



KÖPRÜLERİN DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Ezgi Zeynep ÖZTORUN¹, Cenk ALHAN², Savaş ERDEM³, Namık Kemal ÖZTORUN⁴
^{1,2,3,4} İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ABSTRACT

It is known that bridges, viaducts and similar structures may be damaged and even destroyed under earthquake excitation; however, exact causes have not been determined yet. While the behavior of bridge-type structures subjected to earthquakes is being investigated; it is observed that, generally, only horizontal effects are included in the current studies. Furthermore, only the horizontal impact is taken into account by important prevailing international specifications/codes. One of the main reasons for inclusion of only horizontal effects in the calculation is the possibility for the system to become mechanism if the vertical loads are small compared to the probable tension forces during the earthquake, ultimately, causing the solution to become practically impossible. Because of this, the problem cannot be solved and the vertical effects cannot be taken into account. In the present study, besides the conventional earthquake analyses of structures with lateral forces, the vertical effects are also taken into account. At this stage of the study, the mechanisms of collapsing can be determined for the structural elements. It is anticipated that studies on the subject will continue for many years, and it is highly likely that the consideration of the vertical displacement effect would become inevitable for all types of structures (building, dam, bridge, viaduct etc.). In this case, all analysis methods and specifications should be reviewed.

ÖZET

Depremlerde köprü, viyadük ve benzeri yapıların hasar görebildiği ve hatta yıkılabildiği bilinmekle birlikte; nedenleri henüz kesin olarak belirlenmemiştir. Deprem etkisine maruz köprü türü yapıların davranışları araştırılırken, mevcut araştırmalarda genellikle sadece yatay etkilerin hesaba katıldığı görülmektedir. Hatta günümüze kadar süregelen önemli uluslararası şartnamelerde de yalnızca yatay etki hesaba katılmaktadır. Yalnızca yatay etkilerin hesaba katılmasında önemli nedenlerden bir tanesi, düşey yüklerin deprem esnasında meydana gelebilen olası çekme kuvvetlerine kıyasla küçük olması durumunda sistemin mekanizma haline gelmesi (oynak olması) ve sonuçta çözümün pratik olarak imkânsız hale gelmesidir. Bu durumda problem çözülememekte ve düşey etkiler hesaba katılamamaktadır. Mevcut çalışmada yapısal sistemlerin alışlagelmiş deprem analizlerinin yanı sıra düşey etkiler de hesaba katılmaktadır. Çalışmanın bu aşamasında yapısal elemanlar arasında göçme mekanizmaları belirlenebilmektedir. Konu ile ilgili çalışmaların yıllarca devam edeceği ön görülmekte ve devamında tüm yapısal sistemlerde (bina, baraj, köprü, viyadük vb.) düşey deplasman etkisinin göz önüne alınmasının kaçınılmaz olduğu sonucunun bulunmasının kuvvetle muhtemel olduğu düşünülmektedir. Bu durumda tüm analiz yöntemleri ve şartnameler gözden geçirilmelidir.

GİRİŞ

Deprem etkisi sırasında düşey davranışın özellikle köprü ve köprüyol (viyadük) türü yapılarda hesaba katılması hayati önem taşımaktadır. Literatürde “Rocking Effect” (sallanma/çarpma) olarak bilinen davranış, yapı bütünlüğünü bozarak yapıda büyük hasarlara ve can kaybına neden olabilmektedir. Buna en büyük örneklerden biri 1989 Loma Prieta depremi sırasında San Francisco–Oakland Körfez Köprüsü’nün ve Cypress Viyadüğü’nün çökmesidir. Geçmiş yıllarda bazı araştırmacılar tarafından, düşey uyarımın etkilerinin, depremlerin yüksek yoğunlukta olduğu alanlarda önem taşıdığı belirtilmiştir [1-3]. Köprü yapılarının sismik performansı üzerine düşey uyarımın etkileri özellikle köprü yataklarında açığa çıkmaktadır [4]. Düşey uyarım modeli düşünüldüğünde taşıyıcılardaki düşey reaksiyon kuvvetinin de değişeceği, dolayısıyla kayma sürtünme yatakları ile sismik olarak izole edilmiş bir köprünün sismik performansını etkileyen kritik kayma kuvveti ve histerik enerji dağılımının da etkileneceği ifade edilmiştir [5]. Yazılmış bazı raporlara göre; hasar gören köprüler için, en yaygın göçme modlarının çarpma etkilerinin yanı sıra taşıyıcıların yukarı kalkarak yırtılması ve bunun sonucunda köprü gövdelerinin yerinden çıkması olduğu belirtilmektedir. Bunlara 1989 Loma Prieta [6], 1994 Northridge [7], 1995 Kobe [8], 1999 Chi Chi [9] ve 2011 Tohoku [10-14] örnek verilebilir. Bu depremler nedeniyle köprülerde oluşan yerinden çıkma ve taşıyıcılarda yukarı kalkma etkisi şartnamelere bakıldığında oldukça belirgindir [15,19]. Konunun önemi ve şartnamelerin yetersiz kalması nedeniyle son zamanlarda yeni çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [20-22].

Bununla birlikte; genel amaçlı mevcut yazılımların bu konuda yetersiz kalması, analiz yönteminin alışlagelmiş yöntemlerden farklı olması gibi nedenlerle literatürde uygulanabilir, pratik bir çözüm yöntemin geliştirilemediği saptanmıştır. İlk araştırmalar ve analizler mevcut genel amaçlı yazılımların olanakları ile sınırlı olarak bazı varsayımlarla gerçekleştirilebilmektedir. Bu davranışın gerçekçi olarak matematiksel modelde tanımlanabilmesi için model hazırlama tekniği son derece önemlidir. Deprem etkisi altında düşey davranışın görülmesi özellikle sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan analiz programlarında oldukça zordur. Sistemin düşey davranışının görülmesi için kullanılan modelde düşey sınır koşullarının serbest bırakılması sonucu rijitlik matrisinde diyagonal üzerindeki terimler negatif çıkmakta, bunun sonucunda rijitlik matrisinin evriği (invers) alınamamaktadır. "Kötü koşullu (ill conditioned)" olarak geçen bu durumda modelin analizi yapılamamaktadır. Sınır şartlarında düşey davranışın gözlemlenemediği durumda ise sistem analizi gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Mevcut çalışma kapsamında genel amaçlı bir bilgisayar programı geliştirilmektedir. Program geliştirilmesinin birçok gerekçesi vardır. Ancak en önemli neden yapısal sistemlerin dinamik karakteristiklerinin daha kolay kontrol edilebilmesini sağlamaktır (hazır programlarda, gerek eleman, gerekse sistem bazında rijitlik ve kütle matrisine doğrudan ulaşmak mümkün değildir).

