

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOLU VİYADÜĞÜ'NÜN DEPREM
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

121 329

Hakan TEMİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
DEPREM VE YAPI BİLİMLERİ
ANABİLİM DALI

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr.M. Eren UÇKAN

GEBZE

2002

121329



Hakan Temiz' in tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/09/2002 tarih ve 2002/28 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Deprem ve Yapı Bilimleri Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (Tez Danışmanı)

: Yrd. Doç. Dr. Eren Uçkan

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Bülent Akbaş

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr Atilla Öven

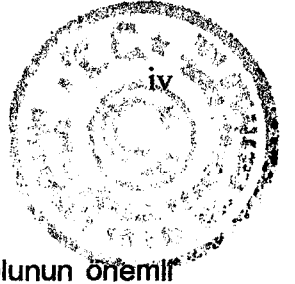
ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12/12/2002 tarih ve 2002/16 sayılı kararı.

İmza/Mühür



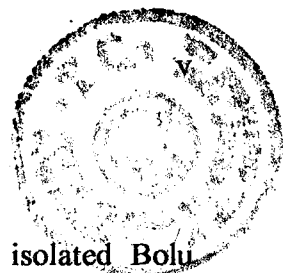
YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ



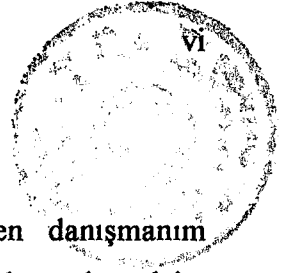
ÖZET

Tezde; Avrupa ve Asya kıtalarını birbirine bağlayan TEM otoyolunun önemli bir bağlantı noktasını oluşturan sismik olarak izole edilmiş Bolu Viyadüğü' nün deprem performansı araştırılmıştır. Bilindiği üzere Türkiye sismik olarak aktif bir bölgede bulunduğundan, büyük depremlerin meydana gelmesi olağan bir durum teşkil etmektedir. Bu neden sismik performans ve sismik izolasyonu daha da önemli kılmaktadır. 12 Kasım 1999, Düzce depremi meydana geldiği sırada Bolu Viyadüğü büyük ölçüde tamamlanmıştı ve depremden sonra viyadükte elde edilen bulgular bize viyadüğün deprem performansı hakkında fikir vermektedir. Yapı LUSAS Sonlu Elemanlar Analiz Programı ile modellenerek; modal spektral çözümleme yöntemi ve doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi yapılmıştır. Modal analizde yapının dinamik karakteristikleri ilk 10 modu elde edilerek belirlenmiştir. Spektral analizde AASHTO (1992) spektrumu kullanılarak yapının AASHTO şartnamesine uygun olarak inşa edilip edilmediği araştırılmış, doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi ile de yapının sismik izolasyon sisteminde deprem sonrası oluşan etkiler elde edilmiştir. Doğrusal olmayan zaman geçmişi analizinde Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından oluşturulmuş simule deprem datası ve 12 Kasım 1999, Düzce depreminin Bolu kaydı kullanılarak yapının sismik izolasyon sisteminin yeterliliği sorgulanmıştır.

SUMMARY



In this thesis, the seismic performance of the seismically isolated Bolu Viaduct, which contains an important segment of TEM motorway that connects Europe and Asia continents, has been studied. As it's known, Turkey is to be found on a seismically active region, occurrence of large earthquakes constitutes a usual situation. This reason makes seismic performance and seismic isolation more important. When November, 12 1999 Duzce Earthquake occurred, Bolu Viaduct was almostly completed and the observation of the viaduct after the earthquake helped us to inform about the seismic performance of the viaduct. Being modelled by LUSAS finite element analysis program modal, spectral and non-linear time history analysis have been performed. By modal analysis the dynamic characteristics of the structure have been defined by obtaining the first 10 modes. In spectral analysis, by using AASHTO (1992) Guide, and also by the help of non-linear time history analysis the effect that could occur after the earthquake had taken place, at the seismic isolation system of the structure is obtained. In the non-linear time history analysis, by the help of simulated seismic data that is made by Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute and the Bolu record of November, 12 1999 Duzce earthquake, the sufficiency of the seismic isolation system of the viaduct have been inquired.



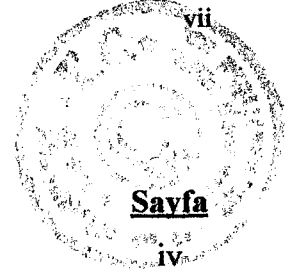
TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince benden yardımlarını esirgemeyen danışmanım
Yrd.Doç.Dr. M. Eren Uçkan ve bölümümüzün diğer hocalarına, bana her daim
destek olan mesai arkadaşlarım ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla



İÇİNDEKİLER DİZİNİ



ÖZET	vii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLÖLAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	xi
2. BOLU VADİSİ BÖLGESİNİN SİSMİK OLARAK İNCELENMESİ	1
3. YAPI HAKKINDA GENEL BİLGİ	3
3.1. Viyadük	4
3.2. Kolonların Enkesit ve Boykesitten Görünüşleri	4
3.2.1. EP Tipi	6
3.2.2. VP Tipi	7
3.2.3. VPJ Tipi	8
3.2.4. Yan Ayaklardaki EP	9
4. YAPININ TASARIMI	9
5. DEPREMLER	10
6. VİYADÜĞÜN YAKIN DEPREMLERDEKİ PERFORMANSI	14
6.1. 17 Ağustos 1999 Depreminin Viyadük Üzerindeki Etkisi	16
6.2. 12 Kasım 1999 Depreminin Viyadük Üzerindeki Etkisi	16
6.2.1. Yer Hareketi	16
6.2.2. Yapısal Hasar	17
7. YAPININ ANALİZİ	18
7.1. Modelin Geliştirilmesi	18
7.2. Modal Analiz	19
7.3. Spektral Analiz	25
7.4. Lineer (Doğrusal) Olmayan Zaman Geçmişi Analizi	30
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	59

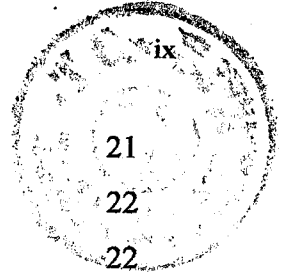
ŞEKİLLER DİZİNİ



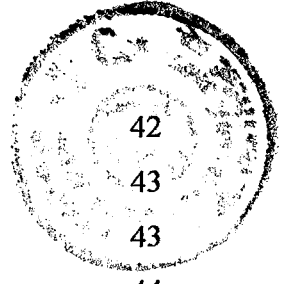
Sekil

Sayfa

1.1. Düzce Depreminin Odak Noktasını Gösteren Harita	1
1.2. Düzce Depreminde Kaydedilen Maksimum Yatay Yer İvmesi	1
1.3. Bolu Viyadüğü' nün Havadan Görünümü. (Fay Kırığı Kırmızı Çizgiyle Gösterilmektedir.)	2
2.1. Projenin Konumu ve Bölgenin Sismik Açidan Derecelendirilmesi	3
3.1. Bolu Viyadüğü' nün Genel Görünümü, Kaynaşlı Vadisi	4
3.2. Viyadüğün İki Genleşme Derzi Arasında Kalan 10 Açıklıktan Oluşan Kısım	5
3.3. Kolonların Enkesit ve Boykesitten Görünüşleri	6
3.4. Sismik Aygıtın Kolonun Üst Kısımına Yerleştirilmiş Hali	7
3.5. Çok yönlü EP Cihazının Nötr Pozisyonda Ve Maksimum Deplasmandaki Hali	7
3.6. Birebir Ölçekli Test Altındaki EP Aygıtı	8
4.1. $A=0.4$, Zemin Sınıfı 2 için % 5 Sönümlü AASHTO Tasarım Spektrumu	10
4.2. Bir EP Aygıtının Kuvvet Deplasman Grafiği	11
4.3. Mukabele Spektrumu Ve Yapay Akseleretrelerle Karşılaştırılması	12
4.4. Akan Çelik Aygıtın 480 mm Genlikteki Yanal Kuvvet-Deplasman Döngüsü (Ghasemi et al., 2000)	13
4.5. Her Kolon Bölgesindeki Sismik İzolasyon Sisteminin Hayali Bilineer Histeretik Davramışı (Astaldi S.p.A., 2000)	13
5.1. Düzce T South 12.11.1999 Akselerogramı	14
5.2. Düzce L West 12.11.1999 Akselerogramı	15
5.3. Bolu Nord T 12.11.1999 Akselerogram	15
5.4. Bolu Nord L 12.11.1999 Akselerogram	15
6.1. Köprü'nün 45. Ayağındaki Dönme	16
6.2. 45. Ayağın Mesnedi Etrafındaki Zeminin Durumu	17
7.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Şematik Görünümü	19
7.1. Mod 1' in Yer Değiştirmesi	20
7.2. Mod 2' in Yer Değiştirmesi	21



7.3. Mod 3' ün Yer Değiştirmesi	21
7.4. Mod 4' ün Yer Değiştirmesi	22
7.5. Mod 5' in Yer Değiştirmesi	22
7.6. Mod 6' nün Yer Değiştirmesi	23
7.7. Mod 7' nin Yer Değiştirmesi	23
7.8. Mod 8' in Yer Değiştirmesi	24
7.9. Mod 9' un Yer Değiştirmesi	24
7.10. Mod 10' nun Yer Değiştirmesi	25
7.11. Spektrum x yönünderken F_x diyagramı	26
7.12. Spektrum x yönünderken F_y diyagramı	27
7.13. Spektrum x yönünderken M_z diyagramı	27
7.14. Spektrum x yönünderken deplasman vektörleri	28
7.15. Spektrum y yönünderken F_x diyagramı	28
7.16. Spektrum y yönünderken F_y diyagramı	29
7.17. Spektrum y yönünderken M_z diyagramı	29
7.18. Spektrum y yönünderken deplasman vektörleri	30
7.19. Kandilli Bolu simule Deprem Datasının 20 Saniyelik Bölümü	31
7.20. Elasto-Plastik Joint Elemanın Kuvvet-Deformasyon Şeması	32
7.21. 12. ve 2. Nodların Zaman-Deplasman Grafiğı	32
7.22. 1 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	33
7.23. 2 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	33
7.24. 3 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	34
7.25. 4 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	34
7.26. 5 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	35
7.27. 6 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	35
7.28. 7 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	36
7.29. 8 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiğı	36
7.30. 9 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiğı	37
7.31. 10 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiğı	37
7.32. 11 No ' lu İzolatörün Zaman Deplasman Grafiğı	38
7.33. 3 No' lu İzolatörün Zaman – Deplasman Grafiğı	41
7.34. 1 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiğı	41
7.35. 2 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiğı	42



7.36. 3 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	42
7.37. 4 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	43
7.38. 5 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	43
7.39. 6 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	44
7.40. 7 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	44
7.41. 8 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	45
7.42. 9 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	45
7.43. 10 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	46
7.44. 11 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	46
7.45. 12 Kasım 1999, Düzce depremi Bolu L 0,00 kaydı	47
7.46. 7.No' lu İzolatörün Zaman- Deplasman Grafiği	48
7.47. 5..No' lu İzolatörün Zaman- Deplasman Grafiği	50
7.48. 1 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	50
7.49. 2 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	51
7.50. 3 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	51
7.51. 4 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	52
7.52. 5 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	52
7.53. 6 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	53
7.54. 7 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	53
7.55. 8 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	54
7.56. 9 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	54
7.57. 10 No' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	55
7.58. 11no' lu İzolatörün Deplasman Grafiği	55

TABLÖLAR DİZİNİ



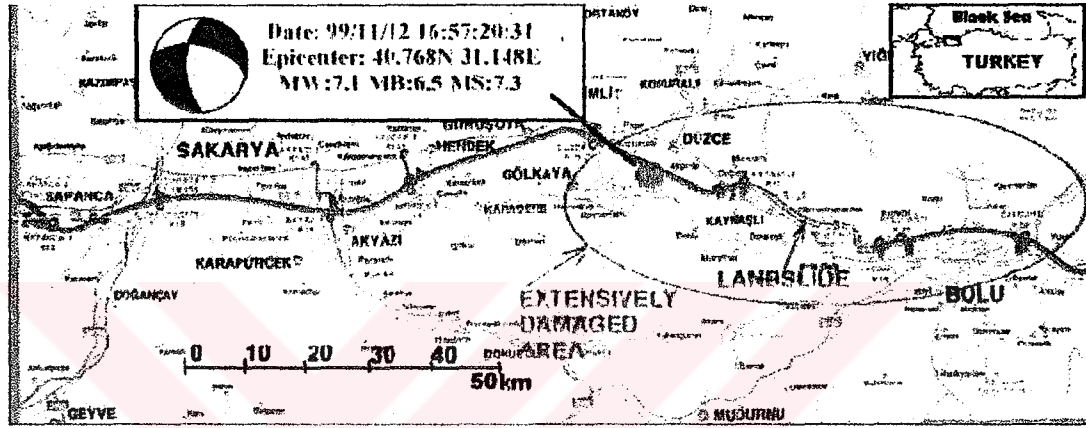
Tablo

Sayfa

4.1. Pilon ve Tabliye Arasındaki Rölatif Deplasmanlar (mm).	12
7.1. Modeldeki Pilonların ve Tabliyenin Parametrik Özellikleri	18
7.2. Yapının Hesaplanan İlk On Doğal Frekansı	20
7.3. x Doğrultusunda, Boylamasına Etkitilen Deprem Sonucu Oluşan Maksimum İzolatör Deplasmanları	39
7.4. z Doğrultusunda, Enine Etkitilen Deprem Sonucu Oluşan Maksimum İzolatör Deplasmanları	40
7.5. x Doğrultusunda, Enine Etkitilen Düzce Depremi Sonucu Oluşan Maksimum izolatör deplasmanları	48
7.6. x Doğrultusunda, Enine Etkitilen Düzce Depremi Sonucu Oluşan Maksimum İzolatör Deplasmanları	49

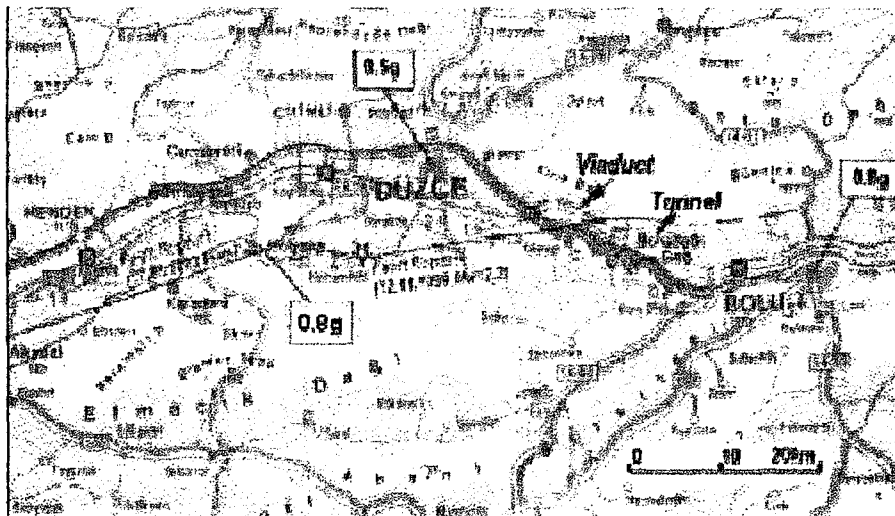
1. GİRİŞ

Yıkıcı 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden yaklaşık 3 ay sonra, 12 Kasım 1999'da Türkiye moment magnitüdü 7.2 olan başka bir depremle sarsıldı. Düzce depremi denilen bu deprem 45 km' lik bir yüzey kırığı ve 5 m sağ yanal atım ile meydana gelmiştir. Kırık 75 km civarında olan Düzce fayının doğu bölümünde oluşmuştur. Bu fayın batıda bulunan 30 km' sinin 17.08.1999 Kocaeli depreminde kırıldığı tahmin edilmiştir.



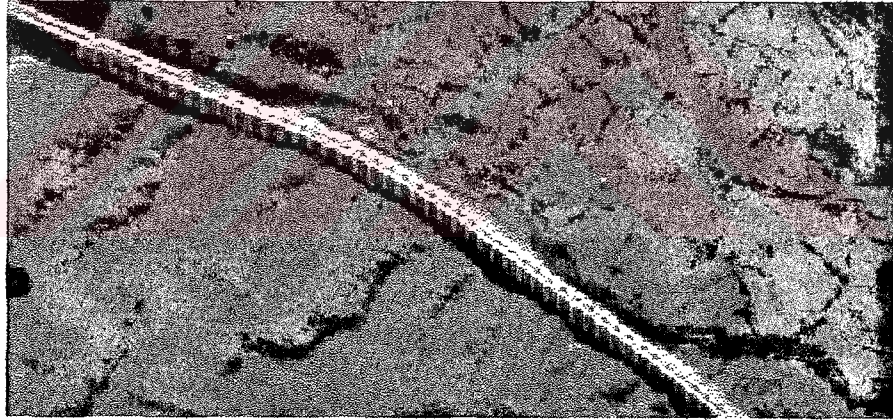
Şekil 1.1. Düzce Depreminin Odak Noktasını Gösteren Harita

Odak noktasının 30 km kadar yakınındaki Düzce yer hareketi istasyonunda 0.8 g' lik maksimum zemin ivmesi (PGA) kaydedildi. Düzce depremi yaklaşık 1000 kadar insan kaybına ve 5000 kadar da yaralanmaya sebep oldu. Aynı zamanda Düzce



Şekil 1.2. Düzce Depreminde Kaydedilen Maksimum Yatay Yer İvmesi

depremi, deprem anında yapımı devam etmekte olan, sismik olarak izole edilmiş Bolu Viyadüğü' nde de hasara yol açmıştır. Bu viyadük TEM otoyolunun tamamlanması gereken son 24 km' lik bölümün bir parçasını oluşturmaktadır. Şekil 1.1' de bu bölüm kırmızı çember içinde görülmektedir. Bu kısımda bulunan viyadük Düzce fayına yakınlığı ve değişken jeolojik koşullar sebebiyle belki de dizaynı ve yapımı en zor olan parçayı teşkil etmektedir. Düzce depreminden sonra bu bölümde yapılan incelemeler göstermektedir ki Bolu Viyadüğü' nün üstyapısına gelen hasarın sebebi yakın-fay etkisidir[Ghasemi et al., 2000]. Viyadüğün ayakları arasında yüzeysel fay izi görülebilmektedir ve deprem kayıtlarından yüksek-hızlı itmelerin meydana geldiği gözlenmektedir. Yanal atımlı fayların yırtılması sonucu oluşması normal olan yüksek-hızlı itmelerin etkisinin yüksek yapılar ve otoyol yapıları üzerinde özel problemler teşkil eden depremlerin yakın-saha etkisi sebebiyle olduğu yönünde deliller gözlemlenmektedir. Bu tip problemler çok büyük deplasmanlar, devrilme momentleri, zemin sıvılaşması olasılığı ve diğer enerjiye duyarlı yapısal tepkiler tarafından ortaya konmaktadır.

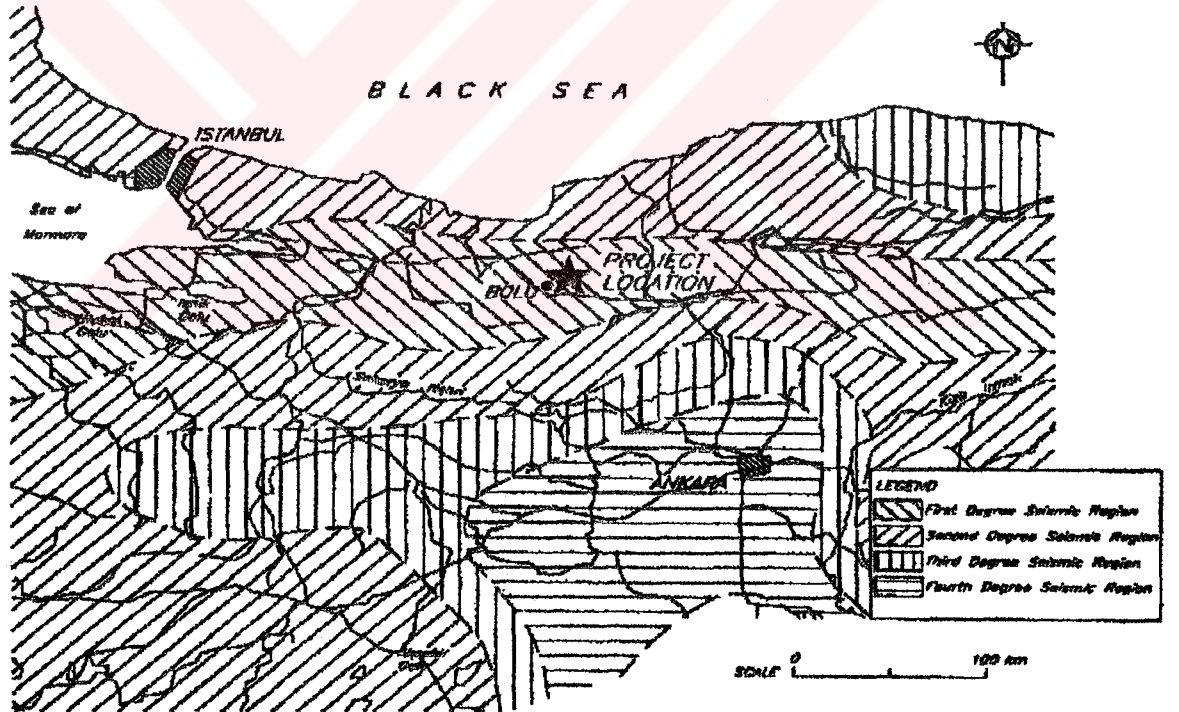


Şekil 1.3. Bolu Viyadüğü' nün Havadan Görünümü. (Fay Kırığı Kırmızı Çizgiyle Gösterilmektedir.)

Yapılan bu çalışmada Bolu Viyadüğü' nün Düzce depreminde gösterdiği performans ve AASHTO şartnamesine (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999) uygun olup olmadığı incelenmiştir.

2. BOLU VADİSİ BÖLGESİNİN SİSMİK OLARAK İNCELENMESİ

Bolu Viyadüğü Projesi civarındaki bölgede bulunan faylar Şekil 2.1' de görüldüğü gibi 1. derece veya sismik açıdan aktif olarak sınıflandırılmışlardır. Türkiye yakın geçmişe kadar da devam etmekte olan büyük depremler bakımından uzun bir geçmişe sahiptir. 1939' dan başlayarak hem doğu tarafına hem de batı tarafına hareket etmiş olan Kuzey Anadolu Fayı birbiri ardına gelen büyük depremler üretmiştir. 1939 ve 1944 yılları arasında batıya doğru göçme kısmen aktif haldeydi. Aslında bu zaman aralığında 600 km uzunluğunda sürekli fayın kırılmasına sebep olmuştur. Depremlerin bu batıya doğru hareketi daha sonra yavaşlamıştır. 1957 ve 1967' de 100 km' lik ek bitişik fayın kırılmasına sebep oldu. 1963 ve 1964' te batıdan ileriye ayrılmış bir aktivite vardır.

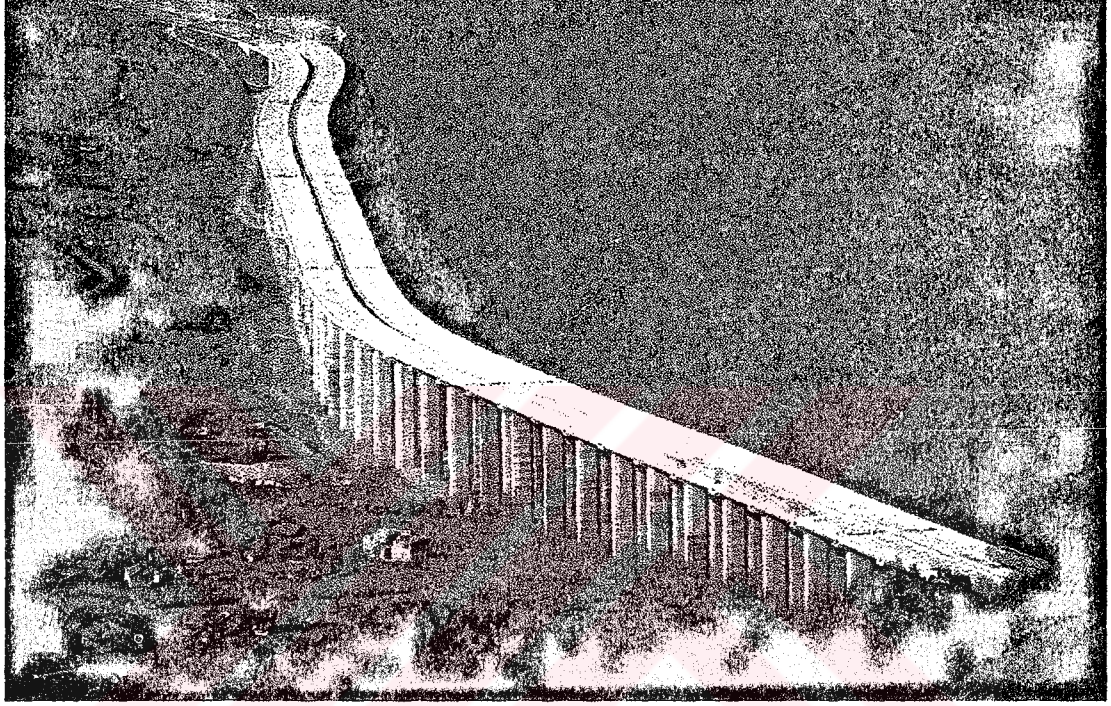


Şekil 2.1. Projenin Konumu ve Bölgenin Sismik Açıdan Derecelendirilmesi.

3. YAPI HAKKINDA GENEL BİLGİ

3.1. Viyadük

Bolu Viyadüğü 59 ikili açıklıktan oluşan ve 2.3 km uzunlukta bir yapıdır. 12 Kasım 1999 Düzce depremi esnasında yaklaşık olarak % 95' i tamamlanmış olup

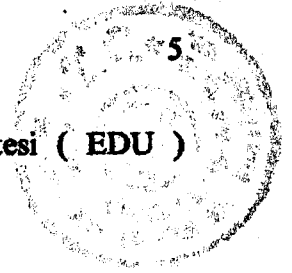


Şekil 3.1. Bolu Viyadüğü' nün Genel Görünümü, Kaynaşlı Vadisi.

