

Kafes Sistemlerin Dinamik Hesabı

Emre Kıvanç Budak

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2017

Dynamic Analysis of Trusses

Emre Kıvanç Budak

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

May 2017

Kafes Sistemlerin Dinamik Hesabı

Emre Kıvanç Budak

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Mizam Doğan

Mayıs 2017

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Emre Kıvanç Budak'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Kafes Sistemlerin Dinamik Hesabı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Mizam Doğan

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Mizam Doğan

Üye : Prof. Dr. Eşref Ünlüoğlu

Üye : Prof. Dr. Nevzat Kırac

Üye : Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan Özbaşaran

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Mizam Doğan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kafes Sistemlerin Dinamik Hesabı” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 18/05/2017

Emre Kıvanç Budak

İmza

ÖZET

Kafes sistemler deprem sonrasında hasar almaması istenen yapılarda (sanayi tesisleri, spor salonları, hangarlar vb.) kullanılırlar. Bu yapıların deprem sonrasında, gerek insanların barınmalarını sağlamaları gerekse bölgesel ve ülke ekonomisi bakımından önem arz etmeleri nedeniyle dikkatli bir biçimde tasarlanması, analiz edilmesi ve montajının yapılması gerekir.

Bu çalışmada, düzlem kafes ve uzay kafes sistem örnekleri, SAP2000 analiz programıyla ve el hesabıyla; sabit yük, zati (ölü) yükler ve deprem yükleri etkisi altında analiz edildi. Deprem yüklerinin belirlenmesinde ve modal etkilerin birleştirilmesinde, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007'den faydalanarak, mod birleştirme yöntemi kullanıldı. Analizler sonucunda ulaşılan verilerin değerlendirilmesi yapıldı.

Anahtar Kelimeler: deprem, kafes sistemler, mod birleştirme yöntemi, düzlem kafes sistemler, uzay kafes sistemler

SUMMARY

The truss systems are used in buildings (industrial facilities, sports halls, hangars, etc.) that are required to survive without damage after an earthquake. These structures must be carefully designed, analysed and assembled after the earthquake due to their importance in terms of regional and national economy.

In this study, plane and space truss examples influenced by concentrated loading, dead loadings and earthquake loadings were analysed with SAP2000 analysis program and hand calculation. Mode superposition method taking the Specification for Buildings to be Built in Seismic Zones 2007 into account was used for determining the earthquake loads and mode superposition effects. The results of the analysis were evaluated.

Keywords: earthquake, trusses, modal superposition method, plane trusses, space trusses

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında, sabırla desteklerini benden esirgemeyen anneme ve babama sonsuz teőekkürü borç bilirim. Çalışmamda bana değerli bilgi ve tecrübeleriyle danıőmanlık yapan Doç. Dr. Mizam Doğan’a teőekkürlerimi sunarım. Umarım çalıőmam ilerideki çalışmalar için bir basamak olur. Isaac Newton’un dediği gibi “Ben, benden öncekilerin omuzlarına tırmandığım için onlardan biraz daha ilerisini görebildim.”

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. KAFES SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ	7
3.1. Kafes Sistemler	7
3.1.1. Düzlem kafes sistem (DKS)	7
3.1.2. Uzay kafes sistem (UKS)	9
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	12
3.3. Rijitlik Matrisinin Oluşturulması	14
3.3.1. Eksenel eleman.....	14
3.3.2. Eksenel elemanların birleştirilmesi	16
3.4. Kütle Matrisinin Oluşturulması	18
3.5. Eleman Eksenlerinin Dönüştürülmesi.....	20
3.5.1. Düzlem kafes eleman eksenlerinin dönüştürülmesi	21
3.5.2. Uzay kafes eleman eksenlerinin dönüştürülmesi.....	24
3.6. Hareket Denklemi	25
3.6.1. Serbest titreşim frekansı ve modlar	26
3.6.2. Modal ve spektral matrisler	28
3.6.3. Modların ortogonalliği ve normalizasyonu	29
3.6.4. Özdeğer probleminin çözümü	32
4. YÖNTEM	34
4.1. Deprem Kafes Sistemler Üzerindeki Etkisi	34
4.2. Elastik Deprem Yüklerinin Belirlenmesi	36
4.2.1. Davranış spektrumu.....	36
4.2.2. Spektral ivme katsayısı.....	37
4.2.3. Deprem yükü azaltma katsayısı.....	39
4.2.4. Deprem etkisi altında doğrusal elastik hesap yöntemleri	40
4.2.4.1. <u>Mod birleştirme yöntemi</u>	40
4.2.4.2. <u>Eşdeğer deprem yükü yöntemi</u>	47
4.2.4.3. <u>Zaman tanım alanında hesap yöntemi</u>	47

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
5.1. DKS-1 Örnek Çözüm (El ve SAP2000) Uygulaması	48
5.1.1. Statik analiz	49
5.1.1.1. <u>3 kN'luk yük için statik analiz</u>	49
5.1.1.2. <u>Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz</u>	51
5.1.2. Dinamik analiz	54
5.1.3. Mod birleştirme yöntemi ile analiz.....	56
5.2. DKS-2 Örnek Çözüm (El ve SAP2000) Uygulaması	63
5.2.1. Statik analiz.....	64
5.2.1.1. <u>3 kN'luk yük için statik analiz</u>	64
5.2.1.2. <u>Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz</u>	66
5.2.2. Dinamik analiz	69
5.2.3. Mod birleştirme yöntemi ile analiz.....	70
5.3. DKS-3 Örnek SAP2000 Uygulaması.....	73
5.3.1. Statik analiz.....	74
5.3.1.1. <u>3 kN'luk yük için statik analiz</u>	74
5.3.1.2. <u>Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz</u>	75
5.3.2. Dinamik analiz	76
5.4. UKS-1 Örnek Çözüm (El ve SAP2000) Uygulaması	78
5.4.1. Statik analiz.....	79
5.4.1.1. <u>1000 N'luk yük için statik analiz</u>	79
5.4.1.2. <u>Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz</u>	82
5.4.2. Dinamik analiz	85
5.4.3. Mod Birleştirme Yöntemi ile analiz	86
5.4.3.1. <u>X yönündeki deprem kuvvetleri</u>	87
5.4.3.2. <u>Z yönündeki deprem kuvvetleri</u>	94
5.5. UKS-2 Örnek SAP2000 Uygulaması.....	97
5.5.1. Statik analiz.....	98
5.5.1.1. <u>1000 N'luk yük için statik analiz</u>	98
5.5.1.2. <u>Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz</u>	100
5.5.2. Dinamik analiz	102
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	106
EK AÇIKLAMALAR	108
Ek Açıklama-A : DKS-1 Örneğine Ait Ara İşlemler	109

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
A.1. Elemanların Eksenel Dönüşüm Matrisleri.....	109
A.2. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrisleri	109
A.3. 3 kN'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri.....	111
A.4. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri.....	114
A.5. Dinamik Analiz Ara İşlemleri	116
A.6. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri.....	118
Ek Açıklama-B : DKS-2 Örneğine Ait Ara İşlemler	125
B.1. 3 kN'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri	125
B.2. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri.....	127
B.3. Dinamik Analiz Ara İşlemleri	129
B.4. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri	130
Ek Açıklama-C : UKS-1 Örneğine Ait Ara İşlemler	135
C.1. Elemanların Eksenel Dönüşüm Matrisleri	135
C.2. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrisleri.....	136
C.3. 1000 N'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri.....	139
C.4. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri.....	142
C.5. Dinamik Analiz Ara İşlemleri	145
C.6. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri	146

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kafes sistem örnekleri: a) Washington Wardman Hoteli'nin atriyum çatısı (Hayes'ten, 2013), b) Waterville köprüsü (Anonim'den, 2017).....	2
3.1. a) Perçinli birleşim (Üstündağ'dan, 2013), b) bulonlu birleşim (Sweard'dan, 2011), c) kaynaklı birleşim (Anonim'den, 27.04.2017)	8
3.2. DKS'lerin özel biçimlerde düzenlenmesi (Odabaşı'dan, 2000): a) üçgen, b) trapez, c) paralel, d) değişik başlıklı (üst başlığı parabolik).....	8
3.3. a) Dörtüzlü uzay kafes modül örneği, b) uzay kafes sistem örneği (Polat'tan, 2016)..	9
3.4 Mero birleşim sistemi detayı	10
3.5. Temel biçimleri yönünden UKS'ler: a) düzlem, b) tek eğrilikli (tonozsal), c) çift eğrilikli (kubbesel).....	11
3.6. x_1 ve x_2 koordinatlarına sahip e kafes elemanının düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, eleman üzerindeki herhangi bir nokta ile olan ilişkisi.....	13
3.7. u_1 ve u_2 kadar yer değiştirme sonucu yayda oluşan P_1 ve P_2 uç kuvvetleri.....	15
3.8. i, j ve k düğümlerinde etkiyen u_i , u_j ve u_k yer değiştirmeleri etkisi altında oluşan P_i , P_j ve P_k uç kuvvetleri	17
3.9. i ucunda aksenal yönde $\delta_i=1$ birimlik ivmeye maruz kalan ve j ucunda $\delta_j=1$ birimlik yer değiştirmeye sahip bir kafes eleman.....	18
3.10. Yayılı kütleli, toplu kütleli olarak ifade edilmesi: a) kiriş üzerinde, b) kafes sistem üzerinde	20
3.11. a) Yaya geçidi ve bisiklet yolu (Anonim, 11.04.2017), b) bir kafes elemanın yer değiştirme ve kuvvet bakımından yerel ve genel eksenleri arasındaki ilişki	22
3.12. a) Uzay kafes sistem (Anonim, 29.12.2014), b) e_k kafes elemanının genel koordinat takımında görünüşü, c) e_k kafes elemanının yerel koordinat takımında kuvvet, koordinat ve yer değiştirmeleri, d) e_k kafes elemanının genel koordinat takımında kuvvet, koordinat ve yer değiştirmeleri	24
3.13. a) $f(t)$ kuvveti etkisi altındaki cismin salınımı, b) $f(t)$ etkisi altındaki cisme etkiyen sistem yükleri.....	26
3.14. İki serbestlikli kesme çerçevesi ve buna denk gelen toplu kütleli sistem	30
4.1. a) Kafes eleman hasarı, b) kafes eleman ve birleşim bölgesi hasarı, c) ve d) birleşim bölgesi hasarı (Ünlüoğlu vd.'den, 2007)	35
4.2. (a) ve (b):Kafes sistemin oturduğu altyapının hasar alması (Ünlüoğlu vd.'den, 2007)	35
4.3. TSD bir sistemin deprem etkisi altındaki davranışı.....	37
5.1. DKS-1 örneğine ait düzlem kafes sistem	48
5.2. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri..	49
5.3. Zati yükleme (F_{zati})	51
5.4. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	52
5.5. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli.....	55
5.7. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli.....	55
5.8. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 4. mod şekli.....	55
5.9. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 5. mod şekli.....	56
5.10. 2. mod için yatay deprem kuvvetleri ($F_{deprem2}$).....	57
5.11. 2. mod için $F_{analiz2}$ yüklemesi etkisinde oluşan SAP2000’de analiz sonucu elde edilen iç kuvvetler	58
5.12. 3. mod için yatay deprem kuvvetleri ($F_{deprem3}$).....	59
5.13. 3. mod için $F_{analiz3}$ yükleri etkisinde elemanlarda oluşan SAP2000’de analiz sonucu elde edilen iç kuvvetler.....	60
5.14. DKS-2 örneğine ait düzlem kafes sistem	63
5.15. 3 kN’luk yükleme için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	64
5.16. Zati yükleme (F_{zati})	66
5.17. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	67
5.18. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli.....	69
5.19. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli.....	70
5.20. 1. mod için yatay deprem kuvvetleri ($F_{deprem1}$).....	71
5.21. 1. mod için $F_{analiz1}$ yüklemesi etkisinde oluşan SAP2000’de analiz sonucu elde edilen iç kuvvetler	72
5.22. DKS-3 örneğine ait düzlem kafes sistem	73
5.23. 3 kN’luk yükleme için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	74
5.24. Zati yükleme (F_{zati})	75
5.25. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	76
5.26. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli.....	77
5.27. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli.....	77
5.28. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli.....	77
5.29. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 4. mod şekli.....	77
5.30. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 5. mod şekli.....	78
5.31. UKS-1 örneğine ait uzay kafes sistem.....	79
5.32. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli	86
5.33. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli	86
5.34. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli	86
5.35. 1. mod için, z yönünde deprem kuvvetleri ($F_{(z)deprem1}$)	95

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.36. UKS-2 örneğine ait uzay kafes sistem.....	98
5.37. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli	102
5.38. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli	103
5.39. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli	103
6.1. DKS-1’in SRSS ile birleştirilmiş sonuçlarına göre DKS-2’nin $F_{analiz1}$ için analizinden elde edilen sonuçlarının mutlak değerce azalışı	104
6.2. DKS-1’e göre DKS-3’ün zati yükleme sonucu elde edilen değerlerinin artışı	104
6.3. UKS-1’e göre UKS-2’nin zati yükleme sonucu elde edilen değerlerinin artışı	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. DKS-1 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri.....	48
5.2. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri.....	49
5.3. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri.....	50
5.4. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	50
5.5. 3 kN'luk yükleme için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	50
5.6. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	51
5.7. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	52
5.8. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	52
5.9. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	53
5.10. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	53
5.11. F_{zati} yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	53
5.12. Elle bulunan özdeğer, doğal frekans ve periyot sonuçlarının SAP2000 sonuçlarıyla karşılaştırması.....	54
5.13. 2. mod için $F_{analiz2}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	57
5.14. 2. mod için $F_{analiz2}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	57
5.15. $F_{analiz2}$ yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	58
5.16. $F_{analiz2}$ yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	58
5.17. $F_{analiz2}$ yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	59
5.18. 3. mod için $F_{analiz3}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	60
5.19. 3. mod için $F_{analiz3}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	60
5.20. $F_{analiz3}$ yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	61

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.21. $F_{analiz3}$ yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	61
5.22. $F_{analiz3}$ yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	61
5.23. SRSS ile birleştirilmiş eksenel kuvvet değerleri	63
5.24. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	64
5.25. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri.....	65
5.26. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	65
5.27. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	65
5.28. 3 kN'luk yükleme için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	66
5.29. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	67
5.30. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	67
5.31. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	68
5.32. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	68
5.33. F_{zati} yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	68
5.34. Elle bulunan özdeğer, doğal frekans ve periyot sonuçlarının SAP2000 sonuçlarıyla karşılaştırması.....	69
5.35. 1. mod için $F_{analiz1}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	71
5.36. 1. mod için $F_{analiz1}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	71
5.37. $F_{analiz1}$ yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması..	72
5.38. $F_{analiz1}$ yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	72
5.39. $F_{analiz1}$ yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elde çözüm sonuçlarının karşılaştırması	73
5.40. DKS-3 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri.....	74
5.41. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	74

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.42. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri.....	75
5.43. F_{zati} yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	76
5.44. F_{zati} yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri.....	76
5.45. UKS-1 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri	78
5.46. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	80
5.47. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	80
5.48. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri...	81
5.49. 1000 N'luk yükleme için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması.....	81
5.50. 1000 N'luk yükleme için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	81
5.51. 1000 N'luk yükleme için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	82
5.52. Zati yükleme (F_{zati})	82
5.53. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	83
5.54. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	83
5.55. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	84
5.56. F_{zati} yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması.....	84
5.57. F_{zati} yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması.....	84
5.58. F_{zati} yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	85
5.59. Özdeğerlerin, doğal frekansların ve periyotların; SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	85
5.60. 2. mod için x yönünde deprem kuvvetleri ($F_{(x)deprem2}$).....	87
5.61. 2. mod için $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri	87
5.62. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	88
5.63. 2. mod için $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri	88

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.64. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	89
5.65. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması.....	89
5.66. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	89
5.67. 3. mod için, x yönünde deprem kuvvetleri ($F_{(x)deprem3}$).....	90
5.68. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	90
5.69. 3. mod için $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi sonucunda mesnet tepkileri	91
5.70. 3. mod için $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi sonucunda düğüm noktalarının yer değiştirmeleri ...	91
5.71. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	91
5.72. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	92
5.73. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması.....	92
5.74. 2. ve 3. Modlara ait yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin SRSS yöntemiyle birleştirilmesi.....	93
5.75. SRSS ile birleştirilmiş eksenel kuvvet değerleri	94
5.76. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri.....	95
5.77. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının mesnet reaksiyonları	95
5.78. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	96
5.79. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	96
5.80. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması.....	97
5.81. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması	97
5.82. UKS-2 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri.....	98
5.83. 1000 N’luk yükleme için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri	99

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.84. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri... 99	
5.85. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri 100	100
5.86. Zati yükleme (F_{zati}) 100	100
5.87. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri ... 101	101
5.88. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri 101	101
5.89. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri 102	102
A.1. Elemanlara ait koordinat, uzunluk ve dönüşüm matrisi bileşenleri..... 109	109
A.2. Sistemin doğal periyotları ve doğal frekansları 117	117
A.3. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri..... 118	118
A.4. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri..... 118	118
B.1. Sistemin doğal periyotları ve doğal frekansları 130	130
B.2. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri..... 131	131
B.3. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri 131	131
C.1. Elemanlara ait koordinat, uzunluk ve dönüşüm matrisi bileşenleri 135	135
C.2. Sistemin doğal periyotları ve doğal frekansları 146	146
C.3. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri..... 147	147
C.4. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri 147	147
C.5. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri..... 154	154
C.6. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri 154	154

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kafes sistemler; yapısal olarak sistem elemanlarının sadece eksenleri doğrultusundaki yükleri taşıyacak biçimde oluşturulduğu, yapısal analizlerde çubuk sistem olarak değerlendirilen; küçük kesitler ile geniş açıklıkların geçilmesine olanak tanıyıp sistem ağırlığını azaltan ve özellikle de mühendislikte pek çok yerde kullanılan bir sistemdir. Gerek hesap kolaylığı ve gerekse de hızlı montaj kolaylığı sağlaması; maliyet ve yapı güvenliği açısından kafes sisteme çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Sistemde bulunan boşluklar çeşitli tesisat sistemlerini de bu boşluklardan geçirme olanağı sağlar ve böylece hacimsel kayıp en aza indirilmiş olur. Ayrıca mimarlara geniş ve estetik hacimler yaratma imkânı vermesi, mimarlar tarafından kullanımlarını yaygın hale getirmektedir.

Kafes sistemlerin günümüzdeki kadar pratik ve ekonomik halde kullanılması aslında yapılarda asırlardır çözüm bulunmaya çalışılan bir sürecin ürünüdür. Mimarlar ve mühendisler tarih boyunca hep daha ekonomik ve pratik yöntemler bulma arayışında olmuşlardır ve bu arayış hâlâ devam etmektedir. Elbette; kafes sistemler insanların icat ettiği bir şey değildir. Doğada, bu sistemi kullanan ve hatta doğrudan bu sistemin kendisi olan pek çok canlı vardır. İnsanların uzuvları, kuşların kanatları, örümcek ağları vb. pek çok biçimde çevremize dikkatlice baktığımızda gözlemleyebileceğimiz bir sistemdir. Doğadaki bu sistemlerin benzerleri; çatı sistemlerinde (Şekil 1.1.a), köprülerde (Şekil 1.1.b), enerji nakil hattı direklerinde, spor tesislerinde, sanayi tesislerinde, stadyumlarda, mikrodalga antenlerinde, uçak hangarlarında vb. daha birçok alanda görülmektedir. Ülkemizde son zamanlarda yıldızı parlamış olsa da; kafes sistem yurtdışında sıkça kullanılan bir sistemdir. Üretilen parçaların belli bir standardı sağlaması ile yapısal güvenlik de sağlanmış olur. İnşaat sahasına nakliyesi kolaydır. İnşaat sahasında kaynaklanabilir olması ve montaj teknolojisinin gelişmesi, kafes sistemi avantajlı konuma getirir. Bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle tasarım ve analiz aşamasında daha çabuk sonuçlar alınır. Analizlerde sağladığı bu kolaylığın yanında hafif bir sistem oluşturma olanağı da sağlaması, üzerine gelen dış yükler karşısında kafes sistemleri daha avantajlı hale getirir ve bu da genel yapı maliyetini azaltan bir faktördür.



Şekil 1.1. Kafes sistem örnekleri: a) Washington Wardman Hoteli'nin atriyum çatısı (Hayes'ten, 2013), b) Waterville köprüsü (Anonim'den, 2017)

Bu çalışmanın temel amacı kafes sistemlerin boyutlandırılmasında deprem yüklerini belirlemektir. Standartlarda ve yapılmış olan çalışmaların sayısı göz önüne alındığında, kafes sistemler ile ilgili standartların ve yapılan çalışmaların sayısının oldukça yetersiz olduğu görülür. Bu çalışmada, kafes sistemlerin deprem analizlerine katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

2. Bölüm'de, kafes sistemlerin dinamik davranışları ve deprem karşısındaki davranışları ile ilgili geçmişte yapılmış olan deneysel, gözlemsel ve teorik çalışmalara yer verildi. 3. Bölüm'de, kafes sistemler geometrik tasarımlarına göre düzlem kafes (iki boyutlu) ve uzay kafes (üç boyutlu) sistem olmak üzere iki sınıfta incelendi. Sistem elemanlarının geometrik ve malzeme özellikleri kullanılarak sisteme ait çeşitli teorik bilgiler verildi. 4. Bölüm'de, depremlerin kafes sistemler üzerindeki etkileri üzerinde duruldu ve deprem esnasında yapıya etki edeceği düşünülen deprem kuvvetleri, DBYBHY 2007'den faydalanarak ve Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) kullanılarak elde edildi. 5. Bölüm'de, mesnetlere oturan örnek kafes sistemlerin SAP2000 bilgisayar programı ve el hesabıyla; sabit yük, zati yükler ve deprem yükleri etkisindeki analizleri yapıldı. 6. Bölüm sonuç bölümü olup, örnek sistemlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildi ve ileride yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunuldu.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapı elemanlarının üzerlerine gelen dış yükleri güvenli bir şekilde taşıması gerekmektedir. Deprem etkisi altında, kafes sistemlerin elemanları çeşitli kesit zorlarına maruz kalırlar. Kafes sistemler genellikle, deprem sonrasında hasar almaması gereken geniş açıklıklara sahip yapılarda kullanıldığı için önem arz etmektedir.

Standart ve yönetmeliklerde bu konuyla ilgili çok kapsamlı maddeler bulunmamaktadır ve nasıl davrandığı konusunda çok az şey bilinmektedir (Yi-Gang ve Tien, 1984; Moghaddam, 2004). Uzay çerçevenin dinamik analizinin kapsadığı çalışma çok büyük olması sebebiyle uzay çerçevenin sismik kuvvetini öngörmek için basit ve gerçekçi bir metot, pratik tasarım amacıyla gereklidir (Yi-Gang ve Tien, 1984).

Araştırmalar uzay yapıların sismik davranışlarının geleneksel yapılardan tamamıyla farklı olabileceğini göstermektedir (Moghaddam, 2004). Bunun yanında yönetmelik ve standartlar yeterli olsa bile tasarım ve üretim sonrasındaki hatalar da önemli birer etmen olarak karşımıza çıkmaktadır. Korozyon, montaj hataları, montaj esnasında proje dışında uygulamalarda bulunmak, yapılan bölgenin meteorolojik özelliklerine göre tasarım yapılmaması ve özellikle yerinde kaynak yapımının hatalı yapılması sonucunda sistem gerekli özellikleri göstermekten uzak olmaktadır. Uzay yapılarıdaki göçmelerin genelde mesnet ve birleşim bölgelerinde meydana geldiği görülmüş. Her şeye rağmen uzay yapıların hafif, uygun geometride, hiperstatik ve yüksek dayanım kapasitesi olması üstün özellikleri olmuş (Moghaddam, 2004).

Yi-Gang ve Tien (1984), düşey deprem yükleri altında uzay çerçevenin üzerine gelen kuvvetleri kestirmek için bir metot önermişlerdir. Genelde kullanılan, bir dizi uzay çerçevenin farklı tip ve açıklıklarla bilgisayar analizi yapılmış. Düşey deprem yükleri etkisini araştırmak için çalışmada, Çin'de önerilen düşey spektrumu ve karşılaştırma yapmak amacıyla Wilson- θ metodu uygulanmış El-centro (1940) ve Tianjin (1976) düşey ivme kayıtları uygulanmış. Araştırmanın sonucu olarak; önerilen metodun esas biçimi, uzay çerçevelerin serbest titreşim karakterleri ve deprem tepkisi raporlanmıştır. Hesaplanmış sonuçlar esas periyodun açıklıkla arttığını, titreşim modlarının düşey ve yatay olarak

sınıflandırılabileceğini, farklı tip uzay çerçevelerin düşey modlarının esasında aynı şekli gösterdiğini ve eşit açıklıklı farklı tipteki uzay çerçeveler için düşey frekanslarının birbirine yakın olduğu gözlenmiş. Önerilen yöntem daha gerçekçi yaklaşım için zemin şartlarını ve uzay çerçeve tipini içermektedir.

Moghaddam (2004), çalışmada iki farklı konfigürasyondaki çift tabakalı kemer tonoz; kar yükünün varlığındaki sismik kuvvetler konu edilerek onların tepkileri, elastik ve elastik olmayan aralıklarda çalışılmış. Enine yöndeki yer değiştirmelerin oluşmadığı varsayılarak toplam kütlelerin düğüm noktalarına dağıtılmasıyla farklı mesnet koşulları ve çeşitli deprem kayıtları kullanılarak analiz edilmiş. Sismik yükler, İran sismik standardına uygun olarak ve Naghan deprem kayıtları kullanılarak iki şekilde seçilmiş. Doğrusal olmayan analizin yapılması için SOHRAB ve DRAIN-2DX bilgisayar programları kullanılmış. Çalışmanın sonucunda deprem etkisi süresince kar yükünün olmasının ya da olmamasının frekans ve mod değerleri açısından etkili olduğu belirtilmiş. Kar yükünün varlığının yapı üzerine gelen deprem yükünü ve periyotları artırdığı vurgulanmış. Şiddetli depremler esnasında uzay yapıları etkileyen elastik olmayan sismik kuvvetler sıradan yapılardakinden daha fazla olabileceğine işaret edilmiş. Bu kuvvetler, altyapının dayanımı ile azaltılabilir. Sıradan yapılara karşın, eğrisel formdaki uzay yapılarda yüksek modlar ve düşey modlar depremde etkin bir şekilde katkı sağlamış. Yatay yer hareketinin çok önemsiz bir düşey yer değiştirmeye neden olduğu görülmüş. Burkulma öncesi davranış deprem etkisinde baskın olduğunu kanıtlamış.

Özgür (2005), çalışmada geometri bakımından farklı, bir yapı üzerine oturan 18 çatı TDY (Türk Deprem Yönetmeliği) 1998 şartlarına göre, dört farklı zemin koşulunda, elastik ötesi davranışların analiz edilmesi için doğrusal olmayan statik itme yöntemi kullanılarak ve deprem yükleri kolon tepe noktalarına uygulanarak SAP2000 bilgisayar programıyla analiz edilmiş. Deprem yüklerine maruz kalan sistemlerde kullanılan çapraz elemanların sismik performans etkisi ve modellerin göçme mekanizmaları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kolonların üzerine oturan sistemlerin periyotları, sabit mesnede oturan sistemlerden daha büyük periyotlara sahip olduğu ve kullanılan çapraz elemanların sistem periyotlarını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiş. Sistem geometrisinin davranışta önemli bir rol oynadığı gözlenmiş.

Korkmaz ve Ay (2007), çalışmada rijitliği birbirinden farklı ve beraber çalışan kafes sistem ve alt yapının davranışları incelenmiş. TDY 1998'e göre maksimum yer değiştirme, taban kesme kuvvetleri ve taban momentleri bulunarak üzerinde değerlendirmeler yapılmış. Çalışmanın sonucunda maksimum yer değiştirme değişiminin deprem bölgesi ve yerel zemin sınıfı kriterlerine göre doğrusal olmadığı gözlenmiş. Yerel zemin sınıflarının maksimum yer değiştirmede daha etkin olduğu gözlenmiş. Ama en iyi deprem koşullarında maksimum yer değiştirmede deprem bölgesi baskın olmuş. Maksimum yer değiştirme üzerinde, seçilen çatı sisteminden ziyade alt yapının dayanımının etkili olduğu görülmüş. Elde edilen taban kesme kuvveti ve taban momenti değişimleri de maksimum yer değiştirme kuvvetlerine paralellik göstermiş. Yatay deprem yükünden kaynaklanan düşey yer değiştirmelerin oldukça küçük olduğu belirtilmiş.

Ülker (2007), çalışmada, çift katmanlı kafes sistemlerin statik ve dinamik analizi SAP2000 ve FRAMECAD bilgisayar programlarıyla çeşitli yük kombinasyonları için yapılmış. Çalışmanın sonucunda, kullanılan analiz programlarının gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilmiş.

Bayraktar vd. (2007), çalışmada Trabzon ili Akçaabat ilçesinde bulunan düzlem kafes bir çatının frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları teorik ve operasyonel modal analiz yöntemleri ile belirlenmeye çalışılmış. Çalışmanın sonucunda elde edilen verilerin, teorik çalışmalardan farklı olduğu gözlenmiş ve bunun nedeninin yapılan malzeme ve sınır şartları (düğüm noktalarının mafsallı olarak davranması gibi) kabullerinin gerçek davranıştan farklı olabileceği vurgulanmış.

Ünlüoğlu vd. (2007), çalışmada Adapazarı vagon fabrikasında, 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Kocaeli depreminde, oluşan hasarlar incelenmiş. Kafes sistemin üzerine oturduğu altyapının hasarlarından bahsedilmiş ve kafes sistemde kullanılan elemanların narin ve mesnetlerinin doğru tasarlanmamış olması üzerinde durulmuş.

Doğan vd. (2015), çalışmada, deprem yüklerinin doğrudan çatı kafes sisteme mesnetlerinden etkimesi ve farklı kat sayısına sahip yapıların üzerine oturan çatı kafes sistemlere; dolaylı olarak etkiyen deprem yükleri altında oluşan kesit zorlarının değişimi durumuna göre, kar yüküne göre ve sistemlerin zati ağırlıkları dikkate alınarak analiz

edilmiş. Çalışmanın sonucunda, deprem yüklerinin doğrudan kafes sistemin mesnetlerinden etkimesi halinde sisteme etkiyen deprem yüklerinin dikkat çekici biçimde az olduğunu göstermiş. Kar yükünün ve zati yükün etkisinin, deprem yükünün etkisinden daha fazla olduğu belirtilmiş. Sistemin bir bütün olarak ya da ayrı ayrı analiz edilmesinin önemli farklar yarattığı ancak; deprem yükünün bu kafes sistemlere etkisinin önemli farklar yaratmadığı gözlemlenmiş. Yüklerin kolon uçlarından etkimesiyle doğrudan kafes sistemin mesnetlerinden etkimesi arasında çok büyük farkların olmadığı tespit edilmiş.

3. KAFES SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ

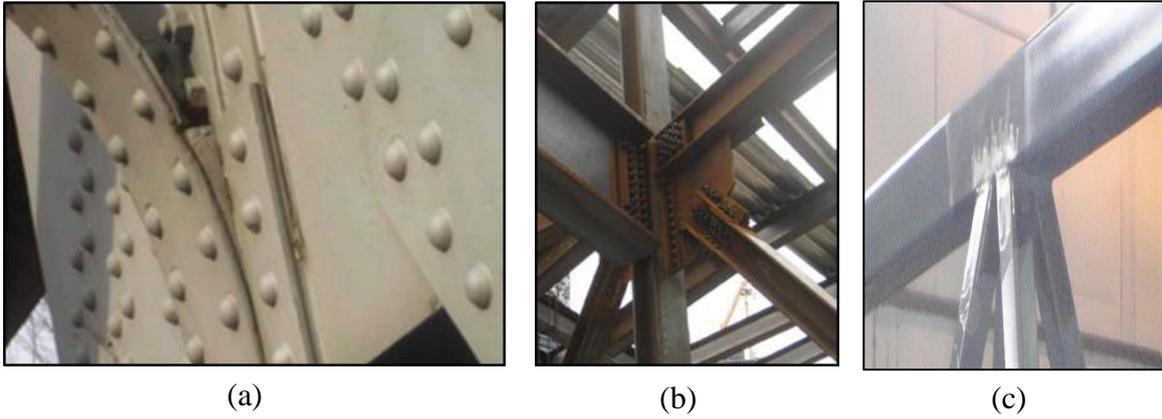
Mühendislikte kafes sistemlerin analizi yapılırken; elemanlarının doğru eksenli olduğu, yapısal olarak sistem elemanlarının sadece eksenleri doğrultusundaki yükleri (çekme veya basınç) taşıyacak biçimde oluşturulduğu, eksenel çubuk eleman olarak idealize edildiği, düğüm noktalarında moment aktarmadığı (yani mafsallı olduğu), dış yüklerin düğüm noktalarına etkiyecek şekilde konumlandığı kabul edilir. Kafes sistemler; düzlem kafes sistem (iki boyutlu) veya uzay kafes sistem (üç boyutlu) olarak tasarlanıp analizleri buna göre yapılır.

3.1. Kafes Sistemler

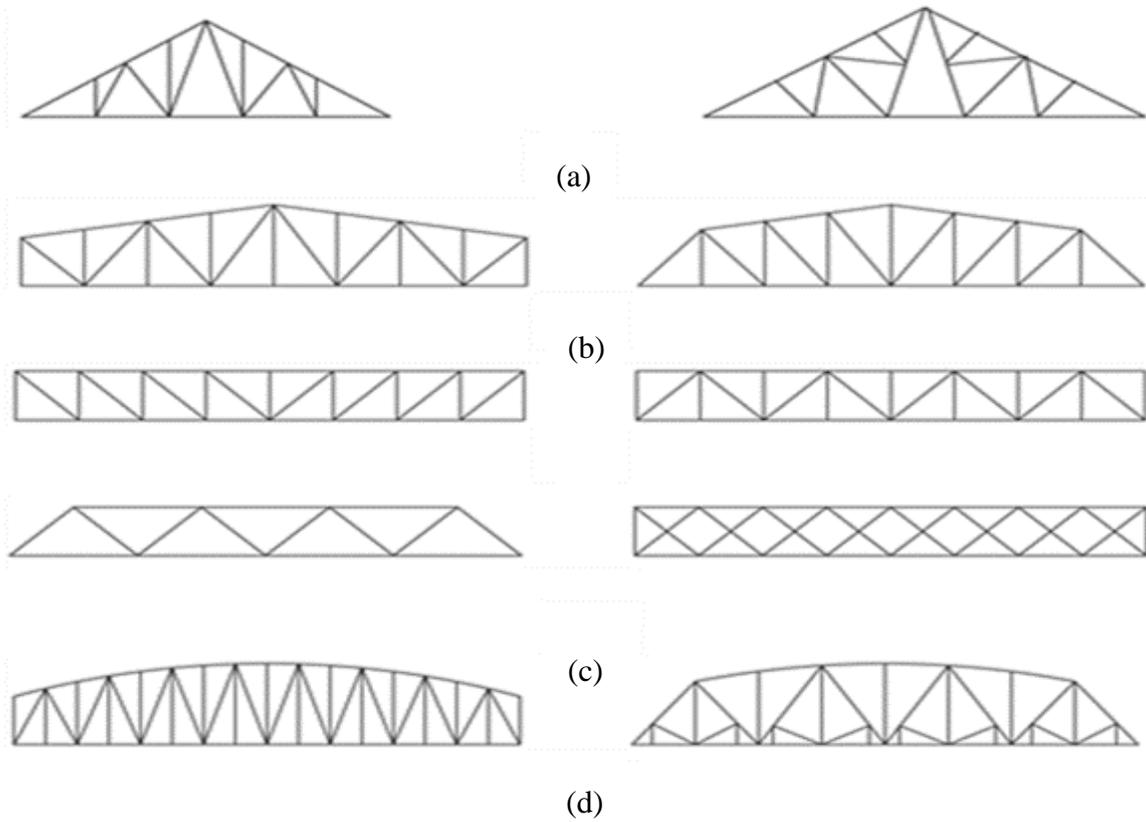
3.1.1. Düzlem kafes sistem (DKS)

Üst ve alt başlık çubukları ile bunların arasında bulunan örgü çubuklarından oluşur. Düşey örgü çubuklarına ‘dikme’, eğik olanlarına da ‘diyagonal (köşegen)’ denir. Çubuk eksenlerinin sistem içinde kesiştikleri yerlere düğüm noktası adı verilir. DKS’de, çubuk eksenleri düğüm noktasında kesiştirilerek çubuklara eksenel kuvvet gelmesi sağlanır. Dış yükler düğüm noktalarında etki ettirilir ve dış yüklerin çubuk düzlemiyle aynı düzlemde olması gerekir. Aksi takdirde, eğilme zorlarından meydana gelen, ikincil gerilmelerin oluşması kaçınılmaz olur.

DKS’ler; Şekil 3.1’deki gibi birleşim araçları bakımından ve kendisini teşkil eden elemanların Şekil 3.2’deki gibi, belli özel biçimlerde düzenlenmesiyle, sistem şekli bakımından farklı isimlerde anılırlar. Birleşim araçları bakımından; perçinli (Şekil 3.1.a) veya bulonlu (Şekil 3.1.b) DKS ve kaynaklı (Şekil 3.1.c) DKS biçiminde sınıflandırmak mümkün olur. Sistem şekli bakımından; üçgen DKS (Şekil 3.2.a), trapez DKS (Şekil 3.2.b), paralel başlıklı DKS (Şekil 3.2.c) ve değişik başlıklı (üst başlığı parabolik) DKS (Şekil 3.2.d) biçiminde sınıflandırmak mümkündür (Odabaşı, 2000). Eğer eleman üzerinde bir noktada yük tesir ettirilmesi gerekiyorsa ve ikincil gerilmelerin oluşması istenmiyorsa, eleman üzerinde uygulanacak yükün olduğu noktaya tali eleman konularak ikincil gerilmenin etkisi engellenir.



Şekil 3.1. a) Perçinli birleşim (Üstündağ'dan, 2013), b) bulonlu birleşim (Sweard'dan, 2011), c) kaynaklı birleşim (Anonim'den, 27.04.2017)



Şekil 3.2. DKS'lerin özel biçimlerde düzenlenmesi (Odabaşı'dan, 2000): a) üçgen, b) trapez, c) paralel, d) değişik başlıklı (üst başlığı parabolik)

Eğer rijitlik matrisinin tersi alınabiliyorsa sistem stabildir. DKS'lerin hiperstatiklik derecesi; k , düğüm noktası sayısı ve m , eleman sayısı olmak üzere

$m+3 < 2k$ ise sistem labil

$m+3 = 2k$ ise sistem izostatik

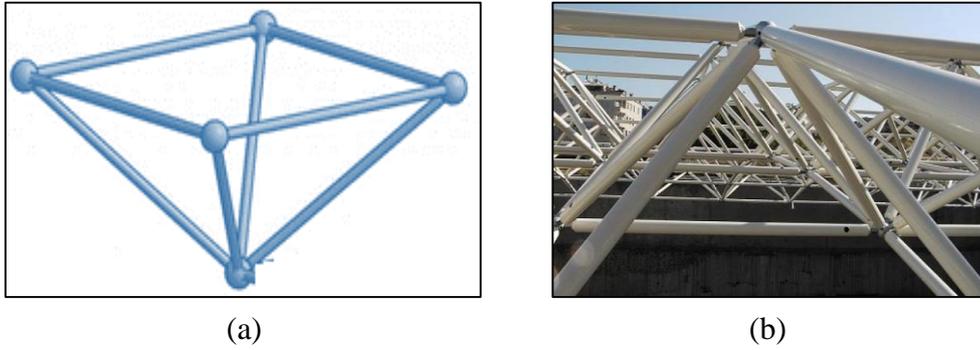
$m+3>2k$ ise sistem hiperstatik

bağıntılarıyla ifade edilir.

