

**1999 KOCAELİ DEPREMİ SONRASINDA GÜÇLENDİRİLMİŞ  
BETONARME BİR BİNANIN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK  
ANALİZLE PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Emrah YILMAZ  
501031211**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005  
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Ocak 2006**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Beyza TAŞKIN**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Zeki HASGÜR (İTÜ)**

**Prof.Dr. Feridun ÇILI (İTÜ)**

**OCAK 2006**

## ÖNSÖZ

Dünyadaki önemli deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunan ülkemizde, özellikle son yıllarda gerçekleşen yıkıcı depremler, depreme dayanıklı yapı tasarımı kavramının oldukça önemli hale gelmesine neden olmuştur. Bu amaçla yapılan çeşitli araştırmalardan, deprem etkisi altında yapılarda oluşacak hasar durumlarını dikkate alan performansa dayalı tasarım ilkesi benimsenmiş, böylece yapı davranışı doğru bir şekilde ortaya konmuştur. Bu çalışmada da, 1999 Kocaeli depremi sırasında orta derecede hasar görmüş ve sonrasında güçlendirilmiş dört katlı betonarme bir binanın güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için gösterdiği performansı, doğrusal olmayan dinamik analiz ile araştırılarak, ileride bu konuda yapılacak diğer çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışma boyunca göstermiş olduğu anlayış ve yardımları için tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Beyza Taşkın'a, ayrıca tez kapsamında sunulan haritaların elde edilmesindeki yardımlarından dolayı Prof.Dr. Tuncay Taymaz ve Arş.Gör. Seda Yolsal'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2005

Emrah Yılmaz

## **İÇİNDEKİLER**

|                                                                    |             |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>KISALTMALAR</b>                                                 | <b>iv</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                               | <b>v</b>    |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                               | <b>vi</b>   |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                              | <b>ix</b>   |
| <b>ÖZET</b>                                                        | <b>xi</b>   |
| <b>SUMMARY</b>                                                     | <b>xiii</b> |
| <br>                                                               |             |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                    | <b>1</b>    |
| <br>                                                               |             |
| <b>2. ÇALIŞMADA KULLANILAN DEPREM KAYITLARI VE<br/>ÖZELLİKLERİ</b> | <b>5</b>    |
| 2.1 1999 Kocaeli Depremi Hakkında Genel Bilgiler                   | 5           |
| 2.1.1 Kullanılan Deprem Kayıtları ve Karakteristik Özellikleri     | 9           |
| 2.2 1999 Düzce Depremi Hakkında Genel Bilgiler                     | 15          |
| 2.2.1 Kullanılan Deprem Kayıtları ve Karakteristik Özellikleri     | 18          |
| <br>                                                               |             |
| <b>3. YAPI SİSTEMLERİNİN DİNAMİK ANALİZİ</b>                       | <b>22</b>   |
| 3.1 Doğrusal Sistemlerin Dinamik Analizi                           | 22          |
| 3.2 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Dinamik Analizi                   | 24          |
| 3.3 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözümlemesinde Drain-2DX Programı | 30          |
| 3.3.1 Analiz Adımları ve Kabuller                                  | 30          |
| 3.3.2 Drain-2DX ile Yapısal Modelin Hazırlanması                   | 31          |
| <br>                                                               |             |
| <b>4. ÖRNEK BİR YAPININ DETAYLI İRDELENMESİ</b>                    | <b>35</b>   |
| 4.1 Yapının Güçlendirme Öncesi Analizi                             | 35          |
| 4.2 Yapının Güçlendirme Sonrası Analizi                            | 46          |
| <br>                                                               |             |
| <b>5. SONUÇLAR</b>                                                 | <b>59</b>   |
| <br>                                                               |             |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                   | <b>64</b>   |
| <br>                                                               |             |
| <b>EKLER</b>                                                       | <b>66</b>   |
| <br>                                                               |             |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                    | <b>90</b>   |

## **KISALTMALAR**

|                |                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>ABYYHY</b>  | : Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik |
| <b>BÇ</b>      | : Beton Çeliği                                            |
| <b>BS</b>      | : Beton Sınıfı                                            |
| <b>ÇSD</b>     | : Çok Serbestlik Dereceli                                 |
| <b>DAD-ERD</b> | : Deprem Araştırma Dairesi-Earthquake Research Department |
| <b>KAF</b>     | : Kuzey Anadolu Fay hattı                                 |
| <b>TSD</b>     | : Tek Serbestlik Dereceli                                 |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Tablo 2.1</b> Sakarya DB, YarımcaDB, Yarımca KG, Düzce DB ve Düzce KG kayıtlarına ait mühendislik şiddetleri                                | 14                     |
| <b>Tablo 2.2</b> Bolu DB ve Düzce DB kayıtlarına ait mühendislik şiddetleri                                                                    | 21                     |
| <b>Tablo 4.1</b> Elemanlardaki farklı akma değerleri                                                                                           | 36                     |
| <b>Tablo 4.2</b> Elemanlardaki farklı enkesit özellikleri                                                                                      | 37                     |
| <b>Tablo 4.3</b> Güçlendirme öncesi yapının en üst kat yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentine ait maksimum değerler  | 41                     |
| <b>Tablo 4.4</b> Yerdeğiştirme Süneklikleri                                                                                                    | 43                     |
| <b>Tablo 4.5</b> Güçlendirme sonrası yapının en üst kat yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentine ait maksimum değerler | 50                     |
| <b>Tablo 4.6</b> Güçlendirme sonrası durumda R katsayıları                                                                                     | 53                     |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                                                                    | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Şekil 2.1  | Kocaeli ve Düzce depremlerinin oluştuğu fay hattı                                                                                                  | 6                      |
| Şekil 2.2  | Kocaeli depreminin oluştuğu bölge                                                                                                                  | 6                      |
| Şekil 2.3  | Kocaeli depreminde hasar gören prefabrike bir yapı                                                                                                 | 8                      |
| Şekil 2.4  | Kocaeli depreminde zemin sıvılaşması                                                                                                               | 8                      |
| Şekil 2.5  | Kocaeli depreminde sahil kesimlerinde meydana gelen zemin sıvılaşması                                                                              | 9                      |
| Şekil 2.6  | Kocaeli depremine ait (a) Sakarya DB, (b) Yarımca DB, (c) Yarımca KG (d) Düzce DB, (e) Düzce KG kayıtlarının ivme izleri                           | 11                     |
| Şekil 2.7  | Kocaeli depremi kayıtlarına ait ivme karşılık spektrumları                                                                                         | 12                     |
| Şekil 2.8  | Kocaeli depremi kayıtlarına ait yerdeğiştirme karşılık spektrumları                                                                                | 13                     |
| Şekil 2.9  | Kocaeli depremi kayıtlarına ait normalize edilmiş ivme karşılık spektrumları ve tasarım spektrumları                                               | 14                     |
| Şekil 2.10 | Düzce depreminin meydana geldiği bölge                                                                                                             | 15                     |
| Şekil 2.11 | Düzce depreminin bir yolda oluşturduğu yanal atım                                                                                                  | 17                     |
| Şekil 2.12 | Düzce depreminde hasar gören bir cami ve minaresi                                                                                                  | 17                     |
| Şekil 2.13 | Düzce depreminde hasar gören bir viyadük                                                                                                           | 18                     |
| Şekil 2.14 | Düzce depremine ait (a) Bolu DB, (b) Düzce DB ivme kayıtları                                                                                       | 19                     |
| Şekil 2.15 | Düzce depremine ait ivme karşılık spektrumları                                                                                                     | 20                     |
| Şekil 2.16 | Düzce depremine ait yerdeğiştirme karşılık spektrumları                                                                                            | 20                     |
| Şekil 2.17 | Düzce depremi kayıtlarına ait normalize edilmiş ivme karşılık spektrumları ve tasarım spektrumları                                                 | 21                     |
| Şekil 3.1  | Doğrusal olmayan kuvvet-şekil değiştirme eğrisi                                                                                                    | 25                     |
| Şekil 3.2  | a) Elastoplastik, b) Çift doğrulu, c) Üç doğrulu, d) Clough, e) Başlangıca yönelik, f) Takeda, g) Roufaiel-Meyer, h) Bouc-Wen histeretik modelleri | 27                     |
| Şekil 3.3  | 2 nolu elemana ait eleman geometrisi ve moment-eğrilik bağıntısı                                                                                   | 32                     |
| Şekil 3.4  | Eğilme momentinin a) sabit, b) değişken olduğu durumlara ait moment-dönme ve moment-eğrilik bağıntıları                                            | 33                     |
| Şekil 3.5  | 9 nolu elemana ait kuvvet-şekil değiştirme bağıntısı                                                                                               | 34                     |
| Şekil 4.1  | Yapının güçlendirilmemiş durumuna ait zemin kat kalıp planı                                                                                        | 36                     |
| Şekil 4.2  | Güçlendirilmemiş duruma ait birleştirilmiş çerçeve                                                                                                 | 38                     |
| Şekil 4.3  | Sistemin ilk dört titreşim modu                                                                                                                    | 39                     |
| Şekil 4.4  | Güçlendirme öncesi duruma ait yerdeğiştirme zarfı                                                                                                  | 39                     |
| Şekil 4.5  | Güçlendirme öncesi duruma ait Görelî kat ötelemeleri                                                                                               | 40                     |
| Şekil 4.6  | Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapının en üst katında oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi                                                 | 40                     |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.7</b>  | Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıdaki taban kesme kuvveti değişimi                                                                                                                                                                                    | 41 |
| <b>Şekil 4.8</b>  | Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıdaki taban devrilme momenti değişimi                                                                                                                                                                                   | 41 |
| <b>Şekil 4.9</b>  | Kocaeli depreminin (a) Sakarya DB, (b) Yarımca DB, (c) Yarımca KG, (d) Düzce DB, ve (e) Düzce KG ile Düzce depreminin (f) Bolu DB ve (g) Düzce DB kayıtlarına göre yapıdaki taban kesme kuvveti-en üst kat yerdeğiştirme değişimleri                             | 44 |
| <b>Şekil 4.10</b> | Güçlendirme öncesi durum için Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan plastik mafsallar                                                                                                                                                              | 45 |
| <b>Şekil 4.11</b> | Yapının güçlendirilmiş durumuna ait zemin kat kalıp planı                                                                                                                                                                                                        | 46 |
| <b>Şekil 4.12</b> | Güçlendirme sonrası duruma ait birleştirilmiş çerçeve                                                                                                                                                                                                            | 47 |
| <b>Şekil 4.13</b> | Güçlendirilmiş duruma ait yerdeğiştirme zarfları                                                                                                                                                                                                                 | 48 |
| <b>Şekil 4.14</b> | Güçlendirilmiş duruma ait göreceli kat ötelemeleri                                                                                                                                                                                                               | 48 |
| <b>Şekil 4.15</b> | Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapının en üst katında oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi                                                                                                                                                               | 49 |
| <b>Şekil 4.16</b> | Düzce depremi Bolu DB kaydına göre Yapıdaki taban kesme kuvvetinin değişimi                                                                                                                                                                                      | 49 |
| <b>Şekil 4.17</b> | Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan taban devrilme momentinin değişimi                                                                                                                                                                              | 50 |
| <b>Şekil 4.18</b> | Güçlendirme sonrası duruma ait Kocaeli depreminin a) Sakarya DB, b) Yarımca DB, c) Yarımca KG, d) Düzce DB, e) Düzce KG kayıtları ile Düzce depreminin e) Bolu DB ve f) Düzce DB kayıtlarına ait taban kesme kuvveti-en üst kat yerdeğiştirme değişim grafikleri | 51 |
| <b>Şekil 4.19</b> | Eş enerji ilkesi                                                                                                                                                                                                                                                 | 52 |
| <b>Şekil 4.20</b> | Güçlendirme sonrası durum için Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan plastik mafsallar                                                                                                                                                                | 54 |
| <b>Şekil 4.21</b> | Doğrusal olmayan statik analiz sonucu güçlendirme öncesi durum için yapıda oluşan kapasite eğrisi                                                                                                                                                                | 55 |
| <b>Şekil 4.22</b> | Doğrusal olmayan statik analiz sonucu güçlendirme sonrası durum için yapıda oluşan kapasite eğrisi                                                                                                                                                               | 55 |
| <b>Şekil 4.23</b> | Güçlendirme öncesi ve sonrası durumlara ait kapasite spektrumu ve talep spektrumu ilişkisi                                                                                                                                                                       | 57 |
| <b>Şekil A.1</b>  | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri                                                                                                                                      | 67 |
| <b>Şekil A.2</b>  | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımca DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri                                                                                                                                      | 68 |
| <b>Şekil A.3</b>  | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımca KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri                                                                                                                                      | 69 |
| <b>Şekil A.4</b>  | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri                                                                                                                                        | 70 |
| <b>Şekil A.5</b>  | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri                                                                                                                                        | 71 |

|                  |                                                                                                                              |    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil A.6</b> | Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri       | 72 |
| <b>Şekil A.7</b> | Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri      | 73 |
| <b>Şekil B.1</b> | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                  | 75 |
| <b>Şekil B.2</b> | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımca DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                  | 76 |
| <b>Şekil B.3</b> | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımca KG kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                  | 77 |
| <b>Şekil B.4</b> | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                    | 78 |
| <b>Şekil B.5</b> | Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                    | 79 |
| <b>Şekil B.6</b> | Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                       | 80 |
| <b>Şekil B.7</b> | Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Düzce DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu                                      | 81 |
| <b>Şekil C.1</b> | Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri | 83 |
| <b>Şekil C.2</b> | Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Yarımca DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri | 84 |
| <b>Şekil C.3</b> | Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Yarımca KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri | 85 |
| <b>Şekil C.4</b> | Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri   | 86 |
| <b>Şekil C.5</b> | Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri   | 87 |
| <b>Şekil C.6</b> | Güçlendirme sonrası durumda Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri      | 88 |
| <b>Şekil C.7</b> | Güçlendirme sonrası durumda Düzce depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri     | 89 |



## SEMBOL LİSTESİ

|                                               |                                                                                                         |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>                                      | : Elemanın donatı etkili enkesit alanı                                                                  |
| <b>a</b>                                      | : İvme                                                                                                  |
| <b>A<sub>e</sub></b>                          | : Elastik kuvvet-yerdeğiştirme doğrusunun altında kalan alan                                            |
| <b>a<sub>eff</sub></b>                        | : Etkin yer ivmesi                                                                                      |
| <b>a<sub>1</sub><sup>(i)</sup></b>            | : i. İtme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait modal sözde ivme                                   |
| <b>A<sub>p</sub></b>                          | : Plastik kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan                                             |
| <b>d<sub>1</sub><sup>(i)</sup></b>            | : (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait modal sözde ivme                             |
| <b>E</b>                                      | : Beton elastisite modülü                                                                               |
| <b>F<sub>cr</sub></b>                         | : Çatlama anında elemana etkiyen kuvvet                                                                 |
| <b>F<sub>e,max</sub></b>                      | : Elastik durumda etkiyen en büyük kuvvet                                                               |
| <b>F<sub>p,max</sub></b>                      | : Plastik durumda etkiyen en büyük kuvvet                                                               |
| <b>F<sub>u</sub></b>                          | : Taşıma gücü durumunda elemana etkiyen kuvvet                                                          |
| <b>F<sub>y</sub></b>                          | : Akma anında elemana etkiyen kuvvet                                                                    |
| <b>H(iω)</b>                                  | : Frekans tepki fonksiyonu                                                                              |
| <b>I</b>                                      | : Elemana ait donatı etkili atalet momenti                                                              |
| <b>I<sub>EAP</sub></b>                        | : Deprem hücum gücü şiddeti                                                                             |
| <b>K<sub>e</sub></b>                          | : Yapının elastik durumdaki rijitliği                                                                   |
| <b>M</b>                                      | : Elemanın eğilme momenti                                                                               |
| <b>M<sub>y</sub><sup>+</sup></b>              | : Elemanın pozitif akma momenti                                                                         |
| <b>M<sub>y</sub><sup>-</sup></b>              | : Elemanın negatif akma momenti                                                                         |
| <b>M(t)</b>                                   | : t anında elemandaki eğilme momenti                                                                    |
| <b>M<sub>max</sub></b>                        | : Yapıda oluşan en büyük devrilme momenti                                                               |
| <b>M<sub>x1</sub></b>                         | : x deprem doğrultusunda doğrusal elastik davranış için tanımlanan birinci (hakim) moda ait etkin kütle |
| <b>m</b>                                      | : Tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi                                                              |
| <b>N</b>                                      | : Elemandaki normal kuvvet                                                                              |
| <b><math>\bar{P}(i\omega), F[P(t)]</math></b> | : Fourier dönüşüm fonksiyonu                                                                            |
| <b>R</b>                                      | : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı                                                                    |
| <b>S<sub>a</sub></b>                          | : İvme spektrumu                                                                                        |
| <b>SI<sub>0.20</sub></b>                      | : Housner şiddeti                                                                                       |
| <b>S<sub>pv</sub></b>                         | : Yalancı hız spektrumu                                                                                 |
| <b>T</b>                                      | : Titreşim periyodu                                                                                     |
| <b>t<sub>d</sub></b>                          | : Deprem süresi                                                                                         |
| <b>t<sub>eff</sub></b>                        | : Etkin süre                                                                                            |
| <b>U<sub>e,max</sub></b>                      | : Elastik durumdaki en büyük yerdeğiştirme                                                              |
| <b>U<sub>p,max</sub></b>                      | : Plastik durumdaki en büyük yerdeğiştirme                                                              |
| <b>u(t)</b>                                   | : Zamana bağlı yerdeğiştirme                                                                            |
| <b>u(ω)</b>                                   | : Frekansa bağlı yerdeğiştirme                                                                          |
| <b>u<sub>cr</sub>, D<sub>cr</sub></b>         | : Çatlama anındaki yerdeğiştirme                                                                        |
| <b>u<sub>max</sub></b>                        | : Yapının en üst katında oluşan en büyük yerdeğiştirme                                                  |

|                       |                                                                                                                                    |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $u_u, D_u$            | : Taşıma gücü durumundaki yerdeğiştirme                                                                                            |
| $u_y, D_y$            | : Akma anındaki yerdeğiştirme                                                                                                      |
| $u_{xN 1}^{(i)}$      | : Binanın tepesinde (N'inci katında) x deprem doğrultusunda (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait yerdeğiştirme |
| $\ddot{u}_g(t)$       | : Yer ivmesi                                                                                                                       |
| $V_{max}$             | : Yapıda oluşan en büyük taban kesme kuvveti                                                                                       |
| $V_{x1}^{(i)}$        | : x deprem doğrultusunda (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait taban kesme kuvveti                              |
| $\alpha$              | : Gerilme pekleşmesi oranı                                                                                                         |
| $\alpha$              | : Sönüme etki eden kütle faktörü                                                                                                   |
| $\beta$               | : Sönüme etki eden rijitlik faktörü                                                                                                |
| $\theta$              | : Elemanda oluşan dönme                                                                                                            |
| $\Delta M$            | : Elemandaki moment değişimi                                                                                                       |
| $\Delta t$            | : Süre değişimi                                                                                                                    |
| $\phi_{xN 1}$         | : Binanın tepesinde (N'inci katında) x deprem doğrultusunda birinci moda ait mod şekli genliği                                     |
| $\Gamma_{x1}$         | : x deprem doğrultusunda birinci moda ait katkı çarpanı                                                                            |
| $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ | : Yerdeğiştirme süneklikleri                                                                                                       |
| $\tau$                | : Sonsuz küçük periyot değişkeni                                                                                                   |
| $\Psi$                | : Elemanda oluşan eğrilik                                                                                                          |
| $\omega$              | : Harmonik titreşime ait açısal frekans                                                                                            |
| $\omega_n$            | : Doğal titreşim frekansı                                                                                                          |
| $\{f_D\}$             | : Sönüm kuvveti vektörü                                                                                                            |
| $\{f_I\}$             | : Eylemsizlik kuvveti vektörü                                                                                                      |
| $\{f_S\}$             | : İç kuvvet vektörü                                                                                                                |
| $\{u\}$               | : Yerdeğiştirme vektörü                                                                                                            |
| $\{\dot{u}\}$         | : Hız vektörü                                                                                                                      |
| $\{\ddot{u}\}$        | : İvme vektörü                                                                                                                     |
| $[C]$                 | : Sönüm matrisi                                                                                                                    |
| $[K]$                 | : Rijitlik matrisi                                                                                                                 |
| $[K_\beta]$           | : Sönüme etki eden rijitlik                                                                                                        |
| $[M]$                 | : Kütle matrisi                                                                                                                    |
| $\{P(t)\}$            | : Dış yük vektörü                                                                                                                  |

## ÖZET

Çalışmada, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde orta derecede hasar görmüş ve sonrasında güçlendirilmiş dört katlı betonarme bir yapının performansı, doğrusal olmayan dinamik analizle araştırılmıştır. DRAIN-2DX programı kullanılarak yürütülen analiz, yukarıda sözedilen Kocaeli depremi ile 12 Kasım 1999 Düzce depremi sırasında kaydedilen 7 adet güçlü hareket kaydından oluşan bir deprem toplumu ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Her ivme izinin uzunluğu gözönünde bulundurulduğunda, kayıtların güçlü hareketin olduğu kısımlarının üzerinde çalışılmasına karar verilmiş, böylece analiz sırasında elde edilecek çıktı miktarı kontrol edilebilir hale gelmiştir. Böyle bir kısaltma işleminin kaydın karakteristik özelliklerinde belirgin bir değişikliğe sebep olmadığını göstermek için, etkin ivme ( $a_{eff}$ ), etkin süre ( $t_{eff}$ ), Housner şiddeti ( $SI_{0.2}$ ),  $I_{RS}$ ,  $I_{RMS}$ , ve Deprem Hücum Gücü yeteneği ( $I_{EAP}$ ) olarak adlandırılan altı adet mühendislik şiddeti karşılaştırılarak incelenmiştir.

Yapı sistemi, düğümlerinde birbirine bağlanan doğrusal olmayan davranış gösteren kiriş ve kolon elemanlardan oluşan düzlem çerçeveler olarak modellenmiştir. Dinamik yükler etkisindeki yapısal elemanların doğrusal olmayan kuvvet-yerdeğiştirme davranışının çift doğrulu (bilinear) modele uyduğu kabul edilmiş, böylece elemanlar program giriş verisi modellenirken bu varsayıma göre oluşturulmuştur. Bununla birlikte, tüm çerçeveler rijit diyafram davranışı gösterecek şekilde kat seviyelerinde rijit bağlantı elemanları ile birbirlerine bağlanmışlardır. Farklı yapısal karakteristiklere sahip elemanlar, ilgili gruplar içinde sınıflandırılmış ve analiz yapının güçlendirme öncesi ve sonrası durumları için gerçekleştirilmiştir. Güçlendirme aşamasında yapıya eklenen perdelerin de çift doğrulu histeretik modele uygun kuvvet-yerdeğiştirme davranışı gösterdikleri kabul edilmiştir. Yapının son durumundaki performansı, taslak halindeki yeni deprem yönetmeliğinin 13. kısmındaki temel prensiplere göre de araştırılmıştır.

Kat yerdeğiştirmeleri ve görelî yerdeğiştirmeler ile en üst kat yerdeğiştirmeleri, taban kesme kuvveti ve devrilme momentinin zamanla değişimleri her durum için belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Yapının güçlendirme öncesi durumundaki kat yerdeğiştirmesi ve görelî yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 200 mm ve 85 mm olarak hesaplanmıştır. Güçlendirme sonrası için ise bu değerler sırasıyla 30 ve 9 mm olarak bulunmuştur. Plastik mafsalların oluşumu ve yerleri hesaplanmış ve gösterilmiştir.

Yapının performansının diğer bir göstergesi olan yerdeğiştirme sünekliği,  $\mu$ , ele alınan her deprem kaydı için hesaplanmıştır. Taban kesme kuvveti-en üst kat yerdeğiştirmesi değişimi gözönüne alınarak belirlenen süneklik değerleri, yapıda oluşan hasara uygun olmak üzere gevrek davranışı gösterecek şekilde güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için sırasıyla 2.0 ve 2.5 olarak bulunmuştur. Yine de, güçlendirilmiş bina beklenildiği gibi çok daha iyi bir performans göstermiştir. Plastik mafsalları sayısı belirgin ölçüde azalmıştır. Bununla birlikte yapının güçlendirme sonrası durumuna ait akma dayanımı azaltım faktörü,  $R$ , 2.1 olarak hesaplanmıştır.

Yapının güçlendirme öncesi ve sonrası performansı, taslak halindeki yeni deprem yönetmeliğinin 13. kısmındaki temel prensiplere göre de araştırılmıştır. Bu araştırma için yapılan doğrusal olmayan statik itme (Pushover) analizi, binanın her iki durumu için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarının, doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları ile tutarlı olduğu görülmüştür.

# **ASSESSMENT OF THE STRUCTURAL PERFORMANCE OF A RC BUILDING STRENGTHENED AFTER KOCAELİ 99 EARTHQUAKE BASED ON NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS**

## **SUMMARY**

Non-linear dynamic analyses are carried out to illustrate the structural performance of a four story RC building in Yalova, which has experienced moderate damage during the August 17, 1999 Kocaeli Earthquake and strengthened afterwards. Analyses, which are realized by the use of DRAIN-2DX computer program, are performed considering an earthquake ensemble composed of 7 strong motions that are recorded during the above-mentioned Kocaeli and November 12, 1999 Düzce Earthquakes. Considering the length of each acceleration-time history, it is decided to work on the “strong motion” portion of the records; consequently, the amount of the output became manageable. In order to demonstrate that such a shortening procedure does not cause any significant change on the characteristics of the record, six engineering intensities; namely, effective acceleration ( $a_{eff}$ ), effective duration ( $t_{eff}$ ), Housner Intensity ( $SI_{0.2}$ ),  $I_{RS}$ ,  $I_{RMS}$ , and Earthquake Attack Power ability ( $I_{EAP}$ ) are investigated, comparatively.

The structural system is modeled as planar frames, which consists of non-linear elements connected at nodes of beams and columns. It is assumed that, bilinear hysteretic model represents the nonlinear force-displacement relationship of structural members, which are subjected to dynamic loading; therefore, the elements are assigned according to this assumption within the program input modeling. However, all of the frames are connected with rigid link elements on floor levels to exhibit rigid diaphragm behavior. Elements having different structural characteristics are classified in groups and analyses are performed for either the “as-built” or “strengthened” states of the building. Additional shear walls within the final state of the system are also accepted to display bi-linear behavior. Structural performance for the latter is also evaluated taking into account of the fundamental principles in Chapter-13 of the preliminary draft version of the new Turkish Earthquake Resistant Design Code.

Envelopes for generalized and relative displacements and time variations of top-story displacements, base-shear and overturning moment are determined and successfully compared for each case. The maximum generalized and relative displacement values of structure are calculated as 200 and 85 mm, respectively for the as-built state, whereas these values decreased to 30 and 9 mm after the strengthening. Occurrence of plastic hinges and their locations are calculated and plotted on a structural scheme.

Displacement ductility,  $\mu$ , which is an other significant indicator of the structural performance of the building, is calculated under the effect of each earthquake motion. Using base shear-roof displacement relations, mean ductility values are found to be 2.0 (and 2.5), indicating almost brittle behavior, hence consistent with the actual damage of the building. Nevertheless, the strengthened building performed

much better as expected. Number of plastic hinges decreased evidently. However, yield strength reduction factor,  $R$ , is computed as 2.1.

Structural performance for both before and after strengthening cases is also evaluated taking into account of the fundamental principles in Chapter-13 of the preliminary draft version of the new Turkish Earthquake Resistant Design Code. In order to determine this performance, pushover analysis is carried out for these two cases. It is obviously seen that results of this analysis are consistent with the results obtained from nonlinear dynamic analysis.

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu varolduğundan bu yana birçok doğal afetle başetmek zorunda kalmıştır. Dünyada süregelen ve insanların yaşamını önemli derecede etkileyen doğa olayları olarak nitelendirilen doğal afetler, toplumun sosyo-ekonomik ve sosyo-kültürel faaliyetlerini önemli ölçüde aksatarak can ve mal kayıplarına neden olurlar. Oluşumu engellenemeyen bu olayların ortaya çıkışını tahmin etmek ve buna göre gerekli önlemleri almak için yıllardan beri sayısız çalışmalar yapılmıştır. Bilimsel araştırmalar sonucu kasırga, hortum gibi birçok doğa olayı önceden tahmin edilerek can ve mal kaybı önemli derecede engellenmiştir. Bununla birlikte, en büyük doğal afetlerden biri olan deprem için, yerkabuğunu oluşturan levhaların birbirleriyle karmaşık olan etkileşimlerinin bir sonucu olarak yeraltında meydana gelmesi sebebiyle yeryüzündeki olaylardan kaynaklanan afetlerle karşılaştırıldığında deprem oluşumunu belirleyen parametrelerin anlık değişimlerinin gözlemlenmesindeki güçlükten dolayı, bugüne kadar insanların hayatını büyük ölçüde kurtaracak başarılı bir tahmin ve erken uyarı sistemi geliştirilememiştir.

Günümüzde birçok araştırmacı tarafından da kabul gören teoriye göre, depremlerin yerkabuğunu oluşturan levhaların sürekli olarak hareket etmesinden dolayı ortaya çıktığı görüşü benimsenmiştir. Dünyanın iç çekirdeğinin üzerinde bulunan 2900 km kalınlığındaki üst manto (Astenosfer) tabakasında oluşan kuvvetler nedeniyle, bu tabakanın üzerinde yeralan ve kalınlığı 70-100 km arasında değişen yerkabuğu (Litosfer), zayıf olan bölgelerinden ayrılarak levhalara bölünmüştür. Deprem ise bu levhaların birbirlerine göre hareketleri sonucu oluşmaktadır (**Bolt, 1989**). Bu hareketin ortaya çıktığı levha sınırlarının bulunduğu kuşaklar, dünyadaki depremlerin büyük çoğunluğunun meydana geldiği deprem bölgelerini oluştururlar. Dünyanın oluşumundan beri sismik yönden aktif haldeki bu bölgeler üzerinde oluşan depremler sonucu milyonlarca insan ölmüş, çok daha fazlası ise evsiz kalmıştır. Özellikle bu bölgeler üzerinde kurulan, insanların yoğun olarak bulunduğu kentlerde meydana gelen depremler en yıkıcı doğal afetler arasında yer almaktadır.

Bilindiği gibi ülkemiz dünyanın en aktif deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Yürürlükte bulunan deprem bölgeleri haritasına göre, yurdumuzun %92 si aktif deprem bölgeleri içerisindedir. Ayrıca ülke nüfusunun %95 i bu deprem bölgelerinde yaşamaktadır. Bundan dolayı geçmişte can ve mal kaybına yol açan pek çok yıkıcı deprem gerçekleşmiştir. Son 58 yıl içinde 58202 vatandaşımız hayatını

kaybetmiş, 122096 kişi yaralanmış ve yaklaşık olarak 411465 bina yıkılmış veya ağır hasar görmüştür. Büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu gözönüne alındığında, meydana gelen depremler büyük miktarda ekonomik kayba da neden olmaktadır.

Depremlerin önceden tahmin edilemeyişiinden kaynaklanan can ve mal güvenliğine dair riski azaltmak için, bu durumun gerçekleşmesindeki en önemli faktör ve yaşam alanı olan yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesi amaçlanmıştır. Depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkesi bu nedenlere dayalı olarak benimsenmiş, bu ilkeye göre oluşturulan yönetmelikler vasıtasıyla depremden dolayı oluşan maddi ve manevi kayıpların mümkün olduğunca önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ülkemizde bu yaklaşıma göre oluşturulan ve kısaca deprem yönetmeliği olarak bilinen Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik **(1998)** esaslarınca yapıların, hafif şiddetteki depremlerde herhangi bir hasar görmemeleri, orta şiddetteki depremlerde can kaybına neden olmayacak şekilde onarılabilir derecede hasar görmeleri, ağır şiddetteki depremlerde ise onarılamayacak derecede hasar görmekle beraber herhangi bir can kaybına neden olmayacak şekilde kısmen veya tamamen göçmelerinin engellenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmalı ve yapı yeterli denetim altında inşa edilmelidir. Yönetmelik gereği ve ekonomik açıdan, binalar bir defa tasarım depremi geçirecek şekilde projelendirilirler. Bu nedenle, tasarım depreminden daha büyük bir depremle karşılaşıldığında yada yapının birden çok deprem yaşaması sonucu neler olacağı tam bilinmemektedir.