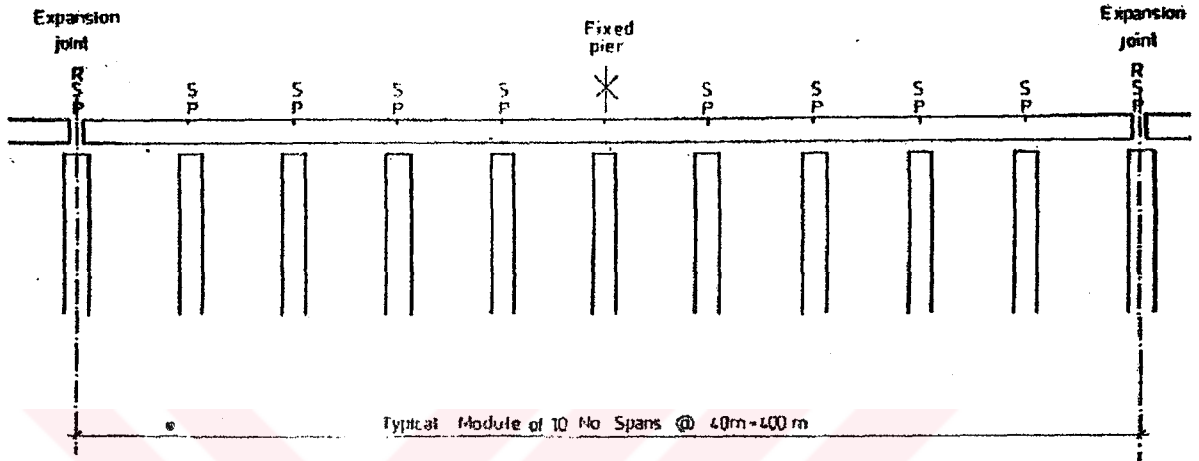
projenin tamamlanması için genişleme birleşimlerinin monte edilmesini beklemekteydi. Viyadüğün açıklıkları 40 m uzunlukta ve 7 adet basit mesnetlenmiş, paslanmaz çelik/politetrafloroethilen (PTFE) kayıcı bir arayüzle mesnet yuvalarına oturan öngermeli betonarme kutu kirişten oluşmaktadır. Tabliye 10' dan fazla açıklıktan oluşan kısımlarda sürekli davranmaktadır. Viyadüğün ayakları tek, sekizgen, yerinde dökme, içi boş, donatılı betonarme kolonlardan oluşmakta ve kesit ölçüleri 4.5'a 8.0 m, boyları ise 10 m' den 49 m' ye kadar değişmektedir. Bu ayaklar deprem esnasında düktil davranmaları için dizayn edilmiş ve detaylandırılmışlardır.

Viyadük aynı zamanda her ayağın başlık kısmında, önemli yer aktivitelerinde enerji-dağıtımı sayesinde sismik kuvveleri azaltan ve uzunlamasına termal

hareketlerde bulunabilmesine imkan veren bir Enerji-Dağıtım Ünitesi (EDU)
sistemini barındırmaktaydı.

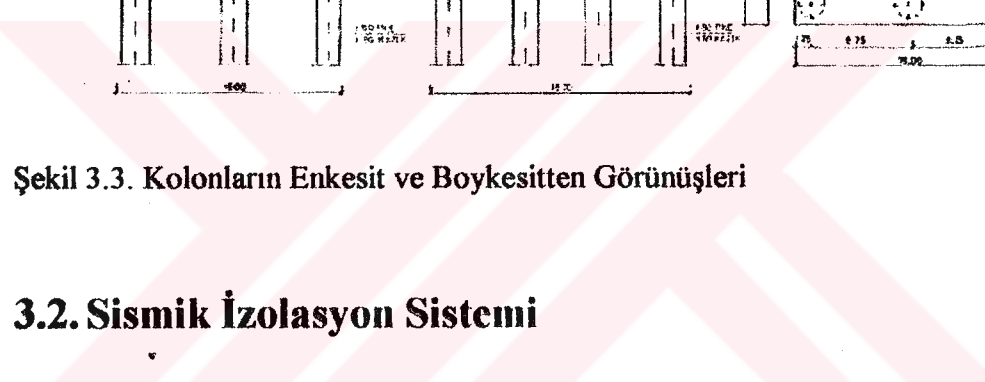


ANATOLIAN MOTORWAY - TURKEY
GÜMÜŞOVA - GEREDE
VIADUCT. I TYPICAL MODULE



NOTE : - R - Longitudinal Restrainer (60cm "stack")
S - Shock Transmission Unit for seismic movement
P - Piston for thermal movement etc

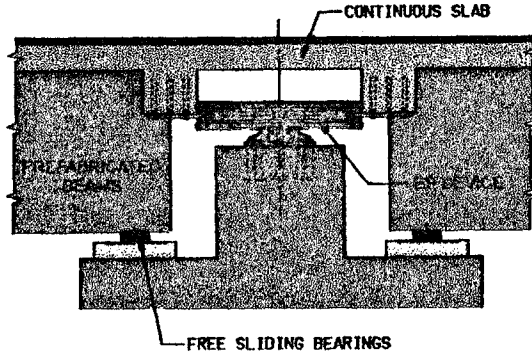
Şekil 3.2. Viyadüğün İki Genleşme Derzi Arasında Kalan 10 Açıklıktan Oluşan Kısmı.



3.2. Sismik İzolasyon Sistemi

Histeretik tipte olan antisismik aygıtlar çelik elemanların döngüsel eğilmesi, akması vasıtasıyla enerji dağıtımını gerçekleştirmektedir. Her bir aygıt C şekilli, çelik, basit histeretik sönuümlendiricilerin kullanımına dayanmaktadır. Her bir sönuümlendirici üniform direnç elde etmek için ve buna bağılı olarak akmadan sonra bütün kesitlerin üniform plastikleşmesini sağlamak için değışken derinlikte çelik dairesel yaydan oluşmuştur. Her köprü ayağıının veya mesnedin üstünde bir aygıt bulunmaktadır. Yapıda hepsi C şekilli olarak tanımlanan elemanlara dayanan 4 çeşit aygıt kullanılmıştır:

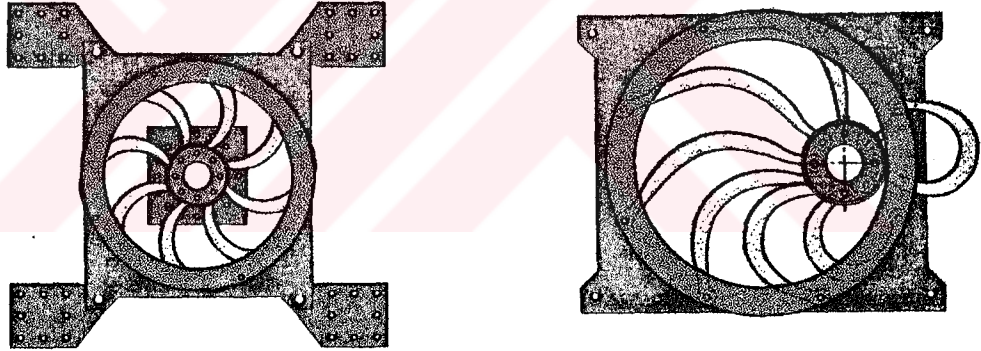
Histeretik tipte olan antisismik aygıtlar çelik elemanların döngüsel eğilmesi, akması vasıtasıyla enerji dağıtımını gerçekleştirmektedir. Her bir aygıt C şekilli, çelik, basit histeretik sönümlendiricilerin kullanımına dayanmaktadır. Her bir sönümlendirici üniform direnç elde etmek için ve buna bağlı olarak akmadan sonra bütün kesitlerin üniform plastikleşmesini sağlamak için değişken derinlikte çelik dairesel yaydan oluşmuştur. Her köprü ayağının veya mesnedin üstünde bir aygıt bulunmaktadır. Yapıda hepsi C şekilli olarak tanımlanan elemanlara dayanan 4 çeşit aygıt kullanılmıştır:



Şekil 3.4. Sismik Aygıtın Kolonun Üst Kısımına Yerleştirilmiş Hali

3.2.1. EP Tipi

Bu aygıt, deprem anında her yöne üniform davranmasına imkan veren 16 adet C şekilli elemanın radyal simetriyle kombinasyonundan oluşmaktadır.



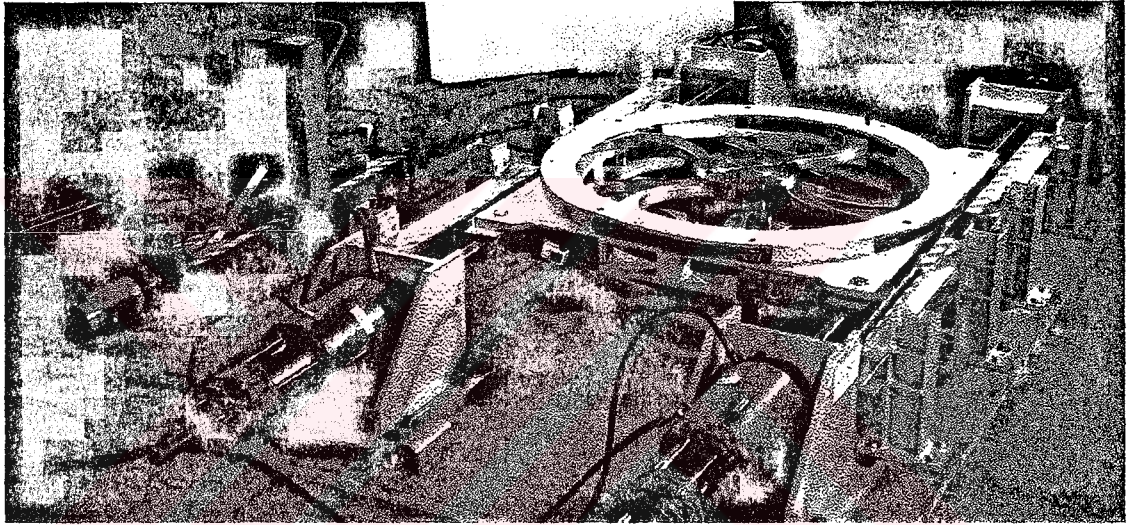
Şekil 3.5. Çok yönlü EP Cihazının Nötr Pozisyonda Ve Maksimum Deplasmandaki Hali

Normal hizmet koşullarında bu aygıt histeretik mesnetlerdeki izin verilebilir gerilmeleri aşmayacak şekilde rüzgar, fren ve kayıcı mesnetlerin diferansiyel sürtünmesinden oluşan yatay yükleri kolonlara aktarmak için dizayn edilmiştir. İki genişleme derzi arasında kalan köprünün her kısmı için kayıcı mesnetlerin sürtünme etkisini minimuma indirmek için her zaman orta kolon veya ortaya en yakın kolonun üstüne sadece bir EP aygıtı yerleştirilmiştir. Deprem durumunda aygıt akma noktasının üzerinde gerilir ve aşağıdaki performans temin edebilir:



- Akma limitindeki kuvvet 1550 kN
- Akma limitindeki deplasman 38 mm
- Tasarım depremiyle deplasman ± 320 mm
- Tasarım depremiyle kuvvet 1860 kN
- En büyük deplasman ± 480 mm

Köprünün bir açıklığının kütlesi 1400 ton olduğundan dolayı, tasarım depremiyle köprüden kolonlara iletilen yatay yük ölü yükün % 13' ü ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 3.6. Birebir Ölçekli Test Altındaki EP Aygıtı

3.2.2. VP Tipi

Bu aygıt içerik ve performans açısından EP tipine benzemekte, fakat ek olarak histeretik mesnete paralel 2 hidrolik darbe iletme ünitesi içermektedir. Darbe iletme üniteleri köprünün uzunlamasına olan yöndeki eksenine paraleldir ve ihmal edilebilecek ölçüdeki dirençle sünme, büzülme ve sıcaklık değişimlerinde yavaş hareketlere izin verir. Deprem durumunda rijit hale geçerler ve aygıt EP tipiyle aynı davranmaktadır.

3.2.3. VPJ Tipi

Bu tip, genleşme derzlerindeki kolonların tepesine yerleştirilir. VP tipiyle benzerlik gösterir fakat enine deprem yükünü bütün bitişik açıklıklara ve uzunlamasına deprem yükünü sadece bir açıklığa eşit olarak iletecek şekilde tasarlanmıştır.

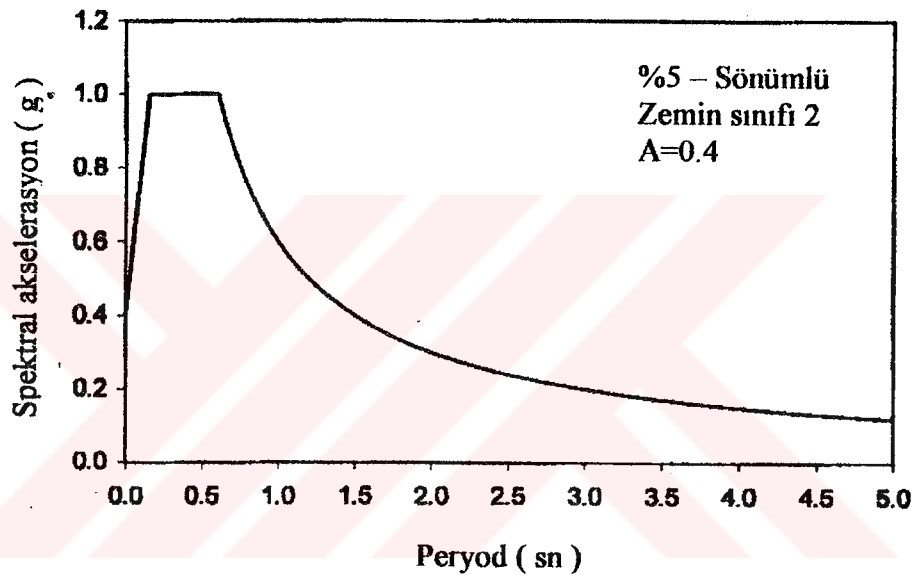
3.2.4. Yan Ayaklardaki EP

Kolonlardaki EP' nin sadece enine yönde hareket eden basitleştirilmiş versiyonudur.



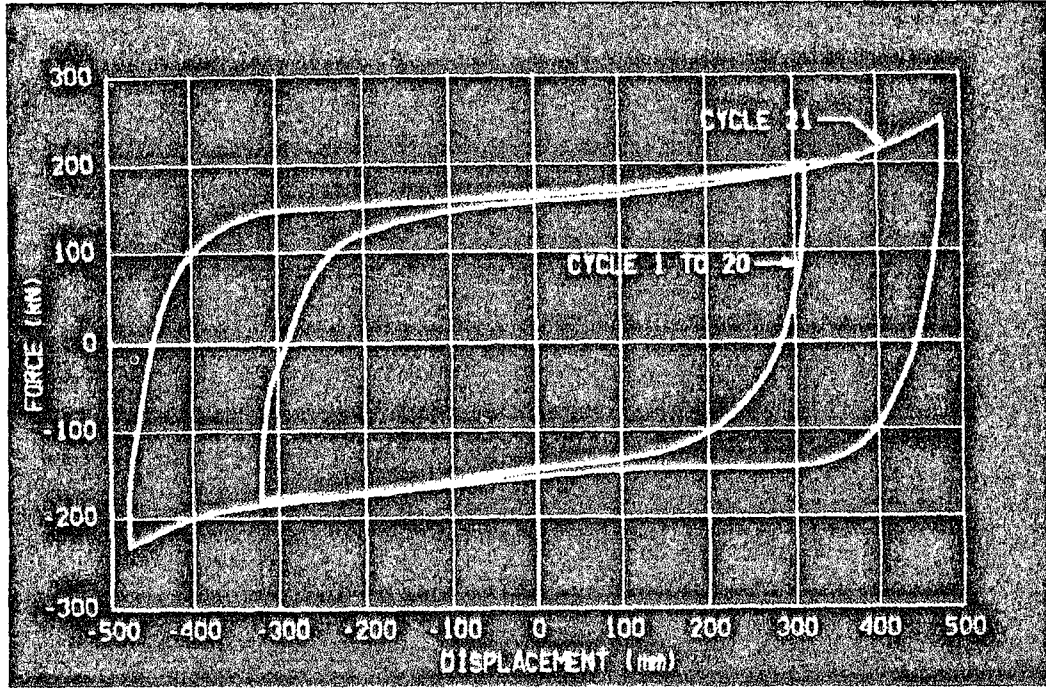
4. YAPININ TASARIMI

Türkiye AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)' a uymakta olan ülkedir. Bununla birlikte viyadüğün tasarımı kısmen 1991 AASHTO ve İtalyan yönetmeliklerini kullanan karma bir kriterin uygulamasını içermektedir. Tasarım sismik kuvvet ve deplasmanları Şekil 4.1' de gösterilen $A=0.4$ ve zemin sınıfı 2 için AASHTO spektrumuna (AASHTO, 1992) uyan yapay akselerometrelerle yapılmış lineer olmayan zaman geçmişi analizi vasıtasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.1. $A=0.4$, Zemin Sınıfı 2 için % 5 Sönümlü AASHTO Tasarım Spektrumu

Köprünün 10 açıklığa kadar olan her bir kısmı kolonların boyları ve zemin karakteristikleri açıklıktan açıklığa göre farklı olduğu için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Yapı mevcut kütleleri ve çatlaksız durumdaki rijitlikleri dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Zemin saha test sonuçlarına uyan rijitliklerle elastik yaylar (hem dönme hem de öteleme için) vasıtasıyla modellenmiştir. Kolon başları ve tabliye arasındaki histeretik sönümlendiriciler, mesnetlerin sürtünmesi göz önünde bulundurularak birebir ölçekli test sonuçlarına uyan lineer olmayan malzeme özellikleriyle "truss" elemanlar kullanılarak modellenmiştir.



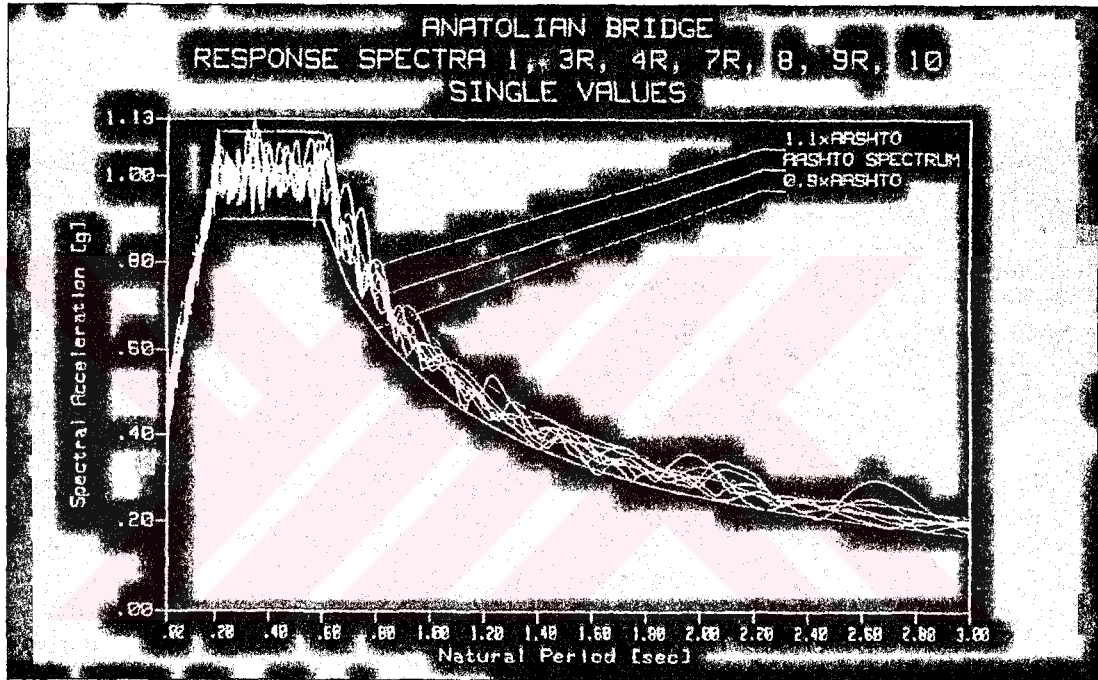
Şekil 4.2. Bir EP Aygıtının Kuvvet Deplasman Grafiği.

Tasarım kuvvetleri ve deplasmanları AASHTO "Guide Specification for Seismic Design of Highways and Bridges" ' da tarif edilen mukabele spektrumuna uyan yapay akselerometrelerle yapılan lineer olmayan zaman geçmişi analizi vasıtasıyla elde edilmiştir. En yüksek zemin akselasyonu (PGA) 0.4 g olarak düşünülmüştür (Şekil 4.3). Analiz 7 farklı yapay akselerometre için tekrar edilmiştir. Kuvvetler ve deplasmanlar için tasarım değerleri 7 simulasyonda elde edilen maksimum değerlerin ortalamaları kabul edilmiştir.

Depremlerden sonra lineer olmayan zaman geçmişi analizi ileriki faktörleri göz önüne alacak uygun datayı oluşturmak için 0.6 g' lik bir PGA dikkate alan sınırlı sayıda durum için tekrar edilmiştir. Analiz sonucu elde edilen tabliye ve pylonlar yada kenar ayaklar arasındaki maksimum rölatif deplasmanlar aşağıdaki tabloda özetlenmiş ve depremden sonra gözlenen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Tablo.4.1. Pilon ve Tabliye Arasındaki Rölatif Deplasmanlar (mm).

Teorik		17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi		12 Kasım 1999 Düzce Depremi	
PGA=0.4 g	PGA=0.6 g	Maksimum	Geri kalan	Maksimum	Geri kalan
320	595	90	1	1000	1000



Şekil 4.3. Mukabele Spektrumu Ve Yapay Akselerometrelerle Karşılaştırılması

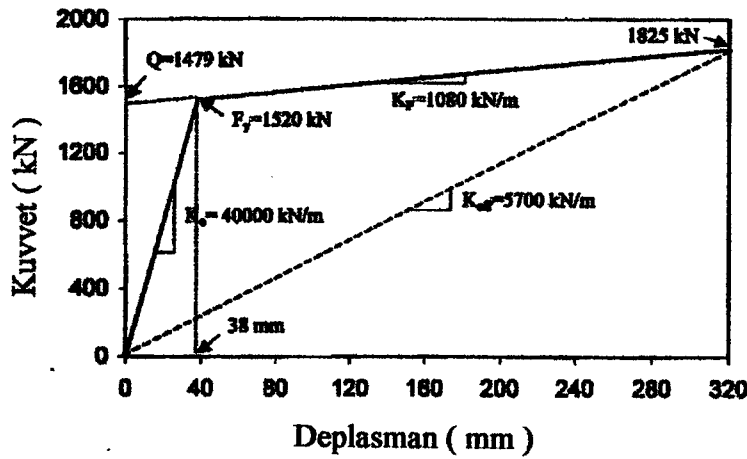
Her bir kolon bölgesi için tasarımda kullanılan sismik izolasyon sisteminin farz olunan bilineer histeretik davranışı Şekil 4.4' te gösterilmiştir (Astaldi S.p.A.,2000). Bu davranış, enerji dağıtım aygıtlarıyla her bir kolon bölgesinde $W=14200$ kN' luk bir ağırlığı taşıyan kayıcı mesnetlerin inelastik davranışlarının kombinasyonudur. Akma kuvveti $F_y=1520$ kN esasen C şekilli enerji dağıtım aygıtlarının akma dayanımından (yaklaşık 1400 kN) ve kalanı da yağlanmış kayıcı mesnetlerdeki kayma kuvvetidir (kayma sürtünme katsayısı 0.01' den az). Sistemin kayma kuvveti ve deplasmanı (38 mm) analizle tutarlıdır (Ciampi and Marioni, 1991). Bununla beraber akmadan sonraki rijitliği K_p kullanılan değer 1080 kN/m' den daha çok deneysel sonuçların gösterildiği Şekil 4.4' teki 800 kN/m değerine daha yakın olduğu

görülmektedir. Her şeye rağmen akmadan sonraki rijitlik olan K_p 'nin bütün değerleri çok düşüktür (Elastik rijitlik olan K_e 'den 0.02 ile 0.027 katı), bu da göstermektedir ki sistem yetersiz bir geri dönüşüm kuvveti kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.4. Akan Çelik Aygıtın 480 mm Genlikteki Yanal Kuvvet-Deplasman Döngüsü (Ghasemi et al., 2000)

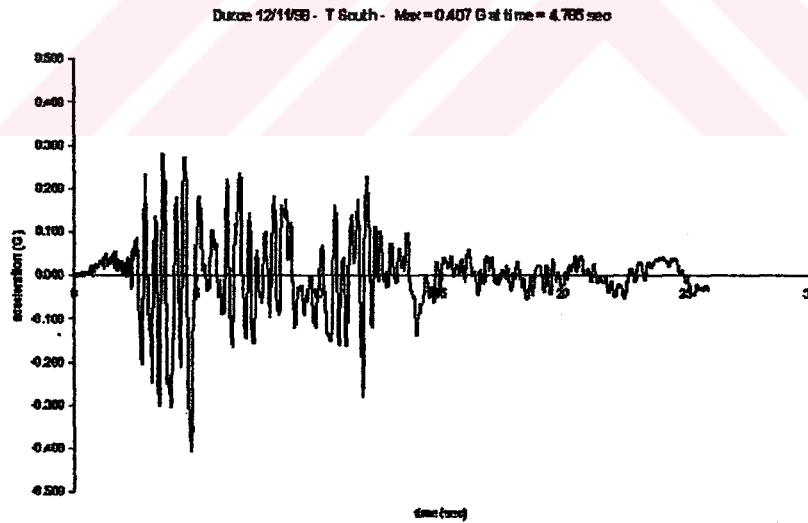
Marioni (2000) efektif rijitlik $K_e=5700$ kN/m olduğunda tasarım deplasmanlarının (tasarım depreminin deplasmanları) 320 mm olması gerektiğini rapor etti. Tasarım deplasmanının 320 mm olarak hesaplanması ilginç ve şaşırtıcıdır, fakat izolasyon mesnetlerinin deplasman kapasitesi sadece 210 mm'dir.



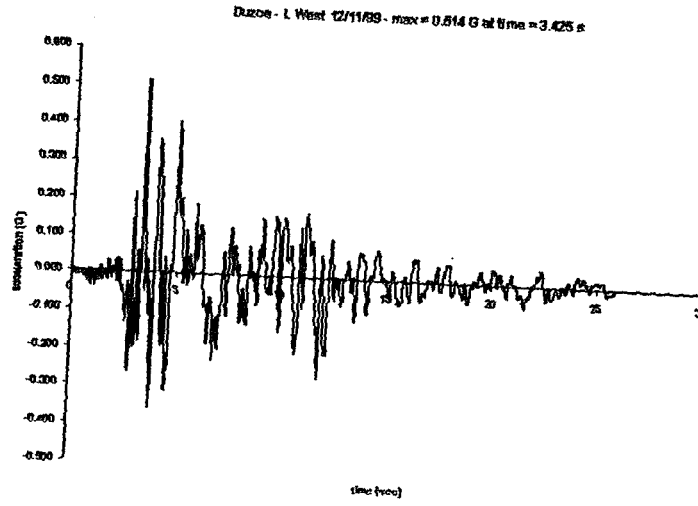
Şekil 4.5. Her Kolon Bölgesindeki Sismik İzolasyon Sisteminin Hayali Bilineer Histeretik Davranışı (Astaldi S.p.A., 2000).