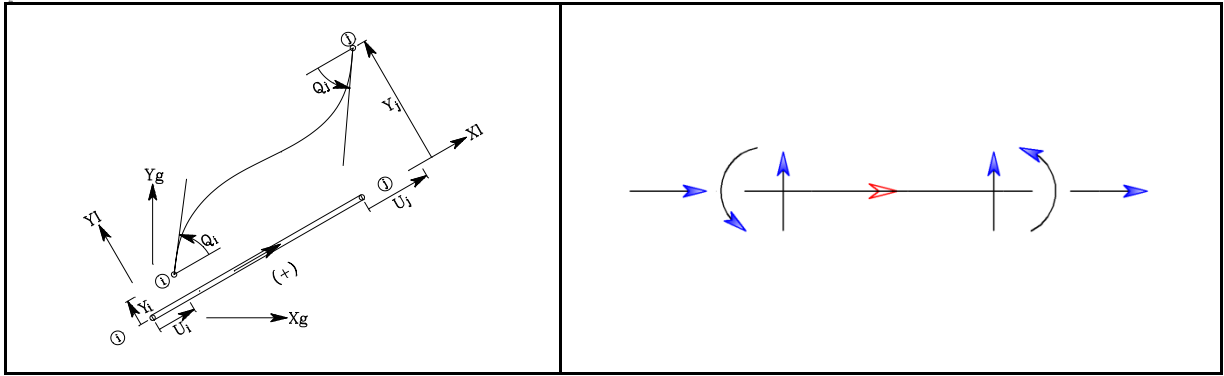
ALAN DENKLEMLERİ ve FORMÜLASYON

Yapıların statik analizlerinin yanı sıra dinamik analizlerini pratik olarak gerçekleştirebilecek bir bilgisayar programı geliştirilmektedir. Bilgisayar programı modüllerden oluşmaktadır. Yapısal sistem verileri gerekli minimum bilgileri içermektedir. Programın ilk modülü “GENERATE” öncül çalışmayı gerçekleştirerek ve minimum veriyi kullanarak detaylı verileri oluşturmaktadır. Analizler esnasında birden fazla kez kullanılacak olan detaylı verileri ilgili dosyalara sıralı bir biçimde oluşturarak yazmaktadır. Ayrıca AutoCAD [23] gibi yazılımlarla da etkileşimli olarak çalışacak şekilde gerekli verileri hazırlayarak görsel kontrolleri sağlamaktadır. Oluşturulan dosyalar geçici dosyalar olup analizler gerçekleştirildikten sonra (isteğe bağlı olarak) silinmektedir. Dosya isimleri problemin adı ile ilişkilendirilmiş olup uzantıları sabittir. Dosyalar probleme ve kullanılan sonlu elemanlar türlerine göre açılmaktadır. “DATA” adlı problem için oluşturulan geçici dosyalar

| | |
|---------------------|--|
| DATA-1-NODES | Genelleştirilmiş ve sıralanmış düğüm noktaları, koordinatlar. Noktalar arasında eşleştirilmiş serbestlik bileşenleri (köle bileşenler) |
| DATA-2-BOUND | Sınır koşulları, mesnet, elastik mesnet, zorlanmış yer değiştirme bilgileri |
| DATA-3-LOADS | Düğüm noktası yükleri ve ek kütleler (konsantre) |
| DATA-4-FRAME | Çerçeve elemanlarının bağlantıları, özellik grupları, yayılı kütleler |
| DATA-5-FRPRO | Çerçeve elemanlarının kesit ve malzeme özellik bilgileri |
| DATA-6-TRUSS | Kafes kiriş elemanlarının bağlantıları, özellik grupları, yayılı kütleler |
| DATA-7-TRPRO | Kafes kiriş elemanlarının kesit ve malzeme özellik bilgileri |
| DATA-8-MODEL | Bilgisayar modelini görsel olarak sunan dosyalar |

şekindedir. Geçici dosyaları oluşturan “GENERATE” adlı modül, ana modül olan ve analizleri gerçekleştirmek - sonuçları sunmak üzere birçok alt modülden oluşan “DYNA” yı çalıştırmaktadır. Program geliştirildikçe yeni sonlu eleman türleri ve yeni modüller ilave edilebilmektedir. “DYNA” iki ve üç boyutlu analizleri gerçekleştirebilmek amacıyla genel amaçlı olarak başlatılmıştır ve mevcut hali ile 60’a yakın alt modülden oluşmaktadır. Söz konusu modüller farklı parametrelerle yüzlerce kez devreye girebilmekte, iteratif analizlerle bu sayı katlanmaktadır. Programa özel Geliştirilmiş Cholesky Yöntemi kullanılmakta ve yapısal sistem rijitlik ve/veya kütle matrisinin evriği (invers) hesaplanırken, matrisin simetrik yarısındaki terimlerin ve diyagonal terimlerin yalnızca sıfırdan farklı olan değerleri çift hassaslıklı bir reel sayı vektöründe oluşturulmaktadır. Adres bilgileri ise aynı sayıda elemana sahip bir tam sayı vektöründe tutulmaktadır. Evrik işlemleri bu iki vektör üzerinde gerçekleştirilmekte ve çözülebilecek denklem sayısı milyonlarla ifade edilebilmektedir. Her iki matrise de analiz esnasında müdahale etmek mümkündür. İsteğe bağlı olarak 500 bilinmeyene kadar olan problemlerde gerek sistem rijitlik matrisi, gerekse sistem kütle matrisi, kare matris biçiminde ve onar kolonluk bloklar halinde yazdırılabilmektedir. Çözüm esnasında gerekli tüm indisli değişkenler (lokal ve global koordinatlarda eleman kütle ve rijitlik matrisleri, yük ve deplasman vektörleri) görülebilmekte, müdahale edilebilmekte ve yazdırılabilmektedir. “DYNA” modülü “DATA” adlı problem için dosyalar aşağıdaki gibidir.

| | |
|--------------------|--|
| DATA-ANALIZ | Verilerin kontrol amaçlı geri sunumu (Eco Check) ve düğüm noktası yer değiştirmeleri, eleman bazında kesit tesiri dağılımları gibi standart analiz sonuçları |
| DATA-MATRIX | Sistemi oluşturan tüm yapısal elemanların gerek lokal, gerekse global koordinat sisteminde kütle ve rijitlik matrisleri, yer değiştirme ve uç kesit tesiri (yük) vektörleri, ilgili düğüm noktaları ve serbestlik numaraları (dof) |
| DATA-SYSTEM | Yapısal sisteme ait gerek lokal, gerekse global koordinat sisteminde kütle ve rijitlik matrisleri, bu matrislerin tersi, ilgili serbestlik numaraları, Öz-vektörler, Öz-değerler, ilgili mod şekilleri, frekans ve periodlar |
| DATA-DISP | Statik analizlerde deformasyonlar |
| DATA-SHAPE | Dinamik analiz mod şekilleri |