Performans kavramı bu duruma bir çözüm bulabilmek için geliştirilmiştir. Gerçekte bütün mühendislik boyutlandırmalarının performansa dayalı olduğu söylenebilir. Bilindiği üzere, betonarme taşıyıcı sistem boyutlamasında kullanma sınır durumu ve taşıma gücü sınır durumu olmak üzere iki performans seviyesi esas alınır. Birinci performans seviyesinde, kullanma durumundaki yükler altında taşıyıcı sistemdeki hasarın kullanıcıları rahatsız etmeyecek seviyede kalması ve aşırı yerdeğiştirmelerin meydana gelmemesi istenir. İkinci performans seviyesinde de taşıyıcı sistemin, beklenen yüklerin arttırılmış değerleri altında güç tükenmesine gelmeden kabul edilebilir bir güvenliğinin mevcut olması beklenir. Deprem mühendisliğinde performansa dayalı tasarım yöntemi, deprem etkisi altında yapıdan beklenen performans seviyesinin belirlenmesi için kullanılır. Performans seviyesi, özellikle depremden sonra yapıda meydana gelecek hasar durumu ile ölçülür. Bilindiği gibi, günümüz modern deprem yönetmeliklerinde verilen deprem etkisi ve sınır durum ile bir performans seviyesi tanımlanmıştır. Performansa dayalı tasarımda belirli bir deprem etkisinde yapıda birden fazla performans (yada hasar) seviyesinin ortaya çıkması öngörülür. Böylece maliyet ve güvenlik açısından çeşitli alternatifler



oluşturulabilir. Performans kavramı, bu çalışmanın oluşturulduğu an itibariyle taslak halinde olan ve 2006 başında yürürlüğe girmesi öngörülen yeni deprem yönetmeliğinde de yapılar için çeşitli hasar durumlarının tanımlanmasıyla dikkate alınmıştır.

Ülkemizdeki yönetmeliklerde olduğu gibi, taşıyıcı sistem boyutlandırılmasında kullanılan yaklaşım, elemanların etkiyen yükler altındaki davranışlarının elastik sınırlar içinde kaldığıdır. Gerçekte ise yapı performansından söz edebilmek için yapının doğrusal ötesi davranışının da hesaba katılması gerekir. Elemanların akma sınırının ötesindeki gerçek taşıma kapasitelerine kalıcı şekil değiştirmeler yaparak ulaşmaları temeline dayanan doğrusal olmayan (nonlinear) davranış, yapının deprem yüklerine karşı elastik davrandığı durum için bulunan karşılıkların yapı sistemine göre seçilen bazı katsayılar yardımıyla (R katsayısı) düzenlenmesiyle dikkate alınmaktadır. Kuvvetli yer hareketine maruz kalan bir yapının deprem performansının değerlendirilmesinde ve deprem isteminin (talep) belirlenmesinde en etkili yol ise, bu katsayılar kullanılmadan ayrıntılı olarak yapılacak olan doğrusal olmayan analiz yöntemidir.

Doğrusal olmayan analiz yönteminde yükler ve yerdeğiştirmeler arttıkça yapıdaki elemanların bazılarında elastik ötesi davranışlar görülmeye başlamaktadır. Analiz sonucunda yapının artan yükler altında kapasitesi ortaya çıkarılmaktadır. Doğrusal olmayan hesap yöntemleri uygulanan yüklemeye göre statik ve dinamik analiz olarak ikiye ayrılır. Statik analiz, bir dizi yanal kuvvetin, hedeflenen belirli bir kuvvet değerine yada yapının belirli bir yerdeğiştirme değerine erişinceye kadar yapıya her yükleme adımında düzgün artacak şekilde uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Dinamik analizde ise yapıya etki eden dış yükler (zamanın lineer fonksiyonu olarak) değişmektedir. Bu yük bir deprem ivmesi olabildiği gibi, çeşitli etkilere dolayı oluşan bir dış kuvvet de olabilir. Her iki analiz türünde de, yapının artan tekrarlı yükler altındaki doğrusal olmayan kuvvet-şekil değiştirme ilişkisinin ortaya konulması gerekmektedir. Histeretik davranış olarak isimlendirilen bu ilişki doğrusal olmayan analiz yönteminin temelini oluşturur. Çalışmada, doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yöntemlerinin her ikisi de çeşitli aşamalarda kullanılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümü, ayrıntılı olarak çözüm yöntemlerine değinmektedir. Doğrusal olmayan analizde kullanılmak üzere 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerine ait toplam 7 adet ivme kaydı seçilmiş, bu ivme kayıtları güçlü hareket kısımlarını içerecek şekilde kısaltılarak analizde kullanılmak üzere düzenlenmiştir. Bu düzenlemenin kayıtların karakteristiklerinde herhangi bir değişiklik yapmadığı, literatürdeki altı adet mühendislik şiddetinin kısaltma öncesi

ve sonrası durumlar için hesaplanarak mukayese edilmesi suretiyle ortaya konulmuştur.

Üçüncü bölümde doğrusal olmayan davranış ve bu davranışı ifade eden, kullanılabilir bazı histeretik çevrimler tanımlanmıştır. Diğer yandan, bu amaçla hesap yapmak için geliştirilen DRAIN-2DX (**Prakash ve diğ., 1993**) programı yardımıyla, yapıya ait kolon, kiriş ve güçlendirme sonrasında eklenen perdeler çift doğrulu histeretik davranış gösterecek şekilde (programda tanımlanan 2 nolu eleman tipine göre) modellenmişlerdir.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi esnasında hasar görmüş ve daha sonra, her iki doğrultusuna dörder adet olmak kaydıyla toplam 8 adet betonarme perdenin ilave edilmesiyle güçlendirilmiş olan, dört katlı betonarme bir bina, çalışmanın dördüncü bölümünde hem güçlendirme öncesi hem de güçlendirme sonrası durumlar için ayrıntılı olarak incelenmiştir. Analiz sonucu, yapının her iki durumu için yapıya ait göreceli ve toplam yerdeğiştirmeler, oluşan kesme kuvveti ve devrilme momenti, yerdeğiştirme süneklikleri, mafsall oluşumu ve yönetmelikteki R katsayısı, ele alınan deprem kayıtlarına göre belirlenerek tablolar ve şekiller yardımıyla ifade edilmiştir.

Doğrusal olmayan analiz sonucu belirlenen yapıya ait kapasite, belirli bir deprem yada bir deprem toplumu için belirlenen istem ile mukayese edilmekte ve bu iki karşılığın sağlandığı nokta yapının performans noktası olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada, ele alınan deprem kayıtlarından oluşturulan deprem toplumu etkisinde yapının gösterdiği performans seviyesi belirlenmiştir.

Sonuç olarak depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı kavramını tam olarak uygulamak ve bunun sonucunda depreme karşı dayanıklı yapıları oluşturmak için gerekli bilgisayar programları ve malzemeler her geçen gün biraz daha geliştirilmekte, yeni ve kullanışlı yöntemler ortaya konulmaktadır. Bütün bu gelişmelere kusursuz çalışan bir denetim mekanizması eklendiğinde, deprem sonrasında gerçekleşecek can ve mal kaybı düşük seviyelerde olacaktır.

## 2. ÇALIŞMADA KULLANILAN DEPREM KAYITLARI VE ÖZELLİKLERİ

Her ne kadar ülkemiz topraklarının neredeyse tamamı deprem tehlikesiyle karşı karşıya olsa da, ne yazık ki kuvvetli hareket kayıt şebekesi oldukça yetersiz durumdadır. Depremlerde alınan kayıtlar, çoğu zaman İnşaat Mühendisliği yapılarında karşılaşılan hasarı tanımlayamayacak ölçüde, merkezüssüne oldukça uzak olan kayıtlar olmuş, dolayısıyla da pik ivme değerlerinin olduğu yöreler bir çok depremde yakalanamamıştır

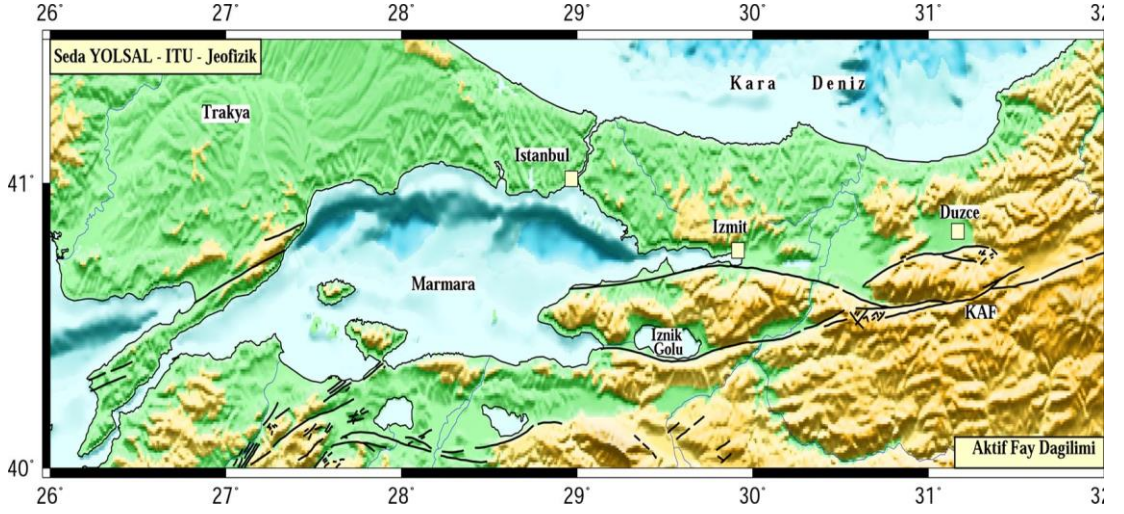
Bu araştırmanın ileri bölümlerinde detaylı olarak incelenecek betonarme yapının Yalova ilinde inşa edilmiş ve ayrıca 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında orta hasar görmüş olması nedeniyle, yörenin karakteristiklerini nispeten temsil etmek bakımından, Türkiye depremleri içinden 1999 Kocaeli ve yine 1999 Düzce depremlerine ait kayıtlar tercih edilmiştir.

### 2.1 1999 Kocaeli Depremi Hakkında Genel Bilgiler

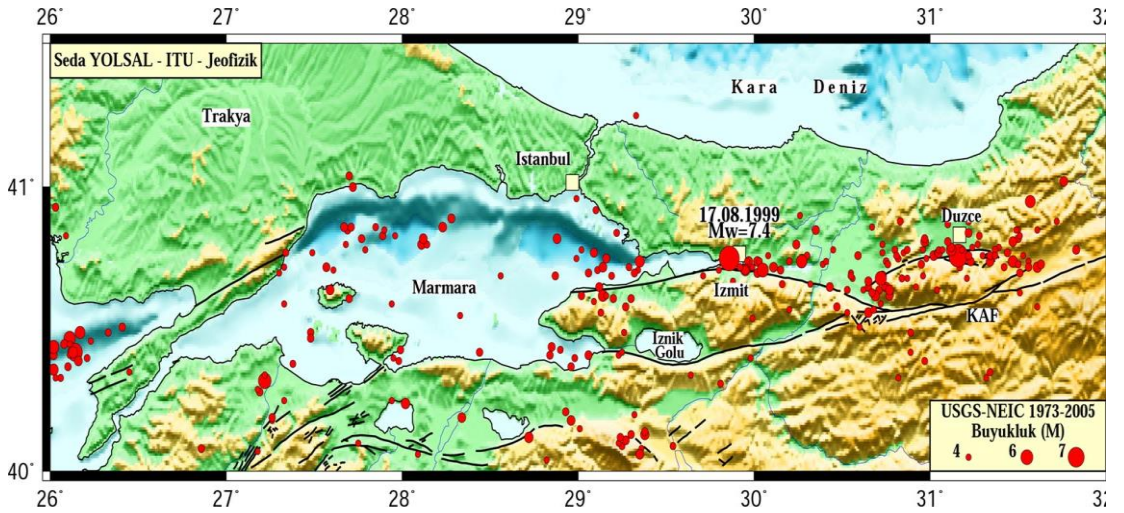
Kocaeli depremi; 17 Ağustos 1999 tarihinde yerel saatle 03:02 de (00:02 GMT)  $M_S=7.8$ ,  $M_W=7.4$  büyüklüğünde meydana gelmiştir. Depremin merkezinde yeralan Kocaeli şehri, geçmişte büyük depremlerin olduğu, Şekil 2.1 de görülen Kuzey Anadolu Fay Hattının (KAF) en batıdaki kısmının üzerinde kurulmuştur. Şekil 2.2 de de görüldüğü gibi şehrin bulunduğu bölge sismik yönden oldukça hareketlidir (Taymaz ve diğ., 2003). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi (Earthquake Research Department, DAD-ERD) depremin merkezüssünün koordinatlarını 40.70 (K), 29.99 (D) olarak belirlemiştir. Bu koordinatlar İzmit şehrinin 11 km güneydoğusunu göstermektedir. 17 Ağustos'tan sonra, ana şoku izleyen çok sayıda artçı şok oluşmuştur. Bunlardan 13 Eylül 1999 tarihinde, Gölcük civarında 5.9 büyüklüğünde gerçekleşen bir artçı şok, deprem sırasında ağır derecede hasar görmüş bazı binaların yıkılmasına neden olmuştur. İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bolu, Bursa, Zonguldak ve Eskişehir'de binalarda ağır derecede hasar ortaya çıkmış, çok sayıda ölen ve yaralanan olmuştur. Deprem, 300 km ötedeki Ankara'nın doğusuna kadar geniş bir alanda hissedilmiştir (Aydan ve diğ., 2000).

Kocaeli depremine neden olan kırılma 15 km derinlikte oluşmuş, Düzce'nin doğusundan başlayarak İzmit körfezine kadar süren, 120 km uzunluğunda yüzey

kırığı meydana getirmiştir. Kırılma fayda, KAF'ın karakteristik özelliğine uygun olarak sağ yanal atıma neden olmuştur. Arazi gözlemleri ele alındığında yüzey kırığı, ortaya çıkış sırasına göre üç ana kısımda incelenebilir (**Taymaz, 1999**):



**Şekil 2.1 : Kocaeli ve Düzce depremlerinin oluştuğu fay hattı**



**Şekil 2.2 : Kocaeli depreminin oluştuğu bölge**

*Düzce-Akyazı arası:* Düzce'nin doğusundan başlayıp Gölyaka ve Değirmentepe'den geçerek Akyazı'ya ulaşır. Bu kısımda yeralan Gölyaka ve Değirmendere'de sırasıyla 7 ve 25 cm yanal atım gözlenmiştir.

*Akyazı-Sapanca arası:* Fay Adapazarı'nın 5 km güneyinden ve Sakarya ovasında yeralan Arifiye'den geçerek Sapanca gölüne doğru ilerlemiştir. Bu kısımda yeralan Arifiye'de yüzey kırığı açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Kırık bu bölgedeki bir yolu yaklaşık 350 cm ötelemiştir. Demiryolu hatlarında büyük deformasyonlar görülmüştür. Fayın geçtiği Arifiye'deki TEM otoyolu üstgeçidinin kuzeydeki toprak setinde oluşan yanal hareketten dolayı köprü yıkılmıştır. Fay Arifiye'yi geçtikten sonra Sapanca gölünün güneydoğu ucuna doğru uzanır ve gölün içinde kaybolur.

*Sapanca-Gölcük segmenti:* Sapanca gölünden İzmit körfezine kadar uzanır. Sapanca gölünün güneydoğusunda kaybolan kırık gölün batı ucunda ortaya çıkmış ve Acısu, Tepetarla ve Sarımeşe köylerinden geçmiştir. Fay Acısu'da 300 cm'lik yanal ötelenme yapmıştır. Tepetarla köyünde bazı duvar ve çitlerde 200~240 cm arasında değişen yanal ötelenmeler görülmüştür. İzmit körfezine geldiğinde fay, körfezin güney sahilindeki Başiskele civarında denizin içine doğru uzanıp kaybolur. Kırık Gölcükte tekrar ortaya çıkar. Burada bulunan ordu karargahının batı duvarındaki ötelenme 450 cm ile fayın oluşturduğu en büyük yanal atım olarak ölçülmüştür.

Gölcük ve Değirmendere arasında fay tekrar denizin içine girer ve sahil boyunca kıyıya yakın bir şekilde batıya doğru uzanır. Fayın bu bölgede kırılmasından dolayı oluşan sıvılaşmayla fay ile sahil arasında denizin içinde uzanan zemin kaymış ve deniz kıyısında bulunan yerleşimlerin büyük hasar görmesine sebep olmuştur.

17 Ağustos depremi farklı yapı türlerinde, özellikle de kayıpların büyük bir çoğunluğunun meydana geldiği betonarme yapılarda değişik düzeylerde hasar durumlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Betonarme yapılarda görülen bu hasarların sebepleri kötü işçilik, düşük beton kalitesi, yapı tasarımında sismik etkilerin yeterince gözönüne alınmaması, taşıyıcı özelliği oldukça zayıf olan boşluklu tuğla kullanımı, yıkanmamış deniz kumu kullanımı sonucu oluşan yoğun düzeyli korozyon, zemin şartlarından oluşan aşırı oturmalar ve sıvılaşmadır. Ayrıca prefabrike yapılarda da Şekil 2.3 deki gibi önemli derecede hasar gözlemlenmiştir.

Betonarme hatılların yönetmelik esaslarına uygun olarak kullanıldığı ve yönetmelik esaslarına uygun, üç kattan daha az olarak inşa edilen yığma yapılarda, alüvyon zemin üzerinde bulunmalarına rağmen ciddi bir hasar gözlemlenmemiştir.

Genellikle yığma olarak inşa edilen yüksek minareler yıkılmıştır. Pilonlar ise fayın tam üzerinde bulunanlar haricinde hasar görmemişlerdir.

Bazı köprüler ve üstgeçitler yapısal hasar görmüş ve hatta yıkılmışlardır.

Zeminde büyük yatay ötelenmeler ve sıvılaşma gözlemlenmiştir. Adapazarı, Gölcük, İzmit ve Yalova'daki hasarların oldukça fazla olmasında, Şekil 2.4 ve 2.5 de görülen zemin sıvılaşmasının etkisi büyüktür. Ayrıca bazı bölgelerde şev kaymaları görülmüştür.





Şekil 2.3 : Kocaeli depreminde hasar gören prefabrike bir yapı



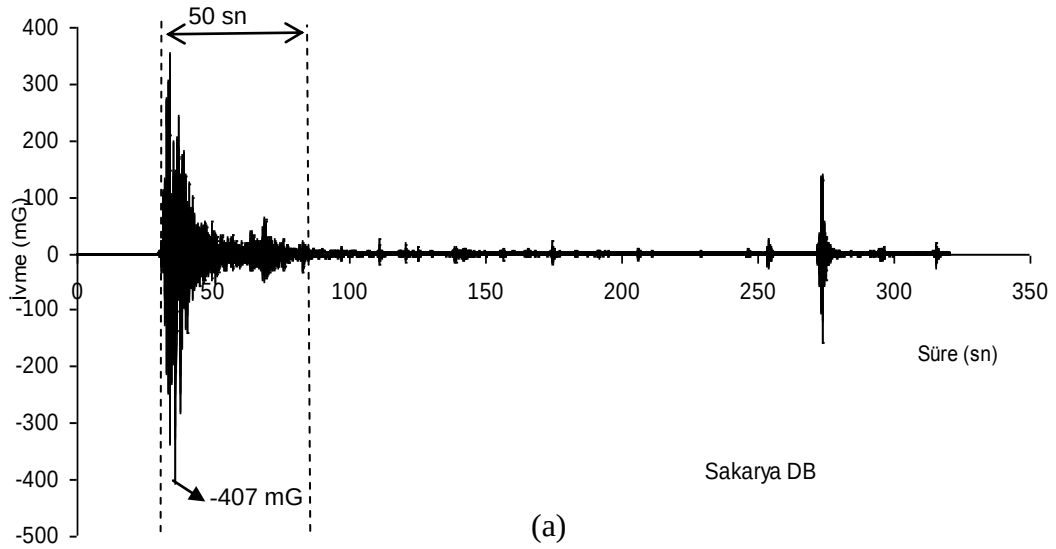
Şekil 2.4 : Kocaeli depreminde zemin sıvılaşması

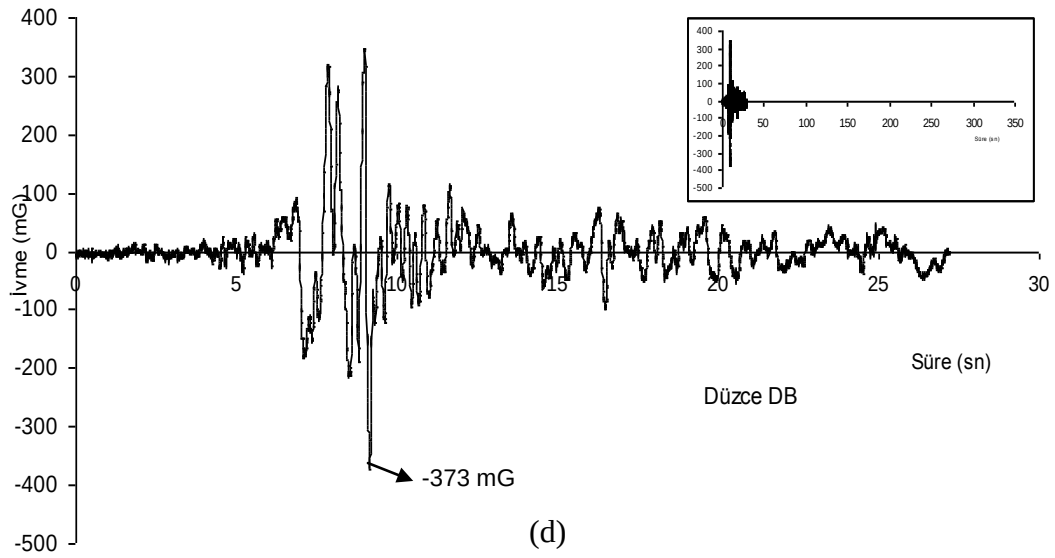
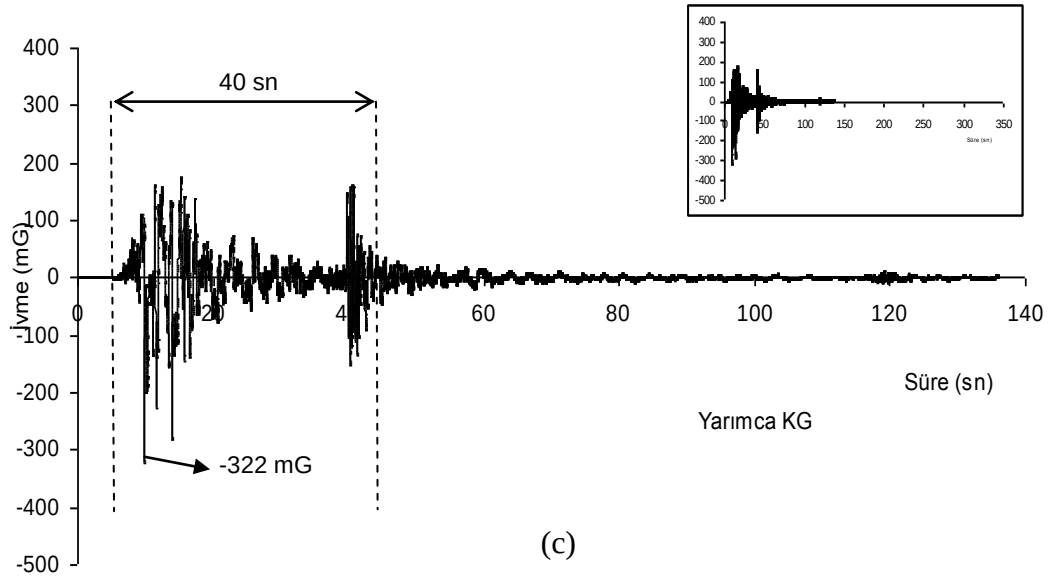
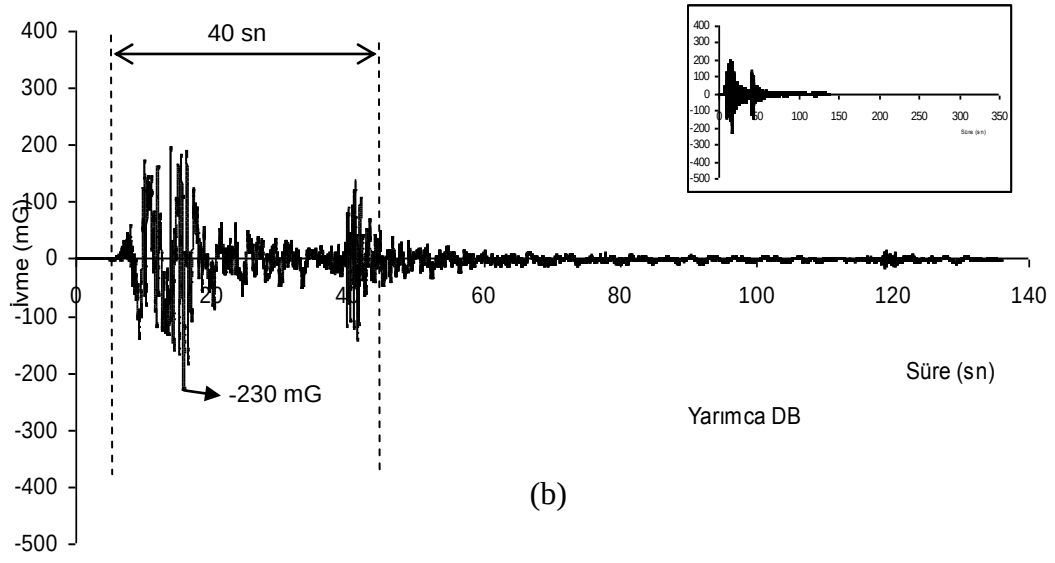


**Şekil 2.5 :** Kocaeli depreminde sahil kesimlerinde meydana gelen zemin sıvılaşması

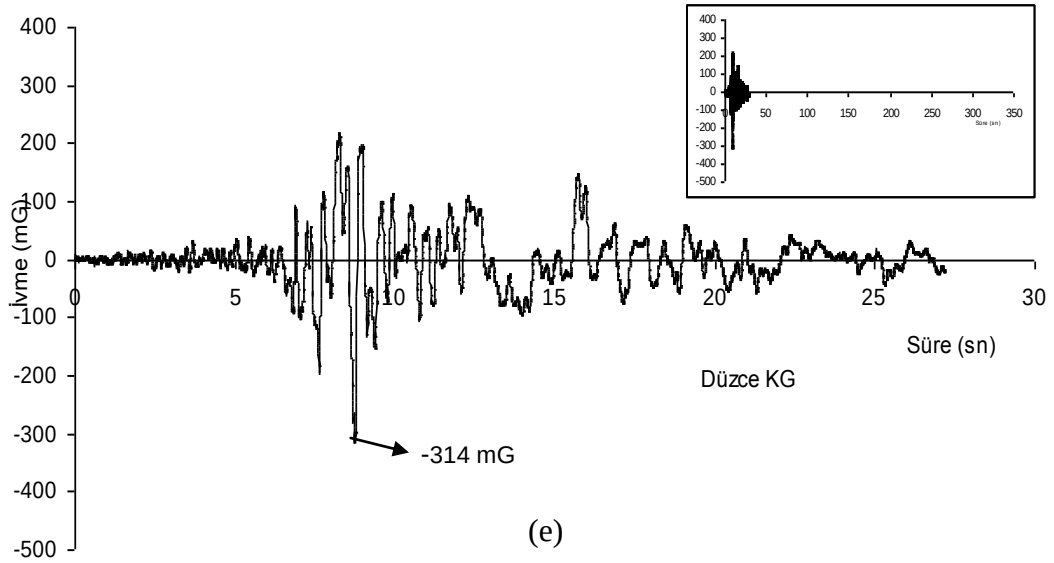
### 2.1.1 Kullanılan Deprem Kayıtları ve Karakteristik Özellikleri

Depremin ana şoku, (DAD-ERD) tarafından oluşturulmuş Türkiye Ulusal Güçlü Hareket Kayıt Ağı'na bağlı olan çeşitli istasyonlarda bulunan akselograflar tarafından kaydedilmiştir. Bu çalışma kapsamında Kocaeli depremi için Düzce doğu-batı (DB) ve kuzey-güney (KG), Sakarya DB, Yarımca DB ve KG olmak üzere beş farklı deprem kaydı dikkate alınmıştır. Bu kayıtların ivme izleri Şekil 2.6 (a,b,c,d,e) da görülmektedir.







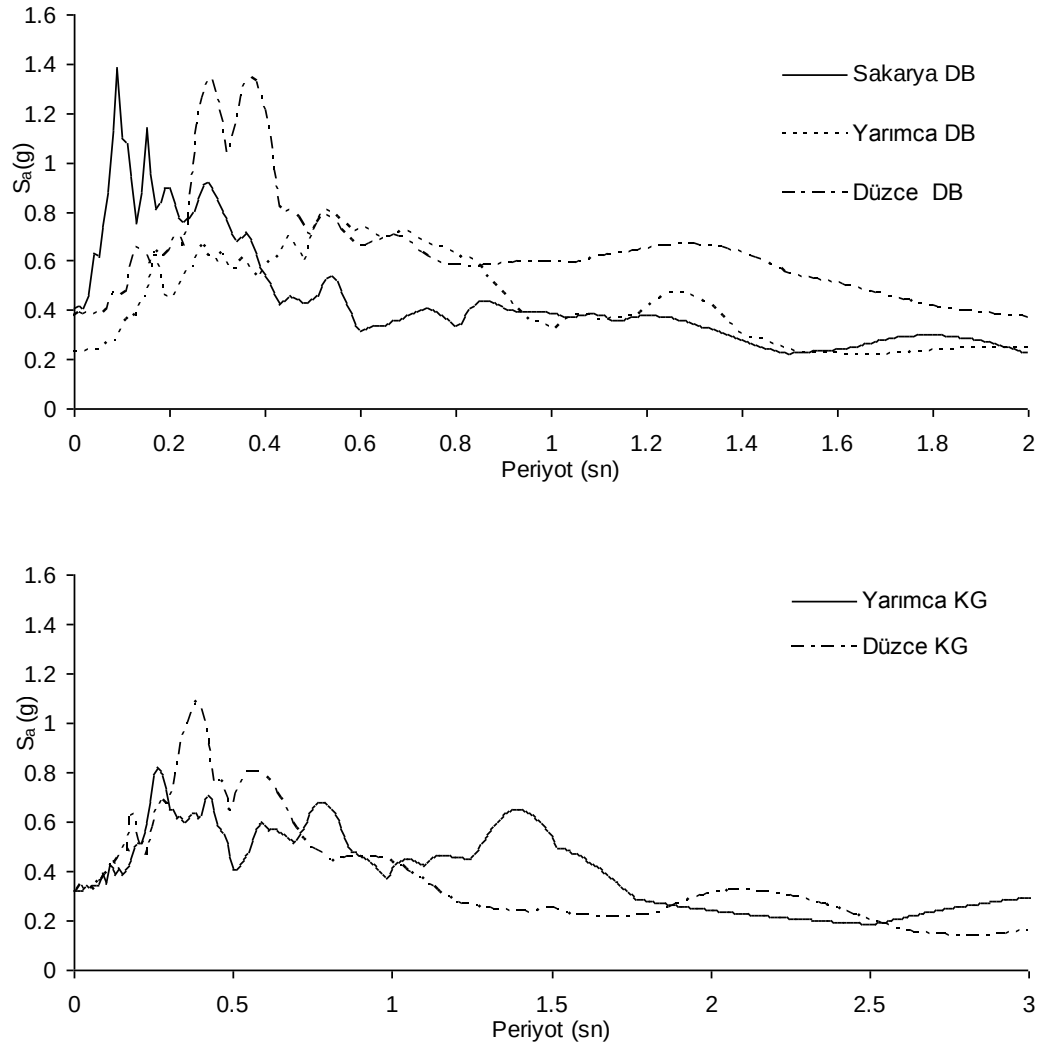


**Şekil 2.6 :** Kocaeli depremine ait (a) Sakarya DB, (b) Yarımca DB, (c) Yarımca KG (d) Düzce DB, (e) Düzce KG kayıtlarının ivme izleri

Yukarıda ivme izleri verilen kayıtlar kullanılarak oluşturulan %5 sönümlü ivme ve yerdeğiştirme spektrumları Şekil 2.7 ve Şekil 2.8 de verilmiştir.

İvme karşılık spektrumlarına bakıldığında DB yönü için maksimum değerler Sakarya kaydında yaklaşık 0.10 sn de ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, 0.15, 0.25, 0.55 ve 0.85 sn ler civarında, yumuşak zemin karakteristiklerini yansıtacak şekilde pik oluşumları söz konusudur. Yarımca kaydında en büyük değer 0.50 sn de oluşmuş, 0.20, 0.30, 0.45 ve 1.30 sn değerlerinde de pik oluşumuna rastlanmıştır. Düzce kaydında 0.40 sn de oluşan maksimumun yanısıra, 0.15, 0.40, 0.55 ve 0.70 sn değerlerinde de pik oluşumu görülür. KG yönünde ise maksimum değerler Yarımca kaydı için 0.25 sn., Düzce kaydı için 0.40 sn.'de ortaya çıkmaktadır. Burada da Yarımca kaydı için 0.45, 0.6, 0.8 ve 1.40 sn lerde, Düzce kaydı için ise 0.20, 0.60 ve 2.10 sn lerde pik değerler görülmektedir.

