

ÇİFT KÖPRÜLÜ ASKI TİP KREN SİSTEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE MODAL ANALİZİ

¹Sahin YILDIRIM , ²Emir ESİM 

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE
¹sahiny@erciyes.edu.tr, ²emiresim@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 30.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2019)

ÖZ: Doğal frekanslar cisimlerin kütle ve esnekliğine bağlı olarak belirlenen bir parametredir. Kren sistem elemanlarının hepsi birbiri ile temasta olmasından dolayı bir bütün olarak tasarlanıp frekansların belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle kren sisteminin çalışma şartlarına göre üzerinde araba bulunması ve sistemde yapının yük ile hareket etmesi sebebi ile kren sistemi bir bütün olarak modellenmiştir. Ayrıca kren sistemlerinde köprü grubunun hareket ettiği taşıyıcı çerçevelerde dikkate alınarak modal analizler Sonlu Elamanlar Metodu (SEM) ile yapılmıştır. Köprü grubu, kaldırma grubu ve yük ile tasarlanan kren sisteminde; araba grubunun ve yükün köprü başında ve ortasında olması durumlarına göre de analizler yapılmıştır. Belirtilen şartlara göre doğal frekans ve mod şekilleri elde edilerek, karşılaştırmalar yapılmış ve tasarım özelliklerinin sonuçlar üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Köprülü kren, Sonlu elemanlar metodu, Modal analiz, Mekanik titreşimler

Modal Analysis of Double Beam Overhead Type Crane Systems by Finite Element Method

ABSTRACT: Natural frequencies are a parameter determined by the mass and flexibility of the bodies. Since all the crane system elements are in contact with each other, they should be designed as a whole, and their frequencies should be determined. Therefore, the crane system is modelled as a whole system due to the presence of cars on the crane system and the movement of the structure with the load. In addition, modal analysis was performed by using finite element method in crane systems by taking into consideration the carrier frames in which the bridge group moves. In the crane system designed with bridge group, lifting group and load; analyses were made according to the fact that the car group and the load were at the beginning and middle of bridge. Natural frequency and mode shapes are obtained according to the specified conditions, comparisons have been made and the effects of the design characteristics on the results are emphasized.

Key Words: Bridged crane, Finite element method, Modal analysis, Mechanical vibrations

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislikte birçok yapıda bazen çevresel dış etkenlerden bazen de kaynağı tespit edilemeyen nedenlerden dolayı titreşimler oluşmaktadır. Meydana gelen bu titreşimler sistemin zarar görmesine neden olabilecek kritik etkiler oluşturabilmektedir. Bahsi geçen bu titreşimlerin belirlenmesinde incelenmesi gereken önemli konular 'doğal frekans' ve 'rezonans' konularıdır. Bu nedenle tasarlanan

yapının titreşim özelliklerini tahmin etmek için tasarım sürecinin modal analizi önemli bir adım olarak kabul edilir. Modal analizin amacı doğal frekansları ve bu frekanslara karşılık gelen mod davranışlarını belirlemektir. Kren sistemleri üzerinde yapılan çoğu çalışmalar kren sistemi kirişler ve davranışları üzerinde olmuştur. Bu konuda yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: Kren kirişleri üzerinde teorik olarak en kapsamlı çalışma Fryba tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kren üzerinde hareket eden yüklerin etkisi ile yapı ve katıların titreşimleri incelenmiştir. (Fryba,1999).

K.H. Low tarafından yapılan çalışmada çoklu kütle taşıyan kirişler için öz fonksiyonlar kullanılarak titreşim analizi yapılmıştır polinom yaklaşımlı mod analizi hem analitik hem de deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma sonuçları önerilen modeller için geçerli sonuçlar vermiştir (Low,1997). K.H. Low diğer bir çalışmasında ise Bir Euler Bernoulli kirişinin yoğunlaşmış kütle ve herhangi bir noktasındaki kütle taşıması durumunda doğal frekanslarının karşılaştırma çalışması yapılmıştır (Low,1997). Cha tarafından yapılan çalışmalarda; farklı noktalarda toplu kütle taşıyan lineer elastik yapıların serbest titreşimleri ile alakalı yaygın olarak kullanılan analiz yaklaşımlarının sınıflandırılması, yaklaşık ve tam analizler hakkında çalışmalar genellenerek özetlenmiştir (örneğin Lagrange yaklaşımı, Dinamik Green fonksiyon yaklaşımı, Laplace transformu, analitik ve nümerik çözüm metotları) (Cha,2005), (Cha,2002), (Cha, 1997).

J. Wu, A.R. Whittaker ve M.P. Cartmell tarafından yapılan çalışmada zamana bağlı olarak hareket eden yükler altındaki yapıların dinamik davranışlarının tespiti standart paket analiz programları ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle analizler tek kiriş üzerinde hareket eden tekil kütle için gerçekleştirilerek örneklendirilmiş ve daha sonra aynı metodoloji iki boyutta hareket edebilen mobil portal kren için tekrarlanmıştır (Wu,2001). W. Yang, Z. Zhang ve R. Shen tarafından yapılan çalışmada; bir kule kren modeli ele alınırken sistem dönebilen ve aynı zamanda hareket eden taşıyıcı ile serbest olarak mafsallanmış kiriş üzerinde sarkaç hareketi ile taşınan küresel şekilde gösterilmiş faydalı yük olarak modellenmiştir. Serbest mafsallanmış ve dönebilen kiriş Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre matematiksel modeli oluşturulmuştur. Faydalı yük noktasal kütle olarak modellenerek, kütleli elastik kablo ile dönebilen serbest mafsallı kirişe bağlanmıştır. Hamilton prensibine göre hareket yükleri kiriş düzlemi içinde ve dışında ele alınarak hareket denklemleri çıkarılmıştır(Yang,2007). Abu Hilal, Euler Bernoulli kirişlerinin zorlanmış titreşimini Green fonksiyonlarına dayalı dinamiği üzerine çalışmalar yapmıştır (Abu-Hilal, 2003).

Wu, 3 boyutlu portal vincin sonlu elemanlar modeli ve deneysel model analizini yaparak dinamik analizini gerçekleştirmiştir (Wu, 2006). Malgaca ve diğ. dinamik şekil değiştirme ölçümü askı tip krene uygulamalar ve kiriş için SEM modeli ile deneysel gerilme değerlerini karşılaştırmışlardır (Malgaca ve diğ, 2008).

Pesterev ve arkadaşları, üzerinde birçok hareketli salınım yapan elastik kirişlerin dinamik cevabı hakkında çalışmalar yapmış ve sistem titreşimleri üzerinde salınım yapan osilatörlerin sistemin titreşim dinamiğini daha da karmaşık hale getirdiğini göstermişlerdir (Pesterev,2001). Pesterev ve Bergman yine kiriş üzerinde hareketli osilatör olan sistem için yeni bir çözüm metodu geliştirmişler ve etkinliğini nümerik çözümlerle göstermişlerdir (Pesterev,2000).

Gasic ve diğ. yine osilatör taşıyan farklı yay katsayıları ve farklı hızlara göre kirişin dinamik cevabı üzerine çalışmalar yaparak sistem üzerine etkilerini incelemişlerdir (Gasic ve diğ.,2011). Zirnic ve diğ. portal vinç üzerinde elastik olarak bağlanmış hareket eden bir cismin etkilerini analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile açıklamaya çalışmışlardır. Hareketli cismin atalet etkileri sistemin diferansiyel denklemi elde edilirken sisteme dahil edilmiş, yine aynı şekilde sistemim sönümü de dahil edilerek sistemde hızın, ivmenin ve süspansiyon karakteristiklerinin etkileri çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin kren tasarımında kullanılabilir bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir (Zirnic ve diğ., 2015).