5. DEPREMLER

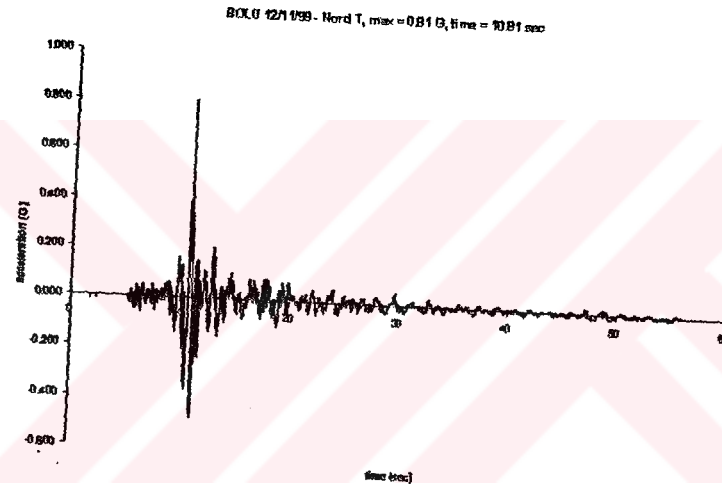
Richter ölçeğine göre büyüklüğü 7.6 olan 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin merkezi viyadükten yaklaşık 120 km uzaklıkta Kocaeli' nin yakınlarındadır. Bununla birlikte Kuzey Anadolu Fayı doğrultusu boyunca, yaklaşık olarak W – E (Batı – Doğu) depremin merkezinden çok uzaklarda bile çok yüksek zemin akselerasyonları ölçülmüştür. Düzce' de viyadükten aşağı yukarı 15 km uzaklıkta ölçülen PGA tasarım değeri olan 0.4 g' e çok yakın olan 0.38 g' di. 12 Kasım 1999 Düzce depreminin merkezi viyadükten sadece birkaç kilometre uzaklıkta, Kaynaşlı civarındaydı. Düzce ve Bolu' da viyadükten 25 km uzaklıkta kaydedilen akselerogramlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Akselerogramların vektöryel bileşiminden en yüksek zemin akselerasyonu Düzce' de 0.90 g ve Bolu' da 0.55 g ile sonuçlanmıştır. Buna ek olarak viyadük, yüzeysel bir zemin kırılmasına maruz kalmıştır. Bu kırılma aşağı yukarı 40 km E – W yönünde sürmekteydi ve toprak kaymaları 500 cm' e ulaşmasına rağmen viyadüğün altında kaymalar yaklaşık 120 cm ile sınırlıydı.



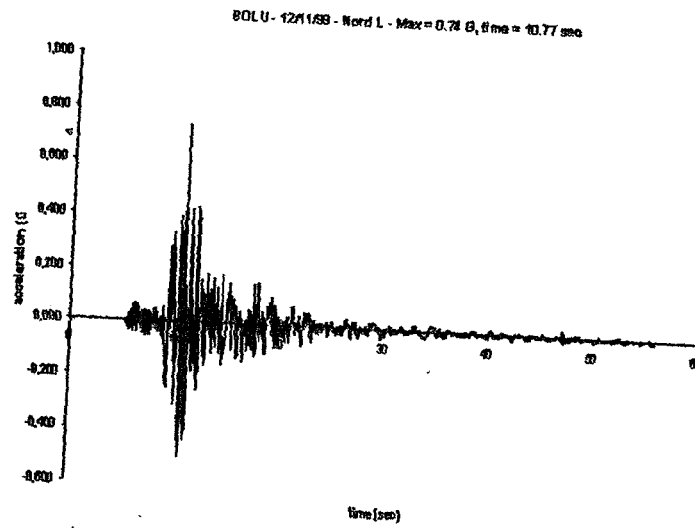
Şekil 5.1. Düzce T South 12.11.1999 Akselerogramı



Şekil 5.2. Düzce L West 12.11.1999 Akselerogramı.



Şekil 5.3. Bolu Nord T 12.11.1999 Akselerogram



Şekil 5.4. Bolu Nord L 12.11.1999 Akselerogram.

6. VİYADÜĞÜN YAKIN DEPREMLERDEKİ PERFORMANSI



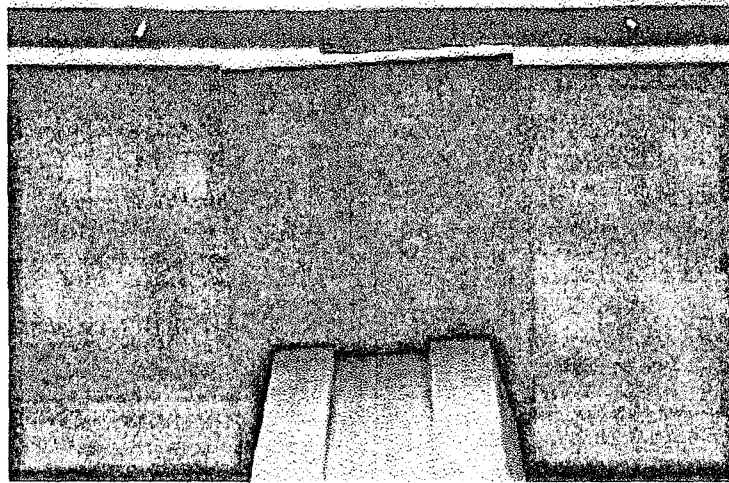
6.1. 17 Ağustos 1999 Depreminin Viyadük Üzerindeki Etkisi

Düzce istasyonunda kaydedilen yer akselerasyonlarının uzunlamasına 0.39g, enine 0.31g ve dikey yönde 0.5g olduğu tahmin edilen maksimum uzunlamasına akselerasyonlara dayanmaktadır. 17 Ağustos 1999, Kocaeli depreminden sonra giriş mesnetlerindeki rölatif hareket uzunlamasına yönde 3-8 cm ve enine yönde 3-7 cm civarındaydı.

6.2. 12 Kasım 1999 Depreminin Viyadük Üzerindeki Etkisi

6.2.1. Yer Hareketi

Ne yazık ki 12 Kasım 1999 depremi esnasında yer hareketi kaydı alınmadığı gözükmemektedir. Düzce’de depremin merkezinin yanında ve yaklaşık viyadüğün 5 km batısındaki güçlü yer hareketi istasyonu önceden belirlenmiş limit 1.0g’ nin üzerinde yer hareketindeki fazlalıktan dolayı kapanmıştır. Bolu’ da viyadüğün yaklaşık 25 km



Şekil 6.1. Köprünün 45. Ayağındaki Dönme.

doğusundaki güçlü yer hareketi kaydı 0.8g'lik maksimum akselerasyona sahiptir ve viyadük bölgesindeki maksimum yer akselerasyonun 1.0g civarında olduğu tahmin edilmektedir.

Köprü'nün güney kısmının hemen yanında zemin kırılması gözlenmiştir ve bu kırılma viyadüğün güney köprüsünün 45. ayağında (doğu tarafından sayılmıştır) köprüyle kesişmiştir. Görülebilir düzeyde eğilme bulunmamasına rağmen 45. ayak dikey ekseninde yaklaşık 12 derece kadar dönmüştür (USC' den Dr. J.P. Bardet tarafından ölçülmüştür) [Referans no 2]. Bazı temel mesnetlerinin etrafında bölgesel sıvılaşmalar gözlene de önemli bir ilgisi bulunmamıştır.



Şekil 6.2. 45. Ayağın Mesnedi Etrafındaki Zeminin Durumu.

6.2.2. Yapısal Hasar

Viyadüğün kolonlarındaki hasar önemsiz miktardaydı. Sadece bazı kolonların alt kısımlarında küçük yatay çatlaklar bulunmaktaydı. Viyadüğün köprülerindeki yapısal hasar genelde üstyapıda ve yan ayaklarda meydana gelmişti.

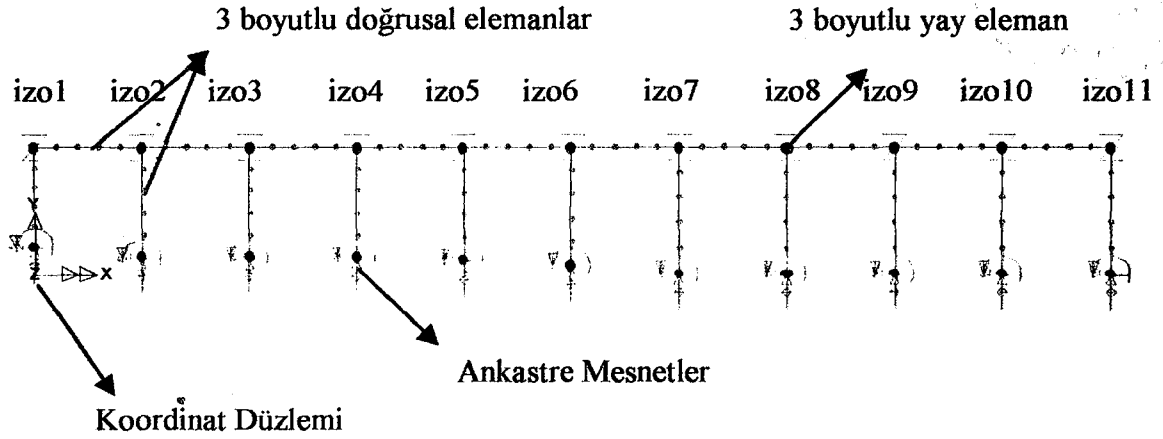
7. YAPININ ANALİZİ

7.1. Modelin Geliştirilmesi

Yapının analizi için 10 açıklıklı bir model geliştirilerek LUSAS sonlu elemanlar programı kullanılarak modal, spektral ve zaman geçmişi analizleri yapılmıştır. Analizde 3 boyutta çalışan elemanlar kullanılmıştır. Kolon ve tabliye kısımlarının modellenmesinde “ 3 boyutlu doğrusal “ elemanlar kullanılıp herbiri 5 adet alt bölümlere ayrılmıştır. Kolon başlarıyla tabliye kısmını birbirine bağlayan izolasyon sistemi “ 3 boyutlu yay “ elemanlarıyla modellenmiştir. Modeldeki geometrik ve materyal parametreleri yapımcı firmanın kabullerine dayanmaktadır (Astaldi Ş.p.A., 2000). Modelde kullanılan parametrik özellikler Tablo.7.1’de görülmektedir:

Tablo.7.1. Modeldeki Pilonların ve Tabliyenin Parametrik Özellikleri.

Özellikler	Pilonlar	Tabliye
Kesit alanı (A)	14.30 m ²	12.88 m ²
y eksenine göre atalet momenti (I _{yy})	106.30 m ⁴	314 m ⁴
z eksenine göre atalet momenti (I _{zz})	38.30 m ⁴	0.58 m ⁴
Burulma sabiti (J)	80	2.33
z doğrultusundaki kesme alanı (A _{sz})	14.30 m ²	12.88 m ⁴
z doğrultusundaki etkili kesit alanı (A _{sy})	14.30 m ²	12.88 m ⁴
Eksantriklik (e _z)	0	0
Elastisite katsayısı (kN / m ²)	2.36E7	3.12E7
Poisson katsayısı	0.17	0.17
Kütle yoğunluğu (t / m ³)	2.502	2.867



Şekil 7.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Şematik Görünümü.

7.2. Modal Analiz

Modal analiz teknikleri n sayıda bilinmeyen deplasman için n sayıda bir takım denklemin çözümüne alternatif olarak geliştirilmiştir. Bunun yerine yapının global davranışını temsil etmesi açısından azaltılmış sayıda bilinmeyen kullanmaya çalışır. Metodun başarısı analiz edilen problemin türüne ve lokal yada global deplasmanların hakim olup olmadığına bağlıdır. Mesela bir çerçevenin deprem yüklemesi bütün yapının salınım yapmasıyla sonuçlanırken, bir arabanın çarpması çarpma noktasında yüksek lokal deformasyonlara sebep olur. Yapının dinamik davranışını anlamak amacıyla ilk olarak modal analiz yapılır. Ölçülen doğal frekans ve mod şekilleri bu modlar meydana geldiğinde yapının nasıl tepki vereceğini anlama konusunda yardımcı olurlar.

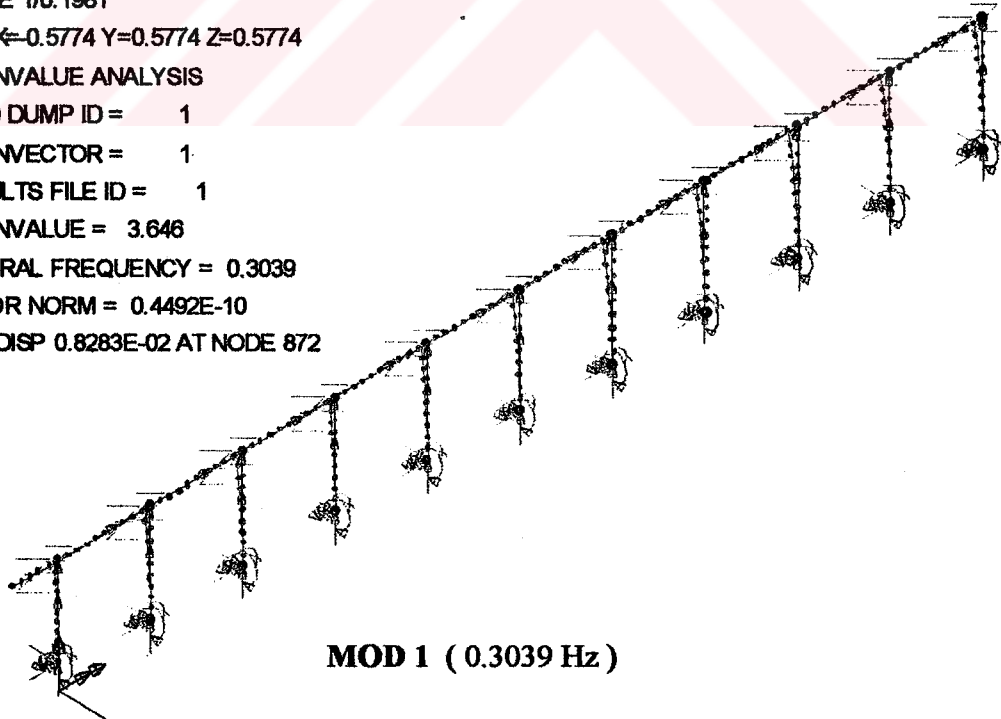
Modal analizin lineer yapısı yüzünden enerji dağıtım elemanlarında (EDU) ve diğer yapısal elemanların modellenmesinde lineer materyal özellikleri kullanılmıştır. İzolatör rijitliği şekil 4.5 ' teki değer olan efektif rijitlik $K_{eff} = 5700 \text{ kN / m}^2$ alınmıştır (Marioni, 1997; Marioni, 2000). Modal analizde eigensolver olarak “ subspace jacobi “ kullanılarak 30 iterasyon sonucunda ilk on modu hesaplanmıştır. Hesaplanan ilk on mod için frekanslar Tablo.7.2' de verilmektedir.

Tablo.7.2. Yapının Hesaplanan İlk On Doğal Frekansı.

Mod	Mod Frekansı (Hz)
1	0.3039
2	0.3183
3	0.3811
4	0.6230
5	0.7153
6	0.7354
7	0.7930
8	0.8807
9	0.9903
10	1.114

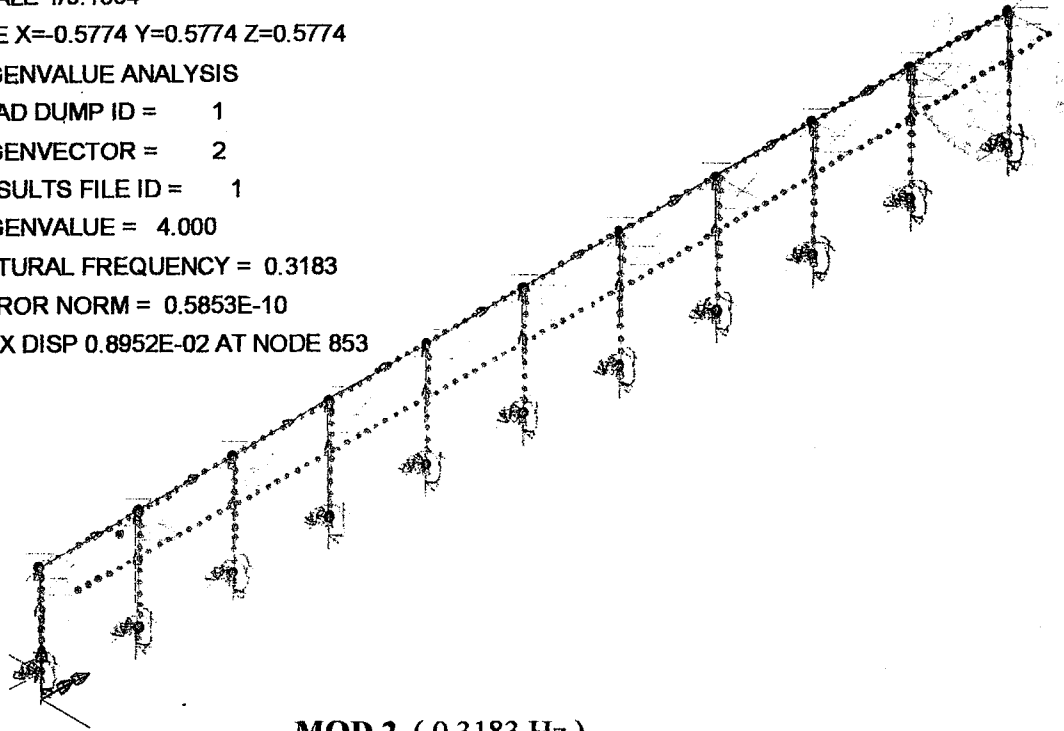
İlk on moda ait yer değiştirmeler ise sırasıyla aşağıda verilmektedir:

SCALE 1/0.1981
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 EIGENVALUE ANALYSIS
 LOAD DUMP ID = 1
 EIGENVECTOR = 1
 RESULTS FILE ID = 1
 EIGENVALUE = 3.646
 NATURAL FREQUENCY = 0.3039
 ERROR NORM = 0.4492E-10
 MAX DISP 0.8283E-02 AT NODE 872



Şekil 7.1. Mod 1' in Yer Değiştirmesi.

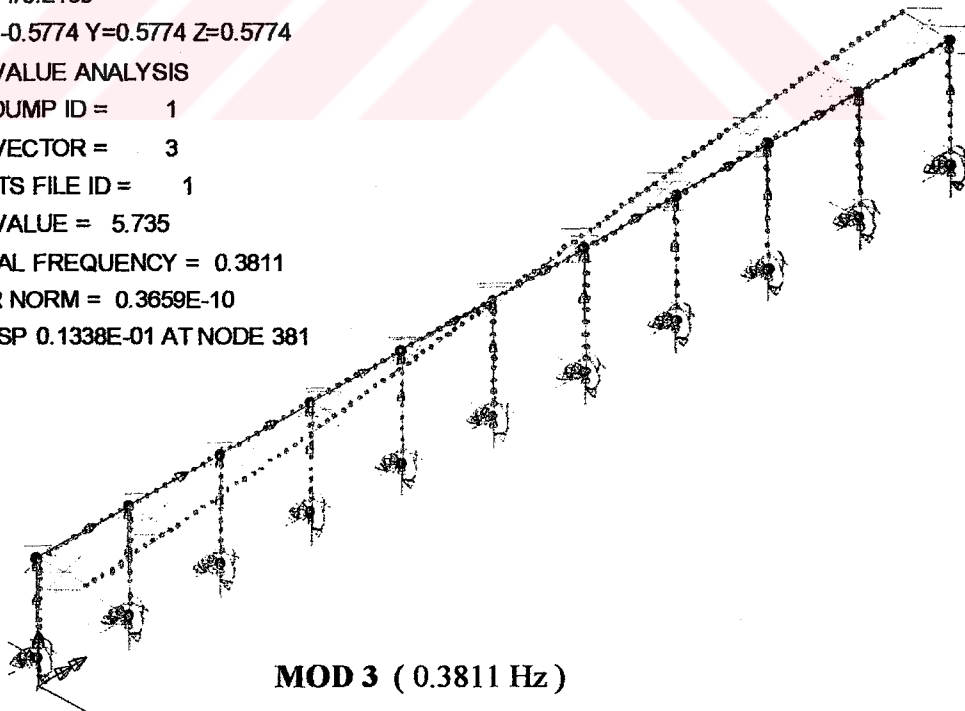
SCALE 1/0.1994
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 EIGENVALUE ANALYSIS
 LOAD DUMP ID = 1
 EIGENVECTOR = 2
 RESULTS FILE ID = 1
 EIGENVALUE = 4.000
 NATURAL FREQUENCY = 0.3183
 ERROR NORM = 0.5853E-10
 MAX DISP 0.8952E-02 AT NODE 853



MOD 2 (0.3183 Hz)

Şekil 7.2. Mod 2' in Yer Değiştirmesi.

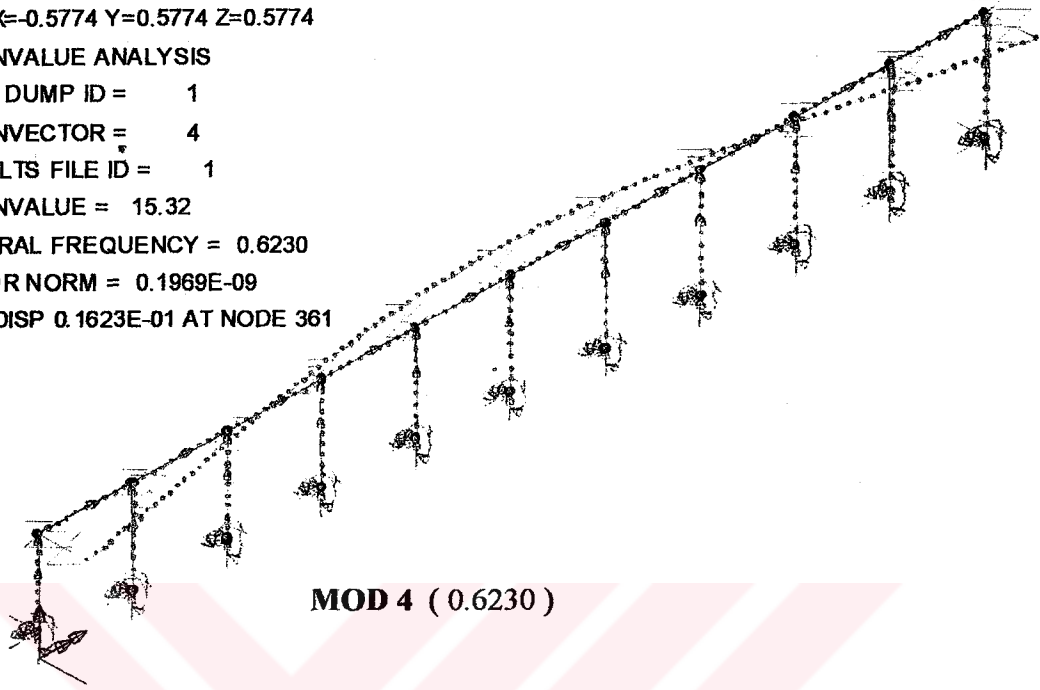
SCALE 1/0.2168
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 EIGENVALUE ANALYSIS
 LOAD DUMP ID = 1
 EIGENVECTOR = 3
 RESULTS FILE ID = 1
 EIGENVALUE = 5.735
 NATURAL FREQUENCY = 0.3811
 ERROR NORM = 0.3659E-10
 MAX DISP 0.1338E-01 AT NODE 381



MOD 3 (0.3811 Hz)

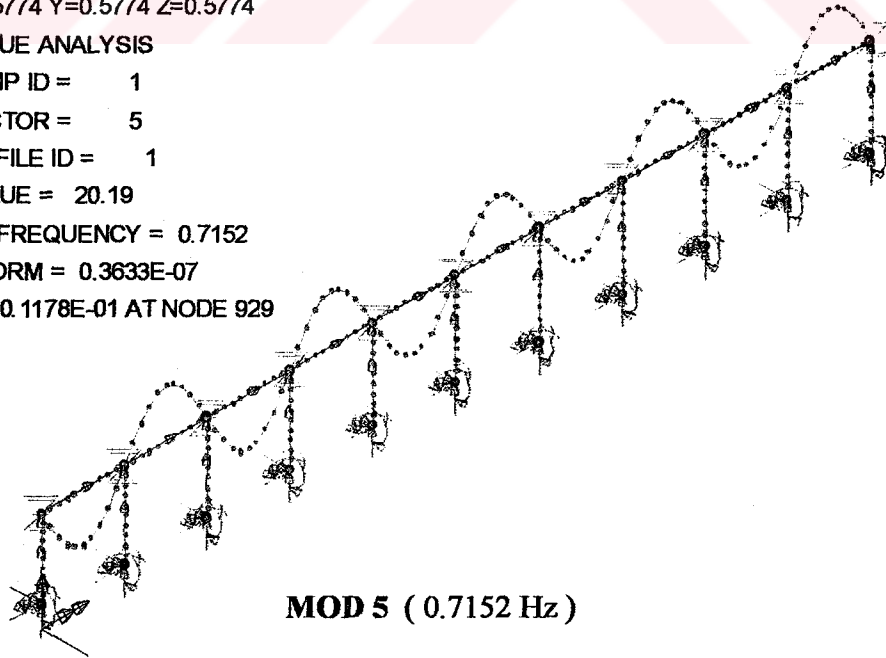
Şekil 7.3. Mod 3' ün yer değiştirmesi.

SCALE 1/0.2071
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 EIGENVALUE ANALYSIS
 LOAD DUMP ID = 1
 EIGENVECTOR = 4
 RESULTS FILE ID = 1
 EIGENVALUE = 15.32
 NATURAL FREQUENCY = 0.6230
 ERROR NORM = 0.1969E-09
 MAX DISP 0.1623E-01 AT NODE 361



Şekil 7.4. Mod 4' ün yer değıştirmesi.

SCALE 1/0.2162
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 EIGENVALUE ANALYSIS
 LOAD DUMP ID = 1
 EIGENVECTOR = 5
 RESULTS FILE ID = 1
 EIGENVALUE = 20.19
 NATURAL FREQUENCY = 0.7152
 ERROR NORM = 0.3633E-07
 MAX DISP 0.1178E-01 AT NODE 929



Şekil 7.5. Mod 5' in yer değıştirmesi.

SCALE 1/0.2434

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

EIGENVALUE ANALYSIS

LOAD DUMP ID = 1

EIGENVECTOR = 6

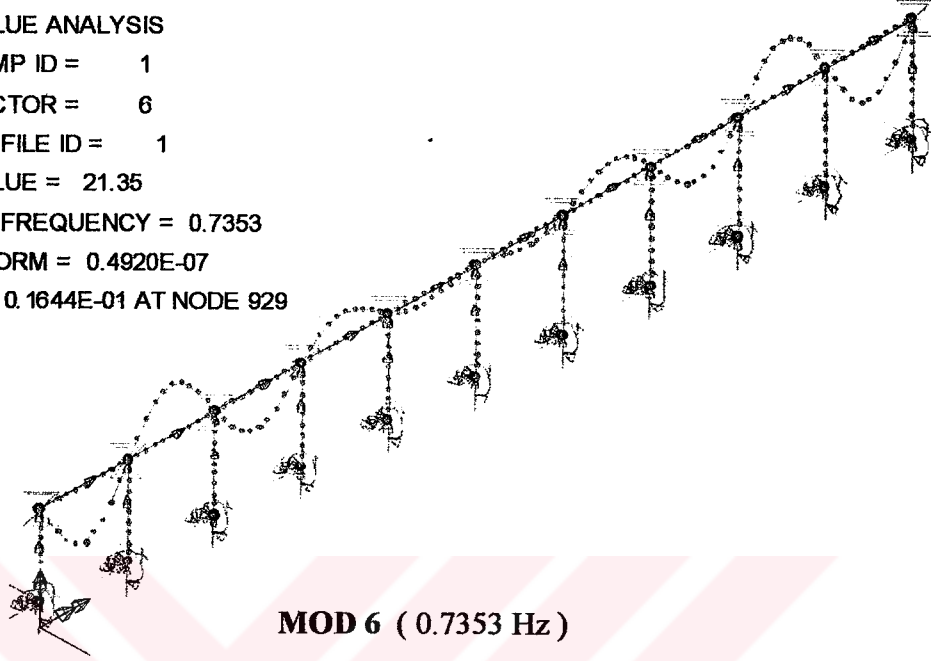
RESULTS FILE ID = 1

EIGENVALUE = 21.35

NATURAL FREQUENCY = 0.7353

ERROR NORM = 0.4920E-07

MAX DISP 0.1644E-01 AT NODE 929



Şekil 7.6. Mod 6' ın yer değıştirmesi.