Yerdeğiştirme karşılık spektrumlarına göre maksimum değerler DB yönünde Yarımca kaydı için 5. sn de ortaya çıkarken Düzce ve Sakarya kaydında 2 ve 6 sn değerlerinde oluşur. KG yönünde maksimum yerdeğiştirme değerleri 2, 4, 6-7 sn'ler arasında oluşur.



**Şekil 2.7 :** Kocaeli depremi kayıtlarına ait ivme karşılık spektrumları

Sakarya ve Yarımca kayıtlarının süreleri oldukça uzundur (Sakarya kaydı için 388.87 sn, Yarımca için 135.81 sn). İvme verilerinin fazlalığının ileride yapılacak olan dinamik analizde büyük zorluklar ortaya çıkaracağı düşünülerek kayıtlar kuvvetli yer hareketini kapsayacak şekilde kısaltılmıştır. Bu anlamda, Şekil 2.6 da görülen Sakarya kaydının 30-80 saniyeler arasındaki 50 saniyelik kısmı ile Yarımca DB ve KG kayıtlarının 5-45 saniyeler arasındaki 40 saniyelik kısımları araştırmaya esas alınmıştır. Bahsi geçen şekilde bir kısaltma yapabilmek ve aynı zamanda da denklemin karakteristiklerini korumak amacıyla kayıtlara ait altı adet mühendislik şiddeti ayrı ayrı incelenmiştir. İncelenen şiddetler sırasıyla, etkin yer ivmesi ( $a_{eff}$ ), etkin süre ( $t_{eff}$ ),

Housner şiddeti,

$$SI_{0.20} = \int_{0.1}^{2.5} S_{pv}(0.2; T) dT \quad (2.1)$$

$I_{RS}$  ve  $I_{RMS}$ ,

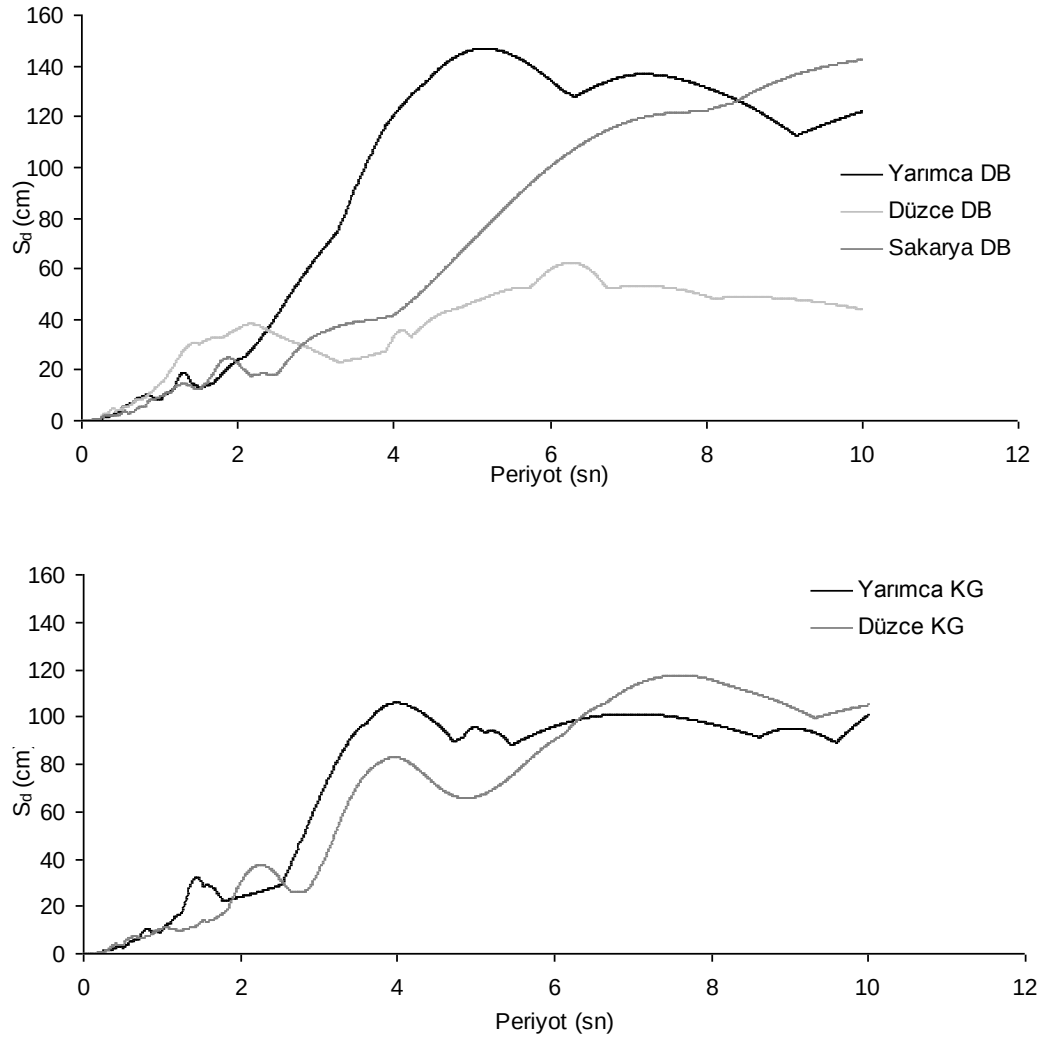
$$I_{RS} = \left[ \int_0^{t_d} a^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

$$I_{RMS} = \frac{1}{t_d} \left[ \int_0^{t_d} a^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

ve Deprem Hücüm Gücü ( $I_{EAP}$ ),

$$I_{EAP} = \frac{a_{eff} \cdot t_{eff}}{SI_{0.20} / 2.4} \quad (2.4)$$

olmak kaydıyla toplam altı tanedir (**Hasgür, 1991**).



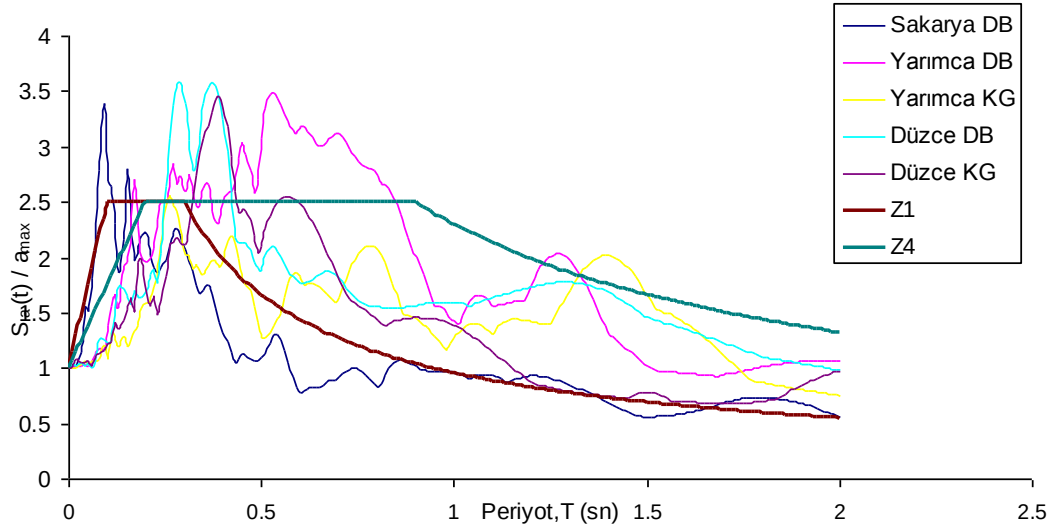
**Şekil 2.8 :** Kocaeli depremi kayıtlarına ait yerdeğiştirme karşılık spektrumları

Tablo 2.1 den de anlaşılacağı gibi böyle bir kesim işlemi kayıtlara ait mühendislik şiddetleri üzerinde önemli ölçüde bir değişiklik yapmadığı için uygun bulunmuştur.

**Tablo 2.1 :** Sakarya DB, Yarımca DB, Yarımca KG, Düzce DB ve Düzce KG kayıtlarına ait mühendislik şiddetlerinin karşılaştırılması

| Deprem Kayıtları |               | Mühendislik Şiddetleri |                |            |          |           |           |
|------------------|---------------|------------------------|----------------|------------|----------|-----------|-----------|
|                  |               | $A_{eff}$ (mG)         | $t_{eff}$ (sn) | $SI_{0,2}$ | $I_{RS}$ | $I_{RMS}$ | $I_{EAP}$ |
| Sakarya DB       | Kısaltılmış   | 195.0                  | 14.6           | 80.8       | 343.5    | 6.9       | 84.7      |
|                  | Kısaltılmamış | 195.0                  | 44.0           | 80.8       | 352.3    | 0.9       | 256.7     |
| Yarımca DB       | Kısaltılmış   | 110.0                  | 32.0           | 83.9       | 315.8    | 7.9       | 100.7     |
|                  | Kısaltılmamış | 110.0                  | 33.2           | 95.0       | 321.0    | 2.4       | 92.3      |
| Yarımca KG       | Kısaltılmış   | 125.0                  | 31.1           | 92.2       | 319.9    | 8.0       | 101.3     |
|                  | Kısaltılmamış | 125.0                  | 31.9           | 107.7      | 323.7    | 2.4       | 88.7      |
| Düzce DB         | -             | 218.0                  | 12.1           | 138.7      | 296.4    | 10.9      | 45.6      |
| Düzce KG         | -             | 175.0                  | 11.9           | 97.5       | 266.3    | 9.8       | 51.2      |

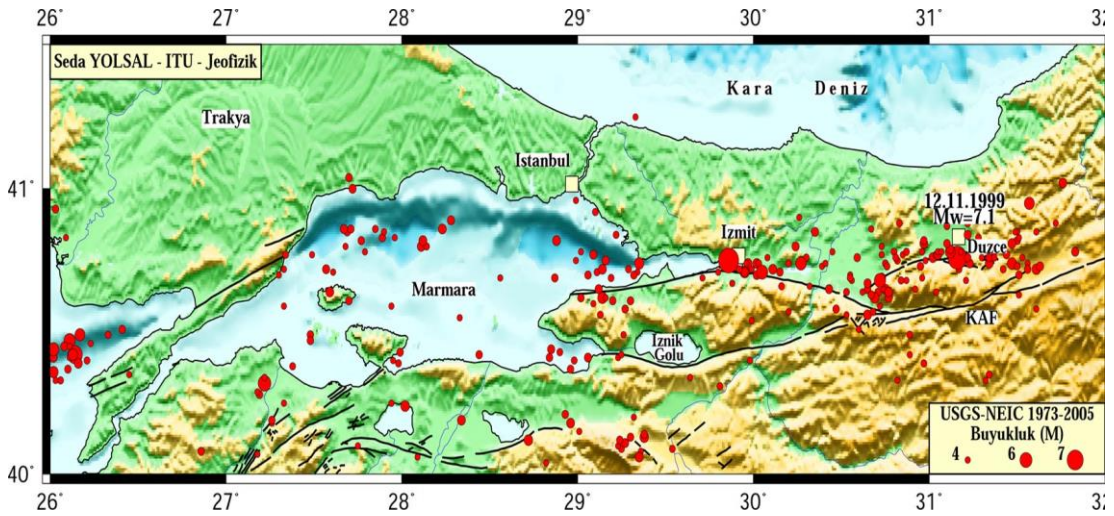
Bu şekilde kesilerek kısaltılan kuvvetli hareketler, yürürlükte olan Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'te (ABYYHY, 1998) tanımlanan ve 50 yıllık yapı ekonomik ömrü için %10 aşılma olasılığına karşı gelen, %5 sönüm oranlı Tasarım Spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2.9 dan da anlaşılacağı üzere, Sakarya DB kaydında yükseltgenme değerinin 0,09 sn civarında 3.4 mertebesinde olduğu ve yönetmelikteki 2.5 değerini aştığı görülmektedir. Aynı şekilde Yarımca DB, Düzce DB ve Düzce KG kayıtlarında da benzer değerler sırasıyla yaklaşık 3.5, 3.6 ve 3.5 olarak ortaya çıkar.



**Şekil 2.9 :** Kocaeli depremi kayıtlarına ait normalize edilmiş ivme karşılık spektrumları ve tasarım spektrumları

## 2.2 1999 Düzce Depremi Hakkında Genel Bilgiler

Düzce depremi, 12 Kasım 1999 tarihinde yerel saatle 18:57 (16:57 GMT)'de Richter ölçeğine göre  $M_w=7.2$  büyüklüğünde meydana gelmiştir. Deprem Araştırma Dairesi depremin merkezüssünün koordinatlarını 40.79 (N), 31.11 (E) olarak belirlemiştir. Bu koordinatlar Düzce şehrinin 4 km güneyini işaret etmektedir (**Taymaz ve diğ., 2003**). 12 Kasım 1999 depreminin merkezüssü, 17 Ağustos 1999'da gerçekleşen 7.4 büyüklüğündeki Kocaeli depreminin merkezüssünün 110 km doğusunda bulunmaktadır. Düzce depreminin gerçekleştiği bölge de Şekil 2.10 da görüldüğü üzere sismik yönden oldukça aktif bir bölgedir. 12 Kasım'daki ana şoktan sonra da benzer olarak çok sayıda artçı şok görülmüştür. Bu artçı şokların en büyüğü depremin olduğu gün Kaynaşlı civarında 5.5 büyüklüğünde meydana gelmiş ve ağır derecede hasar gören yapıların yıkılmasına neden olmuştur. Henüz il olmamış Düzce ile Bolu şehirleri ve Kaynaşlı ilçesindeki binalar ağır hasar görmüş, çok sayıda can ve mal kaybı oluşmuştur. Kocaeli depremini zaten oldukça ağır atlatan Düzce şehrinde, Kocaeli depreminde hafif hasar gören yapıların birçoğu Düzce depremiyle birlikte, ya ağır hasara uğramışlar yada yıkılmışlardır. (**Aydan ve diğ., 2000**)



Şekil 2.10 : Düzce depreminin meydana geldiği bölge

Kuzey Anadolu Fay zone, Bolu'nun yaklaşık 5 km güneyinden geçer ve Bolu havzasını güneyden sınırlar. Fay, Beldibi yakınlarında iki kola ayrılır. Kuzey kolu Kuzuluk-Akyazı arasından geçerek Sapanca gölüne kadar uzanır. Güney kolu ise Geyve'den geçerek İznik gölüne doğru devam eder. Diğer yandan Bolu'nun kuzeybatısında ana faya paralel ikinci bir fay bulunur. Fay, Kaynaşlı ilçesinden ve Düzce'nin güneyinden geçerek Eftene gölünü güneyden sınırlar, gölün güneybatısında Aksu vadisini izler ve Akyazı'nın kuzeyinden geçerek ana faya bağlanır. Bu fay 12 Kasım'daki deprem kırığını ve 17 Ağustos'taki deprem kırığının doğu ucunun bir kısmını oluşturmuştur (**Demirtaş ve diğ.,2000**).

Kuzey Anadolu fayına paralel uzanan bu fay üzerinde gerçekleşen Düzce depremi 14 km derinlikte oluşmuş ve hafif bir normal atım bileşenine sahip olmakla birlikte sağ-yanal atıma neden olmuştur. Deprem yaklaşık 40 km uzunluğunda bir yüzey kırığı meydana getirmiştir. Yapılan analizlere göre deprem, Düzce ile Kaynaşlı arasında yer alan Beyköy’de başlamış ve her iki yöne doğru ilerlemiştir. Yüzey kırığı Bolu tüneline 2 km uzaklıkta ortaya çıkmış ve Darıyeri, Hasanbey, Kaynaşlı, Fındıklı, Beyköy, Kutluköy, Çakırbrahim, Çınarlı, Gölormanı gibi yerleşim yerlerinden geçerek Düzce’nin batısına doğru ilerlemiştir. Yüzey kırıklarından da anlaşılabilceği üzere deprem, 17 Ağustos depremindeki yüzey kırığının doğu ucu ile Bolu tünelleri arasında uzanan Düzce fayını kırmıştır.

Fay doğuda Bolu tünellerinde ortaya çıkmış ve Akarsu vadisinde bulunan ve depremin gerçekleştiği zaman yapım aşamasında olan İstanbul-Ankara TEM otoyolunun Bolu viyadüğünün ayaklarından birkaçının arasından geçerek batıya, Darıyeri Hasanbey köyüne doğru uzanmıştır. Fay bu köyde çitleri ve duvarları, 2.5~3.7 m arasında değişen sağ yönlü yanal atımlarla ayırmıştır. Bu bölgede normal atım bileşeni olarak güney bloğunda 20 cm’lik çökme görülmüştür. Batıya gidildikçe Kaynaşlı civarında 3.5 m’ye varan belirgin sağ-yanal atım gözlenmiştir. Kaynaşlı’nın batısında güney bloğunda 14 cm’lik çökme oluşmuştur. Yine bu bölgede yeralan Şimşir mahallesinde çitler arasında 4.2 m’lik yanal atım ölçülmüştür. Şimşir mahallesinin batısındaki Fındıklı köyünde ise ötelenme 3.7 m civarındadır ve doğrultu atım bileşeni oluşmamıştır. Ovapınar köyünden geçerek Beyköy’e gelen fay, buranın batısında 1.5 m sağ-yanal atıma ve güney bloğunda 25 cm çökmeye neden olmuştur. Beyköy’den sonra fay, Kutluköy’ün güneyine geçmiş ve bir bahçe duvarını 1.5 m ötelemiştir. Bu bölgede fayın güney parçası 75 cm çökmüştür. Batıya doğru Çakırbrahim köyünde 3.3 m’lik yanal atımın yanısıra 1.15 m düşey atım görülmüştür. Buranın batısındaki Çınarlı köyünde ise 4 m atım görülmüştür. Buradan sonra ise yüzey kırığı Aydınpinar ve Gölormanı güzergahlarını takip ederek Efteni gölünün güney sahilini izlemiştir. Bu bölgede gözlenen 3 m ye varan düşey yerdeğiştirmeler, normal faylanmadan ziyade fayın geçtiği eğimli yerlerdeki gevşek zeminlerin kaymasından dolayı oluşmuştur. Yüzey kırığı Efteni gölünün güneybatısında, Hacıyakup ve Açma Mahallesi arasında ortadan kaybolmuştur. Yüzey kırığındaki yerdeğiştirmelerden, maksimum atımın fayın ortasında olduğu ve bu atımın Şekil 2.11 deki gibi 4 m ye kadar çıktığı görülmüştür. Öte yandan fay, sağ-yanal atımın yanısıra 10~115 cm arasında değişen düşey bileşene de sahiptir.

Depremden etkilenen bölgede yapılan saha gözlemlerinde, betonarme yapıların, özellikle dört ve daha fazla katlı inşa edilmiş olanlarının büyük hasara uğradıkları görülmüştür. Betonarme yapılarda gözlenen hasarlar, Kocaeli depremindekine benzer şekilde kötü işçilik, yapım hataları, yapı tasarımında deprem yönetmeliklerinin

yeterince dikkate alınmamış olması, zemin koşullarından kaynaklanan olumsuz etkiler, yumuşak (zayıf) katların varlığı, bitişik düzende teşkil edilen yapıların çarpışması ve sıvılaşmadan kaynaklanmaktadır. Üçten daha az katlı olan betonarme yapılar ile, yönetmelik esaslarına uygun şekilde hatıllarla döşenmiş yığma binalar ise, alüvyon zeminlerde bulunmalarına rağmen çok iyi performans göstermişlerdir.



**Şekil 2.11 :** Düzce depreminin bir yolda oluşturduğu yanal atım

Bölgedeki bazı camilerde Şekil 2.12 de görüldüğü gibi oldukça büyük hasar gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise dükkan oluşturulması amacıyla yapıya eklenen zemin katlardan dolayı ortaya çıkan yumuşak kat durumudur. Minareler de kesitlerinin dikdörtgenden dairesel forma geçtiği birleşim bölgesinden ayrılarak devrilmişlerdir.



**Şekil 2.12 :** Düzce depreminde hasar gören bir cami ve minaresi



Kocaeli depremi sırasında herhangi bir hasara uğramayan Bolu viyadükleri, Düzce depremi sırasında değişik düzeylerde hasar görmüştür. Tabliyeler Şekil 2.13 deki gibi kalıcı deformasyona uğrayıp kaymış ve viyadüklerin çok hafif eğilmesi ve dönmesi sonucu mesnetler ve sönümleyiciler ya düşmüş, ya da kırılmıştır.

Sanayi tesislerinde gözlenen en önemli hasarlar ise prefabrike betonarme çerçeve olarak inşa edilen tesislerde görülmüştür (Aydan ve diğ., 2000).



**Şekil 2.13 :** Düzce depreminde hasar gören bir viyadük

### **2.2.1 Kullanılan Deprem Kayıtları ve Karakteristik Özellikleri**

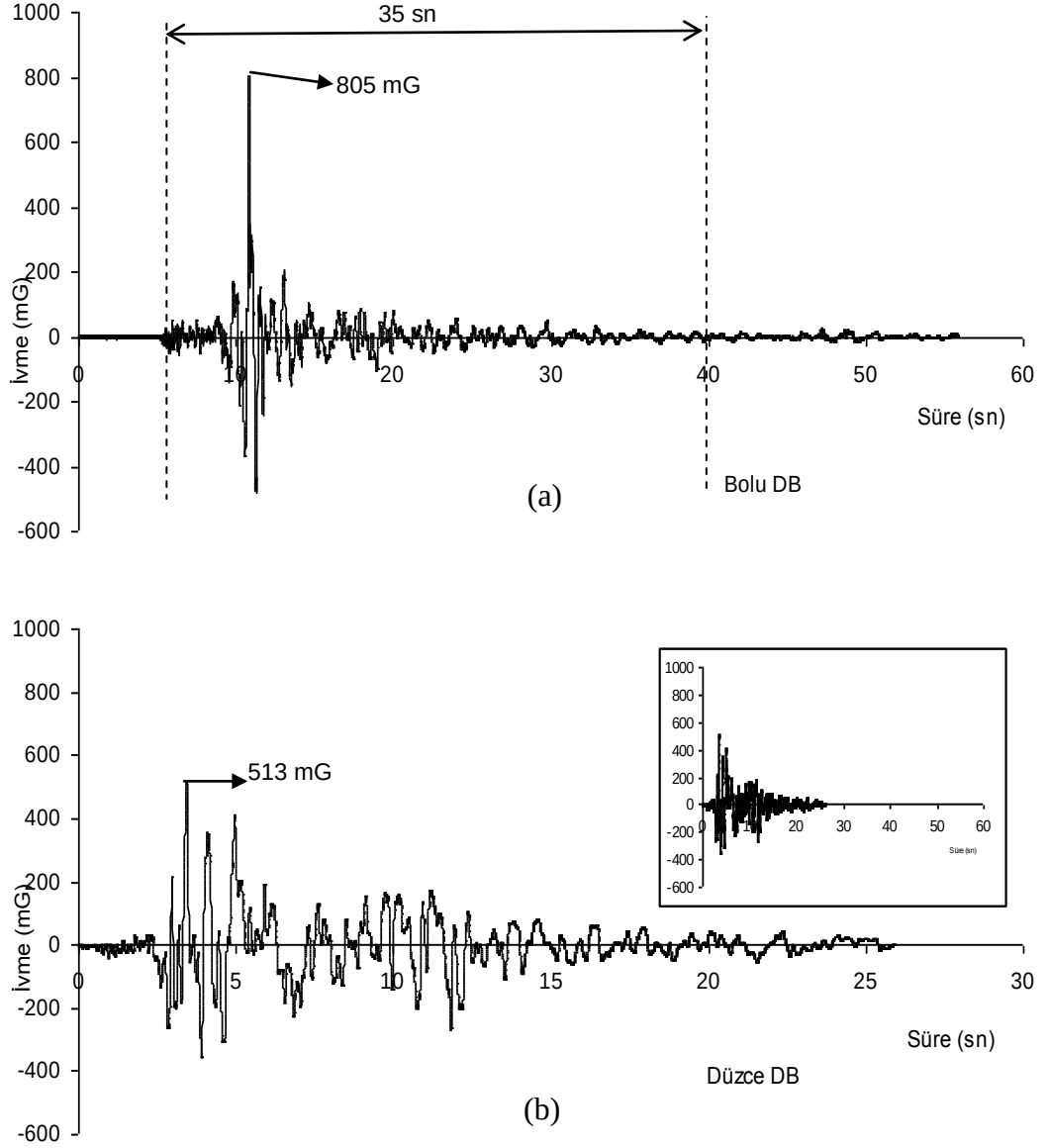
Depremin merkezüssüne en yakın kayıt istasyonları Düzce (7 km-Kuzey), Adapazarı (60 km-Batı), Bolu (41 km-Doğu) ve Mudurnu'da (37 km-Güney) bulunmaktadır. Ölçülen maksimum yer ivmeleri Düzce'de 513 mG (DB), Bolu'da 805 mG (DB), Adapazarı'nda 24 mG (DB) ve Mudurnu'da 120 mG (DB)'dir. Bolu ve Adapazarı istasyonlarında ölçülen maksimum ivmeler kıyaslandığında önemli bir fark olduğu görülür. Kandilli Rasathanesi'nde yapılan çözümlemelere göre deprem kırılan fayın batı ucunda başlamış ve doğuya doğru yayılmıştır. Bu yüzden, kırılan fayın batısında yeralan Adapazarı'nda fayın doğusunda bulunan Bolu'ya göre daha düşük ivme değerleri ortaya çıkmıştır.

Araştırmada Düzce depremine ait olarak Bolu DB ve Düzce DB kayıtları kullanılmıştır. Bu kayıtların ivme izleri Şekil 2.14 de görülmektedir. Bahsi geçen

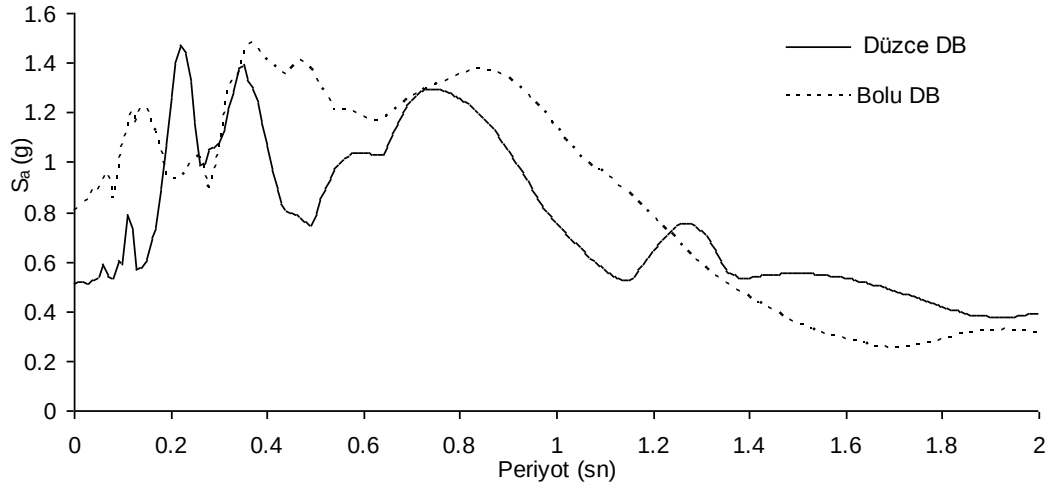


kayıtlar kullanılarak %5 sönüm değerine göre oluşturulan ivme ve yerdeğiştirme spektrumları Şekil 2.15 ve 2.16 da verilmiştir.

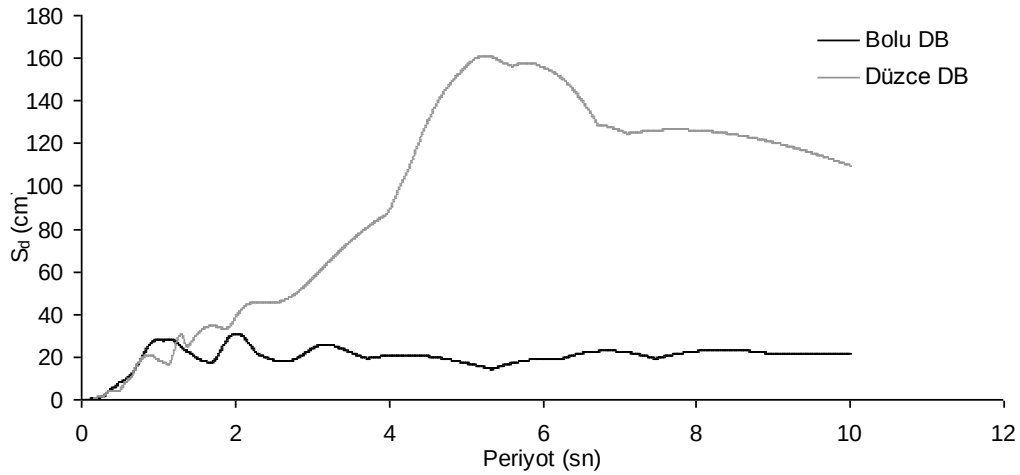
İvme spektrumu için maksimum değerler 0.1~1.3 sn aralığındaki periyot değerlerinde ortaya çıkmaktadır. En etkili bölgenin ise 0.3~0.4 sn arasında olduğu görülmektedir. Yerdeğiştirme spektrumları için maksimum değerler 1, 2 ve 5 sn'lik periyot değerlerinde ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 2.14 :** Düzce depremine ait (a) Bolu DB, (b) Düzce DB ivme kayıtları



**Şekil 2.15 : Düzce depremine ait ivme karşılık spektrumları**



**Şekil 2.16 : Düzce depremine ait yerdeğiştirme karşılık spektrumları**

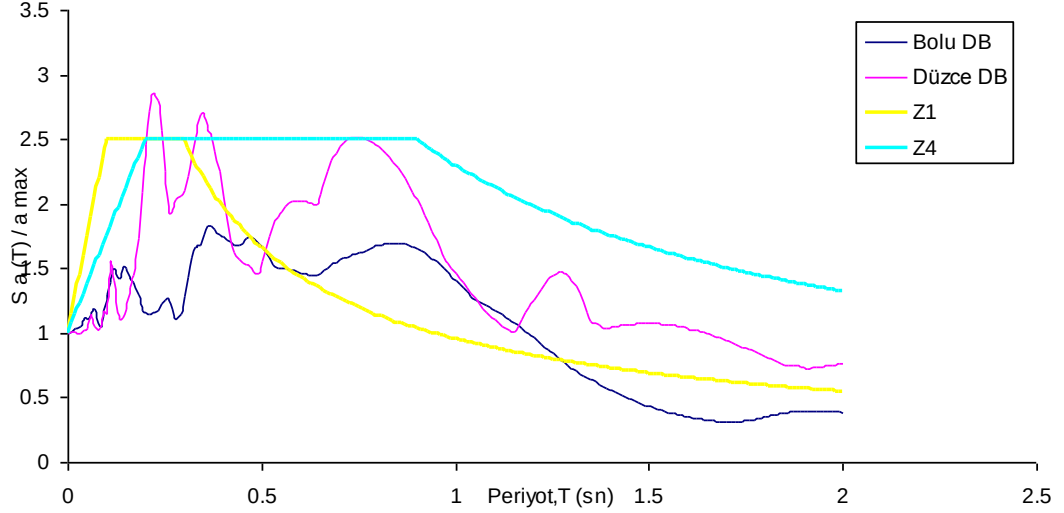
Düzce depreminin Bolu kaydı oldukça fazla sayıda ivme verisine sahiptir ve ileride yapılacak olan doğrusal olmayan dinamik analizde zorluklara ve oldukça uzun ve karışık sonuç dosyalarının ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Bu yüzden, Bolu DB kaydına ait veriler 5-40 saniyeler arasında kaydın güçlü yer hareketi kısmını kapsayacak şekilde kısaltılmıştır. Kocaeli depreminde olduğu gibi bu kısaltma işlemi de depremin mühendislik şiddetleri gözönünde bulundurularak gerçekleştirilmiş olup, sonucun Tablo 2.2 de de görüldüğü üzere şiddetleri fazlaca değiştirmedeği görülmektedir.