Şekil 1. Eleman uç vektörleri için pozitif işaret notasyonu (yer değiştirme ve kesit tesirleri)

Programın geliştirilmesi esnasında çok sayıda (yüzlerce) doğrulama örneği kullanılmıştır. Bu bildiri kapsamında ise bir köprü örneği sunulmuştur. Veriler Karakaya Demiryolu Köprüsü'ne ait yayınlardan [24] elde edilen bilgiler ışığında yorumlanarak hazırlanmıştır. Gerçek analiz ve tasarım verileri değildir. Bu nedenle analiz sonuçları köprü ile doğrudan ilişkilendirilmemelidir. Köprü platformunun köprü ayağına oturduğu bir bölgede hayali bir zafiyet (elastik bağlantı) oluşturulmuştur. Bu durumda sabit titreşim altında davranış araştırılmıştır. Analizlerde Şekil 1'deki işaret notasyonu kullanılmıştır.

SAYISAL SONUÇLAR

Mevcut analizde 5 farklı özellikte 74 çerçeve elemanı, 2 farklı özellikte 57 kafes kiriş elemanı kullanılmıştır. Şekil 2'de görülen matematiksel model 78 düğüm noktasından oluşmaktadır. İki boyutlu olarak oluşturulan modelde gerekli test ve analizler eşliğinde eşdeğer parametreler elde edilmiş, üçüncü boyuta ait yük ve kütleler hesaba katılmıştır. Simetrik yüklemeler altında statik davranış Şekil 3'te verilmiştir. Genel amaçlı analizde 234 bilinmeyen ve 222 mod söz konusudur. Köprü modeli Şekil 4-8'de görüldüğü gibi yatay ve düşey modlara sahiptir. Modal frekanslar geometri, kesit ve malzeme özelliklerine göre birbirlerine yaklaşılabilmektedir. Yatay salınımlar köprü ayaklarını, düşey salınımlar ise köprü platformu ile köprü ayakları arasındaki bağlantıları zorlamaktadır. Söz konusu hayali zafiyetin gerçek olması durumunda göçme söz konusu olabilirdi. Ancak gerçek köprüde böyle bir zafiyetin olmadığı görülmekte ve hatta yakın tarihlerde köprüye müdahale edildikten sonra üzerine bir karayolu platformunun ilave edildiği bilinmektedir [24]. Analizlerde kullanılan eleman özelliklerine ilişkin örnekler ve analiz sonuçlarıyla ilgili bilgiler kısmen Çizelge 1-8'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kafes kiriş elemanlarında kesit ve malzeme özellikleri

| NUMBER OF TRUSS MEMBER PROPERTIES (MATERIAL AND SECTIONAL) = 2 | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PROPERTY-NO | SECTIONAL-AREA | ELASTICITY-MOD | POISSONS-RATIO | WEIGHT-DENSITY | WEIGHT/LENGTH | MASS / LENGTH |
| 1 | 2.54000000E-02 | 2.00000000E+08 | 3.00000000E-01 | 7.85000000E+00 | 1.99390000E-01 | 2.03251775E-02 |
| 2 | 6.58000000E-02 | 2.00000000E+08 | 3.00000000E-01 | 7.85000000E+00 | 5.16530000E-01 | 5.26534126E-02 |

Çizelge 2. Kafes kiriş elemanlarının matrisleri ile ilgili örnek

| TRUSS MEMBER 1 LENGTH= 8.5 Q= 45.0 COS(Q)= .7 SIN(Q)= .7 | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| STIFFNESS MATRIX IN GLOBAL COORDINATES | | | | |
| | (13) | (14) | (19) | (20) |
| 13-) | 2.9934187E+05 | 2.9934187E+05 | -2.9934187E+05 | -2.9934187E+05 |
| 14-) | 2.9934187E+05 | 2.9934187E+05 | -2.9934187E+05 | -2.9934187E+05 |
| 19-) | -2.9934187E+05 | -2.9934187E+05 | 2.9934187E+05 | 2.9934187E+05 |
| 20-) | -2.9934187E+05 | -2.9934187E+05 | 2.9934187E+05 | 2.9934187E+05 |
| MASS MATRIX | | | | |
| | (13) | (14) | (19) | (20) |
| 13-) | 2.1903036E-03 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 14-) | 0.0000000E+00 | 2.1903036E-03 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 19-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 2.1903036E-03 | 0.0000000E+00 |
| 20-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 2.1903036E-03 |

| A-) TRANSFORMATION MATRIX | | | | GLOBAL DISPLACEMENTS | |
|---------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------------|----------------|
| | (13) | (14) | (15) | (19) | |
| 13-) | 7.0710678E-01 | 7.0710678E-01 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | -7.8816713E-04 |
| 14-) | -7.0710678E-01 | 7.0710678E-01 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | -1.8159261E-03 |
| 15-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 7.0710678E-01 | 7.0710678E-01 | -1.1232191E-03 |
| 19-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | -7.0710678E-01 | 7.0710678E-01 | 2.9166518E-03 |

| B-) STIFFNESS MATRIX IN LOCAL COORDINATES | | | | LOCAL DISPLACEMENTS | |
|---|----------------|---------------|----------------|---------------------|----------------|
| | (13) | (14) | (15) | (19) | |
| 13-) | 5.9868374E+05 | 0.0000000E+00 | -5.9868374E+05 | 0.0000000E+00 | -1.8413720E-03 |
| 14-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | -7.2673534E-04 |
| 15-) | -5.9868374E+05 | 0.0000000E+00 | 5.9868374E+05 | 0.0000000E+00 | 1.2681484E-03 |
| 19-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 2.8566201E-03 |

Çizelge 3. Çerçeve elemanlarının matrisleri ile ilgili örnek

| FRAME MEMBER 3 | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| STIFFNESS MATRIX IN GLOBAL COORDINATES | | | | | | |
| | (16) | (17) | (18) | (22) | (23) | (24) |
| 16-) | 1.7000000E+07 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | -1.7000000E+07 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 17-) | 0.0000000E+00 | 1.6777778E+04 | 5.0333333E+04 | 0.0000000E+00 | -1.6777778E+04 | 5.0333333E+04 |
| 18-) | 0.0000000E+00 | 5.0333333E+04 | 2.0133333E+05 | 0.0000000E+00 | -5.0333333E+04 | 1.0066667E+05 |
| 22-) | -1.7000000E+07 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.7000000E+07 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 23-) | 0.0000000E+00 | -1.6777778E+04 | -5.0333333E+04 | 0.0000000E+00 | 1.6777778E+04 | -5.0333333E+04 |
| 24-) | 0.0000000E+00 | 5.0333333E+04 | 1.0066667E+05 | 0.0000000E+00 | -5.0333333E+04 | 2.0133333E+05 |