SCALE 1/0.2263

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

EIGENVALUE ANALYSIS

LOAD DUMP ID = 1

EIGENVECTOR = 7

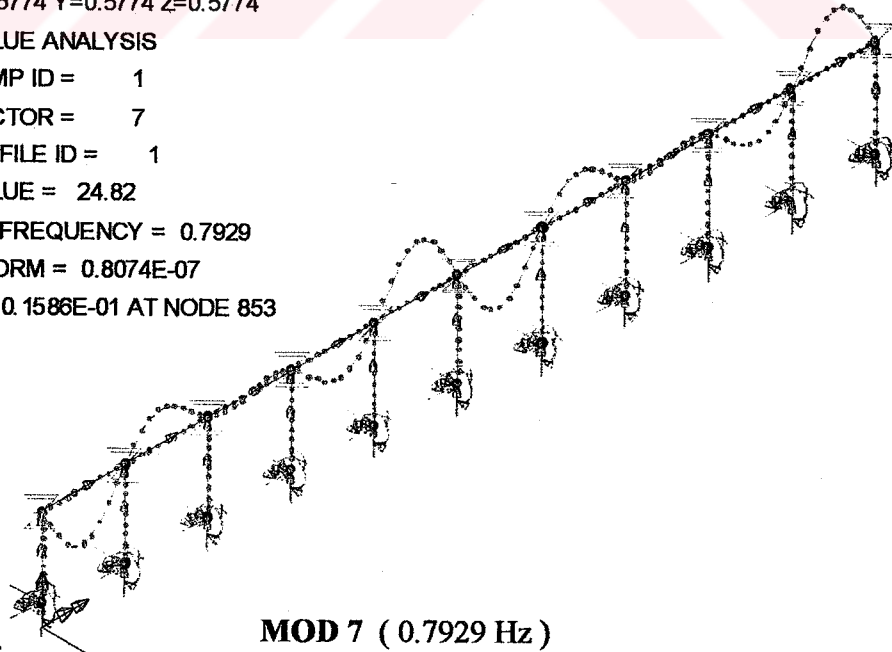
RESULTS FILE ID = 1

EIGENVALUE = 24.82

NATURAL FREQUENCY = 0.7929

ERROR NORM = 0.8074E-07

MAX DISP 0.1586E-01 AT NODE 853



Şekil 7.7. Mod 7' in yer değıştirmesi.

SCALE 1/0.2235

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

EIGENVALUE ANALYSIS

LOAD DUMP ID = 1

EIGENVECTOR = 8

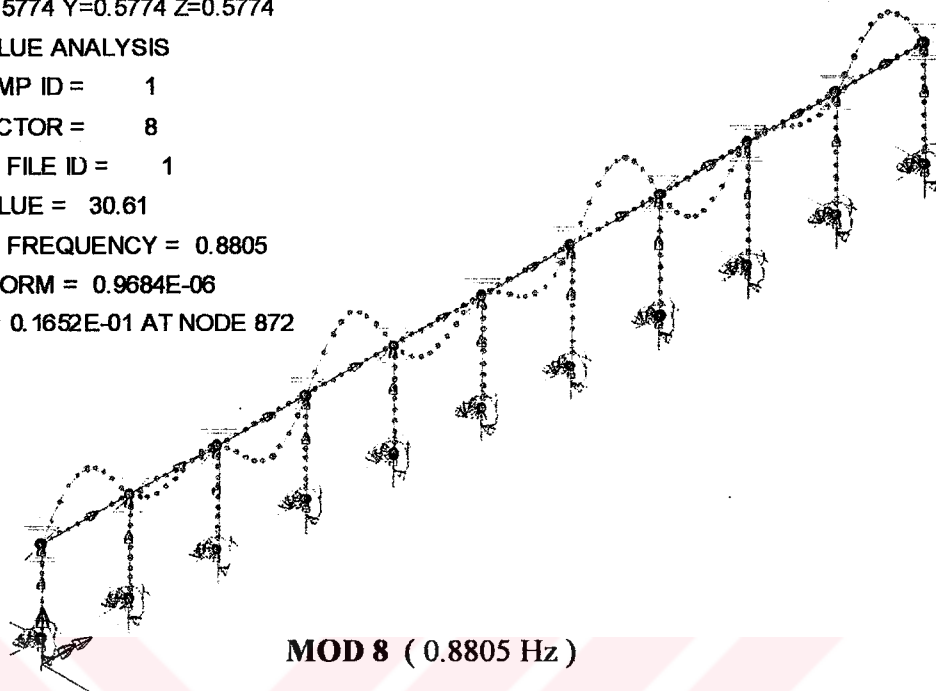
RESULTS FILE ID = 1

EIGENVALUE = 30.61

NATURAL FREQUENCY = 0.8805

ERROR NORM = 0.9684E-06

MAX DISP 0.1652E-01 AT NODE 872



Şekil 7.8. Mod 8' in yer değiştirmesi.

SCALE 1/0.2287

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

EIGENVALUE ANALYSIS

LOAD DUMP ID = 1

EIGENVECTOR = 9

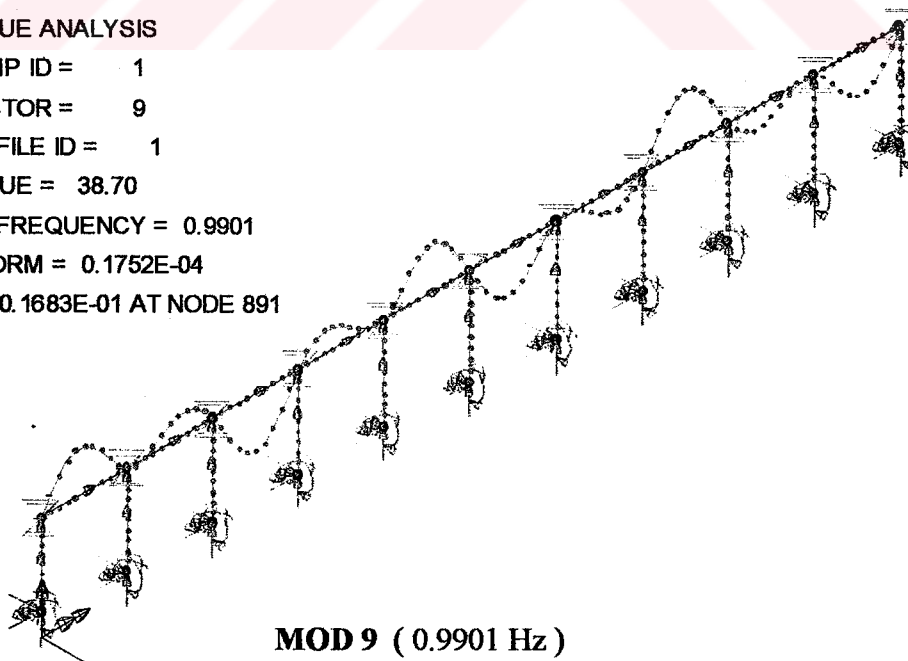
RESULTS FILE ID = 1

EIGENVALUE = 38.70

NATURAL FREQUENCY = 0.9901

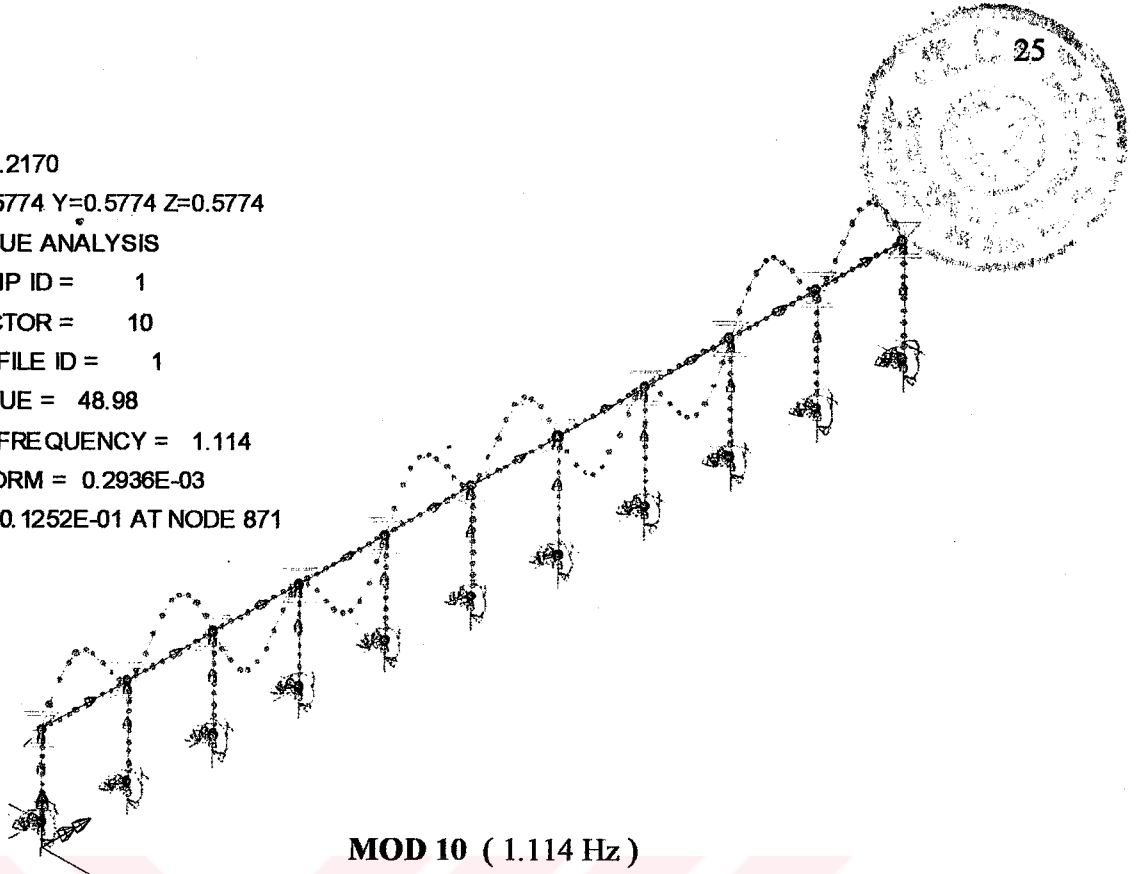
ERROR NORM = 0.1752E-04

MAX DISP 0.1683E-01 AT NODE 891



Şekil 7.9. Mod 9' un yer değiştirmesi.

SCALE 1/0.2170
EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
EIGENVALUE ANALYSIS
LOAD DUMP ID = 1
EIGENVECTOR = 10
RESULTS FILE ID = 1
EIGENVALUE = 48.98
NATURAL FREQUENCY = 1.114
ERROR NORM = 0.2936E-03
MAX DISP 0.1252E-01 AT NODE 871



Şekil 7.10. Mod 10' un yer değıştirmesi.

7.3. Spektral Analiz

Yer hareketlerinin yapılar üzerindeki etkilerini araştırmak için hareketin şiddetinin ölçülmesi gerekmektedir. Genel anlamda bir yer hareketi için tepki spektrumuna ait bilgiden pratik bir ölçüm elde edilebilir. Spektral tepki analizi tasarım depremi esnasında, hareketin bütün süresi üzerinden modelin doğrudan integrasyonuna gerek duymadan yapının maksimum deplasmanını veya pseudo (yalancı) hızını veya ivmesini bulmaya çalışır.

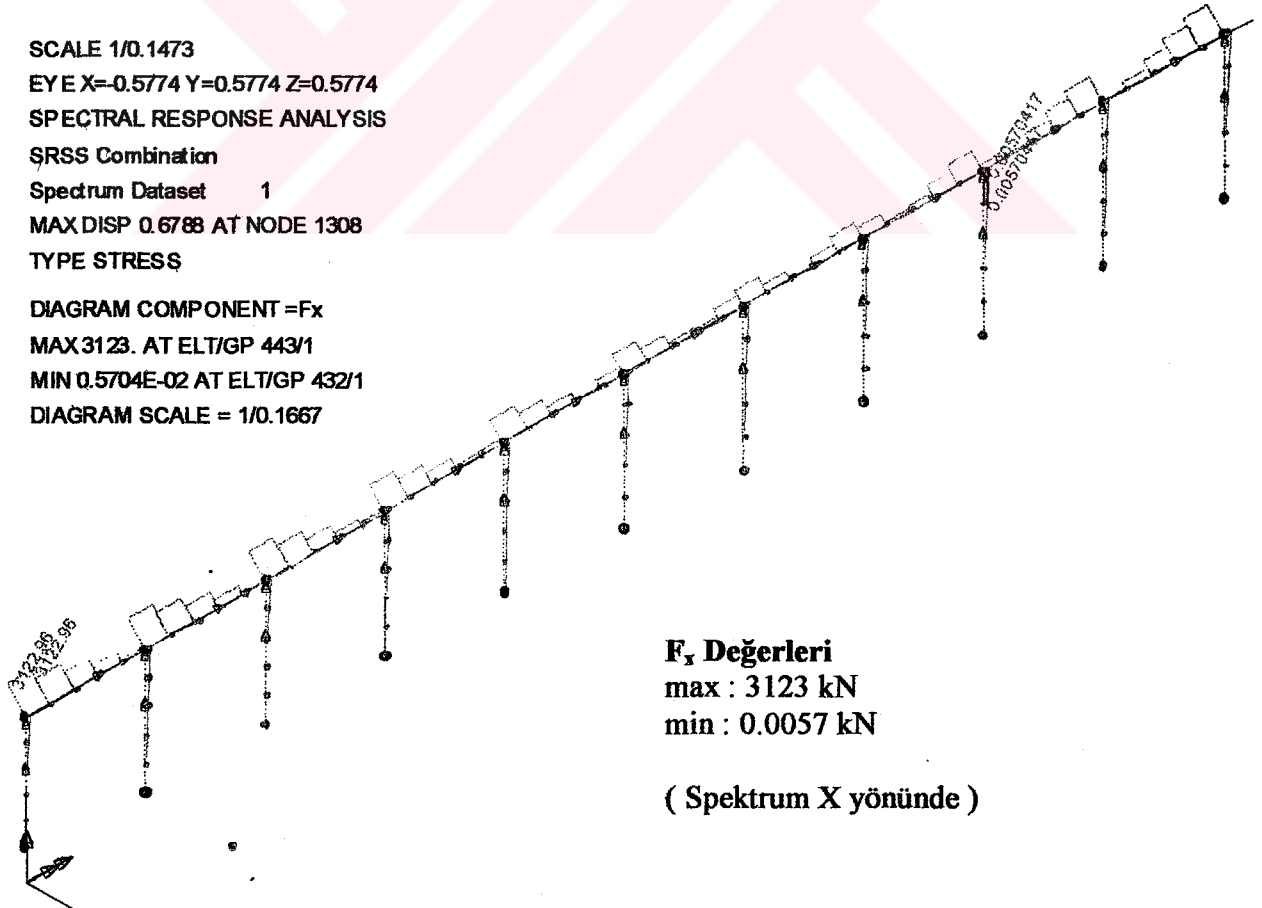
Zaman alanında sayısal çözümleme, deplasman veya kesit etkisi gibi bir sistem parametresinin zamana bağlı olan değışimini verir. Ancak, taşıyıcı sistemin boyutlandırılmasında genel olarak bu parametrelerin en büyük değeri etkili olur. Bu nedenle, uzun ve yorucu olan sayısal çözümlemeye ihtiyaç kalmadan, deprem hareketinin spektrumunu kullanarak, boyutlamaya esas olan değerlerin elde edilmesi önemli ölçüde kolaylık sağlar.

Spektral tepki dasetının belirlenmesinden önce sistemin modları ve mod vektörleri hesaplanmalıdır. Spektral datanın tanımlanmasında spektral eğri kullanılır.

Spektral eğrinin tanımlanması üç şekilde yapılabilir:

- Frekans / deplasman
- Frekans / hız
- Frekans / akselerasyon

Modal analizin yapılmasından sonra LUSAS (ver. 13.3) sonlu elemanlar analiz programında modelin spektral analizi yapılmıştır. Analizde AASHTO ' nun $A=0.4$, zemin sınıfı 2 için % 5 sönümlü tasarım spektrumu kullanılmıştır (Şekil 4.1). Spektrum hem enine hem de uzunlamasına yönde uygulanarak analiz sonucunda F_x , F_y kesme kuvvetleri, M_z eğilme momenti ve deplasman vektör değerleri elde edilmiştir. Aşağıdaki şekillerde hem x (uzunlamasına) hem de y (enine) yönde elde edilen grafikler ve değerleri sırasıyla verilmiştir:



Şekil 7.11. Spektrum x yönündeyken F_x diyagramı.

SCALE 1/0.1473

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS

SRSS Combination

Spectrum Dataset 1

MAX DISP 0.6788 AT NODE 1308

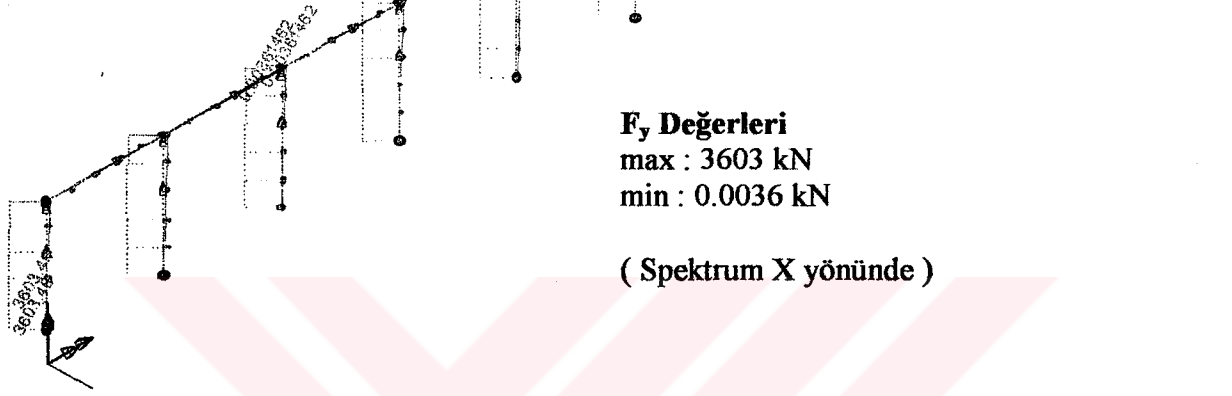
TYPE STRESS

DIAGRAM COMPONENT =Fy

MAX 3603. AT ELT/GP 388/1

MIN 0.3615E-02 AT ELT/GP 451/1

DIAGRAM SCALE = 1/0.1667



Şekil 7.12. Spektrum x yönüdeyken F_y diyagramı.

SCALE 1/0.1473

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS

SRSS Combination

Spectrum Dataset 1

MAX DISP 0.6788 AT NODE 1308

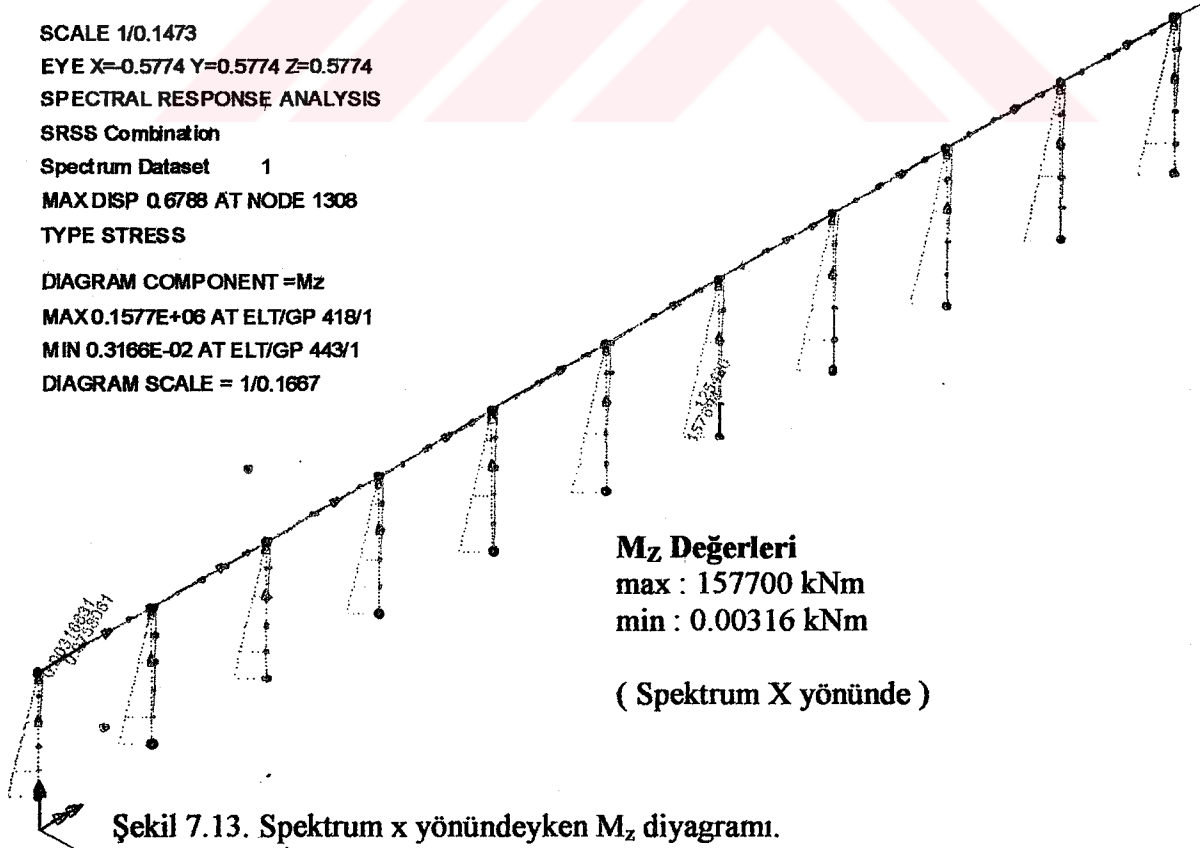
TYPE STRESS

DIAGRAM COMPONENT =Mz

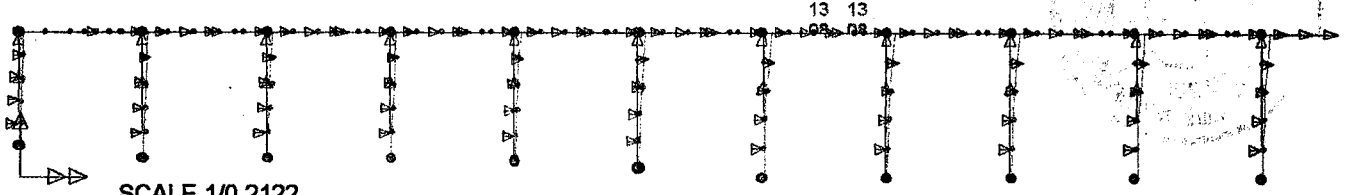
MAX 0.1577E+06 AT ELT/GP 418/1

MIN 0.3166E-02 AT ELT/GP 443/1

DIAGRAM SCALE = 1/0.1667



Şekil 7.13. Spektrum x yönüdeyken M_z diyagramı.



SCALE 1/0.2122

EYE X=0.0000E+00 Y=0.0000E+00 Z=1.000

SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS

SRSS Combination

Spectrum Dataset 1

MAX DISP 0.6788 AT NODE 1308

TYPE DISPLACEMENT

MAXIMUM VALUE = 0.6788

AT NODE NUMBER = 1308

MAX VECTOR VALUE 0.6788 AT NODE 1308

VECTOR SCALE = 1/ 0.6667E-01

Deplasman Vektörleri

max : 0.6788 m

(Spektrum X yönünde)

Şekil 7.14. Spektrum x yönündeyken deplasman vektörleri.

