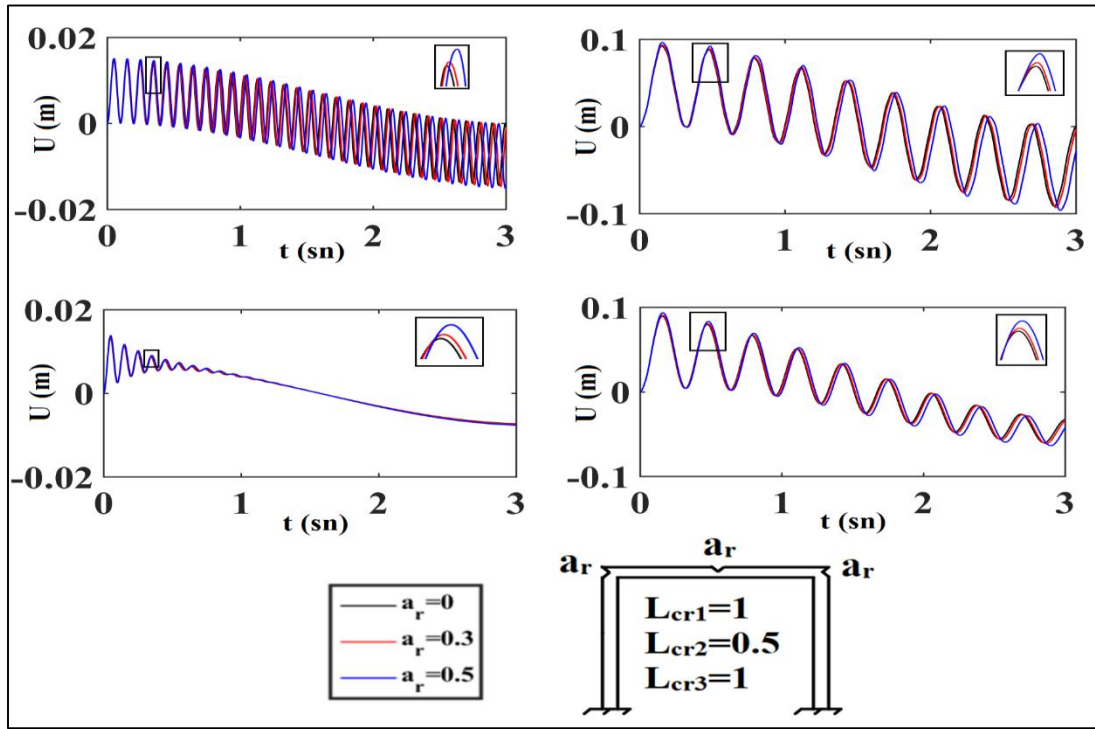
Şekil 11. $L_{cr1}=1$ ve $L_{cr3}=1$ çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve $H=3$ m, b) Sönümsüz durum ve $H=6$ m, c) Sönümlü durum ve $H=3$ m, d) Sönümlü durum ve $H=6$ m (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=1$ and $L_{cr3}=1$ a) undamped and $H=3$ m, b) undamped and $H=6$ m, c) damped and $H=3$ m, d) damped and $H=6$ m)



Şekil 12. $L_{cr1}=0$, $L_{cr2}=0.5$ 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 (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=0$, $L_{cr2}=0.5$ and $L_{cr3}=0$ **a)** undamped and $H=3$ m, **b)** undamped and $H=6$ m, **c)** damped and $H=3$ m, **b)** damped and $H=6$ m)



Şekil 13. $L_{cr1}=0$, $L_{cr2}=1$ 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 (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=0$, $L_{cr2}=1$ and $L_{cr3}=0$ **a)** undamped and $H=3$ m, **b)** undamped and $H=6$ m, **c)** damped and $H=3$ m, **b)** damped and $H=6$ m)



Şekil 14. $L_{cr1}=1$, $L_{cr2}=0.5$ 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 (Time responses on the displacements for crack location $L_{cr1}=1$, $L_{cr2}=0.5$ and $L_{cr3}=1$ **a)** undamped and $H=3$ m, **b)** undamped and $H=6$ m, **c)** damped and $H=3$ m, **b)** damped and $H=6$ m