| MASS MATRIX | | | | | | |
|-------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| | (16) | (17) | (18) | (22) | (23) | (24) |
| 16-) | 1.2480703E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 6.2403514E-01 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 17-) | 0.0000000E+00 | 1.3907069E+00 | 1.1767520E+00 | 0.0000000E+00 | 4.8139854E-01 | -6.9535344E-01 |
| 18-) | 0.0000000E+00 | 1.1767520E+00 | 1.2837294E+00 | 0.0000000E+00 | 6.9535344E-01 | -9.6279708E-01 |
| 22-) | 6.2403514E-01 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.2480703E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 23-) | 0.0000000E+00 | 4.8139854E-01 | 6.9535344E-01 | 0.0000000E+00 | 1.3907069E+00 | -1.1767520E+00 |
| 24-) | 0.0000000E+00 | -6.9535344E-01 | -9.6279708E-01 | 0.0000000E+00 | -1.1767520E+00 | 1.2837294E+00 |

| A-) TRANSFORMATION MATRIX | | | | GLOBAL DISPLACEMENTS | | |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|
| | (16) | (17) | (18) | (22) | (23) | (24) |
| 16-) | 1.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 17-) | 0.0000000E+00 | 1.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 18-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 22-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 23-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 24-) | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.0000000E+00 |

| B-) STIFFNESS MATRIX IN LOCAL COORDINATES | | | | LOCAL DISPLACEMENTS | | |
|---|----------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|
| | (16) | (17) | (18) | (22) | (23) | (24) |
| 16-) | 1.2835000E-04 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | -1.2835000E-04 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 17-) | 0.0000000E+00 | 5.6666667E+06 | 1.7000000E+07 | 0.0000000E+00 | -5.6666667E+06 | 1.7000000E+07 |
| 18-) | 0.0000000E+00 | 1.7000000E+07 | 6.8000000E+07 | 0.0000000E+00 | -1.7000000E+07 | 3.4000000E+07 |
| 22-) | -1.2835000E-04 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 | 1.2835000E-04 | 0.0000000E+00 | 0.0000000E+00 |
| 23-) | 0.0000000E+00 | -5.6666667E+06 | -1.7000000E+07 | 0.0000000E+00 | 5.6666667E+06 | -1.7000000E+07 |
| 24-) | 0.0000000E+00 | 1.7000000E+07 | 3.4000000E+07 | 0.0000000E+00 | -1.7000000E+07 | 6.8000000E+07 |

Çizelge 4. Sistem rijitlik matrisi (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır)

| STRUCTURAL STIFFNESS MATRIX | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|--|--|
| I/J----- | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | | |
| 4 | 1.625E+09 | 0.000E+00 | -8.125E+08 | -1.625E+09 | 0.000E+00 | -8.127E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | | |
| 5 | 0.000E+00 | 1.208E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -1.188E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | | |
| 6 | -8.125E+08 | 0.000E+00 | 5.510E+08 | 8.127E+08 | 0.000E+00 | 2.709E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | | |
| 7 | -1.625E+09 | 0.000E+00 | 8.127E+08 | 1.725E+09 | 0.000E+00 | 8.127E+08 | -1.000E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | | |
| 8 | 0.000E+00 | -1.188E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 3.119E+09 | 3.000E+09 | 0.000E+00 | -3.000E+09 | 3.000E+09 | 0.000E+00 | | |
| 9 | -8.127E+08 | 0.000E+00 | 2.709E+08 | 8.127E+08 | 3.000E+09 | 4.542E+09 | 0.000E+00 | -3.000E+09 | 2.000E+09 | 0.000E+00 | | |
| 10 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -1.000E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 2.020E+08 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | -1.020E+08 | | |

Çizelge 5. Sistem rijitlik matrisinin evriği (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır)

| INVERSE OF THE STRUCTURAL STIFFNESS MATRIX | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|--|
| I/J----- | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | | |
| 4 | 1.196E-04 | 5.727E-09 | -2.918E-06 | 1.225E-04 | 5.824E-09 | -2.912E-06 | 1.225E-04 | -5.819E-06 | -2.912E-06 | 1.225E-04 | | |
| 5 | 5.727E-09 | 4.968E-07 | -2.468E-10 | 5.977E-09 | 4.968E-07 | -2.537E-10 | 5.977E-09 | 4.963E-07 | -2.546E-10 | 5.977E-09 | | |
| 6 | -2.918E-06 | -2.468E-10 | 1.787E-07 | -3.096E-06 | -2.509E-10 | 1.784E-07 | -3.096E-06 | 3.566E-07 | 1.784E-07 | -3.096E-06 | | |
| 7 | 1.225E-04 | 5.977E-09 | -3.096E-06 | 1.256E-04 | 6.078E-09 | -3.094E-06 | 1.256E-04 | -6.182E-06 | -3.094E-06 | 1.256E-04 | | |
| 8 | 5.824E-09 | 4.968E-07 | -2.509E-10 | 6.078E-09 | 5.052E-07 | -2.580E-10 | 6.078E-09 | 5.047E-07 | -2.589E-10 | 6.078E-09 | | |
| 9 | -2.912E-06 | -2.537E-10 | 1.784E-07 | -3.094E-06 | -2.580E-10 | 1.856E-07 | -3.094E-06 | 3.709E-07 | 1.855E-07 | -3.094E-06 | | |
| 10 | 1.225E-04 | 5.977E-09 | -3.096E-06 | 1.256E-04 | 6.078E-09 | -3.094E-06 | 1.256E-04 | -6.182E-06 | -3.094E-06 | 1.256E-04 | | |
| 11 | -5.819E-06 | 4.963E-07 | 3.566E-07 | -6.182E-06 | 5.047E-07 | 3.709E-07 | -6.182E-06 | 1.248E-06 | 3.718E-07 | -6.182E-06 | | |

Çizelge 6. Öz vektörler (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır)