Ele alınan bu kayıtlara ait ivme karşılık spektrumları normalize edilerek yine Deprem Yönetmeliğindeki Z1 ve Z4 türü zeminler için tanımlanan tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılmışlardır. Şekil 2.16 da görülen bu kıyaslamaya göre, Düzce DB kaydının

0.22 sn lik periyot değerinde görülen yükseltgenme değeri 2.86 mertebesindedir ve tasarım spektrumları için verilen 2.5 değerini hafifçe aşmaktadır.

**Tablo 2.2 :** Bolu DB ve Düzce DB kayıtlarına ait mühendislik şiddetleri

| Deprem Kayıtları |               | Mühendislik Şiddetleri |                |            |          |           |           |
|------------------|---------------|------------------------|----------------|------------|----------|-----------|-----------|
|                  |               | $A_{eff}$ (mG)         | $t_{eff}$ (sn) | $SI_{0,2}$ | $I_{RS}$ | $I_{RMS}$ | $I_{EAP}$ |
| Bolu DB          | Kısaltılmış   | 433.0                  | 9.0            | 155.3      | 396.4    | 11.3      | 59.9      |
|                  | Kısaltılmamış | 433.0                  | 9.0            | 155.3      | 397.2    | 7.1       | 60.5      |
| Düzce DB         | -             | 240.0                  | 10.9           | 157.8      | 436.5    | 16.9      | 39.8      |



**Şekil 2.17 :** Düzce depremi kayıtlarına ait normalize edilmiş ivme karşılık spektrumları ve tasarım spektrumları

### 3. YAPI SİSTEMLERİNİN DİNAMİK ANALİZİ

Yapı sistemlerinin dinamik analizi içerik olarak bir bakıma, zamana bağlı değişen yükler altında taşıyıcı sistemde oluşan gerilmelerin ve yerdeğiştirmelerin, değişen sistem karakteristiklerini de gözönüne alarak incelenmesi olarak tanımlanabilir. Dinamik çözüm ile statik çözüm arasındaki en önemli fark, dinamik yerdeğiştirme sırasında eylemsizlik kuvvetlerinin meydana gelmesidir. Bir sisteme etkiyen yük, dinamik özelliğe sahipse, zamana bağlı olarak meydana gelecek yerdeğiştirmeler, ivmeleri ve eylemsizlik kuvvetlerini ortaya çıkarırlar. Böyle bir durumda yapı iki tür yükün etkisi altında düşünülebilir: Harekete sebep olan dış yük ve hareketin ivmelenmesine karşı koyan eylemsizlik kuvvetleri. Yapının kesitlerinde ise bu iki etkiye karşı koyacak kesit tesirleri ve hareketi sönümleyici kuvvetler meydana gelir. Bu nedenlerden ötürü iç kuvvetlerin ve sönüm kuvvetlerinin hesaplanabilmesi için daha önce eylemsizlik kuvvetlerinin belirlenmiş olması gerekir. Ancak eylemsizlik kuvvetleri ise yerdeğiştirmelere, dolayısıyla da iç kuvvetlere bağlıdır. Bu birbirine bağımlılık şeklinde ortaya çıkan durumu ifade eden matematik modelin oluşturulması gerekir. Bu sebeple, sistemin hareketini tanımlamak için yazılan ve zamanla değişen dış yük ile buna karşı koyan sistem karşı koyma kuvvetleri arasındaki kuvvetler dengesini ifade eden bir diferansiyel denklem kurulmuştur. Yapının gösterdiği davranış, kurulan bu hareket denkleminin uygun başlangıç ve sınır koşulları altında çözülmesi ile elde edilir **(Celep ve Kumbasar, 2001)**.

$$\{f_I\} + \{f_D\} + \{f_S\} = \{P(t)\} \quad (3.1)$$

(3.1) ifadesinde görülen  $\{f_I\} = [M] \{\ddot{u}\}$  eylemsizlik kuvvetleri,  $\{f_D\} = [C] \{\dot{u}\}$  sönüm kuvvetleri,  $\{f_S\} = [K] \{u\}$  iç kuvvetleri göstermek üzere hareket denklemi

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{P(t)\} \quad (3.2)$$

ile yazılabilir. Burada  $[M]$  kütle matrisi,  $[C]$  rijitik matrisi,  $[K]$  sönüm matrisi,  $\{P(t)\}$  ise dış yük vektörüdür.

#### 3.1 Doğrusal Sistemlerin Dinamik Analizi:

Doğrusal sistemlerde iç kuvvet-şekil değiştirme arasındaki ilişkinin doğrusal olarak değiştiği ve malzeme davranışının da doğrusal olduğu kabul edilir. Sisteme etkiyen

dış yüklere karşı oluşan iç kuvvetlerle ( $f_s$ ), sistemde meydana gelen yerdeğişmeler ( $u$ ) arasında,  $\{f_s\} = [k].\{u\}$  ilişkisi vardır. Aynı şekilde yük boşalma ve ters yükleme durumlarında da davranış doğrusallığını korur. Doğrusal davranış gösteren tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümü için çeşitli yöntemler mevcuttur.

Tek serbestlik dereceli (TSD) sistemler için düzenlenen hareket denkleminin çözümü; klasik diferansiyel denklem çözümü, Duhamel integrali, dönüşüm metodları ve yaklaşık sayısal yöntemler ile elde edilebilir. Sistemin hareket denklemini temsil eden klasik diferansiyel denklemin çözümü, genel ve özel olmak üzere iki kısımdan oluşur. Genel çözüm diferansiyel denklemin analitik çözümünü içerir. Özel çözüm ise denklemin oluşturduğu sistemin başlangıç koşullarının çözümde dikkate alınmasıyla ortaya çıkar.

Diğer bir çözüm, Denklem (3.3) ile verilen ifadede görülen Duhamel integralidir. Duhamel integrali, sisteme uygulanan dış yükü, bir dizi sonsuz derecede kısa itki (impuls) şeklinde ifade eder. Etkiyen  $P(t)$  dış kuvvetine karşı sistemin  $t$  zamanındaki tepkisi, o zamana kadar gerçekleşen tüm itkilerdeki tepkilerin toplanmasıyla bulunur.

$$u(t) = \frac{1}{m \omega_n} \int_0^t p(\tau) \sin \omega_n (t - \tau) d\tau \quad (3.3)$$

Burada  $\omega_n$  doğal titreşime ait açısal frekansı,  $m$  ise TSD sistemin kütlesini göstermektedir.

Dönüşüm metodları olarak kullanılan Laplace ve Fourier dönüşümleri özellikle TSD doğrusal sistemlerin çözümü için oldukça geçerli yöntemlerdir. Temelde iki metot da birbirine benzemesine rağmen, genelde Fourier dönüşüm metodu kullanılır. Fourier dönüşümü, yapı mühendisliğinde kullanılan frekans tanım alanlı dinamik analiz yönteminin temelini oluşturur. Bilinen bir  $P(t)$  titreşim fonksiyonunun Fourier dönüşümü, (3.4a) denkleminde gösterildiği gibidir. Hareket denkleminin Fourier dönüşümü ile çözümünde ilk adım,  $t$  zaman değişkenindeki diferansiyel fonksiyonu ( $i\omega$ ) şeklinde sanal değerli değişkene sahip bir cebrik denkleme dönüştürmektir. Daha sonra cebrik denklem,  $u(t)$ 'nin transformu olan  $\bar{u}(i\omega)$  için çözülür. Son olarak diferansiyel denklemin çözümü denklem (3.4b)'de gösterildiği şekilde  $\bar{u}(i\omega)$ 'nin ters dönüşümü ile elde edilir.

$$\bar{P}(i\omega) = F[P(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} P(t) dt \quad (3.4a)$$

$$u(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(i\omega) \bar{P}(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.4b)$$

Bu denklemde karmaşık frekans tepki fonksiyonu,  $H(i\omega)$ , sistemin harmonik titreşime karşı tepkisini ifade eder.  $\omega$  ise bu titreşimin açısal frekansıdır. Fourier dönüşüm metodu sayısal olarak tanımlanan  $P(t)$  veya  $\ddot{x}_g(t)$  şeklinde titreşimlere maruz kalan doğrusal sistemlerin analizinde de kullanılabilir bir yöntemdir. Böyle durumlarda yukarıdaki iki denklem, örneğin 1960'larda geliştirilen ayırık hızlı Fourier dönüşüm algoritması ile sayısal olarak hesaplanır (**Cheng, 2001**).

Frekans tanım alanında gerçekleştirilecek dinamik analiz, yukarıdaki iki denklem ile tanımlanır. İlk denklem titreşimi oluşturan tüm harmonik bileşenlerin genliklerini verir. İkinci denklem ise sistemin titreşimin her bileşeninin tepkisini hesaplamak ve  $u(t)$ 'yi elde etmek için bu harmonik tepkilerin süperpozisyonu anlamına gelir. Duhamel integrali ile tanımlanan zaman tanım alanlı metoda alternatif olan frekans tanım alanlı metot özellikle, zeminle etkileşimdeki yapıların dinamik analizi için etkili ve kullanışlı bir yoldur.

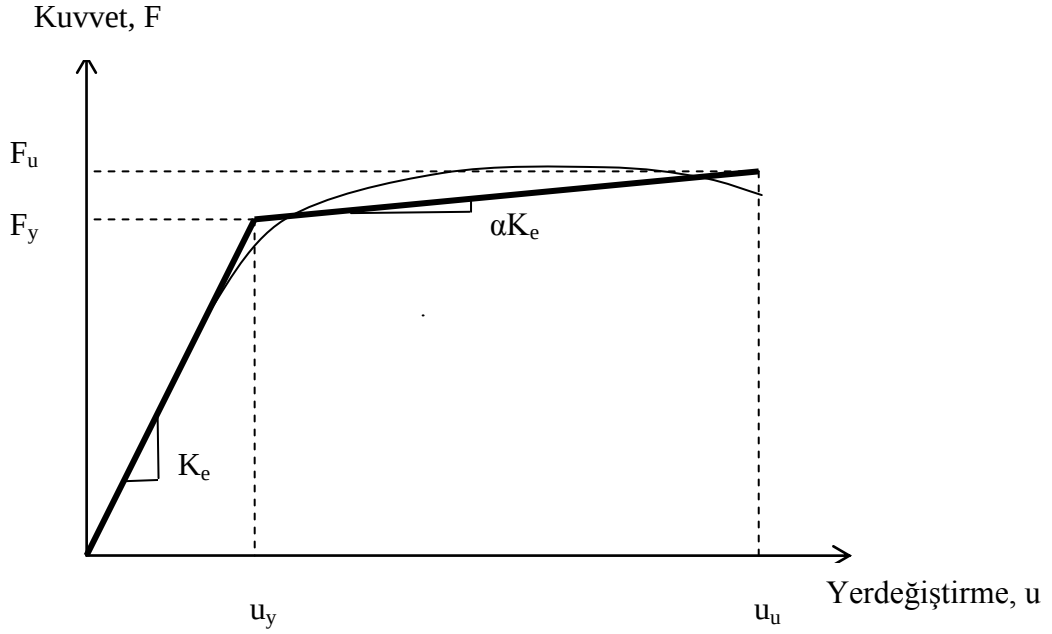
Yapı dinamiği problemlerinde yapıya etkiyen dinamik yükler,  $t$  zamanına göre bir denklem şeklinde analitik olarak ifade edilebilirler. Deprem hareketi gibi karmaşık titreşimleri ise analitik olarak ifade etmek imkansızdır. Bu durumda deprem kaydındaki, örneğin her bir ivme verisi için sistemin tepkisinin hesaplanması gerekir. Bu hesaplamalar ise sayısal metotlarla gerçekleştirilir. Sayısal metotlar ayrıca dinamik yükler altında doğrusal olmayan davranış gösteren sistemlerin analizinde de kullanılırlar.

Viskoz sönüme sahip çok serbestlik dereceli (ÇSD) doğrusal sistemlerin dinamik davranışı klasik modal analiz ile belirlenebilir. Böyle sistemlerde doğal frekanslar ve titreşim modları çözümlenir ve hareket denklemleri modal koordinatlara dönüştürülerek ayırık hale getirilir. Böylece her titreşim modunun tepkisi birbirinden ayrı olarak hesaplanabilir ve modal karşılıklar toplam karşılığı belirlemek için birleştirilebilir. Her mod, kendi özel yerdeğiştirme dizilimine, mod şekline, kendi doğal frekansına ve sönüm değerine sahiptir. Modal karşılıklar, ilgili moda ait titreşim özelliklerine sahip (doğal frekans ve sönüm) TSD bir sistemin analiziyle zamana bağlı bir fonksiyon olarak hesaplanabilir. Bu TSD denklemler analitik olarak ifade edilebilen titreşimler için yukarıda tarif edilen TSD sistemler için çözüm yöntemlerinden biri ile, sayısal olarak ifade edilen titreşimler için de zaman adım metotları ile çözülebilirler (**Chopra, 2001**).

### 3.2 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Dinamik Analizi

Yapı mühendisliğinde yapılan hesaplamalarda sistemi oluşturan elemanların davranışları, özellikle hesap kolaylığı bakımından genelde doğrusal ve elastik olarak kabul edilir. Yapının dış yükler etkisinde yer ve şekil değiştirmeleri arttıkça, kabul

edilen bu doğrusal davranış geçerliliğini yitirir. Deprem kuvvetleri gibi tekrarlı yüklemeler altında elemanlar, elastik sınırlarını aşarak kalıcı plastik deformasyonlar yapmaya başlar. Böyle durumlarda kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi doğrusallığını kaybederek Şekil 3.1 deki duruma gelir. Doğrusal kısmın ötesindeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin hesaba katılmasıyla analiz nonlinear (doğrusal olmayan) yada inelastik analiz haline dönüşür. Yüklemelerin ilk aşamalarında malzemenin elastik davranmasından dolayı doğrusal olmayan analiz her zaman doğrusal analizi de içine alır.



**Şekil 3.1:** Doğrusal olmayan kuvvet-şekil değiştirme eğrisi

Yapısal bir elemanın, tekrarlı yüklemeler altındaki kuvvet-yerdeğiştirme bağıntısındaki elastik olmayan malzeme davranışı dikkate alındığı taktirde, histeretik ve çevrimsel bir sistem davranışı ile karşılaşılır. Bu davranış biçimi esas alınarak, bir dizi yapısal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi, etkiyen yükün de tersinir karakteristiklerini kapsayacak şekilde çeşitli araştırmacılar tarafından modellenmiştir. En genelleştirilmiş biçimiyle “Histeretik Model” olarak adlandırılan bu ilişkiler, sistemi oluşturan elemanların yükleme, boşalma ve yeniden yükleme altındaki karşı gelen yerdeğiştirme zarflarını matematik olarak ifade etmektedir. Doğrusal olmayan analizde kullanılmak üzere araştırmacılar tarafından hazırlanan çeşitli histeresis modelleri vardır. En temel modeller, elastoplastik model, çift doğrulu (bilinear), üç doğrulu (trilinear), rijitliği azalan (stiffness degrading-Clough hysteresis), başlangıca yönelik (Origin-Oriented), Takeda, Roufaiel-Meyer vb. çok parçalı doğrular ile oluşturulan ana iskelet eğrileri kullanılarak temsil edilen histeretik modeller ile, ampirik matematiksel fonksiyonlar yardımıyla oluşturulan Bouc-Wen

türündeki yumuşak (smooth) histeretik modellerdir. Modellere ait kuvvet-deformasyon değişimleri Şekil 3.2 de gösterilmektedir.

*Elastoplastik modelde* iç kuvvet-şekil değiştirme eğrisinin ilk kısmı çatlamış kesit davranışını temsil edecek şekilde doğrusal artan bir formdadır. Kesitin akmasından sonra ise rijitlikte herhangi bir değişimin olmadığı varsayılır. Bu bölümde gerçekleşecek bir yük boşalması elastik kısmın rijitliğinde oluşur.

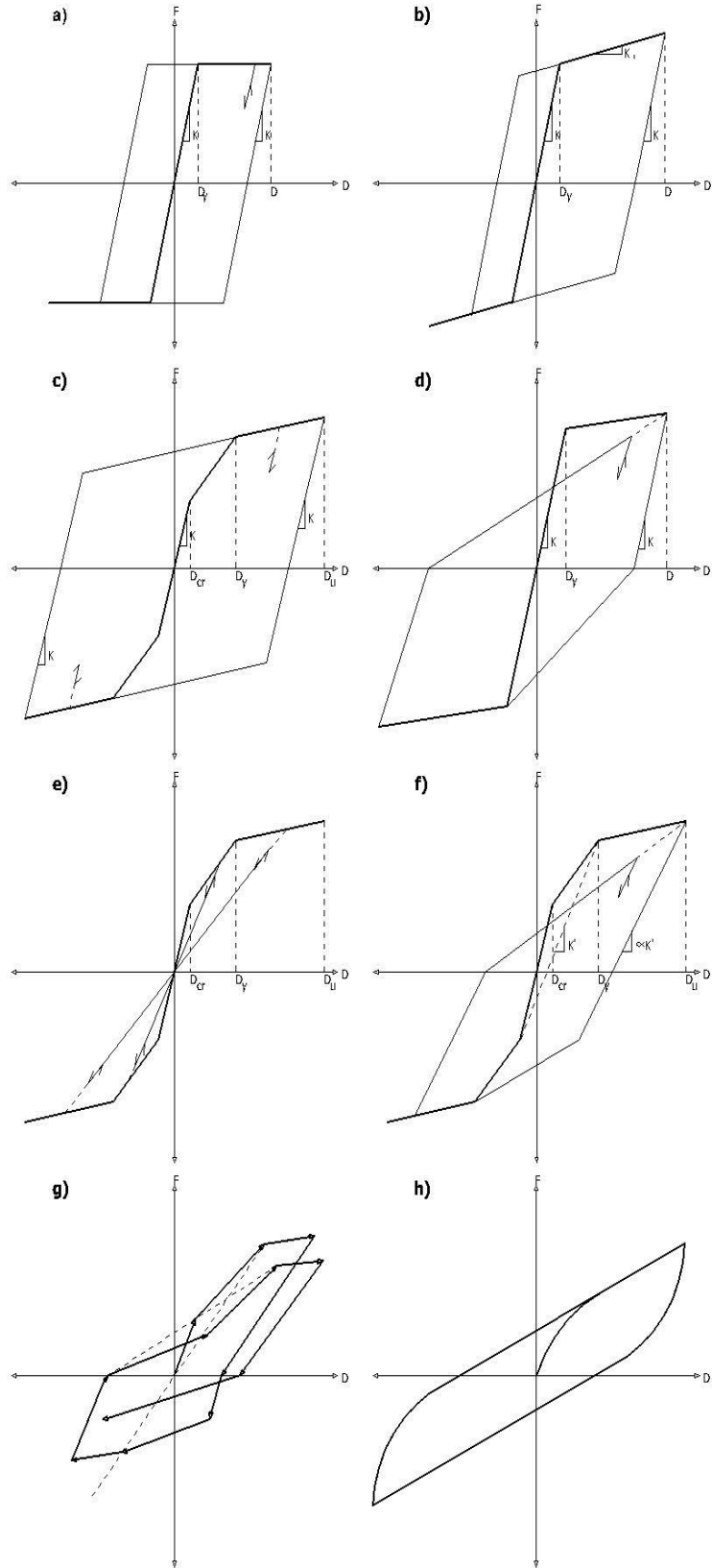
*Çift doğrulu modelde* gerilme pekleşmesi özelliği hesaba katılır. Akmadan sonra kesitte oluşacak rijitlik akmadan önceki kısmın rijitliği cinsinden ifade edilir. Bu model elastoplastik modelden daha gerçekçidir fakat akmadan sonraki yük boşalımı ve ters yükleme durumlarında gerçekleşecek rijitlik azalımı davranışını içermez.

*Üç doğrulu modelde* çift doğrulu modelden farklı olarak kesitteki çatlama da dikkate alınır. Bu yüzden değişim çatlama öncesi, çatlama sonrası ve akma sonrasını ifade eden üç doğru şeklindedir. Bu modelde gerçekleşen yük boşalması çatlamanın kesitin rijitliğine eşit şekilde oluşur.

*Rijitliği azalan (Clough) modelde*, yükün geri yükleme durumunda rijitlik azalımı etkisini içerecek şekilde oluşturulmuştur. Model, gerilme pekleşmesi etkisini hesaba katan çift doğrulu model üzerinde çalışır. İlk yükleme durumunda kesit akmaya ulaşmışsa, yük boşalması başlangıç rijitliği ile aynı rijitlikte gerçekleşir. Yükleme tersine döndüğünde rijitlik azalır. Bu bölümdeki rijitlik, geri yüklemenin başladığı noktadan ters yöndeki yüklemeye ait akma noktasına uzanan doğrunun eğimine eşittir. Eğer yeni bir yükleme yönünde kesit önceden akmaya ulaşmışsa, yeni yüklemeye ait rijitlik, yüklemenin başladığı noktadan maksimum deformasyonun gerçekleştiği noktaya uzanan doğrunun eğimi ile belirlenir (Saiidi, 1982).

Tersinir kesme kuvveti ve kayma yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimini ifade eden *başlangıca yönelik çevrim modelinde*, yükleme ilk başta ana iskelet eğrisini izler. Çatlamadan önce eleman elastik davrandığı için doğal olarak histeretik enerji kaybı olmaz. Bu durumda, yükleme ve boşaltma sırasında sistem kayma rijitliği başlangıç eğimini takip eder. Yükün azalarak boşalmaya başlaması ile çevrim başlangıca yönelik olarak çatlakları kapanmış bir kesit gibi, ulaştığı en büyük kesme kuvveti ve yerdeğiştirmeyi başlangıca bağlayan bir rijitlikte, doğrusal bir davranış izler. Bir sonraki yeniden yükleme de, bu başlangıca yönelmiş boşalma güzergahını izleyerek, ana çevrim iskeleti ile rastlaşana kadar ya da yeniden boşalma olana kadar devam eder. Ana çevrim iskeleti ile rastlanılırsa, bu durumda ana eğri takip edilir. Ana iskeleti geçmeden boşalma olursa, başlangıca yönelir (Taşkın, 2001).





**Şekil 3.2:** a) Elastoplastik, b) Çift doğrulu, c) Üç doğrulu, d) Clough, e) Başlangıca yönelik, f) Takeda, g) Roufaei-Meyer, h) Bouc-Wen histeretik modelleri

*Takeda modelinde* eğri çatlama, çatlamış ve akma sonrası durumu ifade eden üç doğrusal kısımdan oluşur. Doğrusal olmayan yerdeğiştirmeler kesitin çatlamasıyla başlar. Yük boşalması ve ters yükleme durumlarındaki rijitlikler akma durumundaki rijitlikten ve birbirlerinden farklıdır. Betonarme bir elemanda artan yükler altında oluşacak deformasyonlar ilk olarak kesitin çatlamasıyla ortaya çıkar. Kesitin akmasından sonra ise hızla artarak kesitin taşıma kapasitesine erişmesine neden olur. Çatlamadan ve akmadan sonra oluşacak yük boşalmaları kesitin rijitliğinde azalmaya neden olacaktır. Bu azalmalar doğal olarak akma sınırını aşmış kesitlerde daha fazladır. Geri yükleme durumunda ise kesit başlangıç durumuna göre daha zayıf olacağından rijitliği de daha az olacaktır. Bu şekilde bir rijitlik azalımı durumunu uygun olarak ifade eden bir model, davranışı en gerçekçi şekilde temsil eden model olacaktır. Takeda modeli betonarme elemanların bu davranışını en uygun şekilde ifade eden modellerden birisidir. Buna karşın karmaşıktır ve uygulamada zorluklar ortaya çıkarır (**Saiidi, 1982**).

*Roufaiel-Meyer modelinde* rijitlik azalımının yanısıra dayanım azalımı da dikkate alınır. Değişim her yüklemede üç doğrudur. Fakat yük boşalmalarında rijitlikler farklılaşır. Ters yükleme sırasında ilk olarak kesitteki çatlaklar kapanır (pinching). Çatlakların kapanmasından sonra yükler altında şekil değiştirmeler hızla artmaya başlar. İlk yük çevriminden sonraki ikinci yük çevriminde, plastik şekil değiştirmelerden dolayı kesitin akma ve göçme sınırları daha düşük değerlerde oluşur. Bundan dolayı her yük çevriminde dayanımda da bir azalma meydana gelir (**Taşkın, 2001**).

*Bouc-Wen Modelinde* ise davranışı oluşturan hareket denklemi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \alpha kx + (1 - \alpha)kz = -m\ddot{y}_g \quad (3.5)$$

şeklinde oluşur. Burada,  $\alpha$  değeri akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı,  $k$  ise histeretik davranış eğrisini şekillendiren bir iç değişkendir. Bu iç değişken, sabitleri histeretik döngünün şeklini kontrol eden ve deneysel olarak belirlenen bazı parametrelerden oluşan, değişkenleri ise hız ve iç değişkenin kendisi ile birinci türevi olan diferansiyel denklemin çözümüyle bulunur (**Marano ve Greco, 2003**).

Doğrusal olmayan dinamik analizde çözümün yapılacağı hareket denkleminin kurulabilmesi için her zaman adımında elemanın rijitliğinin belirlenmesi gerekir. Bunun için, uygulanan dış yükün zamanla değişmesinden dolayı oluşan iç kuvvet değişimlerinin eleman davranışına yapacağı etki hesaplanır. Bu durum şöyle de ifade edilebilir: Bir  $t$  zamanında elemanda oluşan  $M(t)$  momenti, yüklemenin yönüne göre  $M_y^+$  (pozitif) ve  $M_y^-$  (negatif) akma momentleriyle kıyaslanır.  $\Delta t$  zaman artımında oluşacak moment değişimi  $\Delta M$  ile gösterilirse, eleman için:

$$M_y^- < M(t) < M_y^+$$

durumunda eleman davranışı doğrusal,

$$M(t) \geq M_y^+ \text{ ve } \Delta M > 0$$

$$M(t) \leq M_y^- \text{ ve } \Delta M < 0$$

durumunda eleman davranışı nonlineer,

$$M(t) \geq M_y^+ \text{ ve } \Delta M < 0$$

$$M(t) \leq M_y^- \text{ ve } \Delta M > 0$$

durumunda ise yüklemde boşalma başlamıştır denilebilir (**Cheng, 2001**). Elemanın t anında etkiyen dış yüklere karşı göstereceği davranış bu şekilde belirlendikten sonra elemanın rijitlik ve buna bağlı olarak sönüm matrisleri yeniden oluşturulur ve hareket denklemi kurulur. Hareket denklemi kurulduktan sonra çözüme geçilir.

Doğrusal olmayan sistemler dinamik yükler altında sabit bir davranış göstermediğinden uygulanan her yüke karşın sistemin karşılığının ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Böyle bir hesaplamayı yapmak için daha önce de bahsedildiği gibi sayısal hesaplama yöntemleri kullanılır. En çok kullanılan sayısal hesap yöntemleri, Newmark Metodu, Wilson- $\theta$  Metodu ve Runge-Kutta metodlarıdır. Deprem hareketine maruz kalmış bir sistemin dinamik hareket denkleminin çözülmesinde bu metodların kullanımı kısaca şöyle tanımlanabilir:

*Newmark metodunda*  $\Delta t$  zaman artımında deprem ivmelerin doğrusal olarak değiştiği varsayılır. Bu zaman adımındaki ortalama ivme belirlenir ve buna göre t başlangıç zamanı olmak üzere  $(t+\Delta t)$  süresindeki hız ve yerdeğiştirme değerleri, t başlangıç durumundaki yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleri ile  $(t+\Delta t)$  süresindeki ivme değeri cinsinden yazılır. Bu ifade hareket denkleminde yerine konulur ve diferansiyel denklem çözümü yapılarak  $t+\Delta t$  anındaki yerdeğiştirme ve hız değerlerine ulaşılır.

*Wilson- $\theta$  metodu*, Newmark metodunun genişletilmiş şeklidir. Bu metotta ivmelerin t'den  $(t+\theta\Delta t)$  zamanına kadar doğrusal olarak değiştiği varsayılır. Bu aralıktaki bir  $(t+\tau)$  zamanında oluşacak yerdeğiştirme, hız ve ivmeler t ve  $t_0$  anındaki değerler cinsinden yazılır. Bundan sonra  $\tau$ 'nın  $\theta\Delta t$  değerine eşit olduğu  $t_0$  anındaki yerdeğiştirme ve hız değişimleri yine t ve  $t_0$  anındaki değerler cinsinden yazılarak  $\theta$  anında oluşturulan hareket denkleminde yerine konulur ve çözülür.

*Runge-Kutta yönteminin*, özellikle yapı sistemlerinin çözümünde çok kullanılan 4. Mertebesinde ise, hareket denklemi birinci derece diferansiyel denklem cinsinden ifade edilir ve oluşan bu yeni diferansiyel denklem Taylor serisine açılır. Taylor serisinin çözümüyle birinci mertebe diferansiyel denklem için bulunan sonuç hareket

denklemine göre tekrardan düzenlenir. Metoda 4. derece denmesinin nedeni Taylor serisi açılımının dördüncü dereceye kadar yapılıyor olması, daha üst düzey ifadelerin ise ihmal ediliyor olması ile tanımlanabilir.

### **3.3 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözümlemesinde Drain-2DX Programı**

Drain 2DX bilgisayar yazılımı California Üniversitesi, Berkeley tarafından geliştirilen Fortran tabanlı ve doğrusal olmayan dinamik çözümleme yapabilme kapasiteli bir analiz programıdır (**Prakash ve diğ., 1993**). Program, düğüm noktalarında birbirine bağlı doğrusal olmayan elemanlardan oluşan ve iki boyutlu düzlem olarak modellenen yapı üzerinde düşey yük çözümlemesinin yanısıra doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz de gerçekleştirebilmektedir. Program, alt programlar (subroutine) ile sürekli olarak desteklenmektedir, dolayısıyla da sürekli olarak güncellenip yeni modeller tanımlanabilmektedir.

#### **3.3.1 Analiz Adımları ve Kabuller**

Gerçekçiliği ve kolay uygulanabilmesinden dolayı, doğrusal olmayan analizde rijitlik azaltımlı çözüm stratejisi kullanılır. Program doğrusal olmayan bir problemi çözmek için her zaman adımında ayrı bir çözüm yapar. Her adımda, yüklemeden dolayı ortaya çıkan etkilerin sistem davranışını değiştirip değiştirmediğine bakılır ve gerekirse rijitlik yeniden hesaplanır. Böylece istenilen doğrusal olmayan davranış sistemde tanımlanmış olur.

Statik analizde yük bir dizi adımda uygulanır. Her adım içinde program bir sonraki rijitlik değişiminin ortaya çıktığı anda bitecek bir yük alt adım aralığı belirler. Sonra yapı rijitliği düzeltilir ve diğer alt adımda bir analiz gerçekleştirilir. Analiz bölümü tüm yükler uygulandığında yada istenilen yerdeğiştirme değerine ulaşıldığında sona erer.

Dinamik analizde ise işlem, kabul edilebilecek düzeyde bir sapma ve/veya analiz adımı değerlerinin değişebilirliği dışında statik analizle aynı şekilde kontrol edilir. Her adımda rijitlik azalımının hesaba katılımı isteğe bağlı olmakla beraber dikkate alınması tavsiye edilir. Sapma değeri her eleman için belirlenebilir. Bu, çeşitli elemanların önce akmasına yada yük boşalmasına izin vererek, yapı rijitlik matrisinin daha kısa zamanda kurulmasını sağlayacağı için, programın hesap zamanını azaltabilir. Bununla birlikte büyük sapma değerleri, büyük dengelenmemiş yük değerlerine sebep olacaktır. Zaman adımı sabit yada değişken olarak tanımlanabilir. Eğer zaman adımı değişken olursa, adım genişliğini kontrol etmek amacıyla, tolere edilebilecek sınırlar için üst ve alt hata değerleri tanımlanır. Program her zaman adımında bir hata değeri hesaplar. Bu değer herhangi bir adımda üst sınırı aşarsa

zaman adımı düşürülür ve adım tekrarlanır. Eğer ölçüm bazı adımlarda alt tolerans sınırından küçük çıkarsa zaman adımı bir sonraki adımda artırılır. Zaman adımı azaltma ve artırma faktörleri tanımlanabilirler. Genellikle bu değerler sırasıyla 0.5 ve 2.0 olur.

Yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışını temsil eden model, gerilme pekleşmesi oranı, doğrusal kısımdaki ve yük boşalım durumundaki rijitlik değerleri gibi ilgili parametrelerin yapısal modelin hazırlanması kısmında belirtilmesiyle ortaya konulur.

*P-Δ etkisi* istendiği takdirde hesaba katılabilir. Bu işlem, her eleman için rijitlik matrisine eklenecek bir geometrik rijitlik matrisi ile sistem karşılıklarının hesaplanmasıyla yapılır. Doğrusal olmayan statik analizde her rijitlik azalımı durumunda, geometrik rijitlik matrisi değişir. Dinamik analiz için bu durum isteğe bağlı olarak değişebilir yada sabit kalabilir.