Yıldırım ve Esim tarafından yapılan çalışmada; köprülü krenlerde üzerinde farklı araba sayılarının dikkate alındığı ve aynı yükün taşınmasında köprünün bir kiriş veya çift kiriş olması durumunda farklı çalışma hızlarına göre kirişin orta noktalarında meydana gelen dinamik etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir (Yıldırım, 2017). Azeloğlu ve arkadaşları, kren kirişlerinin hareketli

yük altında teorik ve deneysel deformasyon analizi üzerinde çalışmışlardır. Burada kiriş olarak içi dolu profil dikkate alınmış ve kiriş üzerinde meydana gelen dinamik etkilerin çözümü için numerik çözüm yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamak amaçlanmıştır. Nümerik çözümle deneysel elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kiriş modelleri için nümerik çözüm yaklaşımlarının etkinliği gösterilmeye çalışılmıştır (Azeloğlu,2015). Yıldırım ve Esim, sonlu elemanlar analizini kullanarak çok arabalı çift köprülü gezer vinç sisteminin serbest titreşim ve harmonik analizi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir (Yıldırım, 2019), (Yıldırım, 2019).

Bu çalışmanın ana amacı kren sisteminin titreşim davranışlarının belirlenmesidir. Bu kapsamda kren sisteminin, simülasyon ortamında titreşim biçimleri ortaya konulacak ve buradan elde edilen sonuçlar daha sonra yapılacak deneyler ile doğrulanacaktır. Kren sistemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların sadece kirişler üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Fakat kren sistemleri çalışma esnasında birbiri ile temas halinde bulunduğundan dolayı sadece kirişlerin incelenmesi doğru bir yaklaşım değildir. Kren sistemleri çalışma esnasında üzerinde araba, yük ve halat bağlantısı ile birbiri ile temasta olmasından dolayı analiz gerçekleştirilirken bütüncül olarak düşünülmesi gerekmektedir. Çünkü kren sistemlerinin serbest titreşim davranışları kütle ve esnekliğe bağlı olarak değişmesinden dolayı araba, yük ve halatında dikkate alınması gereklidir. Bu çalışma ile bu durum dikkate alınmış ve kren sistemlerinde analiz modeli hazırlanırken gerçek kren modelini oluşturan köprü grubu, taşıyıcı çerçeve, kaldırma gurubu halat ve yük durumlarına göre farklı şartlar dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kren sisteminde kaldırma grubunun köprü üzerindeki konumları da dikkate alınarak modelleme ve analizler yapılmıştır. Bu çalışma literatürdeki benzer çalışmalardan farkı analiz modeli hazırlanırken gerçek durumla ilgili tüm durumlar göz önünde bulundurularak buna uygun analizler yapılması ve krenin bir bütün ve kren kirişi olarak ayrı olarak düşünüldüğünde kirişlerin ana davranışı arasındaki farklılıkların belirlenmesidir. Elde edilen bulgular sonuç kısmında detaylı bir biçimde ifade edilmiştir.

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Modal analizdeki ana varsayım, sistemin lineer olması ve sistemdeki herhangi bir doğrusal olmayan durumun göz ardı edilmesidir (Abdullah, 2012). Sistemi tarifleyen çok serbestlik dereceli lineer yapıya dönüşen yapının titreşim modeli aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$[m] \ddot{x}(t) + [c] \dot{x}(t) + [k] x(t) = f(t) \quad (1)$$

Burada; [M] kütle matrisi, [C] sönüm matrisi, [K] rijitlik matrisi, $x(t)$ sistem deplasman cevabı vektörü; $f(t)$ sisteme etki eden kuvvet vektörü olarak ifade edilir.

Sonlu elemanlar modelinde çok serbestlik dereceli titreşim sistemlerinde sönümleme olmadığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla Denklem 2 aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$[m] \ddot{x}(t) + [k] x(t) = 0 \quad (2)$$

Sonlu elemanlar yöntemindeki modal analiz temel teorisi, koordinat dönüşümüyle fiziksel koordinatları değiştirmek için doğal koordinatları kullanmaktadır.

Bağımlı hareket denklemi ve birleştirilmiş denklemler bağımsız diferansiyel denklemlere dönüştürülür. Denklem 2 de $x(t)$ fizik koordinatlarını modal koordinatlara dönüştürmek için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$x(t) = [u] \Psi \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte [u] modal matrisidir, Ψ modal koordinatlarıdır. Denklem 3 Denklem 2'de yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$[m] [u] \Psi + [k] [u] \Psi = 0 \quad (4)$$

Sönümsüz sistem ve sönümleme sisteminin oranı için, modal matris [u], modal ortogonal(dik) bir matris olarak kabul edilir.

$$[u]^T [m][u] = [I] , [u]^T [k][u] = \lambda \quad (5)$$

Denklem 4 $[u]^T$ ile çarpılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$[u]^T [m][u] \Psi + [u]^T [k][u] \Psi = 0 \quad (6)$$

Denklem 6'dan aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$\begin{cases} \Psi + \lambda \Psi = 0 \\ [k \{u\}] - \lambda [m] \{u\} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitlik çözüldüğünde aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$\Psi = A \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad \lambda = \omega^2 \quad (8)$$

Burada A ve φ keyfi sabitler ω titreşim frekansı, $\{u\}$ ise modal vektör olarak ifade edilir.

Denklem 8 Denklem 7'de yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$[k \{u\}] - \omega^2 [m] \{u\} = \{0\} \quad (9)$$

Burada $\{w_1^2, w_2^2, \dots, w_n^2\}$, $\{u\} = (u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(n)})^T = \Psi$ olarak adlandırılmaktadır.

Denklem 9'un çözümünden aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\{u\}^T [k] \{u\} = \omega^2 \{u\}^T [m] \{u\} \quad (10)$$

Modal vektörün normalleştirilmesi düşünüldüğünde, aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$\{u\}^T [m] \{u\} = 1, \quad \{u\}^T [k] \{u\} = \omega^2 \quad (11)$$

Bir modal matris, bir karede sırayla n normalleştirilmiş modal vektörlerinin düzenlenmesi ile oluşturulur. Yukarıdaki teoriye göre, Denklem (7) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\Psi_r + w_r^2 \Psi_r = \{0\} \quad (r = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