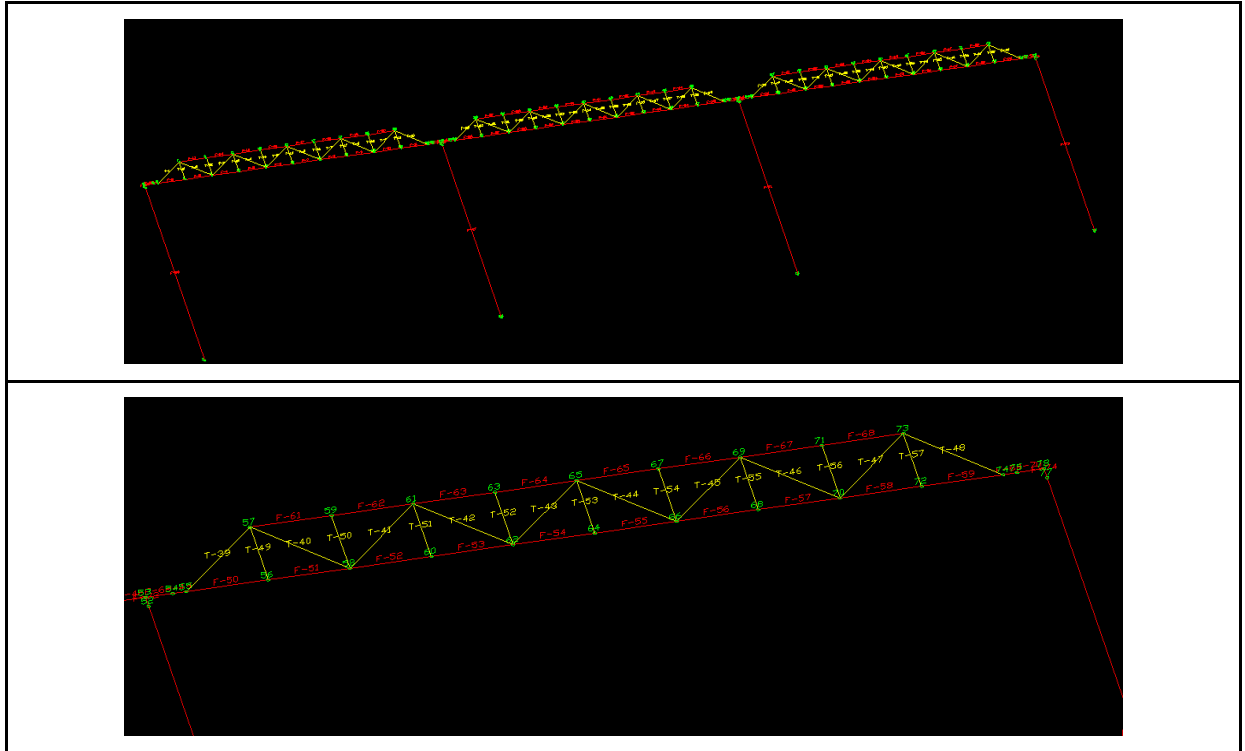
| EIGEN VECTORS | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|--|
| I/J----- | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | | |
| 4 | 4.399E-02 | 9.429E-03 | 8.561E-04 | -4.947E-03 | 3.341E-02 | -3.367E-03 | 1.611E-03 | 1.554E-04 | 2.594E-04 | 9.755E-03 | | |
| 5 | 1.844E-06 | 1.327E-04 | 1.191E-04 | -1.776E-04 | -1.293E-04 | -1.432E-03 | 2.107E-03 | 1.543E-03 | 1.254E-02 | -2.361E-02 | | |
| 6 | -1.046E-03 | 5.540E-03 | 1.240E-03 | -4.182E-03 | -6.619E-03 | 1.137E-03 | -1.122E-03 | -6.399E-04 | -1.997E-04 | -7.139E-04 | | |
| 7 | 4.504E-02 | 3.880E-03 | -3.877E-04 | -7.561E-04 | 4.004E-02 | -4.478E-03 | 2.693E-03 | 7.669E-04 | 3.792E-04 | 1.059E-02 | | |
| 8 | 1.875E-06 | 1.349E-04 | 1.210E-04 | -1.805E-04 | -1.313E-04 | -1.454E-03 | 2.139E-03 | 1.566E-03 | 1.262E-02 | -2.372E-02 | | |
| 9 | -1.045E-03 | 5.554E-03 | 1.247E-03 | -4.196E-03 | -6.626E-03 | 1.083E-03 | -1.042E-03 | -5.817E-04 | -3.744E-05 | -9.664E-04 | | |
| 10 | 4.504E-02 | 3.845E-03 | -3.945E-04 | -7.312E-04 | 4.006E-02 | -4.489E-03 | 2.708E-03 | 7.776E-04 | 3.989E-04 | 1.052E-02 | | |

Çizelge 7. Normalleştirilmiş öz vektörler (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır)

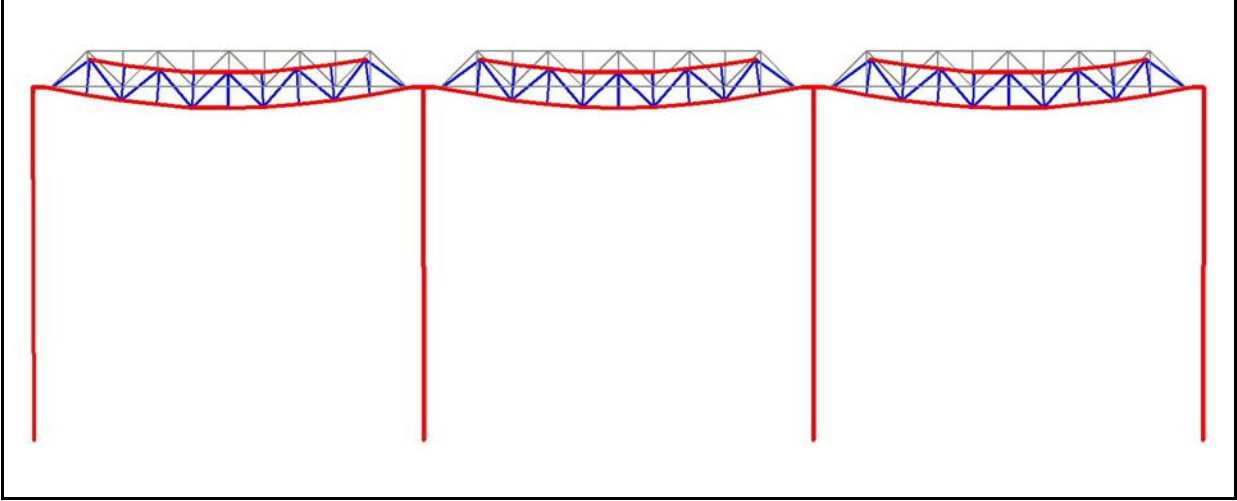
| NORMALIZED EIGEN VECTORS | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|--|
| I/J----- | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | | |
| 4 | 9.765E-01 | 4.992E-01 | 2.492E-02 | -1.910E-01 | 8.206E-01 | -2.297E-02 | 1.111E-02 | 1.085E-03 | 2.218E-03 | 8.314E-02 | | |
| 5 | 4.092E-05 | 7.026E-03 | 3.466E-03 | -6.860E-03 | -3.174E-03 | -9.772E-03 | 1.453E-02 | 1.077E-02 | 1.073E-01 | -2.012E-01 | | |
| 6 | -2.321E-02 | 2.933E-01 | 3.609E-02 | -1.615E-01 | -1.626E-01 | 7.758E-03 | -7.736E-03 | -4.467E-03 | -1.708E-03 | -6.084E-03 | | |
| 7 | 9.997E-01 | 2.054E-01 | -1.128E-02 | -2.920E-02 | 9.833E-01 | -3.055E-02 | 1.858E-02 | 5.353E-03 | 3.243E-03 | 9.026E-02 | | |
| 8 | 4.162E-05 | 7.141E-03 | 3.522E-03 | -6.971E-03 | -3.224E-03 | -9.921E-03 | 1.475E-02 | 1.093E-02 | 1.079E-01 | -2.022E-01 | | |
| 9 | -2.319E-02 | 2.940E-01 | 3.629E-02 | -1.620E-01 | -1.627E-01 | 7.385E-03 | -7.185E-03 | -4.060E-03 | -3.201E-04 | -8.236E-03 | | |
| 10 | 9.998E-01 | 2.036E-01 | -1.148E-02 | -2.824E-02 | 9.837E-01 | -3.062E-02 | 1.868E-02 | 5.427E-03 | 3.411E-03 | 8.968E-02 | | |