*Enerji dengesi* hesapları statik ve dinamik analizlerin her ikisi için de gerçekleştirilebilir. Düğüm noktaları üzerindeki dış işi, elemanlar üzerindeki statik elastik/plastik işi, kinetik enerji ve viskoz sönüm işini hesaplar. Eğer belirli şekilde bir enerji dengesizliği varsa analiz sonuçları büyük olasılıkla geçersizdir.

*Dengelenmemiş yüklerden kaynaklanan hatalar* programda dikkate alınır. Eğer tüm elemanlar çok doğrulu kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarına sahipse, küçük sapma toleransları tanımlanmışsa ve eleman geometrik rijitliği hızlı değişmiyorsa çözüm denge durumuna yakın kalacak ve küçük dengelenmemiş yük durumları oluşacaktır. Bununla birlikte eğer bazı elemanlara ait kuvvet-şekil değiştirme bağıntıları çok doğrulu değil de eğrisel olarak tanımlanmışsa, büyük sapma toleranslarına izin verilmişse veya eleman eksenel kuvvetleri (dolayısıyla geometrik rijitlikleri) hızlı değişmekteyse önemli dengesizlikler oluşabilir. Program her yük adımının sonunda dengesizliği hesaplar ve bunları bir sonraki adımda uygular, fakat dengesiz duruma yinelemez. Eğer sonuçlar bir analizin sonunda büyük dengelenmemiş yük gösteriyorsa ya analiz daha geniş bir yük adımında tekrar edilir (bu durumda dengelenmemiş yük doğrulamaları daha sık yapılır) yada sıfır yüke sahip yalancı bir statik analiz (dengesizlikleri tekrarlamak amacıyla) eklenir.

### **3.3.2 Drain-2DX ile Yapısal Modelin Hazırlanması**

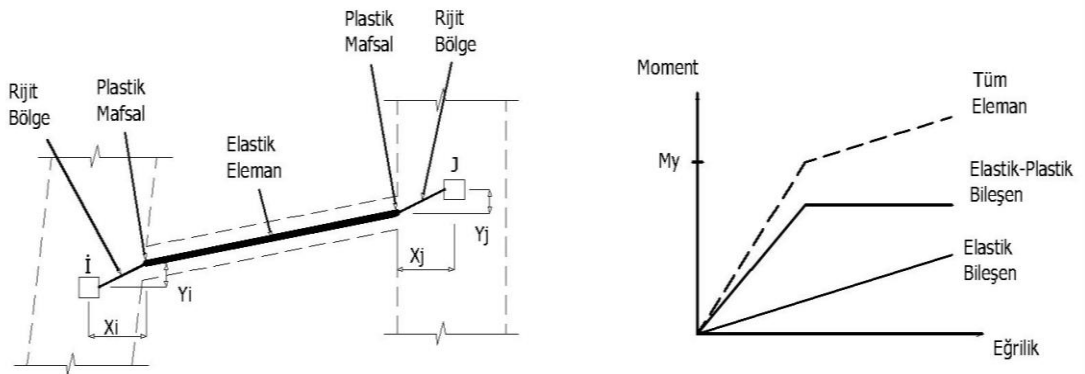
Analizde program giriş verisi hazırlanırken, öncelikle yapı sistemi tanımlanır. İlk olarak düğüm noktaları ve koordinatları belirlenir. Elemanların uçları bu düğüm noktaları ile tanımlanacağı için daha sonra elemanlar ile ilgili herhangi bir uzunluk tanımlaması yapılmaz. Aksi belirtilmedikçe her düğüm noktası X ve Y global eksenlerinde öteleme ve Z ekseninde dönme şeklinde üç adet serbestliğe

sahiptir. Eğer bir düğüm noktası mesnetli yada diğer bir düğüm noktasına bağlı olarak çalışacaksa, bunlar ilgili kısımlarda belirtilir. Yapının kütleleri düğüm noktalarında yığılı olarak düşünülür ve kütle matrisi buna göre düzenlenir.

Yapıyı oluşturan elemanların özellikleri her eleman tipine göre ayrı ayrı belirlenir. Mevcut Drain-2DX program kullanım kılavuzunda belirtilen yada daha sonradan eklenen çalışmalarla tanımlanan eleman tiplerinden biri tercih edildikten sonra, seçilen elemana ait rijitlik ve akma kesiti değerleri,  $P-\Delta$  etkisinin gözönüne alınıp alınmaması gibi tercihler yapılır. Bundan sonra eleman tipine göre rijitlik, akma kesiti, rijit uç bölüm gibi gruplar altında elastisite modülü, eylemsizlik momenti, rijitlikler, sönmeye etki edecek rijitlik faktörü ( $\beta$ ), gerilme pekleşmesi oranı, akma şekil değiştirmesi, akma momentleri, enkesit alanları, plastik mafsallık yerleri, rijit uç kısımları gibi değerler girilir. Elemanların özellikleri tanımlandıktan sonra her elemana ait uç düğüm noktaları, elemanlara ait özelliklerin tanımlandığı grup numaraları tarif edilir. Çalışmada, yapıdaki kiriş ve kolonlar için iki numaralı plastik mafsallı kiriş-kolon elemanı, çerçeveleri birbirine bağlayan ve çerçeveler arasındaki yük aktarımını sağlayan elemanlar için 9 numaralı bağlantı elemanı kullanılmıştır.

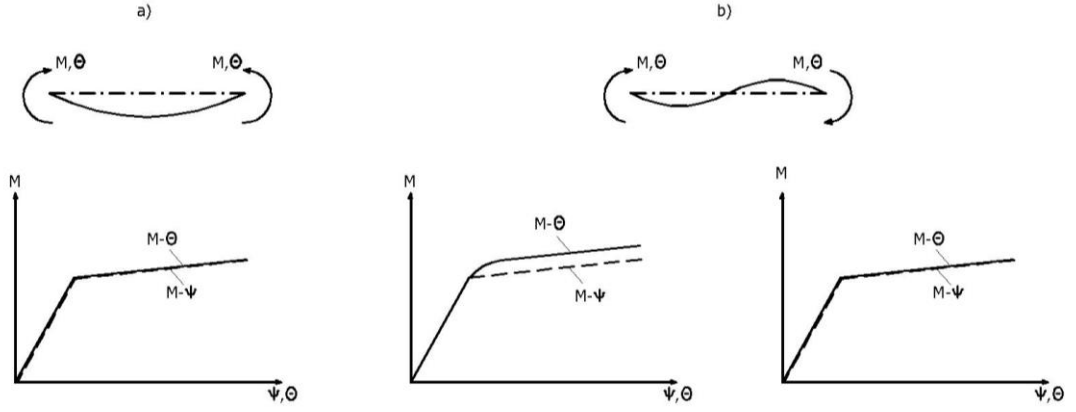
İki numaralı eleman, Şekil 3.3 de gösterildiği üzere elastik bir kiriş, bu kirişin uçlarında gelişen iki rijit-plastik mafsallık ve isteğe bağlı olarak tanımlanabilen rijit uç kısımlardan meydana gelir.

Akma sadece plastik mafsallarda oluşur. Mafsallık akma momentleri elemanın her iki ucunda pozitif ve negatif eğilme durumları için ayrı ayrı tanımlanabilir. Eksenel kuvvet,  $N$ , ile eğilme momenti,  $M$ , etkileşimi sonucu akma yüzeyleri tanımlanarak hesaba katılabilir. Yine de, plastik mafsalların sadece eğilme durumunda oluştuğu, elastik olmayan eksenel şekil değiştirme durumunda oluşmadıkları varsayılmaktadır.



**Şekil 3.3:** 2 nolu elemana ait eleman geometrisi ve moment-eğrilik bağıntısı

Gerilme pekleşmesinin eğilme durumundaki etkisi, elemanın Şekil 3.3 de gösterildiği gibi birbirine paralel elastik ve elastik olmayan bileşenlerden oluştuğu kabulüne göre modellenmesiyle ifade edilir. Sabit moment altında oluşan plastik mafsallar elastik olmayan bileşende yer alır. Elastik bileşendeki momentlerin artmaya devam etmesi gerilme pekleşmesini ifade eder. Bunu açıklamak için eğilme momentinin sabit ve değişken olduğu durumlarda oluşacak moment-eğrilik ve moment-dönme bağıntıları Şekil 3.4 de verilmiştir. Eğer kiriş üzerindeki eğilme momenti sabitse, bu durumda eğrilik ve dönme değerleri birbiriyle orantılı olarak değişeceği için moment-dönme bağıntısı moment-eğrilik bağıntısı ile Şekil 3.4(a) da gösterildiği üzere aynı olacaktır. Bununla birlikte eğer eğilme momenti Şekil 3.4(b) de gösterildiği gibi değişkense, bu durumda eğrilik ve dönme arasındaki oransal değişim ortadan kalkacağı için moment-eğrilik ve moment-dönme bağıntıları halihazırdaki kiriş için aynı olmayacaktır.



**Şekil 3.4:** Eğilme momentinin a) sabit, b) değişken olduğu durumlara ait moment-dönme ve moment-eğrilik bağıntıları

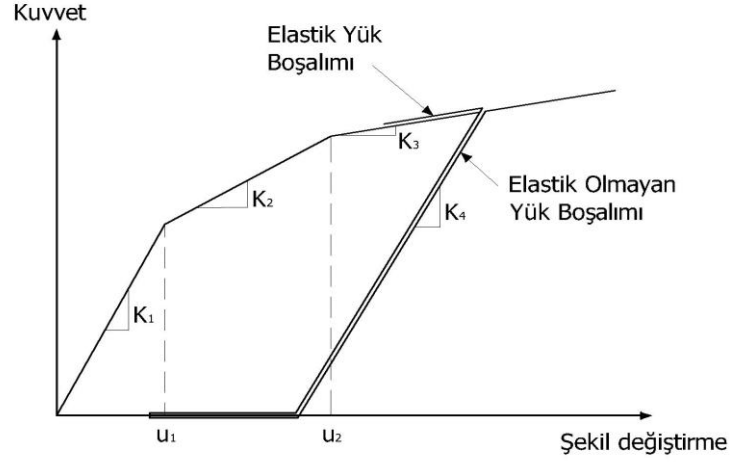
Dokuzuncu tip bağlantı elemanı ise belli bir uzunluğa sahip, sadece eksenel kuvvete karşı direnci olan ve basınç veya çekme kuvveti taşıyacak şekilde modellenebilen bir elemandır. Elemana ait kuvvet-şekil değiştirme bağıntısı Şekil 3.5 de gösterilmektedir. Eleman üzerinde elastik ve elastik olmayan yük boşalım şekli tanımlanabilir. Eğer istenirse, eleman üzerinde önceden oluşmuş bir kuvvet yada şekil değiştirme değeri de tanımlanabilir.

Eleman kütle matrisi ve rijitlik matrisi ile orantılı,

$$[C] = \sum \alpha_i [M] + \sum \beta_j [K_j] \quad (3.6)$$

şeklinde bir sönüm matrisi tanımlanabilir. Pratikte kütle, sönüme bağlı olarak her düğüm noktasında ötelenme ve dönmeye karşı sönümleyiciler üretir ( $\alpha[M]$ ). Eğer istenirse her düğüm için farklı  $\alpha$  değerleri tanımlanabilir. Sönüme bağlı rijitlik

elemanlara paralel olarak sönümleyiciler üretir. Her eleman grubu için farklı  $\beta$  değerleri tanımlanabilir. Sönüme etki eden rijitlik matrisi  $[K_\beta]$  her eleman için sabit kalır. Birçok eleman için  $K_\beta$  başlangıç rijitliğine eşit olacak şekilde oluşturulur.



**Şekil 3.5:** 9 nolu elemana ait kuvvet-şekil değiştirme bağıntısı

Yapı modellendikten sonra sonuçlar kısmında düğüm noktalarına ait yerdeğiştirme zarfları, iç kuvvet zarfları, düğüm noktalarına ait yerdeğiştirme, hız ve ivme-zaman değişimleri, elemanlara ait iç kuvvetler, dönme değerleri ve uç yerdeğiştirmesi-zaman serileri gibi değerler elde edilebilir.

Yapıya ait özelliklerin ve ilgilenilen yapısal karşılıkların belirtilmesinden sonra yapılması düşünülen statik veya dinamik analiz işlemine ait parametreler ve yükleme bilgileri tanımlanır. Bunlar, dinamik analiz için yerdeğiştirme, hız, ivme kayıtları, davranış spektrumları, kuvvet kayıtlarıdır. Statik analiz için kullanılan kontrol değerleri ise dinamik analiz için belirtilmesi gereken zaman adımı, maksimum iterasyon sayısı ve çeşitli ölçek faktörlerinin tanımlandığı parametreler kısmında verilir.



#### 4. ÖRNEK BİR YAPININ DETAYLI İRDELENMESİ

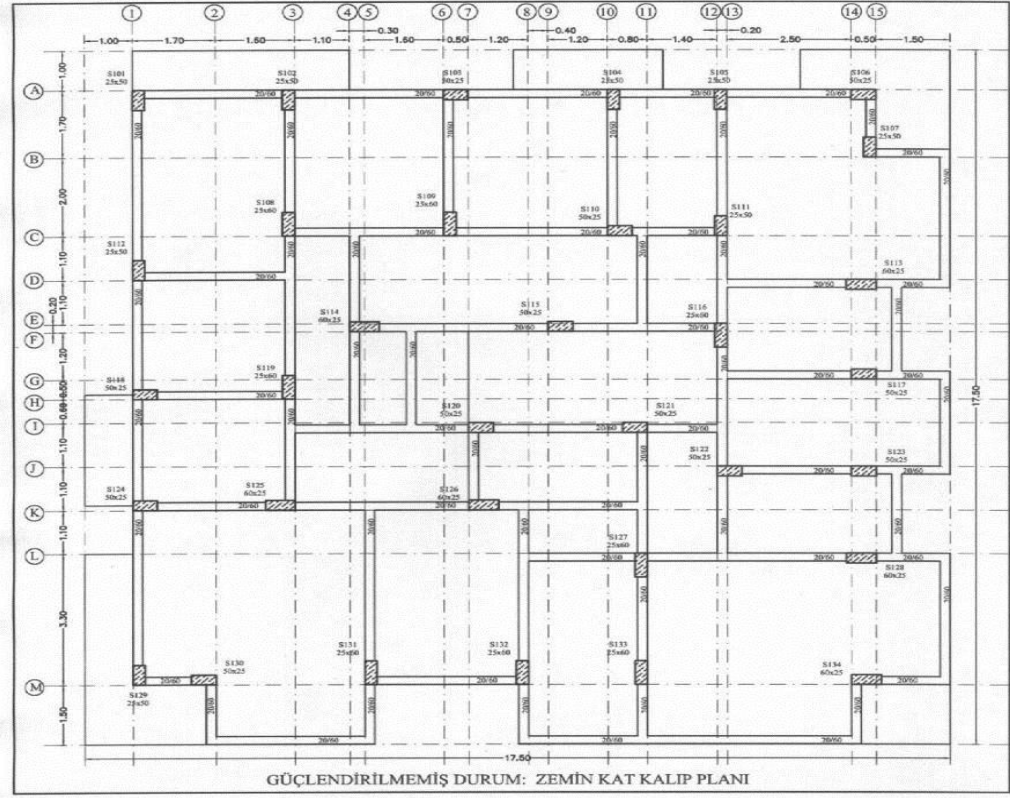
Analizi yapılan bina 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar görmüş, sonrasında perdelerle ve kolonları mantolanarak güçlendirilmiş 4 katlı betonarme konut tipi bir yapıdır. Binanın nispeten zayıf olan y-y eksenini üzerinde analiz yapılmıştır. Yapıya ait güçlendirme öncesi ve sonrası kat kalıp planları Şekil 4.1 de görülmektedir. Yapı malzemesi olarak C14 (BS14) betonu ve S220 (BÇİ) çeliği kullanılmış olduğu saptanmıştır.

Yapıyı oluşturan elemanlara ait eylemsizlik momenti, akma momentleri, enkesit alanları değerleri ile kat ağırlıkları, aynı yapı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmadan (Hasgür ve Taşkın, 2002) alınmıştır.

##### 4.1 Yapının Güçlendirme Öncesi Analizi

Kalıp planından da görüleceği üzere yapı elemanları çok düzensiz bir yerleşime sahiptir. Yapıda y-y yönünde 8 adet çerçeve bulunmuştur. Yapı Drain-2DX programı için yukarıda esasları belirtildiği gibi iki boyutlu olarak modellenmelidir. Bu yüzden yapıyı oluşturan çerçeveler bağlantı elemanlarıyla birbirlerine bağlanarak sözde büyük bir çerçeve oluşturur. Bu bağlantı elemanlarının çerçeveler arası kuvvet aktarımını herhangi bir deformasyon yapmadan gerçekleştirmesi için akma rijitlikleri oldukça yüksek tutulmuş, böylece bağlantı elemanlarının elastik davranması istenmiştir. Bunun için Drain-2DX kullanım kılavuzunda tanımlanan 9. tip bağlantı elemanı istenilen davranışı gösterecek şekilde oluşturulmuştur.

Yapıdaki kiriş ve kolonlar Drain-2DX kullanım kılavuzundaki 2. tip kiriş-kolon eleman şeklinde tanımlanmışlardır. Bu tanımlamaya göre her elemanın rijitliğinin, elastisite modülünün, enkesit alanının tanımlandığı bir rijitlik numarası ile pozitif ( $M_y^+$ ) ve negatif ( $M_y^-$ ) akma momentlerinin tanımlandığı bir akma kesiti numarası vardır. Ele alınan binada 7 farklı rijitlik ve 19 farklı akma kesiti bulunmaktadır. Bu kesitlere ait değerler Tablo 4.1 ve 4.2 de gösterilmiştir. Bağlantı elemanlarıyla birbirine bağlanan çerçevelerden oluşan birleştirilmiş çerçeve ise Şekil 4.2 de gösterilmiştir. Çerçevedeki her bir eleman üzerinde, elemanın numarası, elemanın sahip olduğu rijitliği ve akma özelliklerini belirten rijitlik ve akma kesiti numaraları ve elemanın bağlı olduğu düğümlerin numaraları belirtilmiştir.



Şekil 4.1 : Yapının güçlendirilmemiş durumuna ait zemin kat kalıp planı

Tablo 4.1 : Elemanlardaki farklı akma değerleri

| Akma Enkesiti | Pozitif Akma Momenti, $M_y^+$ (kNm) | Negatif Akma Momenti, $M_y^-$ (kNm) |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1             | 8.60E+01                            | 8.60E+01                            |
| 2             | 9.50E+01                            | 9.50E+01                            |
| 3             | 1.06E+02                            | 1.06E+02                            |
| 4             | 1.15E+02                            | 1.15E+02                            |
| 5             | 1.31E+02                            | 1.31E+02                            |
| 6             | 1.10E+02                            | 1.10E+02                            |
| 7             | 1.27E+02                            | 1.27E+02                            |
| 8             | 1.48E+02                            | 1.48E+02                            |
| 9             | 1.63E+02                            | 1.63E+02                            |
| 10            | 1.70E+02                            | 1.70E+02                            |
| 11            | 4.40E+01                            | 4.40E+01                            |
| 12            | 5.80E+01                            | 5.80E+01                            |
| 13            | 7.13E+01                            | 7.13E+01                            |
| 14            | 3.40E+01                            | 3.40E+01                            |
| 15            | 4.40E+01                            | 4.40E+01                            |
| 16            | 6.10E+01                            | 6.10E+01                            |
| 17            | 2.50E+01                            | 2.50E+01                            |
| 18            | 3.35E+01                            | 3.35E+01                            |
| 19            | 8.70E+01                            | 3.00E+02                            |

**Tablo 4.2 : Elemanlardaki farklı enkesit özellikleri**

| Rijitlik no | Elastisite Modülü, E (kN/m <sup>2</sup> ) | Enkesit Alanı, A (m <sup>2</sup> ) | Eylemsizlik Momenti, I (m <sup>4</sup> ) |
|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
| 1           | 2.60E+07                                  | 1.31E-01                           | 2.90E-03                                 |
| 2           | 2.60E+07                                  | 1.58E-01                           | 4.95E-03                                 |
| 3           | 2.60E+07                                  | 1.04E-01                           | 1.45E-03                                 |
| 4           | 2.60E+07                                  | 1.31E-01                           | 6.88E-04                                 |
| 5           | 2.60E+07                                  | 1.58E-01                           | 8.37E-04                                 |
| 6           | 2.60E+07                                  | 1.04E-01                           | 5.58E-04                                 |
| 7           | 2.60E+07                                  | 3.04E-01                           | 6.38E-03                                 |

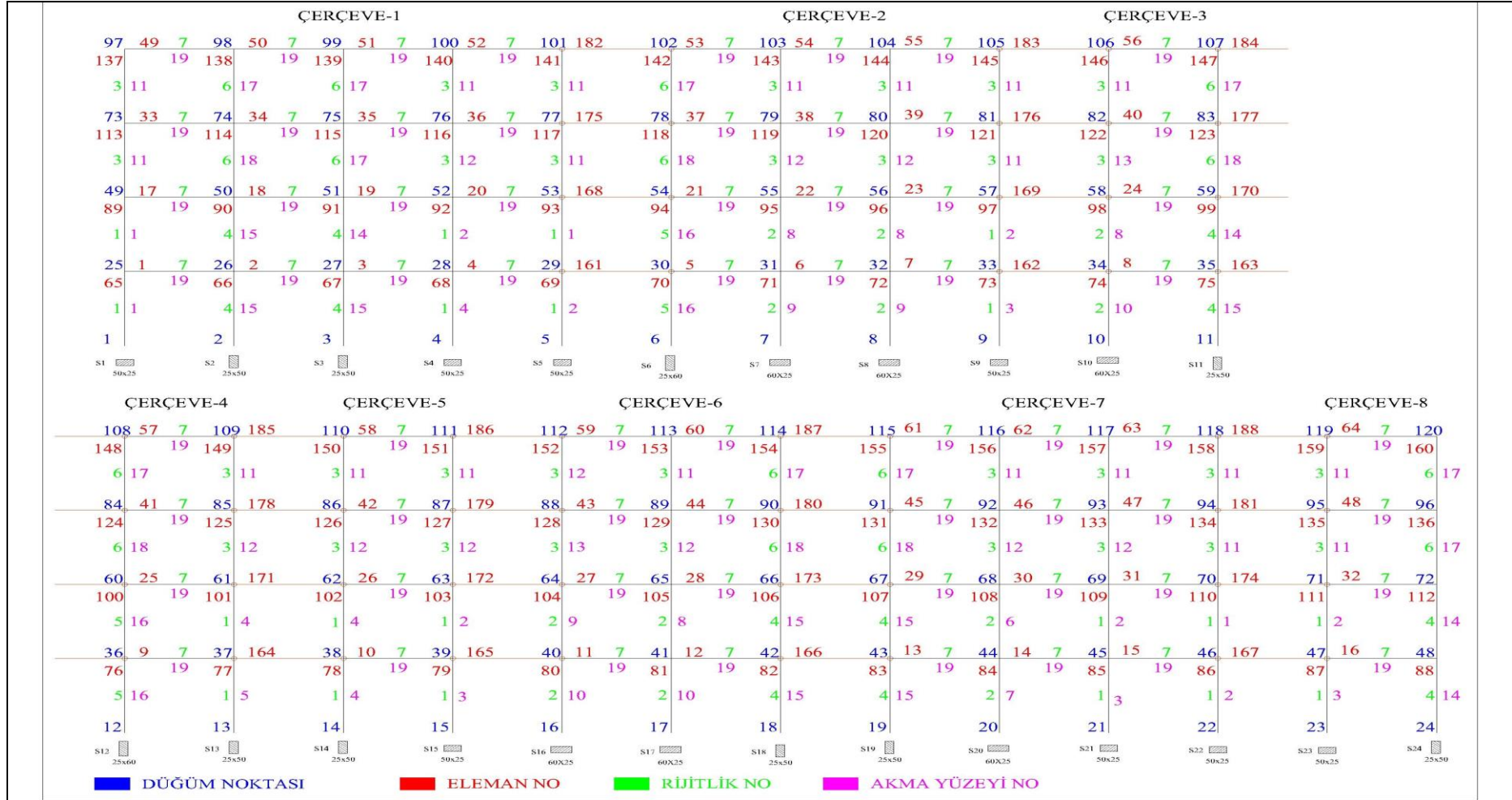
Yapının bütün elemanları için akma sonrası gerilme pekleşme oranı 0.03 alınmıştır. Böylelikle yapı, doğrusal elastik olan ilk kısmı akma durumuna kadar K rijitliğine sahip, ikinci kısmı ise akmadan sonra rijitliği  $\alpha.K$  şeklinde olan ve yük boşalmasının başlangıçdaki rijitliği koruyacak şekilde olduğu çift doğrulu (Bilinear) model esas alınarak çözümlenmiştir. Elemanlarda P- $\Delta$  etkisi ve eğilme momenti-normal kuvvet etkileşimi ihmal edilmiştir.

Her katın ağırlığı çerçevelerin o kattaki düğümlerine eşit olarak paylaştırılmıştır. Buna göre en üst kattaki ve diğer katlardaki 3300 ve 4600 kN luk ağırlıklar katlardaki 24 tane düğüme dağıtılmıştır. Böylece en üst katta düğüm noktası başına 137.50 kN, diğer katlarda 191.67 kN luk ağırlık değerleri elde edilir. Sönüme etki eden  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları sırasıyla 0.25 ve 0.005 alınmıştır. Düğüm noktalarına X ve Y yönünde öteleme, Z eksen etrafında dönme yapacak şekilde üç serbestlik verilmiştir. Her kattaki düğüm noktaları, o kattaki ilk düğüm noktasına bulundukları eksen yönündeki öteleme bakımından bağlıdır. Bu eksene dik olan ve yatay düzlemde bulunan diğer eksen yönündeki öteleme ve düşey eksen etrafındaki dönme bakımından ise bağımsızdır.

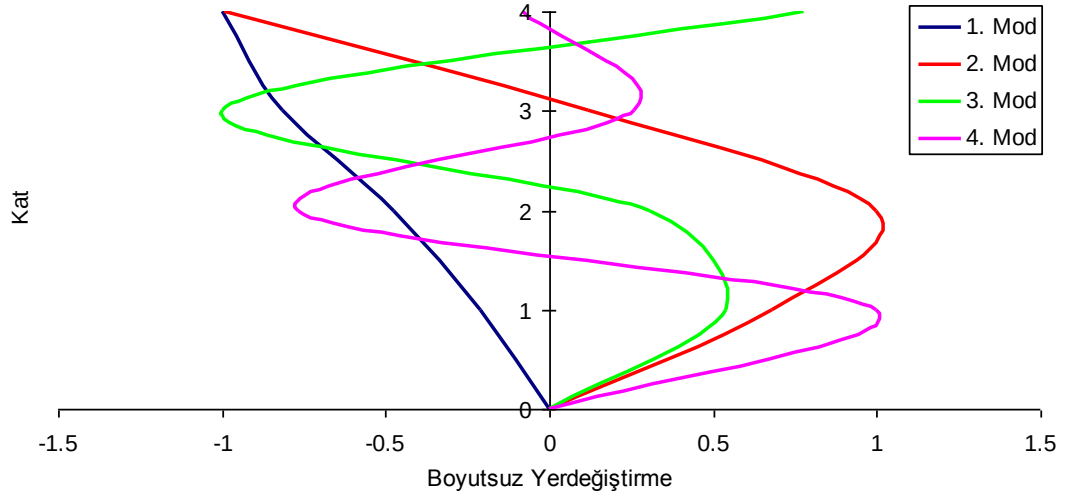
Dinamik analizde her adımda rijitlik hesaplaması yapacak şekilde sabit zaman adımı çözüm tercih edilmiştir. Zaman adımı 0.002 sn. olarak alınmış, her zaman adımında rijitlik hesabı için maksimum 50 iterasyona izin verilmiştir.

Bu şekilde modellenen sistemin ilk dört moduna ait sönümsüz serbest titreşim periyotları sırasıyla  $T_1=0.624$  sn.,  $T_2=0.226$  sn.,  $T_3=0.144$  sn.,  $T_4=0.099$  sn. olarak bulunmuştur. Mod şekilleri Şekil 4.3 de görülmektedir.

Güçlendirilmemiş sistemde oluşan yerdeğiştirme zarfları Şekil 4.4 de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere yapının en üst katının yaptığı en büyük yerdeğiştirme değeri Düzce depreminin Düzce DB kaydında 0.204 m olarak ortaya çıkmaktadır.

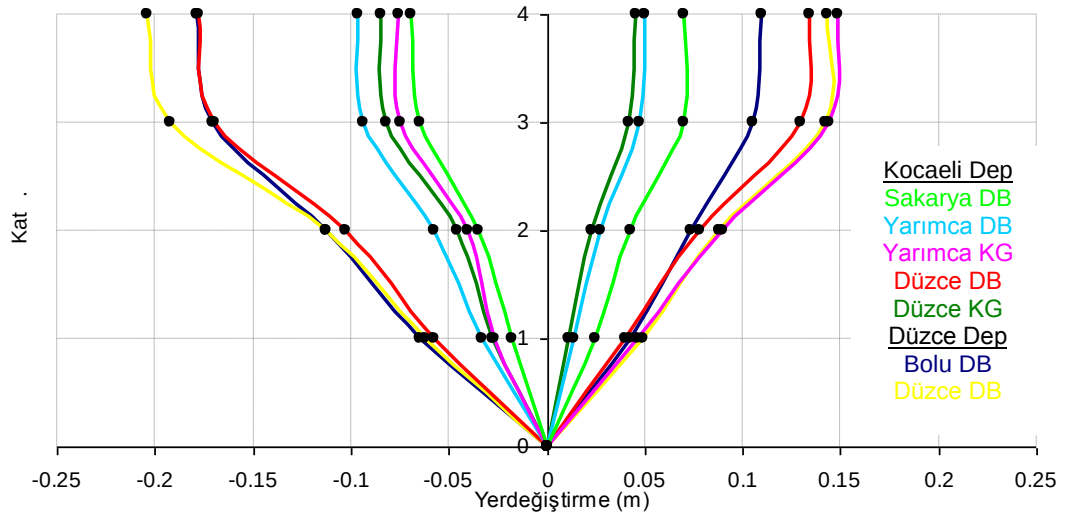


Şekil 4.2 : Güçlendirilmemiş duruma ait birleştirilmiş çerçeve



**Şekil 4.3 : Sistemin ilk dört titreşim modu**

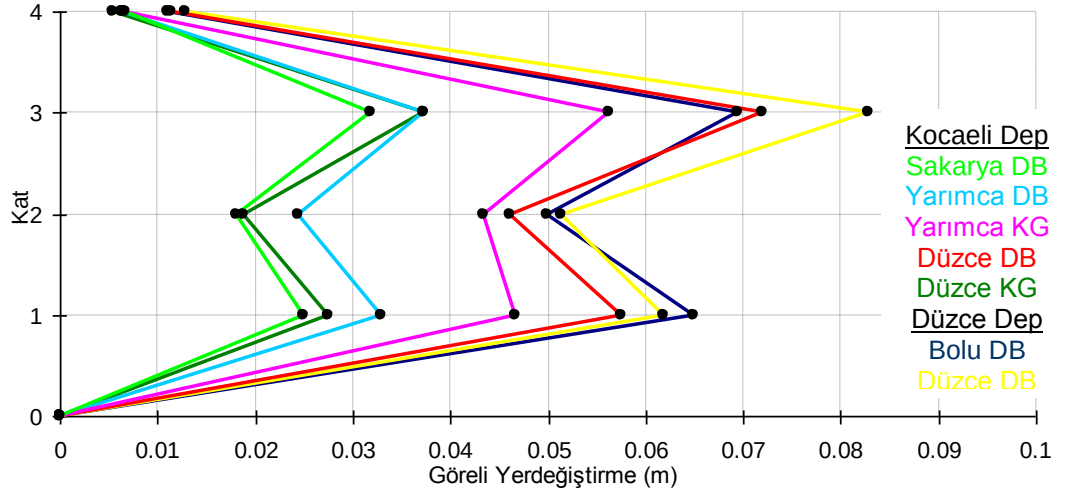
Yapıda oluşan göreceli kat ötelenmeleri ise Şekil 4.5 de verilmiştir. Bu şekle bakıldığında, betonarme çerçevelerden oluşan sistemlerin davranışına uygun olacak şekilde alt katlarda göreceli yerdeğiştirmelerin daha yüksek olduğu görülmektedir. İlk iki katın rijitliği birbiriyle neredeyse aynıdır. Fakat birinci katta depremden dolayı oluşan kat kesme kuvvetleri büyük olduğu için göreceli yerdeğiştirme değerleri de büyüktür. Üçüncü ve dördüncü katın rijitliği, ilk iki katın rijitliğine oranla daha düşük olduğu için göreceli yerdeğiştirmeler üçüncü katta alt katlara göre artmakta, buna rağmen dördüncü katta ise kat kesme kuvvetinin azalmasından dolayı daha düşük değerler almaktadır.