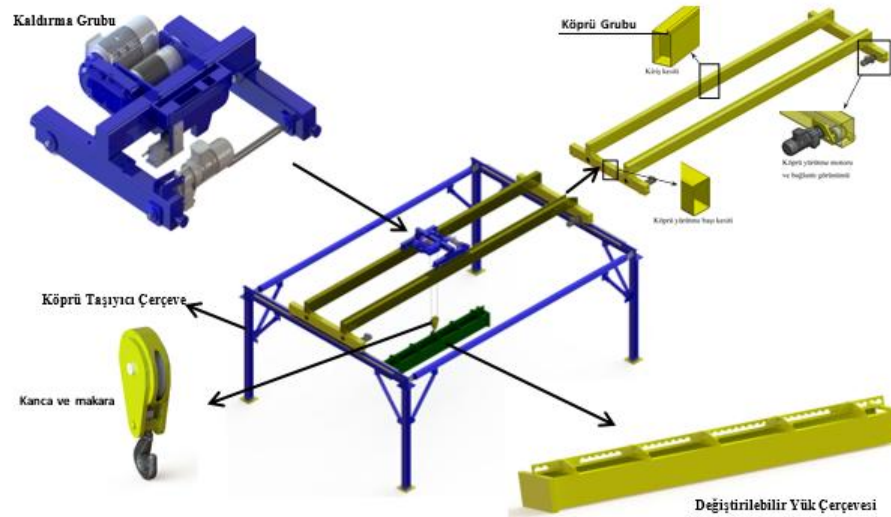
MODELLEME VE NÜMERİK ÇALIŞMA (MODELING AND NUMERICAL STUDY)

Bu çalışmada incelenen kren sistemi, tasarımı gerçekleştirilirken referans olarak kren sisteminin kaldırma kapasitesi, kaldırma yüksekliği, köprü açıklığı ve köprü hareket uzunluğu gibi tasarım parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Genel olarak laboratuvar şartlarında deneysel olarak kullanılacağı düşünülerek bu parametreler belirlenmiştir. Kren sisteminin fiziksel şartlara göre belirlenen tasarım parametreleri ve çalışma hızları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kren tasarım parametreleri*Table 1. Crane design parameters*

Parametreler	Değer
Köprü Açıklığı	7 m
Kaldırma Yüksekliği	4 m
Maksimum Yük	1600kg
Kaldırma Hızı	4 m/min
Köprü Hareket Uzunluğu	5 m
Köprü Hareket Açısal Hızı	147,7 rpm
Köprü Hareket Motor Gücü	0,37 kW
Araba Hareket Açısal Hızı	16 rpm
Araba Hareket Motor Gücü	0,25 kW
Çelik Halat (6*19 Fiber Core)	8 mm
Kanca	DIN15401
Malzeme	St 37

Krenin tasarım parametrelerine göre Katı modeller ve montajlar Solidworks programı kullanılarak oluşturulmuştur. Farklı çalışma şartlarına göre tasarımı yapılan krenlerin montaj modelleri ANSYS Workbench 18.1 programına aktarılmıştır. Tüm konektör tanımlamaları ANSYS Workbench 18.1 programında yapılmıştır. Kren Sistemini meydana getiren elemanlar ve oluşturulan kren sisteminin örnek bir görünümü Şekil 1’de verilmiştir.

**Şekil 1.** Kren sistemi katı model örneği ve kren elemanları*Figure 1. Crane system solid model example and crane elements*

Kren köprü grubu, kaldırma grubu yükün birlikte olduğu şekilde tasarlanan kren sisteminde yapısal olarak yükün bulunduğu yerlerde etkisini de görebilmek amacıyla araba grubunun ve yükün köprü başında ve ortasında bulunması durumlarına göre ve sistemde yük, taşıyıcı çerçeve, köprü ve arabanın etkilerinin neler olduğunu görebilmek amacıyla Şekil 2’de görülen katı modeller oluşturulmuştur.

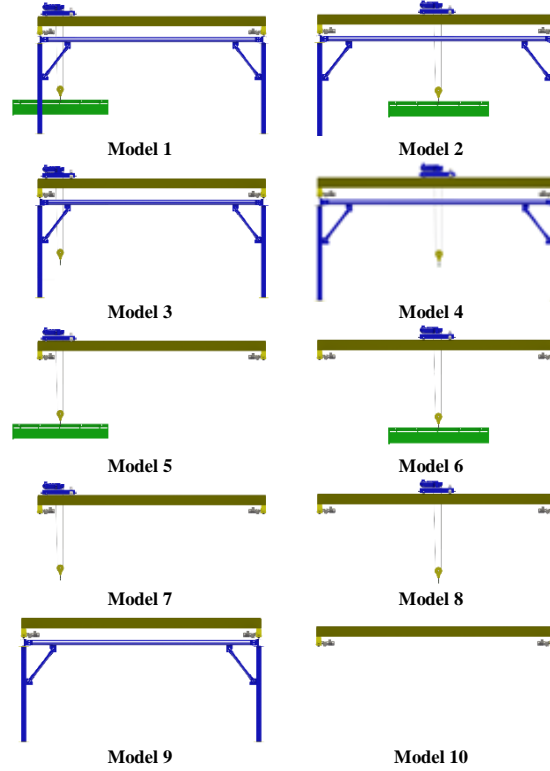
Modal analiz krenin doğal frekanslarını bulmak için yapılmıştır. Analiz için Intel(R) Core (TM) i7-2600 CPU @ 3.40 GHz 3.40 GHz, 32 GB Ram özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Kren sisteminin sonlu elemanlar modelinin görünümü Şekil 3’te verilmiştir. Kren sisteminde köprü taşıyıcısının altında bulunan 4 adet saç levha yere sabitlenmiştir. Diğer parçaların birbirine temasta bulunan yüzeyleri ayrılmaz şekilde birbirine bağlayan BAĞLI (BONDED) ilişkisi tanımlanmıştır. 4 düğüm noktalı doğrusal kabuk elemanı (shell181), doğrusal tetrahedral katı elemanı (solid186) ve doğrusal kübik katı elemanı (solid187) tip elemanlar sonlu elemanlar modellerinde tercih edilmiştir. Elemanların boyutları ise 5-30 mm arasında değişmektedir. Verilen bu model 324367 elemandan ve 808442 düğüm noktasından meydana gelmiştir. Bu sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan analizin çözümü yaklaşık 1 saat 30 dakika sürmektedir. Krenin farklı modellerinde aynı ağ yapısı kullanılmış fakat üzerindeki elemanların

olamamasına göre eleman ve düğüm sayısı farklılık göstermektedir. Analizlerde kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 2’ de verilmiştir.

Çizelge 2. Kren için sonlu eleman analizinde kullanılan malzeme özellikleri

Table 2. Material properties used in finite element analysis for crane

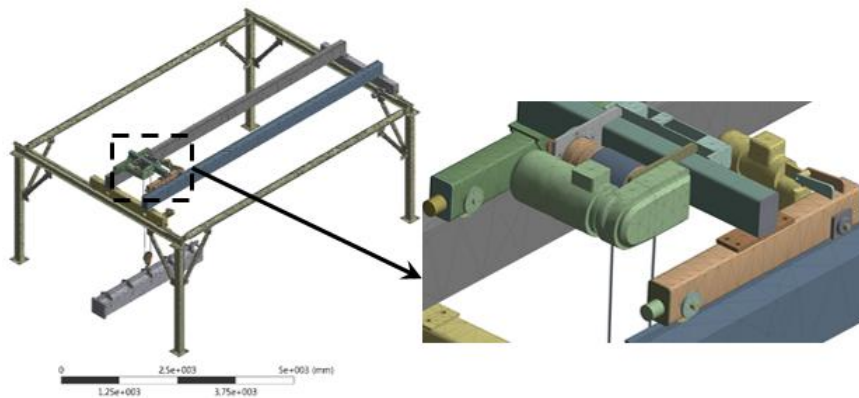
Malzeme	Elastiklik Modülü(GPa)	Poison oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Yapı çeliği	200	0,3	7850