İzostatik DKS'lerin statik analizinde; düğüm noktaları yöntemi, kesim (Ritter) yöntemi, Cremona veya Maxwell yöntemi ve Coulman yöntemi kullanılır. Hiperstatik DKS'lerin statik analizinde; kuvvet yöntemi, yer değiştirme yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılır.

3.1.2. Uzay kafes sistem (UKS)

1940'lı yılların başlarından günümüze kadar hala kullanılmakta olan, bütün dünyada bu tarihlerden itibaren yavaş yavaş uygulama fırsatı bulan UKS'ler pek çok avantaja sahip olması nedeniyle bugünkü popülaritesine ulaşmış bir sistemdir. Başlangıçta askeri amaçlar için kullanılmış, ilerleyen süreçte sivil amaçlar için kullanılmıştır. Sistemin yapısal özelliklerinin iyice anlaşılması daha etkin bir biçimde kullanımına yol açmıştır.



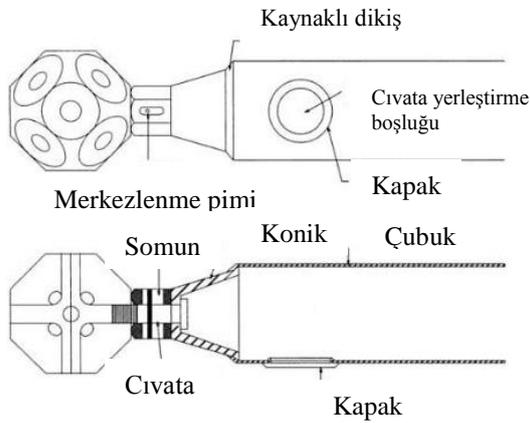
Şekil 3.3. a) Dörtüzlü uzay kafes modül örneği, b) uzay kafes sistem örneği (Polat'tan, 2016)

Sistemin seri üretime elverişli olması, montaj ve demontaj kolaylığının olması, nakliyesinin oldukça kolay yapılabilmesi ve yüksek dereceden hiperstatik olması, günümüzde bilgisayarlı analiz programlarının varlığı ile birlikte, sistemin düşük maliyetle uygulanmasına olanak sağlar. Sistem, dörtüzlü temel modüllerden oluşur (Şekil 3.3.a). Üç boyutlu olması nedeniyle farklı düzlemlerde etkilere maruz kalır. Elemanlarının birbirine bağlantılı olması nedeniyle sürekli bir sistem teşkil eder ve sistemin bir bütün olarak çalışmasını sağlar. UKS genellikle çatı sistemleri (Şekil 3.3.b) oluşturmak için; sanayi

yapılarında, alışveriş merkezlerinde, spor salonlarında ve fuar ve gösteri merkezlerinde kullanılmaktadır. Sistemin teşkilinden ileri gelen boşluklar; elektrik, havalandırma ve iklimlendirme vb. tesisat sistemlerinin geçirilmesinde kullanılmaktadır.

UKS'ler kullanılan birleşim sistemleri bakımından ve temel biçimleri yönünden iki şekilde sınıflandırılır. Kullanılan birleşim sistemleri bakımından; Mero sistemi, Unibat sistemi, Oktaplatte sistemi, SDC sistemi, Pyramitec sistemi, Tridimatec sistemi, Unistrut sistemi, Space Deck sistemi, Triodetic sistemi ve Moduspan sistemi şeklinde yapılabilir (Tekgüvercin, 2002). Pek çok birleşim biçimi olsa da; çubuk elemanlar, konikler, küreler (düğüm noktalarından) ve cıvata, somun ve pimler ile teşkil edilen Mero sistemi en pratik olanıdır. Temel biçimleri yönünden; düzlem UKS, tek eğrilikli (tonozsal) UKS ve çift eğrilikli (kubbesel) UKS olmak üzere üç grupta incelenebilir (Tekgüvercin, 2002).

Mero Sistemi; Dr. Ing. Max Mengerinhausen tarafından geliştirilen ve 1943 yılında piyasaya sürülen Mero düğüm noktası (Anonim, 26.11.2016) ile beraber mimarlıkta uzay kafes sistemler kullanılmaya başladı. Düğümlerde kullanılan küreler, küre merkezine yönelmiş çubukların bağlanmasını mümkün kılar (Şekil 3.4).



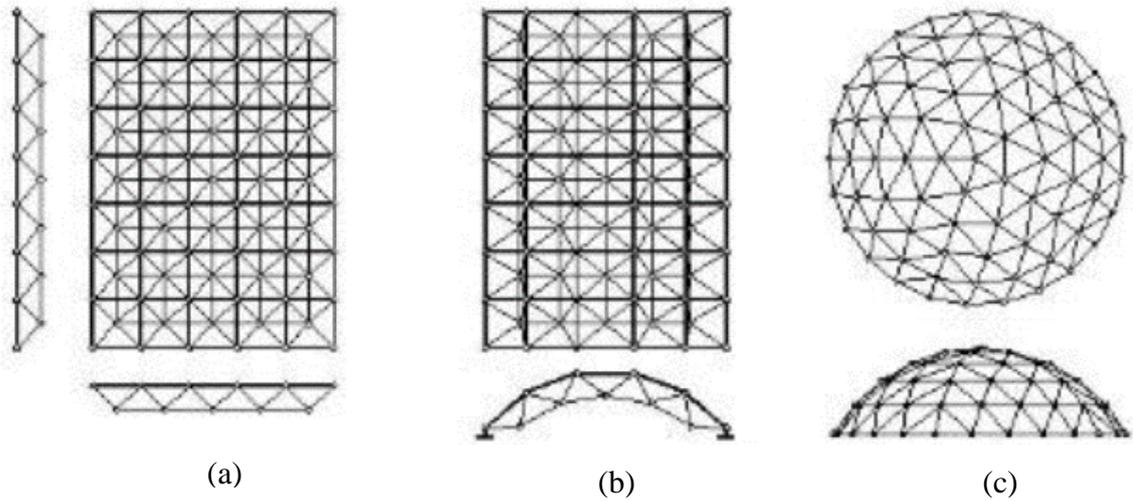
Şekil 3.4 Mero birleşim sistemi detayı

Unibat Sistemi; Fransa'da S. Du Chateau tarafından 1959'da geliştirilen bu sistem modüler bir sistemdir. Bu sistem kare, üçgen ve hegzagonal piramit modüllerin her bir üst köşesinde bir tek yatay vida ile birleştirilmesiyle oluşturulur. Ama alt tabaka elemanları

birbirine tek düşey vida kullanılarak bağlanır. Sistemin üst tabaka elemanları I-kesitlerden ve alt tabaka elemanları cidarlı tüplerden teşkil edilmiştir (Anonim, 27.04.2017).

Oktaplatte Sistemi; oyuk çelik küreler ve kaynakla birleştirilen dairesel çubuk elemanları kullanılır. Düğüm noktası, sıcak ya da soğuk işlenmiş çelik plakalardan yapılmış iki yarım kürenin kaynaklanmasıyla oluşturulur. Oyuk küreler bir halkalı diyafram ile donatılabilir. Bu tip düğüm, uzay çerçevelerin gelişimindeki erken dönemlerde popülerdi. Bu aynı zamanda, diğer patentli sistemlerde taşıma kapasitesiyle sınırlandırılmış uzun açıklıklı yapılar için de kullanışlıdır. Oyuk küreler 500 mm çapa uygun kullanılır. Kaynakla teşkil edilmesi sebebiyle demontajı mümkün değildir.

Düzlem UKS (Şekil 3.5.a); aynı plana sahip olması gerekmez, elemanları düğüm noktalarında birleştirilir, modüllerinin aralarında belli bir açıklık olacak şekilde çift veya çok tabakalı bir dizi şeklinde birbirine paralel iki düzlemde oluşturulur. Tek tabakalı olarak teşkil edilemezler; çünkü düğüm noktalarının mafsallı olması nedeniyle sistem labil olur. Çift tabakalı UKS doğru bir şekilde oluşturulduğunda statik olarak dengede olur.



Şekil 3.5. Temel biçimleri yönünden UKS'ler: a) düzlem, b) tek eğrilikli (tonozsal), c) çift eğrilikli (kubbesel)

Tek eğrilikli (tonozsal) UKS (Şekil 3.5.b); şekli itibariyle tek yönde eğrilığe sahiptir. Eğrilik dereceleri yük taşıma kapasitelerini doğrudan etkiler. Asimetrik yüklemeler karşısında zayıftır.

Çift eğrilikli (kubbesel) UKS (Şekil 3.5.c); kubbe, eğrisel bir yüzeyin eksenini etrafında döndürülmesiyle elde edilir bu nedenle tüm yönlerde eğriliğe sahiptir. Eğrilik dereceleri yük taşıma kapasitelerini doğrudan etkiler. Asimetrik yüklemeler karşısında zayıftır.

Eğer rijitlik matrisinin tersi alınabiliyorsa sistem stabildir. UKS'lerin hiperstatiklik derecesi; k , düğüm noktası sayısı ve m , eleman sayısı olmak üzere

$$m+6 < 3k \text{ (sistem labil)}$$

$$m+6 = 3k \text{ (sistem izostatik)}$$

$$m+6 > 3k \text{ (sistem hiperstatik)}$$

bağıntılarıyla ifade edilir.

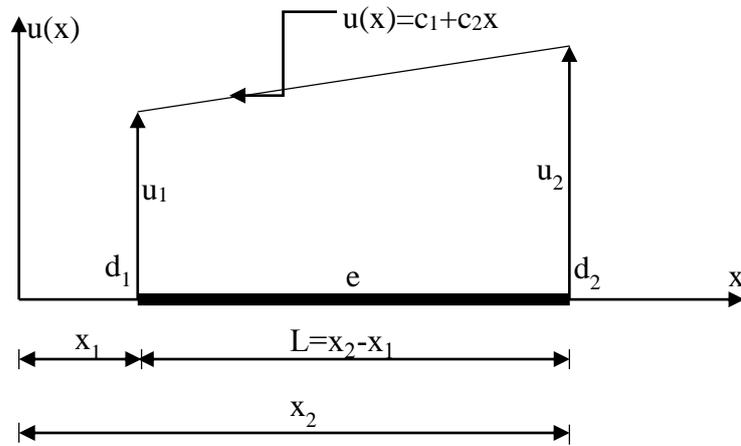
İzostatik UKS'lerin statik analizinde; düğüm noktaları yöntemi ve kesim (Ritter) yöntemi kullanılır. Hiperstatik UKS'lerin statik analizinde; kuvvet yöntemi, yer değiştirme yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Kullanılacak sisteme karar verilmesinin ardından, mühendisler; çubuk sistemin analizi sonucunda sistemin ve elemanların uygulanan yükler etkisinde ne kadar yer değiştirdiğini, güvenli bir hesap yapmak için bilmek isterler. Karmaşık malzeme özellikleri ve sınır koşullarını içeren problemler için, yaklaşık ancak kabul edilebilir çözümler sağlamak için sayısal yöntemler kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemi güçlü ve modern bir hesap yöntemidir ve matris yöntemlerinin doğal bir uzantısı olarak kabul edilebilir. Homojen olmayan, doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı ve karmaşık sınır koşulları gibi karmaşık ve zor problemleri barındırabilir. Yöntemin arkasındaki esas fikir analiz edilecek olan bölgeyi, cismi veya yapıyı; 'sonlu eleman' denilen çok sayıda parçalara veya bölgelere bölmektir ve elemanlar bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu olabilir. Bu elemanların düğüm noktalarında birleştiği kabul edilir. Şekil fonksiyonları, her sonlu eleman üzerindeki yer değiştirmelerin değişimine yaklaşık olarak yaklaşmak üzere seçilir. Her eleman için denge denklemleri minimum potansiyel enerji prensibi ile elde edilir. Bu

denklemler, tüm elemanlar için denklemleri birleştirerek tüm yapı için formüle edilir, böylece yer değiştirmelerin sürekliliği düğümlerde korunur. Elde edilen denklemler, bilinmeyen yer değiştirmeleri elde etmek için sınır koşullarını yerine getirerek çözülür.

Çubuk elemanların düğüm noktaları ile çubuk elemanların üzerindeki noktalar arasında matematiksel bir ilişki kurulmasını, yer değiştirme açısından, polinom biçimindeki ‘şekil fonksiyonları’ sağlar.



Şekil 3.6. x_1 ve x_2 koordinatlarına sahip e kafes elemanının düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, eleman üzerindeki herhangi bir nokta ile olan ilişkisi

Şekil 3.6'daki, d_1 ve d_2 düğüm noktalarının yer değiştirmeleri sırasıyla u_1 ve u_2 , biliniyor ise e çubuk elemanı üzerindeki herhangi bir noktanın yer değiştirmesi

$$u(x) = u_1(x)\Psi_1 + u_2(x)\Psi_2 \quad (3.1)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu denklemde Ψ_1 ve Ψ_2 şekil fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların özelliği Denklem 3.2 ve Denklem 3.3'te belirtildiği gibidir.

$$d_1 \text{ düğümü üzerinde} \quad \left. \begin{array}{l} \Psi_1 = 1 \\ \Psi_2 = 0 \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

$$d_2 \text{ düğüm üzerinde} \quad \left. \begin{array}{l} \Psi_1=0 \\ \Psi_2=1 \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

Bu iki düğüm noktalı aksenal elemanda şekil fonksiyonları

$$\left. \begin{array}{l} u(x)=c_1+c_2x \\ (x=0) \text{ iken } u(0)=u_1=c_1 \\ (x=L) \text{ iken } u(L)=u_2=u_1+c_2L \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

doğrusal olarak değişir (Bkz. Şekil 3.6). Yukarıdaki sınır koşullarından elde edilen c_1 ve c_2 sabitleri için Denklem 3.4 yeniden düzenlenirse

$$u(x)=\left(1-\frac{x}{L}\right)u_1+\frac{x}{L}u_2 \quad (3.5)$$

bağıntısı elde edilir.

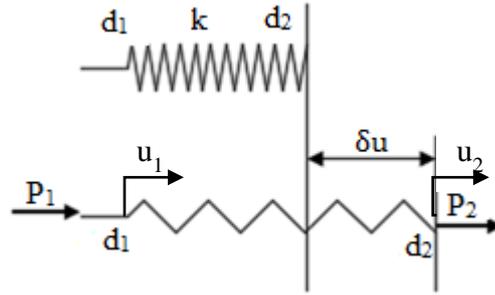
3.3. Rijitlik Matrisinin Oluşturulması

3.3.1. Aksenal eleman

Yay elemanı ve aksenal elemanın (kafes eleman) kendi ekseninde, her bir düğüm noktasındaki serbestlik derecesi birdir. Şekil 3.7’de doğrusal elastik davranış gösteren; d_1 düğümünün u_1 ve d_2 düğümünün u_2 kadar yer değiştirmeleri sonucu yayda oluşan P_1 ve P_2 uç kuvvetleri, δu kadar boy değişimi ve yay katsayısı k olan bir yay eleman görülmektedir. Yay elemanda kuvvet–yer değiştirme arasındaki genel ilişki Denklem 3.6’daki gibidir.

$$F=k(\delta u) \quad (3.6)$$

$$\delta u=u_2-u_1 \quad (3.7)$$



Şekil 3.7. u_1 ve u_2 kadar yer değiştirme sonucu yayda oluşan P_1 ve P_2 uç kuvvetleri

Genel mukavemet bilgisinden faydalanarak kafes elemanın aksenal yük altındaki davranışı; elemanın elastisite modülünü E , kesit alanını A ve boyunu L ile göstermek üzere

$$F=\frac{EA}{L} \delta u \quad (3.8)$$

eşitliği ile ifade edilir. Denklem 3.6 ve Denklem 3.8 birbirine eşitlenirse, k , eleman rijitliği

$$k=\frac{EA}{L} \quad (3.9)$$

yukarıdaki gibi elde edilir.

Eleman dengede ise;

$$P_1+P_2=0 \quad (3.10)$$

Denklem 3.6, Denklem 3.7 ve Denklem 3.10'dan faydalanarak P_1 ve P_2 ile u_1 ve u_2 arasındaki ilişki

$$P_1 = -k(u_2 - u_1) \quad (3.11)$$

$$P_2 = k(u_2 - u_1)$$

bağıntısıyla elde edilir.

[F] elemanın yay kuvveti vektörünü, $[k_{el}]$ elemanın rijitlik matrisini ve $[u_{el}]$ elemanın yer değiştirme vektörünü ifade etmek üzere, Denklem 3.11 matris formunda gösterilirse;

$$[F] = [k_{el}][u_{el}] \quad (3.12)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$[u_{el}] = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$[k_{el}] = k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Denklem 3.12 elde edilir.

3.3.2. Aksenal elemanların birleştirilmesi

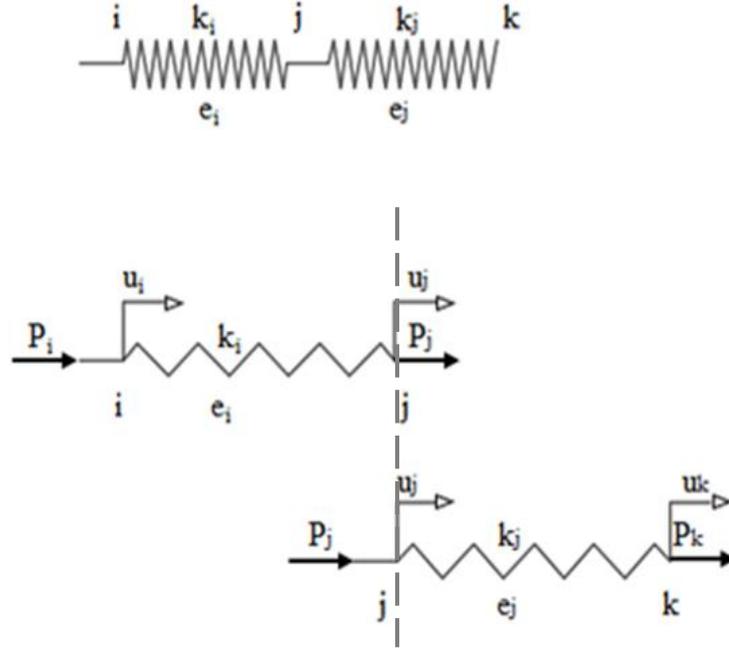
Şekil 3.8'deki yay sisteminde j düğüm noktası, e_i ve e_j yay elemanları için ortaktır. Tek bir yaydakine benzer olarak, birlikte çalışan yaylarda da denge koşuluna dayanarak tümü için birleştirilmiş sistem matrisine ulaşılır.

Denklem 3.12, Denklem 3.13, Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'ten faydalanarak elemanlara ait kuvvet vektörleri ile yer değiştirme vektörleri arasındaki ilişki

$$[P_{ii}] = k_i \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} [u_{ii}] \quad (3.16)$$

$$[P_{ij}] = k_j \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} [u_{ij}] \quad (3.17)$$

biçiminde ifade edilir.



Şekil 3.8. i, j ve k düğümlerinde etkiyen u_i , u_j ve u_k yer değiştirmeleri etkisi altında oluşan P_i , P_j ve P_k uç kuvvetleri

Denklem 3.16 ve Denklem 3.17’de, $[u_{ij}]$, e_i elemanına ait yer değiştirme vektörünü ve $[u_{ij}]$, e_j elemanına ait yer değiştirme vektörünü; $[P_{ii}]$, e_i elemanına ait kuvvet vektörünü ve $[P_{ij}]$, e_j elemanına ait kuvvet vektörünü

$$[u_{ii}] = \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad [u_{ij}] = \begin{bmatrix} u_j \\ u_k \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$[P_{ii}] = \begin{bmatrix} P_i \\ P_j \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad [P_{ij}] = \begin{bmatrix} P_j \\ P_k \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

eşitlikleri ifade eder. Bütün sistemin, sistem kuvvetleri ile yer değiştirmeleri arasındaki ilişki, sistemin rijitlik matrisi $[K]$, sistemin yer değiştirme vektörü $[U]$ ve sistemin kuvvet vektörü $[F]$ olmak üzere, Denklem 3.12’den faydalanarak;

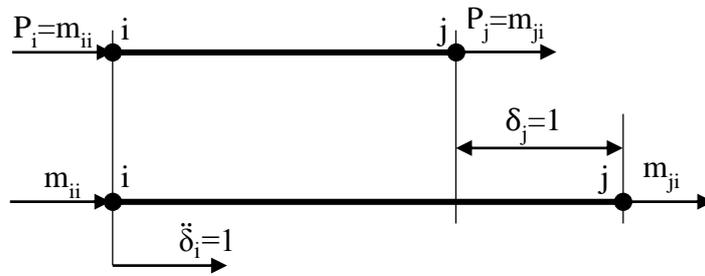
$$[F]=[K][U]=\begin{bmatrix} P_{ii} \\ P_{ij} \\ P_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i & -k_i & 0 \\ -k_i & k_i+k_j & -k_j \\ 0 & -k_j & k_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

bağıntısı ile elde edilir. Simetrik bir matris olan sistem rijitlik matrisi, $[K]$, oluşturulurken; eleman matrislerindeki rijitlik terimleri düğüm noktası serbestlikleri ile olan ilişkileri gözetilerek toplanmıştır.

3.4. Kütle Matrisinin Oluşturulması

Tüm gerçek fiziksel yapılar, üzerlerine bir dış yük etkimesi durumunda, Newton'un ikinci kanunu gereği dinamik davranır ve bu dinamik davranış, D'Alembert prensibi olarak bilinen, kütlesi ile ivmesinin çarpımı kadar eylemsizlik kuvveti oluşturur. Şekil 3.9'da bir kafes elemanın j düğümünde $\delta_j=1$ birimlik yer değiştirme ile i düğümünde $\ddot{\delta}_i=1$ birimlik ivme etkirse; i düğümünün şekil fonksiyonu $\Psi_i(x)$, t anında, eleman eksenel doğrultusunda bir x noktasındaki ivme aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\ddot{u}_i(x,t)=\Psi_i(x)\ddot{\delta}_i(t) \text{ veya } \ddot{u}_i(x,t)=\Psi_i(x) \quad (3.21)$$



Şekil 3.9. i ucunda aksenal yönde $\ddot{\delta}_i=1$ birimlik ivmeye maruz kalan ve j ucunda $\delta_j=1$ birimlik yer değiştirmeye sahip bir kafes eleman

Bu birim ivmenin sonucunda, elemanın birim uzunluğu boyunca kütlesi $\bar{m}(x)$ olmak üzere, elemanın birim uzunluğu boyunca eylemsizlik kuvveti

$$f_1=\bar{m}(x)\Psi_1(x) \quad (3.22)$$

olarak ifade edilir. m_{ji} kütle katsayısına karar vermek için, kafes elemana Şekil 3.9'da görülen $\delta_j=1$ virtüel yer değiştirmeyi verdiğimizde bu virtüel yer değiştirme sırasında sadece dış kuvvetin yaptığı iş,

$$W_E = m_{ji} \delta_j ; \delta_j = 1 \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir. Kafes elemanın j düğümünün şekil fonksiyonu $\Psi_j(x)$ olmak üzere; f_1 eylemsizlik kuvveti tarafından bu virtüel yer değiştirme sırasında birim uzunluğu boyunca etkileyen iç iş

$$\delta W_I = f_1 \Psi_j(x) = \bar{m}(x) \Psi_i(x) \Psi_j(x) \quad (3.24)$$

biçiminde ifade edilir. Böylece toplam iç iş, eleman uzunluğu L boyunca,

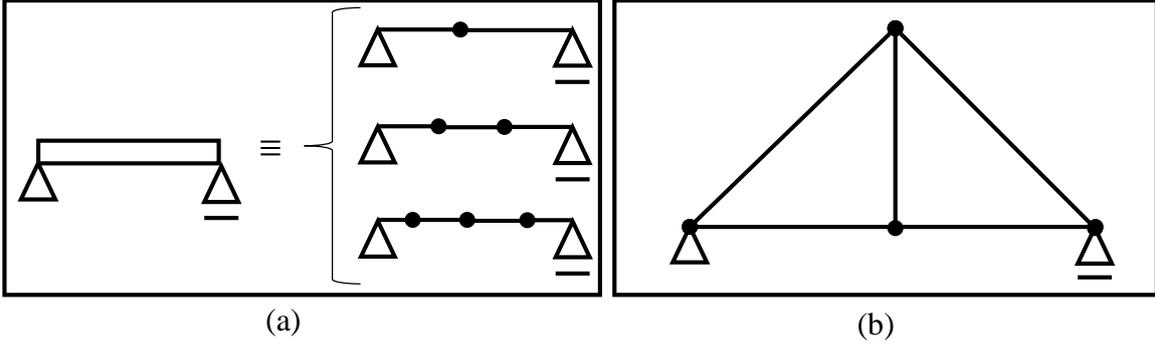
$$W_I = \int_0^L \bar{m}(x) \Psi_i(x) \Psi_j(x) dx \quad (3.25)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Sonuçta, Denklem 3.23 ile Denklem 3.25 birbirine eşitlenirse

$$m_{ij} = \int_0^L \bar{m}(x) \Psi_i(x) \Psi_j(x) dx \quad (3.26)$$

genel denklemi elde edilir.

Yapılan kabuller sonucunda sistemin yer değiştirmeleri, seçilen bazı noktaların yer değiştirmesiyle ifade edilebilir veya Bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi şekil fonksiyonları yardımıyla ilişki kurulur. Bu noktaların yer değiştirme sayısı ve şekil fonksiyonlarının sayısı sistemin 'serbestlik derecesi' olarak adlandırılır. Böylece sistemin yer değiştirme durumu, serbestlik derecesi kadar parametrenin değişimine bağlanmış olur. Yer değiştirme için çıkarılan bu sonuç, dolaylı olarak hız ve ivme için de genişletilebilir.



Şekil 3.10. Yayılı kütlelerin, toplu kütleli olarak ifade edilmesi: a) kiriş üzerinde, b) kafes sistem üzerinde

Bir dinamik sistemin eylemsizlik özelliklerini hesaba katmanın en basit yolu Şekil 3.10'da görüldüğü gibi yapının yayılı durumdaki kütlelerini belli noktalarda toplayarak yapılabilir. Yani ötelenme yer değiştirmelerinin tanımlanmış olduğu noktalarda toplanmış olduğunu varsaymaktır ve bu yaklaşıma 'toplu kütleli' yöntem denir. Alışılmış prosedür her bir elemanın kütlelerini düğüm noktalarına yaymak olur. Bu kütlelerin dağılımı toplam eleman kütlelerinin, elemanın düğüm noktalarına eşit olarak dağıtılmasıyla yapılır. Bu metotta, her dönme serbestlik derecesi ile ilişkilendirilmiş eylemsizlik etkisi genellikle sıfır '0' olarak varsayılır ve \bar{m} elemanın birim boydaki kütlesi ve L elemanın uzunluğu olmak üzere; genel koordinatlardaki topaklanmış kütle matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir (Chandrupatla, 2002). Kafes sistemlerin analizinde kütlelerin düğüm noktalarında topaklı olduğundan yola çıkılarak çözüm yapılır.

$$[M] = \frac{\bar{m}L}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.5. Eleman Eksenlerinin Dönüştürülmesi

Genel koordinat takımı, orijini herhangi bir noktada olan sabit kartezyen koordinat sistemidir. Bu sistem düğüm koordinatlarının, düğüm yer değiştirmelerinin ve dış yüklerin tanımlanmasında kullanılır; x_1 , x_2 ve x_3 şeklinde gösterilir. Yerel koordinat takımı, her bir elemanın herhangi bir noktasında tanımlanan koordinat sistemidir. Bu sistem düğüm noktalarının yerel yer değiştirmelerinin ve yerel iç kuvvetlerin tanımlanmasında kullanılır; \hat{x}_1 , \hat{x}_2 ve \hat{x}_3 şeklinde gösterilir.

Sistem dış yükleri, düğüm noktalarında etki eden dış yüklerdir. Genel eksen yönünde pozitif kabul edilir. Düzlem kafes sistemde her bir düğümde iki kuvvet vardır. Birincisi x_1 ve ikincisi x_2 yönündedir. Mesnet reaksiyonları da dâhil olmak üzere her bir kuvvet düğüm noktalarına uygun şekilde numaralandırılır. Sistem yer değiştirmeleri, düğümlere etkiyen her dış yük nedeniyle bir yer değiştirme vardır ve dış yüklerin numaralandırılmasına uygun şekilde numaralandırılır. Düğüm serbestlik derecesi, bir düğümdeki yer değiştirme sayısı olarak tanımlanır. Düzlem kafes bir eleman her iki ucunda 2'şer adet olmak üzere toplam 4 adet serbestlik derecesine sahiptir. Uzay kafes bir eleman, her iki ucunda 3'er adet olmak üzere toplam 6 adet serbestlik derecesine sahiptir. Dönüşüm matrisleri ortogonaldır ($[T]^T[T]=[I]$ ya da $[T]^{-1}=[T]^T$). Dönüşüm matrisleri yerel eksen takımı ile genel eksen takımı arasındaki ilişkinin kurulmasında kullanılır.

3.5.1. Düzlem kafes eleman eksenlerinin dönüştürülmesi

Şekil 3.11'de boyu L_k , elastisite modülü E_k , kesit alanı A_k ve rijitlik matrisi $[k_k]$ olan e_k kafes elemanı, i düğümünün \hat{u}_{1i} ve j düğümünün \hat{u}_{1j} yer değiştirmesi sonucunda oluşan uç kuvvetleri, i düğümü için \hat{P}_{1i} ve j düğümü için \hat{P}_{1j} ise, Denklem 3.12'den faydalanarak, yerel eksenelde elde edilen kuvvet ile yer değiştirme ilişkisi

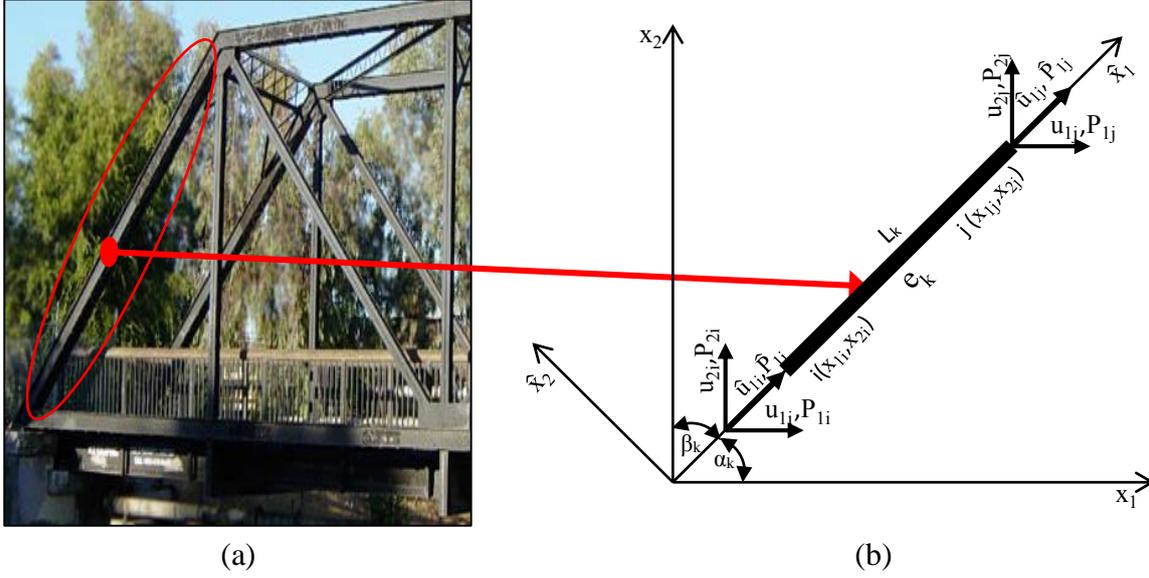
$$[k_k] = \frac{E_k A_k}{L_k} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ olmak üzere; } [\hat{P}_k] = [k_k][\hat{u}_k] \quad (3.28)$$

biçiminde ifade edilir.

Genel koordinat eksen takımını α_k kadar döndürdüğümüzde trigonometriden bildiğimiz aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{1k} &= x_{1j} - x_{1i} \quad , \quad \Delta_{2k} = x_{2j} - x_{2i} \\ L_k &= \sqrt{\Delta_{1k}^2 + \Delta_{2k}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

$$c_{1k} = \cos \alpha_k = \frac{\Delta_{1k}}{L_k} \quad , \quad c_{2k} = \cos \beta_k = \frac{\Delta_{2k}}{L_k} \quad (3.30)$$



Şekil 3.11. a) Yaya geçidi ve bisiklet yolu (Anonim, 11.04.2017), b) bir kafes elemanın yer değiştirme ve kuvvet bakımından yerel ve genel eksenleri arasındaki ilişki

Yerel yer değiştirmeler ile genel yer değiştirmeler arasındaki ilişki

$$\hat{u}_{1i} = u_{1i} \cos \alpha_k + u_{2i} \cos \beta_k \quad (3.31)$$

$$\hat{u}_{1j} = u_{1j} \cos \alpha_k + u_{2j} \cos \beta_k$$

denklemlerle veya $[u_k]$ genel yer değiştirme vektörü ve $[T_k]$ dönüşüm matrisi olmak üzere

$$[\hat{u}_k] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{1i} \\ \hat{u}_{1j} \end{bmatrix} = [T_k][u_k] = \begin{bmatrix} c_{1k} & c_{2k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{1k} & c_{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1i} \\ u_{2i} \\ u_{1j} \\ u_{2j} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$[\hat{u}_k]$ yerel yer değiştirme vektörü ile ifade elde edilir. Yerel uç kuvvetleri ile genel uç kuvvetleri arasındaki ilişki

$$\hat{P}_{1i} = P_{1i} \cos \alpha_k + P_{2i} \cos \beta_k \quad (3.33)$$

$$\hat{P}_{1j} = P_{1j} \cos \alpha_k + P_{2j} \cos \beta_k$$

denklemlerle veya $[P_k]$ genel uç kuvveti vektörü olmak üzere

$$[\hat{P}_k] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{1i} \\ \hat{P}_{1j} \end{bmatrix} = [T_k][P_k] = \begin{bmatrix} c_{1k} & c_{2k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{1k} & c_{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ P_{1j} \\ P_{2j} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$[\hat{P}_k]$ yerel uç kuvveti vektörü ile ifade edilir.

Denklem 3.12'den faydalanarak $[K_k]$ genel rijitlik matrisi olmak üzere;

$$[P_k] = [K_k][u_k] \quad (3.35)$$

$[P_k]$ vektörü elde edilir. Denklem 3.32, Denklem 3.28'de yerine konulursa

$$[\hat{P}_k] = [k_k][T_k][u_k] \quad (3.36)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem 3.35, Denklem 3.34'te yerine konulursa

$$[\hat{P}_k] = [T_k][K_k][u_k] \quad (3.37)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 3.36 ve Denklem 3.37 birbirine eşitlenirse

$$[k_k][T_k][u_k] = [T_k][K_k][u_k] \quad (3.38)$$

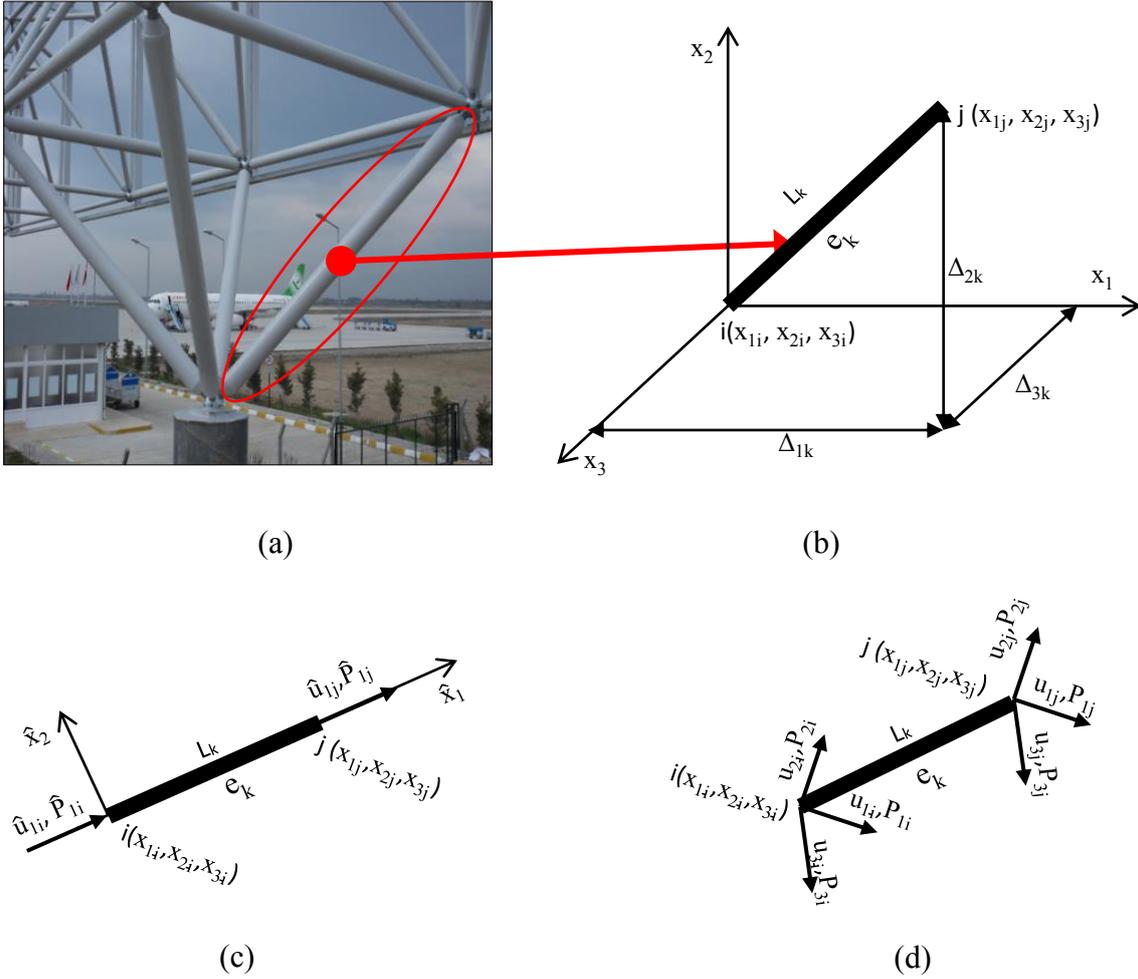
eşitliği elde edilir. Denklem 3.38'de her iki taraftaki $[u_k]$ ifadelerini sadeleştirip, eşitliğin her iki tarafını sol taraftan $[T_k]^{-1}$ ile çarparsak ve $[T_k]^{-1} = [T_k]^T$ özelliğini kullanırsak; yerel rijitlik matrisi $[k_k]$ ile genel rijitlik matrisinin $[K_k]$ arasındaki ilişkiyi

$$[K_k] = [T_k]^T [k_k] [T_k] \quad (3.39)$$

genel bağıntısıyla elde ederiz. Ek Açıklama-A.1'de düzlem kafes elemanların dönüştürülmesiyle ilgili sayısal çözüm verildi.