SCALE 1/0.1473

EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774

SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS

SRSS Combination

Spectrum Dataset 1

MAX DISP 0.6671 AT NODE 1300

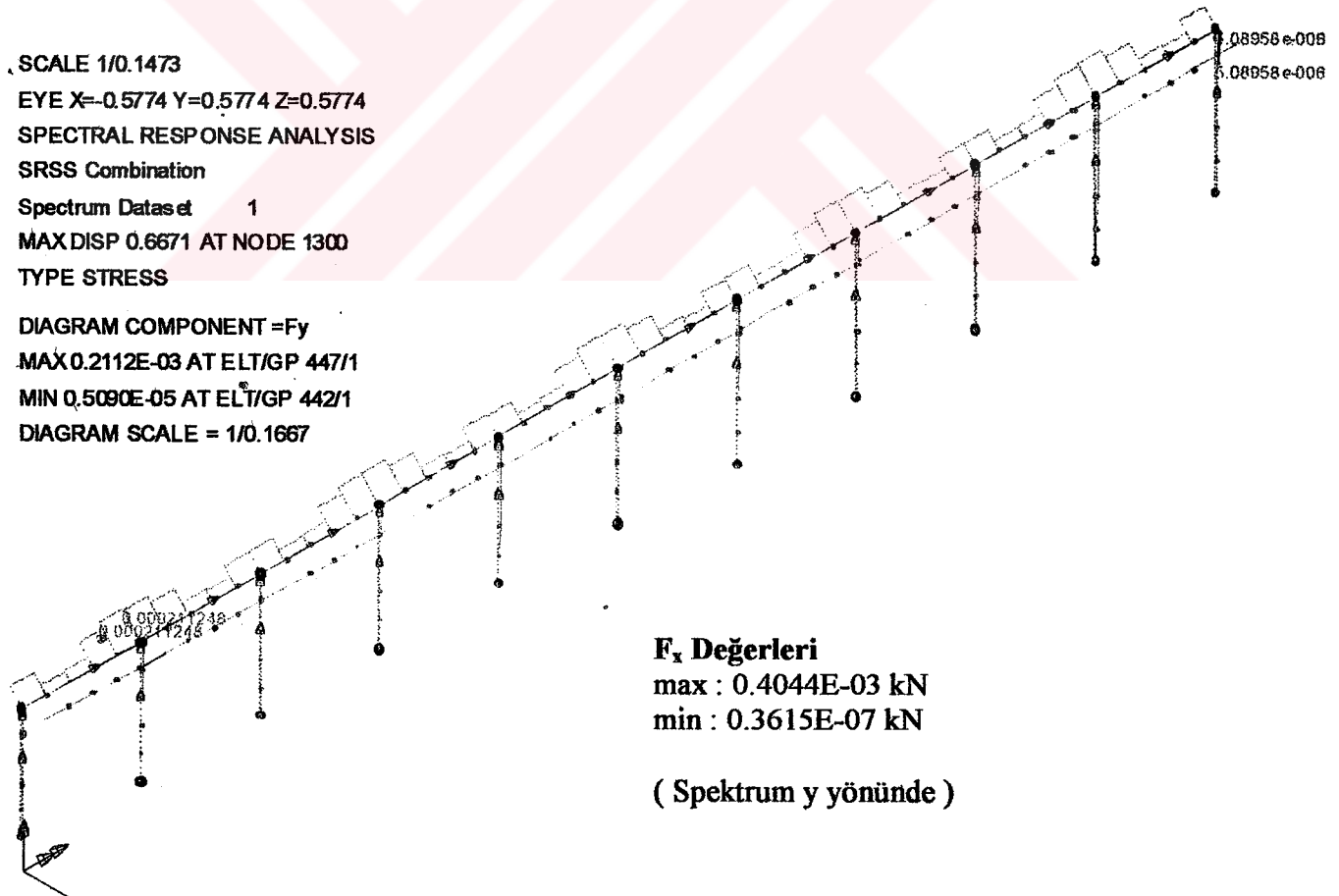
TYPE STRESS

DIAGRAM COMPONENT =Fy

MAX 0.2112E-03 AT ELT/GP 447/1

MIN 0.5090E-05 AT ELT/GP 442/1

DIAGRAM SCALE = 1/0.1667



F_x Değerleri

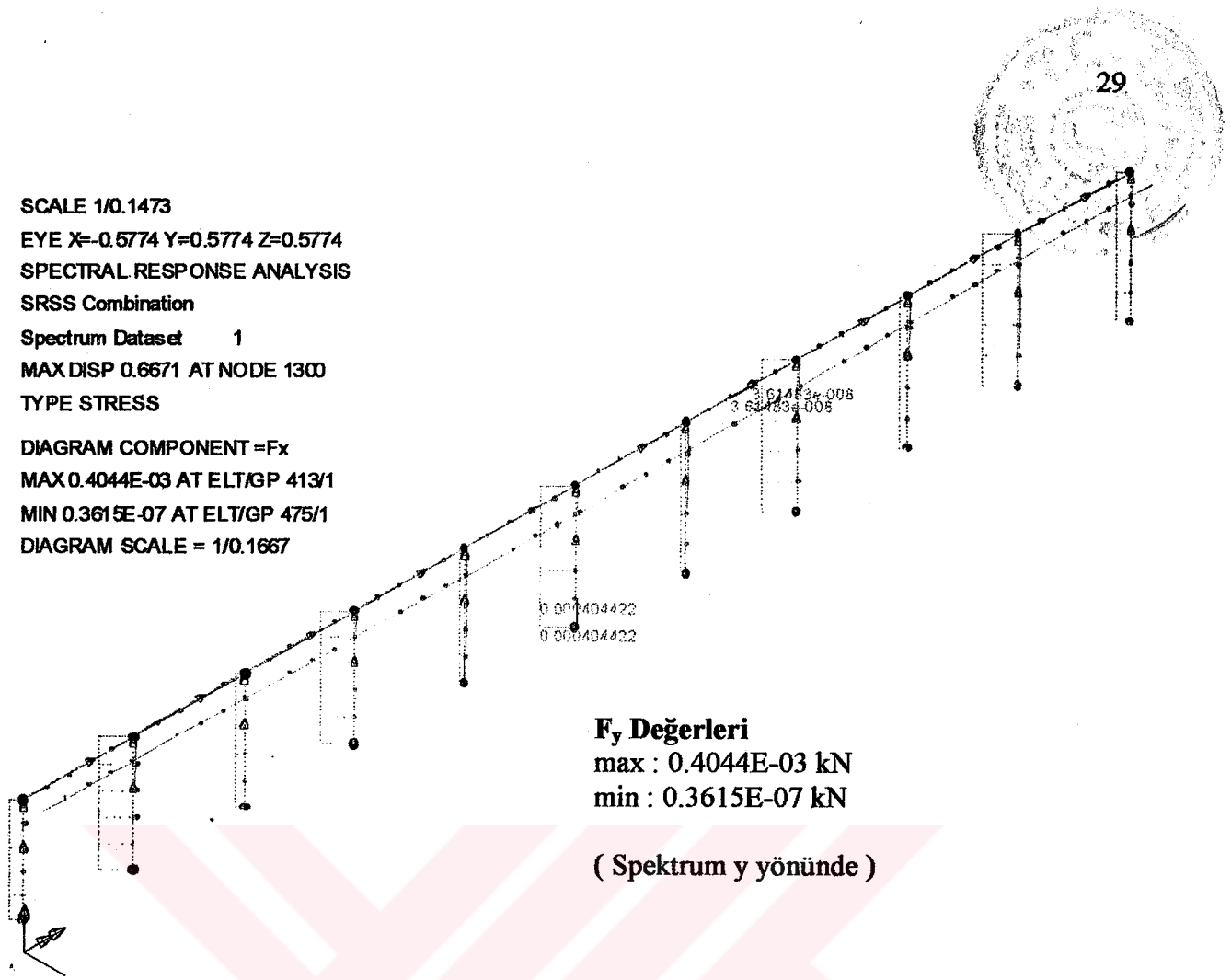
max : 0.4044E-03 kN

min : 0.3615E-07 kN

(Spektrum y yönünde)

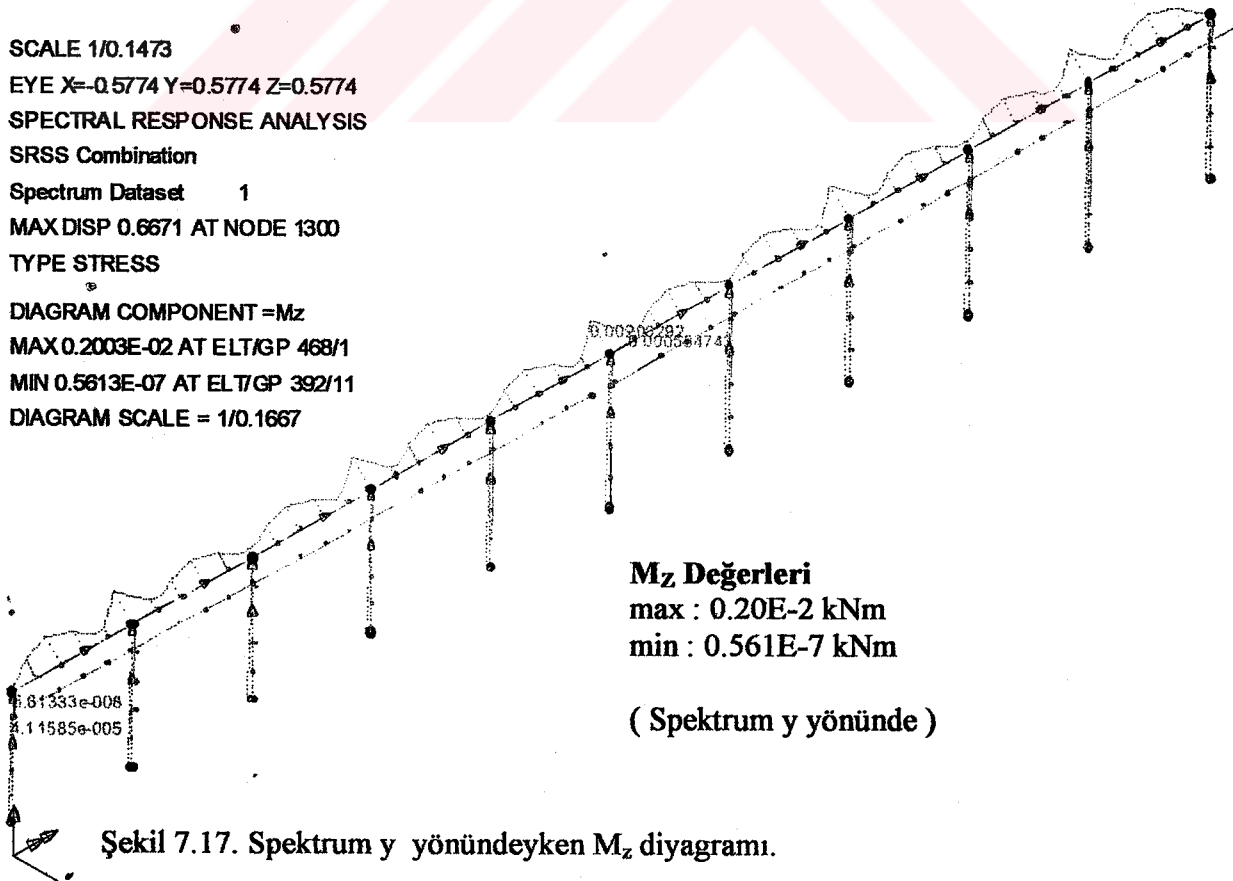
Şekil 7.15. Spektrum y yönündeyken F_x diyagramı.

SCALE 1/0.1473
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS
 SRSS Combination
 Spectrum Dataset 1
 MAX DISP 0.6671 AT NODE 1300
 TYPE STRESS
 DIAGRAM COMPONENT =Fx
 MAX 0.4044E-03 AT ELT/GP 413/1
 MIN 0.3615E-07 AT ELT/GP 475/1
 DIAGRAM SCALE = 1/0.1667



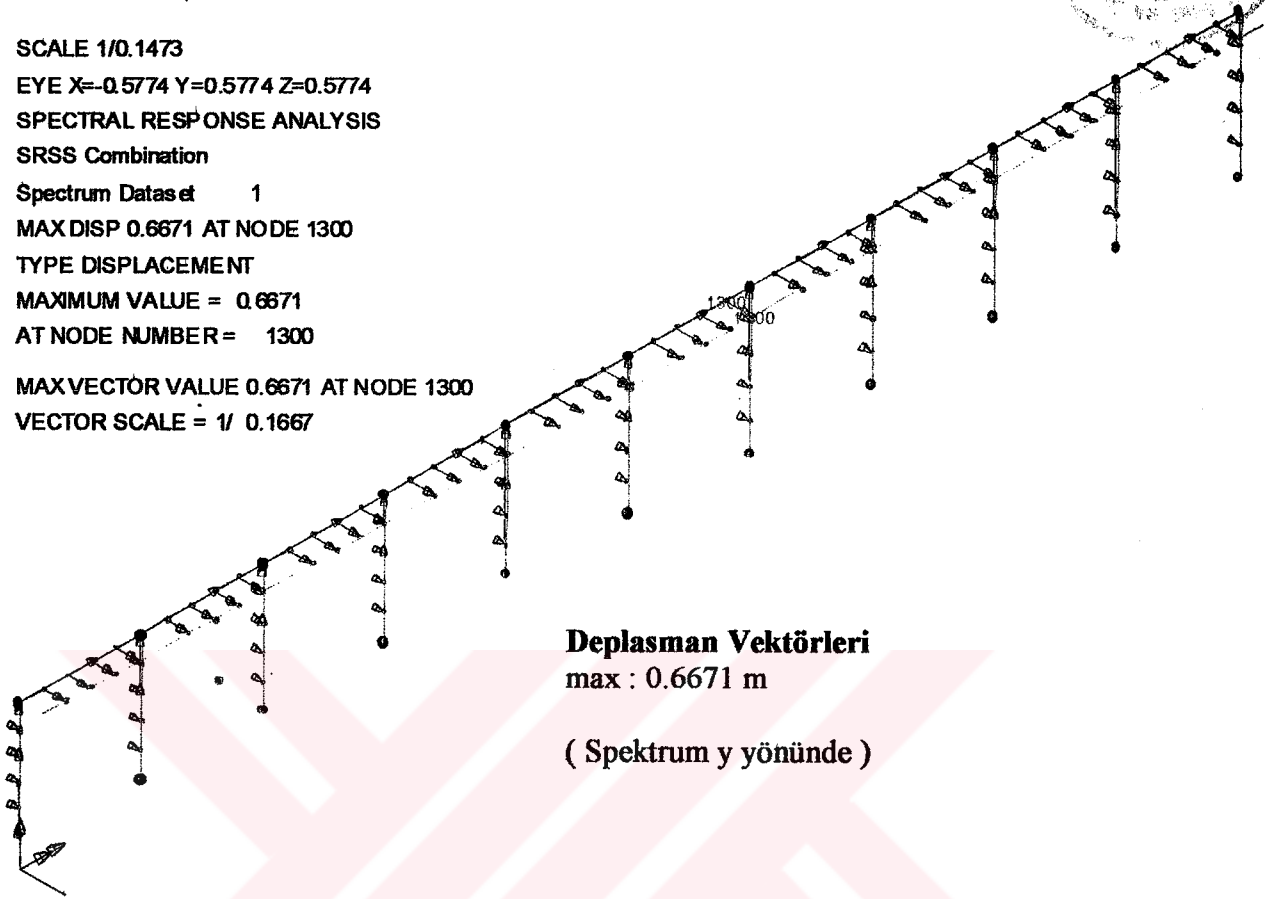
Şekil 7.16. Spektrum y yönündeyken F_y diyagramı.

SCALE 1/0.1473
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS
 SRSS Combination
 Spectrum Dataset 1
 MAX DISP 0.6671 AT NODE 1300
 TYPE STRESS
 DIAGRAM COMPONENT =Mz
 MAX 0.2003E-02 AT ELT/GP 468/1
 MIN 0.5613E-07 AT ELT/GP 392/11
 DIAGRAM SCALE = 1/0.1667



Şekil 7.17. Spektrum y yönündeyken M_z diyagramı.

SCALE 1/0.1473
 EYE X=-0.5774 Y=0.5774 Z=0.5774
 SPECTRAL RESPONSE ANALYSIS
 SRSS Combination
 Spectrum Dataset 1
 MAX DISP 0.6671 AT NODE 1300
 TYPE DISPLACEMENT
 MAXIMUM VALUE = 0.6671
 AT NODE NUMBER = 1300
 MAX VECTOR VALUE 0.6671 AT NODE 1300
 VECTOR SCALE = 1/ 0.1667



Deplasman Vektörleri

max : 0.6671 m

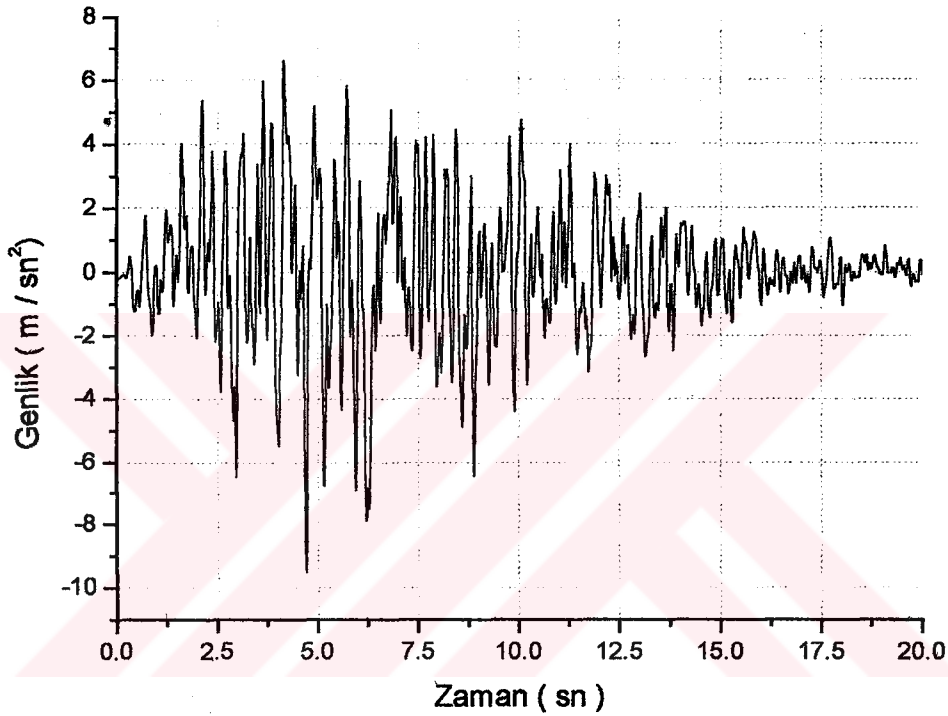
(Spektrum y yönünde)

* Şekil 7.18. Spektrum y yönündeyken deplasman vektörleri.

7.4. Lineer (Doğrusal) Olmayan Zaman Geçmiş Analizi

Bu yöntemde yönetmelikteki ana kuralların ötesine geçilerek deprem mühendisliği bilgileri ile gerçek veya üretilmiş bir deprem kaydının kullanılması gerekir. Geçmiş depremlerin ivme kayıtlarının bu konuda önemli bir yeri vardır. Boyutlama sırasında gerçek deprem kaydının esas alınması, hesaba esas olan deprem büyüklüğü, merkez üssü ve odak uzaklığı, kaynak mekanizması ve zemin koşullarının gerçek durumla en iyi bir şekilde uyuşturulması bakımından tercih edilir. Böylece pek çok belirsizlik önlenmiş olur. Deprem kaydının bulunmaması durumunda, deprem hareketini rasgele bir titreşim kabul ederek yapay deprem kayıtları elde edilebilir. Genellikle deprem hareketinin, başlangıç ve son devreleri dışındaki orta bölümü kararlı rasgele titreşim olarak alınır. Ancak, bu durumda da, yapay depremin büyüklüğü ve frekans içeriği hakkında kabuller yapmak gerekir.

Modelin doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi, LUSAS (version 13.4) sonlu elemanlar analiz programında yapıldı. Analizde ilk olarak Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından simule edilmiş deprem kaydı kullanıldı (Şekil 7.19). Deprem datasının yüksek genlikteki ilk 20 saniyelik kısmı programın gereksinimleri doğrultusunda 0.05 saniyelik aralıkla girildi ve programın interpolasyon özelliği kullanılarak 0.02 saniyelik adımlarla lokal x doğrultusunda, boylamasına etkililerek analiz gerçekleştirildi.

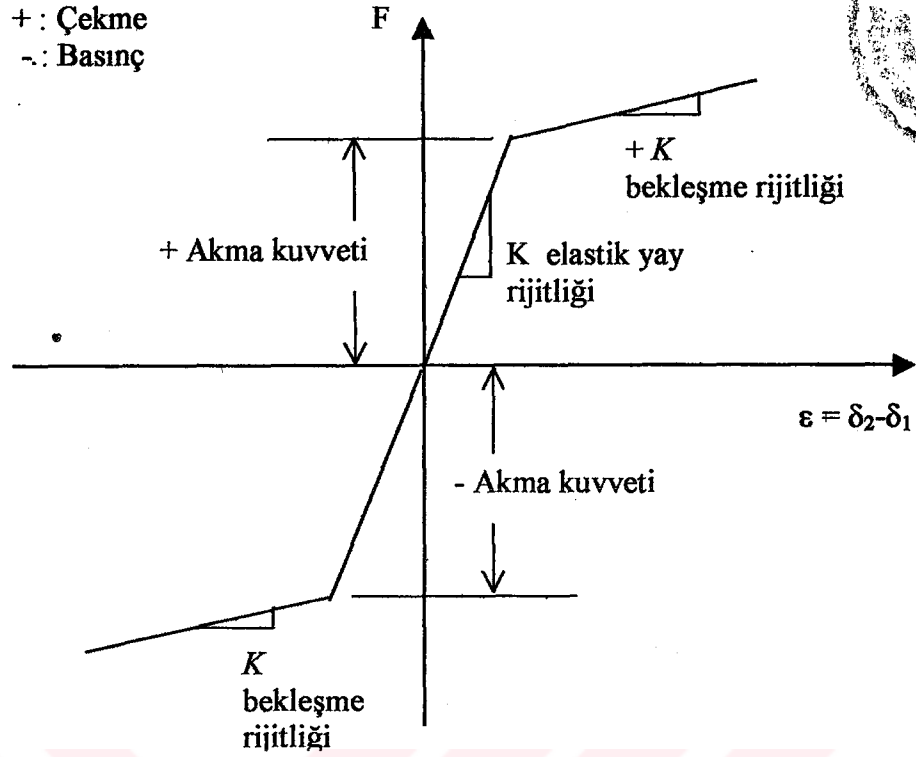


Şekil 7.19. Kandilli Bolu simule deprem datasının 20 saniyelik bölümü.

İzolatörler, doğrusal olmayan zaman geçmişi analizinde elasto-plastik joint elemanlar kullanılarak modellenmiştir. LUSAS sonlu elemanlar analiz programında elasto-plastik joint elemanın gerilme deformasyon şeması Şekil 7.20' de gösterilmiştir.

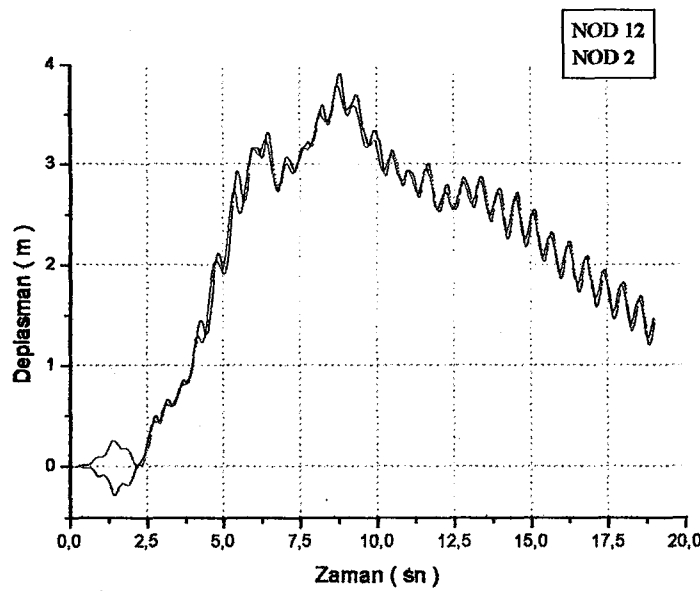
Joint modelimizde kullandığımız materyal özellikleri şekil 4.5 ' ten alınmıştır;

Elastik yay rijitliği (K_e)	: 40000 kN / m ²
Çekmede akma kuvveti (+ F_y)	: 1520 kN / m ²
Çekmede bekleşme rijitliği (+ K_p)	: 1080 kN / m ²
Basınçta akma kuvveti (- F_y)	: 1520 kN / m ²
Basınçta bekleşme rijitliği (- K_p)	: 1080 kN / m ²



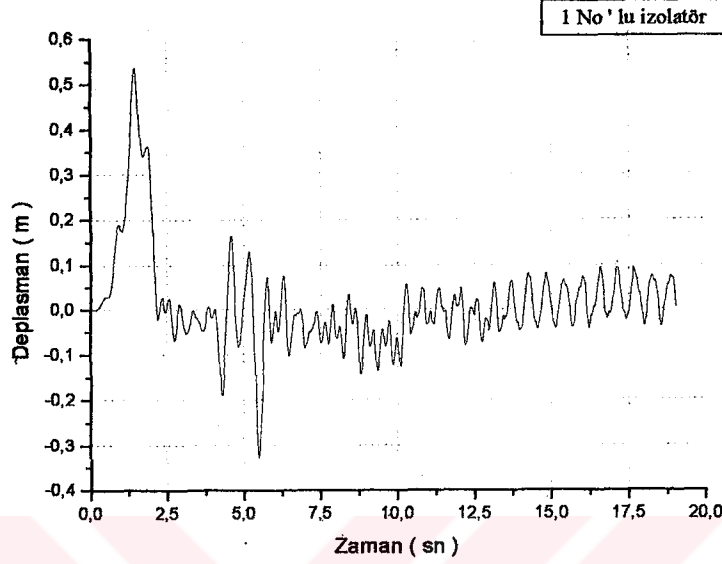
Şekil 7.20. Elasto-Plastik Joint Elemanın Kuvvet-Deformasyon Şeması.

Analiz yapıldıktan sonra izolatörlerin alt kısımları (kolon üst başları) ile üst kısımlarına (tabliyenin alt kısmı) ait deplasmanlar hesaplandı ve her zaman aralığı için aradaki fark hesap edilerek izolatörlerin yapmış olduğu deplasmanlar elde edilmiştir. Ayrıca her bir izolatörün zaman deplasman grafiği Microcal Origin (version 6.0) programı vasıtasıyla çizilmiştir.



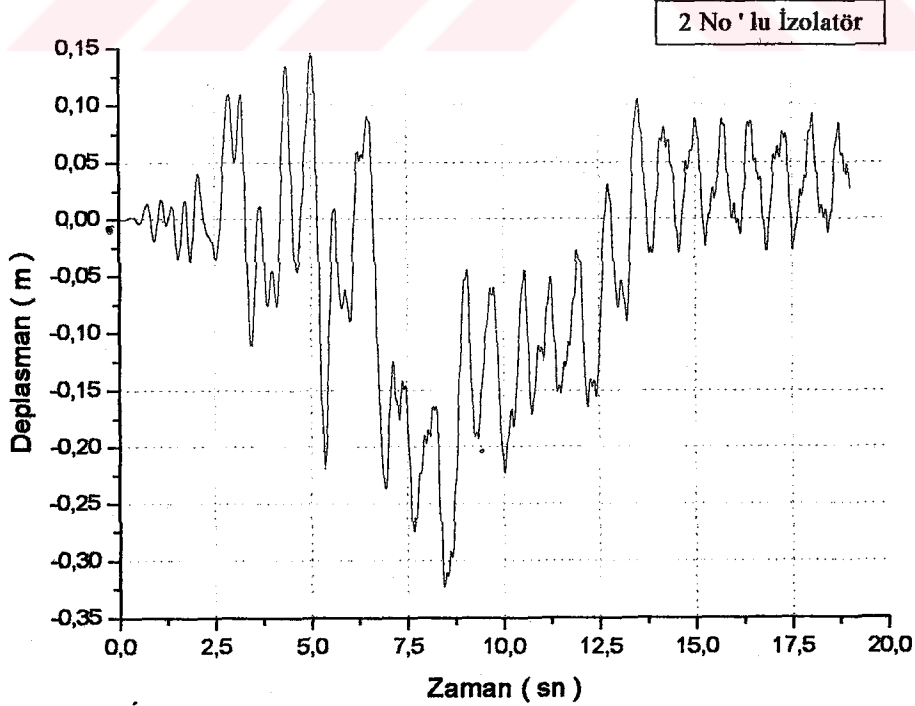
Şekil 7.21. 12. ve 2. Nodların Zaman-Deplasman Grafiği.