Şekil 2. Modal analiz için oluşturulan katı modeller

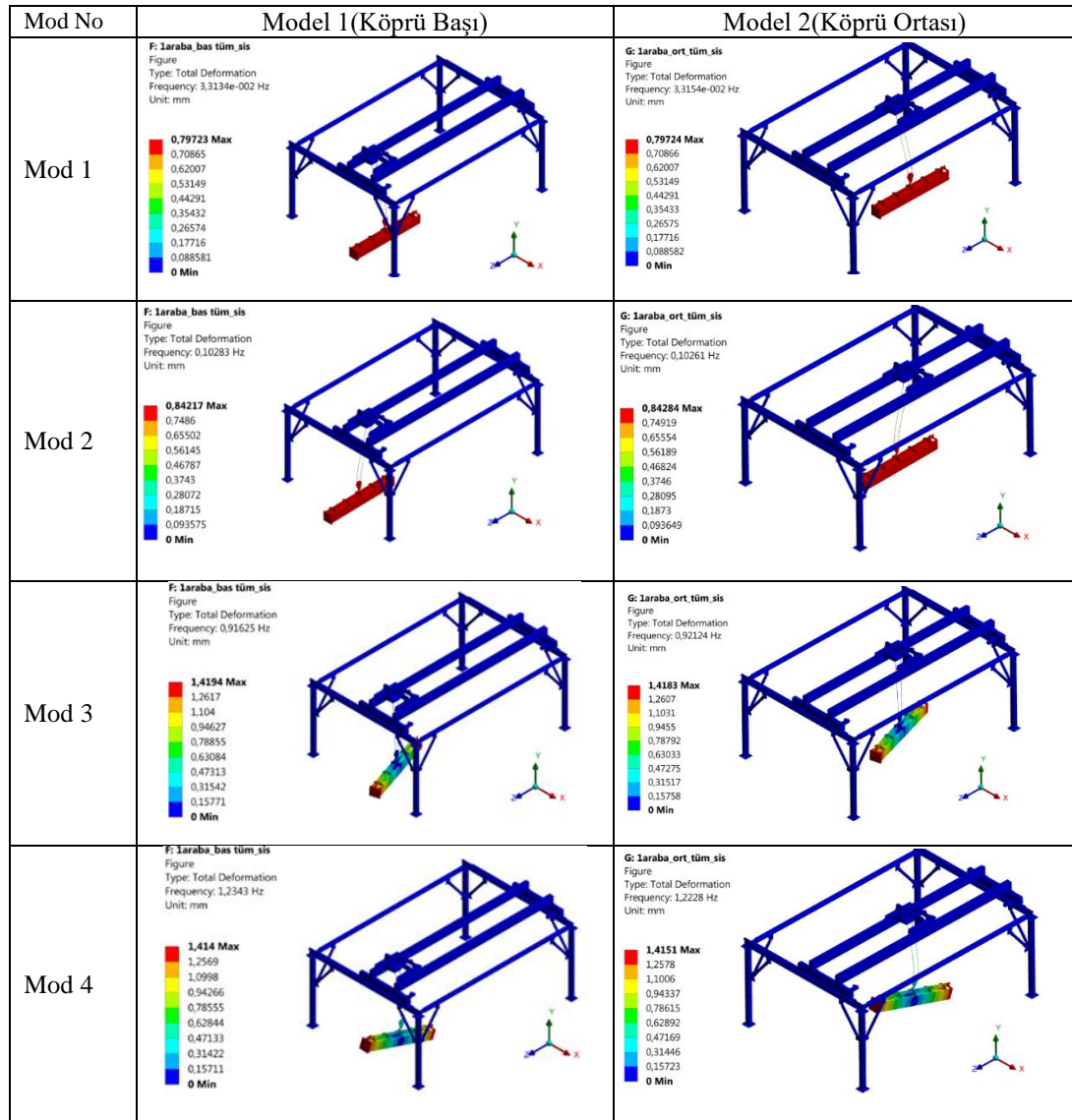
Figure 2. Solid models for modal analysis

Kren için tüm yapının (taşıyıcı çerçeve, köprü grubu, kaldırma grubu, kanca grubu ve yük) olduğu, arabanın köprü başı ve ortasına göre analizden elde edilen ilk 4 doğal frekansa karşılık titreşim biçimleri Şekil 4’ te verilmiştir.



Şekil 3. Katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli

Figure3. Finite element model using solid elements



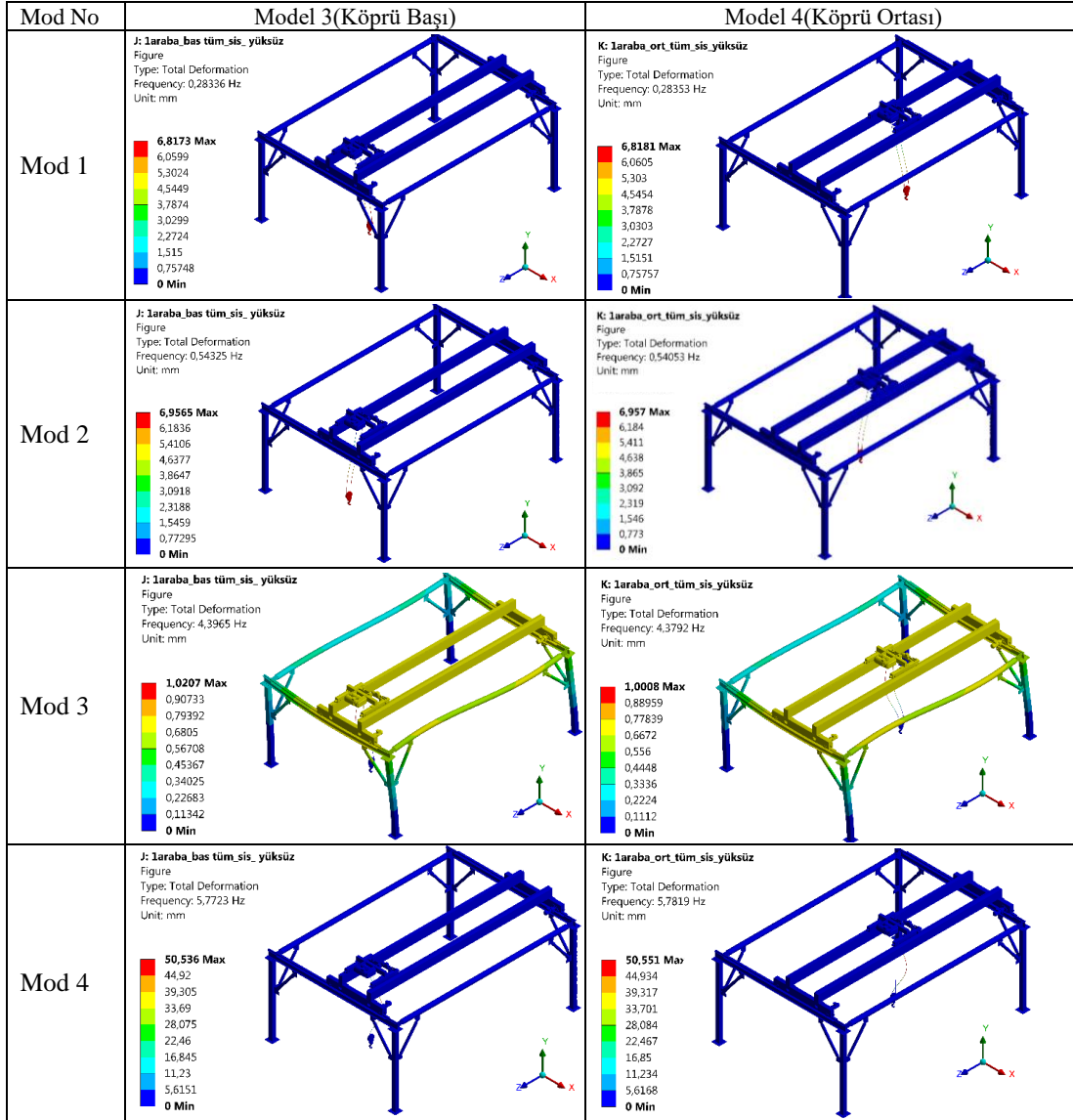
Şekil 4. Kren sisteminin tüm olarak modellenmesi ve arabanın köprü konumlarına göre titreşim biçimleri