3.5.2. Uzak kafes eleman eksenlerinin dönüştürülmesi

Şekil 3.12’de boyu L_k , elastisite modülü E_k , kesit alanı A_k ve rijitlik matrisi $[k_k]$ olan e_k kafes elemanın yerel ekseninde, i düğümünün \hat{u}_{1i} ve j düğümünün \hat{u}_{1j} yer değiştirmesi sonucunda oluşan uç kuvvetleri i düğümü için \hat{P}_{1i} ve j düğümü için \hat{P}_{1j} ise kuvvet ile yer değiştirme ilişkisi Denklem 3.28’de elde edilmişti.



Şekil 3.12. a) Uzak kafes sistem (Anonim, 29.12.2014), b) e_k kafes elemanın genel koordinat takımında görünüşü, c) e_k kafes elemanın yerel koordinat takımında kuvvet, koordinat ve yer değiştirmeleri, d) e_k kafes elemanın genel koordinat takımında kuvvet, koordinat ve yer değiştirmeleri

Genel koordinat eksen takımını α_k , β_k ve γ_k kadar döndürdüğümüzde trigonometriden bilinen aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{1k} &= x_{1j} - x_{1i}, \Delta_{2k} = x_{2j} - x_{2i}, \Delta_{3k} = x_{3j} - x_{3i} \\ L_k &= \sqrt{\Delta_{1k}^2 + \Delta_{2k}^2 + \Delta_{3k}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

$$c_{1k} = \cos \alpha_k = \frac{\Delta_{1k}}{L_k}, \quad c_{2k} = \cos \beta_k = \frac{\Delta_{2k}}{L_k}, \quad c_{3k} = \cos \gamma_k = \frac{\Delta_{3k}}{L_k} \quad (3.41)$$

Yerel yer değiştirmeler ile genel yer değiştirmeler arasındaki ilişki, $[u_k]$ genel yer değiştirme vektörü ve $[T_k]$ dönüşüm matrisi olmak üzere, matris formunda gösterilmek istenirse;

$$[\hat{u}_k] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{1i} \\ \hat{u}_{1j} \end{bmatrix} = [T_k][u_k] = \begin{bmatrix} c_{1k} & c_{2k} & c_{3k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{1k} & c_{2k} & c_{3k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1i} \\ u_{2i} \\ u_{3i} \\ u_{1j} \\ u_{2j} \\ u_{3j} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$[\hat{u}_k]$ yerel yer değiştirme vektörü ile ifade elde edilir. Yerel kuvvetler ile genel kuvvetler arasındaki ilişki, $[P_k]$ genel kuvvet vektörü olmak üzere,

$$[\hat{P}_k] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{1i} \\ \hat{P}_{1j} \end{bmatrix} = [T_k][P_k] = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ P_{3i} \\ P_{1j} \\ P_{2j} \\ P_{3j} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

eşitliği ile matris formunda gösterilir. Yerel rijitlik matrisi ile genel rijitlik matrisi arasındaki ilişkisi Denklem 3.39 denkleminin uzay kafes elemanlar için uyarlanmasıyla elde edilir. Ek Açıklama-B.1'de uzay kafes elemanların dönüştürülmesiyle ilgili sayısal çözüm verildi.

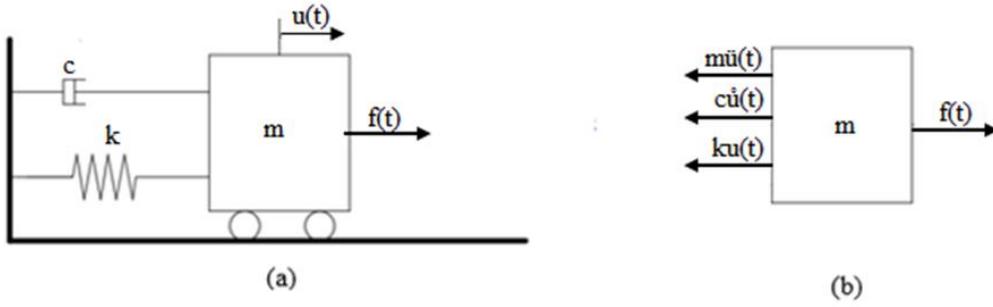
3.6. Hareket Denklemi

şekil 3.13'teki zorlanmış sönümlü hareket yapan tek serbestlikli cismin zamana bağlı hareket denklemi f_I eylemsizlik kuvveti, f_D sönüm kuvveti ve f_S rijitlik kuvveti olmak üzere dinamik dengeden

$$m\ddot{u}(t)+c\dot{u}(t)+ku(t)=f(t) \quad (3.44)$$

$$f_I+f_D+f_S=f(t)$$

elde edilir. Bu eşitlikte; m cismin kütesini, c sönüm katsayısını, k yay katsayısını, t zamanı, $u(t)$ zamana bağlı yer değiştirmeyi, $\dot{u}(t)$ hızı, $\ddot{u}(t)$ ivmeyi ve $f(t)$ zamana bağlı dış kuvveti ifade etmektedir. Sönüm; cisimler hareket etmeye zorlandıklarında, bünyelerinde oluşan iç sürtünmeden kaynaklanan ve titreşimin genliğini sürekli bir şekilde azaltan süreçtir.



Şekil 3.13. a) $f(t)$ kuvveti etkisi altındaki cismin salınımı, b) $f(t)$ etkisi altındaki cisme etkileyen sistem yükleri

Yapı sistemleri çok serbestlik dereceli olması nedeniyle Denklem 3.44'teki eşitlik zamandan bağımsız olacak biçiminde matris formunda düzenlendiğinde

$$[M][\ddot{U}]+[C][\dot{U}]+[K][U]=[F] \quad (3.45)$$

eşitliği elde edilir.

3.6.1. Serbest titreşim frekansı ve modlar

Sisteme herhangi bir dış yük etki etmiyorsa ve sistem geriye döndürücü kuvvetlerle hareketine devam ediyorsa serbest titreşim yapar ve Denklem 3.45

$$[M][\ddot{U}]+[K][U]=0 \quad (3.46)$$

$$u_i(x,t)=a_i \sin(\omega_i t - \theta) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.47)$$

halini alır. Bu durumda düğüm noktası serbestlikleri Denklem 3.47'deki gibi harmonik fonksiyonlarla ifade edilir. Sonuçta Denklem 3.46 ve Denklem 3.47 birleştirilirse; ω_i , i'ninci 'doğal açısal frekans' ve $[a_i]$, i'ninci 'mod vektörleri' veya 'genlik vektörleri' olmak üzere

$$([K]-\omega_i^2[M])[a_i]=0 \quad ; (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.48)$$

eşitliği ile ifade edilir. Denklem 3.48 'özdeğer problemi' olarak anılır. $[K]$ ve $[M]$ bilindiğinde; geriye $[a_i]$ ve ω_i 'nin değerine karar verilmesi kalır. Denklem 3.48, N elemanlı a_{ji} ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) için N adet homojen denklem takımı olarak yorumlanabilir. Bu denklem takımı, her zaman harekete neden olmadığı için kullanışsız olan, $[a_i]=0$ gibi önemsiz bir çözüme sahiptir. Eğer Denklem 3.49'da görüldüğü gibi determinantı '0' ise değerli çözümlere sahiptir.

$$\det([K]-\omega_i^2[M])=0 \quad (3.49)$$

Determinant genişletildiğinde, N'ninci dereceden polinomlar içeren ω_i^2 elde edilir. Denklem 3.49 'karakteristik denklem' ya da 'frekans eşitliği' olarak bilinir. Bu denklem ω_i^2 için N adet gerçek ve pozitif köke sahiptir çünkü $[M]$ ve $[K]$, sistem kütlesi ve rijitliği, simetrik ve pozitif olduğu kesindir. Bu denklem sistemlerinin çözümünde; Jacobi, Arnoldi, QR, power ve Lanczos yöntemleri kullanılabilir.

Denklem 3.49'un N adet kökü, ω_i^2 , titreşimin N adet doğal açısal frekansını belirler. Karakteristik denklemin kökleri aynı zamanda 'özdeğer', 'karakteristik değer' ya da 'normal değer' olarak da bilinir. Bir doğal açısal frekans bilindiği zaman bir çarpım sabitine sahip olan ω_i vektörüne karşılık Denklem 3.48 denkleminin çözümü yapılabilir. Özdeğer problemi; ω_i 'nin mutlak genliğini belirlemez, sadece vektörün şeklini, N adet yer değiştirmenin, a_{ji} 'nin görelî değerlerinden verir. N'ninci dereceden serbestliğe sahip bir sistemin, N adet doğal titreşim frekansına karşılık, 'doğal titreşim modları' veya 'titreşimin doğal mod şekilleri' olarak bilinen, N adet bağımsız $[a_i]$ vektörü vardır. Bu vektörler aynı zamanda 'özvektörler', 'karakteristik vektörler' ya da 'normal modlar' olarak bilinir.

3.6.2. Modal ve spektral matrisler

N adet özdeğer ve N adet doğal mod, matrislerin içine özlü bir biçimde toplanabilir. ω_i doğal frekansına karşılık $[a_i]$ doğal modunun a_{ji} elemanlarına, j serbestlik derecesini belirtmek üzere, sahip olduğu bilinir. N adet öz vektör, her sütunu bir doğal mod olan bir tek kare matris içinde gösterildiğinde, A özdeğer problemi için ‘modal matris’ olarak anılan

$$A=[a_{ji}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

ifade elde edilir. N adet özdeğer, ω_i^2 , özdeğer probleminin ‘spektral matris’i olarak bilinen bir köşegen matris, Ω^2 , Denklem 3.51 içine toplanır.

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Her bir özdeğer ve özvektör,

$$[K][a_i] = [M][a_i]\omega_i^2 \quad (3.52)$$

eşitliği ile ilişkili olarak yazılabilen, Denklem 3.48’i sağlar. Modal ve spektral matrisleri kullanarak, ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) olmak üzere bir tek matris içinde tüm bu ilişkiler toplanarak

$$[K]A = [M]A\Omega^2 \quad (3.53)$$

eşitliği ile ifade edilir.

3.6.3. Modların ortogonalitesi ve normalizasyonu

Modların ortogonalitesi özelliği dinamik problemlerin çözümü için çok önemli yöntemin temelini oluşturur. Şekil 3.14'teki iki serbestlik derecesine sahip sistemdeki her bir kütle serbest titreşimde ise; elemanlara ait rijitlikler k_1 ve k_2 , serbestliklere ait kütleler m_1 ve m_2 , serbestliklere ait yer değiştirmeler u_1 ve u_2 ve serbestliklere ait ivmeler \ddot{u}_1 ve \ddot{u}_2 olmak üzere

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 - k_2 (u_2 - u_1) &= 0 \\ m_2 \ddot{u}_2 + k_2 (u_2 - u_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

eşitlikleri elde edilir. u_1 ve u_2 yer değiştirmeler, \ddot{u}_1 ve \ddot{u}_2 ivmeler ve a_1 ve a_2 genlikler olmak üzere, Denklem 3.47'den yararlanarak

$$u_1 = a_1 \sin(\omega t - \theta) \quad , \quad u_2 = a_2 \sin(\omega t - \theta) \quad (3.55)$$

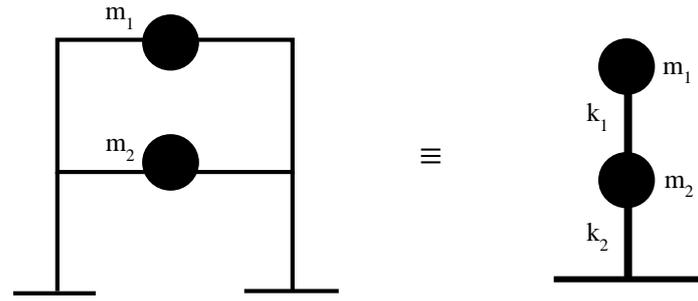
$$\ddot{u}_1 = -a_1 \omega^2 \sin(\omega t - \theta) \quad , \quad \ddot{u}_2 = -a_2 \omega^2 \sin(\omega t - \theta) \quad (3.56)$$

yeniden ifade edilir. Denklem 3.55 ve Denklem 3.56'daki ifadeler Denklem 3.54'te yerine konularak matris formunda yazılırsa

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

eşitliği elde edilir. Eğer Denklem 3.57 ifadesi yeniden düzenlenirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{aligned} (k_1 + k_2)a_1 - k_2 a_2 &= \omega^2 m_1 a_1 \\ -k_2 a_1 + k_2 a_2 &= \omega^2 m_2 a_2 \end{aligned} \quad (3.58)$$



Şekil 3.14. İki serbestlikli kesme çerçevesi ve buna denk gelen toplu kütleli sistem

Denklem 3.58’de yazılan denklemler bu biçimde; büyüklükleri $\omega^2 m_1 a_1$ ve $\omega^2 m_2 a_2$ olan sistem üzerine etkiyen kuvvetleri sırasıyla m_1 ve m_2 kütlelerine uygulandığı için denge denklemleri olarak statik yorum verebilir. Mod şekilleri, her iki mod için Denklem 3.58’in sağ tarafındaki kuvvetlerden kaynaklanan statik şekil değiştirme olarak kabul edilebilir. Bu yorum, statik bir problem olarak, doğrusal yapıların statik teorisinin sonuçları olarak kullanmamıza izin verir. Özellikle; yapı statiği konusundan bilinen Betti teoreminin belirttiği: üzerine kuvvetler uygulanan ve uygun yer değiştirmeler oluşan yapı için, birinci sistemin yükleri tarafından ikinci sistemin yer değiştirmeleri üzerinde hareket ederken yapılan iş; ikinci sistemin yükleri tarafından birinci yük sistemi tarafından oluşan yer değiştirmelere maruz kaldığında yapılan işe eşittir. Aşağıdaki gibi kabul etmemiz gereken iki sistemin yük ve uygun yer değiştirmesi; ω_1 ve ω_2 doğal frekanslar; a_{11} , a_{21} , a_{12} ve a_{22} öz vektör elemanları olmak üzere aşağıdaki belirtildiği gibidir.

Sistem 1:	Kuvvetler	:	$\omega_1^2 m_1 a_{11}$ ve $\omega_1^2 m_2 a_{21}$
	Yer değiştirmeler	:	a_{11} ve a_{21}
Sistem 2:	Kuvvetler	:	$\omega_2^2 m_1 a_{12}$ ve $\omega_2^2 m_2 a_{22}$
	Yer değiştirmeler	:	a_{12} ve a_{22}

Bu iki sistem için Betti teoreminin uygulanması, yerini Denklem 3.59'a bırakır.

$$\left. \begin{aligned} \omega_1^2 m_1 a_{11} a_{12} + \omega_1^2 m_2 a_{21} a_{22} &= \omega_2^2 m_1 a_{12} a_{11} + \omega_2^2 m_2 a_{22} a_{21} \\ \text{veya; } (\omega_1^2 - \omega_2^2) (m_1 a_{11} a_{12} + m_2 a_{21} a_{22}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

Eğer doğal frekanslar farklı olursa ($\omega_1 \neq \omega_2$); Denklem 3.59, iki serbestlik dereceli bir sistemin mod şekilleri arasındaki sözde ortogonallik ilişkisidir. Kütle matrisi diyagonal olan n'inci dereceden serbestlikli sistemin i ve j modları arasındaki ortogonallik ilişkisi Denklem 3.60'ta veya Denklem 3.61'de $[a_i]$ ve $[a_j]$ her hangi iki mod vektörü ve $[M]$ sistemin kütle matrisi olmak üzere

$$\sum_{k=1}^n m_k a_{ki} a_{kj} = 0 \quad , \quad \text{için } (i \neq j) \quad (3.60)$$

$$[a_i]^T [M] [a_j] = 0 \quad , \quad \text{için } (i \neq j) \quad (3.61)$$

genel biçimde ifade edilir.

Normal modda titreşimin genliği, seçim konusu olarak belli bir ölçüde normalize edilebilen ya da ölçeklendirilebilen, sadece göreceli değerlerdir. Genel bir sistem için Denklem 3.62 veya diyagonal kütle matrisine sahip olan bir sistem için Denklem 3.63'te; ϕ_{ij} , j modal vektörünün i normalize olmuş bileşeni olarak

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{[a_i]^T [M] [a_j]}} \quad (3.62)$$

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m_k a_{kj}^2}} \quad (3.63)$$

bağıntılarıyla ifade edilir. Normalize olmuş özvektörler için ortogonalite koşulu Denklem 3.64'te verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} [\phi_i]^T [M] [\phi_j] &= 0, \text{ için } (i \neq j) \\ [\phi_i]^T [M] [\phi_j] &= 1, \text{ için } (i=j) \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

Başka bir ortogonalite koşulu normalize olmuş j modu için Denklem 3.48 düzenlenerek

$$[K] [\phi_j] = \omega_j^2 [M] [\phi_j] \quad (3.65)$$

biçiminde ifade edilir. Denklem 3.65'in her iki tarafı soldan $[\phi_i]^T$ ile çarpıldığında Denklem 3.64'e ulaşılır, özvektörler arasında ortogonalite koşulu

$$\left. \begin{aligned} [\phi_i]^T [K] [\phi_j] &= 0, \text{ için } (i \neq j) \\ [\phi_i]^T [K] [\phi_j] &= \omega_j^2, \text{ için } (i=j) \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

eşitlikleriyle ifade edilir.

3.6.4. Özdeğer probleminin çözümü

Mühendislikte standart özdeğer problemiyle,

$$[B][y] = \lambda[y] \quad (3.67)$$

pek çok dinamik ve stabilite problemlerinde karşılaşılır. Burada $[B]$ kare matris, λ sabit bir sayı ve $[y]$ sıfırdan farklı bir vektördür. λ sabitine $[B]$ matrisinin özdeğeri ve $[y]$ vektörüne $[B]$ matrisinin özvektörü denir. Burada $[B]$ bilinir fakat λ ve $[y]$ bilinmez. Dikkat edilirse Denklem 3.52 de aynı biçimdeki özdeğer problemidir. Denklem 3.49, $[K]$ rijitlik matrisi ve $[I]$ birim matris olmak üzere, öncelikle

$$\det([K]-\lambda_i[I])=0 \quad (3.68)$$

biçimine indirgenmelidir. Denklem 3.68'deki biçime geçilirken uygulanacak işlemler $[M]$ kütle matrisinin yapısına (köşegen matris (toplu kütleli durum) ya da dolu matris (yayıllı kütle durumu)) bağlıdır. Kafes sistemlerde toplu kütleli yaklaşım olduğu Bölüm 3.4'te belirtilmişti. $m_{ij}=m_j$ elemanlarına sahip, $[M]$ kütle matrisinin köşegen olması durumunda

$$\sqrt{[M]}=\sqrt{m_j} \text{ ve } (\sqrt{[M]})^{-1}=(\sqrt{m_j})^{-1} \quad (3.69)$$

$$[M]=(\sqrt{[M]})(\sqrt{[M]}) \text{ ve } [I]=(\sqrt{[M]})(\sqrt{[M]})^{-1}$$

$[M]$ ve $[I]$ matrisleri yukarıdaki gibi ifade edilirler ve Denklem 3.52 yeniden düzenlenirse

$$[K](\sqrt{[M]})(\sqrt{[M]})^{-1}[a_i]=\omega_i^2(\sqrt{[M]})(\sqrt{[M]})[a_i] \quad (3.70)$$

Denklem 3.70'te eşitliğin her iki tarafı soldan $(\sqrt{[M]})^{-1}$ ile çarpılırsa

$$(\sqrt{[M]})^{-1}[K](\sqrt{[M]})(\sqrt{[M]})^{-1}[a_i]=\omega_i^2(\sqrt{[M]})^{-1}(\sqrt{[M]})(\sqrt{[M]})[a_i] \quad (3.71)$$

eşitliği elde edilir. $[K]$ ve $[M]$ matrisleri simetrik olmasına karşın Denklem 3.67'de $[B]$ matrisi simetrik değildir. $[B]$ matrisi simetrik olmadığı için $[B]$ matrisinin simetrik hale getirilmesi gerekir. Denklem 3.71, Denklem 3.67'ye benzetilirse

$$[B]=(\sqrt{[M]})^{-1}[K](\sqrt{[M]}) \text{ , } [y]=(\sqrt{[M]})[a_i], \lambda=\omega_i^2 \quad (3.72)$$

Denklem 3.67, standart özdeğer problemine indirgenmiş oldu ve $[B]$ simetrik hale getirildi. Denklem 3.72 yardımıyla Denklem 3.49'dan Denklem 3.68'deki standart özdeğer yapısına

$$([B]-\omega_i^2[I])[a_i]=0 \text{ ; } [a_i]=(\sqrt{[M]})^{-1}[y] \quad (3.73)$$

biçiminde geçilir.

4. YÖNTEM

4.1. Depremın Kafes Sistemler Üzerindeki Etkisi

Yer kabuğunda biriken gerilmeler artarak, yer kabuğunun taşıma gücünü aşar ve fay adı verilen belli bölgelerde biçim değiştirme enerjisine sebep olur. İşte bu biçim değiştirme enerjisinin aniden boşalması, elastik dalga hareketi yani deprem dalgaları, yer kabuğunun yüzeyinde de dalgalar meydana getirir. Yüzeydeki bu dalgalar, üzerinde yaşayan canlı ve cansız varlıklara çeşitli zararlar verir.

İnsanoğlu, binyıllardır pek çok kez şehirlerini yerle bir eden bu doğal afetle mücadele etmek için çeşitli yöntemler, yasalar, önlemler ve yapım teknikleri geliştirmeye çalışmıştır. Ancak bütün bu çabalara rağmen hala depremleri önceden kesin bir biçimde kestirmek mümkün olamamaktadır. Depremler esnasında yapıların ne şekilde davrandıkları da, bazı teorik yaklaşımlar yaklaşık çözümler sunsalar da, tam olarak bilinmemektedir. Eğer öngörülen değerler ve yapı kalitesi istenilen şekilde sağlanamazsa, zaten teorik olarak varsayımlara dayanan, tasarım ve analiz yöntemleri kalitesiz yapım ile birleşerek çok kötü sonuçlar meydana getirmektedir. Deprem etkilerini önemli ölçüde bertaraf edebilmek amacıyla yapıların depreme dayanıklı biçimde tasarlanıp analiz edilmeleri gerekmektedir.

Kafes sistemler genelde deprem sonrasında insanların barınma ve sığınma ihtiyacını karşılayan yapılarda kullanılması nedeniyle özel bir önem teşkil etmektedir. Kafes sistemlerde oluşan hasarlara bakıldığında, Şekil 4.1’de görüleceği gibi, birleşim bölgeleri; eleman ve mesnet hasarları olduğu ve plastik deformasyonlar meydana geldiği görülür (Moghaddam, 2004; Ünlüoğlu vd., 2007; Doğan vd., 2015). Ancak burada özellikle dikkat çekilmesi gereken nokta kafes sistemlerin üzerlerine oturdukları altyapının (Şekil 4.2) dayanım özelliklerinin, kafes sistemin deprem davranışında önemli bir etken olmasıdır (Moghaddam, 2004; Ünlüoğlu vd., 2007; Korkmaz ve Ay, 2007).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.1. a) Kafes eleman hasarı, b) kafes eleman ve birleşim bölgesi hasarı, c) ve d) birleşim bölgesi hasarı (Ünlüoğlu vd.'den, 2007)



(a)



(b)

Şekil 4.2. (a) ve (b):Kafes sistemin oturduğu altyapının hasar alması (Ünlüoğlu vd.'den, 2007)

DBYBHY 2007’de depreme dayanıklı yapı tasarımının ana ilkesi şöyle ifade edilmektedir:

“Hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlanmasıdır.”

Depremler, yapılar üzerinde dinamik etkilere sahiptir. Aynı deprem hareketinin farklı yapılar üzerindeki etkisi de değişmekte ve yapıların aldıkları hasarlar da farklılaşmaktadır. Bunun nedeni olarak; yapının oturduğu zemin özellikleri, depreme yakınlık, yapı kütlesi ve yapının rijitliği gibi sebepler sayılabilir.

4.2. Elastik Deprem Yüklerinin Belirlenmesi

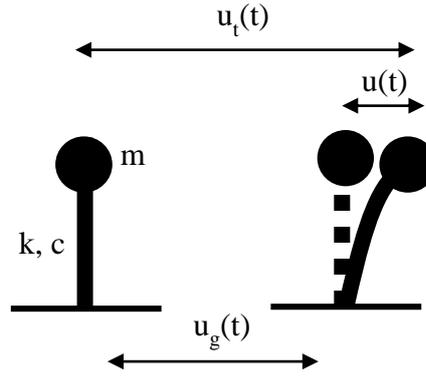
4.2.1. Davranış spektrumu

Davranış spektrumu; bir deprem yer hareketinin etkisi altında, doğal titreşim periyodu T olan doğrusal elastik Tek Serbestlik Dereceli (TSD) bir sistemde meydana gelen yapısal yer değiştirme veya toplam ivme büyüklüğünün T’ye bağlı bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Yapıların deprem etkisindeki tasarımının yapılması için değişik yapıları temsil eden TSD farklı periyodlu fakat eşit kütleli yapıların aynı depremin bir bileşenine karşı gösterdikleri tepkilerin maksimumlarının oluşturdukları eğri, davranış spektrumunu oluşturmaktadır.

Şekil 4.3’te; m kütle, k rijitlik katsayısı, c sönüm katsayısı, $u_g(t)$ deprem yer hareketi (yerin yer değiştirmesi), $\ddot{u}_g(t)$ yer ivmesi, $u(t)$ yapısal yer değiştirme (görelî yer değiştirme), $\ddot{u}(t)$ yapısal ivme, $\dot{u}(t)$ yapısal hız, $u_t(t)$ toplam yer değiştirme, $\dot{u}_t(t)$ toplam hız ve $\ddot{u}_t(t)$ toplam ivmedir. TSD sistemde, sönüm oranı ξ , zaman t, periyot T ve doğal açısal hız ω olmak üzere

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g(t) ; (u \equiv u(t,\xi,\omega)) \quad (4.1)$$

sistemin deprem ivmesi altındaki hareket denklemdir.



Şekil 4.3. TSD bir sistemin deprem etkisi altındaki davranışı

S_d yer değiştirme, S_v hız ve S_a ivme spektrumu yazılmak istenirse

$$S_d(\xi, T) = \max |u(t, \xi, \omega)|, \quad S_v(\xi, T) = \max |\dot{u}(t, \xi, \omega)|$$

$$S_a(\xi, T) = \max |\ddot{u}(t, \xi, \omega) + \ddot{u}_g(t, \xi, \omega)| \quad (4.2)$$

$$S_a(\xi, T) \approx \omega S_v(\xi, T) \approx \omega^2 S_d(\xi, T)$$

bağıntıları elde edilir. Denklem 4.2 belirli bir ξ değeri için yazılmak istenirse; S_{de} spektral yer değiştirme, S_{ve} spektral hız, S_{ae} spektral ivme olmak üzere

$$u_t(t) = u_g(t) + u(t), \quad \ddot{u}_t(t) = \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}(t)$$

$$S_{de}(T) = \max |u(t)|, \quad S_{ve}(T) = \max |\dot{u}(t)| \quad (4.3)$$

$$S_{ae}(T) \approx \max |\ddot{u}_t(t)| = \omega^2 S_{de}(T)$$

bağıntıları elde edilir.

4.2.2. Spektral ivme katsayısı

Elastik deprem yüklerinin belirlenmesi için kullanılan ivme spektrumu, depremden depreme farklılıklar gösterir ve ayrıca yerel zemin koşullarından etkilenir. Bu nedenle, istatistiksel çalışmaların sonucu olarak deprem yönetmeliklerinde spektrum eğrisinin biçimi genellikle standardize edilir ve spektral ivmeler birtakım deprem parametrelerine bağlanarak

analitik olarak ifade edilir. DBYBHY 2007 Denklem 2.1’de, %5 sönüm oranı için spektral ivme katsayısı $S_{ae}(T)$; elastik spektral ivme $A(T)$, etkin yer ivmesi katsayısı A_0 , bina önem katsayısı I , spektrum katsayısı $S(T)$, yapının doğal titreşim periyodu T ve yer çekimi ivmesi g olmak üzere

$$S_{ae} = A(T)g \quad (4.4)$$

$$A(T) = A_0 I S(T)$$

ifade edilmiştir. Burada, A_0 değeri DBYBHY 2007 Tablo 2.2’den ve I değeri DBYBHY 2007 Tablo 2.3’ten alınan değerlerdir.

Henüz taslak halinde olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2017 Denklem 2.3’te yatay tasarım spektrumu köşe periyotları T_A ve T_B , tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} , doğal titreşim periyodu T ’ye bağlı olarak yerçekimi ivmesi $[g]$ cinsinden spektral ivme katsayısı $S_{ae}(T)$;

$$\begin{aligned} S_{ae}(T) &= \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} & 0 \leq T \leq T_A \\ S_{ae}(T) &= S_{DS} & T_A \leq T < T_B \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}}{T} & T_B \leq T < T_L \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & T_L \leq T \end{aligned} \quad (4.5)$$

(Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu $T_L=6$ s alınacaktır.)

olarak tanımlanmıştır.

Spektrum karakteristik periyotları, T_A ve T_B , DBYBHY 2007 Tablo 6.2’de tanımlanan yerel zemin sınıflarına bağlı olarak olarak DBYBHY 2007 Tablo 2.4’te tanımlanır ve spektrum katsayısı, $S(T)$, DBYBHY 2007 Denklem 2.2’de

$$S(T)=1+1,5\frac{T}{T_A} \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S(T)=2,5 \quad (T_A < T \leq T_B) \quad (4.6)$$

$$S(T)=2,5\left(\frac{T_B}{T}\right)^{0,8} \quad (T_B < T)$$

bağıntılarıyla ifade edilir.

4.2.3. Deprem yükü azaltma katsayısı

Deprem etkisi altında taşıyıcı sistemde meydana gelen doğrusal olmayan yapısal davranışı dikkate almak amacı ile elastik deprem yükleri, taşıyıcı sistemin türüne ve süneklik düzeyine bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile tanımlanan deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$ 'ye bölünerek azaltılırlar. Deprem yükü azaltma katsayısı DBYBHY 2007 Denklem 2.3'te; DBYBHY 2007 Tablo 2.5'te verilen taşıyıcı sistem davranış katsayısı R ve yapının doğal titreşim periyodu T 'ye bağlı olarak

$$R_a(T) = 1,5 + (R - 1,5)\frac{T}{T_A} \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad (4.7)$$

$$R_a(T) = R \quad (T_A < T)$$

ifade edilir.

TBDY 2017 Bölüm 4.2.1'de, R ve D sırasıyla TBDY 2017 Tablo 4.1'de tanımlanan taşıyıcı sistem davranış katsayısı ve dayanım fazlalığı katsayısını; I , TBDY 2017 Tablo 3.1'de tanımlanan bina önem katsayısını; T , sistemin doğal titreşim periyodunu ve T_B , TBDY 2017 Denklem 2.4 ile tanımlanan spektrum köşe periyodunu göstermek üzere TBDY 2017 Denklem 4.1a ve TBDY 2017 Denklem 4.1b doğrusal elastik deprem yüklerinin azaltılmasında esas alınacak deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \quad T > T_B$$

(4.8)

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D \right) \frac{T}{T_B} \quad T \leq T_B$$

olarak tanımlanmıştır.

4.2.4. Deprem etkisi altında doğrusal elastik hesap yöntemleri

DBYBHY 2007 ve TBDY 2017’de esas olarak iki hesap yöntemi tanımlanmıştır. Bunlar, hiçbir kısıtlama olmaksızın tüm taşıyıcı sistemlere uygulanabilen Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) ile bu yöntemin özel hali olarak nitelendirilebilecek olan ve bazı kısıtlamalarla belirli tür sistemlere uygulanabilen Eşdeğer Deprem Yüğü Yönetimi (EDYY)’dir. Bunların dışında çok daha seyrek olarak, özel durumlarda ve özellikle taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışını göz önüne almak üzere kullanılan Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemidir (ZTAHY). Bunlardan MBY VE ZTAHY dinamik yöntemler ve EDYY statik yöntem olarak bilinir.

4.2.4.1. Mod birleştirme yöntemi

Hiçbir kısıtlama olmaksızın tüm taşıyıcı sistemlere uygulanabilen MBY’de maksimum iç kuvvetler ve yer değiştirmeler, yapıda yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesi ile elde edilir. Yöntem, modların süperpozisyonu tekniği ile birlikte her titreşim modunda maksimum davranış büyüklüklerini veren davranış spektrumunun birlikte kullanılması esasına dayanır.

TSD sistemler için bu yöntem Denklem 4.2 veya Denklem 4.3 ile birlikte en büyük göreceli yer değiştirme, göreceli hız ve mutlak ivme depremin spektrum eğrileri kullanılarak bulunabilir. Bu işlem, Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) sistemler için MBY kullanılarak aşağıdaki gibi genelleştirilebilir. Deprem etkisindeki ÇSD sistemin hareket denklemi; [r] etki katsayısı vektörü (n x 1) (Chopra, 2007) olmak üzere

$$[m][\ddot{u}] + [c][\dot{u}] + [k][u] = -[m][r]\ddot{u}_g(t) \quad (4.9)$$

ifade edilir. Mod vektörlerinin süperpozisyon kabulü ve ortogonalite bağıntıları kullanılarak, mod vektörlerinin çözüme olan katkıları $Y_j(t)$ ve genelleştirilmiş kütle M_j olmak üzere

$$[u(t)] = \sum_{j=1}^N [u_j(t)] = \sum_{j=1}^N [\phi_j] Y_j(t) ; Y_j(t) = [\phi_j]^T [m][u(t)] / M_j \quad (4.10)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem 4.9 ve Denklem 4.10 kullanılarak, ϕ_j titreşim moduna karşılık gelen sönüm oranı ξ_j olmak üzere

$$\ddot{Y}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{Y}_j + \omega_j^2 Y_j = -L_j \ddot{u}_g(t) / M_j ; L_j = [\phi_j]^T [m][r] \quad (4.11)$$

ayrık denklemlere dönüştürülür.

Sistem sükunette iken deprem hareketinin başladığı kabul edilirse, j. moda ait sönümlü açısal frekans ω_{Dj} ve kukla zaman değişkeni τ , olmak üzere

$$Y_j(t) = -\frac{L_j}{M_j \omega_{Dj}} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi_j \omega_j (t-\tau)} \sin \omega_{Dj} (t-\tau) d\tau ; \Gamma_j = L_j / M_j \quad (4.12)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Denklem 4.12 yeniden düzenlenirse

$$\ddot{D}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{D}_j + \omega_j^2 D_j = -\ddot{u}_g(t) ; D_j = Y_j(t) / \Gamma_j \quad (4.13)$$

ifadesi elde edilir. j. mod titreşiminde oluşan eşdeğer elastik kuvvet, j. moda ait yer değiştirme $D_j(t)$ ve j. moda ait ivme $A_j(t)$ olmak üzere, Denklem 4.14'teki gibidir.

$$[k][\phi_j] = \omega_j^2 [m][\phi_j] ; A_j(t) = \omega_j^2 D_j(t)$$

$$[f_j(t)] = [k][u_j(t)] = [k][\phi_j] Y_j(t) = \omega_j^2 [m][\phi_j] Y_j(t) = \omega_j^2 [m][\phi_j] \Gamma_j D_j(t) = [m][\phi_j] \Gamma_j A_j(t) \quad (4.14)$$

$$[u_j(t)] = [k]^{-1} [f_j] = [k]^{-1} [m][\phi_j] \Gamma_j A_j(t) = \frac{\Gamma_j}{\omega_j^2} [\phi_j] A_j(t) \quad (4.15)$$

j. moda ait eşdeğer elastik kuvvetin bileşenleri $f_{nj}(t)$ ve j. moda ait taban kesme kuvveti toplamı $V_{bj}(t)$ olmak üzere Denklem 4.16'daki gibi yazılır.

$$f_{nj}(t) = \sum_{k=1}^N m_{nk} \phi_{kj} \Gamma_j A_j(t) \quad , \quad V_{bj}(t) = \sum_{k=1}^N f_{nj}(t) \quad (4.16)$$

M_j^* , etkili modal kütle olmak üzere, M_j , L_j f_{nj} ve V_{bj} gibi genel ifadelerle, Denklem 4.17'de ifade edilir.

$$M_j = [\phi_j]^T [m][\phi_j] \quad , \quad L_j = [\phi_j]^T [m][r] \quad , \quad f_{nj}(t) = m_n \phi_{nj} \Gamma_j A_j(t) \quad (4.17)$$

$$V_{bj}(t) = \sum_{n=1}^N f_{nj}(t) = L_j \Gamma_j A_j(t) = M_j^* A_j(t) \quad ; \quad M_j^* = L_j \Gamma_j$$

Belirli bir deprem etkisinde bu büyüklüklerden zamana bağlı olanların en büyük değeri ilgili depremin ivme spektrumu kullanılarak Denklem 4.18'deki gibi yazılır.

$$|A_j(t)|_{\max} = S_a(T_j) \quad , \quad |u_j(t)|_{\max} = \frac{\Gamma_j}{\omega_j^2} [\phi_j] S_a(T_j) \quad (4.18)$$

$$|f_j(t)|_{\max} = [m][\phi_j] \Gamma_j S_a(T_j) \quad , \quad |f_{nj}(t)|_{\max} = |V_{bj}(t)|_{\max} = M_j^* S_a(T_j)$$

Denklem 4.18'deki $S_a(T_j)$ ifadesi, DBYBHY 2007 Denklem 2.13'te azaltılmış ivme spektrumu ve TBDY 2017 Denklem 4.4'te yatay doğrultuda azaltılmış deprem yüklerinin belirlenmesi için kullanılacak azaltılmış tasarım ivme spektrumunun belirli bir T_j doğal titreşim periyodu için ordinatı olan azaltılmış tasarım spektral ivmesi olarak tanımlanan $S_{aR}(T_j)$

$$S_{aR}(T_j) = \frac{S_{ae}(T_j)}{R_a(T_j)} \quad (4.19)$$

olarak analizlerde kullanılacaktır. M_{xj} ve M_{yj} , j. doğal titreşim modunda göz önüne alınan x ve y deprem doğrultusunda binanın etkin kütlesi olmak üzere işlem hacmini azaltmak açısından

$$\sum_{j=1}^Y M_{xj} = \sum_{j=1}^Y \frac{L_{xj}^2}{M_j} \geq 0.90 \sum_{i=1}^N m_i ; \sum_{j=1}^Y M_{yj} = \sum_{j=1}^Y \frac{L_{yj}^2}{M_j} \geq 0.90 \sum_{i=1}^N m_i \quad (4.20)$$

ile ifade edilen, DBYBHY 2007 Denklem 2.14'te kural ile birlikte hesaba katılacak yeterli titreşim mod sayısına karar verilir. DBYBHY 2007 Denklem 2.14'te yer alan L_{xj} ve L_{yj} ile modal kütle M_j 'nin ifadeleri; kat döşemelerinin rijit diyafram olarak çalıştığı binalarda j'inci mod şeklinin i'inci katta, x eksenini doğrultusundaki yatay bileşeni Φ_{xij} ve y eksenini doğrultusundaki yatay bileşeni Φ_{yij} olmak üzere, kat döşemelerinin rijit diyafram olarak çalıştığı binalar için aşağıda verilmiştir:

$$L_{xj} = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{xij} ; L_{yj} = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{yij} \quad (4.21)$$

$$M_j = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{xij}^2 + m_i \Phi_{yij}^2 + m_i \Phi_{\theta ij}^2$$

TBDY 2017 Denklem 4.24 ile ifade edilen kural ile birlikte, m_{txj} göz önüne alınan x deprem doğrultusunda binanın j. doğal titreşim modundaki etkin kütle, m_{tyj} göz önüne alınan y deprem doğrultusunda binanın j. doğal titreşim modundaki etkin kütle ve m_t bina toplam kütlesi olmak üzere işlem hacmini azaltmak açısından

$$\sum_{j=1}^{YM} m_{txj}^{(X)} \geq 0.90 m_t ; \sum_{j=1}^{YM} m_{tyj}^{(Y)} \geq 0.90 m_t \quad (4.22)$$

hesaba katılacak yeterli titreşim mod sayısı YM'ye karar verilir. Ancak katkısı %5'ten büyük olan bütün modlar göz önüne alınır.