Yukarıdaki şekilde modelin soldan 1. izolatörünün üst kısmını gösteren 12. ve alt kısmını gösteren 2. nodun zaman-deplasman grafikleri görülmektedir. Bu iki nodun deplasman farkı ise 1 no ' lu izolatörün yapmış olduğu deplasmanı vermektedir, grafiği ise Şekil 7.22' de görülmektedir:

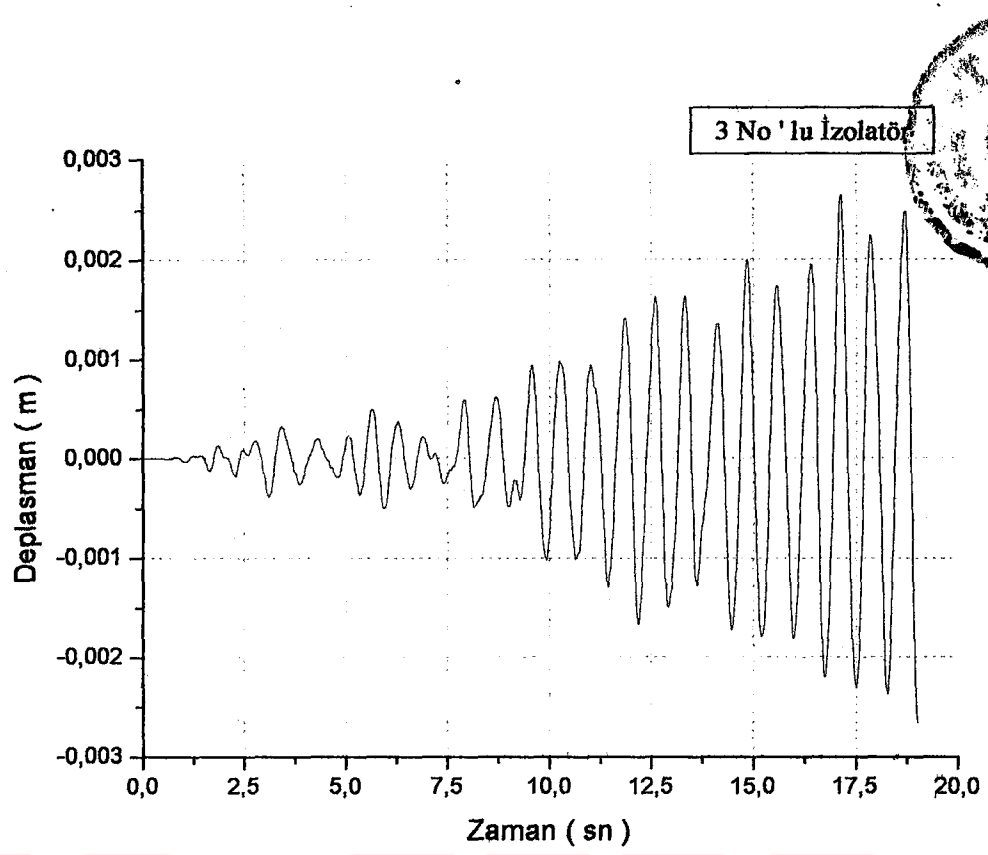


Şekil 7.22. 1 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiği.

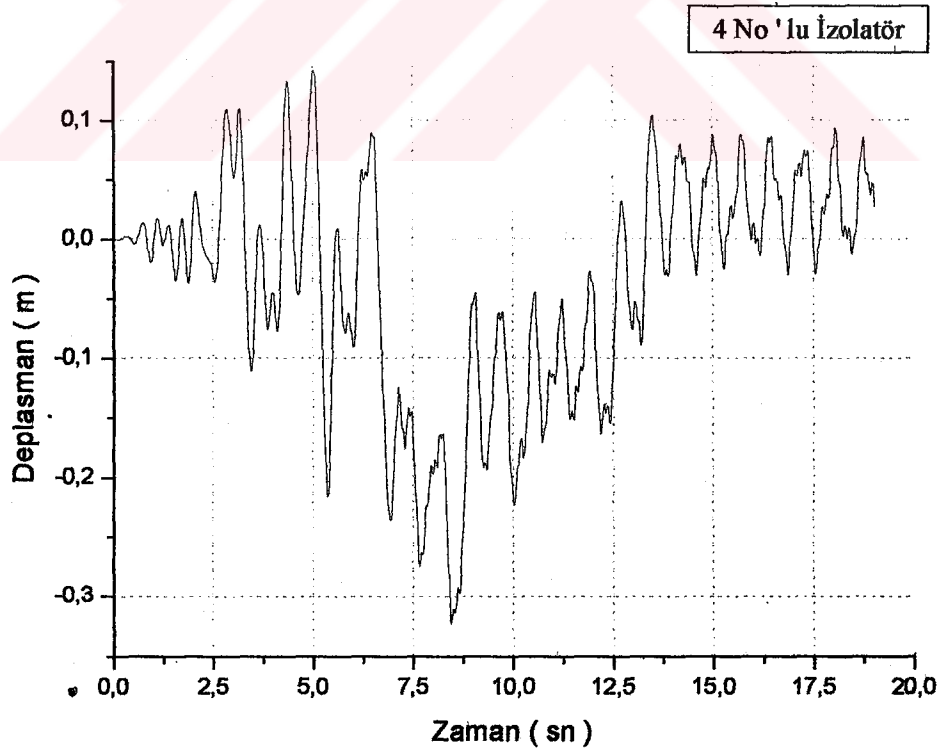
Modeldeki bütün izolatörlerin zaman-deplasman grafikleri aşağıda verilmektedir:



Şekil 7.23. 2 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.

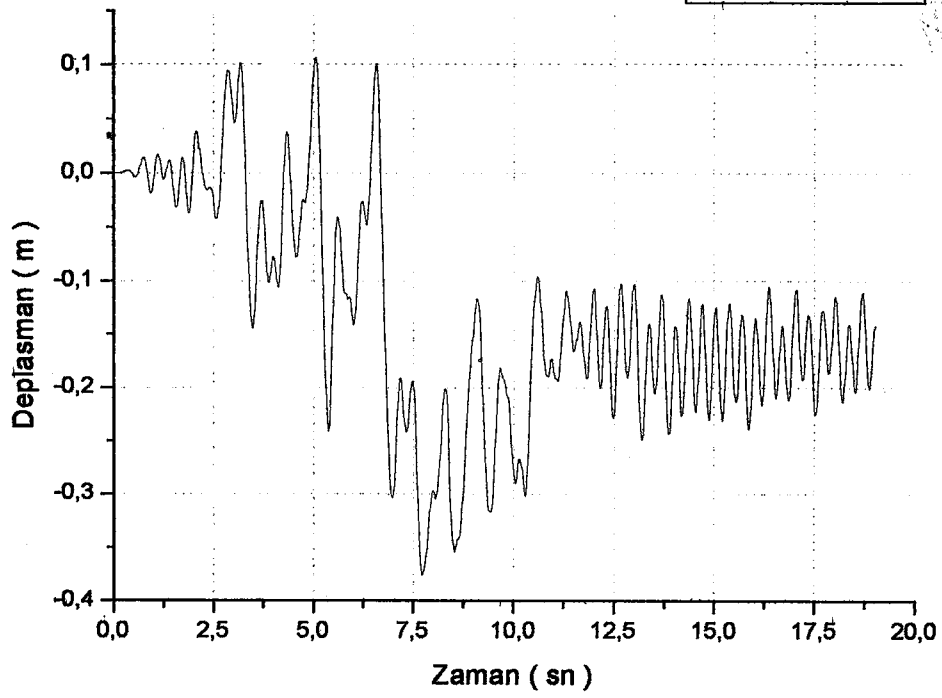


Şekil 7.24. 3 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.



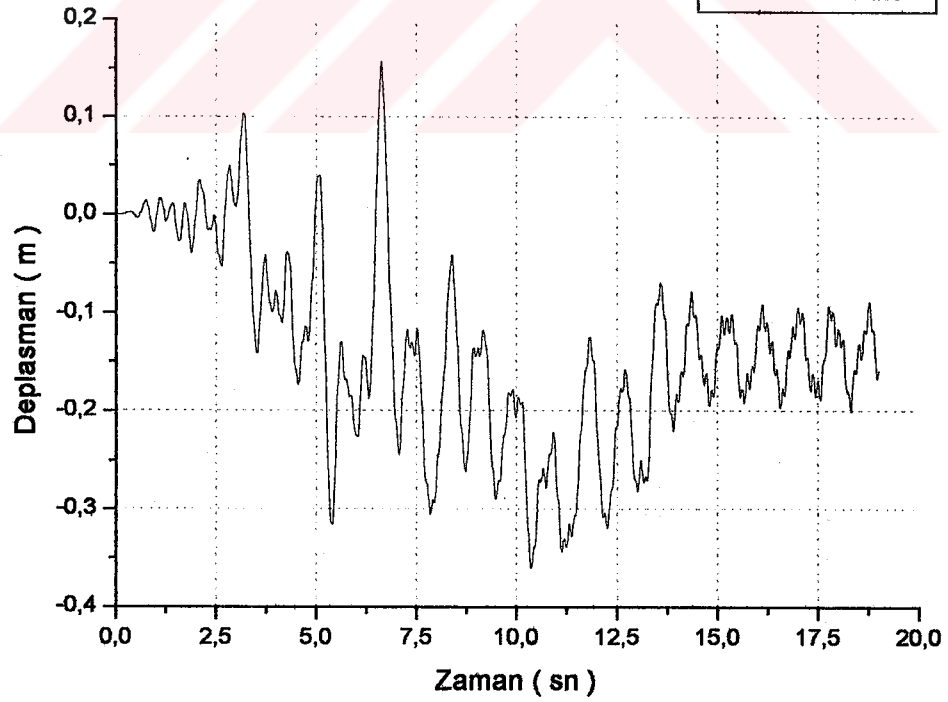
Şekil 7.25. 4 No ' lu İzolatörün Zaman-Deplasman Grafiği.

5 No 'lu İzolatör

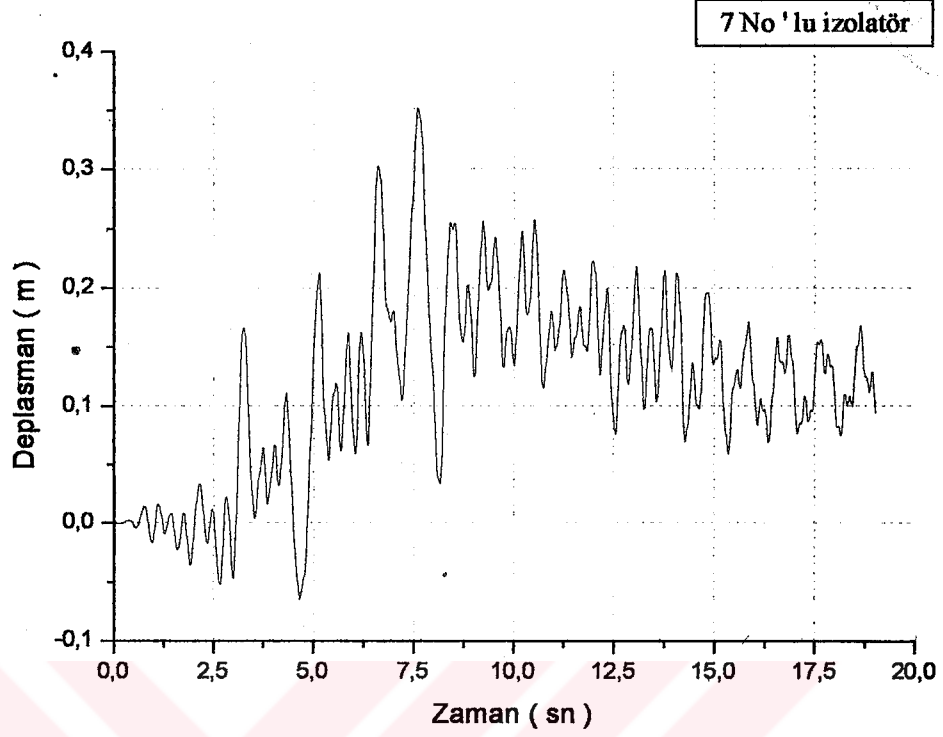


Şekil 7.26. 5 No 'lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.

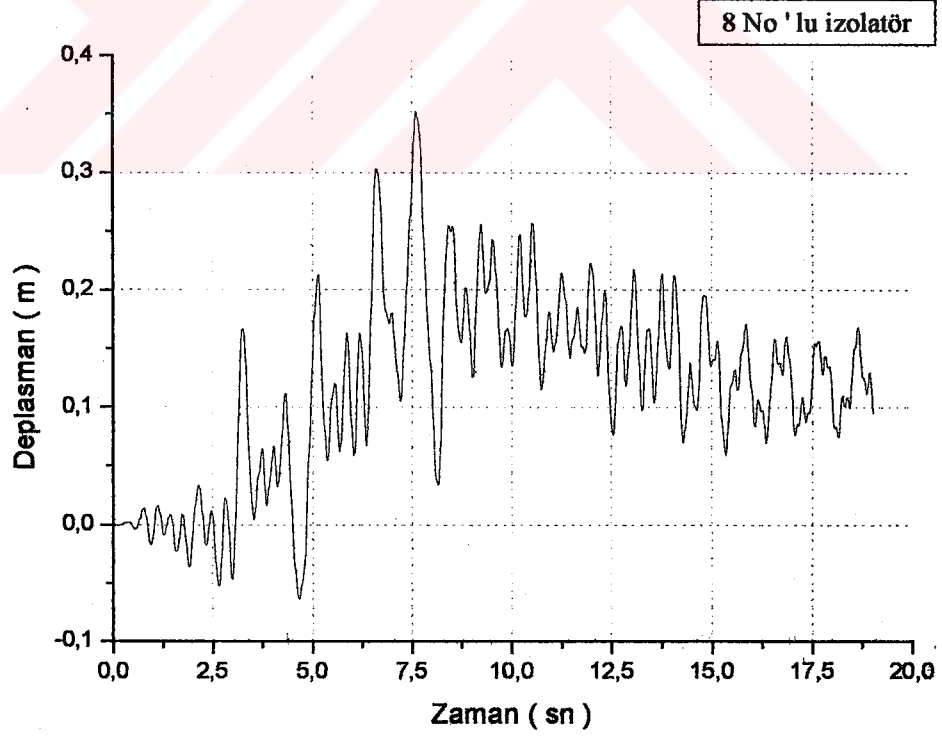
6 No 'lu izolatör



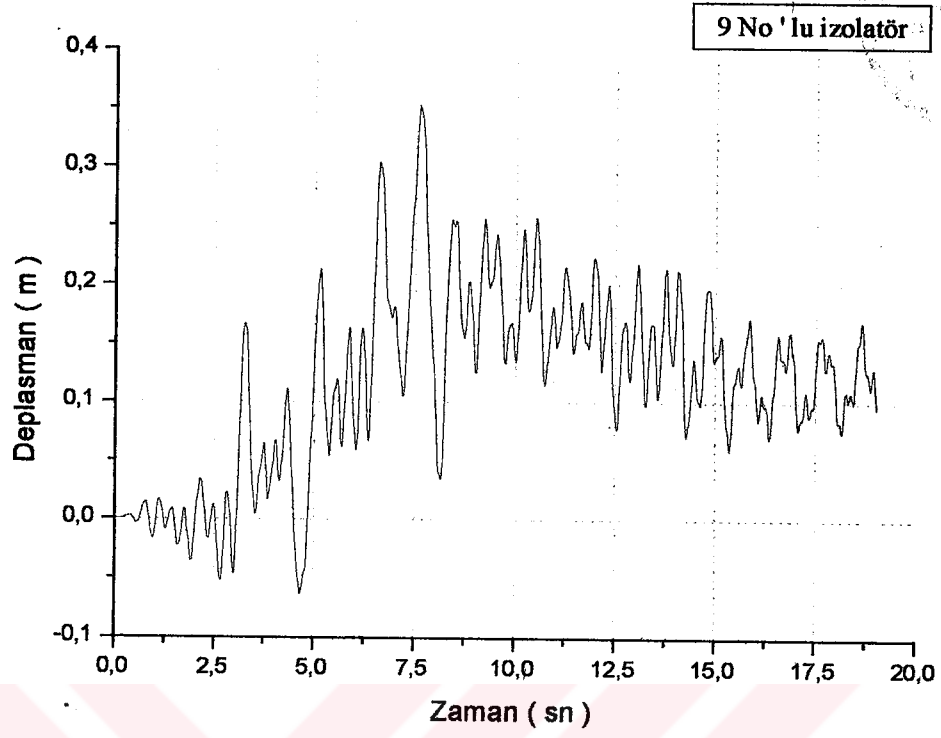
Şekil 7.27. 6 No 'lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.



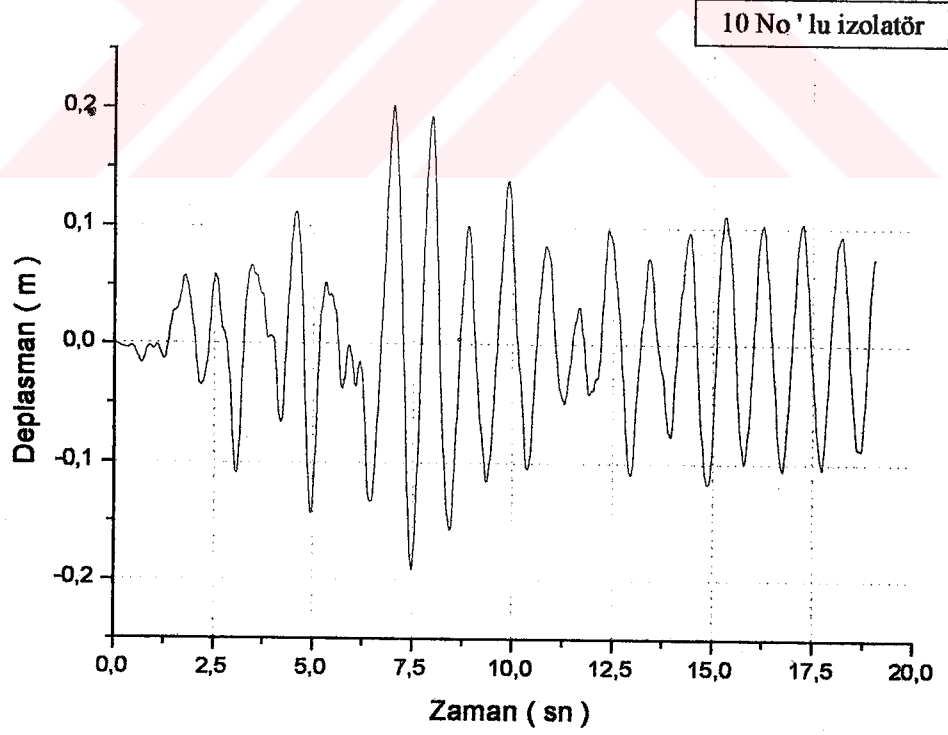
Şekil 7.28. 7 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.



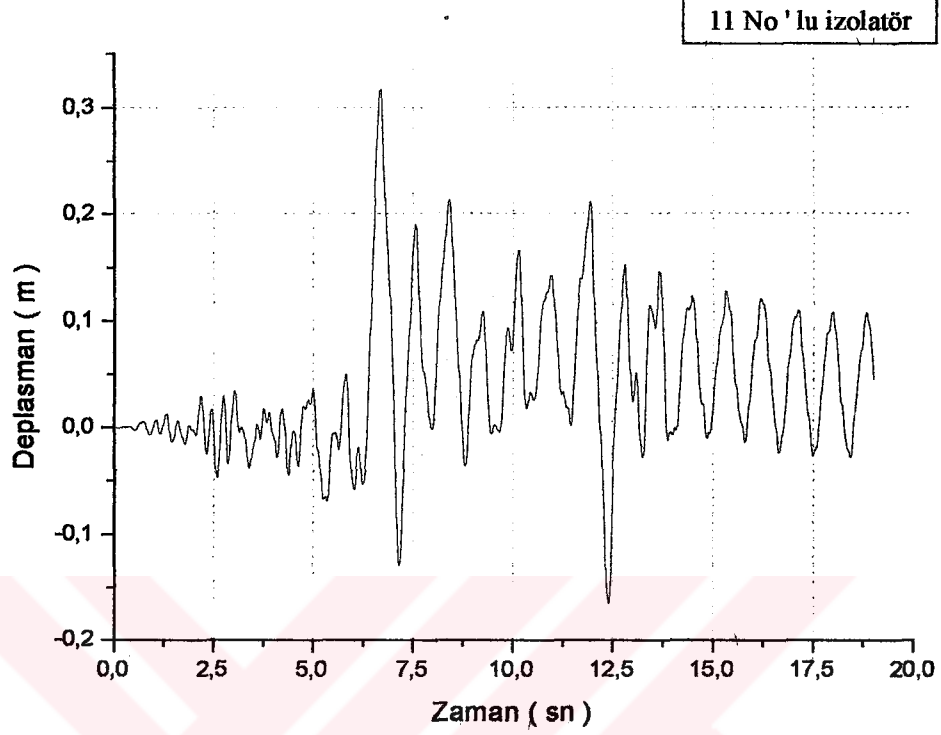
Şekil 7.29. 8 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.



Şekil 7.30. 9 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.



Şekil 7.31. 10 No ' lu izolatörün zaman-deplasman grafiği.



Şekil 7.32. 11 No ' lu izolatörün zaman deplasman grafiği.

Daha sonra doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi sonucunda elde edilen izolatör deplasmanların mutlak değerleri alınarak her bir izolatörün yapmış olduğu maksimum deplasman hesap edilmiştir.

Tablo.7.3. x Doğrultusunda, Boylamasına Etkitilen Deprem Sonucu Oluşan Maksimum İzolatör Deplasmanları.

İzolatör No	+ x yönünde deplasman, (m)	- x yönünde deplasman, (m)
1	0,53702	0,32639
2	0,14364	0,32315
3	0,00264	0,00266
4	0,14287	0,3235
5	0,10687	0,3754
6	0,15674	0,36004
7	0,35207	0,0636
8	0,35195	0,06308
9	0,35195	0,06309
10	0,2026	0,19077
11	0,31705	0,16488

Tablo.7.3' ten de anlaşılacağı gibi maksimum deplasman sol baştan 1 no ' lu izolatörde + lokal x yönünde 0.53702 m olarak oluşmaktadır.

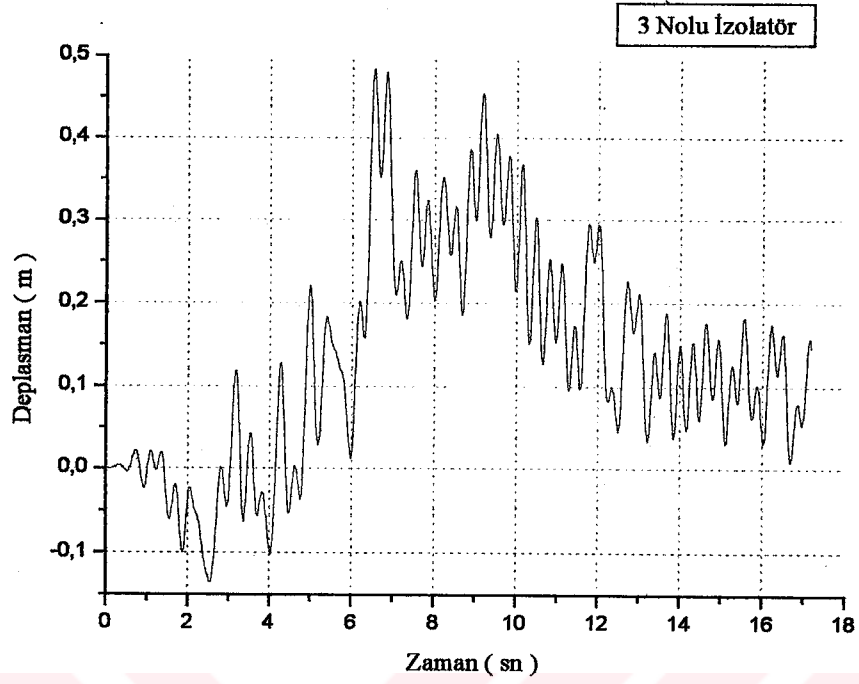
Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi tarafından oluşturulan 0.02 saniye aralıklı aynı simule deprem datası interpolate edilerek 0.05 saniye aralıklı hale getirilip ve lokal z doğrultusunda, enine etkililerek analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda aynı yöntemler kullanılarak her bir izolatörün yapmış olduğu deplasmanlar hesaplanmıştır.

Tablo.7.4. z Doğrultusunda, Enine Etkitilen Deprem Sonucu Oluşan Maksimum İzolatör Deplasmanları.

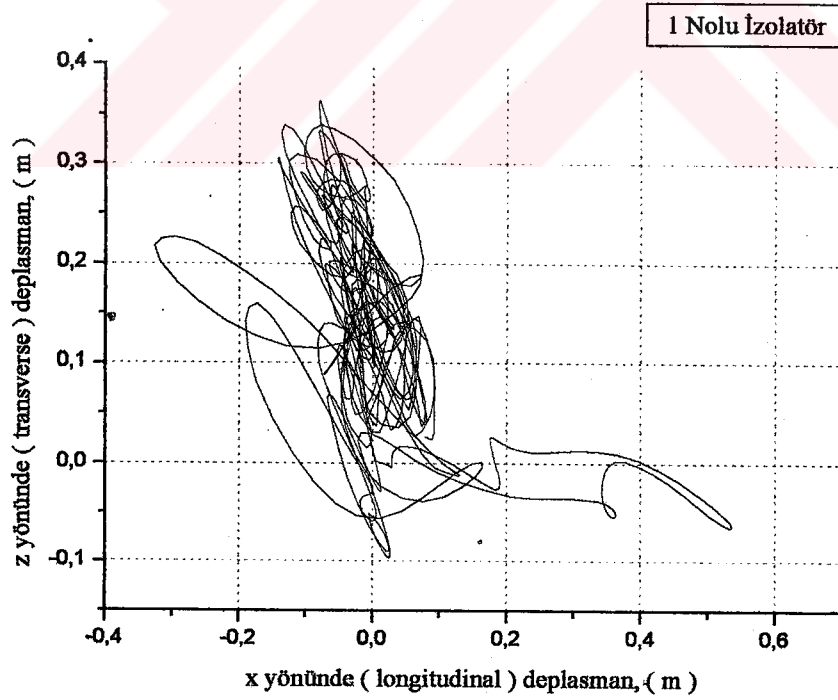
İzolatör No	+ z yönünde deplasman, (m)	- z yönünde deplasman, (m)
1	0,36309	0,096
2	0,48398	0,13535
3	0,48412	0,13541
4	0,48408	0,13542
5	0,48270	0,11145
6	0,32924	0,24085
7	0,35418	0,25362
8	0,35428	0,25365
9	0,35428	0,25365
10	0,35440	0,25356
11	0,15358	0,31086

Tablo.7.4.' ten de anlaşılabacağı üzere maksimum deplasman 3 nolu izolatörde + z yönünde 0,48412 m olarak oluşmuştur.