Çizelge 8. Öz değerler, frekans ve periyotlar (örnek problemde 222 adet)

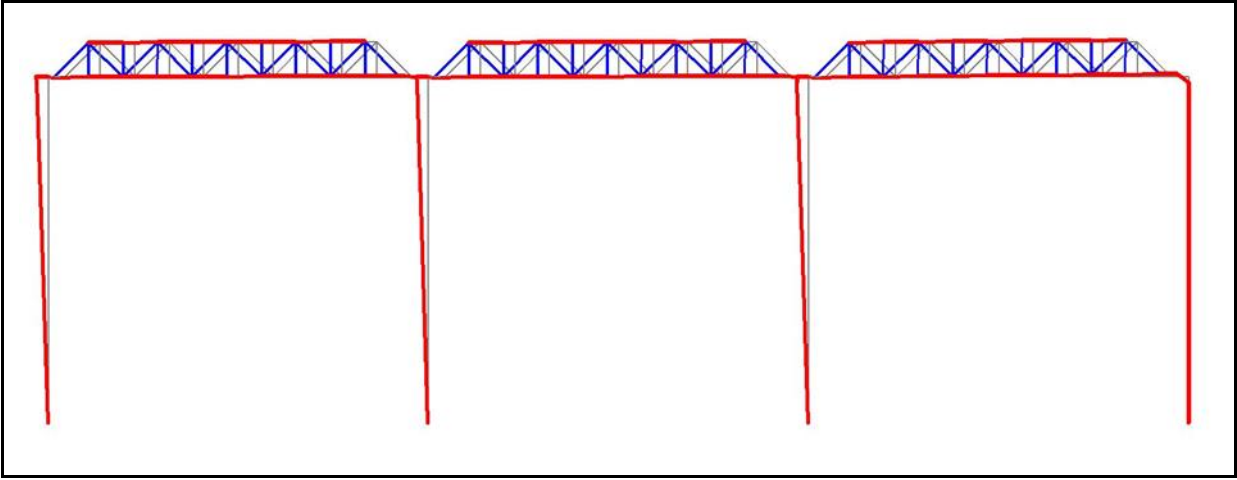
| NUMBER OF MODES =222 | | | | | | | |
|----------------------|---------|---------|----------------|--------------------------|------------------------|-----------------|----------------|
| MODE NO | NODE NO | AXIS NO | ASSOCIATED DOF | EIGENVALUES W (RADIAN/S) | ANGULAR FREQ. (SECOND) | PERIODS (HERTZ) | FREQUENCY |
| 1 | 2 | 1 | 4 | 1.63930992E+01 | 4.04883924E+00 | 1.55184859E+00 | 6.44392761E-01 |
| 2 | 2 | 2 | 5 | 6.85451253E+02 | 2.61811240E+01 | 2.39989142E-01 | 4.16685518E+00 |
| 3 | 2 | 3 | 6 | 6.94983582E+02 | 2.63625413E+01 | 2.38337625E-01 | 4.19572864E+00 |
| 4 | 3 | 1 | 7 | 6.98547907E+02 | 2.64300569E+01 | 2.37728791E-01 | 4.20647408E+00 |
| 5 | 3 | 2 | 8 | 1.29297380E+03 | 3.59579449E+01 | 1.74737057E-01 | 5.72288452E+00 |
| 6 | 3 | 3 | 9 | 1.78167782E+03 | 4.22099256E+01 | 1.48855640E-01 | 6.71791811E+00 |
| 7 | 4 | 1 | 10 | 1.82868074E+03 | 4.27630768E+01 | 1.46930154E-01 | 6.80595487E+00 |
| 8 | 4 | 2 | 11 | 1.87481453E+03 | 4.32991285E+01 | 1.45111130E-01 | 6.89127015E+00 |
| 9 | 4 | 3 | 12 | 1.15297038E+04 | 1.07376458E+02 | 5.85154846E-02 | 1.70894936E+01 |
| 10 | 5 | 1 | 13 | 1.22009129E+04 | 1.10457743E+02 | 5.68831603E-02 | 1.75798953E+01 |