**Şekil 4.4 : Güçlendirme öncesi duruma ait yerdeğiştirme zarfı**

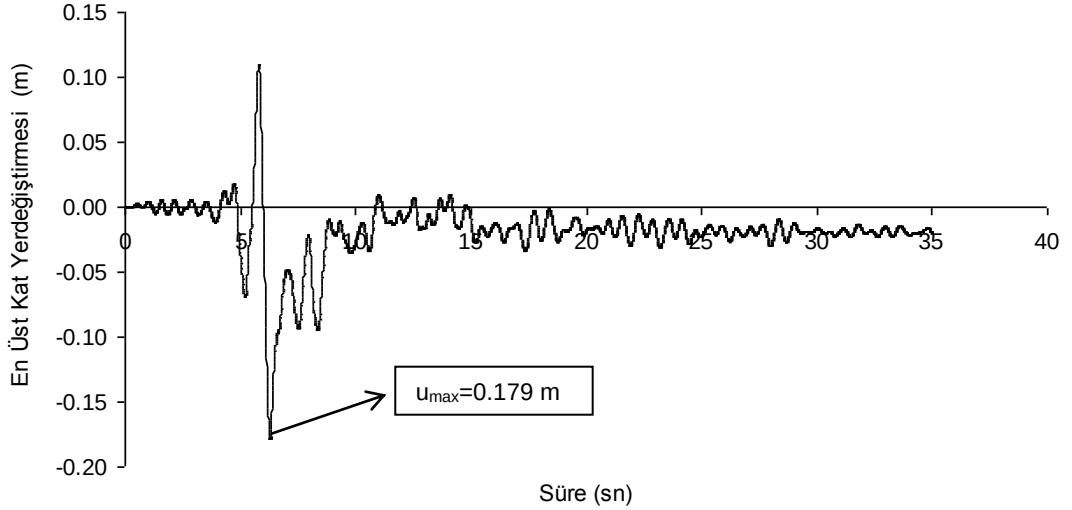
Yapının en üst katında oluşan yerdeğiştirmenin ve yapıdaki taban kesme kuvveti ile taban devrilme momentinin deprem süresince değişimini ifade eden grafikler çeşitli

deprem kayıtları için Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8 de görülmektedir. Bu parametrelerin tüm deprem kayıtlarına göre değişimleri ise Ek A da verilmiştir.

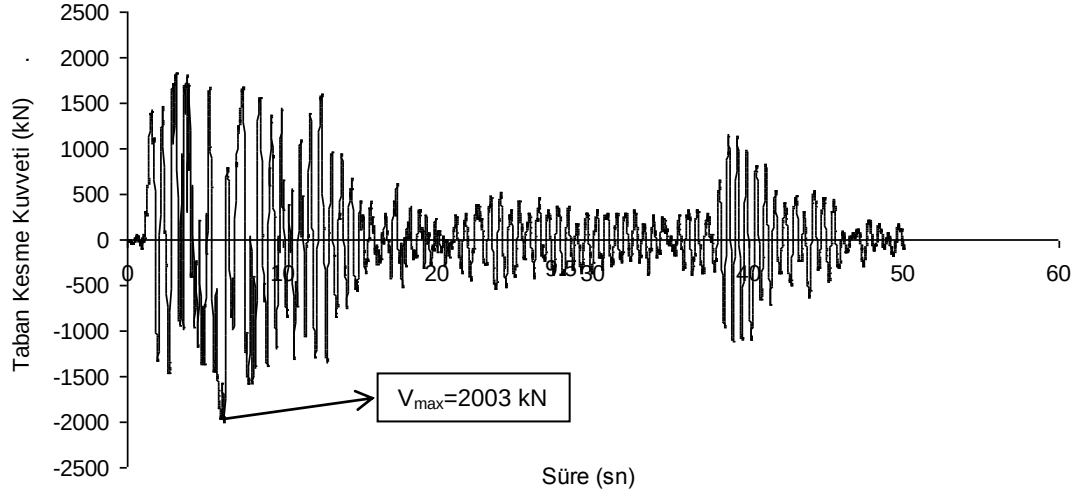


**Şekil 4.5 :** Güçlendirme öncesi duruma ait görel kat ötelemeleri

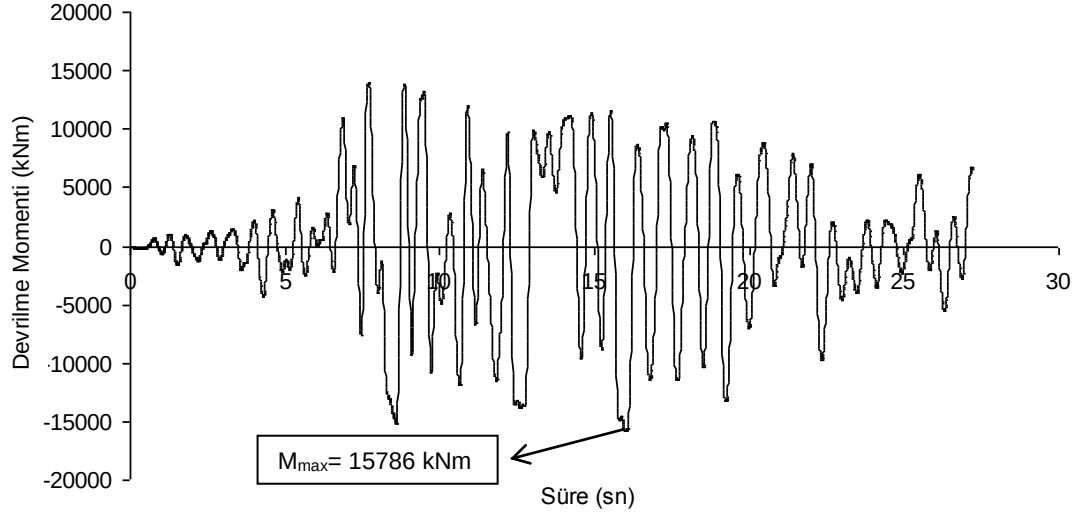
Aşağıdaki şekillerde değişimleri verilen bu parametrelerin her deprem kaydına göre aldıkları en büyük değerler Tablo 4.3 de verilmektedir. Bu tablodan yola çıkarak, ele alınan deprem kayıtları için yapıda oluşan en üst kat yedeğiştirme, taban kesme kuvveti ve devrilme momenti değerlerinin ortalama değerleri hesaplanmış ve sırasıyla 0.137 m, 2318 kN ve 18179 kNm olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.6 :** Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapının en üst katında oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



**Şekil 4.7 :** Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıdaki taban kesme kuvveti değişimi



**Şekil 4.8 :** Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıdaki taban devrilme momenti değişimi

**Tablo 4.3 :** Güçlendirme öncesi yapının en üst kat yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentine ait maksimum değerler

|                                | Kocaeli Depremi |            |            |          |          | Düzce Depremi |          |
|--------------------------------|-----------------|------------|------------|----------|----------|---------------|----------|
|                                | Sakarya DB      | Yarımca DB | Yarımca KG | Düzce DB | Düzce KG | Bolu DB       | Düzce DB |
| En Üst Kat Yerdeğiştirmesi (m) | 0.070           | 0.096      | 0.149      | 0.178    | 0.085    | 0.179         | 0.204    |
| Taban Kesme Kuvveti (kN)       | 2003            | 2148       | 2352       | 2489     | 2035     | 2610          | 2586     |
| Taban Devrilme Momenti (kNm)   | 15071           | 16091      | 18142      | 20223    | 15786    | 21424         | 20517    |

Depremselliği yüksek bölgelerde yeralan ülkelerin depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerinde, gerek yapının en üst katındaki, gerekse katlar arasındaki yerdeğiştirmeler sınırlandırılmıştır. Ancak, yapının gerek tamamının gerekse eleman bazında kısmi olarak gevrek bir şekilde göçmesi engellenmiş, bu durum örneğın ülkemiz deprem yönetmeliğinde R katsayısı ile kontrol altına alınmıştır. Yapıların yatay deprem kuvvetleri etkisinde olabildiğince yerdeğiştirme yaparak haberli bir biçimde göçme sınırına ulaşmaları zorunlu kılınmıştır. Günümüzün modern deprem yönetmelikleri bu yaklaşımları itibarıyla kuvvet kontrolünden çok yerdeğiştirmelerin kontrolünü esas almaktadır.

Bu çalışmada da, yapının deprem etkisi altındaki performansının önemli bir göstergesi olan ve olası bir göçme durumunun habercisi olarak nitelendirilebilecek yerdeğiştirme sünekliğinin belirlenmesine çalışılmıştır. Yerdeğiştirme sünekliğini hesaplayabilmek için, yapının akma durumuna ve taşıma kapasitesine eriştiğı anlardaki yerdeğiştirme değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu anlamda yapının akma sınırı ve taşıma sınırı durumlarını tanımlayan bazı kabuller yapılmıştır. Akma sınırını belirlemek için, akma başlangıcının yapıda akma durumuna gelen ilk kolonla birlikte oluştuğı, daha önce herhangi bir kiriş elemanda akma kapasitesi aşılsa bile yapı bütününde bu durumun yapısal akmayı nitelemediğı varsayılmıştır. Göçme sınırını belirlemek için ise üç ayrı yaklaşım yapılmış, bunun sonucunda  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  ve  $\mu_3$  şeklinde üç farklı yerdeğiştirme sünekliği değeri bulunmuştur.

Bu yaklaşımlardan birincisine göre, yapının herhangi bir katında bulunan kolonların en az yarısının, elemanın alt yada üst olmak kaydıyla herhangi bir ucunda, pozitif veya negatif bir eğilme etkisinde plastik mafsall oluşması durumunda, yapının taşıma kapasitesine eriştiğı varsayılmıştır. Bu varsayımın gerçekleştiğı anda yapının en üst katındaki yerdeğiştirme değeri, taşıma sınırındaki yerdeğiştirme değeri olarak alınmış ve yukarıda tanımlanmış olan akma durumu için yapının en üst katında oluşan yerdeğiştirme değerine bölünerek  $\mu_1$  yerdeğiştirme sünekliği değeri bulunmuştur.

İkinci yaklaşıma göre, yapının herhangi bir katında bulunan kolonların en az yarısı için her iki uçta da plastik mafsalların oluştuğı anda yapının taşıma kapasitesine eriştiğı varsayılmış, bu durumun gerçekleştiğı andaki en üst kat yerdeğiştirme değeri, akma durumundaki yerdeğiştirme değerine bölünerek  $\mu_2$  yerdeğiştirme sünekliği değeri bulunmuştur.

Üçüncü yaklaşıma göre ise, yapıyı oluşturan çerçevelerden herhangi birinin herhangi bir katındaki kolonlarının en az yarısı için her iki uçta da mafsallaşmanın oluştuğı zaman belirlenmiş ve bu anda yapının taşıma kapasitesine eriştiğı varsayılmıştır. Bu durumun ortaya çıktığı andaki en üst kat yerdeğiştirme değeri, taşıma sınırındaki



yerdeğiştirme değeri olarak ele alınarak yine benzer biçimde akma sınırındaki en st kat yerdeğiştirme değerine oranlanmak suretiyle  $\mu_3$  yerdeğiştirme değeri bulunmuştur (Lee ve diğ, 1997).

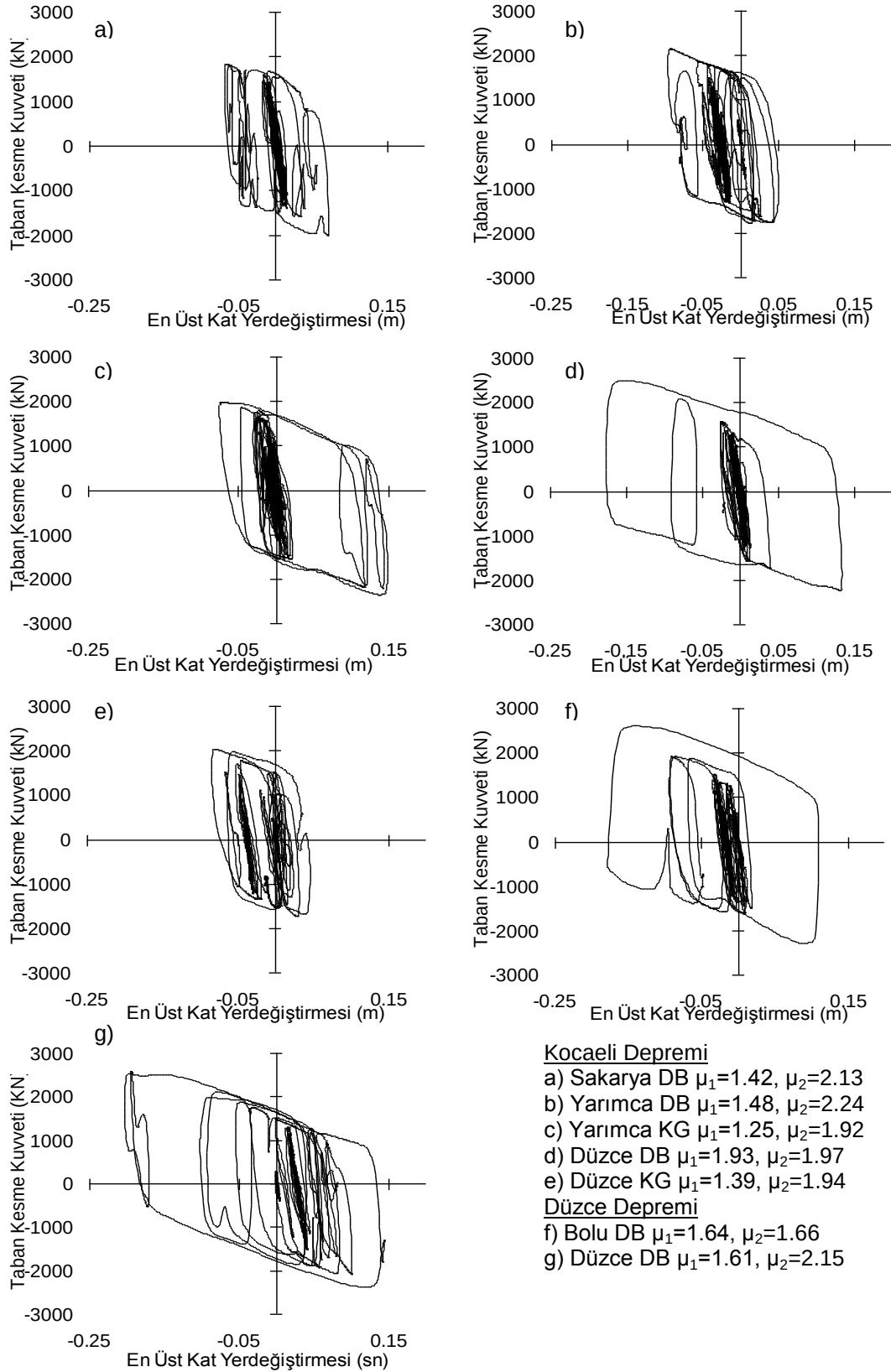
Bu üç süneklik değeri her deprem kaydı için Tablo 4.4 de sunulmuştur. Bu tablodan, ele alınan kayıtlara göre yapıdaki ortalama  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  ve  $\mu_3$  değerleri sırasıyla 1.53, 2.0 ve 1.60 olarak bulunur.

**Tablo 4.4 : Yerdeğiştirme süneklikleri**

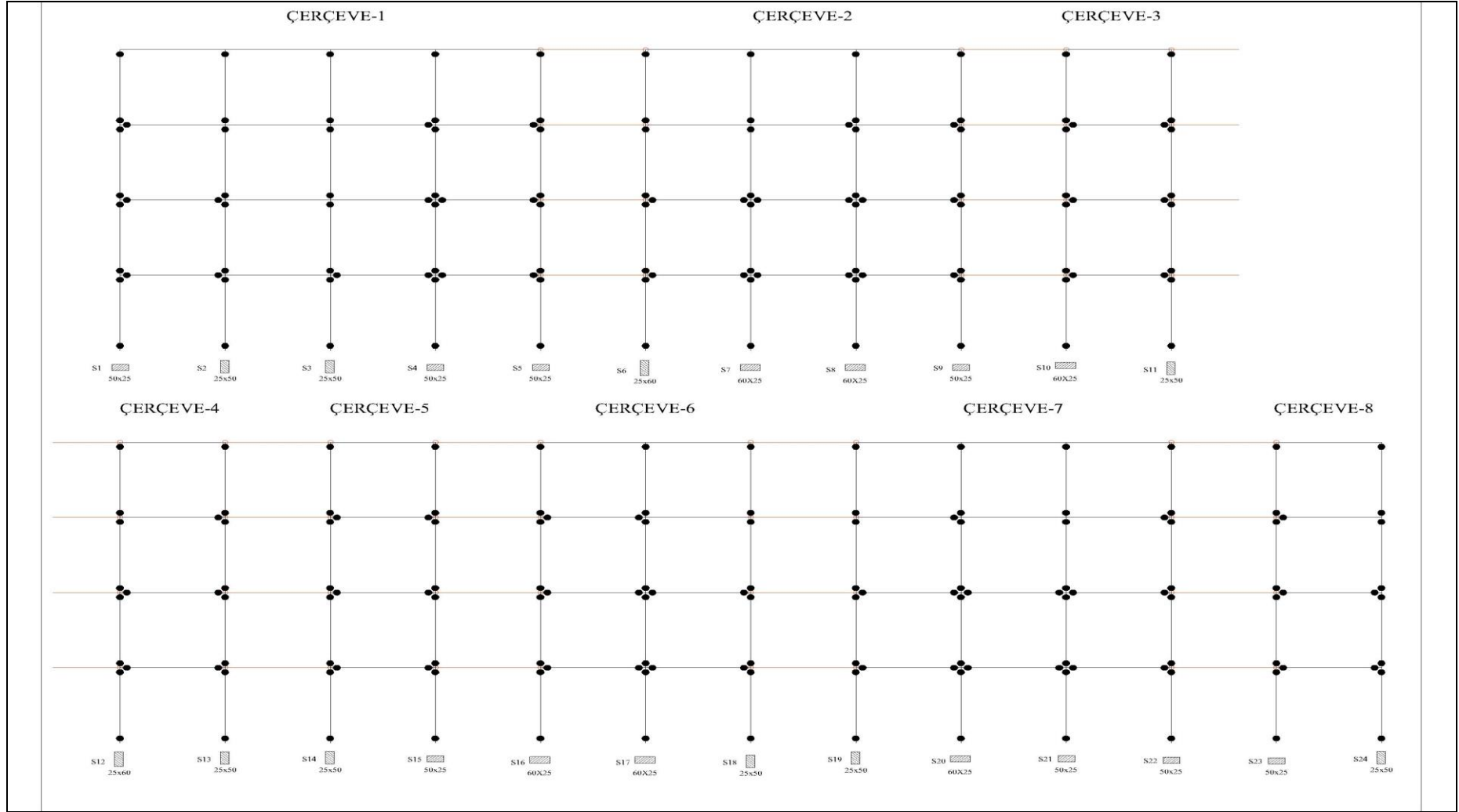
|         | Kocaeli Depremi |            |            |          |          | Düzce Depremi |          |
|---------|-----------------|------------|------------|----------|----------|---------------|----------|
|         | Sakarya DB      | Yarımca DB | Yarımca KG | Düzce DB | Düzce KG | Bolu DB       | Düzce DB |
| $\mu_1$ | 1.42            | 1.48       | 1.25       | 1.93     | 1.39     | 1.64          | 1.61     |
| $\mu_2$ | 2.13            | 2.24       | 1.92       | 1.97     | 1.94     | 1.66          | 2.15     |
| $\mu_3$ | 1.64            | 1.79       | 1.07       | 1.88     | 1.57     | 1.57          | 1.70     |

Çeşitli deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan dinamik analiz sonucu sistemdeki iç kuvvet-yerdeğiştirme değişimini ifade eden histeretik çevrimin oluşumunu göstermek için, literatürde de sıklıkla kullanılan en st kat yerdeğiştirmesi-taban kesme kuvveti değişimi her deprem kaydı için şekil 4.9 daki gibi oluşturulmuştur.

Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan mafsallaşma durumu ise şekil 4.10 da verilmektedir. Bu şekilde, yapının dördüncü katındaki kirişler ile üçüncü katındaki kirişlerin bir kısmı hariç bütün taşıyıcı elemanlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Diğer deprem kayıtları için oluşan plastik mafsallaşma durumu ise Ek B de verilmiştir. Binanın orta derecede hasar gördüğü düşünülürse, ortaya çıkan bu mafsallaşma oluşumunun beklenen bir durum olduğu söylenebilir. Yine de, şekil 4.10 da verilen bu gösterim teorik mafsal tanımına göre yapılmış, bu yüzden elemanların kesitlerinde oluşacak çok küçük dönmeler de mafsallaşma olarak gösterilmiştir. Eğer, dönmelerin belirli bir eşik değerin üzerine çıkması durumunda meydana gelecek şekilde, yapıdaki göçme mekanizmasını daha gerçekçi olarak ifade eden bir mafsallaşma oluşumu dikkate alınırsa, şekilde görülen mafsalların azalacağı rahatlıkla söylenebilir.



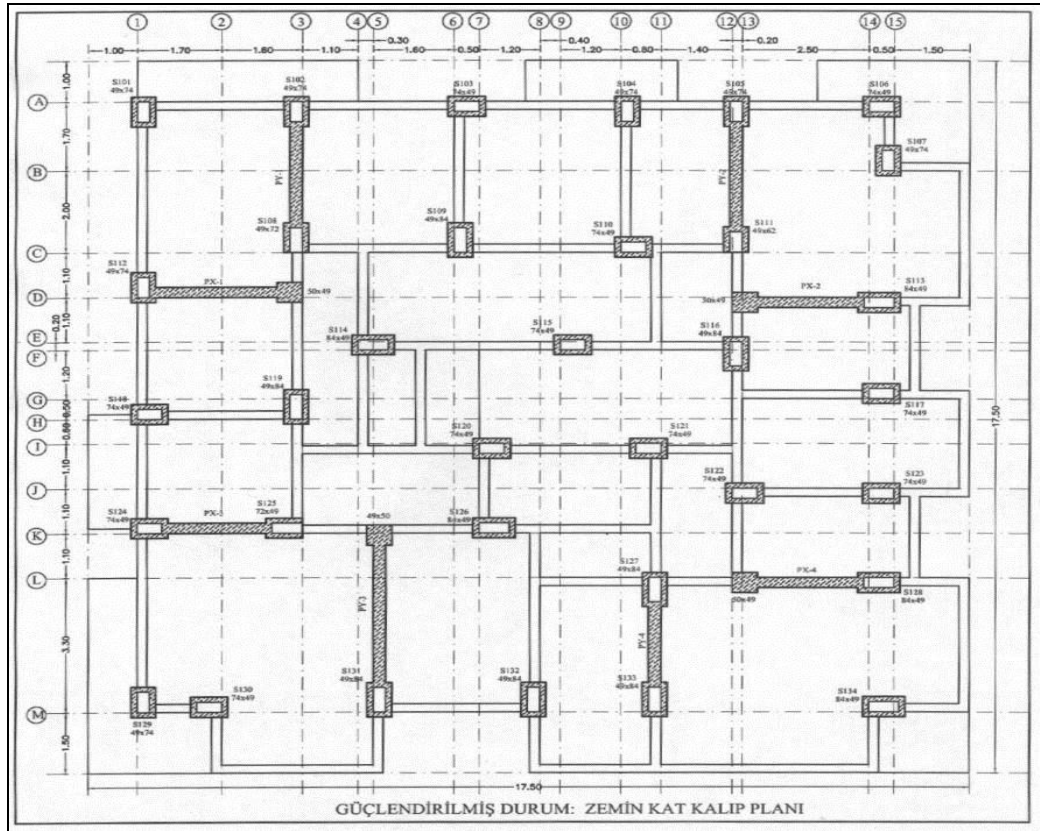
**Şekil 4.9 :** Kocaeli depreminin (a) Sakarya DB, (b) Yarımca DB, (c) Yarımca KG, (d) Düzce DB, ve (e) Düzce KG ile Düzce depreminin (f) Bolu DB ve (g) Düzce DB kayıtlarına göre yapıdaki taban kesme kuvveti-en üst kat yerdeğiştirme değişimleri



Şekil 4.10 : Güçlendirme öncesi durum için Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan plastik mafsallar

## 4.2 Yapının Güçlendirme Sonrası Analizi

Güçlendirme işleminde yapıya Şekil 4.11 de görüldüğü üzere her iki doğrultuda dörder adet perde eklenmiştir. Malzeme olarak C20 (BS 20) betonu ve S420 (BÇ III) çeliği kullanılmıştır. Güçlendirme işlemiyle birlikte güçlendirme öncesi durumdaki farklı rijitlik ve enkesit özelliklerine sahip eleman sayıları da artmıştır. Analizin yapıldığı y-y yönündeki perdeler ile bu yöndeki çerçevelerde kolon olarak çalışan x-x yönündeki perdelerin başlık kısımlarından dolayı 12 farklı enkesit ve 24 farklı rijitlik değeri tanımlanarak modellemeye kullanılmıştır. Ayrıca perdelerle bağlanan kirişlerin uçlarındaki rijit olan bölgeler de belirtilerek plastik mafsalların bu bölgelerin dışında oluşması sağlanmıştır.



Şekil 4.11 : Yapının güçlendirilmiş durumuna ait zemin kat kalıp planı

Bu şekilde modellenen yapıya ait birleştirilmiş çerçeve Şekil 4.12 de görülmektedir. Güçlendirme öncesinde yapıya etkiyen yatay yükler altında çerçeve davranışı göstermeyen 5-5 aksı, perde teşkil edilmesiyle çerçeve haline gelmiş, böylece güçlendirme sonrası durumdaki çerçeve sayısı artmıştır. Güçlendirme sonrası yapının titreşim periyotları beklendiği gibi azalarak  $T_1=0.260$ ,  $T_2=0.062$ ,  $T_3=0.026$ ,  $T_4=0.016$  sn olarak oluşmuştur.

| ÇERÇEVE-1 |    |     |     |     |    |     |    |     |     |     |    | ÇERÇEVE-2 |     |     |    |     |     |     |    | ÇERÇEVE-3 |    |     |    | ÇERÇEVE-4 |     |     |     |     |    |     |     |     |    |
|-----------|----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----------|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----------|----|-----|----|-----------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|
| 101       | 49 | 7   | 102 | 50  | 7  | 103 | 51 | 7   | 104 | 52  | 7  | 105       | 189 | 106 | 53 | 7   | 107 | 54  | 7  | 108       | 55 | 7   | 1  | 109       | 190 | 110 | 191 | 111 | 56 | 7   | 112 | 192 |    |
| 140       | 19 | 141 | 19  | 142 | 19 | 143 | 19 | 144 | 19  | 145 | 19 | 146       | 19  | 147 | 19 | 148 | 19  | 149 | 19 | 150       | 19 | 151 | 19 | 152       | 19  | 153 | 19  | 154 | 19 | 155 | 19  | 156 | 19 |
| 3         | 11 | 6   | 17  | 6   | 17 | 3   | 11 | 3   | 11  | 6   | 17 | 3         | 11  | 12  | 24 | 8   | 20  | 9   | 21 | 3         | 11 | 6   | 17 | 3         | 11  | 6   | 17  | 3   | 11 | 6   | 17  | 3   | 11 |
| 76        | 33 | 7   | 77  | 34  | 7  | 78  | 35 | 7   | 79  | 36  | 7  | 80        | 181 | 81  | 37 | 7   | 82  | 38  | 7  | 83        | 39 | 7   | 1  | 84        | 182 | 85  | 183 | 86  | 40 | 7   | 87  | 184 |    |
| 115       | 19 | 116 | 19  | 117 | 19 | 118 | 19 | 119 | 19  | 120 | 19 | 121       | 19  | 122 | 19 | 123 | 19  | 124 | 19 | 125       | 19 | 126 | 19 | 127       | 19  | 128 | 19  | 129 | 19 | 130 | 19  | 131 | 19 |
| 3         | 11 | 6   | 18  | 6   | 17 | 3   | 12 | 3   | 11  | 6   | 18 | 3         | 12  | 12  | 24 | 8   | 20  | 9   | 21 | 3         | 13 | 6   | 18 | 3         | 11  | 6   | 17  | 3   | 11 | 6   | 17  | 3   | 11 |
| 51        | 17 | 7   | 52  | 18  | 7  | 53  | 19 | 7   | 54  | 20  | 7  | 55        | 173 | 56  | 21 | 7   | 57  | 22  | 7  | 58        | 23 | 7   | 1  | 59        | 174 | 60  | 175 | 61  | 24 | 7   | 62  | 176 |    |
| 90        | 19 | 91  | 19  | 92  | 19 | 93  | 19 | 94  | 19  | 95  | 19 | 96        | 19  | 97  | 19 | 98  | 19  | 99  | 19 | 100       | 19 | 101 | 19 | 102       | 19  | 103 | 19  | 104 | 19 | 105 | 19  | 106 | 19 |
| 1         | 1  | 4   | 15  | 4   | 14 | 1   | 2  | 1   | 1   | 5   | 16 | 2         | 8   | 12  | 24 | 8   | 20  | 9   | 21 | 2         | 8  | 4   | 14 | 1         | 1   | 4   | 15  | 4   | 14 | 1   | 2   | 1   | 1  |
| 26        | 1  | 7   | 27  | 2   | 7  | 28  | 3  | 7   | 29  | 4   | 7  | 30        | 165 | 31  | 5  | 7   | 32  | 6   | 7  | 33        | 7  | 7   | 1  | 34        | 166 | 35  | 167 | 36  | 8  | 7   | 37  | 168 |    |
| 65        | 19 | 66  | 19  | 67  | 19 | 68  | 19 | 69  | 19  | 70  | 19 | 71        | 19  | 72  | 19 | 73  | 19  | 74  | 19 | 75        | 19 | 76  | 19 | 77        | 19  | 78  | 19  | 79  | 19 | 80  | 19  | 81  | 19 |
| 1         | 1  | 4   | 15  | 4   | 15 | 1   | 4  | 1   | 2   | 5   | 16 | 2         | 9   | 12  | 24 | 8   | 20  | 9   | 21 | 2         | 10 | 4   | 15 | 1         | 1   | 4   | 15  | 4   | 15 | 1   | 4   | 1   | 2  |
| 1         |    | 2   |     | 3   |    | 4   |    | 5   |     | 6   |    | 7         |     | 8   |    | 9   |     | 10  |    | 11        |    | 12  |    |           |     |     |     |     |    |     |     |     |    |

| ÇERÇEVE-5 |    |     |     |     |    | ÇERÇEVE-6 |    |     |     |     |    | ÇERÇEVE-7 |    |     |    |     |     | ÇERÇEVE-8 |    |     |     |     |    | ÇERÇEVE-9 |    |     |     |     |    |     |     |     |     |     |    |     |
|-----------|----|-----|-----|-----|----|-----------|----|-----|-----|-----|----|-----------|----|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-----|----|-----------|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| 113       | 57 | 7   | 114 | 193 | 7  | 115       | 58 | 7   | 116 | 194 |    | 117       | 59 | 2   | 7  | 118 | 195 | 119       | 60 | 7   | 120 | 61  | 7  | 121       | 62 | 7   | 122 | 63  | 7  | 1   | 123 | 196 | 124 | 64  | 7  | 125 |
| 152       | 19 | 153 | 19  | 154 | 19 | 155       | 19 | 156 | 19  | 157 | 19 | 158       | 19 | 159 | 19 | 160 | 19  | 161       | 19 | 162 | 19  | 163 | 19 | 164       | 19 | 165 | 19  | 166 | 19 | 167 | 19  | 168 | 19  | 169 | 19 |     |
| 6         | 17 | 3   | 11  | 3   | 11 | 3         | 11 | 6   | 17  | 6   | 17 | 12        | 24 | 6   | 17 | 3   | 11  | 12        | 24 | 11  | 23  | 3   | 11 | 6         | 17 | 3   | 11  | 6   | 17 | 3   | 11  | 6   | 17  | 3   | 11 |     |
| 88        | 41 | 7   | 89  | 185 | 7  | 90        | 42 | 7   | 91  | 186 |    | 92        | 43 | 2   | 7  | 93  | 187 | 94        | 44 | 7   | 95  | 45  | 7  | 96        | 46 | 7   | 97  | 47  | 7  | 1   | 98  | 188 | 99  | 48  | 7  | 100 |
| 127       | 19 | 128 | 19  | 129 | 19 | 130       | 19 | 131 | 19  | 132 | 19 | 133       | 19 | 134 | 19 | 135 | 19  | 136       | 19 | 137 | 19  | 138 | 19 | 139       | 19 | 140 | 19  | 141 | 19 | 142 | 19  | 143 | 19  | 144 | 19 |     |
| 6         | 18 | 3   | 12  | 3   | 12 | 3         | 12 | 6   | 18  | 12  | 24 | 6         | 18 | 3   | 12 | 12  | 24  | 11        | 23 | 3   | 11  | 6   | 17 | 3         | 11 | 6   | 17  | 3   | 11 | 6   | 17  | 3   | 11  | 6   | 17 |     |
| 63        | 25 | 7   | 64  | 177 | 7  | 65        | 26 | 7   | 66  | 178 |    | 67        | 27 | 2   | 7  | 68  | 179 | 69        | 28 | 7   | 70  | 29  | 7  | 71        | 30 | 7   | 72  | 31  | 7  | 1   | 73  | 180 | 74  | 32  | 7  | 75  |
| 102       | 19 | 103 | 19  | 104 | 19 | 105       | 19 | 106 | 19  | 107 | 19 | 108       | 19 | 109 | 19 | 110 | 19  | 111       | 19 | 112 | 19  | 113 | 19 | 114       | 19 | 115 | 19  | 116 | 19 | 117 | 19  | 118 | 19  | 119 | 19 |     |
| 5         | 16 | 1   | 4   | 1   | 4  | 1         | 2  | 10  | 22  | 4   | 15 | 12        | 24 | 4   | 15 | 2   | 6   | 12        | 24 | 11  | 23  | 1   | 2  | 4         | 14 | 1   | 2   | 4   | 14 | 1   | 2   | 4   | 14  | 1   | 2  |     |
| 38        | 9  | 7   | 39  | 169 | 7  | 40        | 10 | 7   | 41  | 170 |    | 42        | 11 | 2   | 7  | 43  | 171 | 44        | 12 | 7   | 45  | 13  | 7  | 46        | 14 | 7   | 47  | 15  | 7  | 1   | 48  | 172 | 49  | 16  | 7  | 50  |
| 77        | 19 | 78  | 19  | 79  | 19 | 80        | 19 | 81  | 19  | 82  | 19 | 83        | 19 | 84  | 19 | 85  | 19  | 86        | 19 | 87  | 19  | 88  | 19 | 89        | 19 | 90  | 19  | 91  | 19 | 92  | 19  | 93  | 19  | 94  | 19 |     |
| 5         | 16 | 1   | 5   | 1   | 4  | 1         | 3  | 10  | 22  | 4   | 15 | 12        | 24 | 4   | 15 | 2   | 7   | 12        | 24 | 11  | 23  | 1   | 3  | 4         | 14 | 1   | 3   | 4   | 14 | 1   | 3   | 4   | 14  | 1   | 3  |     |
| 13        |    | 14  |     | 15  |    | 16        |    | 17  |     | 18  |    | 19        |    | 20  |    | 21  |     | 22        |    | 23  |     | 24  |    | 25        |    |     |     |     |    |     |     |     |     |     |    |     |