TBDY 2017 Bölüm 4B.1.3'te modal hesap parametrelerinin tanımında taşıyıcı sistemin serbestlik dereceleri olarak:

“4B.1.3.a Kat döşemelerinin rijit diyafram olarak modellenmesi durumunda, herhangi bir i 'inci kat döşemesinin kütle merkezinde x ve y yatay doğrultularında tanımlanan yer değiştirmeler ile kat kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafındaki dönme dikkate alınmış ve bu serbestlik m_i ile kat kütle eylemsizlik momenti $m_{i\theta}$ tanımlanmıştır.”

“4B.1.3.b Kat döşemelerinin rijit diyafram olarak alınmaması ve 4.5.6.2'ye göre kendi düzlemleri içindeki yer değiştirmelere ilişkin serbestlik derecelerini içermek üzere iki boyutlu levha (membran) sonlu elemanlar ile modellenmesi durumunda, m_i kat kütleleri yerine sonlu eleman düğüm noktalarındaki $m_j^{(S)}$ kütleleri gözönüne alınacaktır.”

TBDY 2017 Denklem 4B.1'de, verilen x deprem doğrultusu için, j 'inci titreşim moduna ait modal katkı çarpanı $\Gamma_j^{(X)}$ ile binanın x eksenine doğrultusundaki taban kesme kuvveti modal etkin kütlesi $m_{txj}^{(X)}$

$$\Gamma_j^{(X)} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \Phi_{ixj}}{\sum_{i=1}^N (m_i \Phi_{ixj}^2 + m_i \Phi_{iyj}^2 + m_{i\theta} \Phi_{i\theta j}^2)} ; m_{txj}^{(X)} = \Gamma_j^{(X)} \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{ixj} \quad (4.23)$$

olarak tanımlanır. TBDY 2017 Denklem 4B.2'de, verilen x deprem doğrultusu için tipik bir j 'inci titreşim modunda, yukarıda TBDY 2017 Bölüm 4.8.1.3'te tanımlanan serbestlik derecelerine ait kat modal etkin kütleleri

$$m_{ixj}^{(X)} = m_i \Phi_{ixj} \Gamma_j^{(X)} ; m_{iyj}^{(X)} = m_i \Phi_{iyj} \Gamma_j^{(X)} ; m_{i\theta j}^{(X)} = m_i \Phi_{i\theta j} \Gamma_j^{(X)} \quad (4.24)$$

olarak tanımlanır.

DBYBHY 2007 Bölüm 2.8.4'te belirtilen mod katkılarının birleştirilmesi, binaya etkiyen toplam deprem yükü, iç kuvvet bileşenleri, yer değiştirme gibi büyüklüklerin her biri için ayrı ayrı uygulanmak üzere, her titreşim modu için hesaplanan uygulanacak kurallar aşağıda DBYBHY 2007 Bölüm 2.8.4.1 ve DBYBHY 2007 Bölüm 2.8.4.2 ile verilmiştir:

“2.8.4.1 – $T_m < T_n$ olmak üzere, göz önüne alınan herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima $T_m/T_n < 0,80$ koşulunu sağlaması

durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Karelerin Toplamının Kare Kökü Kuralı uygulanabilir.”

“2.8.4.2 – Yukarıda belirtilen koşulun sağlanamaması durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) Kuralı uygulanacaktır. Bu kuralın uygulanmasında kullanılacak çapraz korelasyon katsayılarının hesabında, modal sönüm oranları bütün titreşim modları için %5 olarak alınacaktır.”

Verilen x deprem doğrultusu için tipik j’inci titreşim modunda herhangi bir davranış büyüklüğüne (yer değiştirme, görelî kat ötelemesi, iç kuvvet bileşeni) karşı gelen tipik birim modal davranış büyüklüğü $\bar{r}_j^{(X)}$, yukarıda TBDY 2017 Denklem 4B.2 ile tanımlanan kat modal etkin kütlelerinin kendi doğrultularında yük olarak etki ettirildiği bir statik hesapla elde edilir.

TBDY 2017 Bölüm 4B.2.1’de MBY, x deprem doğrultusu için açıklanmıştır. x’e dik y deprem doğrultusu için de benzer şekilde hesap yapılır. Yatayda x ve y deprem doğrultuları için ayrı ayrı elde edilen en büyük davranış büyüklüklerine TBDY 2017 Bölüm 4.4.2’ye göre doğrultu birleştirmesi uygulanır.

Verilen x deprem doğrultusu için tipik bir j’inci titreşim modunda, herhangi bir davranış büyüklüğüne (yerdeğiştirme, görelî kat ötelemesi, iç kuvvet bileşeni) karşı gelen tipik en büyük modal davranış büyüklüğü $r_{j,max}^{(X)}$ TBDY 2017 Denklem 4B.3 ile hesaplanır:

$$r_{j,max}^{(X)} = \bar{r}_j^{(X)} S_{aR}(T_j) \quad (4.25)$$

burada $\bar{r}_j^{(X)}$ TBDY 2017 Bölüm 4B.1.6’da tanımlanan tipik birim modal davranış büyüklüğünü, $S_{aR}(T_j)$ ise tipik j’inci doğal titreşim periyodu T_j için TBDY 2017 Denklem 4.9’den elde edilen azaltılmış tasarım spektral ivmesini gösterir.

İç kuvvet bileşenleri, yer değiştirme ve görelî kat ötelemesi gibi davranış büyüklüklerinin her biri için ayrı ayrı uygulanmak üzere, her bir titreşim modu için TBDY 2017 Bölüm 4B.2.3’e göre hesaplanan ve eşzamanlı olmayan en büyük modal katkılar, aşağıda açıklandığı üzere istatistiksel olarak birleştirilir.

En genel mod birleştirme kuralı olarak Tam Karesel Birleştirme (CQC) Kuralı TBDY 2017 Denklem 4B.4'te verilmiştir:

$$r_{\max}^{(X)} = \sqrt{\sum_{m=1}^{YM} \sum_{n=1}^{YM} r_{m,\max}^{(X)} \rho_{mn} r_{n,\max}^{(X)}} \quad (4.26)$$

$$\rho_{mn} = \frac{8\sqrt{\xi_m \xi_n} (\beta_{mn} \xi_m + \xi_n) \beta_{mn}^{3/2}}{(1-\beta_{mn}^2)^2 + 4\xi_m \xi_n \beta_{mn} (1+\beta_{mn}^2) + 4(\xi_m^2 + \xi_n^2) \beta_{mn}^2} ; \beta_{mn} = \frac{T_m}{T_n}$$

burada $r_{m,\max}^{(X)}$ ve $r_{n,\max}^{(X)}$ tipik m'inci ve n'inci titreşim modları için TBDY 2017 Bölüm 4B.2.3 ile hesaplanan en büyük modal davranış büyüklüklerini ve ρ_{mn} için TBDY 2017 Denklem 4B.5a'da bu modlara ait çapraz korelasyon katsayısını gösterir. Modal sönüm oranlarının bütün modlarda aynı olduğunun varsayılması durumunda çapraz korelasyon katsayısı TBDY 2017 Denklem 4B.5b'de verildiği üzere sadeleştirilir:

$$\rho_{mn} = \frac{8\xi^2 (1+\beta_{mn}) \beta_{mn}^{3/2}}{(1-\beta_{mn}^2)^2 + 4\xi^2 \beta_{mn} (1+\beta_{mn}^2)} ; (\xi_m = \xi_n = \xi) \quad (4.27)$$

Göz önüne alınan tüm modlar için $\beta_{mn} < 0,8$ koşulunun sağlanması durumunda, TBDY 2017 Denklem 4B.4'te verilen birleştirme kuralı yerine TBDY 2017 Denklem 4B.6'da verilen Karelerin Toplamının Karekökü Kuralı kullanılır:

$$r_{\max}^{(X)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{YM} (r_{n,\max}^{(X)})^2} \quad (4.28)$$

bu birleştirme kuralı, TBDY 2017 Denklem 4B.4'te $\rho_{mn}=0$ ($m \neq n$) ve $\rho_{mn}=1$ ($m=n$) alınması özel durumuna karşı gelir.

Verilen x deprem doğrultusu için tipik bir j'inci titreşim modunda, taşıyıcı sistemin x eksenini doğrultusunda en büyük modal taban kesme kuvveti $V_{txj,max}^{(X)}$ ve buna karşı gelen en büyük taban devrilme momenti $M_{oxj,max}^{(X)}$ TBDY 2017 Denklem 4B.7 ile hesaplanır:

$$V_{txj,max}^{(X)} = \sum_{i=1}^N f_{ixj,max}^{(X)} = m_{txj}^{(X)} S_{aR}(T_j) ; M_{oxj,max}^{(X)} = \sum_{i=1}^N f_{ixj,max}^{(X)} H_i \quad (4.29)$$

bu büyüklüklere ait mod katkılarının birleştirilmesi de TBDY 2017 Bölüm 4B.2.4'e göre yapılır.

4.2.4.2. Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Bu yöntemde sadece deprem doğrultusundaki hakim titreşim modu hesapta göz önüne alınmakta, bu moda ait mod şekli ise doğrusal (ters üçgen) şeklinde basitleştirilmektedir. Yöntemde göz önüne alınan deprem doğrultusundaki hakim titreşim moduna ait doğal titreşim periyodunun hesabı için literatürde Rayleigh Oranı olarak adlandırılan bağıntıdan yararlanılmaktadır. Teorik bir temele dayanan bu bağıntı, hakim titreşim periyodunun doğru ve yeterince hassas bir biçimde hesabı için yeterlidir.

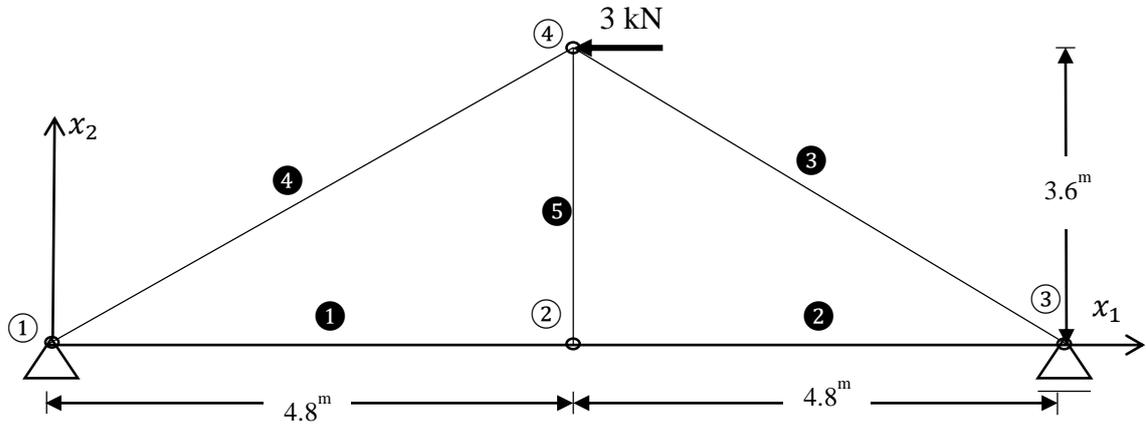
4.2.4.3. Zaman tanım alanında hesap yöntemi

Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi, binaların doğrusal elastik ya da doğrusal elastik olmayan deprem hesabı için kullanılabilecek en kesin ve ileri hesap yöntemidir. Ancak, özel deneyim ve yazılım gereksinimleri nedeni ile uygulamada nadiren kullanılır. Bu yöntemde, yapay yollarla üretilen, daha önce kaydedilmiş veya benzeştirilmiş deprem yer hareketleri kullanılabilir. Hesapta üç yer hareketi kullanılması durumunda sonuçların maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise sonuçların ortalaması tasarım için esas alınır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. DKS-1 Örnek Çözüm (El ve SAP2000) Uygulaması

Şekil 5.1’de x_1 - x_2 koordinat sisteminde gösterilmiş olan DKS, 3 kN’luk sabit yük ile yüklendi (sistemin sönümü ihmal edildi). Çizelge 5.1’de özellikleri verilen bu kafes sistemin statik, dinamik ve x_1 yönündeki deprem yükleri etkisi altındaki analizi takip eden işlemler sonucunda elde edildi (G: birim boydaki kütle; GL/2: elemanlara ait çubuk uçlarındaki topak kütle).



Şekil 5.1. DKS-1 örneğine ait düzlem kafes sistem

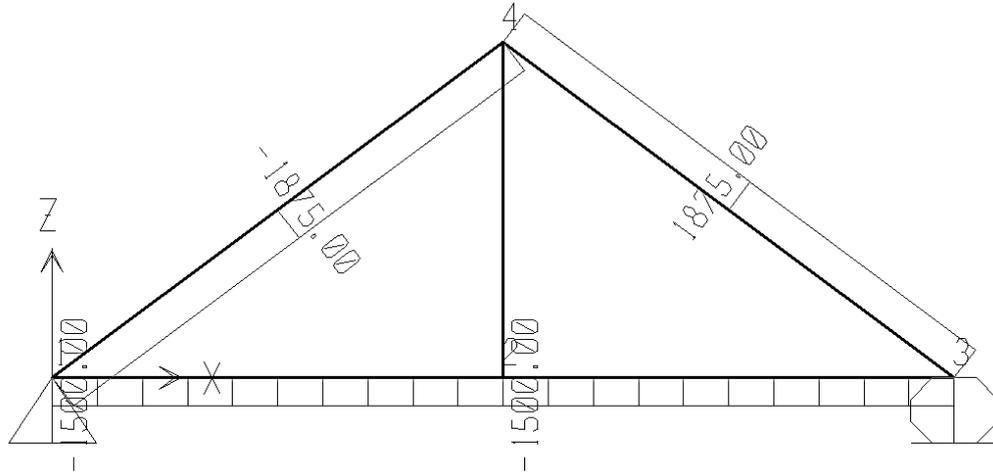
Çizelge 5.1. DKS-1 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri

ELEMAN NO	PROFİL	G (kg/mm)	E (N/mm ²)	A (mm ²)	EA/L (N/mm)	GL/2 (kg)
1	IPE 140	0,0129	210000	1640	71750,00	30,96
2	IPE 140	0,0129	210000	1640	71750,00	30,96
3	[60	0,00507	210000	646	22610,00	15,21
4	[60	0,00507	210000	646	22610,00	15,21
5	IPE 120	0,0104	210000	1320	77000,00	18,72

5.1.1. Statik analiz

5.1.1.1. 3 kN'luk yük için statik analiz

Eleman ağırlıkları ihmal edilip sistem sadece 3 kN'luk yük etkisinde analiz edildi. Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.1, Ek Açıklama-A.2 ve Ek Açıklama-A.3'te verildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.2, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te gösterildi.



Şekil 5.2. 3 kN'luk yüklemeye için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Çizelge 5.2. 3 kN'luk yüklemeye için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Joint Displacements

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	DEAD	LinStatic	-0.020906	0	0.027875	0	0	0
	3	DEAD	LinStatic	-0.041812	0	0	0	0	0
	4	DEAD	LinStatic	-0.124598	0	0.027875	0	0	0

Record: ◀ ▶ 1 ▶ ▶ of 4 Add Tables... Done

Çizelge 5.3. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Joint Reactions

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
▶	1	DEAD	LinStatic	3000	0	1125	0	0	0
	3	DEAD	LinStatic	0	0	-1125	0	0	0

Record: 14 1 of 2 Add Tables... Done

Elle bulunan analiz sonuçlarının SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.4, Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6'da yapıldı.

Çizelge 5.4. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	3000	3000	1125	1125
3	0	0	-1125	-1125

Çizelge 5.5. 3 kN'luk yükleme için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

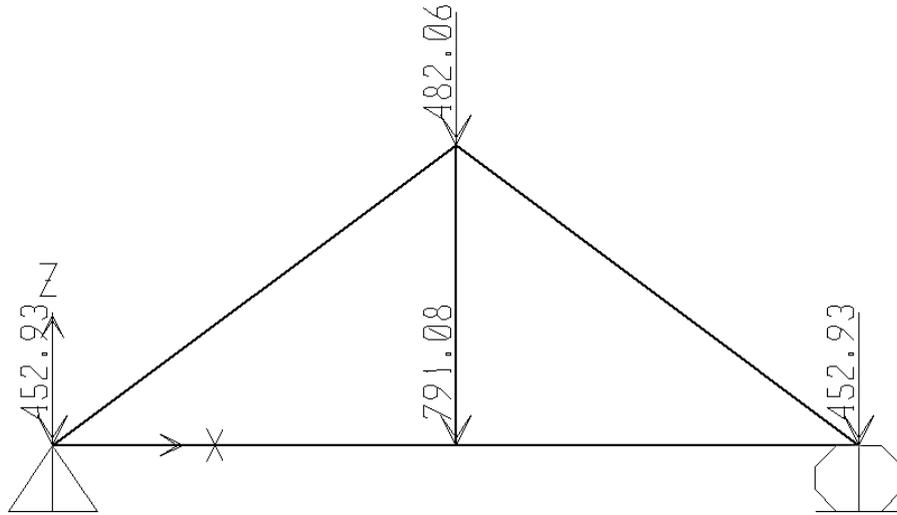
Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	-1500,00	1500,00
	2	-1500,00	-1500,00
2	2	-1500,00	1500,00
	3	-1500,00	-1500,00
3	3	1875,00	1875,00
	4	1875,00	-1875,00
4	1	-1875,00	1875,00
	4	-1875,00	-1875,00
5	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00

Çizelge 5.6. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-0,0209	-0,0209	0,0279	0,0279
3	-0,0418	-0,0418	0,0000	0,0000
4	-0,1246	-0,1246	0,0279	0,0279

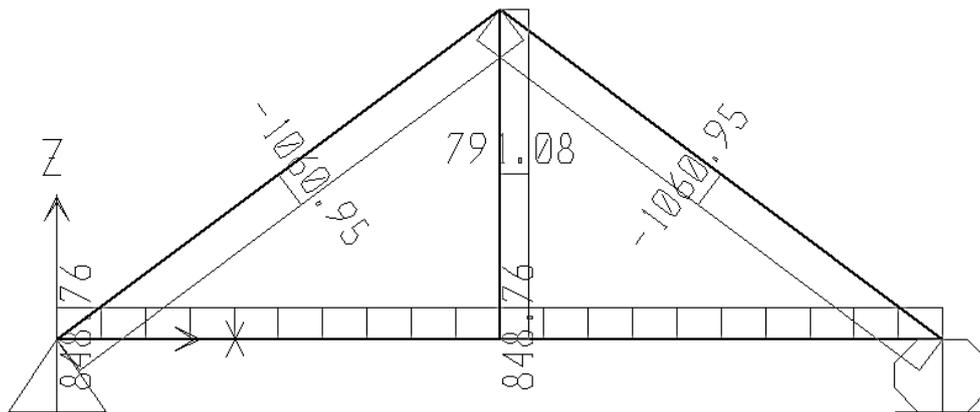
5.1.1.2. Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz

Şekil 5.3'te yükleme şekli gösterilen zati (F_{zati}) yüklerin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.4'te verildi.



Şekil 5.3. Zati yükleme (F_{zati})

F_{zati} yüklemesi sonucunda oluşan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin elle çözümünde gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.4'te verildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.4, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de gösterildi.



Şekil 5.4. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Çizelge 5.7. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0.011829	0	-0.104277	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	0.023659	0	0	0	0	0
4	DEAD	LinStatic	0.011829	0	-0.094003	0	0	0

Record: 1 of 4

Çizelge 5.8. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
1	DEAD	LinStatic	-2.274E-13	0	1089.5	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	0	0	1089.5	0	0	0

Record: 1 of 2

Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri sonuçlarının SAP2000’de analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.9, Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11’de yapıldı.

Çizelge 5.9. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0	0	1089,5	1089,5
3	0	0	1089,5	1089,5

Çizelge 5.10. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0118	0,0118	-0,1043	-0,1043
3	0,0237	0,0237	0,0000	0,0000
4	0,0118	0,0118	-0,0940	-0,0940

Çizelge 5.11. F_{zati} yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

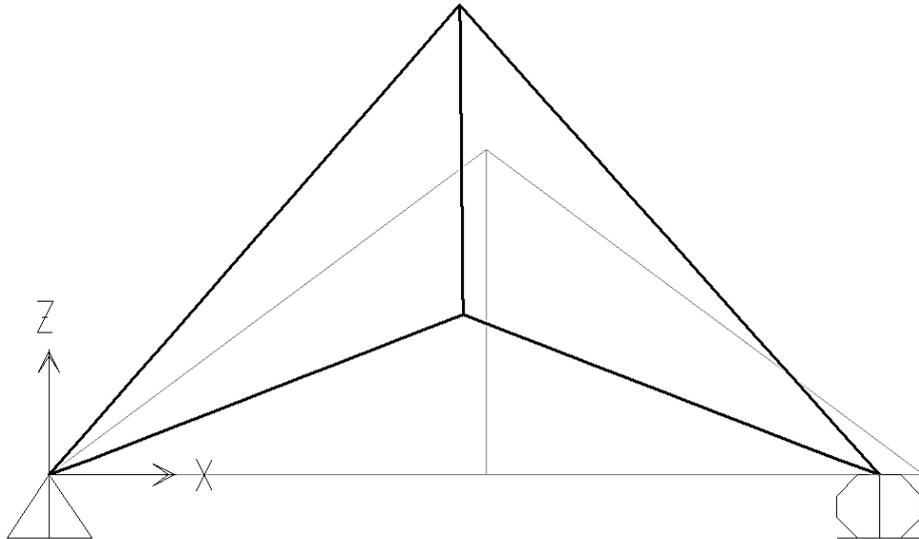
Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	848,76	-848,76
	2	848,76	848,76
2	2	848,76	-848,76
	3	848,76	848,76
3	3	-1060,95	1060,95
	4	-1060,95	-1060,95
4	1	-1060,95	1060,95
	4	-1060,95	-1060,95
5	2	791,08	-791,08
	4	791,08	791,08

5.1.2. Dinamik analiz

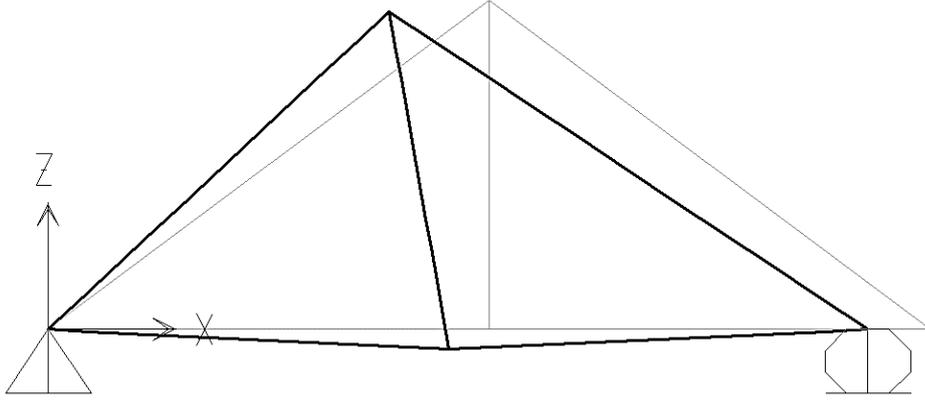
Sistemin elle bulunan doğal frekans ve periyotlarının elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.5'te verildi. Elle bulunan doğal frekans ve periyot sonuçları ile SAP2000'de analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve periyotların karşılaştırması Çizelge 5.12'de ve SAP2000'den elde edilen modlara ait mod şekilleri Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterildi.

Çizelge 5.12. Elle bulunan özdeğer, doğal frekans ve periyot sonuçlarının SAP2000 sonuçlarıyla karşılaştırması

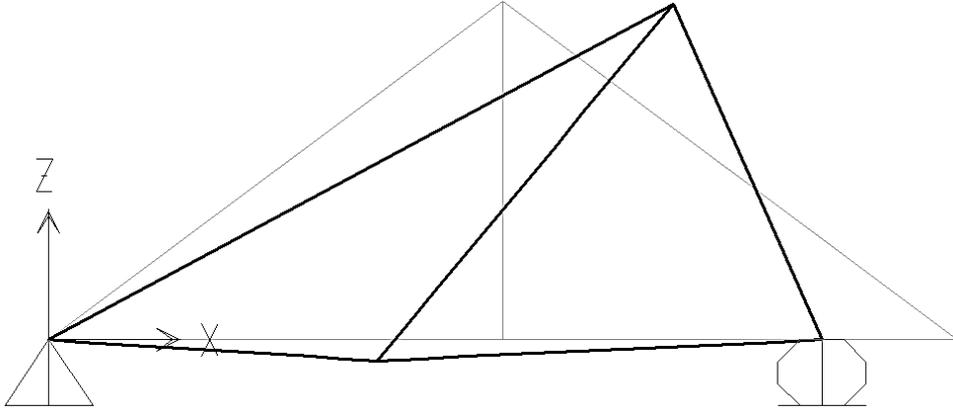
Mod (i)	ω_i^2 x (1.0E+03)		ω_i (s ⁻¹)		T _i (s)	
	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu
1	0,0935	0,0935	1,5391	1,5389	0,6497	0,6498
2	0,4044	0,4043	3,2004	3,2001	0,3125	0,3125
3	0,8226	0,8224	4,5647	4,5643	0,2191	0,2191
4	2,6902	2,6902	8,2549	8,2549	0,1211	0,1211
5	3,0783	3,0782	8,8303	8,8302	0,1132	0,1132



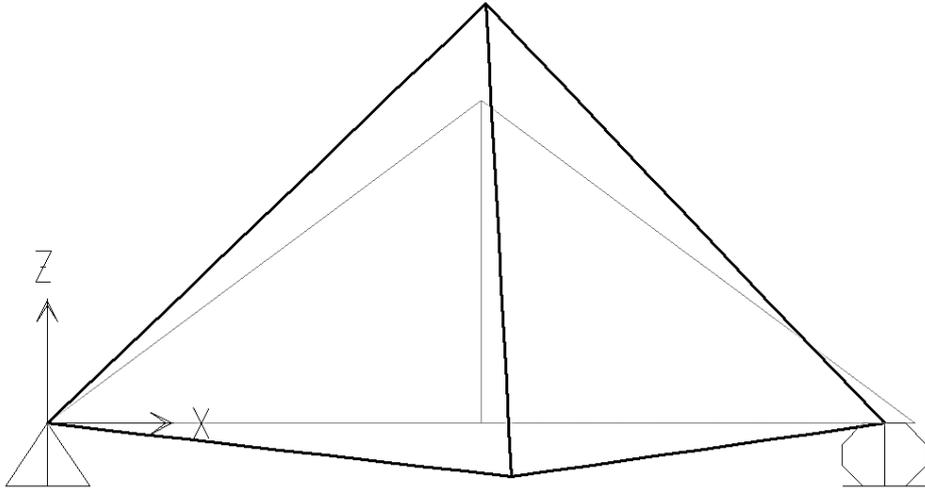
Şekil 5.5. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli



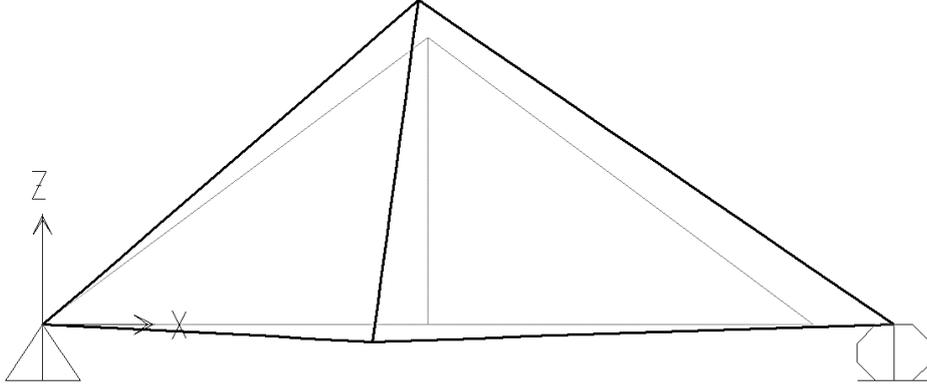
Şekil 5.6. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli



Şekil 5.7. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli



Şekil 5.8. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 4. mod şekli



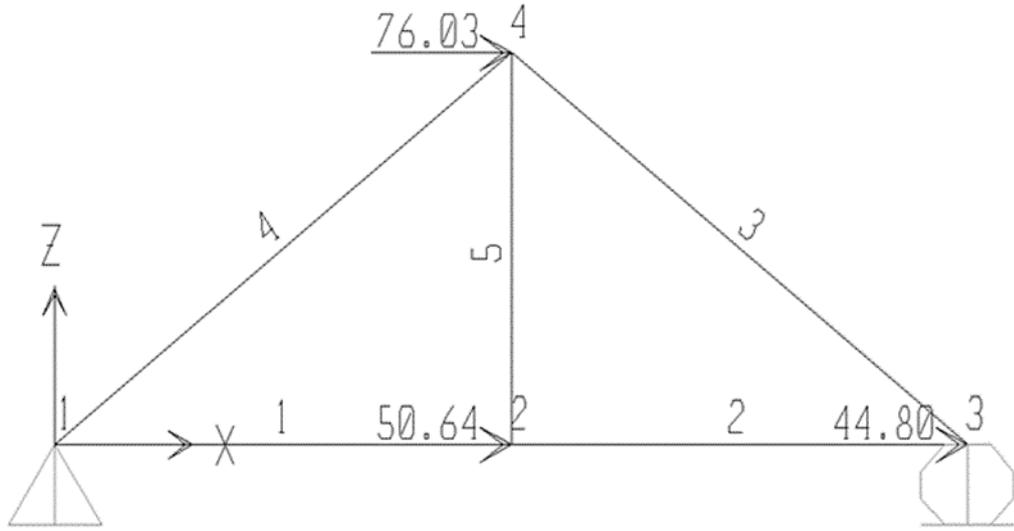
Şekil 5.9. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 5. mod şekli

5.1.3. Mod birleştirme yöntemi ile analiz

DBYBHY 2007'de, 3. deprem bölgesinde; bina önem katsayısı, $I=1,2$; Z2 zemin sınıfında $T_A=0,15$ s ve $T_B=0,40$ s; etkin yer ivmesi $A_0=0,20$; taşıyıcı sistem katsayısı DBYBHY 2007 Tablo 2.5'te (3.1) için $R=5$ değerlerine sahip olan DKS'nin deprem etkileri takip eden işlemlerdeki gibidir.

2. ve 3. mod etkileri DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre yeterlidir ve elle çözüm için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.6'da verildi. 2. moda ait yatay deprem yüklerinin ($F_{deprem2}$) elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.6'da verildi ve Şekil 5.10'da yükleme şekli gösterildi. 2. mod için zati yükler (Bkz. Şekil 5.3) ve yatay deprem yüklerinin birleşiminden oluşan yükleme ($F_{analiz2}=F_{zati}+F_{deprem2}$) etkisinde SAP2000 programı ile analizi aşağıdaki gibidir. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.13, Çizelge 5.14 ve Şekil 5.11'de gösterildi.

$$F_{analiz2}=F_{zati}+F_{deprem2}$$



Şekil 5.10. 2. mod için yatay deprem kuvvetleri (F_{deprem2})

Çizelge 5.13. 2. mod için F_{analiz2} yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions									
File	View	Format-Filter-Sort	Select	Options					
Units:	As Noted								
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm	
1	deprem_ölü yük	Combination	-171.47	0	1060.99	0	0	0	
3	deprem_ölü yük	Combination	0	0	1118.01	0	0	0	

Record: 1 of 2

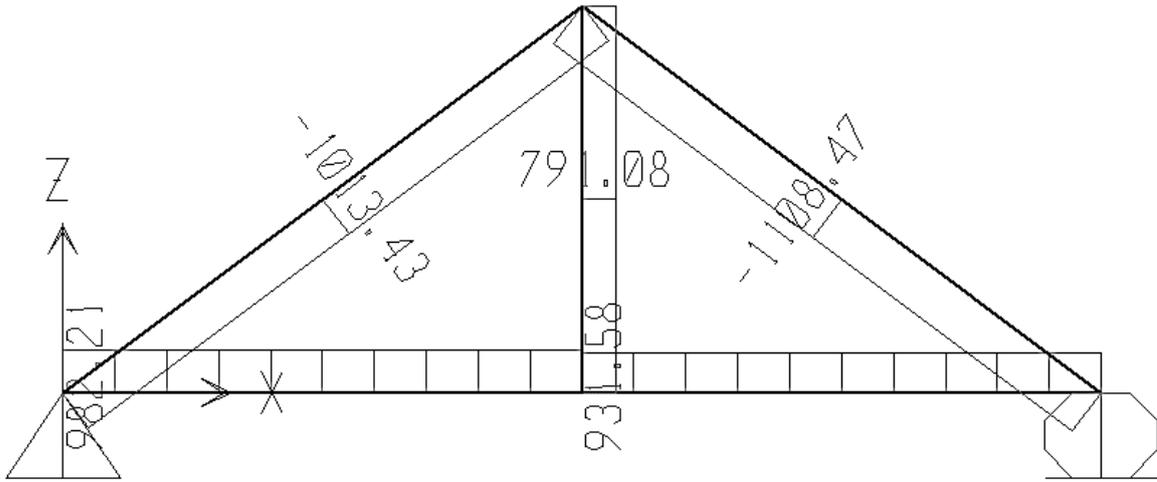
Add Tables... Done

Çizelge 5.14. 2. mod için F_{analiz2} yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements									
File	View	Format-Filter-Sort	Select	Options					
Units:	As Noted								
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians	
1	deprem_ölü yük	Combination	0	0	0	0	0	0	
2	deprem_ölü yük	Combination	0.013689	0	-0.106287	0	0	0	
3	deprem_ölü yük	Combination	0.026673	0	0	0	0	0	
4	deprem_ölü yük	Combination	0.015964	0	-0.096013	0	0	0	

Record: 1 of 4

Add Tables... Done



Şekil 5.11. 2. mod için $F_{analiz2}$ yüklemesi etkisinde oluşan SAP2000’de analiz sonucu elde edilen iç kuvvetler

Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri sonuçlarının SAP2000’de analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.15, Çizelge 5.16 ve Çizelge 5.17’de yapıldı.

Çizelge 5.15. $F_{analiz2}$ yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	-171,47	-171,47	1060,99	1060,989
3	0	0	1118,01	1118,011

Çizelge 5.16. $F_{analiz2}$ yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

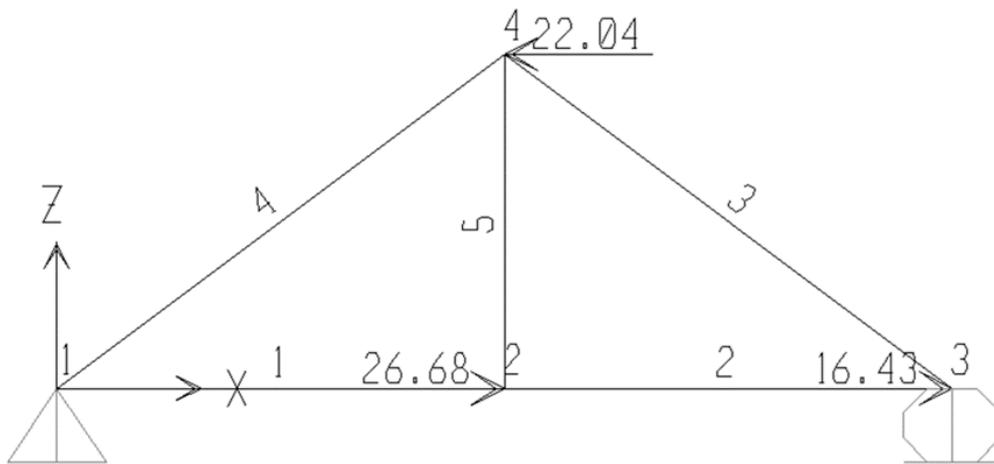
Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0137	0,0137	-0,1063	-0,1063
3	0,0267	0,0267	0,0000	0,0000
4	0,0160	0,0160	-0,0960	-0,0960

Çizelge 5.17. $F_{analiz2}$ yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

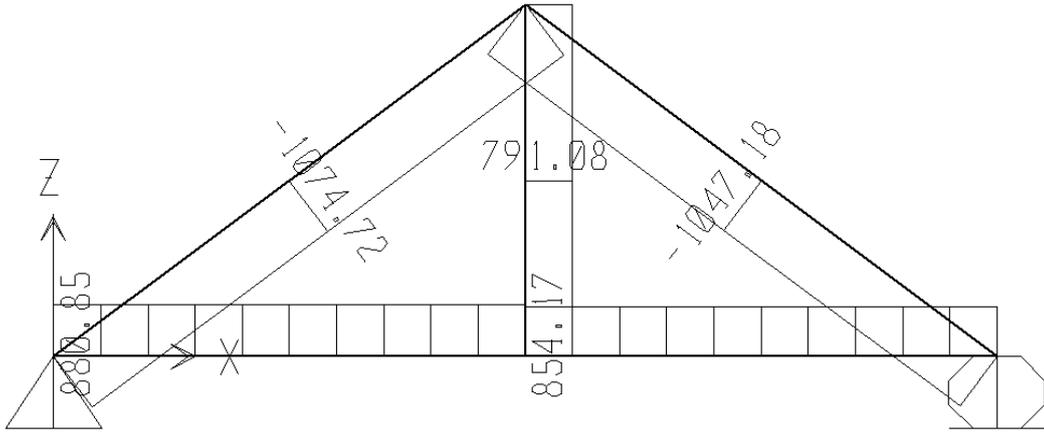
Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	982,21	-982,22
	2	982,21	982,22
2	2	931,58	-931,58
	3	931,58	931,58
3	3	-1108,47	1108,47
	4	-1108,47	-1108,47
4	1	-1013,43	1013,43
	4	-1013,43	-1013,43
5	2	791,08	-791,08
	4	791,08	791,08

3. moda ait yatay deprem yüklerinin ($F_{deprem3}$) elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.6'da verildi ve Şekil 5.12'de yükleme şekli gösterildi. 3. mod için zati yükler (Bkz. Şekil 5.3) ve yatay deprem yüklerinin birleşiminden oluşan yükleme ($F_{analiz3}=F_{zati}+F_{deprem3}$) etkisinde SAP2000 programı ile analizi aşağıdaki gibidir. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.13, Çizelge 5.18 ve Çizelge 5.19'da gösterildi.

$$F_{analiz3}=F_{zati}+F_{deprem3}$$



Şekil 5.12. 3. mod için yatay deprem kuvvetleri ($F_{deprem3}$)



Şekil 5.13. 3. mod için $F_{analiz3}$ yükleri etkisinde elemanlarda oluşan SAP2000’de analiz sonucu elde edilen iç kuvvetler

Çizelge 5.18. 3. mod için $F_{analiz3}$ yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
1	deprem_ölü yük	Combination	-21.07	0	1097.76	0	0	0
3	deprem_ölü yük	Combination	0	0	1081.23	0	0	0

Record: 1 of 2

Çizelge 5.19. 3. mod için $F_{analiz3}$ yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	deprem_ölü yük	Combination	0	0	0	0	0	0
2	deprem_ölü yük	Combination	0.012277	0	-0.104626	0	0	0
3	deprem_ölü yük	Combination	0.024181	0	0	0	0	0
4	deprem_ölü yük	Combination	0.011329	0	-0.094352	0	0	0

Record: 1 of 4

Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri sonuçlarının SAP2000’de analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.20, Çizelge 5.21 ve Çizelge 5.22’de yapıldı.