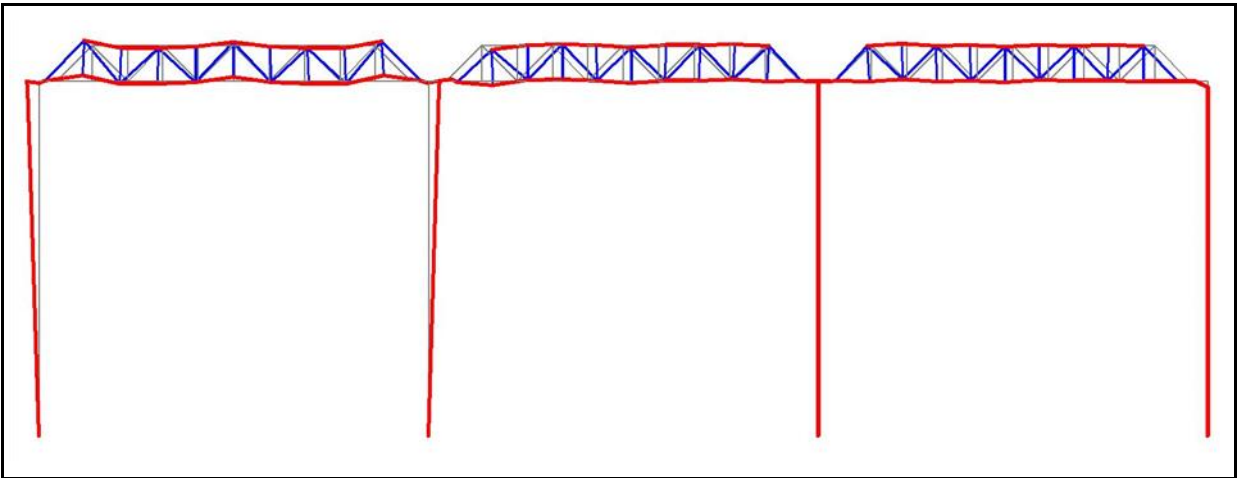
Şekil 2. Matematiksel model



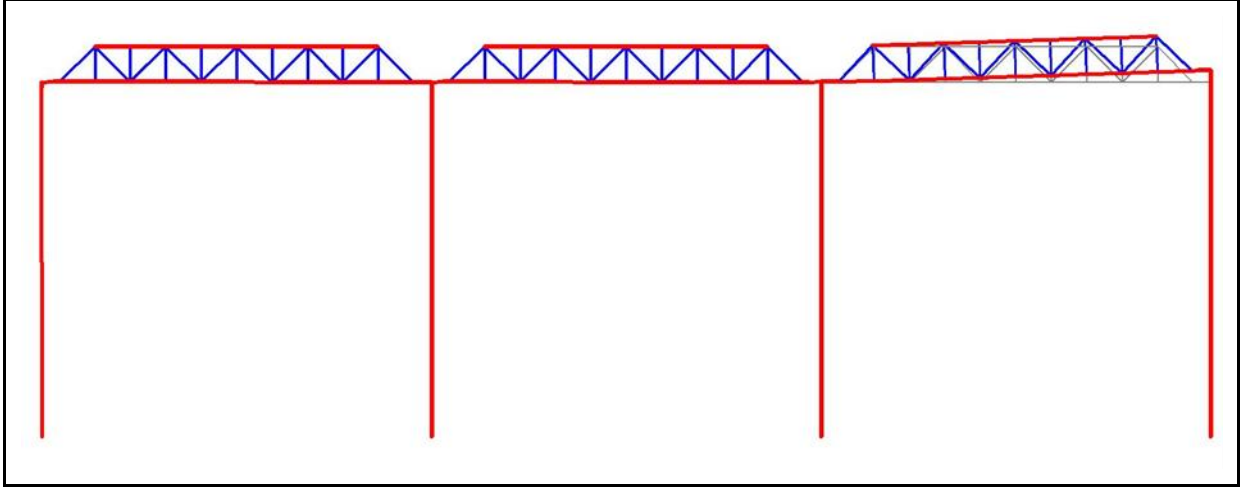
Şekil 3. Statik deformasyonlar (simetrik yükleme)



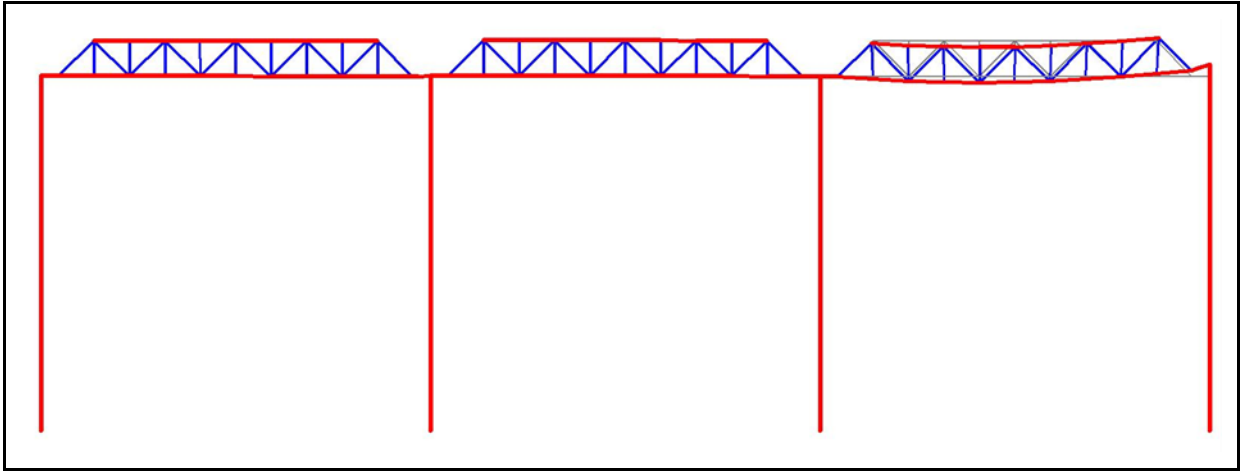
Şekil 4. Mod şekli 1 (yatay hareket)



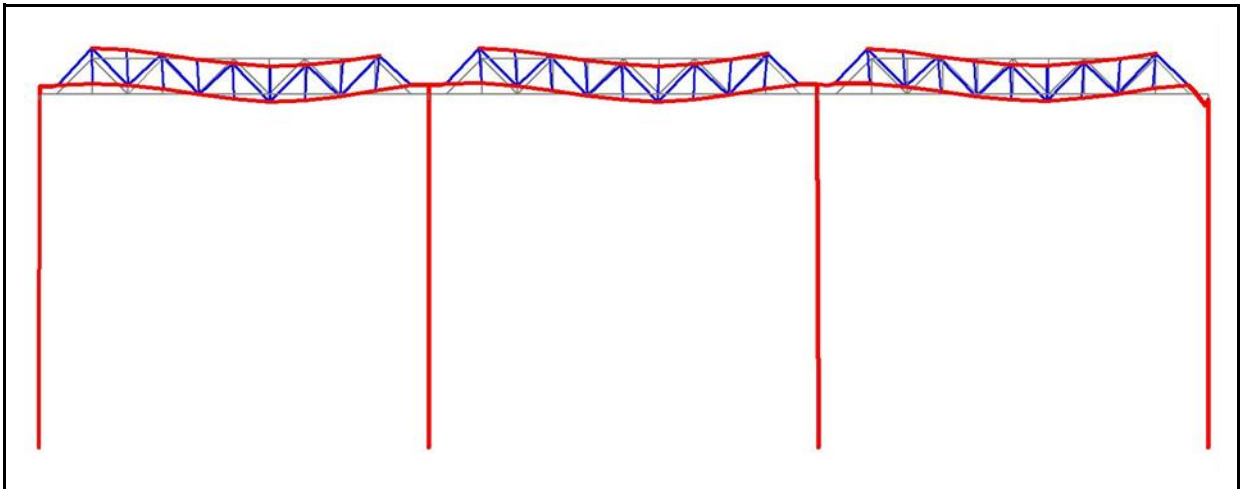
Şekil 5. Mod şekli 2 (yatay ve düşey hareket)



Şekil 6. Mod şekli 3 (sağ kolon üzerinde düşey hareket)