Figure 4. Modeling of the crane system as a whole and vibration shapes according to the bridge positions of the car

Analizlerde ilk 10 doğal frekans sonuçları hesaplanmıştır. Frekans analizlerinde genellikle ilk 4 doğal frekans cevabı yüksek şekil değişimine neden olduğundan dolayı modal davranış biçimlerinde ilk dört mod davranış sonuçları verilmiştir. Frekanslarda genel değerlendirme yapabilmek ve elde edilen doğal frekans sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Kren sistemi üzerinde yükün etkisine göre meydana gelen doğal frekans değişimlerini değerlendirmek amacıyla yapılan modal davranış biçimleri Şekil 5'te verilmiştir. Arabanın köprü başı ve ortasında olması durumunda ise meydana gelen frekans sonuçları ise Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Sonlu elemanlar analizinde araba konumlarına göre tüm yapının doğal frekans değerleri*Table 3. Natural frequency values of the whole structure according to car positions in finite element analysis*

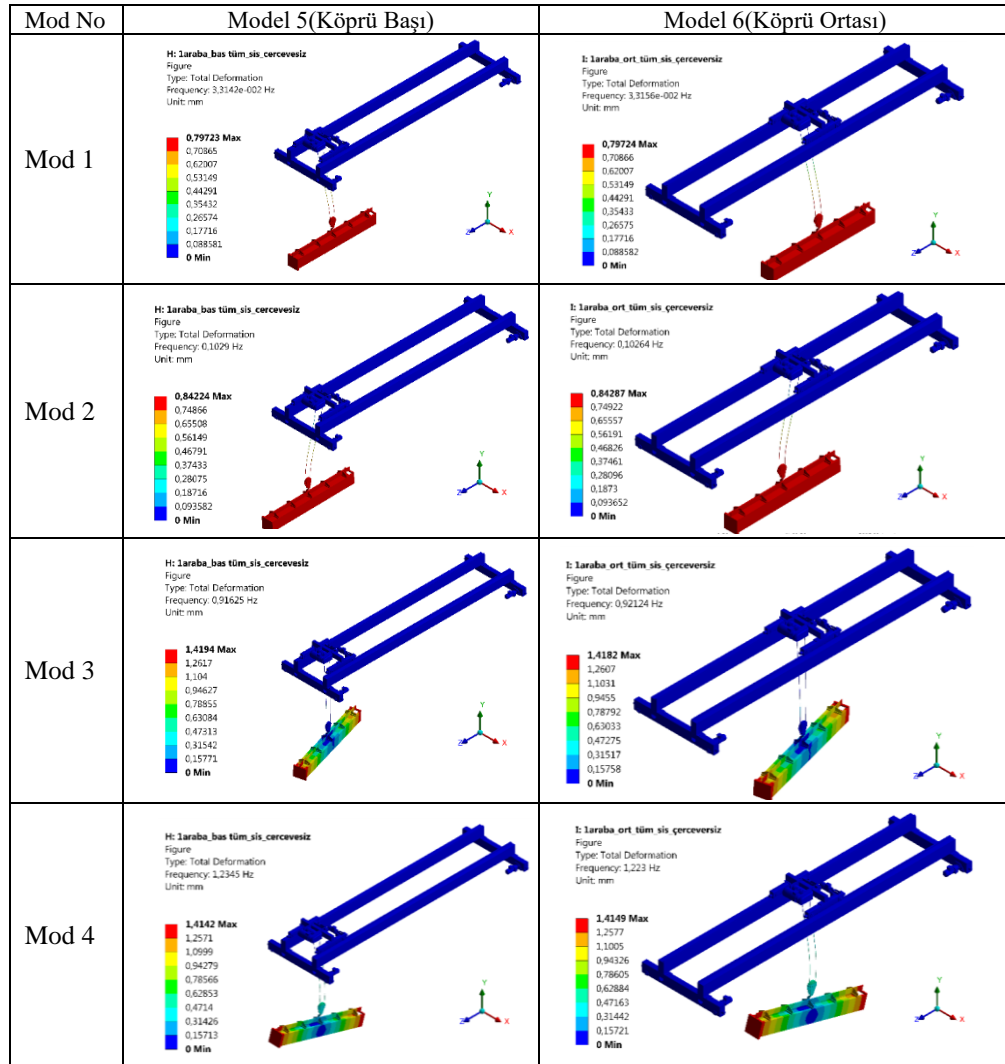
Doğal Frekans Değerleri (Hz)										
Mod No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Model 1 (Baş konum)	3,31E-02	0,10283	0,91625	1,2343	4,3962	5,0504	5,769	5,8309	6,6223	6,6554
Model 2 (Orta konum)	3,315E-02	0,10261	0,92124	1,2228	4,3792	4,9613	5,7773	5,8354	5,8612	6,6222

**Şekil 5.** Kren sisteminin yüksüz olması ve arabanın köprü üzerindeki konumlarına göre titreşim biçimleri*Figure 5. Modeling of the crane system without load and vibration shapes according to positions of the car on bridge*

Çizelge 4. Yük olmadan araba konumlarına göre tüm yapının doğal frekans değerleri*Table 4. Natural frequency values of the whole structure without load according to car positions*

Doğal Frekans Değerleri (Hz)										
Mod No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Model 3 (Baş konum)	0,28336	0,54325	4,3965	5,7723	5,7959	6,6236	6,6521	8,7237	10,109	10,831
Model 4 (Orta konum)	0,28353	0,54053	4,3792	5,7819	5,8061	6,6221	6,6521	8,2631	10,102	10,376

Krenlerde kullanılan çerçeve yapılar sadece kren tasarımında değil birçok köprü bina ve gemilerde kullanılmakta ve birçok araştırmacı için önemli bir çalışma konusudur. Kren sistemleri fabrikalarda kurulmadan önce kren yolu olarak imal edilmektedir ve tasarım yaparken de çerçeve daha önce modellendiği için analizlerde kullanılmamaktadır. Burada köprü taşıyıcı sistem olmadığı durumda kren sisteminin davranışlarının belirlenmesi amacıyla kren sisteminde taşıyıcı çerçeve olmadan modelleme ve analiz gerçekleştirilmiştir. Bu durumda meydana gelen doğal frekans değişimlerini değerlendirmek amacıyla yapılan modal davranış biçimleri Şekil 6'da verilmiştir. Çerçevesiz yapıda arabanın köprü başında ve ortasında olması durumunda ise meydana gelen frekans sonuçları ise Çizelge 5'te verilmiştir.