Çizelge 5.20. $F_{analiz3}$ yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	-21,07	-21,08	1097,76	1097,761
3	0	0	1081,23	1081,239

Çizelge 5.21. $F_{analiz3}$ yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0123	0,0123	-0,1046	-0,1046
3	0,0242	0,0242	0,0000	0,0000
4	0,0113	0,0113	-0,0944	-0,0943

Çizelge 5.22. $F_{analiz3}$ yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	880,85	-880,86
	2	880,85	880,86
2	2	854,17	-854,18
	3	854,17	854,18
3	3	-1047,18	1047,18
	4	-1047,18	-1047,18
4	1	-1074,72	1074,72
	4	-1074,72	-1074,72
5	2	791,08	-791,08
	4	791,08	791,08

$T_3/T_2 < 0,80$ koşulu sağlandığı için 2. ve 3. moda ait; mesnet tepkileri (Bkz. Çizelge 5.13 ve Bkz. Çizelge 5.18), taban kesme kuvveti, yer değiştirme (Bkz. Çizelge 5.14 ve Bkz. Çizelge 5.19) ve iç kuvvet (Bkz. Şekil 5.11 ve Bkz. Şekil 5.13) değerlerinin maksimum değerli olanları, Karelerin Toplamının Kare Kökü Kuralı (SRSS) yöntemi uygulanarak

modal etkiler birleştirilir. Ara işlemleri Ek Açıklama-A.6'da ve j mod numarası olmak üzere taban kesme kuvveti V_j için SRSS ile elde edilen değer aşağıdaki gibidir.

$$V_{SRSS} = \sqrt{V_2^2 + V_3^2} = 172,75 \text{ N}$$

Düğüm noktalarının u_{12} , u_{22} , u_{13} , u_{14} ve u_{24} serbestliklerine karşılık gelen modal yer değiştirmelerin bu kural ile süperpozisyonunda ara işlemleri Ek Açıklama-A.6'da ve i düğüm numarası ve j mod numarası olmak üzere $(u_{1i})_j$ ve $(u_{2i})_j$ yer değiştirmeleri;

$$u_{12(SRSS)} = \sqrt{((u_{12})_2)^2 + ((u_{12})_3)^2} = 0,018388 \text{ mm} ,$$

$$u_{22(SRSS)} = \sqrt{((u_{22})_2)^2 + ((u_{22})_3)^2} = 0,0149143 \text{ mm} ,$$

$$u_{13(SRSS)} = \sqrt{((u_{13})_2)^2 + ((u_{13})_3)^2} = 0,0360002 \text{ mm} ,$$

$$u_{14(SRSS)} = \sqrt{((u_{14})_2)^2 + ((u_{14})_3)^2} = 0,019575 \text{ mm} ,$$

$$u_{24(SRSS)} = \sqrt{((u_{24})_2)^2 + ((u_{24})_3)^2} = 0,134614 \text{ mm}$$

elde edilir. Modal etkilerin oluşturduğu mesnet tepkilerinin bu kural ile süperpozisyonundan ara işlemleri Ek Açıklama-A.6'da ve i düğüm numarası ve j mod numarası olmak üzere $(R_{1i})_j$ ve $(R_{2i})_j$ mesnet tepkileri;

$$R_{11(SRSS)} = \sqrt{((R_{11})_2)^2 + ((R_{11})_3)^2} = 172,76 \text{ N} ,$$

$$R_{21(SRSS)} = \sqrt{((R_{21})_2)^2 + ((R_{21})_3)^2} = 1526,69 \text{ N} ,$$

$$R_{23(SRSS)} = \sqrt{((R_{23})_2)^2 + ((R_{23})_3)^2} = 1555,31 \text{ N}$$

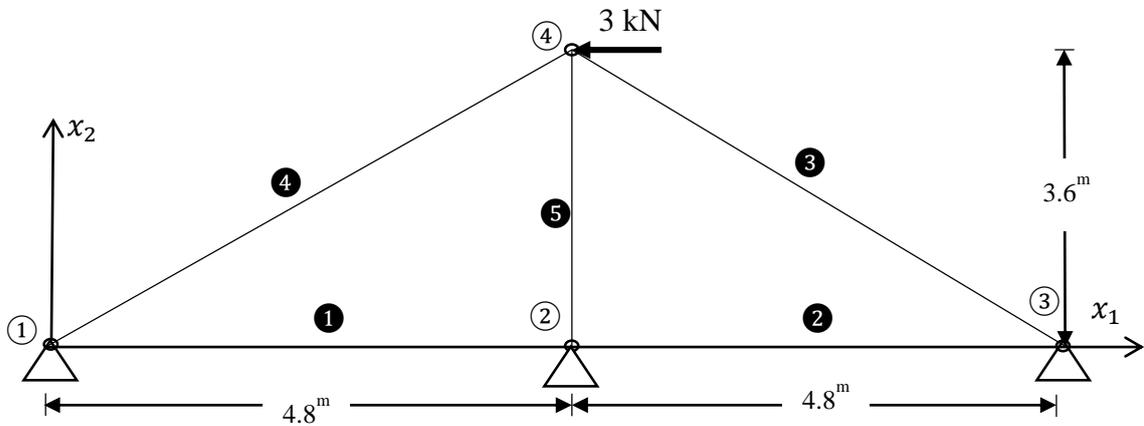
elde edilir. Modal etkilerin oluşturduğu iç kuvvetlerin bu kural ile birleştirilmesinden Çizelge 5.23'teki değerler elde edilir.

Çizelge 5.23. SRSS ile birleştirilmiş eksenel kuvvet değerleri

Eleman Numarası	Düğüm Numarası	Eksenel Kuvvetler (N)		SRSS İle Birleştirilmiş Eksenel Kuvvetler (N)
		2. Mod	3. Mod	
1	1	982.21	880.85	1319.33
	2	982.21	880.85	1319.33
2	2	931.58	854.17	1263.90
	3	931.58	854.17	1263.90
3	3	-1108.47	-1047.18	1524.89
	4	-1108.47	-1047.18	1524.89
4	1	-1013.43	-1074.72	1477.18
	5	-1013.43	-1074.72	1477.18
5	2	791.08	791.08	1118.76
	4	791.08	791.08	1118.76

5.2. DKS-2 Örnek Çözüm (El ve SAP2000) Uygulaması

Şekil 5.14'te x_1 - x_2 koordinat sisteminde gösterilmiş olan DKS, 3 kN'luk sabit yük ile yüklendi ve kafes sistemin özellikleri Bkz. Çizelge 5.1'de verilmiş olup bu kafes sistemin statik, dinamik ve x_1 yönündeki deprem yükleri etkisi altındaki analizi takip eden işlemler sonucunda elde edildi (sistemin sönümü ihmal edildi).

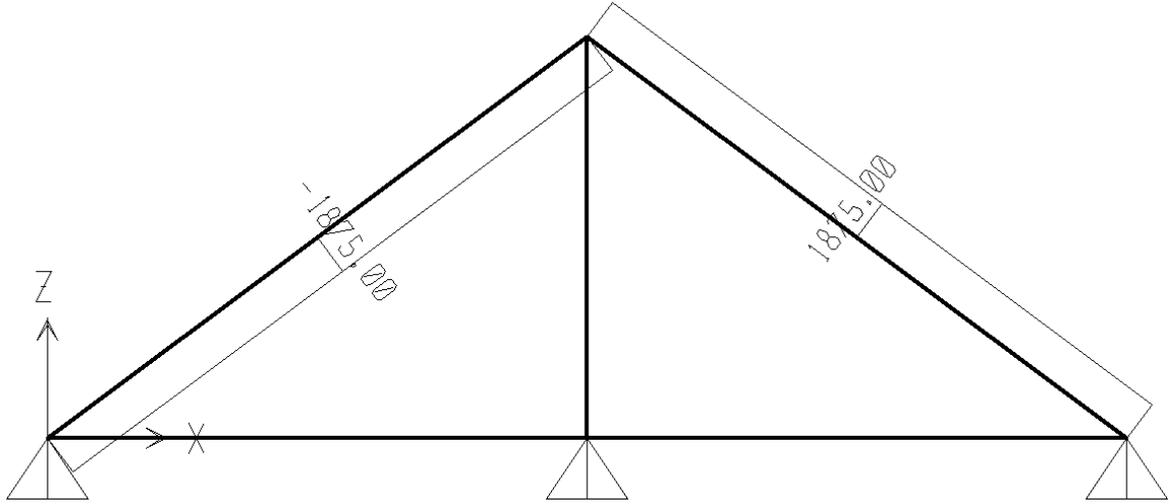


Şekil 5.14. DKS-2 örneğine ait düzlem kafes sistem

5.2.1. Statik analiz

5.2.1.1. 3 kN'luk yük için statik analiz

Eleman ağırlıkları ihmal edilip sistem sadece 3 kN'luk yük etkisinde analiz edildi. Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.1, Ek Açıklama-A.2 ve Ek Açıklama-B.1'de verildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.15, Çizelge 5.24 ve Çizelge 5.25'te gösterildi.



Şekil 5.15. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Çizelge 5.24. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements									
File View Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted					Joint Displacements				
	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	Sabit	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	Sabit	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	3	Sabit	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	4	Sabit	LinStatic	-0.103692	0	0	0	0	0

Record: |<<| |>>| of 4

Add Tables... Done

Çizelge 5.25. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

Joint Text	Output Case Text	Case Type Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
1	Sabit	LinStatic	1500	0	1125	0	0	0
2	Sabit	LinStatic	0	0	0	0	0	0
3	Sabit	LinStatic	1500	0	-1125	0	0	0

Record: 1 of 3

Elle bulunan analiz sonuçlarının SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.26, Çizelge 5.27 ve Çizelge 5.28'de yapıldı.

Çizelge 5.26. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	-0,1037	-0,1037	0,0000	0,0000

Çizelge 5.27. 3 kN'luk yükleme için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

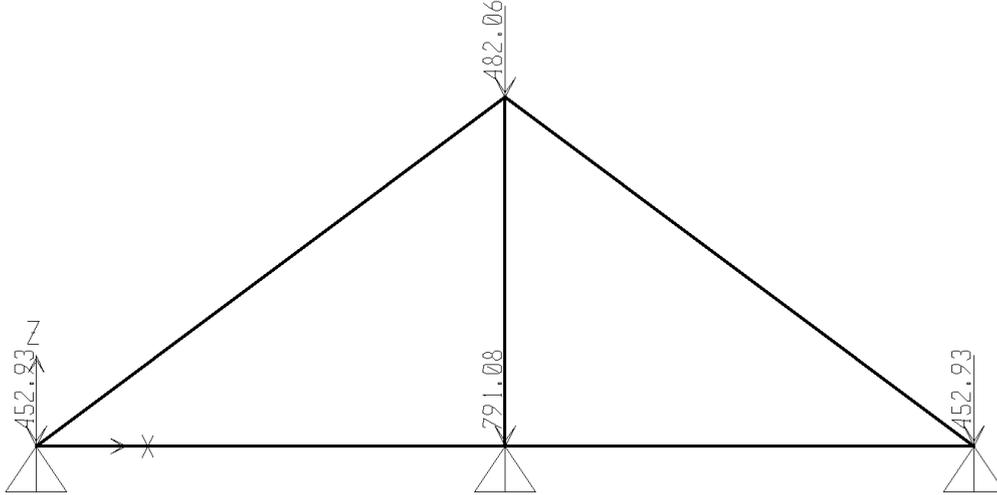
Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1500,00	1500,00	1125,00	1125,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1500,00	1500,00	-1125,00	-1125,00

Çizelge 5.28. 3 kN'luk yükleme için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	0,00	0,00
	2	0,00	0,00
2	2	0,00	0,00
	3	0,00	0,00
3	3	1875,00	-1875,00
	4	1875,00	1875,00
4	1	-1875,00	1875,00
	4	-1875,00	-1875,00
5	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00

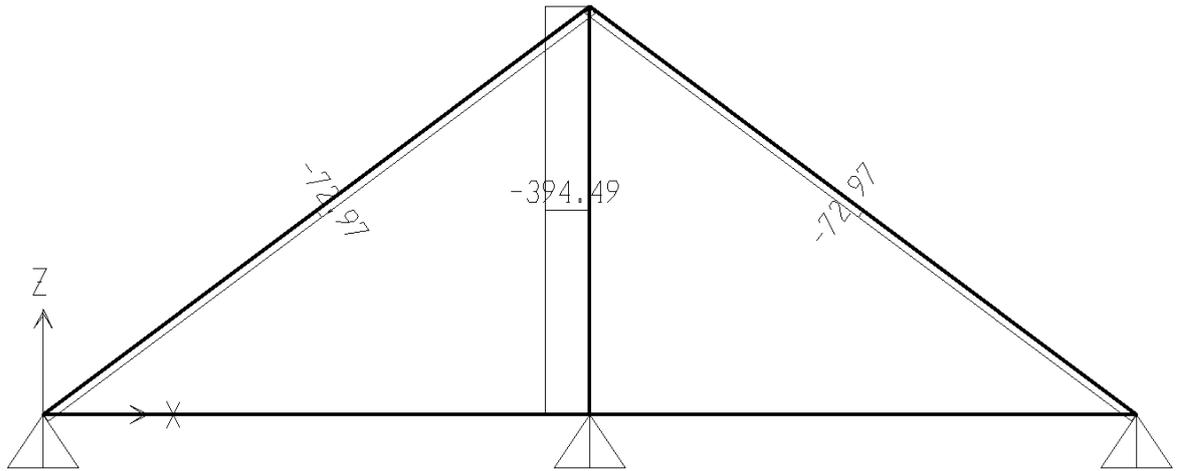
5.2.1.2. Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz

Şekil 5.16'da yükleme şekli gösterilen zati (F_{zati}) yüklerin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-B.2'de verildi.



Şekil 5.16. Zati yükleme (F_{zati})

F_{zati} yüklemesi sonucunda oluşan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin elle çözümünde gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.1, Ek Açıklama-A.2 ve Ek Açıklama-B.2'de verildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.17, Çizelge 5.29 ve Çizelge 5.30'da gösterildi.



Şekil 5.17. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Çizelge 5.29. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements									
File View Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted									
Joint Displacements									
	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	3	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	4	DEAD	LinStatic	0	0	-0.005381	0	0	0

Record: [Navigation icons] of 4 Add Tables... Done

Çizelge 5.30. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions									
File View Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted									
Joint Reactions									
	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
▶	1	DEAD	LinStatic	58.38	0	496.71	0	0	0
	2	DEAD	LinStatic	0	0	1185.57	0	0	0
	3	DEAD	LinStatic	-58.38	0	496.71	0	0	0

Record: [Navigation icons] of 3 Add Tables... Done

Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri sonuçlarının SAP2000’de analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.31, Çizelge 5.32 ve Çizelge 5.33’te yapıldı.

Çizelge 5.31. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	-0,0054	-0,0052

Çizelge 5.32. F_{zati} yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	58,38	56,09	496,71	494,99
2	0,00	0,00	1185,57	1189,01
3	-58,38	-56,09	496,71	494,99

Çizelge 5.33. F_{zati} yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

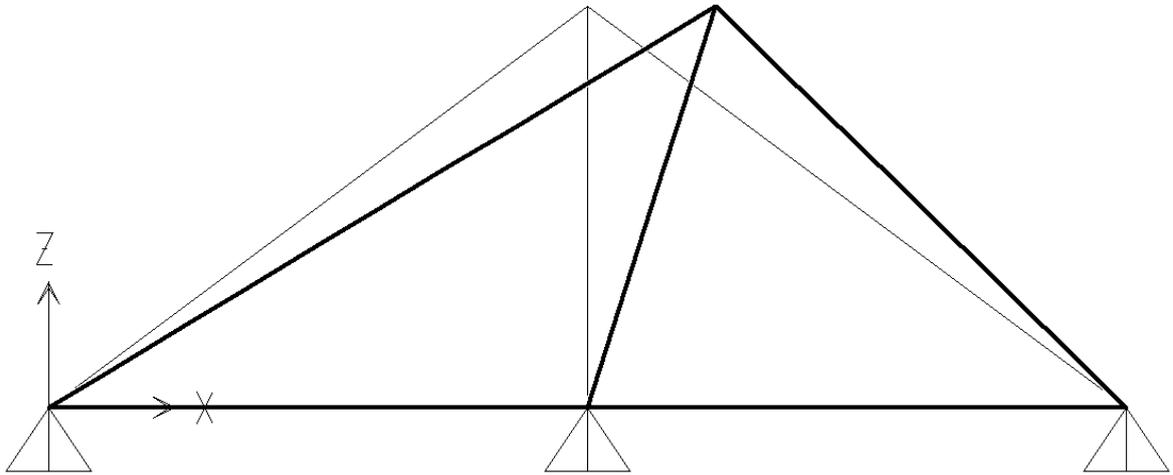
Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	0,00	0,00
	2	0,00	0,00
2	2	0,00	0,00
	3	0,00	0,00
3	3	-72,97	70,11
	4	-72,97	-70,11
4	1	-72,97	70,11
	4	-72,97	-70,11
5	2	-394,49	397,93
	4	-394,49	-397,93

5.2.2. Dinamik analiz

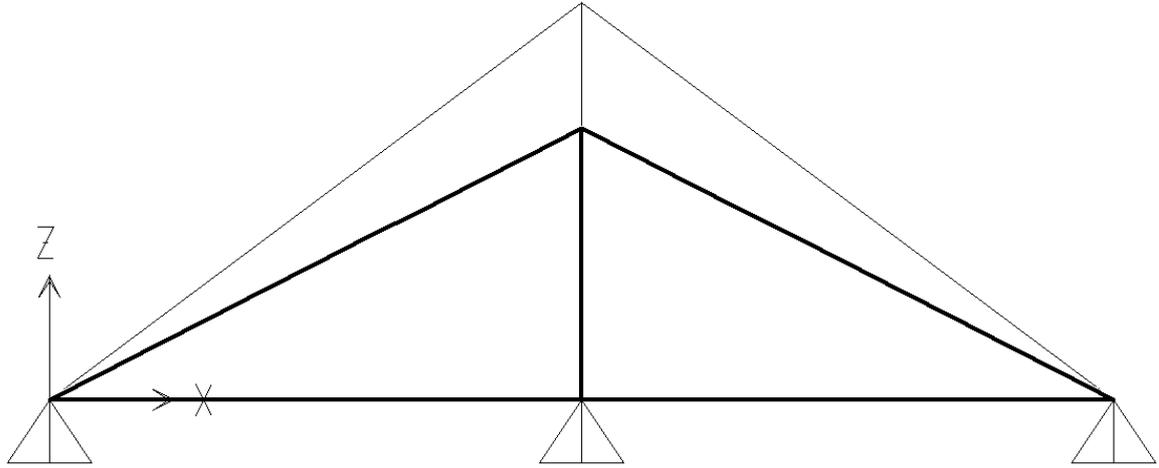
Sistemin elle bulunan doğal frekans ve periyotlarının elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-B.3'te verildi. Elle bulunan doğal frekans ve periyot sonuçları ile SAP2000'de analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve periyotların karşılaştırması Çizelge 5.34'te ve SAP2000'den elde edilen modlara ait mod şekilleri Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da gösterildi.

Çizelge 5.34. Elle bulunan özdeğer, doğal frekans ve periyot sonuçlarının SAP2000 sonuçlarıyla karşılaştırması

Mod (i)	ω_i^2 x (1,0E+03)		ω_i (s ⁻¹)		T_i (s)	
	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu
1	0,5889	0,5885	3,8623	3,8609	0,2589	0,2590
2	1,8982	1,8224	6,9341	6,7943	0,1442	0,1472



Şekil 5.18. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli



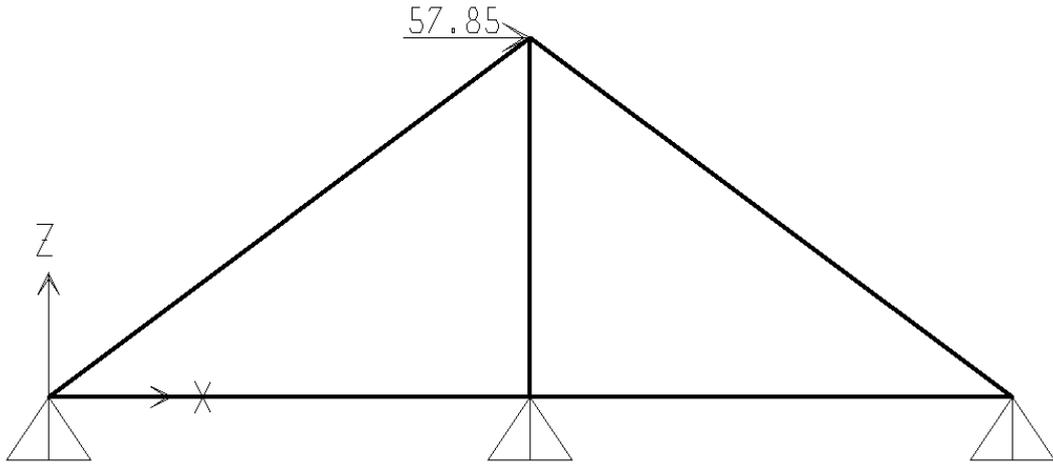
Şekil 5.19. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli

5.2.3. Mod birleştirme yöntemi ile analiz

DBYBHY 2007'de, 3. deprem bölgesinde; bina önem katsayısı, $I=1,2$; Z2 zemin sınıfında $T_A=0,15$ s ve $T_B=0,40$ s; etkin yer ivmesi $A_0=0,20$; taşıyıcı sistem katsayısı DBYBHY 2007 Tablo 2.5'te (3.1) için $R=5$ değerlerine sahip olan DKS'nin deprem etkileri takip eden işlemlerdeki gibidir.

1. mod etkileri DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre yeterlidir ve elle çözüm için gereken ara işlemler Ek Açıklama-B.4'te verildi. 1. moda ait yatay deprem yüklerinin ($F_{deprem1}$) elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-B.4'te verildi ve Şekil 5.20'de yükleme şekli gösterildi. 1. mod için zati yükler (Bkz. Şekil 5.16) ve yatay deprem yüklerinin birleşiminden oluşan yükleme ($F_{analiz1}=F_{zati}+F_{deprem1}$) etkisinde SAP2000 programı ile analizi aşağıdaki gibidir. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.35, Çizelge 5.36 ve Şekil 5.21'de gösterildi.

$$F_{analiz1}=F_{zati}+F_{deprem1}$$



Şekil 5.20. 1. mod için yatay deprem kuvvetleri (F_{deprem1})

Çizelge 5.35. 1. mod için F_{analiz1} yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
2	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
3	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
4	COMB1	Combination	0.002	0	-0.005381	0	0	0

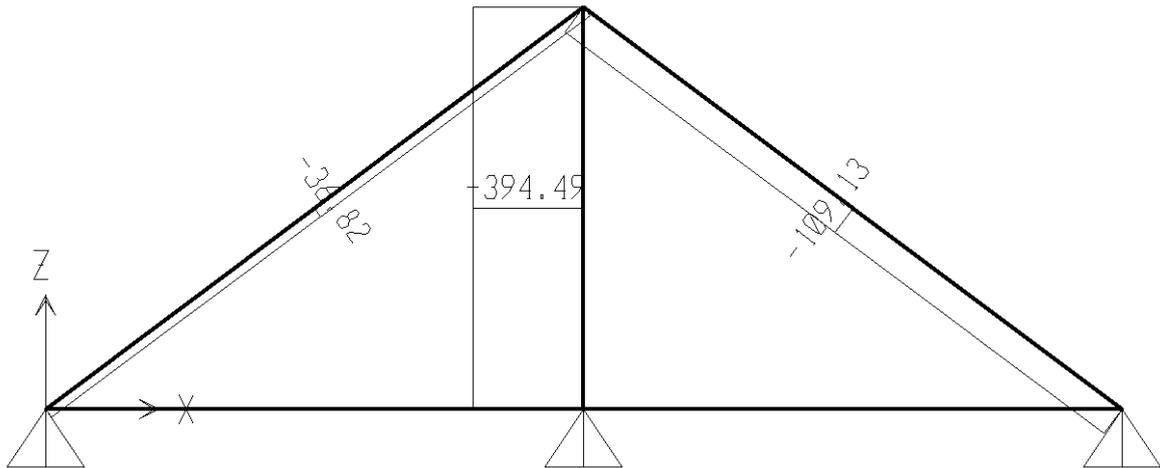
Record: ⏪ ⏩ of 4 Add Tables... Done

Çizelge 5.36. 1. mod için F_{analiz1} yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
1	COMB1	Combination	29.45	0	475.02	0	0	0
2	COMB1	Combination	0	0	1185.57	0	0	0
3	COMB1	Combination	-87.3	0	518.41	0	0	0

Record: ⏪ ⏩ of 3 Add Tables... Done



Şekil 5.21. 1. mod için $F_{analiz1}$ yüklemesi etkisinde oluşan SAP2000’de analiz sonucu elde edilen iç kuvvetler

Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri sonuçlarının SAP2000’de analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.37, Çizelge 5.38 ve Çizelge 5.39’da yapıldı.

Çizelge 5.37. $F_{analiz1}$ yüklemesi için x_1 yönündeki U1 ve x_2 yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (mm)		U3 (mm)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0020	0,0020	-0,0054	-0,0052

Çizelge 5.38. $F_{analiz1}$ yüklemesi için x_1 yönündeki F1 ve x_2 yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

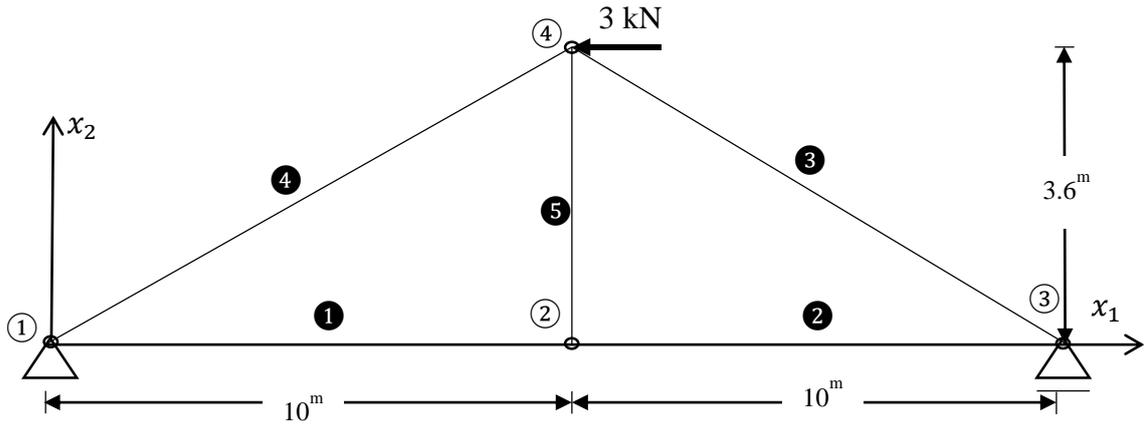
Düğüm No	F1 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	29,45	27,16	475,02	473,30
2	0,00	0,00	1185,57	1189,01
3	-87,30	-85,01	518,41	516,69

Çizelge 5.39. $F_{analiz1}$ yüklemesi sonucunda elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elde çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	1	0,00	0,00
	2	0,00	0,00
2	2	0,00	0,00
	3	0,00	0,00
3	3	-109,13	106,26
	4	-109,13	-106,26
4	1	-36,82	33,95
	4	-36,82	-33,95
5	2	-394,49	397,93
	4	-394,49	-397,93

5.3. DKS-3 Örnek SAP2000 Uygulaması

Şekil 5.22'de x_1 - x_2 koordinat sisteminde gösterilmiş olan DKS, 3 kN'luk sabit yük ve kendi ağırlığından kaynaklanan zati yükler ile yüklendi ve kafes sistemin özellikleri Çizelge 5.40'ta verilmiş olup bu kafes sistemin statik ve dinamik analizi takip eden işlemler sonucunda elde edildi (sistemin sönümü ihmal edildi).



Şekil 5.22. DKS-3 örneğine ait düzlem kafes sistem

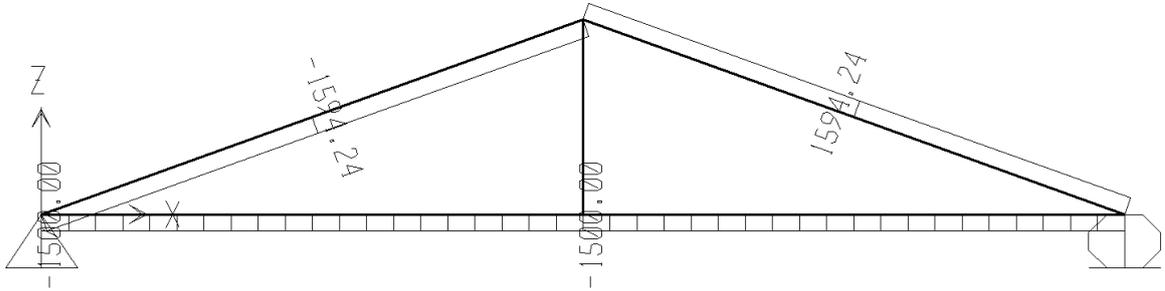
Çizelge 5.40. DKS-3 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri

ELEMAN NO	PROFİL	G (kg/mm)	E (N/mm ²)	A (mm ²)	EA/L (N/mm)	GL/2 (kg)
1	IPE 140	0,0129	210000	1640	34440,00	64,50
2	IPE 140	0,0129	210000	1640	34440,00	64,50
3	[60	0,00507	210000	646	12764,08	26,94
4	[60	0,00507	210000	646	12764,08	26,94
5	IPE 120	0,0104	210000	1320	77000,00	18,72

5.3.1. Statik analiz

5.3.1.1. 3 kN'luk yük için statik analiz

Eleman ağırlıkları ihmal edilip sistem sadece 3 kN'luk yük etkisinde analiz edildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.23, Çizelge 5.41 ve Çizelge 5.42'de gösterildi.



Şekil 5.23. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Çizelge 5.41. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements									
File View Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted									
Joint Displacements									
	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	Sabit	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	Sabit	LinStatic	-0.043554	0	0.120983	0	0	0
	3	Sabit	LinStatic	-0.087108	0	0	0	0	0
	4	Sabit	LinStatic	-0.176343	0	0.120983	0	0	0

Record: [Navigation icons] of 4

Add Tables... Done

Çizelge 5.42. 3 kN'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions										
File View Format-Filter-Sort Select Options										
Units: As Noted										
Joint Reactions										
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm		
1	Sabit	LinStatic	3000	0	540	0	0	0		
3	Sabit	LinStatic	0	0	-540	0	0	0		

Record: [Navigation icons] of 2 Add Tables... Done

5.3.1.2. Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz

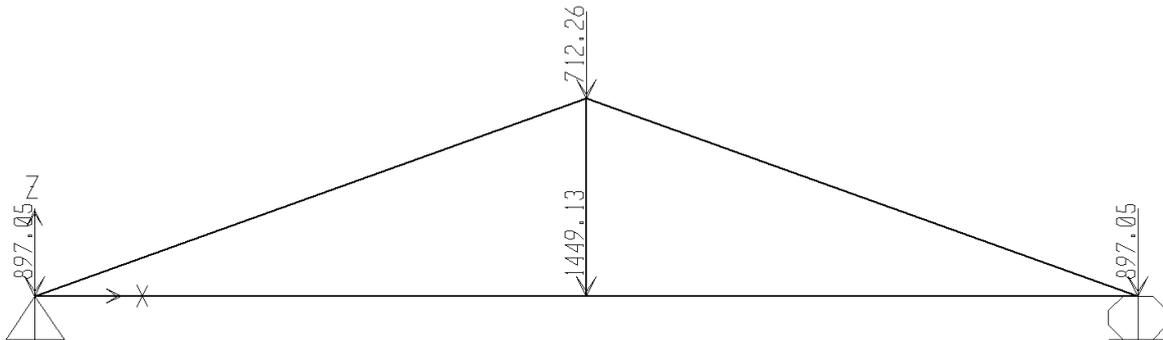
Şekil 5.24'te yükleme şekli gösterilen zati (F_{zati}) yüklerin elde edilmesi için gereken işlemler aşağıdaki gibidir.

$$1 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (64,50 + 26,94) = 897,05 \text{ N}$$

$$2 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (64,50 + 64,50 + 18,72) = 1449,13 \text{ N}$$

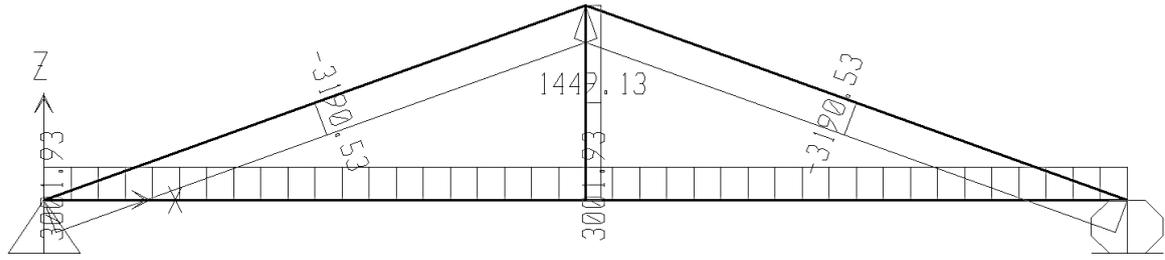
$$3 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (64,50 + 26,94) = 897,05 \text{ N}$$

$$4 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (26,94 + 26,94 + 18,72) = 712,26 \text{ N}$$



Şekil 5.24. Zati yükleme (F_{zati})

SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Şekil 5.25, Çizelge 5.43 ve Çizelge 5.44'te gösterildi.



Şekil 5.25. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Çizelge 5.43. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options
Units: As Noted

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0.087164	0	-0.999132	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	0.174328	0	0	0	0	0
4	DEAD	LinStatic	0.087164	0	-0.980312	0	0	0

Record: 1 of 4

Add Tables... Done

Çizelge 5.44. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options
Units: As Noted

Joint Reactions

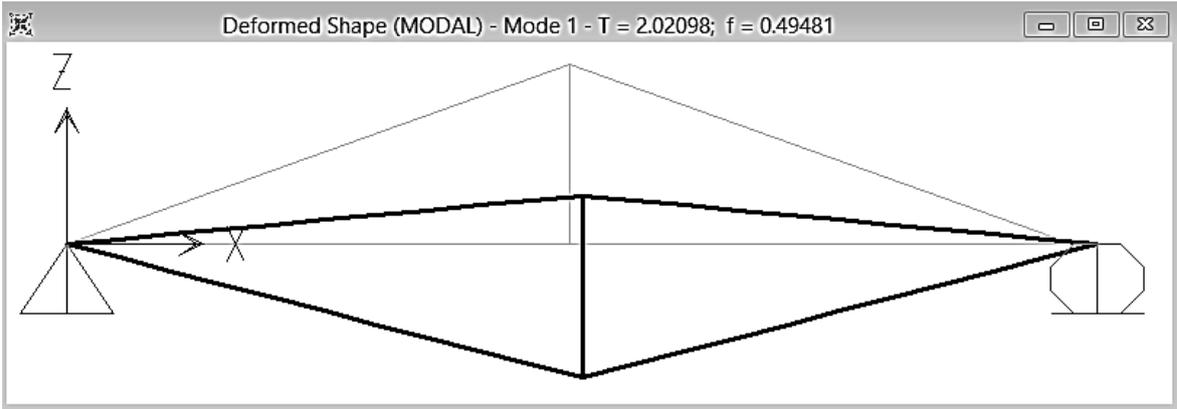
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-mm	M2 N-mm	M3 N-mm
1	DEAD	LinStatic	-4.547E-13	0	1977.75	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	0	0	1977.75	0	0	0

Record: 1 of 2

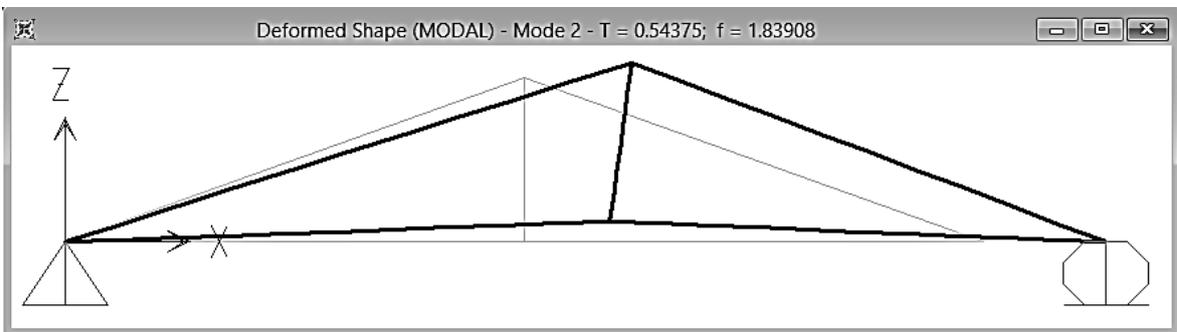
Add Tables... Done

5.3.2. Dinamik analiz

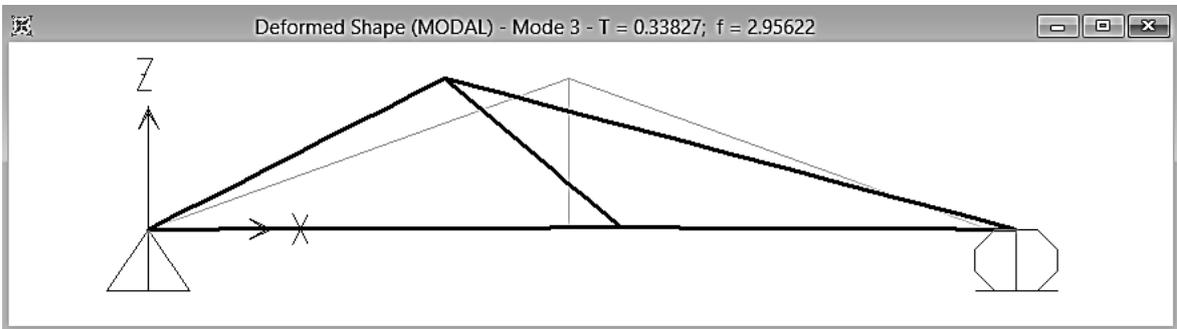
Sistemin SAP2000'de analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve periyotlar elde edilen modlara ait mod şekilleri Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'de gösterildi.