DÜĞÜM NOKTASI

ELEMAN NO

RÜİTLİK NO

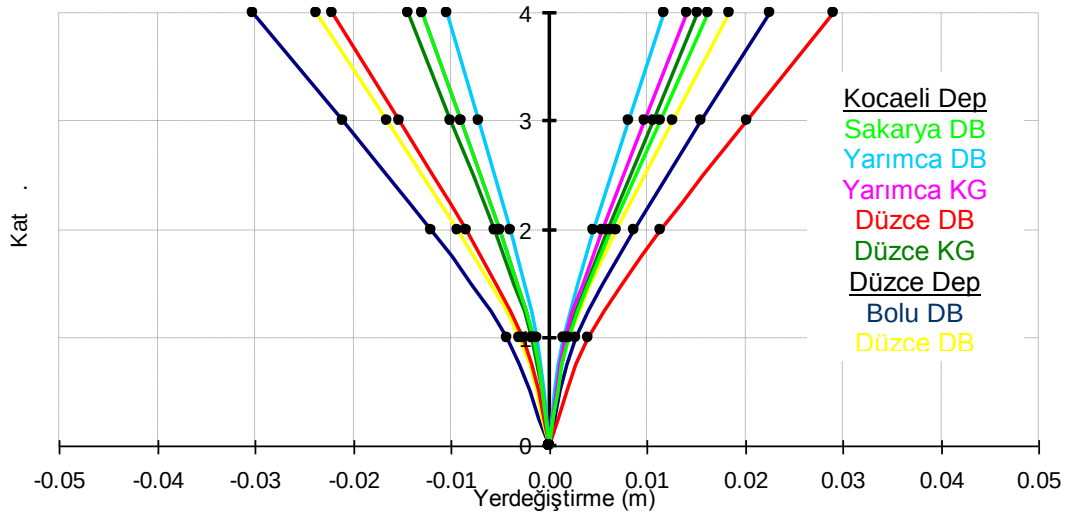
AKMA YÜZEYİ NO

RÜİT UÇ KISIM NO

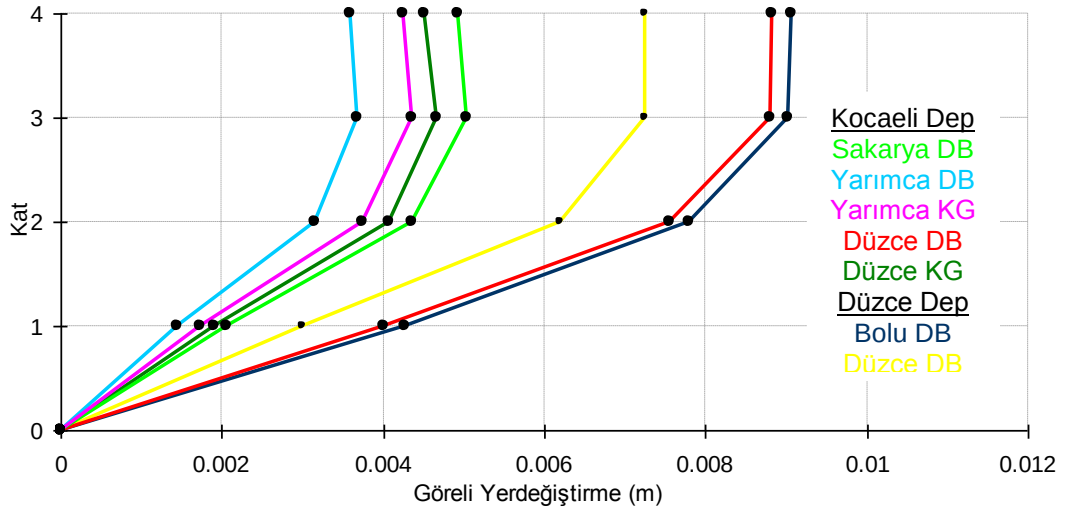
Şekil 4.12 : Güçledirme sonrası duruma ait birleştirilmiş çerçeve

Yapıdaki yerdeğiştirme zarfları Şekil 4.13 de verilmiştir. Bu şekle bakıldığında, en üst kattaki yerdeğiştirmenin en büyük değerinin Düzce depreminin Bolu DB kaydında 3 cm olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer aynı deprem kaydı için güçlendirme öncesi durumda 18 cm olarak oluşmuştur.

Yapıdaki görel kat ötelemeleri Şekil 4.14 de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, güçlendirme sonrası durumda en büyük görel kat ötelemesi, Düzce depreminin Bolu DB kaydında 0.9 cm olarak oluşmuştur. Güçlendirme öncesi durum için hesaplanan maksimum görel kat yerdeğiştirmesi değeri ise 8.3 cm dir. Şekilden ayrıca, görel kat ötelemelerinin, perde-çerçeve sistem davranışına uygun olacak şekilde üst katlarda daha yüksek değerler aldıkları görülmektedir.



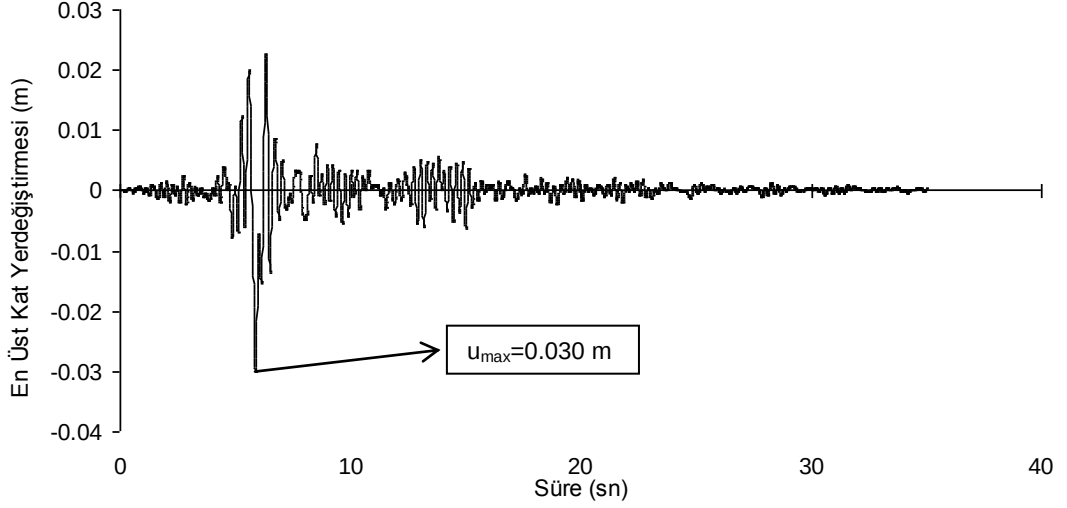
Şekil 4.13 : Güçlendirilmiş duruma ait yerdeğiştirme zarfları



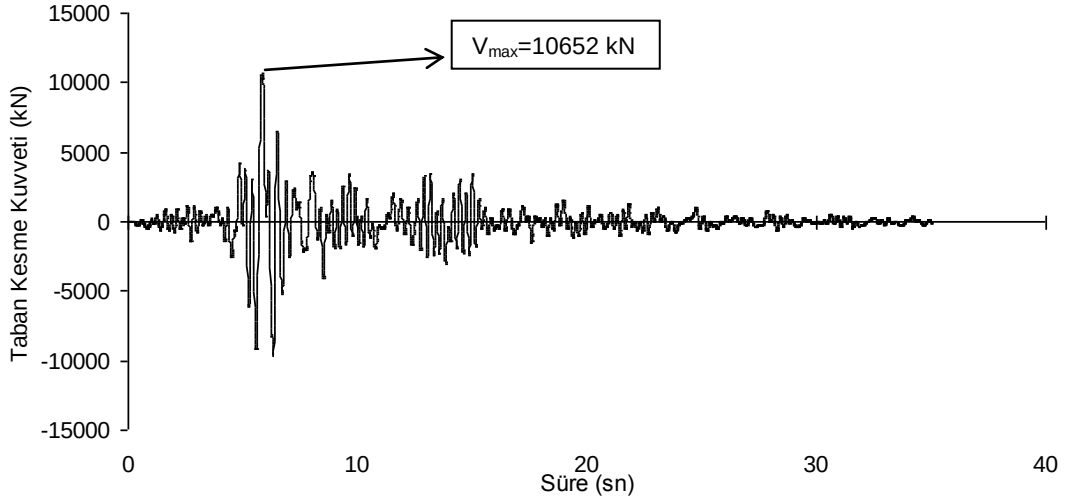
Şekil 4.14 : Güçlendirilmiş duruma ait görel kat ötelemeleri

Güçlendirme sonrası durum içinde, yapıda oluşan en üst kat yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentinin zamanla değişim grafikleri, Düzce

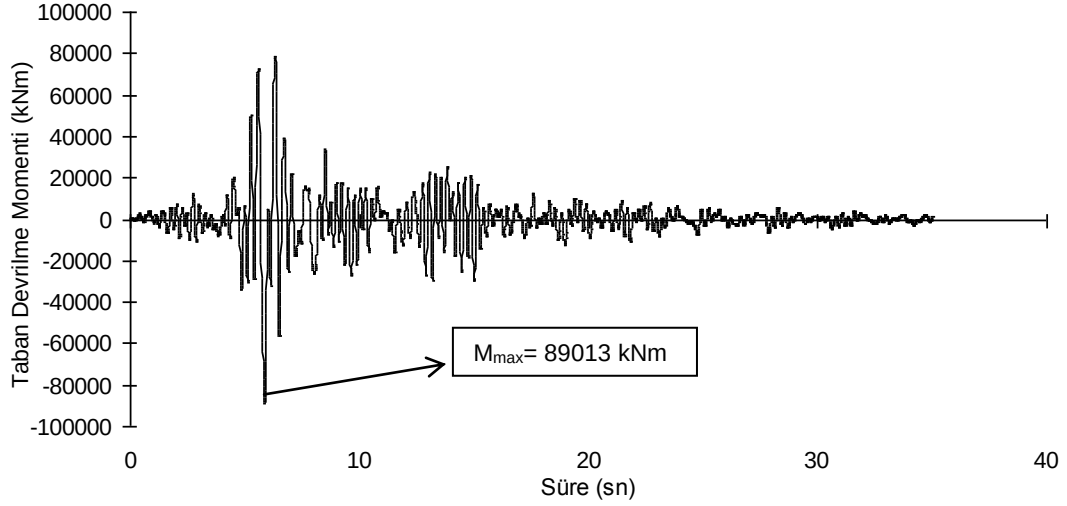
depreminin Bolu DB kaydı için Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17 de verilmiş, tüm deprem kayıtları için ise EK C de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, en üst kat yerdeğiştirmesinin oldukça azaldığı görülmektedir. Yapıda oluşan taban kesme kuvveti ile taban devrilme momentinin ise yapının rijitliği ile orantılı olarak arttığı ortaya çıkmaktadır. Aşağıda değişimleri verilen bu karşılıkların tüm deprem kayıtları için aldıkları en büyük değerler Tablo 4.5 de verilmiştir.



**Şekil 4.15 :** Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapının en üst katında oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



**Şekil 4.16 :** Düzce depremi Bolu DB kaydına göre Yapıdaki taban kesme kuvvetinin değişimi



**Şekil 4.17 :** Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan taban devrilme momentinin değişimi

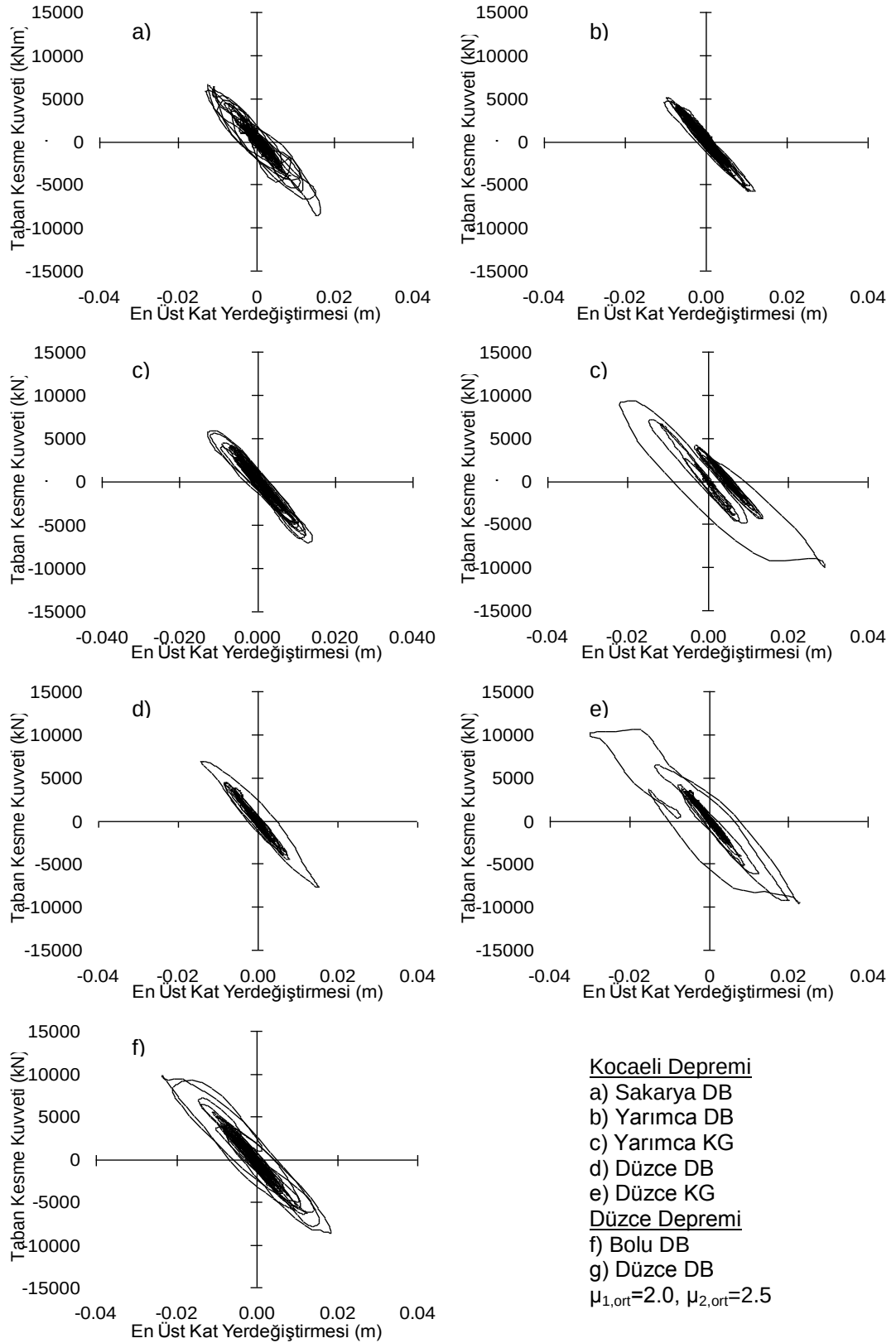
**Tablo 4.5 :** Güçlendirme sonrası yapının en üst kat yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentine ait maksimum değerler

|                                | Kocaeli Depremi |            |            |          |          | Düzce Depremi |          |
|--------------------------------|-----------------|------------|------------|----------|----------|---------------|----------|
|                                | Sakarya DB      | Yarımca DB | Yarımca KG | Düzce DB | Düzce KG | Bolu DB       | Düzce DB |
| En Üst Kat Yerdeğiştirmesi (m) | 0.016           | 0.012      | 0.014      | 0.029    | 0.015    | 0.030         | 0.024    |
| Taban Kesme Kuvveti (kN)       | 8575            | 5735       | 7001       | 10004    | 7721     | 10652         | 9765     |
| Taban Devrilme Momenti (kNm)   | 63942           | 48796      | 55935      | 86819    | 59966    | 89013         | 80040    |

Yukarıda değişimleri verilen bu parametrelerden yola çıkarak, ele alınan tüm deprem kayıtları için yapıdaki en üst kat yerdeğiştirmesi-taban kesme kuvveti değişimini ifade eden grafikler Şekil 4.18 de verilmiştir.

Güçlendirme sonrası duruma ait yerdeğiştirme sünekliği değerleri hesaplanarak güçlendirme öncesi durumdaki süneklik değerleriyle karşılaştırılmak istenmiştir. Bunun için, öncelikle güçlendirme öncesi durumda, Düzce depreminin Düzce DB kaydına ait yerdeğiştirme sünekliği değerleri ile ortalama yerdeğiştirme sünekliği değerleri arasındaki yakınlıktan dolayı, bu kayıt altında oluşan yerdeğiştirme sünekliği değerinin, ele alınan deprem toplumuna göre yapıda oluşan yerdeğiştirme sünekliklerini temsil ettiği düşünülmüştür. Aynı kayda ait güçlendirme sonrası  $\mu_1$  ve  $\mu_2$  yerdeğiştirme sünekliği değerleri ise sırasıyla 1.97 ve 2.37 olarak hesaplanmıştır. Buna göre bu kayıt gözönüne alındığında, güçlendirme öncesi ve sonrası yerdeğiştirme sünekliği değerlerindeki artışın sırasıyla %22 ve %10 seviyelerinde olduğu hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, aynı karşılaştırma eğer güçlendirme

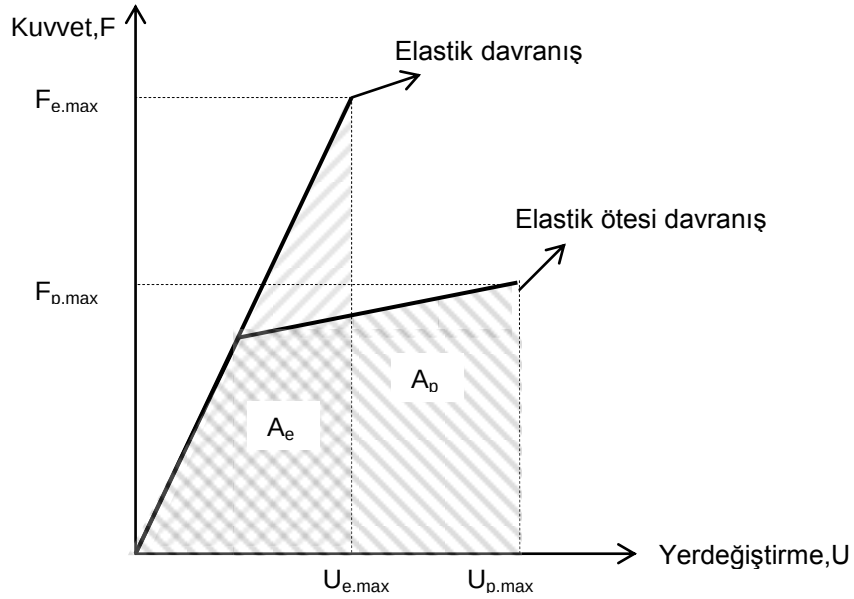




**Şekil 4.18 :** Güçlendirme sonrası duruma ait Kocaeli depreminin a) Sakarya DB, b) Yarımca DB, c) Yarımca KG, d) Düzce DB, e) Düzce KG kayıtları ile Düzce depreminin e) Bolu DB ve f) Düzce DB kayıtlarına ait taban kesme kuvveti-en üst kat yerdeğiştirme değişim grafikleri

öncesi ve sonrasında tüm kayıtlar gözönüne alınarak bulunan ortalama süneklik değerleri arasında yapılacak olursa, güçlendirme sonrasında yapıda sırasıyla 2.0 ve 2.5 olarak oluşan ortalama  $\mu_1$  ve  $\mu_2$  yerdeğiştirme sünekliği değerleri dikkate alınarak hesaplanan artış, sırasıyla %31 ve %25 olarak ortaya çıkmaktadır.

Yapıların deprem yükleri altındaki gerçek davranışını ortaya çıkarmak için doğrusal olmayan davranışın da gözönünde bulundurulması gerekir. Yürürlükte olan deprem yönetmeliğinde, yapının bu davranışını dikkate almak için, doğrusal (elastik) davranışa göre deprem etkisi altında yapıda oluşan karşılıklar, Şekil 4.19 daki gibi ifade edilebilen eşit enerji ilkesine göre doğrusal olmayan (plastik) karşılıklara dönüştürülür. Bu ilkeye göre; yapının doğrusal olmayan davranışı, doğrusal davranışta oluşan enerjiye göre belirlenir. Şekile bakıldığında, elastik kuvvet-yerdeğiştirme doğrusunun altında kalan alan ( $A_e$ ), doğrusal durumda ortaya çıkan enerjiyi ifade eder. Elastik ötesi davranışa ait eğrinin altında kalan alan ( $A_D$ ), elastik ötesi durumdaki alana eşit olacak şekilde eğri sınırlanır ve oluşan en büyük kuvvet ve yerdeğiştirme değerleri elastik ötesi davranışa ait değerler olarak belirlenir. Yapının bu elastik ve elastik ötesi durumlarındaki iç kuvvet değerleri birbirine oranlanarak, deprem yönetmeliğinde tanımlanan, yapının doğrusal olmayan davranışının deprem hesabında dikkate alınmasını sağlayan R katsayısı elde edilmiş olur.



**Şekil 4.19 : Eş enerji ilkesi**

Bu şekilde hesaplanan R değerleri güçlendirme sonrası durum için Tablo 4.6 da verilmiştir. Bu tablodan güçlendirme sonrası için R katsayısı ortalama 2.1 olarak bulunmuştur.

**Tablo 4.6 : Güçlendirme sonrası durumda R katsayıları**

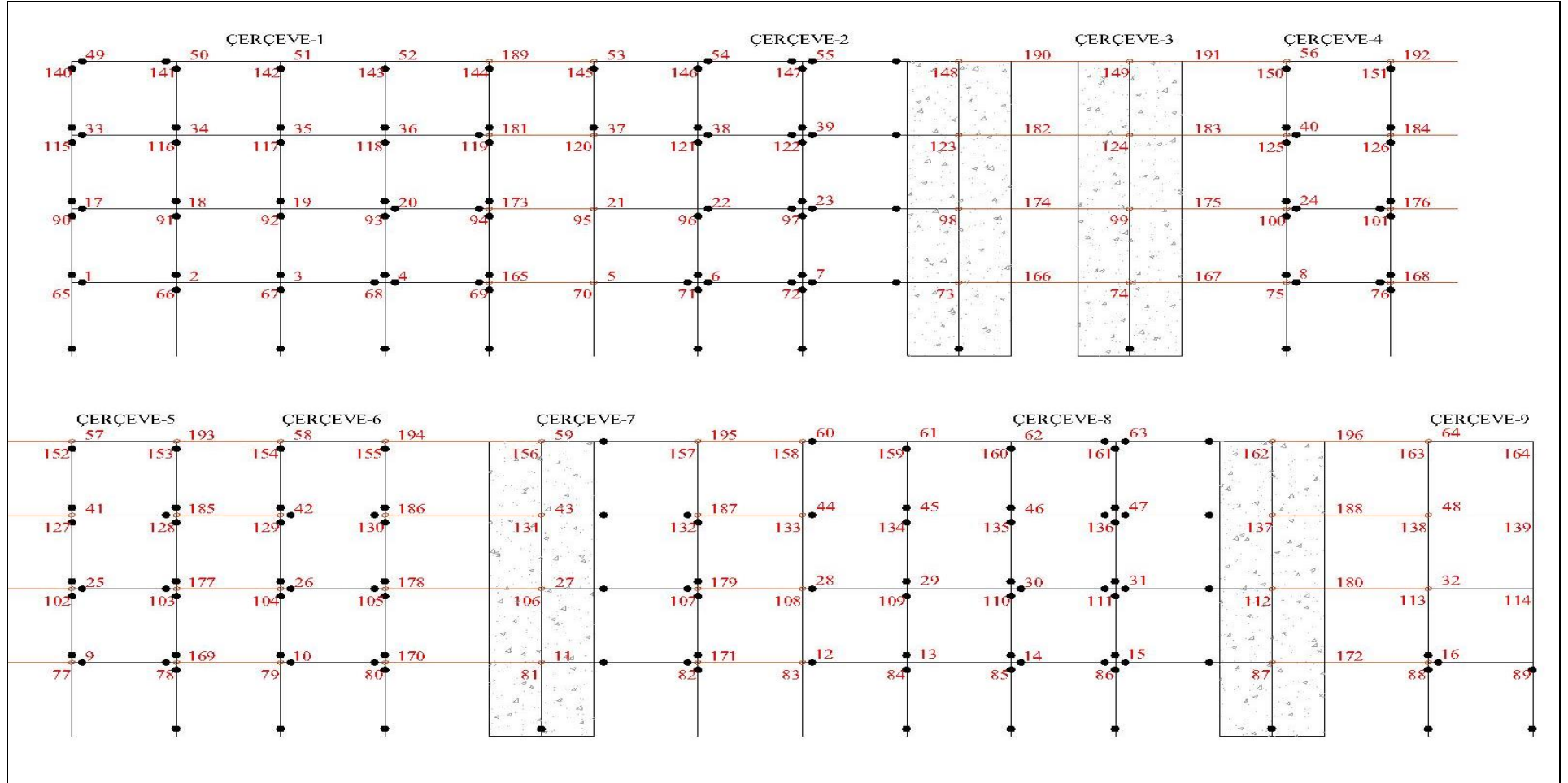
|             | Kocaeli Depremi |            |            |          |          | Düzce Depremi |          |
|-------------|-----------------|------------|------------|----------|----------|---------------|----------|
|             | Sakarya DB      | Yarımca DB | Yarımca KG | Düzce DB | Düzce KG | Bolu DB       | Düzce DB |
| R katsayısı | 2.0             | 3.0        | 2.4        | 1.7      | 2.2      | 1.6           | 1.8      |

Güçlendirme sonrası durum için yapıda oluşan mafsallaşma da Düzce depreminin Bolu DB kaydı için Şekil 4.20 de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, yapıda oluşan mafsallar güçlendirme öncesi duruma göre oldukça azalmıştır.

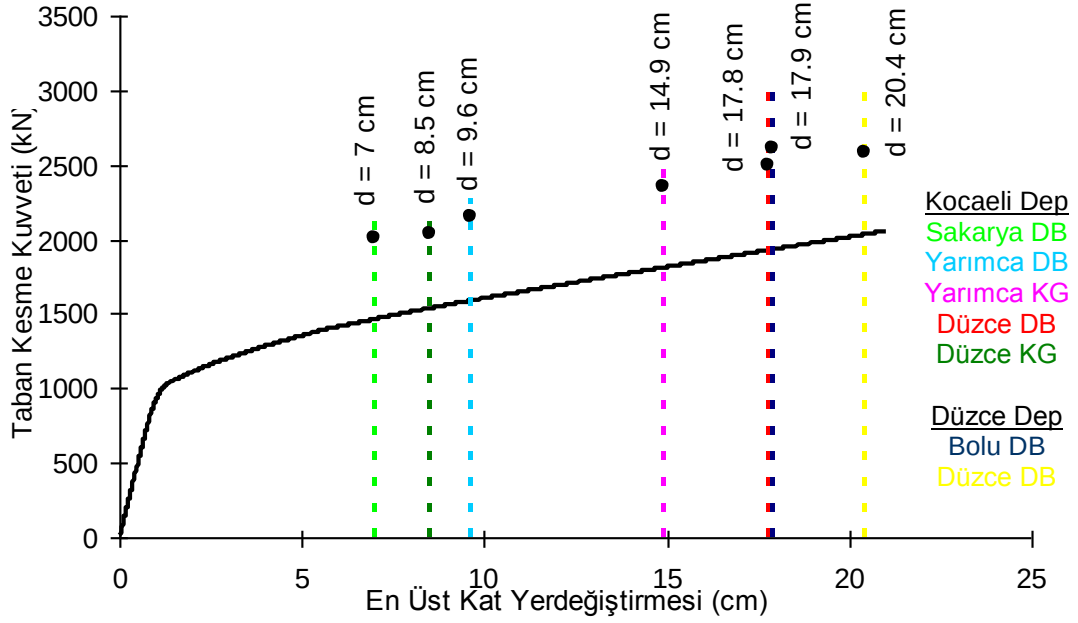
Yapının güçlendirme öncesi ve sonrası gösterdiği performansı ortaya konulduktan sonra, yapının mevcut güçlendirilmiş halinin 2006 da yürürlüğe girecek olan taslak halindeki yeni deprem yönetmeliğine uygunluğu araştırılmak istenmiştir. Bu amaçla, yapının güçlendirme sonrası durumu, yeni deprem yönetmeliğinin mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi ile ilgili hükümlerin belirtildiği 13. bölümünde yer alan depremde bina performansının belirlenmesinde doğrusal olmayan elastik yöntemler kısmında açıklanan artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemine göre incelenmiştir.

Bu yöntemde yapının birinci (deprem doğrultusunda hakim) mod şekli ile orantılı olacak şekilde, deprem istem sınırına kadar monotonik olarak adım adım arttırılan eşdeğer deprem yüklerinin etkisi altında doğrusal olmayan itme analizi yapılmaktadır. Analiz sırasında her bir adımda taşıyıcı sistemde meydana gelen yerdeğiştirme, plastik şekil değiştirme ve iç kuvvet artımları ile bunlara ait birikimli değerler ve son adımda deprem istemine karşı gelen maksimum değerler hesaplanır. Bu şekilde tanımlanan artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemini uygulamak üzere, yapının güçlendirme sonrası durumu için, birinci titreşim modu dikkate alınmak suretiyle DRAIN-2DX programı kullanılarak doğrusal olmayan statik itme (Pushover) analizi gerçekleştirilmiştir. Aynı analiz yapının güçlendirme öncesi durumu için de yapılarak, güçlendirme işleminin taşıyıcı sistem davranışına yaptığı etki ortaya konulmak istenmiştir. Bu amaçla, güçlendirme öncesi durum için yapılan analiz sonucu oluşan kuvvet-yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.21 de görülmektedir.