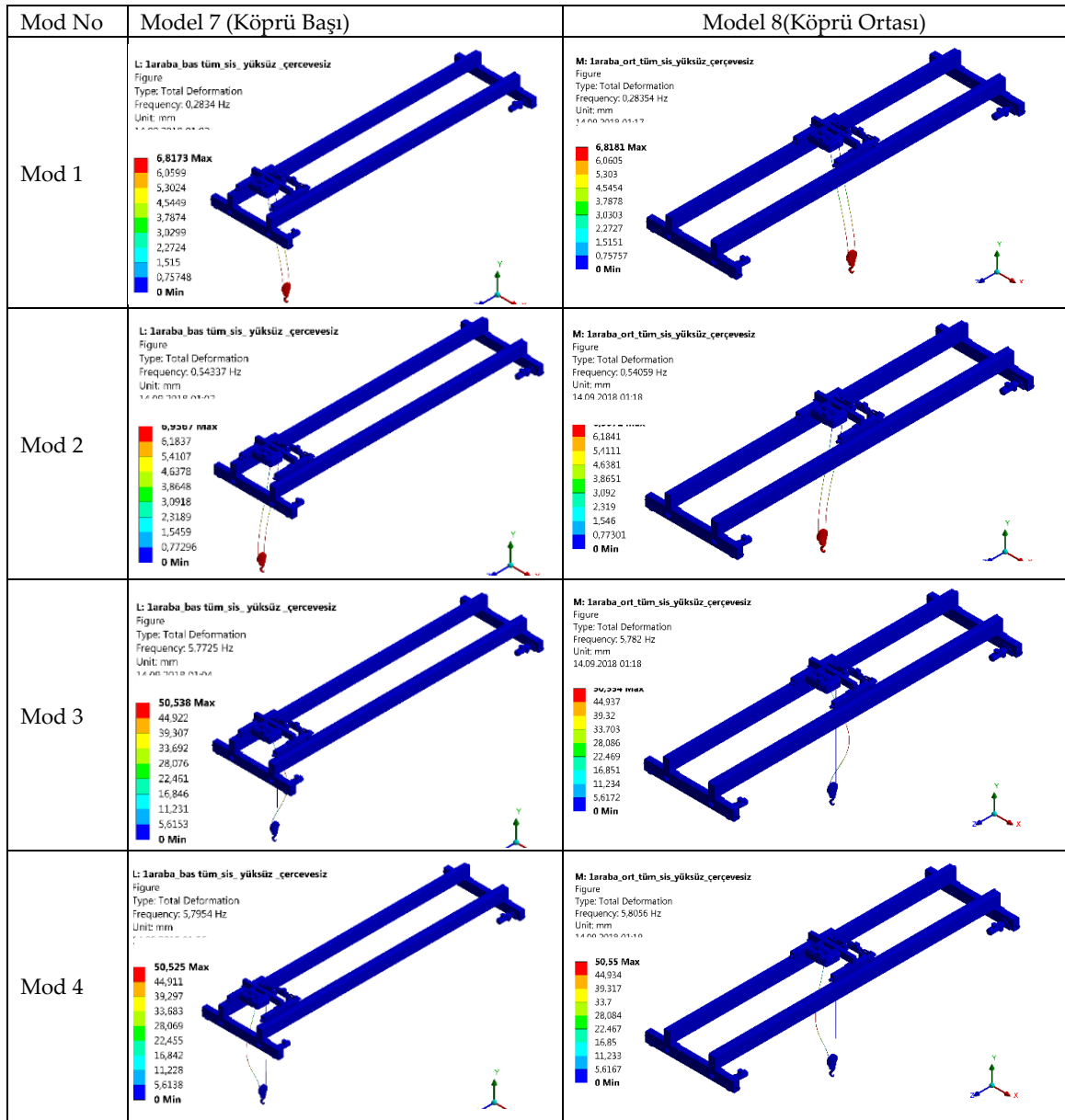
**Şekil 6.** Kren sisteminin taşıyıcı çerçeve olmadan araba konumlarına göre titreşim biçimleri
Figure 6. Modeling of the crane system without bridge carrier and vibration shapes according to positions of the car on bridge

Çizelge 5. Çerçevesiz yapının yükle beraber araba konumlarına göre doğal frekans değerleri*Table 5. Natural frequency values of frameless structure with load according to car positions*

Doğal Frekans Değerleri (Hz)										
Mod No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Model 5 (Baş konum)	3,31E-02	0,1029	0,91625	1,2345	5,0504	5,7684	5,8311	6,6218	6,6558	10,187
Model 6 (Orta konum)	3,32E-02	0,10264	0,92124	1,223	4,9613	5,777	5,8357	6,6217	6,6537	7,6425

Kren sisteminin yükün uygulanması genel olarak halatın geometrik yapısından dolayı karakteristik şekil değişimi yük üzerinde gerçekleşirken yükün olmadığı durumda kanca ve halatta söz konusudur. 3.modda ise yük olmadığından dolayı kütle azalmasından dolayı köprü ve köprü taşıyıcı üzerinde şekil değişimi gerçekleştiği görülmektedir. Çerçevesiz yapı ile çerçevesiz yapının sonuçları değerlendirildiğinde ise karakteristik modal davranış benzerlik gösterirken doğal frekanslarda ise 5. moddan itibaren artış gösterdiği anlaşılmaktadır.

Kren sistemi üzerinde çerçevesiz yapıda yük olmadığı durumda gelen modal davranış biçimleri Şekil 7'de verilmiştir. Arabanın köprü bas ve ortasında olması durumunda ise meydana gelen frekans sonuçları ise Çizelge 6'da verilmiştir.