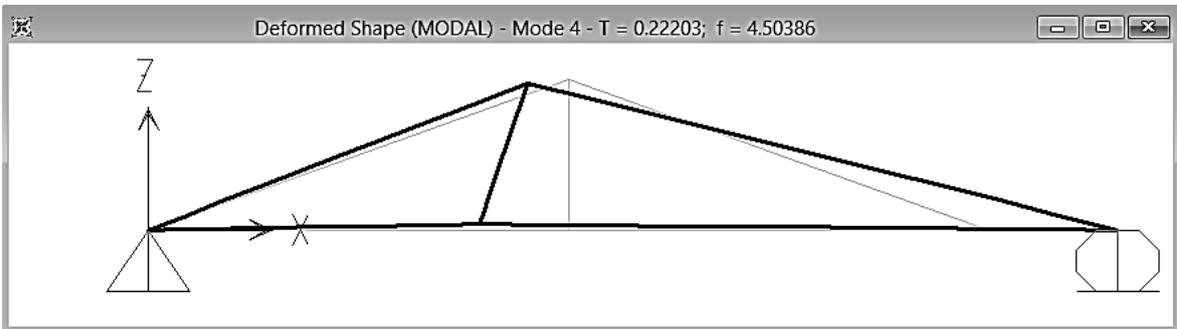
Şekil 5.26. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli



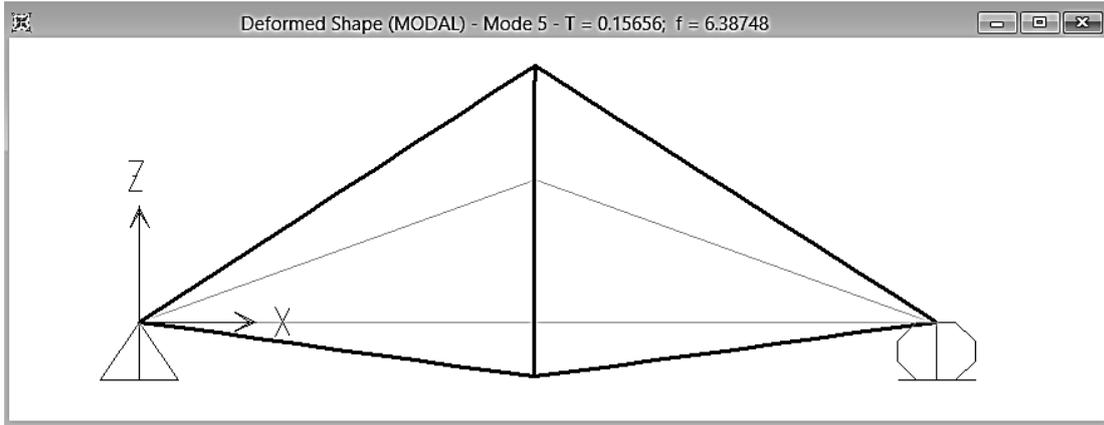
Şekil 5.27. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli



Şekil 5.28. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli



Şekil 5.29. SAP2000'de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 4. mod şekli



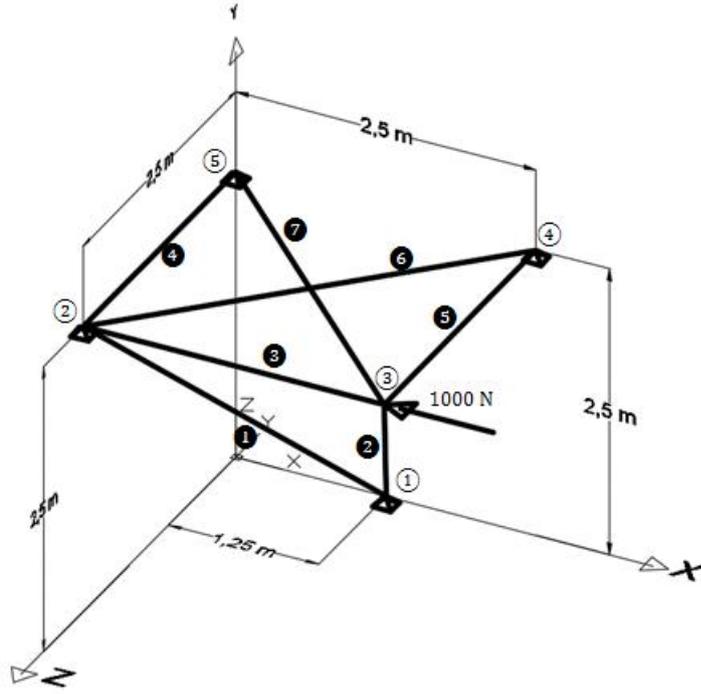
Şekil 5.30. SAP2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 5. mod şekli

5.4. UKS-1 Örnek Çözüm (El ve SAP2000) Uygulaması

Şekil 5.31’de x-y-z koordinat sisteminde gösterilmiş olan UKS, 1000 N’luk sabit yük ile yüklendi (sistemin sönümü ihmal edildi). Çizelge 5.45’te özellikleri verilen bu UKS’nin statik, dinamik ve x ve z yönündeki deprem yükleri etkisi altındaki analizi takip eden işlemler sonucunda elde edildi (G: birim boydaki kütle; $GL/2$: elemanlara ait çubuk uçlarındaki topak kütle).

Çizelge 5.45. UKS-1 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri

ELEMAN NO	G (kg/m)	E (N/m ²)	A (m ²)	EA/L	GL/2
1	0,10000	3,00E+07	0,01	8,00E+04	0,188
2	0,10000	3,00E+07	0,01	8,00E+04	0,188
3	0,10000	3,00E+07	0,01	1,20E+05	0,125
4	0,10000	3,00E+07	0,01	1,20E+05	0,125
5	0,10000	3,00E+07	0,01	1,20E+05	0,125
6	0,10000	3,00E+07	0,01	8,49E+04	0,177
7	0,10000	3,00E+07	0,01	8,49E+04	0,177



Şekil 5.31. UKS-1 örneğine ait uzay kafes sistem

5.4.1. Statik analiz

5.4.1.1. 1000 N'luk yük için statik analiz

Eleman ağırlıkları ihmal edilip sistem sadece 1000 N'luk yük etkisinde analiz edildi. Elle bulunan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.1, Ek Açıklama-C.2 ve Ek Açıklama-C.3'te verildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.46, Çizelge 5.47 ve Çizelge 5.48'de verildi.

Çizelge 5.46. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Joint Displacements ▾

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	3	DEAD	LinStatic	-0.006607	0.001578	0.001726	0	0	0
	4	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	5	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0

Record: ◀◀ 1 ▶▶ of 5 Add Tables... Done

Çizelge 5.47. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Element Forces - Frames ▾

	Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m
▶	1	0	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	1	1.875	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	1	3.75	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	2	0	DEAD	LinStatic	-1.735E-14	0	0	0	0
	2	1.875	DEAD	LinStatic	-1.735E-14	0	0	0	0
	2	3.75	DEAD	LinStatic	-1.735E-14	0	0	0	0
	3	0	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	0.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	1	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	1.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	2	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	2.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	4	0	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	4	1.25	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	4	2.5	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	5	0	DEAD	LinStatic	207.11	0	0	0	0
	5	1.25	DEAD	LinStatic	207.11	0	0	0	0
	5	2.5	DEAD	LinStatic	207.11	0	0	0	0
	6	0	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	6	1.76777	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	6	3.53553	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	7	0	DEAD	LinStatic	-292.89	0	0	0	0
	7	1.76777	DEAD	LinStatic	-292.89	0	0	0	0
	7	3.53553	DEAD	LinStatic	-292.89	0	0	0	0

Record: ◀◀ | ▶▶ of 24 Add Tables... Done

Çizelge 5.48. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
1	DEAD	LinStatic	3.553E-15	7.105E-15	7.105E-15	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	792.89	0	0	0	0	0
4	DEAD	LinStatic	0	0	-207.11	0	0	0
5	DEAD	LinStatic	207.11	0	207.11	0	0	0

Record: 1 of 4

Elle bulunan analiz sonuçlarının SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.49, Çizelge 5.50 ve Çizelge 5.51'de yapıldı.

Çizelge 5.49. 1000 N'luk yükleme için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (m)		U2 (m)		U3 (m)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	-0,0066	-0,0066	0,0016	0,0016	0,0017	0,0017
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Çizelge 5.50. 1000 N'luk yükleme için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F2 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	792,89	792,89	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	-207,11	-207,11
5	207,11	207,11	0,00	0,00	207,11	207,11

Çizelge 5.51. 1000 N'luk yükleme için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	2	0,00	0,00
	1	0,00	0,00
2	3	0,00	0,00
	1	0,00	0,00
3	2	-792,89	792,89
	3	-792,89	-792,89
4	2	0,00	0,00
	5	0,00	0,00
5	3	207,11	-207,11
	4	207,11	207,11
6	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
7	5	-292,89	-292,89
	3	-292,89	292,89

5.4.1.2. Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz

Çizelge 5.52'de yükleme şekli gösterilen zati (F_{zati}) yüklerin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.4'te verildi.

Çizelge 5.52. Zati yükleme (F_{zati})

Joint Loads - Force									
File	View	Format-Filter-Sort	Select	Options					
Units: As Noted					Joint Loads - Force				
	Joint Text	LoadPat Text	CoordSys Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
▶	1	ZATI	GLOBAL	0	-3.68	0	0	0	0
	2	ZATI	GLOBAL	0	-6.03	0	0	0	0
	3	ZATI	GLOBAL	0	-6.03	0	0	0	0
	4	ZATI	GLOBAL	0	-2.96	0	0	0	0
	5	ZATI	GLOBAL	0	-2.96	0	0	0	0

Record: of 5 Add Tables... Done

F_{zati} yüklemesi sonucunda oluşan iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin elle çözümünde gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.4'te verildi. SAP2000 programı ile

analizi sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.53, Çizelge 5.54 ve Çizelge 5.55'te verildi.

Çizelge 5.53. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0	0
3	ZATI	LinStatic	0.000009508	-0.000209	0.000035	0	0	0
4	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0	0
5	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0	0

Record: 1 of 5

Çizelge 5.54. F_{zati} yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m
1	0	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
1	1.875	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
1	3.75	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
2	0	ZATI	LinStatic	-9.04	0	0	0	0
2	1.875	ZATI	LinStatic	-9.04	0	0	0	0
2	3.75	ZATI	LinStatic	-9.04	0	0	0	0
3	0	ZATI	LinStatic	1.14	0	0	0	0
3	0.5	ZATI	LinStatic	1.14	0	0	0	0
3	1	ZATI	LinStatic	1.14	0	0	0	0
3	1.5	ZATI	LinStatic	1.14	0	0	0	0
3	2	ZATI	LinStatic	1.14	0	0	0	0
3	2.5	ZATI	LinStatic	1.14	0	0	0	0
4	0	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
4	1.25	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
4	2.5	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
5	0	ZATI	LinStatic	4.15	0	0	0	0
5	1.25	ZATI	LinStatic	4.15	0	0	0	0
5	2.5	ZATI	LinStatic	4.15	0	0	0	0
6	0	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
6	1.76777	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
6	3.53553	ZATI	LinStatic	0	0	0	0	0
7	0	ZATI	LinStatic	2.65	0	0	0	0
7	1.76777	ZATI	LinStatic	2.65	0	0	0	0
7	3.53553	ZATI	LinStatic	2.65	0	0	0	0

Record: 1 of 24

Çizelge 5.58. F_{zati} yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

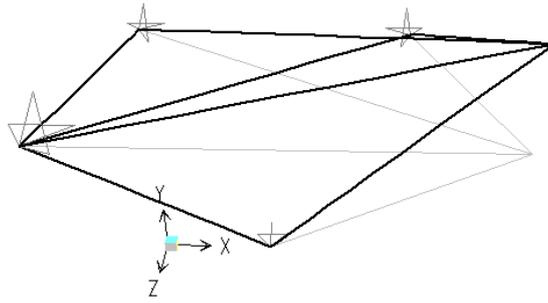
Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	2	0,00	0,00
	1	0,00	0,00
2	3	-9,04	9,04
	1	-9,04	-9,04
3	2	1,14	-1,14
	3	1,14	1,14
4	2	0,00	0,00
	5	0,00	0,00
5	3	4,15	-4,15
	4	4,15	4,15
6	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
7	5	2,65	2,65
	3	2,65	-2,65

5.4.2. Dinamik analiz

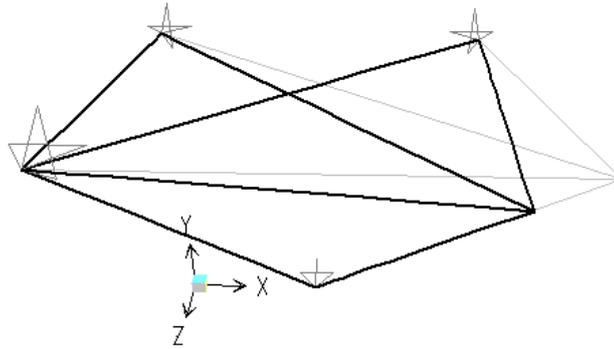
Sistemin elle bulunan doğal frekans ve periyotlarının elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.5'te verildi. Elle bulunan doğal frekans ve periyot sonuçları ile SAP2000'de analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve periyotların karşılaştırması Çizelge 5.59'da ve SAP2000'den elde edilen modlara ait mod şekilleri Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te verildi.

Çizelge 5.59. Özdeğerlerin, doğal frekansların ve periyotların; SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

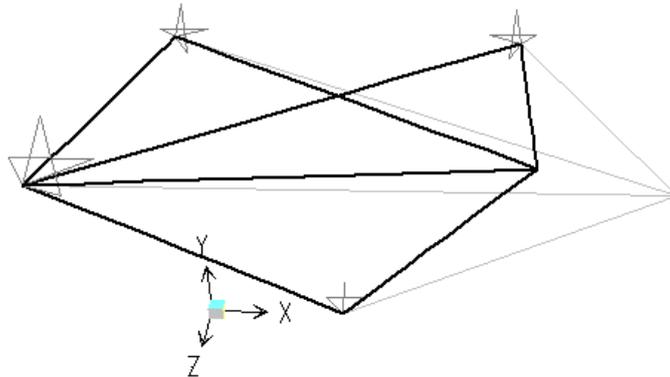
Mod (i)	$\omega_i^2 \times (1,0E+05)$		$\omega_i (s^{-1})$		$T_i (s)$	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,4542	0,4548	33,9199	33,9423	0,0295	0,0295
2	2,0135	2,0114	71,4168	71,3791	0,0140	0,0140
3	4,1230	4,1233	102,1938	102,1985	0,0098	0,0098



Şekil 5.32. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli



Şekil 5.33. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli



Şekil 5.34. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli

5.4.3. Mod Birleştirme Yöntemi ile analiz

DBYBHY 2007’de, 3. deprem bölgesinde; bina önem katsayısı, $I=1,2$; Z2 zemin sınıfında $T_A=0,15$ s ve $T_B=0,40$ s; etkin yer ivmesi, $A_0=0,20$; taşıyıcı sistem katsayısı, DBYBHY 2007 Tablo 2.5’te (3.1) için $R=5$ değerlerine sahip olan UKS’nin deprem etkileri takip eden işlemlerdeki gibidir.

5.4.3.1. X yönündeki deprem kuvvetleri

2. ve 3. mod etkileri DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre yeterlidir ve elle çözüm için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.6'da verilmiştir.

2. moda ait x yönündeki deprem yüklerinin ($F_{(x)deprem2}$) elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.6'da verildi ve Çizelge 5.60'ta yükleme şekli gösterildi. 2. mod için zati yükler (Bkz. Çizelge 5.52) ve x yönündeki deprem yüklerinin birleşiminden oluşan yükleme ($F_{(x)analiz2}=F_{zati}+F_{(x)deprem2}$) etkisinde SAP2000 programı ile analizi aşağıdaki gibidir. SAP2000 programı ile analizi sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.61, Çizelge 5.62 ve Çizelge 5.63'te verildi.

Çizelge 5.60. 2. mod için x yönünde deprem kuvvetleri ($F_{(x)deprem2}$)

Joint Loads - Force

Joint Text	LoadPat Text	CoordSys Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
3	EQX_mod2	GLOBAL	0.57	0	0	0	0	0

Record: 1 of 1

Çizelge 5.61. 2. mod için $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi sonucunda SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0	0
2	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0	0
3	Zati_EQX_mod2	Combination	0.000013	-0.00021	0.000034	0	0	0
4	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0	0
5	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0	0

Record: 1 of 5

Çizelge 5.62. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

File View Format-Filter-Sort Select Options
Units: As Noted Element Forces - Frames

	Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m
▶	1	0	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	1	1.875	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	1	3.75	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	2	0	Zati_EQX_mod2	Combination	-9.04	0	0	0	0
	2	1.875	Zati_EQX_mod2	Combination	-9.04	0	0	0	0
	2	3.75	Zati_EQX_mod2	Combination	-9.04	0	0	0	0
	3	0	Zati_EQX_mod2	Combination	1.59	0	0	0	0
	3	0.5	Zati_EQX_mod2	Combination	1.59	0	0	0	0
	3	1	Zati_EQX_mod2	Combination	1.59	0	0	0	0
	3	1.5	Zati_EQX_mod2	Combination	1.59	0	0	0	0
	3	2	Zati_EQX_mod2	Combination	1.59	0	0	0	0
	3	2.5	Zati_EQX_mod2	Combination	1.59	0	0	0	0
	4	0	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	4	1.25	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	4	2.5	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	5	0	Zati_EQX_mod2	Combination	4.04	0	0	0	0
	5	1.25	Zati_EQX_mod2	Combination	4.04	0	0	0	0
	5	2.5	Zati_EQX_mod2	Combination	4.04	0	0	0	0
	6	0	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	6	1.76777	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	6	3.53553	Zati_EQX_mod2	Combination	0	0	0	0	0
	7	0	Zati_EQX_mod2	Combination	2.81	0	0	0	0
	7	1.76777	Zati_EQX_mod2	Combination	2.81	0	0	0	0
	7	3.53553	Zati_EQX_mod2	Combination	2.81	0	0	0	0

Record: ◀◀ ▶▶ of 24 Add Tables... Done

Çizelge 5.63. 2. mod için $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi sonucunda SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options
Units: As Noted Joint Reactions

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
▶	1	Zati_EQX_mod2	Combination	3.01	9.7	6.03	0	0	0
	2	Zati_EQX_mod2	Combination	-1.59	6.03	0	0	0	0
	4	Zati_EQX_mod2	Combination	0	2.96	-4.04	0	0	0
	5	Zati_EQX_mod2	Combination	-1.99	2.96	-1.99	0	0	0

Record: ◀◀ ▶▶ of 4 Add Tables... Done

Elle bulunan analiz sonuçlarının SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.64, Çizelge 5.65 ve Çizelge 5.66’da yapıldı.

Çizelge 5.64. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F2 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	3,01	3,01	9,70	9,70	6,03	6,03
2	-1,59	-1,59	6,03	6,03	0,00	0,00
4	0,00	0,00	2,96	2,96	-4,04	-4,04
5	-1,99	-1,99	2,96	2,96	-1,99	-1,99

Çizelge 5.65. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (m)		U2 (m)		U3 (m)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0002	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Çizelge 5.66. $F_{(x)analiz2}$ yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	2	0,00	0,00
	1	0,00	0,00
2	3	-9,04	9,04
	1	-9,04	-9,04
3	2	1,59	-1,59
	3	1,59	1,59
4	2	0,00	0,00
	5	0,00	0,00
5	3	4,04	-4,04
	4	4,04	4,04
6	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
7	5	2,81	2,81
	3	2,81	-2,81

3. moda ait x yönündeki deprem yüklerinin ($F_{(x)analiz3}$) elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.6'da verildi ve Çizelge 5.67'de yükleme şekli gösterildi. 3. mod için zati yükler (Bkz. Çizelge 5.52) ve x yönündeki deprem yüklerinin birleşiminden oluşan yükleme ($F_{(x)analiz3}=F_{zati}+F_{(x)deprem3}$) etkisinde SAP2000 programı ile analizi aşağıdaki gibidir. SAP2000 programı ile analizi sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.68, Çizelge 5.69 ve Çizelge 5.70'te verildi.

Çizelge 5.67. 3. mod için, x yönünde deprem kuvvetleri ($F_{(x)deprem3}$)

Joint Loads - Force

Joint Text	LoadPat Text	CoordSys Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
3	EQX_mod3	GLOBAL	0.34	0	0	0	0	0

Record: 1 of 1

Çizelge 5.68. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m
1	0	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
1	1.875	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
1	3.75	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
2	0	Zati_EQX_mod	Combination	-9.04	0	0	0	0
2	1.875	Zati_EQX_mod	Combination	-9.04	0	0	0	0
2	3.75	Zati_EQX_mod	Combination	-9.04	0	0	0	0
3	0	Zati_EQX_mod	Combination	1.41	0	0	0	0
3	0.5	Zati_EQX_mod	Combination	1.41	0	0	0	0
3	1	Zati_EQX_mod	Combination	1.41	0	0	0	0
3	1.5	Zati_EQX_mod	Combination	1.41	0	0	0	0
3	2	Zati_EQX_mod	Combination	1.41	0	0	0	0
3	2.5	Zati_EQX_mod	Combination	1.41	0	0	0	0
4	0	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
4	1.25	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
4	2.5	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
5	0	Zati_EQX_mod	Combination	4.08	0	0	0	0
5	1.25	Zati_EQX_mod	Combination	4.08	0	0	0	0
5	2.5	Zati_EQX_mod	Combination	4.08	0	0	0	0
6	0	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
6	1.76777	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
6	3.53553	Zati_EQX_mod	Combination	0	0	0	0	0
7	0	Zati_EQX_mod	Combination	2.75	0	0	0	0
7	1.76777	Zati_EQX_mod	Combination	2.75	0	0	0	0
7	3.53553	Zati_EQX_mod	Combination	2.75	0	0	0	0

Record: 1 of 24

Çizelge 5.69. 3. mod için $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi sonucunda mesnet tepkileri

Joint Reactions									
File View Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted									
Joint Reactions									
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m	
▶ 1	Zati_EQX_mod3	Combination	3,01	9,7	6,03	0	0	0	
2	Zati_EQX_mod3	Combination	-1,41	6,03	0	0	0	0	
4	Zati_EQX_mod3	Combination	0	2,96	-4,08	0	0	0	
5	Zati_EQX_mod3	Combination	-1,94	2,96	-1,94	0	0	0	

Record: of 4 Add Tables... Done

Çizelge 5.70. 3. mod için $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi sonucunda düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements									
File View Format-Filter-Sort Select Options									
Units: As Noted									
Joint Displacements									
Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians	
▶ 1	Zati_EQX_mod3	Combination	0	0	0	0	0	0	
2	Zati_EQX_mod3	Combination	0	0	0	0	0	0	
3	Zati_EQX_mod3	Combination	0,000012	-0,000209	0,000034	0	0	0	
4	Zati_EQX_mod3	Combination	0	0	0	0	0	0	
5	Zati_EQX_mod3	Combination	0	0	0	0	0	0	

Record: of 5 Add Tables... Done

Elle bulunan analiz sonuçlarının SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.71, Çizelge 5.72 ve Çizelge 5.73'te yapıldı.

Çizelge 5.71. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F2 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	3,01	3,01	9,70	9,70	6,03	6,03
2	-1,41	-1,41	6,03	6,03	0,00	0,00
4	0,00	0,00	2,96	2,96	-4,08	-4,08
5	-1,94	-1,94	2,96	2,96	-1,94	-1,94

Çizelge 5.72. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	2	0,00	0,00
	1	0,00	0,00
2	3	-9,04	9,04
	1	-9,04	-9,04
3	2	1,41	-1,41
	3	1,41	1,41
4	2	0,00	0,00
	5	0,00	0,00
5	3	4,08	-4,08
	4	4,08	4,08
6	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
7	5	2,75	2,75
	3	2,75	-2,75

Çizelge 5.73. $F_{(x)analiz3}$ yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (m)		U2 (m)		U3 (m)	
	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elle Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0002	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

$T_3/T_2 < 0,80$ koşulu sağlandığı için 2. ve 3. moda ait; mesnet tepkileri (Bkz. Çizelge 5.63 ve Bkz. Çizelge 5.69), taban kesme kuvveti, yer değiştirme (Bkz. Çizelge 5.61 ve Bkz. Çizelge 5.70) ve eksenel iç kuvvet (Bkz. Çizelge 5.62 ve Bkz. Çizelge 5.68) değerlerinin maksimum değerli olanları, SRSS yöntemi uygulanarak modal etkiler birleştirildi. j mod numarası ve ara işlemleri Ek Açıklama-C.6'da olmak üzere taban kesme kuvveti V_{jx} için SRSS ile elde edilen değer aşağıdaki gibidir.

$$V_{X(SRSS)} = \sqrt{V_{2x}^2 + V_{3x}^2} = 0,6618 \text{ N}$$

U1, U2 ve U3 sırasıyla x, y, ve z yönündeki yer değiştirmeler ve F1, F2 ve F3 sırasıyla x, y, ve z yönündeki mesnet tepkileri olmak üzere SRSS yöntemiyle birleştirilmesi ile Çizelge 5.74'teki değerler elde edildi. Modal etkilerin oluşturduğu eksenel iç kuvvetlerin bu kural ile birleştirilmesinden Çizelge 5.75'teki değerler elde edildi.

Çizelge 5.74. 2. ve 3. Modlara ait yer değiştirme ve mesnet tepkilerinin SRSS yöntemiyle birleştirilmesi

		Düğüm Noktaları					
		1	2	3	4	5	
Yer Değiştirmeler (m)	2. Mod	U1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		U2	0,0000	0,0000	-0,0002	0,0000	0,0000
		U3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3. Mod	U1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		U2	0,0000	0,0000	-0,0002	0,0000	0,0000
		U3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mesnet Tepkileri (N)	2. Mod	F1	3,010	-1,590	-	0,000	-1,990
		F2	9,700	6,030	-	2,960	2,960
		F3	6,030	0,000	-	-4,040	-1,990
	3. Mod	F1	3,010	-1,410	-	0,000	-1,940
		F2	9,700	6,030	-	2,960	2,960
		F3	6,030	0,000	-	-4,080	-1,940
SRSS ile Birleştirilmiş Değerler		U1	0,000000	0,000000	0,000023	0,000000	0,000000
		U2	0,000000	0,000000	0,000283	0,000000	0,000000
		U3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
		F1	3,01	1,59	-	0,00	1,99
		F2	9,70	6,03	-	2,96	2,96
		F3	6,03	0,00	-	4,04	1,99

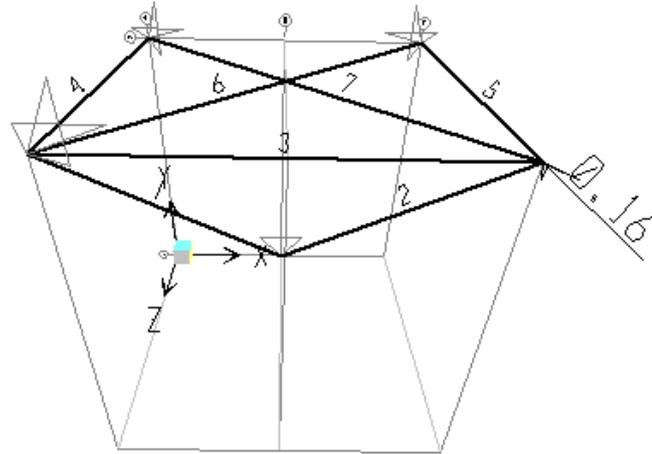
Çizelge 5.75. SRSS ile birleştirilmiş eksenel kuvvet değerleri

Eleman No	Düğüm No	Eksenel Kuvvetler (N)		SRSS ile Birleştirilmiş Değerler
		2. Mod	3. Mod	
1	2	0,00	0,00	0,00
	1	0,00	0,00	0,00
2	3	-9,04	-9,04	12,78
	1	-9,04	-9,04	12,78
3	2	1,59	1,41	2,13
	3	1,59	1,41	2,13
4	2	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00
5	3	4,04	4,08	5,74
	4	4,04	4,08	5,74
6	2	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00
7	5	2,81	2,75	3,93
	3	2,81	2,75	3,93

5.4.3.2. Z yönündeki deprem kuvvetleri

1. mod etkileri DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre yeterlidir ve elle çözüm için gereken ara işlemler Ek Açıklama-C.6'da verildi.

1. moda ait z yönündeki deprem yüklerinin ($F_{(z)deprem1}$) elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklamalar-C.6'da verildi ve Şekil 5.35'te yükleme şekli gösterildi. 3. mod için zati yükler (Bkz. Çizelge 5.52) ve z yönündeki deprem yüklerinin birleşiminden oluşan yükleme ($F_{(z)analiz1}=F_{zati}+F_{(z)deprem1}$) etkisinde SAP2000 programı ile analizi aşağıdaki gibidir. SAP2000 programı ile analizi sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.76, Çizelge 5.77 ve Çizelge 5.78'de verildi.



Şekil 5.35. 1. mod için, z yönünde deprem kuvvetleri ($F_{(z)\text{depreml}}$)

Çizelge 5.76. $F_{(z)\text{analiz1}}$ yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Joint Displacements

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
	2	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
	3	Zati_EQZ_mod1	Combination	0.000009784	-0.000208	0.000034	0	0	0
	4	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
	5	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0

Record: |<<<<>>>>| of 5 Add Tables... Done

Çizelge 5.77. $F_{(z)\text{analiz1}}$ yüklemesi için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının mesnet reaksiyonları

Joint Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Joint Reactions

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
▶	1	Zati_EQZ_mod1	Combination	3.01	9.7	6.03	0	0	0
	2	Zati_EQZ_mod1	Combination	-1.17	6.03	0	0	0	0
	4	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	2.96	-4.03	0	0	0
	5	Zati_EQZ_mod1	Combination	-1.84	2.96	-1.84	0	0	0

Record: |<<<<>>>>| of 4 Add Tables... Done

Çizelge 5.78. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m	M3 N-m
1	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
1	1.875	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
1	3.75	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
2	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	-9.04	0	0	0	0	0
2	1.875	Zati_EQZ_mod1	Combination	-9.04	0	0	0	0	0
2	3.75	Zati_EQZ_mod1	Combination	-9.04	0	0	0	0	0
3	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	1.17	0	0	0	0	0
3	0.5	Zati_EQZ_mod1	Combination	1.17	0	0	0	0	0
3	1	Zati_EQZ_mod1	Combination	1.17	0	0	0	0	0
3	1.5	Zati_EQZ_mod1	Combination	1.17	0	0	0	0	0
3	2	Zati_EQZ_mod1	Combination	1.17	0	0	0	0	0
3	2.5	Zati_EQZ_mod1	Combination	1.17	0	0	0	0	0
4	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
4	1.25	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
4	2.5	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
5	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	4.03	0	0	0	0	0
5	1.25	Zati_EQZ_mod1	Combination	4.03	0	0	0	0	0
5	2.5	Zati_EQZ_mod1	Combination	4.03	0	0	0	0	0
6	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
6	1.76777	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
6	3.53553	Zati_EQZ_mod1	Combination	0	0	0	0	0	0
7	0	Zati_EQZ_mod1	Combination	2.6	0	0	0	0	0
7	1.76777	Zati_EQZ_mod1	Combination	2.6	0	0	0	0	0
7	3.53553	Zati_EQZ_mod1	Combination	2.6	0	0	0	0	0

Record: of 24 Add Tables... Done

Elle bulunan analiz sonuçlarının SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Çizelge 5.79, Çizelge 5.80 ve Çizelge 5.81’de yapıldı.

Çizelge 5.79. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için x yönündeki F1, y yönündeki F2 ve z yönündeki F3 olmak üzere mesnet tepkilerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	F1 (N)		F2 (N)		F3 (N)	
	SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu
1	3,01	3,01	9,70	9,70	6,03	6,03
2	-1,17	-1,17	6,03	6,03	0,00	0,00
4	0,00	0,00	2,96	2,96	-4,03	-4,03
5	-1,84	-1,84	2,96	2,96	-1,84	-1,84

Çizelge 5.80. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için x yönündeki U1, y yönündeki U2 ve z yönündeki U3 olmak üzere düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

Düğüm No	U1 (m)		U2 (m)		U3 (m)	
	SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu	SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0002	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Çizelge 5.81. $F_{(z)analiz1}$ yüklemesi için elemanlarda oluşan iç kuvvetlerin, SAP2000 ve elle çözüm sonuçlarının karşılaştırması

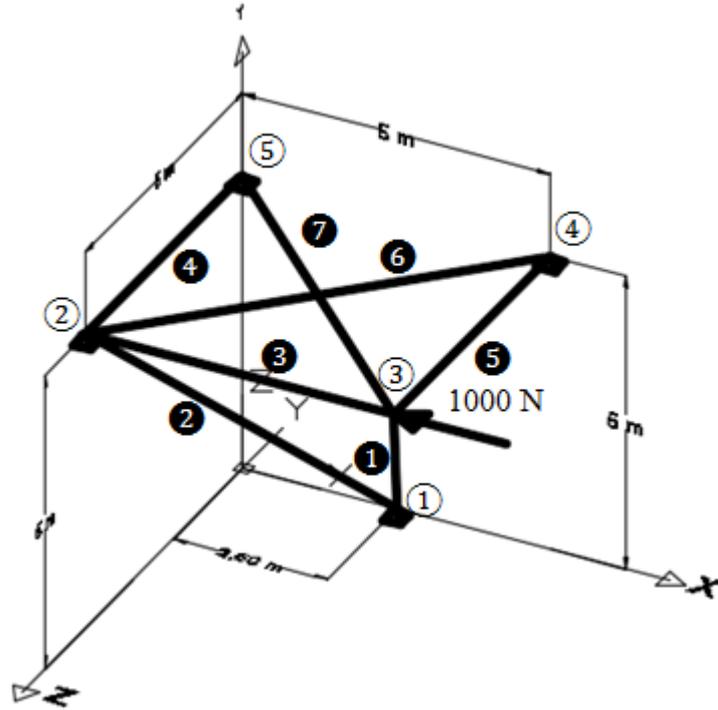
Eleman No	Düğüm No	P (N)	
		SAP2000 Sonucu	Elde Çözüm Sonucu
1	2	0,00	0,00
	1	0,00	0,00
2	3	-9,04	9,04
	1	-9,04	-9,04
3	2	1,17	-1,17
	3	1,17	1,17
4	2	0,00	0,00
	5	0,00	0,00
5	3	4,03	-4,03
	4	4,03	4,03
6	2	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
7	5	2,60	2,60
	3	2,60	-2,60

5.5. UKS-2 Örnek SAP2000 Uygulaması

Şekil 5.36'da x-y-z koordinat sisteminde gösterilmiş olan UKS, 1000 N'luk sabit yük ile yüklendi (sistemin sönümü ihmal edildi). Çizelge 5.82'de özellikleri verilen bu UKS'nin statik, dinamik ve x ve z yönündeki deprem yükleri etkisi altındaki analizi takip eden işlemler sonucunda elde edildi (G: birim boydaki kütle; GL/2: elemanlara ait çubuk uçlarındaki topak kütle).

Çizelge 5.82. UKS-2 örneğine ait malzeme ve kesit özellikleri

ELEMAN NO	G (kg/m)	E (N/m ²)	A (m ²)	EA/L	GL/2
1	0,10000	3,00E+07	0,01	4,00E+04	0,375
2	0,10000	3,00E+07	0,01	4,00E+04	0,375
3	0,10000	3,00E+07	0,01	6,00E+04	0,250
4	0,10000	3,00E+07	0,01	6,00E+04	0,250
5	0,10000	3,00E+07	0,01	6,00E+04	0,250
6	0,10000	3,00E+07	0,01	4,24E+04	0,354
7	0,10000	3,00E+07	0,01	4,24E+04	0,354



Şekil 5.36. UKS-2 örneğine ait uzay kafes sistem

5.5.1. Statik analiz

5.5.1.1. 1000 N'luk yük için statik analiz

Eleman ağırlıkları ihmal edilip sistem sadece 1000 N'luk yük etkisinde analiz edildi. SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.83, Çizelge 5.84 ve Çizelge 5.85'te gösterildi.

Çizelge 5.83. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

File View Format-Filter-Sort Select Options
Units: As Noted Element Forces - Frames

	Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m
▶	1	0	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	1	3.75	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	1	7.5	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	2	0	DEAD	LinStatic	-1.735E-14	0	0	0	0
	2	3.75	DEAD	LinStatic	-1.735E-14	0	0	0	0
	2	7.5	DEAD	LinStatic	-1.735E-14	0	0	0	0
	3	0	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	0.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	1	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	1.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	2	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	2.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	3	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	3.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	4	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	4.5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	3	5	DEAD	LinStatic	-792.89	0	0	0	0
	4	0	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	4	2.5	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	4	5	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	5	0	DEAD	LinStatic	207.11	0	0	0	0
	5	2.5	DEAD	LinStatic	207.11	0	0	0	0
	5	5	DEAD	LinStatic	207.11	0	0	0	0
	6	0	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	6	3.53553	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	6	7.07107	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0
	7	0	DEAD	LinStatic	-292.89	0	0	0	0
	7	3.53553	DEAD	LinStatic	-292.89	0	0	0	0
	7	7.07107	DEAD	LinStatic	-292.89	0	0	0	0

Record: |<<| |>>| of 29 Add Tables... Done

Çizelge 5.84. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options
Units: As Noted Joint Reactions

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
▶	1	DEAD	LinStatic	3.553E-15	7.105E-15	7.105E-15	0	0	0
	2	DEAD	LinStatic	792.89	0	0	0	0	0
	4	DEAD	LinStatic	0	0	-207.11	0	0	0
	5	DEAD	LinStatic	207.11	0	207.11	0	0	0

Record: |<<| |>>| of 4 Add Tables... Done

Çizelge 5.85. 1000 N'luk yükleme için SAP2000'de analiz sonucu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	-0.013215	0.003156	0.003452	0	0	0
4	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
5	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0

Record: 1 of 5

5.5.1.2. Zati yükler (F_{zati}) için statik analiz

Çizelge 5.86'da yükleme şekli gösterilen zati (F_{zati}) yüklerin elde edilmesi için gereken işlemler aşağıdaki gibidir.

1 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,375 + 0,375) = 7,36$ N

2 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,375 + 0,250 + 0,250 + 0,354) = 12,05$ N

3 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,375 + 0,250 + 0,250 + 0,354) = 12,05$ N

4 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,250 + 0,354) = 5,92$ N

5 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,250 + 0,354) = 5,92$ N

Çizelge 5.86. Zati yükleme (F_{zati})

Joint Loads - Force

Joint Text	LoadPat Text	CoordSys Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
1	Zati	GLOBAL	0	-7.36	0	0	0	0
2	Zati	GLOBAL	0	-12.05	0	0	0	0
3	Zati	GLOBAL	0	-12.05	0	0	0	0
5	Zati	GLOBAL	0	-5.92	0	0	0	0
4	Zati	GLOBAL	0	-5.92	0	0	0	0

Record: 1 of 5

SAP2000 programı ile analiz sonucunda elde edilen iç kuvvet, yer değiştirme ve mesnet tepkileri Çizelge 5.87, Çizelge 5.88 ve Çizelge 5.89'da gösterildi.