Şekil 7. Mod şekli 4 (sağ kolon üzerinde düşey hareket)



Şekil 8. Mod şekli 5 (düşey hareket)

SONUÇLAR

Geliştirilmekte olan bilgisayar programı tüm ara işlemlerin yanı sıra tüm indisli değişkenleri gösterebilmektedir. Parametrik müdahaleler mümkündür. Geometrik kontrolleri kolaylaştırmak için AutoCAD programı [23] ile entegre çalışmaktadır. Program formülasyonunda, sistem rijitlik matrisi ve kütle matrislerinin boyutları aynıdır ve bu boyutlar kullanılan bilgisayarın kapasitesine göre milyonlar mertebesine ulaşabilmektedir. Sistem kütle ve rijitlik matrislerinin boyutlarının aynı olması nedeniyle, açısal bileşenler dahil her serbestliğe karşılık gelen bir kütle bileşeni mevcuttur. Yayılı kütleler hesaba katılabilmekte ve açısal bileşenler göz önüne alınabilmektedir. Programın geliştirilmesinin her aşamasında doğrulama test dataları çalıştırılmakta ve diğer genel amaçlı sonlu elemanlar programları ile kıyaslanmaktadır. Program mevcut hali ile çok sayıda (milyonlarca) bilinmeyen için statik analizlerin yanı sıra modal analizleri gerçekleştirebilecek durumdadır. Söz konusu program kullanılarak çalışmalar öncelikle köprü türü (köprü ayağı, tabliye, kiriş, kafes kiriş ve çerçeve elemanlarından oluşan) yapısal sistemler üzerinde yoğunlaştırılmıştır. İlk bulgulara köprü ayaklarının yatay deprem etkileri altında zorlandığı, köprü ayaklarının yatay salınımlarına sebep olan frekanslara yakın frekanslarda, tabliyelerin ve yatay elemanların düşey etkiler altında zorlanabildiği görülmektedir. Bu durum uygun detaylandırılmamış bir sistem için göçme nedeni olabilir. Seçilen örneklerin çoğaltılması ile özellikle hasar görmüş yapılarda göçme modunun kesin olarak belirlenmesi kuvvetle muhtemeldir.

KAYNAKLAR

- [1] A.J., Papazoglou and A.S., Elnashai, 1996, Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25(10): s. 1109–1137. doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199610)25:10<1109::AID-EQE604>3.0.CO;2-0.
- [2] S., Tanimura, T., Sato, T., Umeda, K., Mimura and O., Yoshikawa, 2002, A note on dynamic fracture of the bridge bearing due to the great Hanshin-Awaji earthquake, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, Issue 2, s. 153–160, DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00037-9.
- [3] S.K., Kunnath, E., Erduran, Y.H., Chai and M., Yashinsky, 2008, Effect of Near-Fault Vertical Ground Motions on Seismic Response of Highway Overcrossings, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, Issue 3, s. 282-290, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:3(282).
- [4] A.-J, Ye, S.-D., Hu and L.-C, Fan, 2001, Simulation of Seismic Behavior for Bridge Bearings, *Journal of Tongji University*, 29(1): 6–9.
- [5] C., Wang and X., Chen, 2007, Effect of Vertical Excitation on Seismic Performance of Continuous Bridge, *Journal of Vibration and Shock*, 26(6): s. 31–35.
- [6] M.J.N., Priestley, F., Seible & G.M., Calvi, 1996, *Seismic design and retrofit of bridges*, New York, NY: Wiley. ISBN: 978-0-471-57998-4.
- [7] Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 1995, *Northridge earthquake reconnaissance report*, Oakland, CA: Author.
- [8] Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 1995, *The Hyogo-Ken Nanbu earthquake reconnaissance report*, Oakland, CA: Author.
- [9] Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 2001, *1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake reconnaissance report*, Oakland, CA: Author.
- [10] Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 2011, *Learning from earthquakes bridge performance in the Mw 9.0 Tohoku, Japan, earthquake of March 11, 2011*, Oakland, CA: Author.

- [11] M., Akiyama, D.M., Frangopol & K., Mizuno, 2014, Performance analysis of Tohoku-Shinkansen viaducts affected by the 2011 Great East Japan earthquake, *Structure and Infrastructure Engineering*, 10:9, s. 1228-1247. doi: 10.1080/15732479.2013.806559.
- [12] I., Buckle, W.-H.(P.), Yen, L., Marsh, and E., Monzon, 2012, Implications of bridge performance during Great East Japan Earthquake for U.S. Seismic Design Practice, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, March 1–4, 2012, Tokyo, Japan, s. 1363–1374,
- [13] Kawashima, K., 2012, Damage of Bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, March 1–4, 2012, Tokyo, Japan, s. 82–101.
- [14] T., Kitahara, Y., Kajita & Y., Kitane, 2012, Investigation on the damage cause of the bridge rubber bearings in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Proceedings of the 15th WCEE – World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, paper No. 2815, International Association for Earthquake Engineering.
- [15] California Department of Transportation [CalTrans], 1999, *Bridge memo to designers (20-1) – Seismic design methodology*, Sacramento, CA: Author.
- [16] Japan Road Association [JRA], 2002, *Chapter 1: Seismic design specifications for highway bridges*, Tokyo: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Japan Road Association.
- [17] EN 1998-2, 2005, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges*. Brussels: European Committee for Standardization.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2010, *Guide specifications for seismic isolation design* (3rd ed.), Washington, DC: Author.
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2013, *LRFD bridge design specifications*, Customary U.S. units, 6th ed., with 2013 interim revisions, Washington, DC: Author.
- [20] S.A., Mitoulis, 2015, Uplift of elastomeric bearings in isolated bridges subjected to longitudinal seismic excitations, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11:12, 1600-1615. doi: 10.1080/15732479.2014.983527.
- [21] N.E., Reyhanoğulları and U., Akyüz, 2015, Vertical Ground Motion Influence on Seismically Isolated & Unisolated Bridges, *Challenge Journal Of Structural Mechanics*, 1 (3) (2015), s. 117–123. doi: 10.20528/cjsmec.2015.07.022.
- [22] Z., Jin, S., Pei, X., Li, H., Liu, and S., Qiang, 2016, Effect of vertical ground motion on earthquake-induced derailment of railway vehicles over simply-supported bridges, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 383, s 277-294. doi: 10.1016/j.jsv.2016.06.048.
- [23] AutoCAD, Autodesk Inc. 2016, CAD (Computer-Aided Design) Software, California, USA.
- [24] B., Sarıcı, N., Marionos, ve A., Caner, 2011, Karakaya Demiryolu Köprüsünün Deprem Güçlendirme Ve Karayolu Eklentisi İle Kapasite Artırımı Çalışması, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, s. 1-2, 11-14 Ekim 2011, ODTÜ – Ankara.