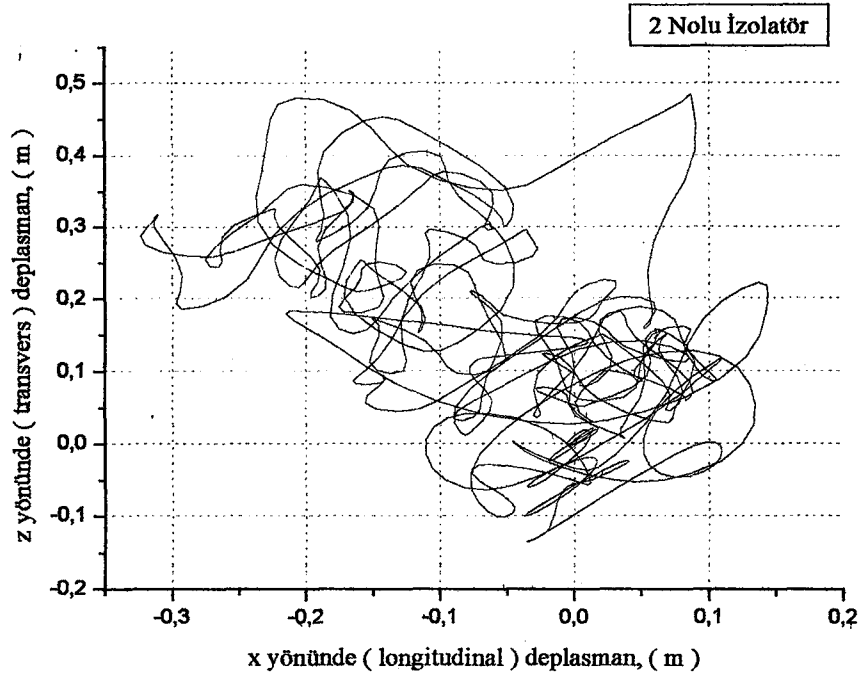
Zaman – deplasman grafiklerinin çiziminden sonra izolatörlerin deprem esnasında yapmış olduğu deplasmanların kapasite dahilinde olup olmadığının daha iyi anlaşılması amacıyla lokal x doğrultusunda (uzunlamasına) ve lokal z doğrultusunda (enlemesine) yapmış olduğu deplasmanlar her bir izolatör için ayrı olarak gösterilmiştir. Aşağıda ilk olarak 3 nolu izolatörün zaman deplasman, sonra ise sol baştan itibaren sırasıyla izolatörlerin deplasman grafikleri verilmektedir:



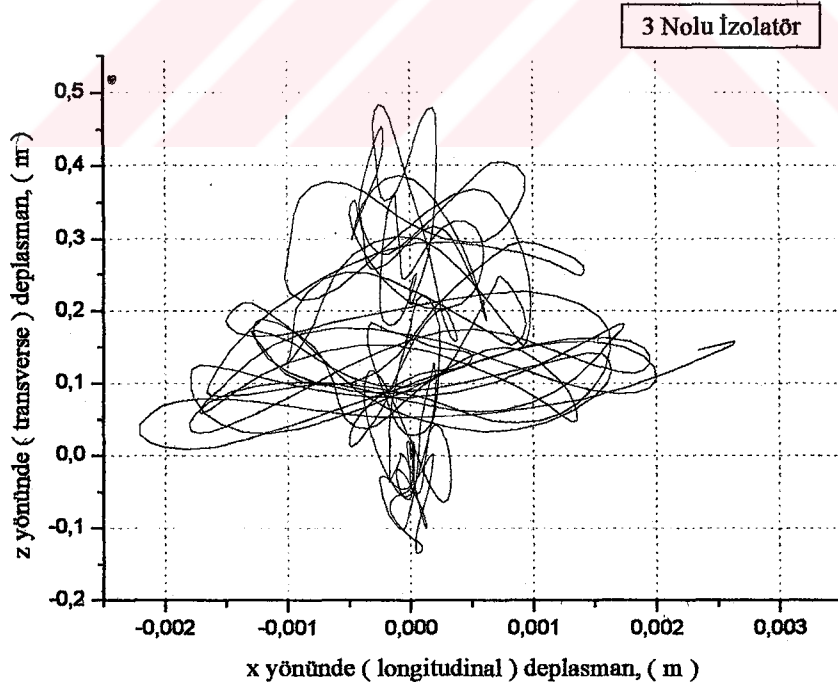
Şekil 7.33. 3 nolu izolatörün zaman – deplasman grafiği.



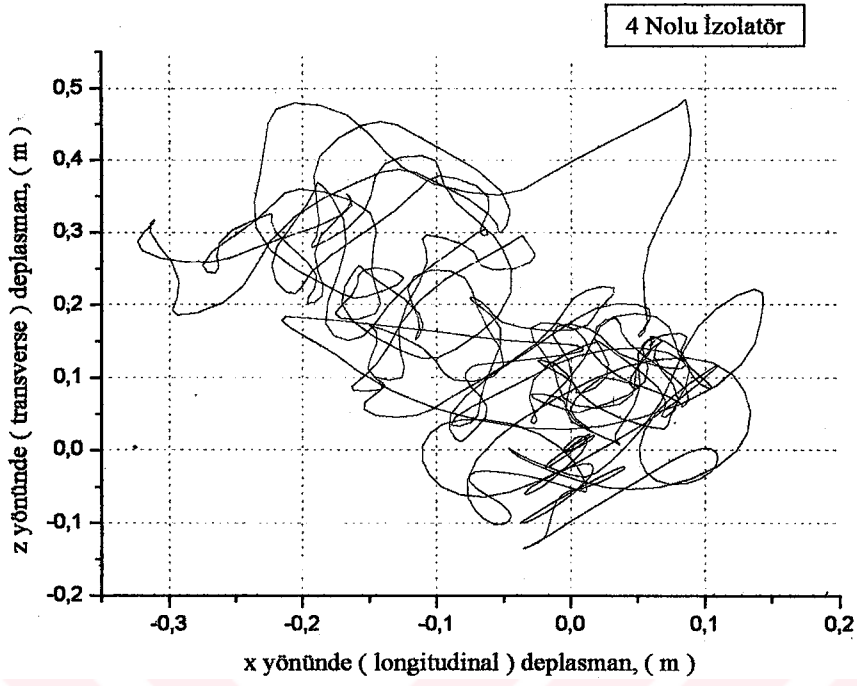
Şekil 7.34. 1 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



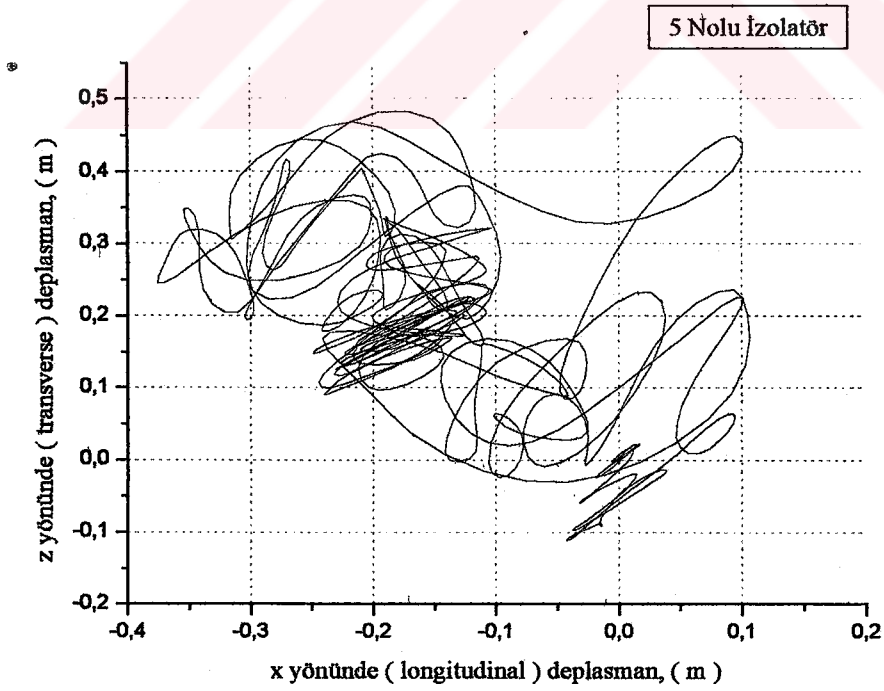
Şekil 7.35. 2 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



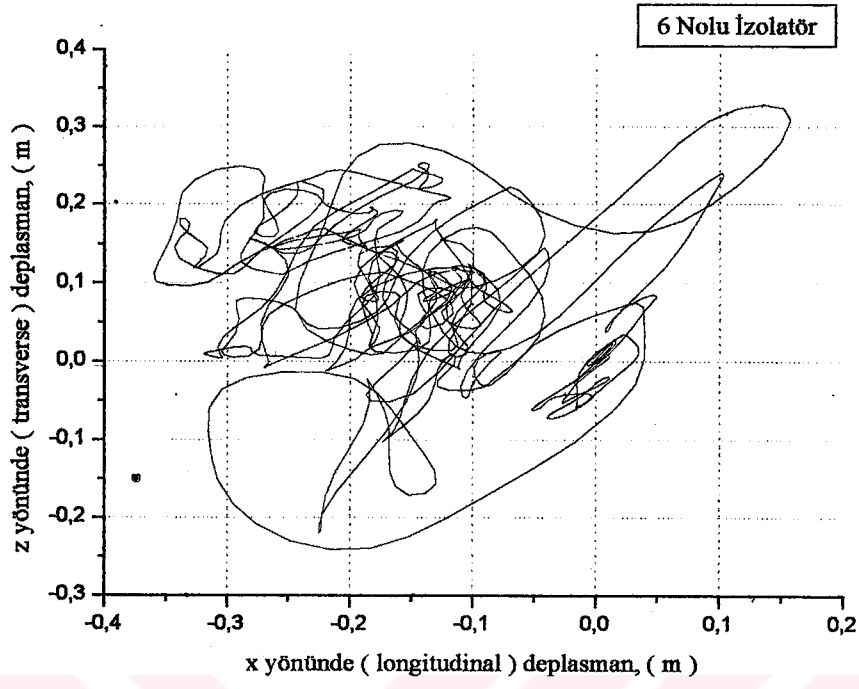
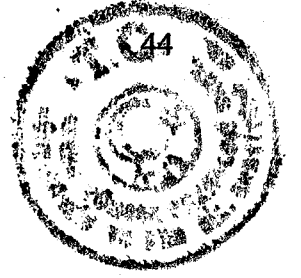
Şekil 7.36. 3 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



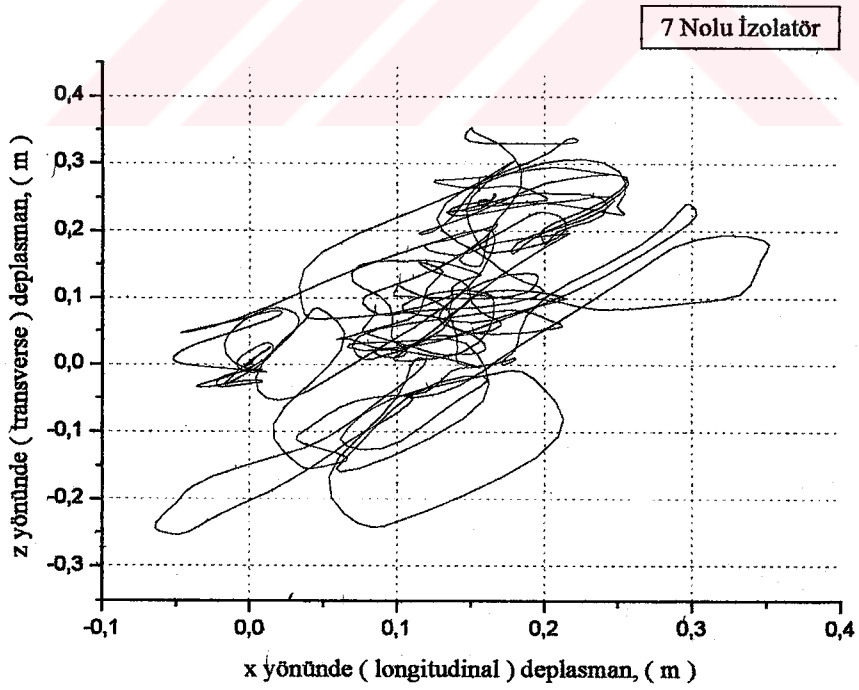
Şekil 7.37. 4 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



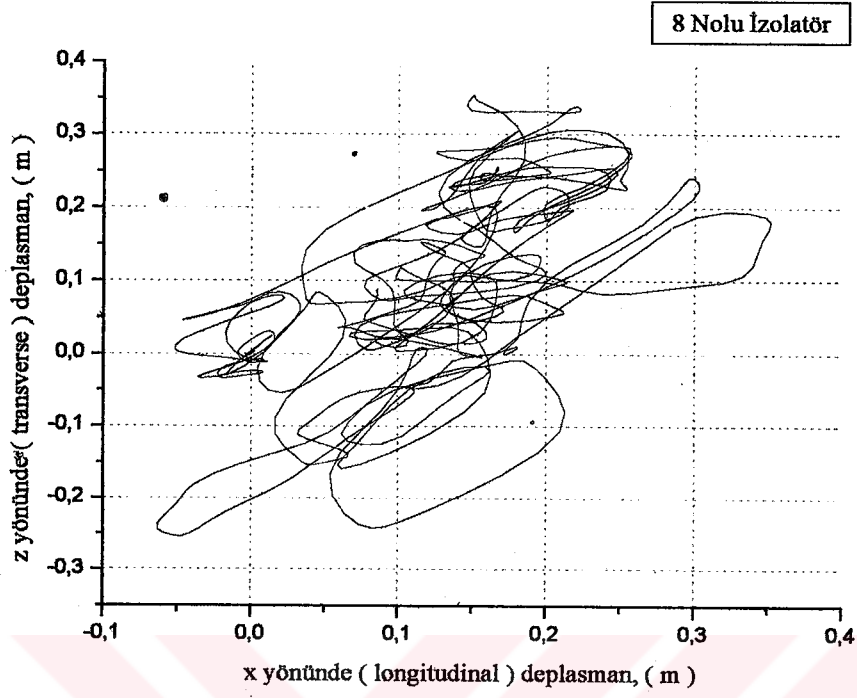
Şekil 7.38. 5 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



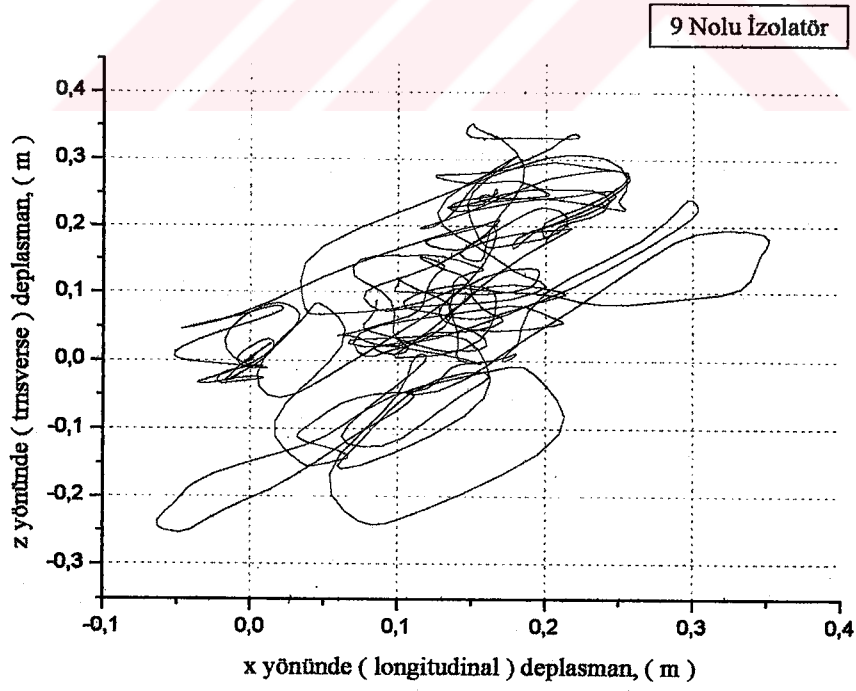
Şekil 7.39. 6 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



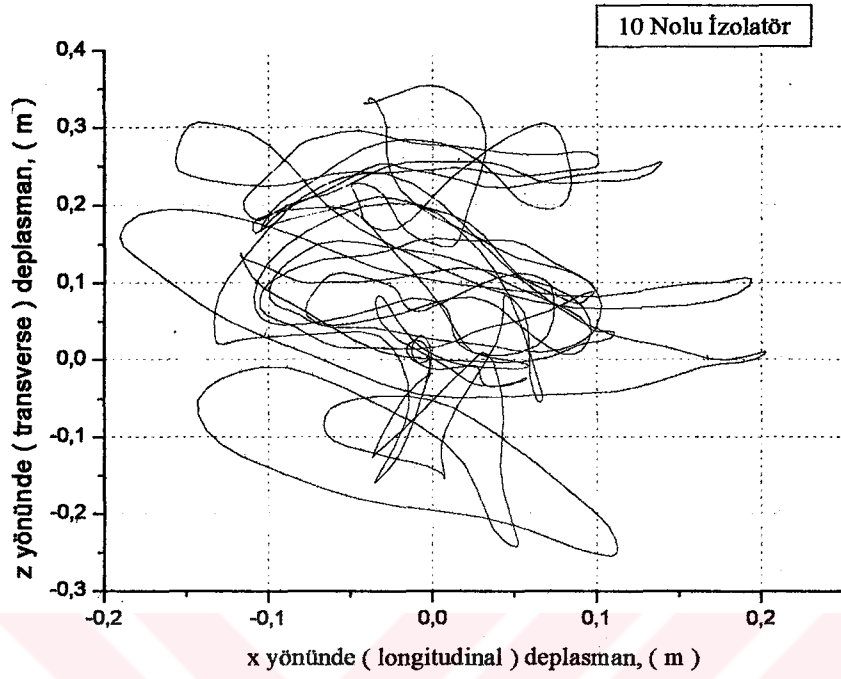
Şekil 7.40. 7 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



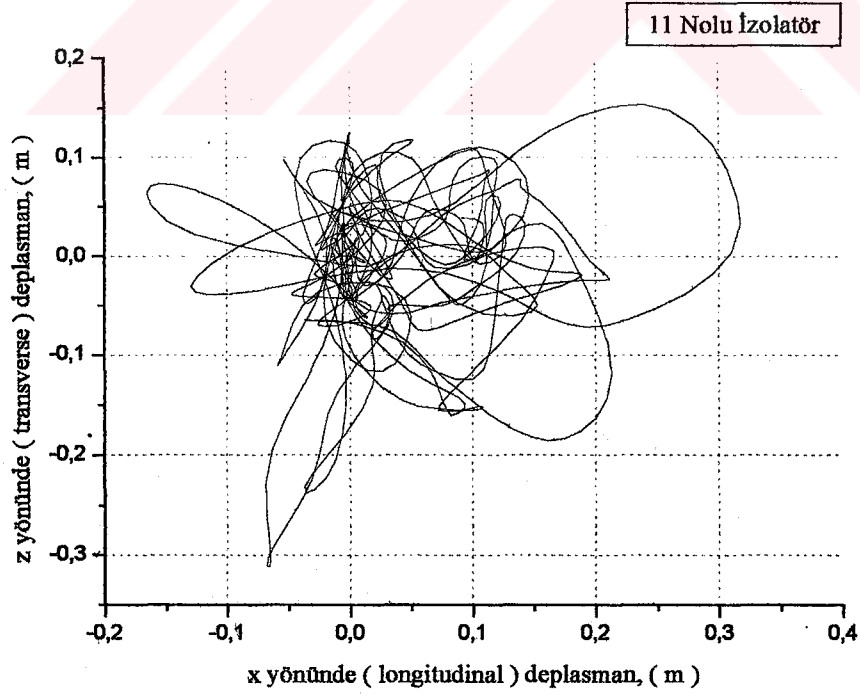
Şekil 7.41. 8 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



Şekil 7.42. 9 no'lu izolatörün deplasman grafiği.

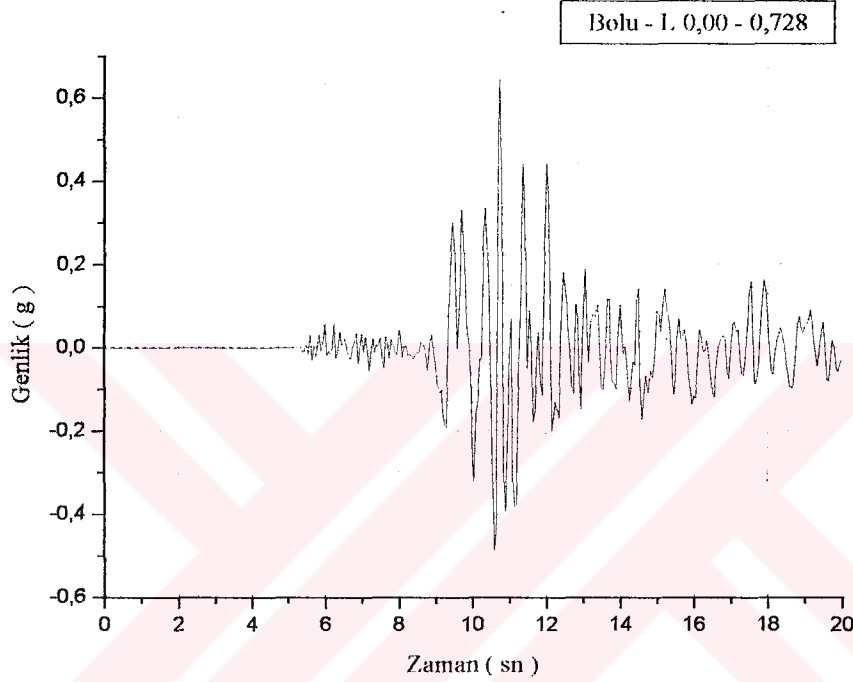


Şekil 7.43. 10 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



Şekil 7.44. 11 no' lu izolatörün deplasman grafiği.

Bolu simule deprem datasının lokal x ve z doğrultularında etkilmesinden sonra 12 Kasım 1999, Düzce depreminin Bolu istasyonundan elde edilen 0,01 sn aralıklı maksimum genliği 0,728 g olan L – 0.00 kaydı kullanılarak lokal x doğrultusunda (uzunlamasına) analiz yapılmıştır. Yine deprem datasının en yüksek genliğe sahip 20 saniyelik bölümü alınıp LUSAS sonlu elemanlar analiz programının gereksinimleri doğrultusunda interpolate edilerek 0,05 saniye aralıklı hale getirilmiştir.



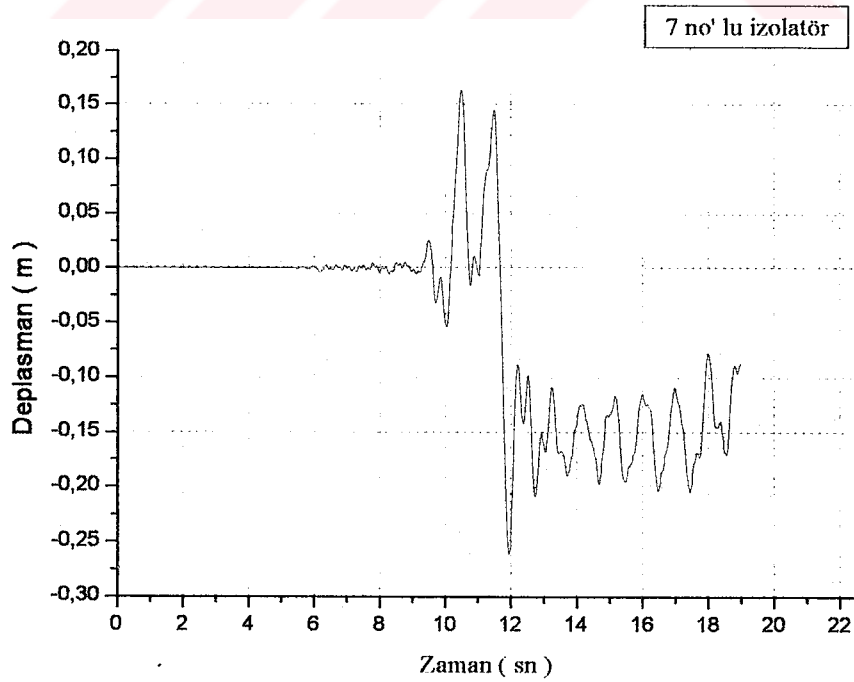
Şekil 7.45. 12 Kasım 1999, Düzce depremi Bolu L 0,00 kaydı.

Aşağıda analiz sonucu elde edilen değerler tablo.7.5.' de verilmektedir:

Tablo.7.5. x Doğrultusunda, Enine Etkitilen Düzce Depremi Sonucu Oluşan Maksimum izolatör deplasmanları.

İzolatör No	+ x yönünde deplasman, (m)	- x yönünde deplasman, (m)
1	0,103263	0,21228
2	0,118052	0,24736
3	0,118449	0,24647
4	0,118394	0,24627
5	0,160197	0,2144
6	0,213377	0,17932
7	0,1639	0,26052
8	0,163676	0,25902
9	0,163675	0,25902
10	0,163834	0,26003
11	0,097073	0,07206

Tablo.7.5.' den de görülebileceği üzere maksimum deplasman sol baştan 7. izolatörde 0,26052 m olarak gerçekleşmiştir, grafiği Şekil 7.46' da verilmektedir:

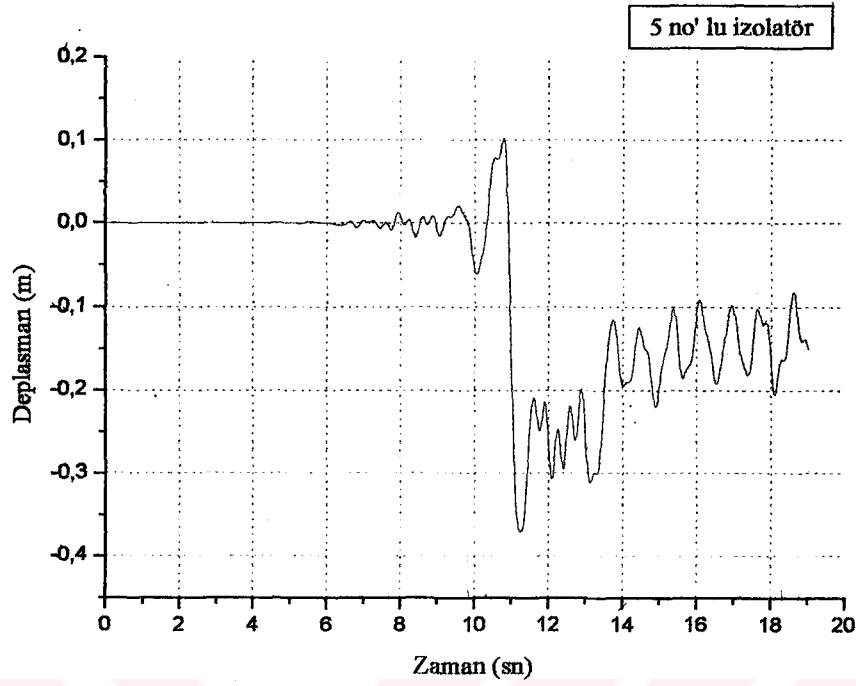


Şekil 7.46. 7 no' lu izolatörün zaman – deplasman grafiği.