Çizelge 5.87. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen eleman iç kuvvetleri

Element Forces - Frames

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Element Forces - Frames

	Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P N	V2 N	V3 N	T N-m	M2 N-m	M3 N-m
▶	1	0	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	1	3.75	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	1	7.5	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	0	Zati	LinStatic	-18.08	0	0	0	0	0
	2	3.75	Zati	LinStatic	-18.08	0	0	0	0	0
	2	7.5	Zati	LinStatic	-18.08	0	0	0	0	0
	3	0	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	0.5	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	1	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	1.5	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	2	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	2.5	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	3	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	3.5	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	4	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	4.5	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	3	5	Zati	LinStatic	2.28	0	0	0	0	0
	4	0	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	4	2.5	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	4	5	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	5	0	Zati	LinStatic	8.31	0	0	0	0	0
	5	2.5	Zati	LinStatic	8.31	0	0	0	0	0
	5	5	Zati	LinStatic	8.31	0	0	0	0	0
	6	0	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	6	3.53553	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	6	7.07107	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	7	0	Zati	LinStatic	5.29	0	0	0	0	0
	7	3.53553	Zati	LinStatic	5.29	0	0	0	0	0
	7	7.07107	Zati	LinStatic	5.29	0	0	0	0	0

Record: Add Tables... Done

Çizelge 5.88. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen düğüm noktalarının yer değiştirmeleri

Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Joint Displacements

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	2	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	3	Zati	LinStatic	0.000038	-0.000835	0.000138	0	0	0
	4	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0
	5	Zati	LinStatic	0	0	0	0	0	0

Record: Add Tables... Done

Çizelge 5.89. F_{zati} yüklemesi için SAP2000’de analiz sonucu elde edilen mesnet tepkileri

Joint Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options

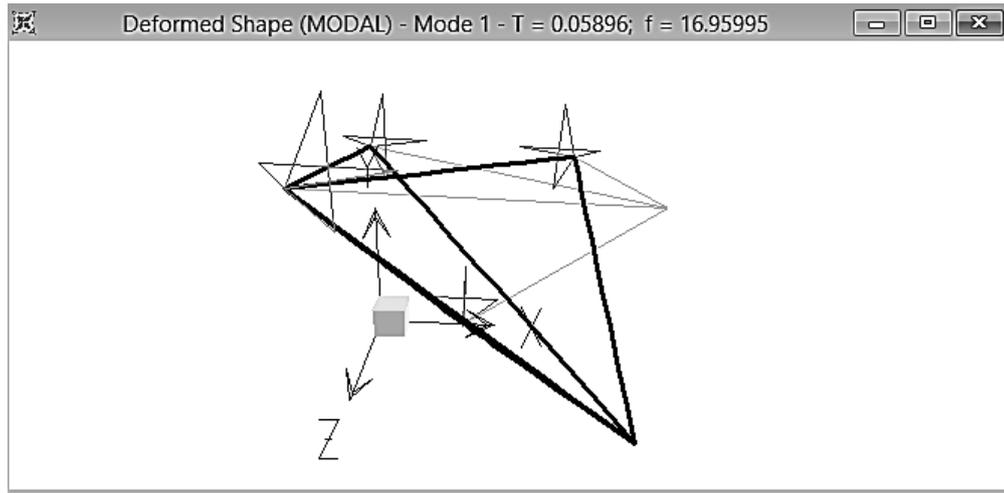
Units: As Noted Joint Reactions

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	F1 N	F2 N	F3 N	M1 N-m	M2 N-m	M3 N-m
▶	1	Zati	LinStatic	6.03	19.41	12.05	0	0	0
	2	Zati	LinStatic	-2.28	12.05	0	0	0	0
	4	Zati	LinStatic	0	5.92	-8.31	0	0	0
	5	Zati	LinStatic	-3.74	5.92	-3.74	0	0	0

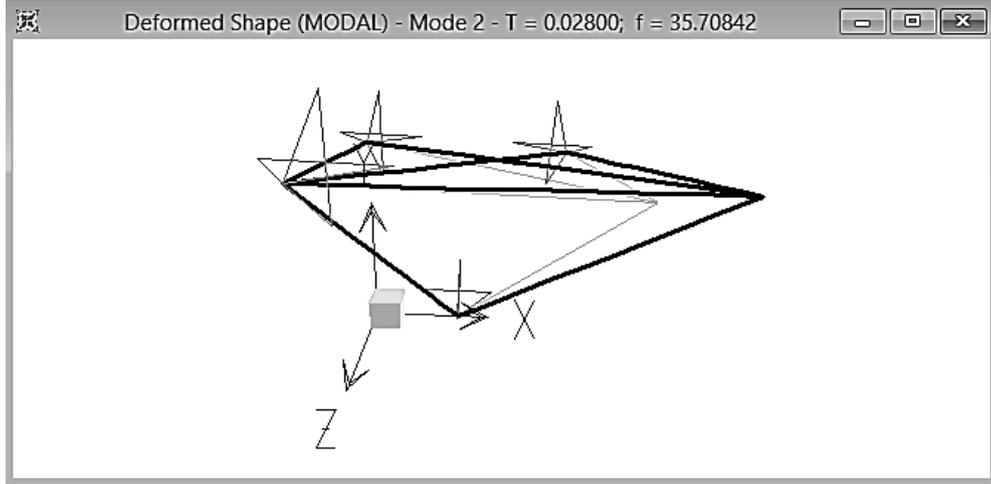
Record: ⏪ ⏩ of 4 Add Tables... Done

5.5.2. Dinamik analiz

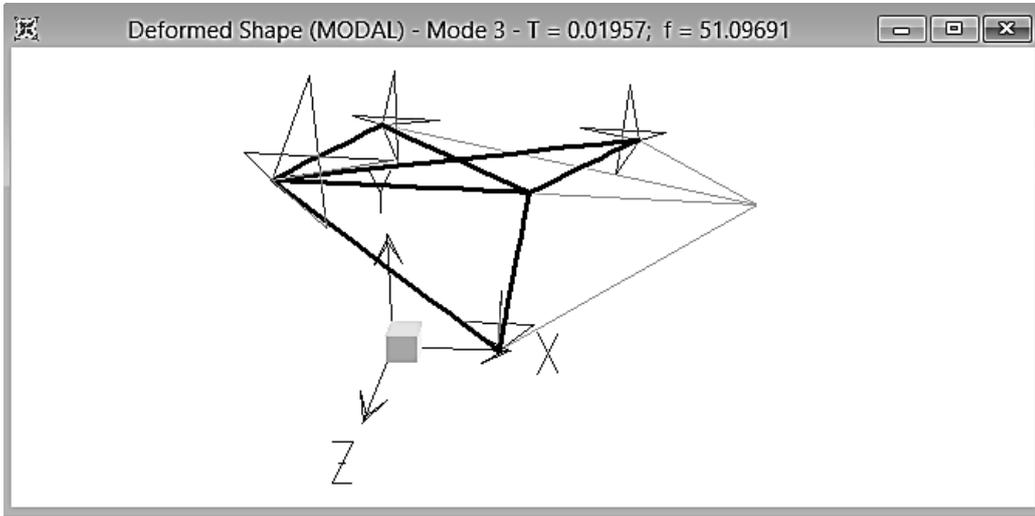
Sistemin SAP2000’de analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve periyotlar elde edilen modlara ait mod şekilleri Şekil 5.37, Şekil 5.38 ve Şekil 5.39’da gösterildi.



Şekil 5.37. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 1. mod şekli



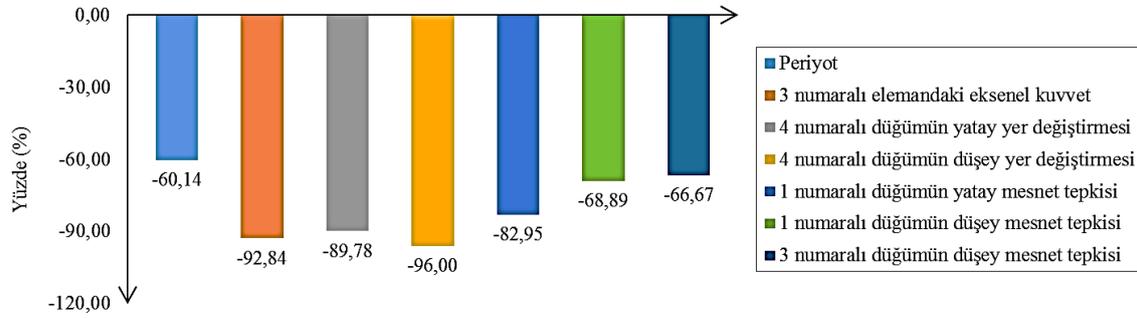
Şekil 5.38. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 2. mod şekli



Şekil 5.39. Sap2000’de analiz sonucu elde edilen sisteme ait 3. mod şekli

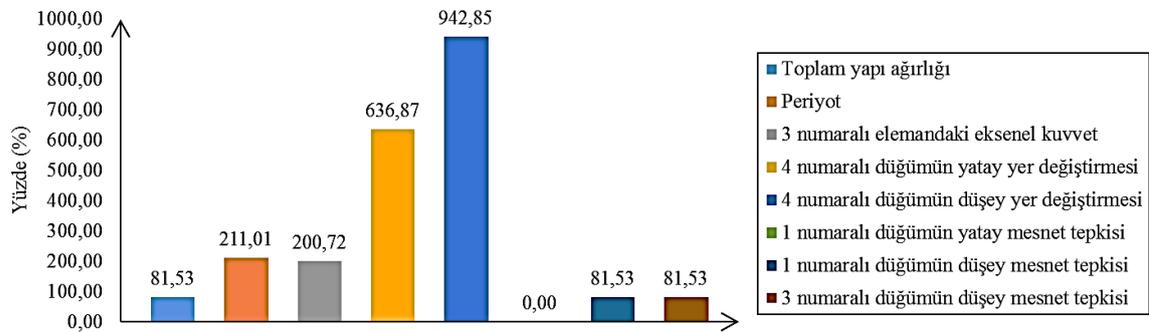
6. SONUÇ VE ÖNERİLER

DKS-1'in SRSS ile birleştirilmiş sonuçlarına ve DKS-2'nin $F_{analiz1}$ için analizinden elde edilen mutlak değerce sonuçlarına bakıldığında; önceki çalışmalarda belirtilen altyapı özelliklerine karşılık gelen mesnet koşullarının (hiperstatiklik derecesinin) ya da başka bir deyişle altyapı esneklik koşullarının değişmesiyle, kafes sistemin maruz kaldığı deprem etkilerinin de değiştiği görüldü. Farklı yükleme durumlarında ve farklı kafes sistemlere göre değişmekle birlikte, sistemin hiperstatiklik derecesi arttığında; Şekil 6.1'de karşılaştırılan değerler, belirtilen miktarlarda azalmıştır.

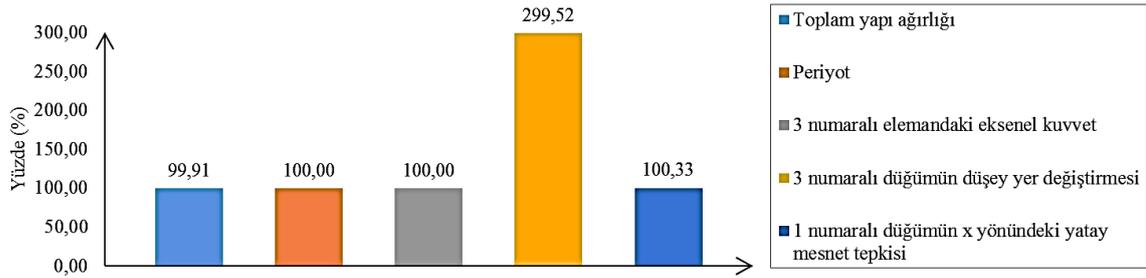


Şekil 6.1. DKS-1'in SRSS ile birleştirilmiş sonuçlarına göre DKS-2'nin $F_{analiz1}$ için analizinden elde edilen sonuçlarının mutlak değerce azalışı

Açıklığın artmasının etkilerini görmek amacıyla; DKS-1 ve DKS-3 örnekleri için Şekil 6.2'de karşılaştırılan değerler, belirtilen miktarlarda artmıştır. UKS-1 ve UKS-2 örnekleri için Şekil 6.3'te karşılaştırılan değerler, belirtilen miktarlarda artmıştır.



Şekil 6.2. DKS-1'e göre DKS-3'ün zati yükleme sonucu elde edilen değerlerinin artışı



Şekil 6.3. UKS-1'e göre UKS-2'nin zati yükleme sonucu elde edilen değerlerinin artışı

Yukarıdaki karşılaştırmalar ve önceki yapılan çalışmalar göstermiştir ki kafes sistemler projelendirilirken; yükleme ve mesnet koşulları, düğüm noktaları ve birleşim elemanları, kafes elemanların teşkili ve sistem geometrisi, çevre koşullarıyla uyumlu olacak şekilde seçilmelidir. Teşkil edilişlerinden dolayı, oluşması muhtemel ikincil gerilmelerden kaçınılmalı ve sadece aksenal yük taşıyacak ve yükler düğüm noktalarından etkiyecek biçimde sistem oluşturulmalıdır. İkincil gerilmelerin oluşması sistem elemanlarında hasara neden olabileceğinden, eğer sistemde yardımcı bir yük taşıma alternatifi yoksa diğer elemanlarda aşırı yüke neden olur ve sistem sürekliliği bozular. Sistem şekli ve açıklıkların optimum gereksinimleri karşılayacak özelliklerde seçilmesi, hem yapısal güvenlik hem de ekonomiklik bakımından avantaj sağlar. Şantiyedeki montaj koşulları, kaynak kalitesi, eleman ve mesnet bağlantılarının projesine uygun yapılması ve denetlenmesi, yapının servis ömrü ve dış yükler karşısındaki davranışında belirleyici rol oynamaktadır. Montaj hatalarını önlemek için kaynaklı imatlardan kaçınılmalı ve bunun yerine monte edilebilir birleşim sistemleri tercih edilmelidir. DKS'lerde yapma elemanlarda kesit geometrisi değişse bile elemanlar aynı eksenle montaj edilmelidir. UKS'lerde ise yapma elemanlardan ve elemanların homojenliklerini ve dolayısıyla sistem sürekliliğini bozacak imatlardan kaçınılmalıdır. Ayrıca yapma elemanların şantiyede kaynakla birleştirilmesi ek maliyete yol açar. Uygulamada çok sıklıkla kullanılan kafes sistemler üzerine yapılan çalışmaların ve standartlardaki açıklamaların yetersiz olduğu görülmüştür. Standartlarda çok kısıtlı bir şekilde ele alınması nedeniyle, kafes sistemlerin tasarım ve analizlerinde gerçekçi yaklaşımlarda bulunulamamaktadır. Çeşitli afetler sonrasında hizmet etmesi düşünülen yapılarda kullanılmasına rağmen, gereken önemin verilmemesi oldukça düşündürücü olmaktadır. Standartlarda ve ileride yapılacak olan çalışmalarda kafes sistemlere, betonarme yapılarda olduğu gibi daha detaylı kriterler sunulması ve konuyla ilgili daha çok çalışma yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anonim, 11.04.2017, Truss, <https://en.wikipedia.org/wiki/Truss>, erişim tarihi: 20.04.2017.
- Anonim, 2016, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), <http://www.deprem.gov.tr/belgeler2016/tbdy.pdf>, erişim tarihi: 10.05.2017
- Anonim, 26.11.2016, Space frame, https://en.wikipedia.org/wiki/Space_frame, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Anonim, 27.04.2017, London Bridge temporary works, <http://www.becro.co.uk/case-studies/london-bridge/>, erişim tarihi: 27.04.2017
- Anonim, 27.04.2017, Unibat system, http://www.setareh.arch.vt.edu/safas/010_system_05_unibat.html, erişim tarihi: 27.04.2017.
- Anonim, 29.12.2014, Referanslar, <http://www.uzaykafessistemleri.com/referanslar.html>, erişim tarihi: 27.04.2017.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Resmi gazete, Yayın no: 26454 ve 26511
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B., 2007, Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, <http://ankara.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/9077.pdf>, erişim tarihi: 08.05.2017.
- Chandrupatla, T. R., 2002, Belegundu, A. D., Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice Hall, p.375
- Chopra, A. K., 2007, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson Prentice Hall, p.372-373
- Doğan, M., Özbaşaran, H., Gönen, H., Ünlüoğlu, E., Karagöz, Ö., 2015, Betonarme Taşıyıcı Sistem – Çelik Kafes Çatı Etkileşimi: Deprem Davranışı, http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17726_10_28.pdf, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Hayes, B., 2013, Tetrahedra with a twist, <http://bit-player.org/2013/tetrahedra-with-a-twist>, erişim tarihi: 20.04.2017.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Korkmaz, A., Ay, Z., 2007, Çelik Uzay Çatı Sistemli Hal Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi, Journal of Yasar University, 2 , 8, 875-887, http://journal.yasar.edu.tr/wp-content/uploads/2012/05/no8_vol2_04_korkmaz_ay.pdf, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Moghaddam, H. A., 2004, Seismic Behaviour Of Space Structures, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_523.pdf, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Odabaşı, Y., 2000, Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım A.Ş., s.336-340
- Özgür, Z., 2005, Prefabrike Çelik Uzay Kafes Çatı Sistemli Büyük Açıklıklı Yapıların Sismik Performansı, https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=-L8ilcwn9ZRRc_YMKxXW1mPdSDoY1ARSa-N8m7sdE0T-jRUxhQIT18x4hCyj0rH3, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Polat, F., 2016, Uzay kafes çatı sistemleri nedir?, <https://www.sanalsantiye.com/uzay-kafes-cati-sistemleri/>, erişim tarihi: 21.04.2017.
- Seward, A., 2011, 9/11 Memorial Museum Entry Pavilion, <https://archpaper.com/2011/10/911-memorial-museum-entry-pavilion/>, erişim tarihi: 21.04.2017.
- Tekgüvercin, Z. D., 2002, Uzay Kafes Sistemler; Tarihi Gelişim, Güncel Durum, <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/8593>, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Ülker, F., 2007, Çift Katmanlı Uzay Kafes Sistemlerin Statik Ve Dinamik Analizi, https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=wBmNpkQC9Nhi90NLW7E7-Q3K3s7UX2OrDUct_5Yh72-0NvhmX8R_og3oxELPhl7f, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Ünlüoğlu, E., Doğan, M., Kıraç, N., Yılmaz, E., 2007, Adapazarı Vagon Fabrikası Çelik Yapısının Deprem Hasarı, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/9072.pdf>, erişim tarihi: 28.04.2017.
- Üstündağ, C., 2013, Çelik Yapılar Ders Notu, <http://web.itu.edu.tr/ustunda1/course/celiksunum.pdf>, erişim tarihi: 21.04.2017.
- Yi-Gang, Z., Tien, L., 1984, Analysis Of Space Frames Under Vertical Earthquake Loads, <http://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bse-cr-001:1984:12::655#655>, erişim tarihi: 28.04.2017.

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A : DKS-1 Örneğine Ait Ara İşlemler

- A.1. Elemanların Eksenel Dönüşüm Matrisleri
- A.2. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrisleri
- A.3. 3 kN'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri
- A.4. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri
- A.5. Dinamik Analiz Ara İşlemleri
- A.6. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri

Ek Açıklama-B : DKS-2 Örneğine Ait Ara İşlemler

- B.1. 3 kN'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri
- B.2. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri
- B.3. Dinamik Analiz Ara İşlemleri
- B.4. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri

Ek Açıklama-C : UKS-1 Örneğine Ait Ara İşlemler

- C.1. Elemanların Eksenel Dönüşüm Matrisleri
- C.2. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrisleri
- C.3. 1000 N'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri
- C.4. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri
- C.5. Dinamik Analiz Ara İşlemleri
- C.6. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri

Ek Açıklama-A : DKS-1 Örneğine Ait Ara İşlemler

A.1. Elemanların Eksenel Dönüşüm Matrisleri

Çizelge A.1’de görülen koordinat değerleri ile Bölüm 3.5.1’den faydalanarak ve Denklem 3.29 ve Denklem 3.30 kullanılarak i eleman numarası olmak üzere $[T_i]$, elemanlara ait dönüşüm matrisleri aşağıda elde edildi.

Çizelge A.1. Elemanlara ait koordinat, uzunluk ve dönüşüm matrisi bileşenleri

ELEMAN NO	ELEMAN UÇ NOKTALARI NUMARALARI		x_{1i} (mm)	x_{2i} (mm)	x_{1j} (mm)	x_{2j} (mm)	L (mm)	c_1	c_2
	i	j							
1	1	2	0,00	0,00	4800,00	0,00	4800,00	1,000	0,000
2	2	3	4800,00	0,00	9600,00	0,00	4800,00	1,000	0,000
3	3	4	9600,00	0,00	4800,00	3600,00	6000,00	-0,800	0,600
4	1	4	0,00	0,00	4800,00	3600,00	6000,00	0,800	0,600
5	2	4	4800,00	0,00	4800,00	3600,00	3600,00	0,000	1,000

$$[T_1] = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 & 0,000 \end{bmatrix}, [T_2] = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 & 0,000 \end{bmatrix}$$

$$[T_4] = \begin{bmatrix} 0,800 & 0,600 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,800 & 0,000 \end{bmatrix}, [T_5] = \begin{bmatrix} 0,000 & 1,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix}$$

$$[T_3] = \begin{bmatrix} -0,800 & 0,600 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & -0,800 & 0,000 \end{bmatrix}$$

A.2. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrisleri

Elemanların kesit ve malzeme özellikleri (Bkz. Çizelge 5.1) ve i eleman numarası olmak üzere Denklem 3.15’i kullanarak $[k_i]$,

$$[k_1]=[k_2]=71750 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, [k_3]=[k_4]=22610 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, [k_5]=77000 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

yerel eleman rijitlik matrisleri elde edildi. Denklem 3.39'dan ve Ek Açıklama-A.1'den yararlanarak dönüştürülmüş eleman rijitlik matrisleri $[K_i]$

$$[K_1]=[K_2]=[T_1]^T[k_1][T_1]=[T_2]^T[k_2][T_2]=\begin{bmatrix} 71750 & 0 & -71750 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -71750 & 0 & 71750 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_3]=[K_4]=[T_3]^T[k_3][T_3]=[T_4]^T[k_4][T_4]=$$

$$\begin{bmatrix} 14470,40 & -10852,80 & -14470,40 & 10852,80 \\ -10852,80 & 8139,60 & 10852,80 & -8139,60 \\ -14470,40 & 10852,80 & 14470,40 & -10852,80 \\ 10852,80 & -8139,60 & -10852,80 & 8139,60 \end{bmatrix}$$

$$[K_5]=[T_5]^T[k_5][T_5]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 77000 & 0 & -77000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -77000 & 0 & 77000 \end{bmatrix}$$

ve Denklem 3.27'den yararlanarak eleman kütle matrisleri $[M_i]$ (diyagonal matrisleri göstermek için $[]$ sembolü kullanılarak),

$$[M_1]=[M_2]=30,96[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1], \quad [M_3]=[M_4]=15,21[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$[M_5]=18,72[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

elde edildi. Genel koordinat takımında, Bölüm 3.3.2'den ve Bölüm 3.4'ten yararlanarak, elemanların kütle matrisleri birleştirilerek tüm sistemin kütle matrisi $[M]$

$$[M]=\begin{bmatrix} 46,17 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 46,17 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 80,64 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 80,64 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 46,17 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 46,17 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 49,14 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 49,14 \end{bmatrix}$$

elde edildi. Genel koordinat takımında, Bölüm 3.3.2'den yararlanarak, elemanların rijitlik matrisleri birleştirilerek tüm sistemin rijitlik matrisi $[K]$ elde edildi.

$$[K]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 86,22 & 10,85 & -71,75 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -14,47 & -10,85 \\ 10,85 & 8,14 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -10,85 & -8,14 \\ -71,75 & 0,00 & 143,50 & 0,00 & -71,75 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 77,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -77,00 \\ 0,00 & 0,00 & -71,75 & 0,00 & 86,22 & -10,85 & -14,47 & 10,85 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -10,85 & 8,14 & 10,85 & -8,14 \\ -14,47 & -10,85 & 0,00 & 0,00 & -14,47 & 10,85 & 28,94 & 0,00 \\ -10,85 & -8,14 & 0,00 & -77,00 & 10,85 & -8,14 & 0,00 & 93,28 \end{bmatrix}$$

A.3. 3 kN'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri

Çubukların ağırlıkları ihmal edilirse, i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, $[P]$ dış kuvvet vektörünün bileşenleri P_{1i} ve P_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde; $[R]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve $[U]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[P]= \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{12} \\ P_{22} \\ P_{13} \\ P_{23} \\ P_{14} \\ P_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -3000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , [R]= \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , [U]= \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F]=[P]+[R]=[K][U]$$

$[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_0]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_0]=[K_0][U_0]$$

$[F_0]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_0]=[K_0]^{-1}[F_0]$$

eşitliği elde edilir. $[K_0]$, $[K_0]^{-1}$, $[U_0]$ ve $[F_0]$ aşağıdaki gibidir.

$$[K_0]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 143,50 & 0,00 & -71,75 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 77,00 & 0,00 & 0,00 & -77,00 \\ -71,75 & 0,00 & 86,22 & -14,47 & 10,85 \\ 0,00 & 0,00 & -14,47 & 28,94 & 0,00 \\ 0,00 & -77,00 & 10,85 & 0,00 & 93,28 \end{bmatrix}$$

$$[K_0]^{-1}=1,0E-05 \begin{bmatrix} 1,39 & -0,93 & 1,39 & 0,70 & -0,93 \\ -0,93 & 8,68 & -1,86 & -0,93 & 7,38 \\ 1,39 & -1,86 & 2,79 & 1,39 & -1,86 \\ 0,70 & -0,93 & 1,39 & 4,15 & -0,93 \\ -0,93 & 7,38 & -1,86 & -0,93 & 7,38 \end{bmatrix}$$

$$[F_0]= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -3000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N , } [U_0]= \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_0]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_0]= \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0209 \\ 0,0279 \\ -0,0418 \\ -0,1246 \\ 0,0279 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0,0209 \\ 0,0279 \\ -0,0418 \\ 0 \\ -0,1246 \\ 0,0279 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [K][U] = [P] + [R] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{23} \\ -3000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3000 \\ 1125 \\ -1125 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0209 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0209 \\ -0,0418 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0334 \\ 0,1164 \end{bmatrix} \text{ mm} ,$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0829 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0279 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m] = [k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1500 \\ -1500 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_2] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1500 \\ -1500 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_3] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1875 \\ -1875 \end{bmatrix} \text{ N} ,$$

$$[\hat{P}_4] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1875 \\ -1875 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_5] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}$$

A.4. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri

F_{zati} , çubuklardan düğüm noktalarına gelen, çubuk ağırlıklarının iki düğüme eşit paylaşılmasıyla aşağıdaki gibi elde edilen yüklerdir.

$$1 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (30,96 + 15,71) = 452,93 \text{ N}$$

$$2 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (30,96 + 30,96 + 18,72) = 791,08 \text{ N}$$

$$3 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (30,96 + 15,71) = 452,93 \text{ N}$$

$$4 \text{ nolu düğüm noktası için; } 9,81 \times (15,21 + 15,21 + 18,72) = 482,06 \text{ N}$$

F_{zati} yüklemesi için genel koordinat takımında sırasıyla sisteme ait, i düğüm numarasını belirtmek üzere, $[F]$ dış kuvvet vektörünün bileşenleri F_{1i} ve F_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde; $[R_{zati}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve $[U_{zati}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N} , [R_{zati}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , [U_{zati}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [R_{zati}] = [K][U_{zati}]$$

Ek Açıklama-A.3'te elde edilen $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0zati}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0zati}] = [K_0][U_{0zati}]$$

$[F_{0zati}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0zati}] = [K_0]^{-1} [F_{0zati}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0zati}]$ ve $[F_{0zati}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N}, [U_{0zati}] = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_{0zati}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0zati}] = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0118 \\ -0,1043 \\ 0,0237 \\ 0,0118 \\ -0,0940 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler, $[U_{zati}]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U_{zati}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,0118 \\ -0,1043 \\ 0,0237 \\ 0 \\ 0,0118 \\ -0,0940 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [R_{zati}] = [K][U_{zati}] \text{ ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 1089,50 \\ 1089,50 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m]=[T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i=1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{u}_1]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0,0118 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad , \quad [\hat{u}_2]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0118 \\ 0,0237 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad ,$$

$$[\hat{u}_3]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -0,0189 \\ -0,0659 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad , \quad [\hat{u}_4]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ -0,0469 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad ,$$

$$[\hat{u}_5]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -0,1043 \\ -0,0940 \end{bmatrix}(\text{mm})$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -848,76 \\ 848,76 \end{bmatrix}N, \quad [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -848,76 \\ 848,76 \end{bmatrix}N, \quad [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1060,95 \\ -1060,95 \end{bmatrix}N \quad ,$$

$$[\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1060,95 \\ -1060,95 \end{bmatrix}N \quad , \quad [\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -791,08 \\ 791,08 \end{bmatrix}N$$

A.5. Dinamik Analiz Ara İşlemleri

Denklem 3.48'den faydalanarak doğal periyotlar ve doğal frekanslar bulunabilir. Bu eşitlikte, sınır koşullarını göz önünde bulundurarak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse indirgenmiş sistemin rijitlik matrisi $[K_0]$ ve kütle matrisi $[M_0]$ elde edilir.

$$([K_0]-\omega_i^2[M_0])(a_i)=0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

Yukarıda indirgenmiş matrisler yardımıyla kurulan özdeğer probleminin sonucunda, u_{12} , u_{22} , u_{13} , u_{14} ve u_{24} serbestliklerine karşılık gelen, Denklem 3.72'den faydalanarak

özdeğerler Ω^2 ve Denklem 3.73'ten faydalanarak özvektörler A ve bunların sonuçlarından yola çıkarak doğal periyot ve doğal frekanslar bulunur.

$$[M_0]=[80,64 \quad 80,64 \quad 46,17 \quad 49,14 \quad 49,14]$$

$$\det([K_0]-\omega_i^2[M_0])=0$$

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} 93,50 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 404,40 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 822,60 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 2.690,20 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 3.078,30 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0,0129 & -0,0442 & 0,0664 & 0,0335 & -0,0689 \\ 0,0887 & -0,0214 & 0,0111 & -0,0593 & -0,0210 \\ -0,0245 & -0,0683 & 0,0714 & -0,0343 & 0,1006 \\ -0,0146 & -0,1089 & -0,0900 & 0,0048 & -0,0119 \\ 0,0800 & -0,0123 & 0,0015 & 0,1078 & 0,0467 \end{bmatrix}$$

Sistemin doğal frekansları $\omega_i = \sqrt{\Omega_{ii}^2}$ ve Sistemin doğal periyotları; $T_i = 1/\omega_i$ olmak üzere Çizelge A.2'de görülen değerlerdir.

Çizelge A.2. Sistemin doğal periyotları ve doğal frekansları

i	ω_i (s ⁻¹)	T_i (s)
1	1.5391	0.6497
2	3.2004	0.3125
3	4.5647	0.2191
4	8.2549	0.1211
5	8.8303	0.1132

A.6. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri

DBYBHY 2007’de, 3. deprem bölgesinde; bina önem katsayısı $I=1,2$; Z2 zemin sınıfında $T_A=0,15$ s ve $T_B=0,40$ s; etkin yer ivmesi $A_0=0,20$; taşıyıcı sistem katsayısı, DBYBHY 2007 Tablo 2.5’te (3.1) için $R=5$ değerlerine sahip olan düzlem kafes sistemin deprem etkileri takip eden işlemlerdeki gibidir.

Etki katsayıları vektörü, $[r]$, yatay deprem yükü durumunda sırasıyla u_{12} , u_{22} , u_{13} , u_{14} ve u_{24} serbestliklerine karşılık gelen değerler aşağıdaki gibidir.

$$[r] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Çizelge A.3. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i (s^{-1})	$L_i = [A_i]^T [M_0] [r]$	$m_i = [A_i]^T [M_0] [A_i]$	$\Gamma_i = L_i / m_i$	$m_i^* = \Gamma_i L_i$
1	0,6497	1,5391	-2,8889	1,00	-2,8873	8,3409
2	0,3125	3,2004	-12,0690	1,00	-12,0685	145,66
3	0,2191	4,5647	4,2284	1,00	4,2327	17,898
4	0,1211	8,2549	1,3537	1,00	1,3529	1,8314
5	0,1132	8,8303	-1,4962	1,00	-1,4965	2,239

DBYBHY 2007 Denklem 2.14’e göre göz önüne alınacak mod sayısı, yeterli mod sayısı (Çizelge A.3): $\Sigma m_i^* > 0,90 \Sigma m_i = 158,36$ buna göre 2. ve 3. modlar yeterli: $m_2^* + m_3^* = 163,553$ ’tür.

Çizelge A.4. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i	$R_a(T_i)$	$S(T_i)$	$A(T_i)$	$S_{ac}(T_i)$	$S_{aR}(T_i)$
2	0,3125	3,2004	5	2,5	0,6	5,886	1,1772
3	0,2191	4,5647	5	2,5	0,6	5,886	1,1772

f_2 ve f_3 , 2. ve 3. modlara ait deprem kuvveti vektörleridir. $f_i = S_{ar}(T_i) \Gamma_i [M_0] [A_i]$ için (Çizelge A.4);

$$f_2 = \begin{bmatrix} 50,64 \\ 24,52 \\ 44,80 \\ 76,03 \\ 8,59 \end{bmatrix}, \quad f_3 = \begin{bmatrix} 26,68 \\ 4,46 \\ 16,43 \\ -22,04 \\ 0,37 \end{bmatrix}$$

deprem kuvvetleri elde edilir.

Yanal deprem etkisinde sisteme etkiyen deprem kuvvetleri, f_2 ve f_3 deprem kuvveti vektörlerinde f_{21} ve f_{31} elemanlarına u_{12} ; f_{23} ve f_{33} elemanlarına u_{13} ve f_{24} ve f_{34} elemanlarına u_{14} yanal serbestlikleri karşılık gelir. V_2 ve V_3 taban kesme kuvvetleri

$$V_2 = f_{21} + f_{23} + f_{24} = 171,4653 \text{ N}, \quad V_3 = f_{31} + f_{33} + f_{34} = 21,0692 \text{ N}$$

olarak elde edilir.

2. mod için, zati yükler ve yatay deprem yükü etkisinde ($F_{analiz2} = F_{zati} + F_{deprem2}$) yüklemesi için i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, $[F_{analiz2}]$ dış kuvvet vektörü, $[R_{analiz2}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve $[U_{analiz2}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [F_{deprem2}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50,64 \\ 0 \\ 44,80 \\ 0 \\ 76,03 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [R_{analiz2}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N},$$

$$[U_{\text{analiz2}}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} \text{ mm} , [F_{\text{analiz2}}] = [F_{\text{zati}}] + [F_{\text{deprem2}}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 50,64 \\ -791,08 \\ 44,80 \\ -452,93 \\ 76,03 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{\text{zati}}] + [F_{\text{deprem2}}] + [R_{\text{analiz2}}] = [K][U_{\text{analiz2}}]$$

Ek Açıklama-A.3'te elde edilen $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0\text{analiz2}}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0\text{analiz2}}] = [K_0][U_{0\text{analiz2}}]$$

$[F_{0\text{analiz2}}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0\text{analiz2}}] = [K_0]^{-1} [F_{0\text{analiz2}}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0\text{analiz2}}]$ ve $[F_{0\text{analiz2}}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0\text{analiz2}}] = \begin{bmatrix} 50,64 \\ -791,08 \\ 44,80 \\ 76,03 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N} , [U_{0\text{analiz2}}] = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_{0analiz2}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0analiz2}] = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0137 \\ -0,1063 \\ 0,0267 \\ 0,0160 \\ -0,0960 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{analiz2}]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U_{analiz2}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,0137 \\ -0,1063 \\ 0,0267 \\ 0 \\ 0,0160 \\ -0,0960 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{deprem2}] + [R_{analiz2}] = [K][U_{analiz2}] \text{ ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -171,47 \\ 1060,99 \\ 1118,01 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0137 \end{bmatrix} \text{ mm} \quad , \quad [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0137 \\ 0,0267 \end{bmatrix} \text{ mm} \quad , \quad [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0213 \\ -0,0704 \end{bmatrix} \text{ mm} \quad ,$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0448 \end{bmatrix} \text{ mm} \quad , \quad [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,1063 \\ -0,0960 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m] = [k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -982,19 \\ 982,19 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_2] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -931,58 \\ 931,58 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_3] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1108,47 \\ -1108,47 \end{bmatrix} N,$$

$$[\hat{P}_4] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1013,43 \\ -1013,43 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_5] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -791,08 \\ 791,08 \end{bmatrix} N$$

3. mod için, zati yükler ve yatay deprem yükü etkisinde ($F_{analiz3} = F_{zati} + F_{deprem3}$) yüklemesi için i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sırasıyla sisteme ait, $[F_{analiz3}]$ dış kuvvet vektörü, $[R_{analiz3}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve $[U_{analiz3}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} N, [F_{deprem3}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50,64 \\ 0 \\ 44,80 \\ 0 \\ 76,03 \\ 0 \end{bmatrix} N, [R_{analiz3}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} N,$$

$$[U_{analiz3}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} mm, [F_{analiz3}] = [F_{zati}] + [F_{deprem3}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 50,64 \\ -791,08 \\ 44,80 \\ -452,93 \\ 76,03 \\ -482,06 \end{bmatrix} N$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{deprem3}] + [R_{analiz3}] = [K][U_{analiz3}]$$

Ek Açıklama-A.3'te elde edilen $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0analiz3}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0analiz3}] = [K_0][U_{0analiz3}]$$

$[F_{0analiz3}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0analiz3}] = [K_0]^{-1}[F_{0analiz3}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0analiz3}]$ ve $[F_{0analiz3}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0analiz2}] = \begin{bmatrix} 26,68 \\ -791,08 \\ 16,43 \\ -22,03 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N}, [U_{0analiz2}] = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_{0analiz3}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denkleme yerine konulursa

$$[U_{0analiz3}] = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0123 \\ -0,1046 \\ 0,0242 \\ 0,0113 \\ -0,0944 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{analiz3}]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U_{analiz3}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,0123 \\ -0,1046 \\ 0,0242 \\ 0 \\ 0,0113 \\ -0,0944 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{deprem3}] + [R_{analiz3}] = [K][U_{analiz3}] \text{ ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -21,07 \\ 1097,76 \\ 1081,24 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m]=[T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i=1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{u}_1]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0123 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad , \quad [\hat{u}_2]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0123 \\ 0,0242 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad ,$$

$$[\hat{u}_3]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,0657 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad , \quad [\hat{u}_4]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0475 \end{bmatrix}(\text{mm}) \quad ,$$

$$[\hat{u}_5]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -0,1046 \\ -0,0944 \end{bmatrix}(\text{mm})$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , şeklinde aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -880,85 \\ 880,85 \end{bmatrix} \text{N} \quad , \quad [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -854,18 \\ 854,18 \end{bmatrix} \text{N} \quad , \quad [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1047,18 \\ -1047,18 \end{bmatrix} \text{N} \quad ,$$

$$[\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1074,72 \\ -1074,72 \end{bmatrix} \text{N} \quad , \quad [\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -791,08 \\ 791,08 \end{bmatrix} \text{N}$$

Ek Açıklama-B : DKS-2 Örneğine Ait Ara İşlemler

Elemanlara ait; eksenel dönüşüm matrisleri Ek Açıklama-A.1’de ve rijitlik ve kütle matrisleri Ek Açıklama-A.2’de elde edilen değerler göz önüne alınarak hesaplarda kullanılacaktır.