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma “Çatlak İçeren Çerçeve Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş ve Bursa Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne desteklenmiştir. Proje Numarası: 172L06.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tharp T.M., "A Finite Element for Edge-Cracked Beam Columns", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24: 1941-1950, (1987).
- [2] Ostachowicz W.M. and Krawczuk M., "Vibration Analysis of a Cracked Beam", *Computers & Structures*, 36: 245-250, (1990).
- [3] Shen M. H. and Pierre C., "Free Vibrations of Beams with a Single-Edge Crack", *Journal of Sound and Vibration*, 170: 237-259, (1994).
- [4] Nikolakopoulos P.G., Katsareas D.E. and Papadopoulos C.A., "Crack Identification in Frame Structures", *Computers & structures*, 64: 389-406, (1997).
- [5] Krawczuk M., Ostachowicz W. and Zak A., "Dynamics of Cracked Composite Material Structures", *Computational Mechanics*, 20: 79-83, (1997).
- [6] Yokoyama T. and Chen M. C., "Vibration Analysis of Edge-Cracked Beams Using a Line-Spring Model", *Engineering Fracture Mechanics*, 59: 403-409, (1998).
- [7] Saavedra P.N. and Cuitino L.A., "Crack Detection and Vibration Behavior of Cracked Beams", *Computers & Structures*, 79:1451-1459, (2001).
- [8] Kuntiyawichai K. and Burdekin F.M., "Engineering Assessment of Cracked Structures Subjected to Dynamic Loads Using Fracture Mechanics Assessment", *Engineering Fracture Mechanics*, 70:1991-2014, (2003).
- [9] Zheng D.Y. and Kessissoglou N. J., "Free Vibration Analysis of a Cracked Beam by Finite Element Method", *Journal of Sound and vibration*, 273:457-475, (2004).
- [10] Gürel M.A. and Kısa M., "Buckling of Slender Prismatic Columns with a Single Edge Crack Under Concentric Vertical Loads", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 29:185- 193, (2005).
- [11] Gürel M. A., "Buckling of Slender Prismatic Circular Columns Weakened by Multiple Edge Cracks", *Acta Mechanica*, 188:1-19, (2007).
- [12] Caddemi S. and Caliò I., "Exact Solution of the Multi-Cracked Euler- Bernoulli Column", *International Journal of Solids and Structures*,45:1332-1351, (2008).
- [13] Caddemi S., Caliò I. and Cannizzaro F., "The Influence of Multiple Cracks on Tensile and Compressive Buckling of Shear Deformable Beams", *International Journal of Solids and Structures*, 50:3166-3183, (2013).

- [14] Challamel N. and Xiang Y., "On the Influence of the Unilateral Damage Behaviour in the Stability of Cracked Beam/Columns", *Engineering Fracture Mechanics*, 77:1467-1478, (2010).
- [15] İbrahim A.M., Öztürk H. And Sabuncu M., "Vibration Analysis of Cracked Frame Structures", *Structural Engineering and Mechanics*, 45: 33-52, (2013).
- [16] Chatterjee A., "Nonlinear Dynamics and Damage Assessment of a Cantilever Beam with Breathing Edge Crack", *Journal of Vibration and Acoustics*, 133: 051004, (2011).
- [17] Akbaş Ş.D., "Free Vibration Characteristics of Edge Cracked Functionally Graded Beams by Using Finite Element Method", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4: 4590-4597, (2013).
- [18] Labib A., Kennedy D. and Featherston C., "Free Vibration Analysis of Beams and Frames with Multiple Cracks for Damage Detection", *Journal of Sound and Vibration*, 333: 4991-5003, (2014).
- [19] Akbaş Ş.D., "Wave Propagation Analysis of Edge Cracked Circular Beams under Impact Force", *Plos One*, 9: 1-8, (2014).
- [20] Akbaş Ş.D., "Wave Propagation in Edge Cracked Functionally Graded Beams Under Impact Force", *Journal of Vibration and Control*, 22: 2443-2457, (2014).
- [21] Öztürk H., Yashar A. and Sabuncu M., "Dynamic Stability of Cracked Multi-Bay Frame Structures", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 23:715-726, (2016).
- [22] Tan G., Liu Z., Shan J. and Wu C., "Direct and Inverse Problems on Free Vibration Analysis of Cracked Non-Uniform Beams Carrying Spring-Mass Systems by Finite Element Method", *Journal of Vibroengineering*, 14:7-12, (2017).
- [23] Akbaş Ş.D., "Free vibration of edge cracked functionally graded microscale beams based on the modified couple stress theory ", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17: 1750033, (2017).
- [24] Akbaş Ş.D., "Forced vibration analysis of cracked nanobeams", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 392, (2018).
- [25] Akbaş Ş.D., "Forced vibration analysis of cracked functionally graded microbeams", *Advances in Nano Research*, 6: 39-55, (2018).
- [26] Akbaş Ş.D., "Axially Forced Vibration Analysis of Cracked a Nanorod", *Advances in Nano Research*, 50: 63-68, (2019).