12 Kasım 1999, Düzce depreminin Bolu istasyonundan elde edilen L0,00 kaydının uzunlamasına etkililmesinden sonra aynı istasyondan elde edilen L0,90 kaydı enlemesine etkililmiştir. Önce deprem datasının en yüksek genliğe sahip 20 saniyelik kısmı alınıp interpolasyonla 0,05 saniye aralıklı hale getirilmiştir. Elde edilen data lokal z yönünde, enine etkililerek analiz gerçekleştirilmiştir. Maksimum deplasman aşağıdaki tabloda da görüleceği üzere – lokal z yönünde sol baştan 5 no' lu izolatörde 0,37017 m olarak meydana gelmiştir. Tablo.7.6' da maksimum deplasman değerleri ve Şekil 7.47' de 5 no' lu izolatörün zaman – deplasman grafiği görülmektedir:

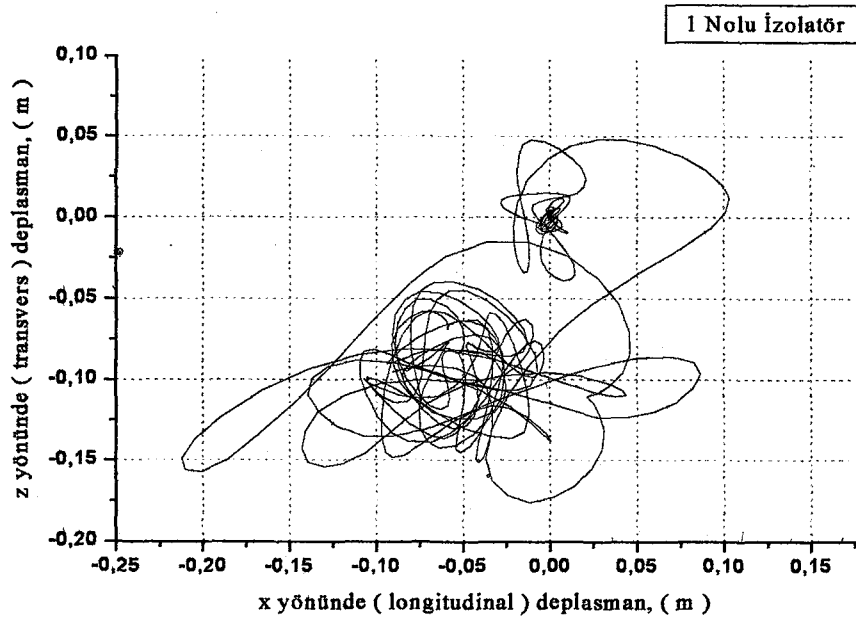
Tablo.7.6. x Doğrultusunda, Enine Etkililen Düzce Depremi Sonucu Oluşan Maksimum İzolatör Deplasmanları.

İzolatör No	+ x yönünde deplasman, (m)	- x yönünde deplasman, (m)
1	0,103263	0,21228
2	0,118052	0,24736
3	0,118449	0,24647
4	0,118394	0,24627
5	0,160197	0,2144
6	0,213377	0,17932
7	0,1639	0,26052
8	0,163676	0,25902
9	0,163675	0,25902
10	0,163834	0,26003
11	0,097073	0,07206

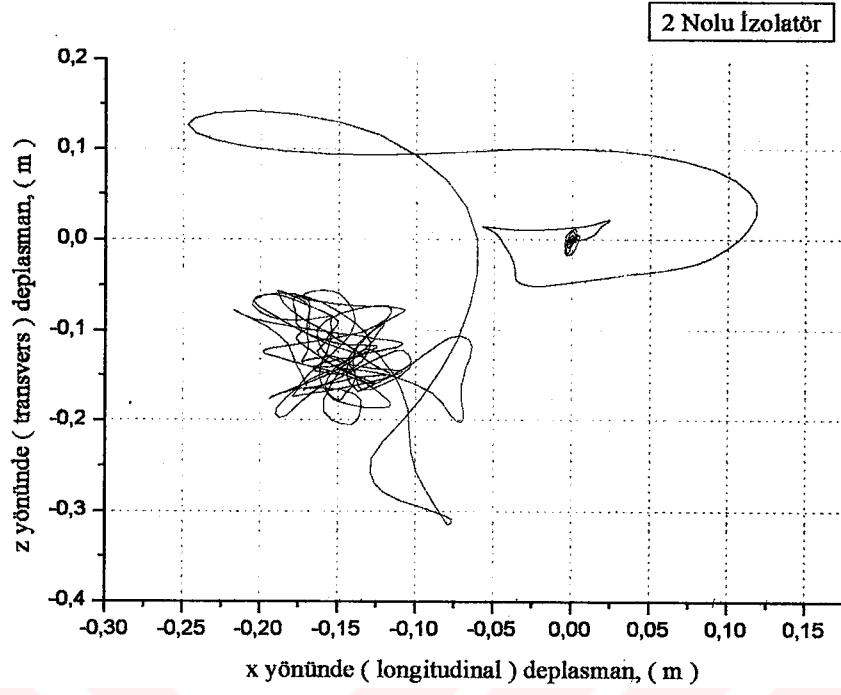


Şekil 7.47. 5 no' lu izolatörün zaman – deplasman grafiği.

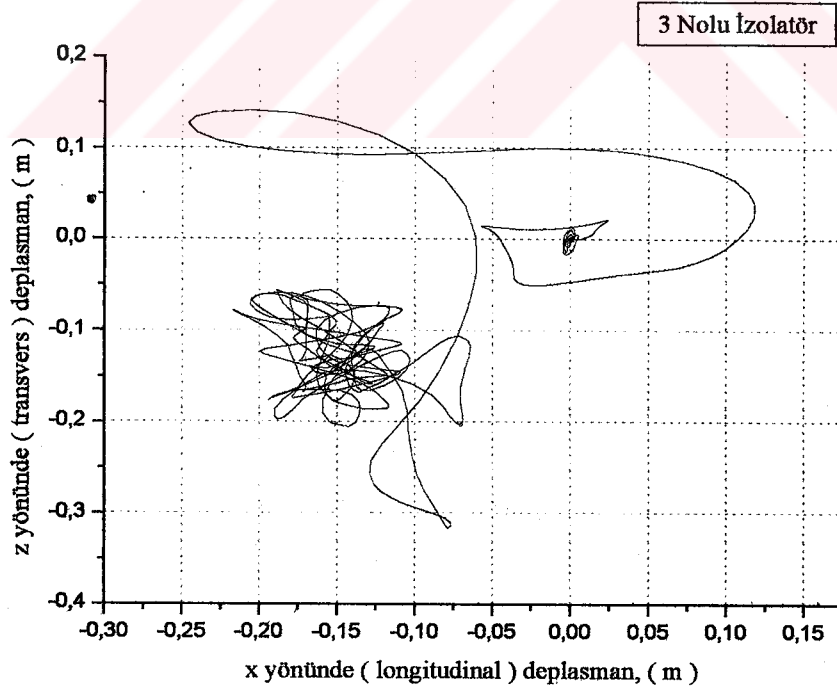
Uzunlamasına ve enine deprem etkililerle analiz yapıldıktan sonra elde edilen deplasman değerleri her bir izolatör için ayrı olarak birleştirilerek izolatörlerin düzlemsel deplasman değerleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler aşağıda görülmektedir:



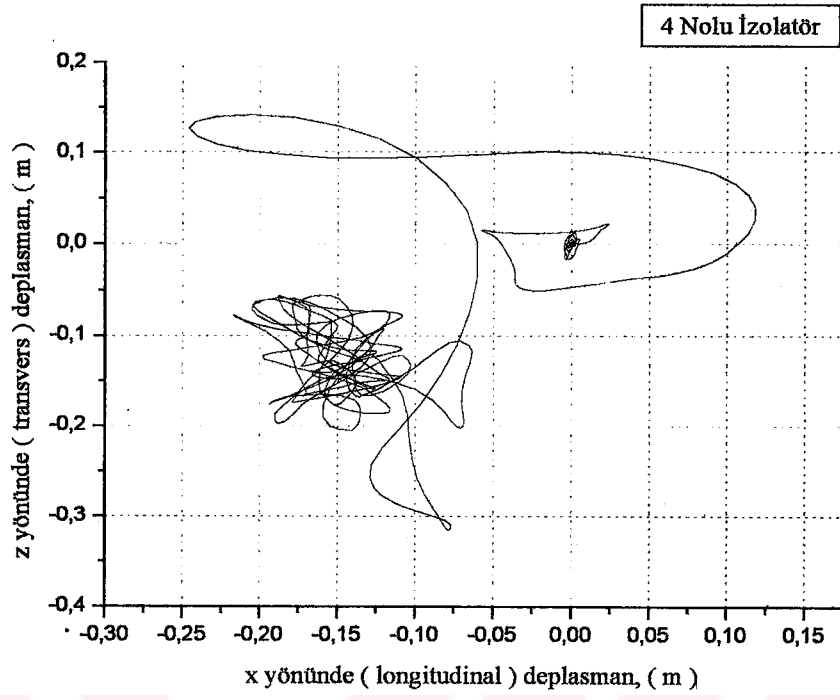
Şekil 7.48. 1 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



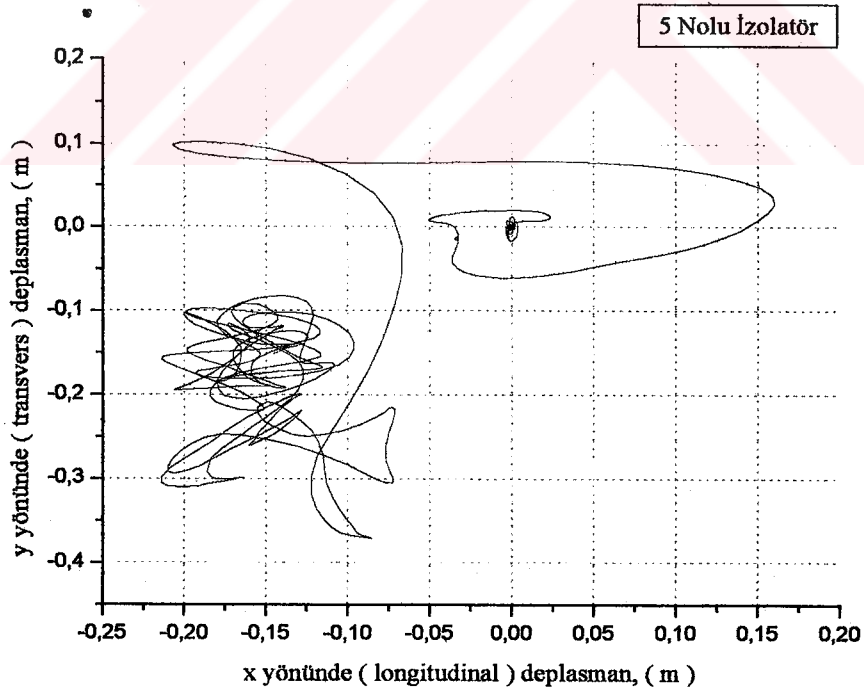
Şekil 7.49. 2 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



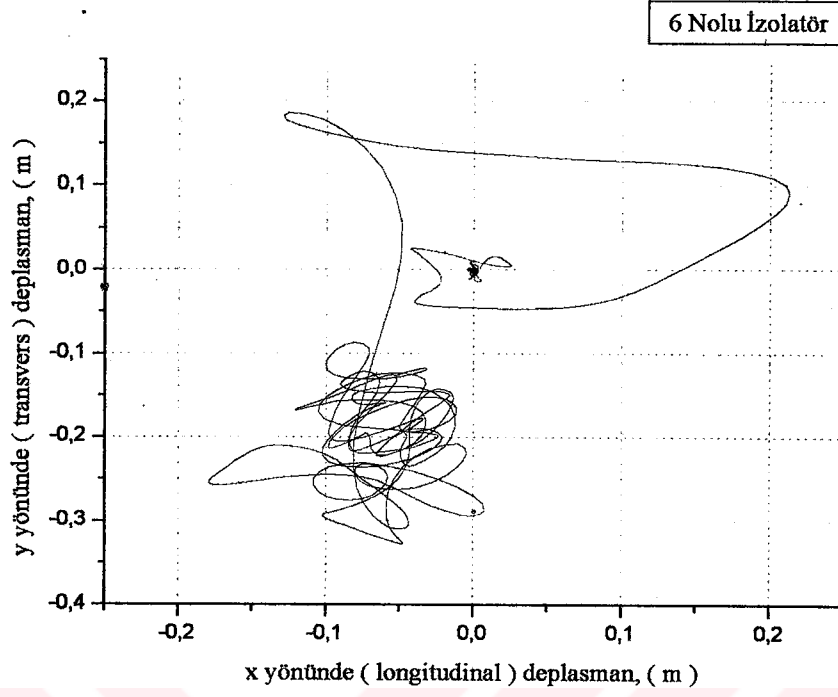
Şekil 7.50. 3 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



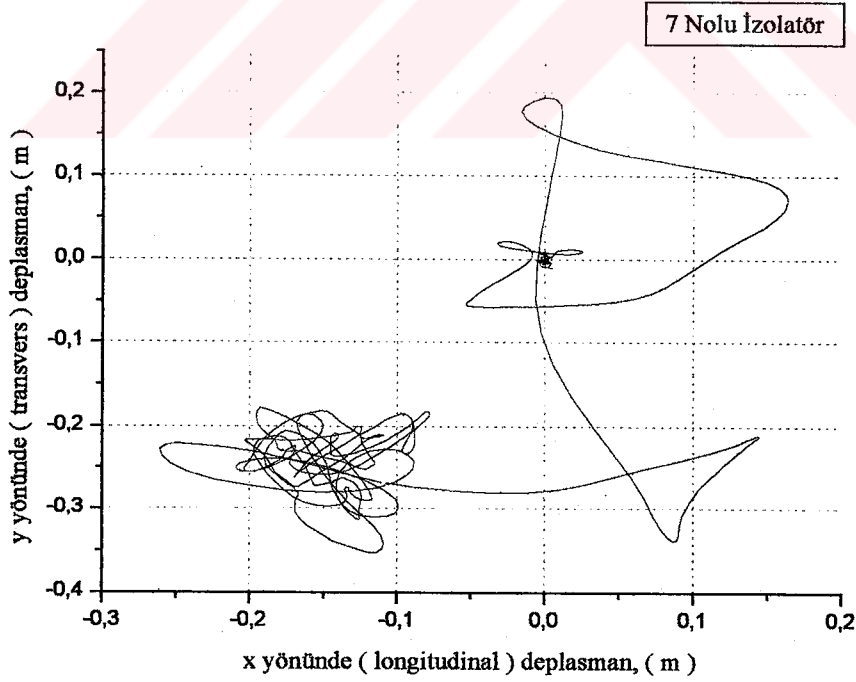
Şekil 7.51. 4 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



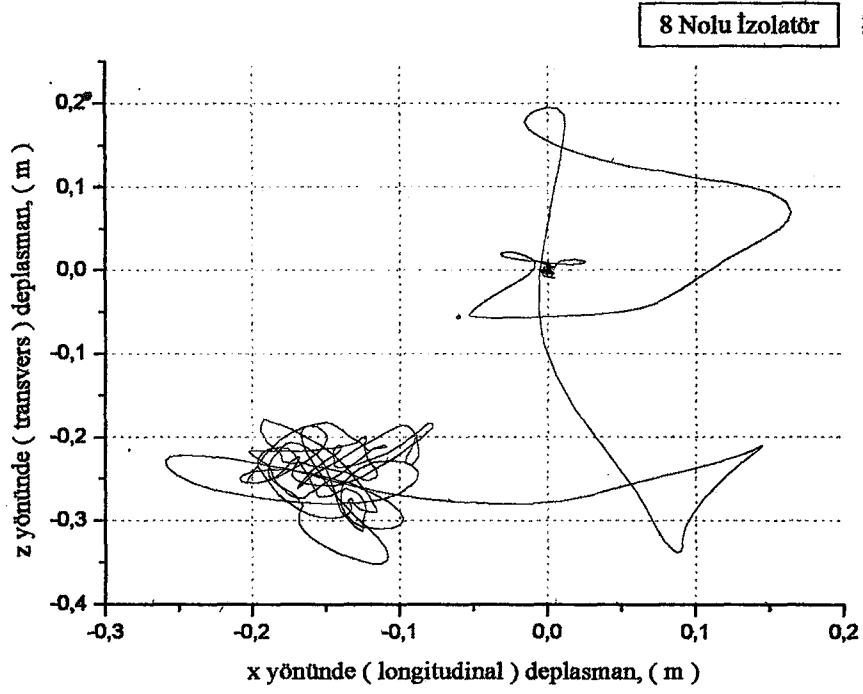
Şekil 7.52. 5 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



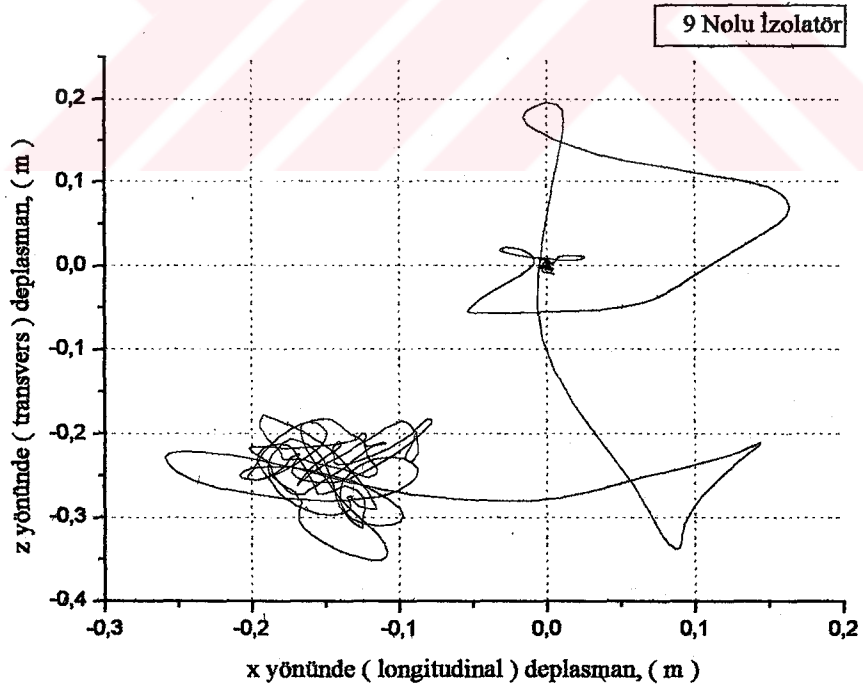
Şekil 7.53. 6 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



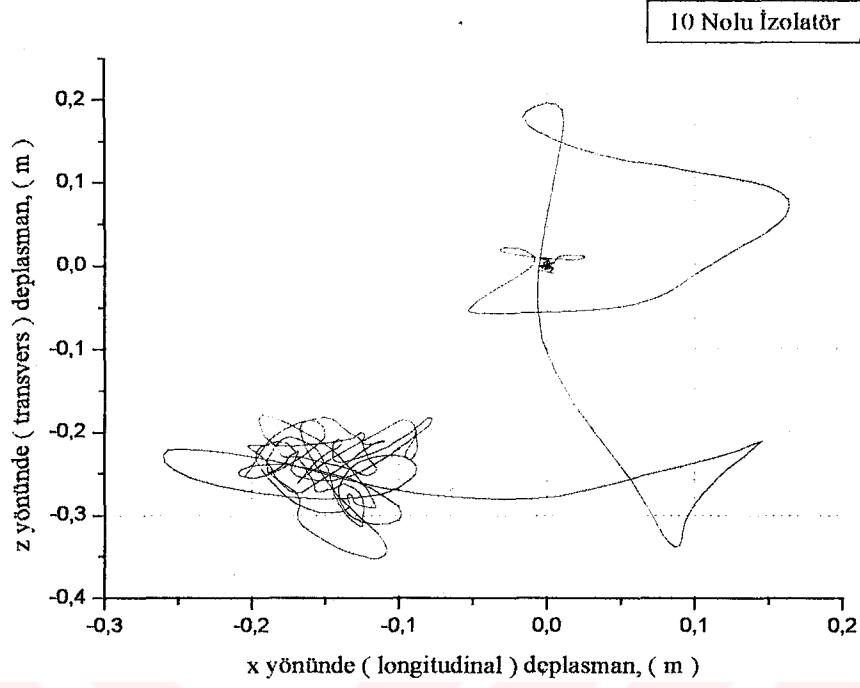
Şekil 7.54. 7 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



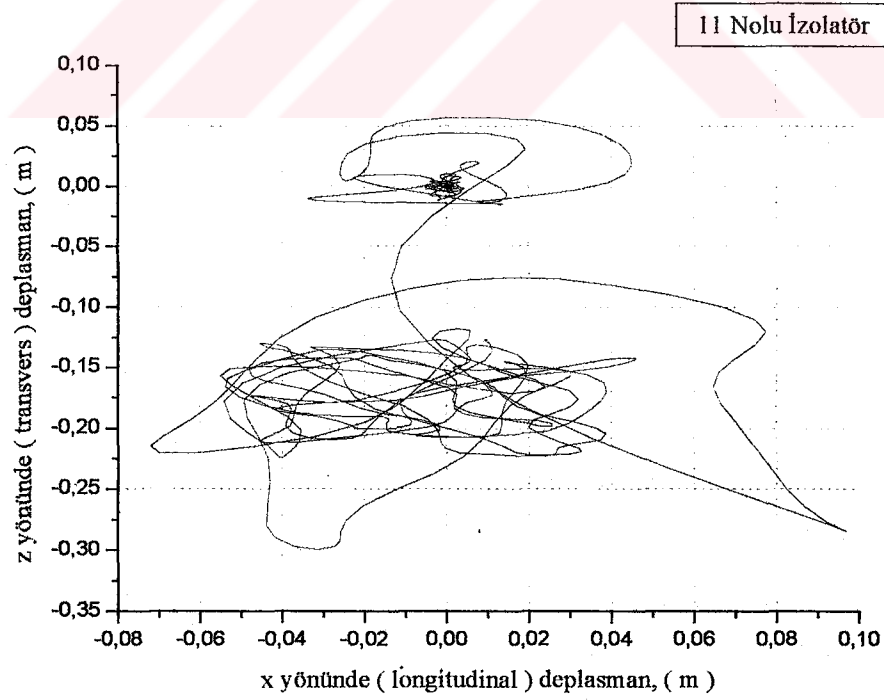
Şekil 7.55. 8 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



Şekil 7.56. 9 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



Şekil 7.57. 10 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



Şekil 7.58. 11 no' lu izolatörün deplasman grafiği.



8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere viyadük AASHTO şartnamesine uygun olarak dizayn edilmemiştir. AASHTO spektrumunun uygulandığı spektral analiz sonucu ortaya çıkan veriler göstermektedir ki sismik izolasyon sistemi yaklaşık 680 mm' lik bir deplasman kapasitesine ihtiyaç duymaktadır. Doğrusal zaman geçmişi analizi içinse bu değer yaklaşık 537 mm' dir. Ancak sistemin deplasman kapasitesi 210 mm olarak dizayn edilmiştir ve buradan da tasarlanan sistemin AASHTO şartnamesine uygun olmadığı sonucu çıkmaktadır. Düşündürücü olan bir diğer nokta ise tasarı deprem deplasman değeri olan 320 mm ve en büyük deplasman değeri olan 480 mm' in göz ardı edilerek sismik izolasyon sisteminin dizaynının gerçekleşmiş olmasıdır.

Sistemde 38 mm gibi küçük bir yer değiştirmeden sonra akma meydana gelmektedir ve plastik hale geçmesinden sonra sistemin rijitliğinde önemli ölçüde düşme görülmektedir. Elastik değer $K_e : 40000 \text{ kN} / \text{m}^2$, plastik haldeki değer $K_p : 1080 \text{ kN} / \text{m}^2$ dir. Rijitlikte görülen yüksek orandaki azalma göstermektedir ki sistemin akmadan sonraki geri dönüşüm kuvveti oldukça yetersizdir ve büyük miktarda kalıcı deformasyona maruz kalacaktır.

Dikkate alınması gereken bir diğer nokta ise 12 Kasım 1999, Düzce depremi esnasında aralarında 30 km mesafe bulunan Düzce ve Bolu istasyonlarında sırasıyla 1,0 g ve 0,8 g' lik maksimum zemin akselerasyonları kaydedilmiştir. Bu da göstermektedir ki iki istasyonun arasında bulunan Bolu viyadüğü tasarımda hedeflenen akselerasyon değeri 0,4 g' den daha büyük zemin ivmelenmelerine maruz kalmıştır.

Netice itibarıyla 12 Kasım 1999, Düzce depreminden sonra viyadüğün izolasyon sisteminde kalıcı büyük deformasyonlar meydana gelmiştir. Buna rağmen izolasyon sistemi görevi icabı deplasmanları kendi bünyesinde yoğunlaştırarak üstyapı ve kolonlara önemli hasar meydana gelmesini engellemiştir. Her ne kadar üstyapı ve kolonlarda ciddi hasar oluşmamış da olsa TEM otoyolunda önemli bir bağlantı yolunu teşkil etmesi bakımından depremden sonra da işlevini yerine

getiriyor olması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı viyadüğün sismik izolasyon sistemi ihtiyaca cevap verebilecek hale getirilmelidir.



KAYNAKLAR



1. A. Marioni (2000), Behaviour of large base isolated prestressed concrete bridges during the recent exceptional earthquakes in Turkey, GLIS, ENEA, News Issue No.1-2000, Bologna, Italy.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (1992), Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Washington, D.C.
3. Astaldi S.p.A. (Contractors) (2000), Miscellaneous documents and diagrams related to the Bolu Viaduct.
4. Bolu simule deprem datası, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, <http://www.koeri.boun.edu.tr/default.html>.
5. Finite Element Analysis Ltd. (2002), LUSAS Finite Element Program, version 13.4, United Kingdom.
6. Hamid Ghasemi et al., The November 1999 Duzce Earthquake: Post – Earthquake Investigation of the Structures on the TEM, Publication No. FHWA – RD – 00 – 146, <http://www.tfhrc.gov/structur/00-00-146.pdf>.
7. Mustafa Erdik, Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes, Bogazici University, Dept. Of Earthquake Engineering, 81220 Cengelkoy, Istanbul, Turkey. <http://www.koeri.boun.edu.tr/earthqk/Kocaelireport.pdf>
8. Naeim, Farzad and M.Kelly, James. Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice. (Canada : John Wiley & Sons, 1999).
9. November,12 1999 Duzce earthquake data Bolu record, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>.
10. P. C. Roussis and M. C. Constantinou, Assessment of Performance of Bolu Viaduct in the 1999 Duzce Earthquake in Turkey, Department of Civil Structural and Environmental Engineering University at Buffalo, State University of New York, June 2001.
11. Y. Xiao, T.T. Yaprak. University of Southern California, Department of Civil Engineering, Los Angeles, CA 90089-2531 USA ve Faik Tokgozoglul, Deputy Project Manager, Yuksel & Rendel Joint Venture, Bolu, Turkey, Observations of the November 12, 1999, Düzce Earthquake.
12. Zekai Celep ve Nahit Kumbasar. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul: Beta Dağıtım, 2000.

ÖZGEÇMİŞ



1976' da İstanbul' da doğdu. İlkokulu Özel Seymen İlköğretim Okulu' nda tamamladıktan sonra orta ve lise öğrenimini Özel Seymen Lisesi' nde yaptı. 1995 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nü kazandı. 1999 yılında mezun olduktan sonra Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü Deprem ve Yapı Bilimleri Anabilim Dalı' nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2000 – 2001 eğitim yılında GYTE Deprem ve Yapı Bilimleri Anabilim Dalı' nda araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Yüksek lisans öğrenimini 2002 – 2003 eğitim yılı güz döneminde bitirdi.