B.1. 3 kN’luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri

Çubukların ağırlıkları ihmal edilirse, i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, [P] dış kuvvet vektörünün bileşenleri P_{1i} ve P_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde; [R] mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve [U] yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[P]=\begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{12} \\ P_{22} \\ P_{13} \\ P_{23} \\ P_{14} \\ P_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -3000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , [R]=\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , [U]=\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F]=[P]+[R]=[K][U]$$

$[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_0]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_0]=[K_0][U_0]$$

$[F_0]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_0]=[K_0]^{-1}[F_0]$$

eşitliği elde edilir. $[K_0]$, $[K_0]^{-1}$, $[U_0]$ ve $[F_0]$ aşağıdaki gibidir.

$$[K_0]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 28,94 & 0,00 \\ 0,00 & 93,28 \end{bmatrix}, \quad [K_0]^{-1}=1,0E-05 \begin{bmatrix} 3,46 & 0,00 \\ 0,00 & 1,07 \end{bmatrix}$$

$$[F_0]= \begin{bmatrix} -3000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [U_0]= \begin{bmatrix} u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_0]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_0]= \begin{bmatrix} u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,1037 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U]= \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,1037 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F]=[K][U]=[P]+[R]= \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ -3000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1500 \\ 1125 \\ 0 \\ 0 \\ 1500 \\ -1125 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m]=[T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i=1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_2]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_3]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0,0829 \end{bmatrix} \text{ mm} ,$$

$$[\hat{u}_4]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ -0,0829 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_5]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -1875 \\ 1875 \end{bmatrix} \text{ N} ,$$

$$[\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1875 \\ -1875 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}$$

B.2. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri

F_{zati} yüklemesinin elde edilmesi için gereken ara işlemler Ek Açıklama-A.4'te verildi. F_{zati} yüklemesi için genel koordinat takımında sisteme ait, i düğüm numarasını belirtmek üzere, $[F]$ dış kuvvet vektörünün bileşenleri F_{1i} ve F_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde; $[R_{zati}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve $[U_{zati}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}]=\begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [R_{zati}]=\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [U_{zati}]=\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F]=[F_{zati}]+[R_{zati}]=[K][U_{zati}]$$

Ek Açıklama-B.1'de elde edilen $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0zati}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0zati}]=[K_0][U_{0zati}]$$

$[F_{0zati}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0zati}]=[K_0]^{-1}[F_{0zati}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0zati}]$ ve $[F_{0zati}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_0]=\begin{bmatrix} 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{N}, [U_{0zati}]=\begin{bmatrix} u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_{0zati}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0zati}]=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0052 \end{bmatrix} \text{mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler, $[U_{zati}]$ vektöründe yerine konulursa aşağıdaki vektör elde edilir.

$$[U_{zati}]=\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0000 \\ -0,0052 \end{bmatrix} \text{mm}$$

Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F]=[F_{zati}]+[R_{zati}]=[K][U_{zati}] \text{ ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56,09 \\ 494,99 \\ 0 \\ 1189,01 \\ -56,09 \\ 494,99 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m]=[T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i=1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_2]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_3]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0031 \end{bmatrix} \text{ mm} ,$$

$$[\hat{u}_4]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0031 \end{bmatrix} \text{ mm} , \quad [\hat{u}_5]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0052 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70,11 \\ -70,11 \end{bmatrix} \text{ N} ,$$

$$[\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70,11 \\ -70,11 \end{bmatrix} \text{ N} , \quad [\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 397,93 \\ -397,93 \end{bmatrix} \text{ N}$$

B.3. Dinamik Analiz Ara İşlemleri

Denklem 3.48'den faydalanarak doğal periyotlar ve doğal frekanslar bulunabilir. Bu eşitlikte, sınır koşullarını göz önünde bulundurarak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse indirgenmiş sistemin rijitlik matrisi $[K_0]$ ve kütle matrisi $[M_0]$ elde edilir.

$$([K_0]-\omega_i^2[M_0])(a_i)=0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

Yukarıda indirgenmiş matrisler yardımıyla kurulan özdeğer probleminin sonucunda, u_{14} ve u_{24} serbestliklerine karşılık gelen, Denklem 3.72'den faydalanarak özdeğerler Ω^2 ve Denklem 3.73'ten faydalanarak özvektörler A ve bunların sonuçlarından yola çıkarak doğal periyot ve doğal frekanslar bulunur.

$$[M_0]=49,14 \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1 \end{bmatrix}$$

$$\det([K_0]-\omega_i^2[M_0])=0$$

$$\Omega^2=1,0E+03 \begin{bmatrix} 0,5889 & 0 \\ 0 & 1,8982 \end{bmatrix}$$

$$A= \begin{bmatrix} 0,1427 & 0 \\ 0 & 0,1427 \end{bmatrix}$$

Sistemin doğal frekansları $\omega_i=\sqrt{\Omega_{ii}^2}$ ve Sistemin doğal periyotları; $T_i=1/\omega_i$ olmak üzere Çizelge B.'de görülen değerlerdir.

Çizelge B.1. Sistemin doğal periyotları ve doğal frekansları

i	ω_i (s ⁻¹)	T_i (s)
1	3,8623	0,2589
2	6,7943	0,1472

B.4. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri

DBYBHY 2007'de, 3. deprem bölgesinde; bina önem katsayısı $I=1,2$; Z2 zemin sınıfında $T_A=0,15$ s ve $T_B=0,40$ s; etkin yer ivmesi $A_0=0,20$; taşıyıcı sistem katsayısı, DBYBHY 2007 Tablo 2.5'te (3.1) için $R=5$ değerlerine sahip olan düzlem kafes sistemin deprem etkileri takip eden işlemlerdeki gibidir.

Etki katsayıları vektörü, $[r]$, yatay deprem yükü durumunda sırasıyla u_{14} ve u_{24} serbestliklerine karşılık gelen değerler aşağıdaki gibidir.

$$[r] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Çizelge B.2. Sistemin, modlara karşılık gelen geliştirilmiş parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i (s^{-1})	$L_i = [A_i]^T [M_0] [r]$	$m_i = [A_i]^T [M_0] [A_i]$	$\Gamma_i = L_i/m_i$	$m_i^* = \Gamma_i L_i$
1	0,2589	3,8623	7,01	1,00	7,01	49,14
2	0,1442	6,9341	0,00	1,00	0,00	0

DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre göz önüne alınacak mod sayısı, yeterli mod sayısı (Çizelge B.2): $\sum m_i^* > 0,90 \sum m_i = 44,23$ buna göre 1. mod yeterli: $m_1^* = 49,14$ 'tür.

Çizelge B.3. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i	$R_a(T_i)$	$S(T_i)$	$A(T_i)$	$S_{ac}(T_i)$	$S_{aR}(T_i)$
1	0,2589	3,8623	5	2,5	0,60	5,886	1,1772
2	0,1442	6,9341	4,87	2,44	0,57	5,750	1,1819

f_1 , 1. mod ait deprem kuvveti vektörüdür. $f_1 = S_{aR}(T_1) \Gamma_1 [M_0] [A_1]$ için (Çizelge B.3);

$$f_1 = \begin{bmatrix} 57,85 \\ 0,00 \end{bmatrix}$$

deprem kuvvetleri elde edilir.

Yanal deprem etkisinde sisteme etkiyen deprem kuvvetleri, f_1 deprem kuvveti vektöründe f_{11} elemanına u_{14} yanal serbestliği karşılık gelir. V_1 taban kesme kuvveti

$$V_1 = f_{11} = 57,85 \text{ N}$$

olarak elde edilir.

1. mod için, zati yükler ve yatay deprem yükü etkisinde ($F_{analiz1} = F_{zati} + F_{deprem1}$) yüklemesi için i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, $[F_{analiz1}]$ dış kuvvet vektörü, $[R_{analiz1}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} ve R_{2i}

sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde ve $[U_{analiz1}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} ve u_{2i} sırasıyla x_1 ve x_2 yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -482,06 \end{bmatrix} N, [F_{deprem2}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 57,85 \\ 0 \end{bmatrix} N, [R_{analiz1}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{14} \\ R_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} N,$$

$$[U_{analiz1}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} mm, [F_{analiz1}] = [F_{zati}] + [F_{deprem1}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -452,93 \\ 0 \\ -791,08 \\ 0 \\ -452,93 \\ 57,85 \\ -482,06 \end{bmatrix} N$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{deprem1}] + [R_{analiz1}] = [K][U_{analiz1}]$$

Ek Açıklama-B.1'de elde edilen $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0analiz1}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0analiz1}] = [K_0][U_{0analiz1}]$$

$[F_{0analiz1}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0analiz1}] = [K_0]^{-1}[F_{0analiz1}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0analiz1}]$ ve $[F_{0analiz1}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_0] = \begin{bmatrix} 57,85 \\ -482,06 \end{bmatrix} \text{N}, [U_{0\text{analiz1}}] = \begin{bmatrix} u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix}$$

$[F_{0\text{analiz1}}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0\text{analiz1}}] = \begin{bmatrix} 0,0020 \\ -0,0052 \end{bmatrix} \text{mm}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{\text{analiz1}}]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U_{\text{analiz1}}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{14} \\ u_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0020 \\ -0,0052 \end{bmatrix} \text{mm}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{\text{zati}}] + [F_{\text{depren1}}] + [R_{\text{analiz1}}] = [K][U_{\text{analiz1}}] \text{ ise; } [R_{\text{analiz1}}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{13} \\ R_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27,16 \\ 473,30 \\ 0,00 \\ 1189,01 \\ -85,01 \\ 516,69 \end{bmatrix} \text{N}$$

Denklem 3.32'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,0137 \end{bmatrix} \text{mm}, [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0137 \\ 0,0267 \end{bmatrix} \text{mm}, [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0213 \\ -0,0704 \end{bmatrix} \text{mm},$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0448 \end{bmatrix} \text{mm}, [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,1063 \\ -0,0960 \end{bmatrix} \text{mm}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -982,19 \\ 982,19 \end{bmatrix} \text{N}, [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -931,58 \\ 931,58 \end{bmatrix} \text{N}, [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1108,47 \\ -1108,47 \end{bmatrix} \text{N} ,$$

$$[\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1013,43 \\ -1013,43 \end{bmatrix} \text{N} , [\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -791,08 \\ 791,08 \end{bmatrix} \text{N}$$

Ek Açıklama-C : UKS-1 Örneğine Ait Ara İşlemler

C.1. Elemanların Eksenel Dönüşüm Matrisleri

Çizelge C.1’de görülen koordinat değerleri ile Bölüm 3.5.1’den faydalanarak ve Denklem 3.40 ve Denklem 3.41 kullanılarak i eleman numarası olmak üzere $[T_i]$, elemanlara ait dönüşüm matrisleri aşağıda elde edildi.

Çizelge C.1. Elemanlara ait koordinat, uzunluk ve dönüşüm matrisi bileşenleri

ELEMEN NO	ELEMEN UÇ NOKTALARI NUMARALARI		x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	x_j (m)	y_j (m)	z_j (m)	L (m)	c_1	c_2	c_3
	i	j										
1	2	1	0,00	2,50	2,50	1,25	0,00	0,00	3,75	0,333	-0,667	-0,667
2	3	1	2,50	2,50	2,50	1,25	0,00	0,00	3,75	-0,333	-0,667	-0,667
3	2	3	0,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,000	0,000	0,000
4	2	5	0,00	2,50	2,50	0,00	2,50	0,00	2,50	0,000	0,000	-1,000
5	3	4	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00	2,50	0,000	0,000	-1,000
6	2	4	0,00	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00	3,54	0,707	0,000	-0,707
7	5	3	0,00	2,50	0,00	2,50	2,50	2,50	3,54	0,707	0,000	0,707

$$[T_1] = \begin{bmatrix} 0,333 & -0,667 & -0,667 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,333 & -0,667 & -0,667 \end{bmatrix}$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} -0,333 & -0,667 & -0,667 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,333 & -0,667 & -0,667 \end{bmatrix}$$

$$[T_3] = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 & 0,000 & 0,000 \end{bmatrix}$$

$$[T_4] = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,000 & -1,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -1,000 \end{bmatrix}$$

$$[T_5] = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,000 & -1,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -1,000 \end{bmatrix}$$

$$[T_6] = \begin{bmatrix} 0,707 & 0,000 & -0,707 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,707 & 0,000 & -0,707 \end{bmatrix}$$

$$[T_7] = \begin{bmatrix} 0,707 & 0,000 & 0,707 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,707 & 0,000 & 0,707 \end{bmatrix}$$

C.2. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrisleri

Elemanların kesit ve malzeme özellikleri (Bkz. Çizelge 5.45) ve i eleman numarası olmak üzere Denklem 3.15'i kullanarak $[k_i]$,

$$[k_1]=[k_2]=8,00E+04 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, [k_3]=[k_4]=[k_5]=1,20E+05 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[k_6]=[k_7]=8,49E+04 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

yerel eleman rijitlik matrisleri elde edildi. Denklem 3.39'dan ve Ek Açıklama-C.1'den yararlanarak dönüştürülmüş eleman rijitlik matrisleri $[K_i]$

$$[K_1]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 8,89 & -17,78 & -17,78 & -8,89 & 17,78 & 17,78 \\ -17,78 & 35,56 & 35,56 & 17,78 & -35,56 & -35,56 \\ -17,78 & 35,56 & 35,56 & 17,78 & -35,56 & -35,56 \\ -8,89 & 17,78 & 17,78 & 8,89 & -17,78 & -17,78 \\ 17,78 & -35,56 & -35,56 & -17,78 & 35,56 & 35,56 \\ 17,78 & -35,56 & -35,56 & -17,78 & 35,56 & 35,56 \end{bmatrix}$$

$$[K_2]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 8,89 & 17,78 & 17,78 & -8,89 & -17,78 & -17,78 \\ 17,78 & 35,56 & 35,56 & -17,78 & -35,56 & -35,56 \\ 17,78 & 35,56 & 35,56 & -17,78 & -35,56 & -35,56 \\ -8,89 & -17,78 & -17,78 & 8,89 & 17,78 & 17,78 \\ -17,78 & -35,56 & -35,56 & 17,78 & 35,56 & 35,56 \\ -17,78 & -35,56 & -35,56 & 17,78 & 35,56 & 35,56 \end{bmatrix}$$

$$[K_3]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 120,00 & 0,00 & 0,00 & -120,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -120,00 & 0,00 & 0,00 & 120,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix}$$

$$[K_4]=[K_5]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 120,00 & 0,00 & 0,00 & -120,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -120,00 & 0,00 & 0,00 & 120,00 \end{bmatrix}$$

$$[K_6]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 42,43 & 0,00 & -42,43 & -42,43 & 0,00 & 42,43 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -42,43 & 0,00 & 42,43 & 42,43 & 0,00 & -42,43 \\ -42,43 & 0,00 & 42,43 & 42,43 & 0,00 & -42,43 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 42,43 & 0,00 & -42,43 & -42,43 & 0,00 & 42,43 \end{bmatrix}$$

$$[K_7]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 42,43 & 0,00 & 42,43 & -42,43 & 0,00 & -42,43 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 42,43 & 0,00 & 42,43 & -42,43 & 0,00 & -42,43 \\ -42,43 & 0,00 & -42,43 & 42,43 & 0,00 & 42,43 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -42,43 & 0,00 & -42,43 & 42,43 & 0,00 & 42,43 \end{bmatrix}$$

ve Denklem 3.27'den yararlanarak eleman kütle matrisleri $[M_i]$

$$[M_1]=[M_2]=0,188[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1], \quad [M_6]=[M_7]=0,177[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

$$[M_3]=[M_4]=[M_5]=0,125[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

elde edildi. Genel koordinat takımında, Bölüm 3.3.2'den yararlanarak, elemanların rijitlik matrisleri birleştirilerek tüm sistemin rijitlik matrisi $[K]$ aşağıda elde edildi.

17,78	0,00	0,00	-8,89	17,78	17,78	17,78	-8,89	-17,78	-17,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	71,11	71,11	17,78	-35,56	-35,56	-35,56	-17,78	-35,56	-35,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	71,11	71,11	17,78	-35,56	-35,56	-35,56	-17,78	-35,56	-35,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-8,89	17,78	17,78	171,32	-17,78	-60,20	-60,20	-120,00	0,00	0,00	-42,43	0,00	42,43	0,00	0,00
17,78	-35,56	-35,56	-17,78	35,56	35,56	35,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,78	-35,56	-35,56	-60,20	35,56	197,98	197,98	0,00	0,00	0,00	42,43	0,00	-42,43	0,00	0,00
-8,89	-17,78	-17,78	-120,00	0,00	0,00	0,00	171,32	17,78	60,20	0,00	0,00	0,00	0,00	-42,43
-17,78	-35,56	-35,56	0,00	0,00	0,00	0,00	17,78	35,56	35,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-17,78	-35,56	-35,56	0,00	0,00	0,00	0,00	60,20	35,56	197,98	0,00	0,00	-120,00	-42,43	-42,43
0,00	0,00	0,00	-42,43	0,00	42,43	42,43	0,00	0,00	0,00	42,43	0,00	-42,43	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	42,43	0,00	-42,43	-42,43	0,00	0,00	-120,00	-42,43	0,00	162,43	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-42,43	0,00	-42,43	0,00	0,00	0,00	42,43	42,43
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-120,00	-120,00	-42,43	0,00	-42,43	0,00	0,00	0,00	42,43	42,43
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

[K]=1,0E+03

Genel koordinat takımında, Bölüm 3.3.2'den ve Bölüm 3.4'ten yararlanarak, elemanların kütle matrisleri birleştirilerek tüm sistemin kütle matrisi $[M]$

$$[M] = \begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] & [M_{13}] & [M_{14}] & [M_{15}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] & [M_{23}] & [M_{24}] & [M_{25}] \\ [M_{31}] & [M_{32}] & [M_{33}] & [M_{34}] & [M_{35}] \\ [M_{41}] & [M_{42}] & [M_{43}] & [M_{44}] & [M_{45}] \\ [M_{51}] & [M_{52}] & [M_{53}] & [M_{54}] & [M_{55}] \end{bmatrix}$$

$$[M_{11}] = 0,375[1 \ 1 \ 1], [M_{22}] = [M_{33}] = 0,614[1 \ 1 \ 1],$$

$$[M_{44}] = [M_{55}] = 0,302[1 \ 1 \ 1]$$

diğer kütle matrisi elemanları sıfır olmak üzere elde edildi.

C.3. 1000 N'luk Yük İçin Statik Analiz Ara İşlemleri

Çubukların ağırlıkları ihmal edilirse, i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, $[P]$ dış kuvvet vektörünün bileşenleri P_{1i} , P_{2i} ve P_{3i} sırasıyla x , y ve z yönünde; $[R]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} , R_{2i} ve R_{3i} sırasıyla x , y ve z yönünde ve $[U]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} , u_{2i} ve u_{3i} sırasıyla x , y ve z yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{31} \\ P_{12} \\ P_{22} \\ P_{32} \\ P_{13} \\ P_{23} \\ P_{33} \\ P_{14} \\ P_{24} \\ P_{34} \\ P_{15} \\ P_{25} \\ P_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [U] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [R] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} \text{ N}$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F]=[P]+[R]=[K][U]$$

$[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_0]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_0]=[K_0][U_0]$$

$[F_0]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_0]=[K_0]^{-1}[F_0]$$

eşitliği elde edilir. $[K_0]$, $[K_0]^{-1}$, $[U_0]$ ve $[F_0]$ aşağıdaki gibidir.

$$[K_0]=1,0E+03 \begin{bmatrix} 171,32 & 17,78 & 60,20 \\ 17,78 & 35,56 & 35,56 \\ 60,20 & 35,56 & 197,98 \end{bmatrix}$$

$$[K_0]^{-1}=1,0E-06 \begin{bmatrix} 6,61 & -1,58 & -1,73 \\ -1,58 & 34,66 & -5,74 \\ -1,73 & -5,74 & 6,61 \end{bmatrix}$$

$$[F_0]= \begin{bmatrix} -1000 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{N}, [U_0]= \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix}$$

$[F_0]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_0]= \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0066 \\ 0,0016 \\ 0,0017 \end{bmatrix} \text{m}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,0066 \\ 0,0016 \\ 0,0017 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [K][U] = [P] + [R] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ -1000 \\ 0 \\ 0 \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} \text{ N ise; } \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 792,89 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -207,11 \\ 207,11 \\ 0 \\ 207,11 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklemler 3.42'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0066 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0017 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_6] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{16} \\ \hat{u}_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_7] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{17} \\ \hat{u}_{27} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0035 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Denklem 3.29'dan yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m] = [k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [\hat{P}_2] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [\hat{P}_3] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 792,89 \\ -792,89 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [\hat{P}_4] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N},$$

$$[\hat{P}_5] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -207,11 \\ 207,11 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [\hat{P}_6] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{16} \\ \hat{P}_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, \quad [\hat{P}_7] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{17} \\ \hat{P}_{27} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -292,89 \\ 292,89 \end{bmatrix} \text{ N}$$

C.4. Zati Yükler (F_{zati}) İçin Statik Analiz Ara İşlemleri

F_{zati} , çubuklardan düğüm noktalarına gelen, çubuk ağırlıklarının iki düğüme eşit paylaştırılmasıyla aşağıdaki gibi elde edilen yüklerdir.

1 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,188 + 0,188) = 3,69 \text{ N}$

2 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,188 + 0,125 + 0,125 + 0,177) = 6,03 \text{ N}$

3 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,188 + 0,125 + 0,125 + 0,177) = 6,03 \text{ N}$

4 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,125 + 0,177) = 2,96 \text{ N}$

5 nolu düğüm noktası için; $9,81 \times (0,125 + 0,177) = 2,96 \text{ N}$

F_{zati} yüklemesi için i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, $[F]$ dış kuvvet vektörünün bileşenleri F_{1i} , F_{2i} ve F_{3i} sırasıyla x , y ve z yönünde; $[R_{zati}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} , R_{2i} ve R_{3i} sırasıyla x , y ve z ve $[U_{zati}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} , u_{2i} ve u_{3i} sırasıyla x , y ve z yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -3,68 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \end{bmatrix} N, [R_{zati}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ 0 \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ 0 \\ 0 \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} N, [U_{zati}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [R_{zati}] = [K][U_{zati}]$$

Ek Açıklama-C.3'te elde edilen, $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0zati}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0zati}] = [K_0][U_{0zati}]$$

$[F_{0zati}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0zati}] = [K_0]^{-1} [F_{0zati}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0zati}]$ ve $[F_{0zati}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -6,03 \\ 0 \end{bmatrix}, [U_{0zati}] = \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix}$$

$[F_{0zati}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0zati}] = \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0002 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{zati}]$ vektöründe yerine konulursa

$$[U_{zati}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0000 \\ -0,0002 \\ 0,0000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m}$$

elde edilir. Mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [R_{zati}] = [K][U_{zati}] \text{ ise; } [R_{zati}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,01 \\ 9,70 \\ 6,03 \\ -1,14 \\ 6,03 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2,96 \\ -4,15 \\ -1,87 \\ 2,96 \\ -1,87 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.42'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m]=[T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , ($i = 1, 2$) ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{u}_1]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)}, [\hat{u}_2]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0001 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)}, [\hat{u}_3]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)},$$

$$[\hat{u}_4]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)}, [\hat{u}_5]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)}, [\hat{u}_6]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{16} \\ \hat{u}_{26} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)},$$

$$[\hat{u}_7]=\begin{bmatrix} \hat{u}_{17} \\ \hat{u}_{27} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ (m)}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 9,04 \\ -9,04 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -1,14 \\ 1,14 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix},$$

$$[\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -4,15 \\ 4,15 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_6]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{16} \\ \hat{P}_{26} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_7]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{17} \\ \hat{P}_{27} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2,65 \\ -2,65 \end{bmatrix} \text{ N}$$

C.5. Dinamik Analiz Ara İşlemleri

Denklem 3.48'den faydalanarak doğal periyotlar ve doğal frekanslar bulunabilir. Bu eşitlikte, sınır koşullarını göz önünde bulundurarak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse indirgenmiş sistemin rijitlik matrisi $[K_0]$ ve kütle matrisi $[M_0]$ elde edilir.

$$([K_0]-\omega_i^2[M_0])(a_i)=0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

Yukarıda indirgenmiş matrisler yardımıyla kurulan özdeğer probleminin sonucunda, u_{13} , u_{23} ve u_{33} serbestliklerine karşılık gelen, Denklem 3.72'den faydalanarak özdeğerler Ω^2

ve Denklem 3.73'ten faydalanarak özvektörler A ve bunların sonuçlarından yola çıkarak doğal periyot ve doğal frekanslar bulunur.

$$[M_0]=0,614[1 \ 1 \ 1]$$

$$\det([K_0]-\omega_i^2[M_0])=0$$

$$A=\begin{bmatrix} 0,0534 & 1,0135 & 0,7737 \\ -1,2517 & -0,1059 & 0,2252 \\ 0,2431 & -0,7683 & 0,9896 \end{bmatrix}$$

$$\Omega^2=1,0E+05 \begin{bmatrix} 0,4548 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 2,0114 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 4,1233 \end{bmatrix}$$

Sistemin doğal frekansları $\omega_i=\sqrt{\Omega_{ii}^2}$ ve sistemin doğal periyotları; $T_i = 1/\omega_i$ olmak üzere Çizelge C.2'de görülen değerlerdir.

Çizelge C.2. Sistemin doğal periyotları ve doğal frekansları

i	ω_i (s ⁻¹)	T_i (s)
1	33,8983	0,0295
2	71,4286	0,014
3	102,0408	0,0098

C.6. Mod Birleştirme Yöntemi İle Analiz Ara İşlemleri

DBYBHY 2007'de, 3. deprem bölgesinde; bina önem katsayısı $I=1,2$; Z2 zemin sınıfında $T_A=0,15$ s ve $T_B=0,40$ s; etkin yer ivmesi $A_0=0,20$; taşıyıcı sistem katsayısı, DBYBHY 2007 Tablo 2.5'te (3.1) için $R=5$ değerlerine sahip olan uzay kafes sistemin deprem etkileri takip eden işlemlerdeki gibidir.

X yönündeki deprem kuvvetleri için etki katsayıları vektörü, $[r]$, x yönündeki deprem yükü durumunda sırasıyla u_{13} , u_{23} ve u_{33} serbestliklerine karşılık gelen değerler aşağıdaki gibidir.

$$[r] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Çizelge C.3. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i (s^{-1})	$L_i = (A_i)^T [M_0] [r]$	$m_i = [A_i]^T [M_0] [A_i]$	$\Gamma_i = L_i / m_i$	$m_i^* = \Gamma_i L_i$
1	0,0295	33,9423	0,033	1,00	0,0328	0,0011
2	0,0140	71,3791	0,623	1,00	0,6223	0,3874
3	0,0098	102,1985	0,475	1,00	0,4751	0,2258

DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre göz önüne alınacak mod sayısı, yeterli mod sayısı (Çizelge C.3): $\sum m_i^* > 0,90 \sum m_i = 0,55$ buna göre 2. ve 3. modlar yeterli: $m_2^* + m_3^* = 0,61$ 'dir.

Çizelge C.4. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i (s^{-1})	$R_a(T_i)$	$S(T_i)$	$A(T_i)$	$S_{ae}(T_i)$	$S_{aR}(T_i)$
1	0,0295	33,9423	2,1883	1,2950	0,3108	3,0489	1,3933
2	0,0140	71,3791	1,8267	1,1400	0,2736	2,6840	1,4694
3	0,0098	102,1985	1,7287	1,0980	0,2635	2,5851	1,4954

f_{x2} ve f_{x3} , 2. ve 3. modlara ait deprem kuvveti vektörleridir. $f_{xi} = S_{aR}(T_i) \Gamma_i [M_0] [V_i]$ için (Çizelge C.4);

$$f_{x2} = \begin{bmatrix} 0,57 \\ -0,06 \\ -0,43 \end{bmatrix}, \quad f_{x3} = \begin{bmatrix} 0,34 \\ 0,10 \\ 0,43 \end{bmatrix}$$

deprem kuvvetleri elde edilir.

X yönündeki deprem etkisinde sisteme etkiyen deprem kuvvetleri, f_{x2} ve f_{x3} deprem kuvveti vektörlerinde u_{13} serbestliğine karşı gelen; f_{x21} ve f_{x31} kuvvet vektörü bileşenleridir. V_{x2} ve V_{x3} taban kesme kuvvetleri

$$V_{x2}=f_{x21}=0,57 \text{ N} \quad , \quad V_{x3}=f_{x31}=0,34 \text{ N}$$

olarak elde edilir.

2. mod için, zati yükler ve x yönündeki deprem yükü etkisinde $F_{(x)analiz2}=F_{zati}+F_{(x)deprem2}$ yüklemesi için genel koordinat takımında sisteme ait, i düğüm numarasını belirtmek üzere, $[F_{(x)analiz2}]$ dış kuvvet vektörü, $[R_{(x)analiz2}]$ mesnet tepkisi vektörü, bileşenleri R_{1i} , R_{2i} ve R_{3i} sırasıyla x, y ve z yönünde ve $[U_{(x)analiz2}]$ yer değiştirme vektörü bileşenleri u_{1i} , u_{2i} ve u_{3i} sırasıyla x, y ve z yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -3,68 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad , \quad [F_{(x)deprem2}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,57 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad , \quad [R_{(x)analiz2}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} \text{ N} \quad ,$$

$$[U_{(x)analiz2}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{(x)deprem2}] + [R_{(x)analiz2}] = [K][U_{(x)analiz2}]$$

Ek Açıklama-C.3'te elde edilen, $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0(x)analiz2}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0(x)analiz2}] = [K_0][U_{0(x)analiz2}]$$

$[F_{0(x)analiz2}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0(x)analiz2}] = [K_0]^{-1}[F_{0(x)analiz2}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0(x)analiz2}]$ ve $[F_{0(x)analiz2}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0(x)analiz2}] = \begin{bmatrix} 0,57 \\ -6,03 \\ 0 \end{bmatrix}, [U_{0(x)analiz2}] = \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix}$$

$[F_{0(x)analiz2}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0(x)analiz2}] = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0002 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{(x)analiz2}]$ vektöründe yerine konulursa mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{(x)deprem2}] + [R_{(x)analiz2}] = [K][U_{(x)analiz2}] \text{ ise;}$$

$$[R_{(x)analiz2}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,01 \\ 9,70 \\ 6,03 \\ -1,59 \\ 6,03 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2,96 \\ -4,04 \\ -1,99 \\ 2,96 \\ -1,99 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklemler 3.42'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edildi.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0001 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, [\hat{u}_6] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{16} \\ \hat{u}_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_7] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{17} \\ \hat{u}_{27} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 9,04 \\ -9,04 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -1,14 \\ 1,14 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix},$$

$$[\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -4,15 \\ 4,15 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_6]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{16} \\ \hat{P}_{26} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \text{ N}, [\hat{P}_7]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{17} \\ \hat{P}_{27} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2,65 \\ -2,65 \end{bmatrix} \text{ N}$$

3. mod için, zati yükler ve x yönündeki deprem yükü etkisinde $F_{(x)\text{analiz3}}=F_{\text{zati}}+F_{(x)\text{deprem3}}$ yüklemesi için i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sırasıyla sisteme ait, $[F_{(x)\text{analiz3}}]$ dış kuvvet vektörü, $[R_{(x)\text{analiz3}}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} , R_{2i} ve R_{3i} sırasıyla x, y ve z yönünde ve $[U_{(x)\text{analiz3}}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} , u_{2i} ve u_{3i} sırasıyla x, y ve z yönünde aşağıdaki gibidir.

$$[F_{\text{zati}}]=\begin{bmatrix} 0 \\ -3,68 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, [F_{(x)\text{deprem3}}]=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,34 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N}, [R_{(x)\text{analiz3}}]=\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} =\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} \text{ N},$$

$$[U_{(x)analiz3}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{(x)depem3}] + [R_{(x)analiz3}] = [K][U_{(x)analiz3}]$$

Ek Açıklama-C.3'te elde edilen, $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0(x)analiz3}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere

$$[F_{0(x)analiz3}] = [K_0][U_{0(x)analiz3}]$$

$[F_{0(x)analiz3}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, indirgenmiş rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0(x)analiz3}] = [K_0]^{-1}[F_{0(x)analiz3}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0(x)analiz3}]$ ve $[F_{0(x)analiz3}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0(x)analiz3}] = \begin{bmatrix} 0,34 \\ -6,03 \\ 0 \end{bmatrix}, [U_{0(x)analiz3}] = \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix}$$

$[F_{0(x)analiz3}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0(x)analiz3}] = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0002 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{(x)analiz3}]$ vektöründe yerine konulursa mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{(x)depem3}] + [R_{(x)analiz3}] = [K][U_{(x)analiz3}] \text{ ise;}$$

$$[R_{(x)analiz3}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,01 \\ 9,70 \\ 6,03 \\ -1,41 \\ 6,03 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2,96 \\ -4,08 \\ -1,94 \\ 2,96 \\ -1,94 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.43'ten yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0001 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_6] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{16} \\ \hat{u}_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_7] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{17} \\ \hat{u}_{27} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 9,04 \\ -9,04 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -1,14 \\ 1,14 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix},$$

$$[\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -4,15 \\ 4,15 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_6]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{16} \\ \hat{P}_{26} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_7]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{17} \\ \hat{P}_{27} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2,65 \\ -2,65 \end{bmatrix} N$$

Z yönündeki deprem kuvvetleri için etki katsayıları vektörü, $[r]$, z yönündeki deprem yükü durumunda sırasıyla u_{13} , u_{23} ve u_{33} serbestliklerine karşılık gelen değerler aşağıdaki gibidir.

$$[r]=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Çizelge C.5. Sistemin, modlara karşılık gelen genelleştirilmiş parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i (s^{-1})	$L_i = (A_i)^T [M_0][r]$	$m_i = [A_i]^T [M_0][A_i]$	$\Gamma_i = L_i/m_i$	$m_i^* = \Gamma_i L_i$
1	0,0295	33,9423	-0,769	1,00	-0,7685	0,5909
2	0,0140	71,3791	-0,065	1,00	-0,065	0,0042
3	0,0098	102,1985	0,138	1,00	0,1383	0,0191

DBYBHY 2007 Denklem 2.14'e göre göz önüne alınacak mod sayısı, yeterli mod sayısı (Çizelge C.5): $\Sigma m_i^* > 0,90 \Sigma m_i = 0,55$ buna göre 1. mod yeterli: $m_1^* = 0,59$ 'dur.

Çizelge C.6. Sistemin, modlara karşılık gelen azaltılmış ivme spektrumu parametreleri

Mod (i)	T_i (s)	ω_i (s^{-1})	$R_a(T_i)$	$S(T_i)$	$A(T_i)$	$S_{ae}(T_i)$	$S_{aR}(T_i)$
1	0,0295	33,9423	2,1883	1,2950	0,3108	3,0489	1,3933
2	0,0140	71,3791	1,8267	1,1400	0,2736	2,6840	1,4694
3	0,0098	102,1985	1,7287	1,0980	0,2635	2,5851	1,4954

f_{z1} , 1. modlara ait deprem kuvveti vektörüdür. $f_{zi}=S_{aR}(T_i) \Gamma_i[M_0][V_i]$ için (Çizelge C.6);

$$f_{z1} = \begin{bmatrix} -0,04 \\ 0,82 \\ -0,16 \end{bmatrix}$$

deprem kuvvetleri elde edilir.

Z yönündeki deprem etkisinde sisteme etkiyen deprem kuvvetleri, f_{z1} deprem kuvveti vektörüdür. u_{33} serbestliğine karşı gelen; f_{z13} kuvvet vektörü bileşenidir. V_{z1} taban kesme kuvveti

$$V_{z1}=f_{x21}=-0,16 \text{ N}$$

olarak elde edilir. 1. mod için, zati yükler ve z yönündeki deprem yükü etkisinde ($F_{(z)analiz1}=F_{zati}+F_{(z)deprem1}$) yüklemesi için i düğüm numarasını belirtmek üzere genel koordinat takımında sisteme ait, $[F_{(z)analiz1}]$ dış kuvvet vektörü, $[R_{(z)analiz1}]$ mesnet tepkisi vektörünün bileşenleri R_{1i} , R_{2i} ve R_{3i} sırasıyla x, y ve z yönünde ve $[U_{(z)analiz1}]$ yer değiştirme vektörünün bileşenleri u_{1i} , u_{2i} ve u_{3i} sırasıyla x, y ve z yönünde olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$[F_{zati}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -3,68 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -6,03 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \\ 0 \\ -2,96 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} , [F_{(z)deprem1}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,16 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad [R_{(z)analiz1}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} \text{ N} ,$$

$$[U_{(z)analiz1}] = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \\ u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ u_{14} \\ u_{24} \\ u_{34} \\ u_{15} \\ u_{25} \\ u_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m$$

Aşağıdaki eşitlikte, sınır koşulları göz önünde bulundurularak, yer değiştirmeleri sıfır olan terimlerin sütun ve satırları silinirse,

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{(z)deprem1}] + [R_{(z)analiz1}] = [K][U_{(z)analiz1}]$$

Ek Açıklama-C.3'te elde edilen, $[K_0]$ indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ve $[U_{0(z)analiz1}]$ indirgenmiş sistem yer değiştirme vektörü olmak üzere;

$$[F_{0(z)analiz1}] = [K_0][U_{0(z)analiz1}]$$

$[F_{0(z)analiz1}]$ indirgenmiş sistem kuvvet vektörü elde edilir. Denklemin her iki tarafı soldan, rijitlik matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$[U_{0(z)analiz1}] = [K_0]^{-1}[F_{0(z)analiz1}]$$

eşitliği elde edilir. $[U_{0(z)analiz1}]$ ve $[F_{0(z)analiz1}]$ aşağıdaki gibidir.

$$[F_{0(z)analiz1}] = \begin{bmatrix} 0 \\ -6,03 \\ -0,16 \end{bmatrix}, [U_{0(z)analiz1}] = \begin{bmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix}$$

$[F_{0(z)analizl}]$ ve $[K_0]^{-1}$ denklemde yerine konulursa

$$[U_{0(z)analizl}] = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,0002 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler $[U_{(z)analizl}]$ vektöründe yerine konulursa mesnet tepkileri aşağıda ifade edildiği gibi bulunur.

$$[F] = [F_{zati}] + [F_{(z)deprem}] + [R_{(z)analizl}] = [K][U_{(z)analizl}] \text{ ise;}$$

$$[R_{(z)analizl}] = \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} \\ R_{13} \\ R_{23} \\ R_{33} \\ R_{14} \\ R_{24} \\ R_{34} \\ R_{15} \\ R_{25} \\ R_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,01 \\ 9,70 \\ 6,03 \\ -1,17 \\ 6,03 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2,96 \\ -4,03 \\ -1,84 \\ 2,96 \\ -1,84 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Denklem 3.43'ten yararlanarak eleman uçlarındaki yerel yer değiştirme vektörü $[\hat{u}_m] = [T_m][u_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{u}_{im} , $i = 1, 2$ ve m eleman numarası olmak üzere aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{u}_1] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{11} \\ \hat{u}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_2] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{12} \\ \hat{u}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0001 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_3] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{13} \\ \hat{u}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_4] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{14} \\ \hat{u}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_5] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{15} \\ \hat{u}_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad [\hat{u}_6] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{16} \\ \hat{u}_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m},$$

$$[\hat{u}_7] = \begin{bmatrix} \hat{u}_{17} \\ \hat{u}_{27} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Denklem 3.28'den yararlanarak eleman uçlarındaki yerel kuvvet vektörü $[\hat{P}_m]=[k_m][\hat{u}_m]$ ve bu vektörün bileşenleri \hat{P}_{im} , olarak aşağıdaki değerler elde edilir.

$$[\hat{P}_1]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{21} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_2]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{22} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 9,04 \\ -9,04 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_3]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{13} \\ \hat{P}_{23} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -1,14 \\ 1,14 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_4]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{14} \\ \hat{P}_{24} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix},$$

$$[\hat{P}_5]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{15} \\ \hat{P}_{25} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -4,15 \\ 4,15 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_6]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{16} \\ \hat{P}_{26} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} N, [\hat{P}_7]=\begin{bmatrix} \hat{P}_{17} \\ \hat{P}_{27} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2,65 \\ -2,65 \end{bmatrix} N$$