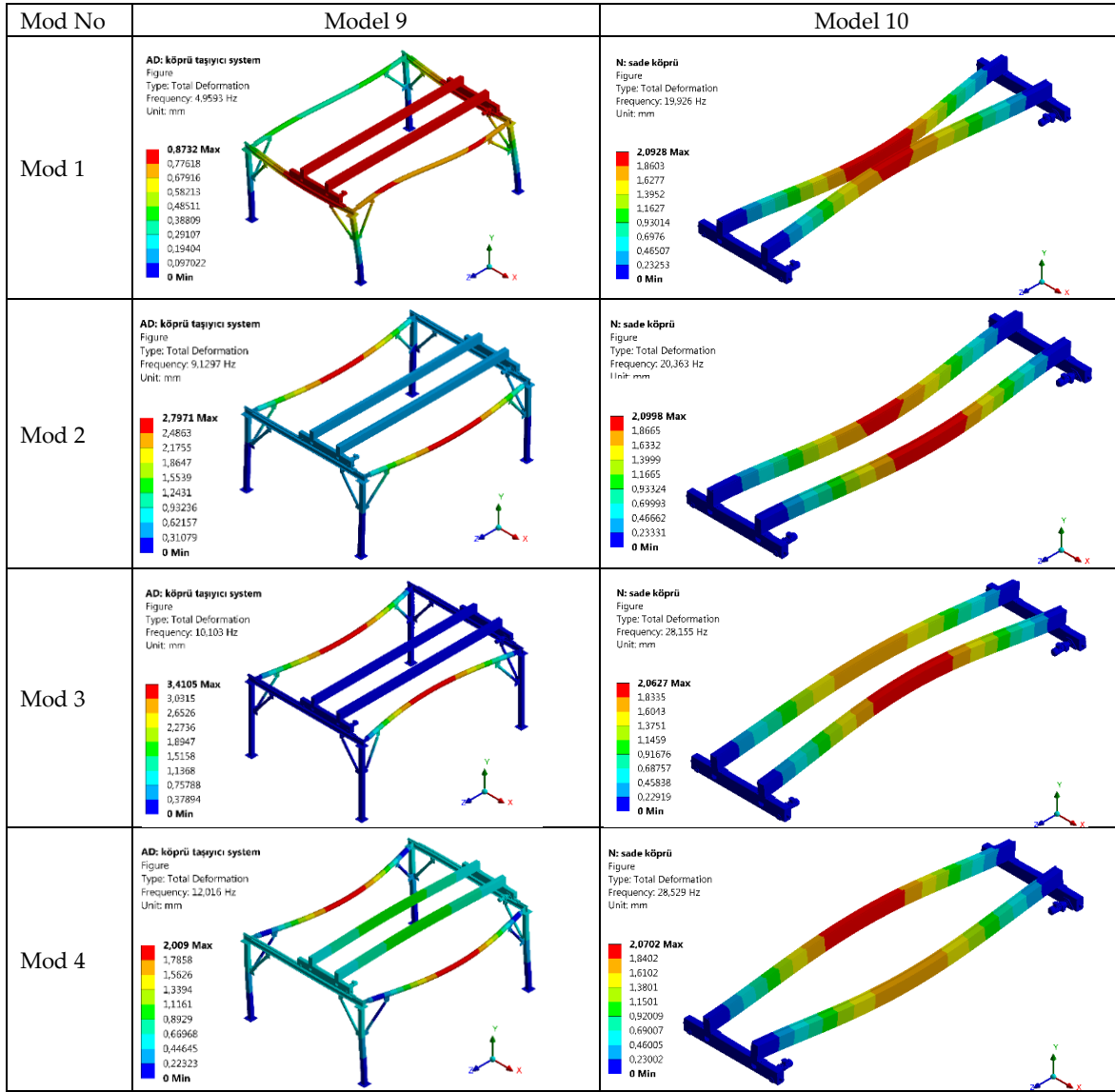
Şekil 7. Çerçevesiz ve yüksüz kren sisteminin araba konumlarına göre titreşim biçimleri
Figure 7. Frameless and unloaded modeling of crane system and vibration shapes according to positions of the car on bridge

Çizelge 6. Yüksüz ve çerçevesiz durumda araba konumlarına göre tüm yapının doğal frekans değerleri
Table 6. Natural frequency values of frameless and unloaded structure according to car positions

Mod No	Doğal Frekans Değerleri (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Model 7 (Baş konum)	0,2834	0,54337	5,7725	5,7954	6,6241	6,6517	15,861	15,928	18,2	18,274
Model 8 (Orta konum)	0,28354	0,54059	5,782	5,8056	6,6226	6,6516	12,675	15,889	15,956	17,6

Yüksüz ve çerçevesiz yapının sonuçları değerlendirildiğinde çerçevesiz duruma göre benzer titreşim biçimleri gözlenirken yükün olmamasından dolayı doğal frekans değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Üzerinde arabanın olmadığı ve genel olarak köprü taşıyıcı ve köprü olarak sistemin genel davranışının ne olduğunu gözlemlemek amacıyla sistem köprü taşıyıcı ve köprü olarak tasarımı gerçekleştirilmiş model ve sadece çift kiriş olarak modeli gerçekleştirilen köprüün modal davranış

biçimleri Şekil 8'de verilmiştir. Bu iki model için meydana gelen frekans sonuçları ise Çizelge 7'de verilmiştir.



Şekil 8. Köprü çerçeve ve sadece köprünün titreşim biçimleri

Figure 7. Vibration shapes of frame with bridge and only bridge model

Çizelge 7. Yüksüz ve çerçevesiz durumda araba konumlarına göre tüm yapının doğal frekans değerleri

Table 7. Natural frequency values of frameless and unloaded structure according to car positions

Mod No	Doğal Frekans Değerleri (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Model 9 (Çerçeve+köprü)	4,9593	9,1297	10,103	12,016	12,472	13,823	16,029	18,481	22,599	22,955
Model 10 (Köprü)	19,926	20,363	28,155	28,529	55,246	55,518	70,466	80,262	84,724	104,41

Modeller incelendiğinde sistem bir bütün olarak değerlendirildiğinde köprü üzerinde net olarak ne kadarlık bir şekil değişimi tespit edilemediğinden; köprü taşıyıcı ve köprünün ne kadar bir şekil değiştirmeye maruz kalacağı hakkında bilgilere ulaşılmaktadır. Doğal frekanslar incelendiğinde ise daha önce gerçekleştirilen modal analizlere göre arabasız, köprü taşıyıcı ve köprüden oluşan yapının

frekanslarında bir artışın olduğu görülmektedir. Köprü gurubunun modal davranışları incelendiğinde ise simetrik olmasına rağmen her iki kirişte birbirinden farklı şekil değiştirme gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışma, yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak kren sisteminin tüm bileşenleri ve kreni oluşturan taşıyıcı çerçeve, yük gibi elemanların olmadığı durumlarda dinamik davranışı incelenmiştir. Ayrıca, krenlerde yükün kaldırılması köprü üzerinde farklı konumlarda gerçekleşmesinden dolayı yükün köprü başında veya ortasında olması dikkate alınarak krenin dinamik davranışına konum etkisi araştırılmıştır. Bu nedenle 10 farklı modelleme yapılarak kren sisteminin dinamik analizleri SEM kullanılarak yapılmıştır.

Kren sisteminin çalışması esnasında yük, halat, araba, köprü ve köprü taşıyıcı sistem birbirleri ile temasta olduğundan dolayı bir bütüncül olarak dikkate alınması gerekmektedir. Tüm bileşenlerin dikkate alındığı sistem için ilk dört mod davranışındaki yer değiştirmeler daha çok yük üzerinde gerçekleşirken ilk iki mod için 0.8mm civarlarında yükün ötelemesi şeklinde iken, 3.ve 4. modlarda şekil değişimi 1.4mm civarlarında olup yükün dönme hareketi şeklinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Arabanın köprü üzerindeki konumu açısından incelendiğinde arabanın köprü başında bulunduğu konum için elde edilen doğal frekansların hemen hemen aynı değerlerde olmasına rağmen bir miktar artış gösterdiği tablo ve şekillerden anlaşılmaktadır. Frekans değerleri açısından değerlendirildiğinde frekans değerlerinde çok az bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Tüm sistem için maksimum doğal frekans değerinin 0-6.60 Hz dolaylarında gerçekleştiği ve davranış karakteristiklerinin aynı olduğu görülmektedir. Yükün olmadığı durumlarda ise doğal frekans değerlerinde artış gerçekleştiği şekil değiştirme karakteristiği ilk 2 mod için kanca üzerinde olup yükün olduğu sistemle benzer karakteristik göstermektedir. İlk iki mod için şekil değiştirme 6.8mm civarlarında olup yük olduğu duruma göre 8 kat artış göstermiştir. 3 modlarda hem köprü başı hem köprü ortasın konumlarında köprü ve taşıyıcı çerçeve üzerinde maksimum şekil değiştirme 1mm dolaylarında olduğu görülmektedir. 4 modda ise şekil değiştirme 50 mm olup halatlar üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Köprü çerçevesiz şekilde modellendiği durumda meydana gelen şekil değiştirme çerçeveli duruma göre benzer karakteristik göstermektedir. Aynı zamanda şekil değiştirme ilk iki mod için 0.8 mm, 3. ve 4. mod için 1.4mm civarlarında gerçekleşerek çerçeveli durumla benzerlik göstermektedir. İlk 9 mod için frekans değişimlerinde 6.65Hz kadar çerçeveli sistemle benzerlik olduğu sadece 10. mod frekans değerlerinde değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Çerçevesiz ve yüksüz durumda ise ilk 6 doğal frekans değerleri yüklü ama çerçevesiz duruma göre aynı değerlerde olup daha sonraki frekanslarda artış gerçekleştiği görülmektedir. Burada meydana gelen şekil değişimi ise ilk 2 mod için makara ve kanca üzerinde 6.8mm iken, 3.ve 4. modlarda 50mm olarak halatlarda meydana gelmektedir. Kren isteminde taşıyıcı çerçeve ve köprüden oluşan modelde ilk 10 mod için 4-23Hz arasında gerçekleşirken sadece köprü dikkate alındığında 20-105Hz arasında değişen değerlerde doğal frekanslarla karşılaşılmaktadır. Doğal frekanslara karşılık gelen şekil değişimleri incelendiğinde köprü ve taşıyıcı sistemden oluşan modelde meydana gelen maksimum şekil değişimi 3. Modda 3.41mm, sadece köprü olarak değerlendirildiğinde tüm modlar için 2.09mm civarlarındadır.

Yukarıda belirtilen frekans ve modal davranış sonuçlarına göre aşağıda belirtilen şu genel sonuçlara ulaşılabilir:

- Kren sisteminin iki kirişten oluşmasından dolayı şekil değişimlerinin her iki kirişte de farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu yüzden çift kiriş köprüsü analizleri yapılırken ki kirişlerin benzer şekil değişimine maruz kalması kabul edilerek analiz edilmesi doğru bir yaklaşım değildir. Buradaki şekil değişimleri bu kabulün yanlış olacağını ve sistemlerde analiz gerçekleştirilirken bu davranışlarında dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.
- Kren sistemlerinde arabaların köprü başında veya ortasında olması durumuna göre değerlendirildiğinde konumun doğal frekansları ve karakteristik şekil değiştirmeleri

etkilemediği ve analizler gerçekleştirilirken sadece konumlardan birisinin dikkate alınmasının yeterli olduğu görülmektedir.

- Kren sitemi üzerinde her bir grubun karakteristiği farklı olduğundan dolayı ayrı olarakta incelenmesinde fayda olduğu yapılan analizler sonucunda ortaya çıkmaktadır.
- Kren sistemlerinde kütle azaldıkça meydana gelen doğal frekans değerlerinde artış meydana geldiği ve bu durum ise literatürde belirlenen doğal frekansların kütle ve esnekliğe bağlı olduğu ilkesini desteklemektedir.
- Ayrıca kren siteminde çerçevesiz durumda ki doğal frekans değerleri ile modal davranışlarının aynı olduğu görülmektedir. Bu durum bize kren tasarımında çerçevesiz durumun dikkate alınmasının yeterli olacağını göstermektedir.

Belirtilen bu sonuçlar; bu tip kren tasarım ve analizlerinde titreşim karakteristiğini belirlemede dikkate alınacak parametrelerin belirlenmesine katkı sunmaktadır.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından FCD-2015-5162 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar Erciyes Üniversitesi BAP birimine desteklerinden dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdullah, O.I. and J. Schlattmann, 2012, Vibration Analysis of the Friction clutch Disc Using. *Advances in Mechanical Engineering and its Applications (AMEA)*, Cilt 1, Sayı 4, ss. 86-91.
- Azeloğlu, C.A.H., A. G.; Özen S.; Çolakçakır Ö. Ü.; Sağrı A., 2015. Theoretical and experimental deformation analysis of crane beams subjected to moving loads. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33(4): p. 653-663.
- Abu-Hilal, M., 2003, Forced vibration of Euler-Bernoulli beams by means of dynamic Green functions. *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 267, Sayı 2, ss. 191-207.
- Cha, P.D., 2005, A general approach to formulating the frequency equation for a beam carrying miscellaneous attachments. *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 286, Sayı 4-5, ss. 921-939.
- Cha, P.D., 2002, Eigenvalues of a linear elastic carrying lumped masses, springs and viscous dampers. *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 257, Sayı 4, ss. 798-808.
- Cha, P.D. and W.C. Wang, A novel approach to determine the frequency equations of combined dynamical systems. *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 219, Sayı 4, ss. 689-706.
- Fryba, L., 1999, *Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads*. Thomas Telford, London
- Low, K.H., 1997 An analytical-experimental comparative study of vibration analysis for loaded beams with variable boundary conditions. *Computers & Structures* Cilt 65, Sayı 1, ss. 97-107.
- Low, K.H., G.B. Chai, and G.S. Tan, 1997, A comparative study of vibrating loaded plates between the rayleigh-ritz and experimental methods. *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 199, Sayı 2, ss. 285-297.
- Malgaca L., Kara C., and Demirsoy M., 2008, Dinamik Şekil Değiştirme Ölçümü ve Bir Tavan Vincinde Uygulaması, in VII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, MMO Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi İzmir. ss. 191-201.
- Pesterev, A.V., Yanh, B., Bergman, L.A., Tan, A., 2001. Responce of elastic continiuum carrying multiple moving oscillators. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(3): p. 260-265.
- Pesterev, A.V. and L.A. Bergman, 2000. An improved series expansion of the solution to the moving oscillator problem. *Journal of Vibration and Acoustics*. 122(1): p. 54.
- Vlada Gašić, N. Z., Aleksandar Obradović, Srđan Bošnjak (2011). Consideration of Moving Oscillator Problem in Dynamic Responses of Bridge Cranes, *FME Transactions*, 39: 17-24.

- Wu, J.J., A.R. Whittaker, and M.P. Cartmell, 2001, Dynamic responses of structures to moving bodies using combined finite element and analytical methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, Cilt 43, Sayı 11, ss. 2555-2579.
- Wu, J.J., 2006 Finite element analysis and vibration testing of a three-dimensional crane structure. *Measurement*, Cilt 39, Sayı 8, ss. 740-749.
- Yang, W., Z. Zhang, and R. Shen, 2007, Modeling of system dynamics of a slewing flexible beam with moving payload pendulum. *Mechanics Research Communications*, Cilt 34, Sayı 3, ss. 260-266.
- Yıldırım, Ş. and E. Esim. 2017. A New Approach for Dynamic Analysis of Overhead Crane Systems Under Moving Loads. in *CONTROLO 2016*, Cham: Springer International Publishing.
- Yıldırım, Ş., Esim, E., 2019, Free vibration analysis of multi-carriages crane systems with finite element method, in 5th International Conference on Engineering and Nature Science. Prague. p. 22-30.
- Yıldırım, Ş., Esim, E., 2019, Harmonic Response Analysis of Double Bridge Crane System on Multi Carriages, in 5th International Conference on Engineering and Nature Science. Prague. p. 90-96.
- Zrnić, N.Đ., V.M. Gašić, and S.M. Bošnjak, 2015. Dynamic responses of a gantry crane system due to a moving body considered as moving oscillator, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1): p. 243-250.