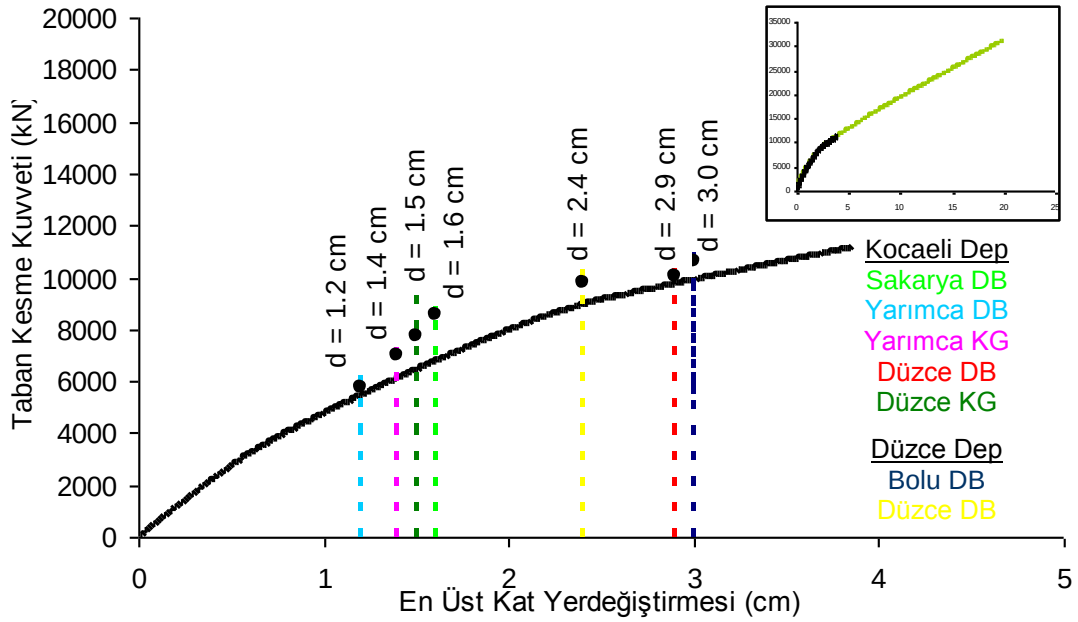
Güçlendirme aşamasında eklenen perdelerin yapıyı rijitleştirmesinden dolayı, etkiyen deprem kuvvetleri altında yapı davranışının elastik sınıra yakın oluşması, bunun sonucu olarak oluşacak yerdeğiştirmelerin azalması beklenir. Nitekim, güçlendirilmiş durum için yapılan doğrusal olmayan statik analiz sonucu Şekil 4.22 deki gibi oluşan kapasite eğrisinden de görüleceği üzere, dinamik analiz sonucu bulunan yerdeğiştirme değerleri kapasite eğrisinin elastik olan bölgesinde yer almaktadır.



Şekil 4.20 : Güçlendirme sonrası durum için Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan plastik mafsallar



**Şekil 4.21 :** Doğrusal olmayan statik analiz sonucu güçlendirme öncesi durum için yapıda oluşan kapasite eğrisi



**Şekil 4.22 :** Doğrusal olmayan statik analiz sonucu güçlendirme sonrası durum için yapıda oluşan kapasite eğrisi

Güçlendirme sonrası durum için bulunan bu kapasite eğrisinin yeni deprem yönetmeliğinde tanımlanan eşdeğer deprem yükü yönteminde kullanılabilmesi için, koordinatları modal yerdeğiştirme ve modal sözde ivme olarak tanımlanan modal kapasite diagramına dönüştürölmesi gerekir. Elde edilecek modal kapasite diagramı ile birlikte, yönetmelikte tanımlanan elastik davranış spektrumu üzerinde, yapı için hedeflenen performans düzeylerine göre yapılacak değişiklikler gözönüne alınarak,

koordinatları spektral ivme ve spektral yerdeğiştirme olarak tanımlanan talep eğrisi belirlenir. Oluşturulan bu diagramlar üzerinde, yönetmelikte tanımlanan hesap adımları gerçekleştirilmek suretiyle modal yerdeğiştirme istemi elde edilir.

Bunun istemin belirlenebilmesi için öncelikle yönetmelikte tanımlanan elastik davranış spektrumunun beklenen hasar durumlarına göre düzenlenmiş hali üzerinde, koordinatları spektral ivme, ( $S_a$ ), ve spektral yerdeğiştirme, ( $S_d$ ), olacak şekilde bir koordinat düzenlemesi yapılması gerekir. Bu düzenlemede, yerdeğiştirme spektrumu değeri, yönetmelikte  $S_a$  olarak ifade edilen ivme spektrumundan yola çıkılarak:

$$S_d = \frac{1}{4\pi^2} S_a T^2 \quad (4.1)$$

şeklinde belirlenmek suretiyle elastik talep spektrumu elde edilmiş olur. Doğrusal olmayan analiz sonucunda bulunan kapasite eğrisinin oluşturulan bu talep spektrumu ile karşılaştırılabilmesi için, koordinatları modal yerdeğiştirme, ( $d$ ), ve modal ivme, ( $a$ ), olarak tanımlanan kapasite spektrumuna dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüştürme işlemi de:

$$a_1^{(i)} = \frac{V_{x1}^{(i)}}{M_{x1}} \quad (4.2)$$

$$d_1^{(i)} = \frac{u_{xN1}^{(i)}}{\phi_{xN1} \Gamma_{x1}} \quad (4.3)$$

şeklinde yapılır. Burada:

$a_1^{(i)}$  : i. İtme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait modal sözde ivme.

$V_{x1}^{(i)}$  : x deprem doğrultusunda (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait taban kesme kuvveti.

$M_{x1}$  : x deprem doğrultusunda doğrusal elastik davranış için tanımlanan birinci (hakim) moda ait etkin kütle.

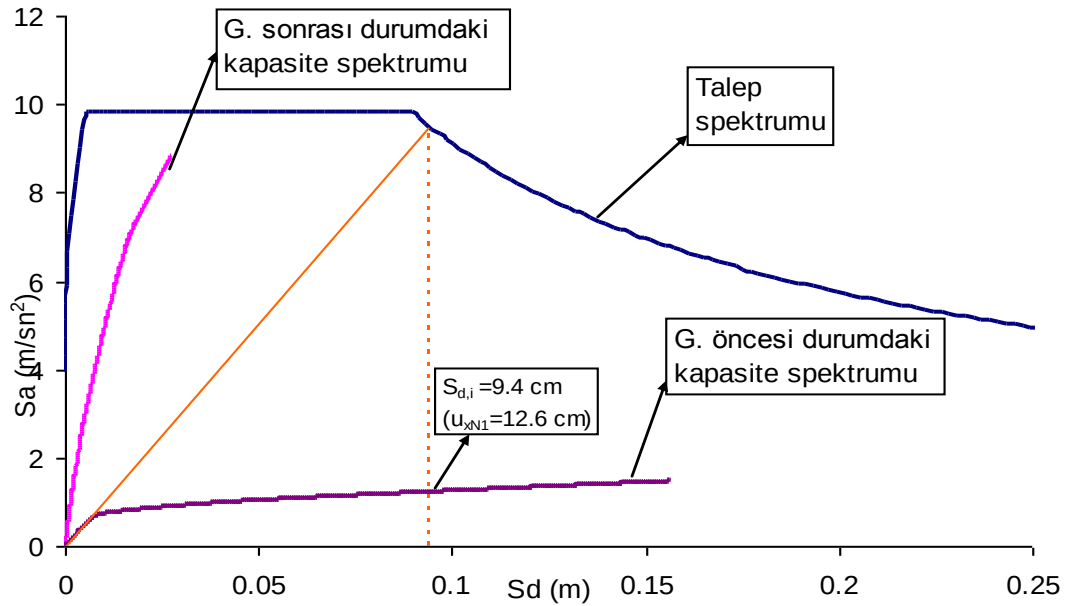
$d_1^{(i)}$  : (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait modal sözde ivme.

$u_{xN1}^{(i)}$  : Binanın tepesinde (N'inci katında) x deprem doğrultusunda (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait yerdeğiştirme.

$\phi_{xN1}$  : Binanın tepesinde (N'inci katında) x deprem doğrultusunda birinci moda ait mod şekli genliği.

$\Gamma_{x1}$  : x deprem doğrultusunda birinci moda ait katkı çarpanıdır. Talep ve kapasite spektrumları bu şekilde elde edildikten sonra aynı grafik üzerinde ifade edilerek yapının yerdeğiştirme istemi belirlenir.

Çalışmada incelenen konut türü binanın güçlendirme öncesi ve sonrası durumları için yerdeğiştirme istemi belirlenmek istenmiştir. Bunun için öncelikle binanın konut tipi bir yapı olduğu, birinci derece deprem bölgesinde ve Z3 türü zemin üzerinde inşa edildiği gözönüne alınarak oluşturulan elastik tasarım spektrumu, taslak halindeki yönetmelikte tanımlanan performans düzeylerinden can güvenliği durumuna göre yeniden ölçeklenmiş ve buna göre düzenlenmiştir. Binanın güçlendirme öncesi ve sonrası durumları için yapılan itme analizi sonucunda elde edilen değerler, yukarıdaki formüllerde yerine konularak kapasite spektrumları oluşturulmuş, bu kapasite spektrumları ile talep spektrumu Şekil 4.23 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.23 :** Güçlendirme öncesi ve sonrası durumlara ait kapasite spektrumu ve talep spektrumu ilişkisi

Güçlendirme öncesi durum için, yapıdaki titreşim periyodu (0.624 sn) Z3 türü zemin için tanımlanan  $T_B$  hakim zemin periyodundan ( $T_B=0.6$  sn) büyüktür. Buna göre, elastik olmayan yerdeğiştirme değeri, yönetmelikte bu durum için belirtilen eşit yerdeğiştirme kuralına göre, elastik durumdaki yerdeğiştirmeye eşit olacak şekilde modal yerdeğiştirme cinsinden 9.4 cm olarak bulunmuştur. Yapının en üst katındaki maksimum yerdeğiştirme değeri ise, bulunan bu modal yerdeğiştirme değerinin (4.3) denkleminde yerine konulmasıyla 12.6 cm olarak belirlenmiştir. Beklendiği gibi, bulunan bu yerdeğiştirme değeri yapının güçlendirme öncesi durumu için çalışmada kullanılan deprem kayıtları etkisinde hesaplanan yerdeğiştirme değerleriyle uyumlu olup, yapıda oluşan orta derecedeki hasar durumunu ve bu durumu ortaya koymak

için gerçekleştirilen doğrusal olmayan dinamik analiz sonucunda belirlenen karşılıkları ve mafsallaşma oluşumunu destekleyen diğer bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır.



## 5. SONUÇLAR

Çalışmada 1999 Kocaeli depreminde orta derecede hasar görmüş ve sonradan güçlendirilmiş dört katlı betonarme bir yapının güçlendirme öncesi ve sonrası durumlarına ait doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları incelenmiştir.

Doğrusal olmayan dinamik analizde kullanılmak üzere 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerine ait, yıkıcı özellikli, yumuşak ve nispeten sert zeminlerde alınmış, içlerinde darbe tipi depremleri de temsil eden 7 farklı kayıt ile bir deprem toplumu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu deprem toplumuna ait kayıtlardan bazılarının oldukça uzun süreli olduğu, dolayısıyla da oldukça fazla sayıda ivme kaydı içerdiği ve bunun sonucu olarak, bu kuvvetli hareketlerin kullanılmasıyla yapılacak analiz sonucu ortaya çıkacak olan sonuç verisinin fazlalığının veriler üzerinde gerçekleştirilecek işlemleri zorlaştıracığı düşünülerek, kayıtlar güçlü yer hareketinin olduğu bölgeleri içerecek şekilde kısaltılmıştır. Bu kısaltma işleminin kayıtların karakteristiklerini değiştirmediklerini göstermek ve kayıtların hangi tip depremleri temsil ettiğini ortaya koymak için mühendislik şiddetleri hesaplanmıştır. Efektif ivme ( $a_{eff}$ ), efektif süre ( $t_{eff}$ ), Housner şiddeti ( $SI_{0.2}$ ),  $I_{RS}$ ,  $I_{RMS}$ , ve deprem hücum gücü ( $I_{EAP}$ ) olarak adlandırılan bu mühendislik şiddetlerinin, kayıtların kısaltılmış ve kısaltılmamış durumları için önemli ölçüde bir değişiklik göstermedikleri görülmüştür. Öyle ki, kayıtlarda efektif ivme bakımından herhangi bir değişiklik görülmemiş, Housner şiddeti ve  $I_{RMS}$  bakımından ise bazı kayıtlarda değişim olmazken, en büyük değişimin görüldüğü Yarımcı KG kaydında bu değişimin %14 mertebesinde kaldığı belirlenmiştir. Oldukça yıkıcı olan 13 Mart 1992 Erzincan depreminde hesaplanan  $SI_{0.2}$  değerinin 201.4 cm olduğu gözönünde bulundurulduğunda, bu çalışmada kullanılan özellikle Düzce depremi kayıtlarının Erzincan depremi kadar olmasa da 160 cm lere varan Housner şiddeti ile oldukça yıkıcı oldukları söylenebilir (**Ülker ve diğ., 1998**). Kocaeli depremi kayıtlarının ise, mühendislik şiddetlerinin genel olarak yüksek mertebelerde olmalarının yanı sıra, efektif sürelerinin 30 sn ve üzerinde olması da depremin yıkıcılığı hakkında önemli bir göstergedir. Kayıtlara ait etkin ivme ve etkin süre değerleri karşılaştırıldığında, darbe tipi ve yıkıcı tip depremler birbirinden kolaylıkla ayrılabilir. Düzce depremine ait özellikle Bolu kaydı, yüksek etkin ivme değerine rağmen düşük etkin süre değerine sahiptir. Bu da, darbe tipi depremi temsil edecek şekilde kuvvetli

hareketin kısa bir zaman aralığında gerçekleştiğini göstermektedir. Diğer kayıtlarda ise kuvvetli hareket daha geniş zaman aralıklarına yayılmıştır.

Deprem kayıtlarına göre % 5 sönümlü sistemler için tasarım spektrumları oluşturulmuştur. Bu spektumlara bakılarak kayıtların alındığı bölgedeki zemin şartları hakkında da bir öngörüye ulaşılabilir. Buna göre, çalışmada kullanılan Kocaeli depremi kayıtlarının hemen hemen hepsinde yüksek periyot değerlerinde de yumuşak zemin durumunu gösteren pik oluşumu gözlenmektedir. Tasarım spektrumlarından ayrıca, Kocaeli depremi kayıtları için yükseltgenme değerlerinin 98 Deprem Yönetmeliğinde tasarım spektrumu için verilen 2.5 değerini aşarak ortalama 3.4 değerine ulaştığı görülmektedir. Düzce depreminde ise yükseltgenme değeri ortalama 2.3 olmakla birlikte 2.5 sınır değerinin altında kalmaktadır. Bu durumda, Kocaeli depreminin yönetmelikte verilen sınırları aşacak şekilde oldukça yıkıcı bir deprem olduğu anlaşılmaktadır. Belirgin düzeyde yüksek ivme değerlerinin (805 mG) gözlenmiş olduğu Düzce depreminde ise her ne kadar yönetmelikteki sınırlar içerisinde kalan kayıtlar kullanılmış olsa da, diğer kayıtlar içinde benzer araştırmanın yapılması son derece önemlidir.

Tersinir yükler etkisinde betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarını temsil etmek üzere, çeşitli araştırmacılar tarafından farklı yapısal karakteristikler dikkate alınmak suretiyle değişik histeretik ilişkiler geliştirilmiştir. Bu çalışmada ise, yapının tekrarlı yükler altındaki doğrusal olmayan bu davranışının çift doğrulu (bilinear) histeretik modele uyduğu kabul edilmiş, yapıdaki kolon ve kirişler ile güçlendirme sonrasında yapıya eklenen perdeler bu davranış dikkate alınarak modellenmişlerdir. Analizde P-Δ etkisi ve eksenel kuvvet-moment etkileşimi ihmal edilmiştir.

Çalışmada, taşıyıcı sistemi betonarme çerçevelerden oluşan, Yalova ilindeki dört katlı gerçek bir konut binası güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki doğrultuda ayrı ayrı olmak kaydıyla dörder adet betonarme perdenin eklenmesi suretiyle güçlendirilen binanın serbest titreşimine ait hakim periyodunun beklendiği gibi azaldığı belirlenmiştir. Güçlendirme öncesi durumda yapının ilk iki titreşim periyodu sırasıyla  $T_1 = 0.624$  sn ve  $T_2 = 0.226$  sn iken, güçlendirme sonrasında aynı değerler  $T_1 = 0.260$  sn ve  $T_2 = 0.062$  sn ye düşmektedir. Benzer şekilde görelî kat ötelenmelerinin maksimum değerlerinin, güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için sırasıyla 0.083 m ve 0.009 m değerlerinde oluştukları tespit edilmiştir. Güçlendirme sonrası durum için oluşan bu 0.009 m değerinin, görelî kat ötelemeleri için 1998 tarihli Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik esaslarıncı tanımlanan:

$$\Delta_i / h_i \leq \min (0.0035 ; 0.02 / R)$$

görelî kat ötelemesi sınırının içinde kaldığı görülmektedir. Güçlendirme öncesi durumda görelî yerdeğiştirmeler çerçeveselî sistem davranışına uyacak şekilde alt katlarda daha yüksek olup, ayrıca rijitliğin değişmekte olduğu ikinci ve üçüncü katlar arasında da beklendiği gibi yüksek çıkmıştır. Güçlendirme sonrasında ise perde-çerçeve davranışına uygun olarak üst katlarda daha yüksek görelî kat ötelenmesi değerleri oluşmaktadır.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında orta hasar görmüş olan bu yapının, güçlendirme öncesi durumuna ait yerdeğiştirme sünekliği üç farklı yaklaşım gözönünde bulundurulmak suretiyle, kullanılan deprem toplumu etkisinde irdelenmiştir. Yapılan kabullere göre ilk kolon elemanda akmanın oluştuğu zamana karşı gelen en üst kat yerdeğiştirmesi yapı için akma yerdeğiştirmesi olarak belirlenmiştir. Birinci kabule göre, herhangi bir katın içerisindeki kolonların %50 sinin üst yada alt uçlarında akmanın gözlendiği an, göçme durumuna geçişi temsil etmekte olup, o zamana karşı gelen en üst kat yerdeğiştirme değeri de maksimum yerdeğiştirme değeri olarak kabul edilmiştir. Bu iki değerin birbirine oranı ise yapının  $\mu_1$  yerdeğiştirme sünekliğini vermektedir. Bu şekilde yapılan kabul sonucunda, çalışmada kullanılan deprem toplumu etkisinde bina için yerdeğiştirme sünekliği değerlerinin 1.25~1.93 arasında değişmekte olduğu, ortalama 1.5 civarında oldukça düşük bir seviyede kaldığı anlaşılmaktadır. İkinci yaklaşımda, herhangi bir kattaki kolonların %50 sinin hem üst hem de alt düğüm noktalarında plastik mafsall oluşma anına karşı gelen en üst kat yerdeğiştirme değeri, yapı için maksimum yerdeğiştirme değeri olarak kabul edilmiştir. Buna göre hesaplanan  $\mu_2$  yerdeğiştirme sünekliği değeri 1.66~2.24 arasında değişip ortalama 2.0 olarak belirlenmiştir. Yerel göçme durumunun gözönünde bulundurulduğu üçüncü yaklaşımda ise, yapıda yatay yükler altında çerçeve davranış gösteren eksenlerden herhangi birinin herhangi bir katındaki kolonların %50 sinin hem üst hem de alt düğüm noktalarında plastik mafsall oluşma anına karşı gelen en üst kat yerdeğiştirmesi, göçme anındaki yerdeğiştirme olarak kabul edilmiştir. Bu durumda oluşan  $\mu_3$  yerdeğiştirme sünekliği değerleri 1.07~1.79 arasında değişerek ortalama 1.60 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de anlaşıldığı üzere, mevcut taşıyıcı sistem elemanları ile yapının sünek bir davranış gösteremediği açık olup, bu durum yapının Kocaeli depremi sırasında orta hasar görmüş olmasının da bir sebebi olarak söylenebilir.

Güçlendirme sonrasında, şiddetli depremlerden oluşan toplum etkisinde yapıda plastik mafsall oluşumları gözlenmiş olmakla birlikte, bunların sayısının oldukça azaldığı ve akma sınırının ötesindeki davranışın sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, yapının yerdeğiştirme sünekliğinin de artmasına sebep olmuş, örneğin Düzce depremi Düzce DB kaydı etkisinde bu değer  $\mu_1$  ve  $\mu_2$  yerdeğiştirme süneklikleri için sırasıyla %22 ve %10 artmıştır. Ortalama süneklik değerlerindeki

artış ise sırasıyla % 31 ve % 25 tir. Taban kesme kuvveti-en üst kat yerdeğiştirmesi ilişkileri incelendiğinde, çevrimsel davranışta çoğunlukla elastik bölgede kalınmış olması da güçlendirme işleminin başarılı olduğu sonucunu doğurmuştur.

Deprem yönetmeliğinde tanımlanan, yapının doğrusal olmayan davranışını gözönünde bulundurmak için deprem yüklerinin azaltılmasını sağlayan taşıyıcı sistem davranış katsayısı R, güçlendirme sonrası durum için yapıda elastik davranış durumunda oluşacak olan taban kesme kuvvetinin hesaplanarak doğrusal olmayan durumda oluşan taban kesme kuvvetine oranlanması suretiyle 1.6~3.0 arasında değişerek ortalama 2.1 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, yapıda gözlemlenen plastik mafsalların oluşum sayısı ve yerleri, yapıda bazı elemanlarda akma olduğunu ancak göçme sınırına kadar yapının zorlanmadığını göstermektedir. Dolayısıyla R katsayısının hesaplanmasında kullanılan maksimum taban kesme kuvveti mevcut yükleme durumundaki maksimumu yansıtmaktadır.

Yapının güçlendirme öncesi ve sonrası durumu 2006 yılında yürürlüğe girecek olan yeni deprem yönetmeliğine göre araştırılmıştır. Bu araştırma, yönetmelikte açıklanan doğrusal olmayan artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için, binanın birinci titreşim modunu dikkate almak suretiyle DRAIN-2DX programı kullanılarak doğrusal olmayan statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu güçlendirme öncesi durum için şekil 4.21 de oluşan kapasite eğrisi üzerinde dinamik analizde bulunan taban kesme kuvvetleri ve en üst kat yerdeğiştirmeleri gösterilmiştir. şekilden de anlaşılacağı üzere, güçlendirme öncesi durumda ele alınan kayıtlardan dolayı oluşan karşılıklar, yapının kapasite eğrisi ile belirlenen performans sınırının üzerinde gerçekteşmektedir. Yapının güçlendirme öncesinde orta derecede hasar görmüş olduğu düşünöldüğünde, böyle bir sonucun ortaya çıkmış olması beklenen bir durumdur.

Güçlendirme sonrası durumda şekil 4.22 deki gibi oluşan kapasite diagramına bakıldığında ise, dinamik analiz sonucu her deprem kaydı için bulunan kesme kuvveti ve yerdeğiştirme değerlerinin yapının güçlendirme sonrası durumuna ait kapasite eğrisine oldukça yakın olmakla birlikte eğrinin çok az üstünde oluştuğu görölmektedir. Nitekim, güçlendirilmiş durum için yapılan dinamik analiz sonucunda ortaya çıkan mafsall oluşumları kapasitenin üzerinde gerçekteşen bu karşılıkları açıklamaktadır. Bununla birlikte, şeklin sağ üst köşesindeki grafikten, dinamik analiz sonucu bulunan en büyük kat yerdeğiştirmesi sınırına göre çizilen grafiğin, güçlendirme sonrası durum için çizilecek itme eğrisinin elastik kısmında kaldığı söylenebilir.

Yapının güçlendirme öncesi ve sonrası performans durumları taslak halindeki yeni deprem yönetmeliğindeki esaslara göre incelenmiştir. Bunun için yönetmeliğe göre oluşturulan elastik davranış spektrumu ile itme analizi sonucu bulunan kapasite eğrisi, yönetmelikte belirtildiği şekilde talep ve kapasite spektrumlarına dönüştürülmüştür. Oluşturulan talep spektrumu ile güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için çizilen kapasite spektrumları Şekil 4.23 de gösterilmiştir. Güçlendirme öncesi durum için elastik olmayan modal yerdeğiştirme istemi, eşit yerdeğiştirme kuralına göre 9.4 cm olarak bulunmuş, bu değere karşılık gelen en üst kat yerdeğiştirme değeri ise 12,6 cm olarak hesaplanmıştır. Bu yerdeğiştirme değeri, güçlendirme öncesi durum için yapılan doğrusal olmayan dinamik analiz sonucu bulunan, en düşük 7 cm, en yüksek ise 20.4 cm olmakla birlikte ortalama olarak 13.7 cm olarak belirlenen en üst kat yerdeğiştirme değeriyle karşılaştırıldığında, yönetmelikte verilen yaklaşımın oldukça başarılı olduğu söylenebilir.

Güçlendirme sonrası durumda ise, yapının kapasitesi beklendiği gibi artmış, bu durum kapasite spektrumuna da yansımıştır. Çizilen kapasite spektrumundan, elastik ötesi davranışın oldukça limitli bir miktarda gerçekleştiği görülmektedir.

## KAYNAKLAR

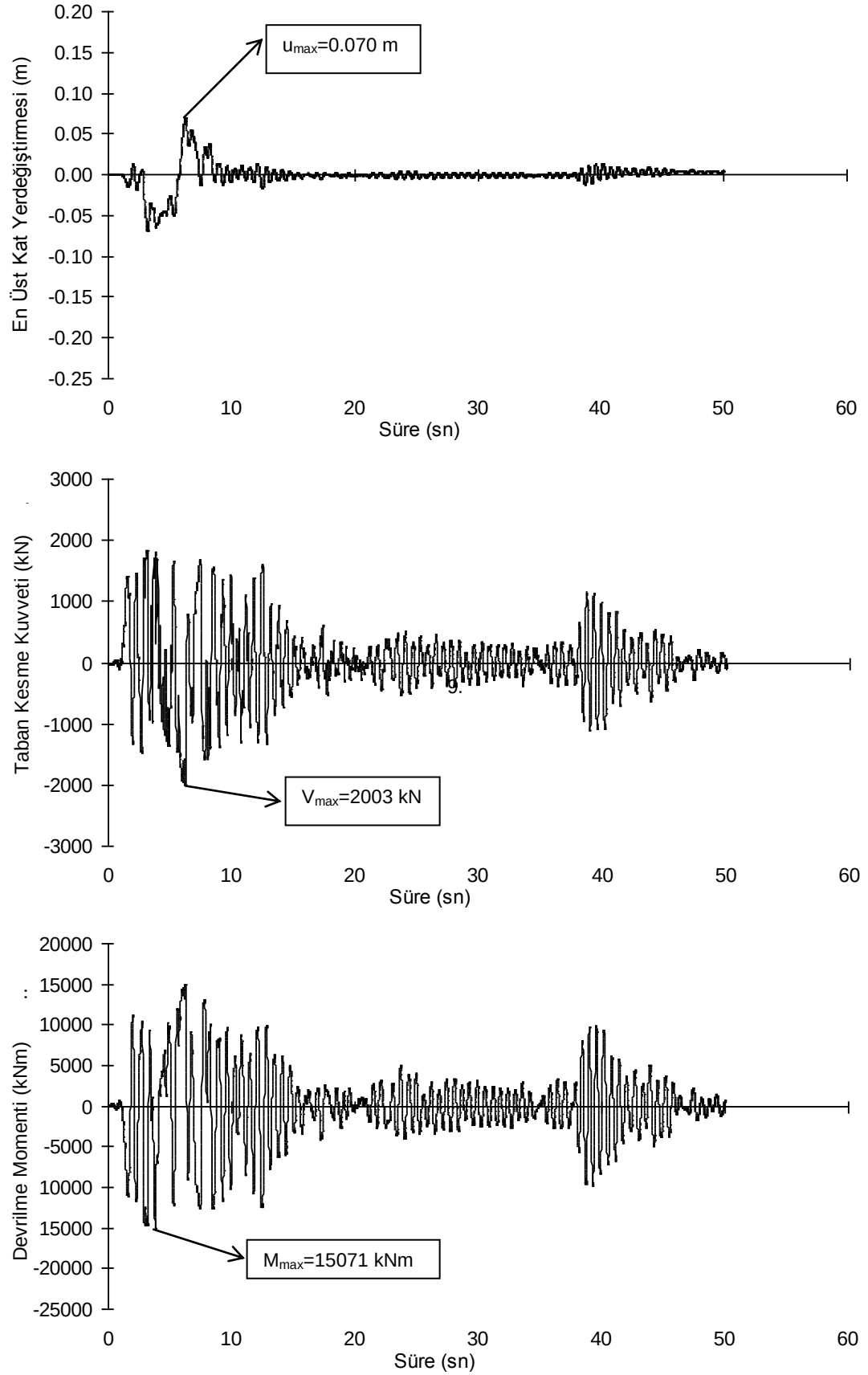
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik**, 1998. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-Taslak 2**, 2005. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Hasgür, Z. and Taşkın, B.**, 2000. A site investigation of Kocaeli earthquake of August 17, 1999, *Turkish Earthquake Foundation Earthquake Report*, **TDV/DR 08-49**, İstanbul, Turkey.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., and Tuncay, E.**, 2000. Site investigation and engineering evaluation of Düzce-Bolu earthquake of November 12, 1999, *Turkish Earthquake Foundation Earthquake Report*, **TDV/DR 09-51**, İstanbul, Turkey.
- Bolt, B. A.**, 1989. The Nature of Earthquake Ground Motion, in *The Seismic Design Handbook-Vol:1*, pp. 1-31, Ed. Naeim, F., Van Nostrand Reinhold, New York.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2001. Yapı Dinamiği, Rehber Matbaacılık, İstanbul.
- Cheng, Franklin Y.**, 2001. Matrix Analysis of Structural Dynamics: Applications and Earthquake Engineering, Marcel Dekker, New York.
- Chopra, Anil K.**, 2001. Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering, Englewood Cliffs, NJ.
- Demirtaş, R., Erkmen, C. ve Yaman, M.**, 1999. 12 Kasım 1999 Düzce depremi: Yüzey kırık geometrisi, atım miktarı dağılımı ve gelecek deprem potansiyeli, *Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Sismoloji Şubesi Deprem Raporu*, **002**, Ankara.
- Hasgür, Z. ve Taşkın, B.**, 2002. Güçlendirme öncesi ve sonrası hasar indislerinin betonarme perdeli-çerçeve yapılarında tayini, *Prof.Dr. Kemal Özden'i Anma Semineri*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 30 Mayıs, s. 155-176.
- Hasgür, Z.**, 1991. Türkiye’de gözlenmiş deprem şiddetlerinin yapı mühendisliği açısından incelenmesi, *İMO Teknik Dergi*, Temmuz sayısı, 319-333.
- Lee, D., Song, J. K. and Yun, C. B.**, 1997. Estimation of system-level ductility demands for multi-story structures, *Engineering Structures*, **19**(12), 1025-1035.
- Marano, G. C. and Greco, R.**, 2003. Degrading structural systems under seismic actions: A stochastic analysis, *Proceedings of the FIB Symposium on Concrete Structures in Seismic Zones*, Athens, Greece, May 6-8.

- Powell, G. H.**, 1993. DRAIN-2DX Element description and user guide for element type 01, type 04, type 06, type 09 and type 15, SEMM Report, **UCB/SEMM-93/18**, University of California-Berkeley, CA.
- Prakash, V., Powell G. H. and Campbell S.**, 1993. DRAIN-2DX base program description and user guide, SEMM Report, **UCB/SEMM-93/17**, University of California-Berkeley, CA.
- Saiidi, M.**, 1982. Hysteresis models for reinforced concrete, *Journal of the Structural Division*, **108**, 1077-1087.
- Taşkın, B.**, 2001. Sismik titreşimler altında betonarme perde ve çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan stokastik analizi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taymaz, T.**, 1999. Seismotectonics of the Marmara Region: Source Characteristics of 1999 Gölcük-Sapanca-Düzce Earthquakes. *Proceedings of ITU-IAHS, International Conference On The Kocaeli Earthquake 17 August 1999*, Istanbul, Turkey, 2-5 December, 55-78.
- Taymaz, T., Tan, O. ve Yolsal, S.**, 2003. Türkiye'nin Levha Tektoniği. *TÜBİTAK Bilim ve Teknik*, **432**, s. 64.
- Ülker, R., Celep, Z., Hasgür, Z., Eyidoğan, H., Erken, A. ve Kaypak, B.**, 1998. 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan depremi hakkında İTÜ öngörüş raporu, *İTÜ Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi raporu*, **98/295**, İstanbul

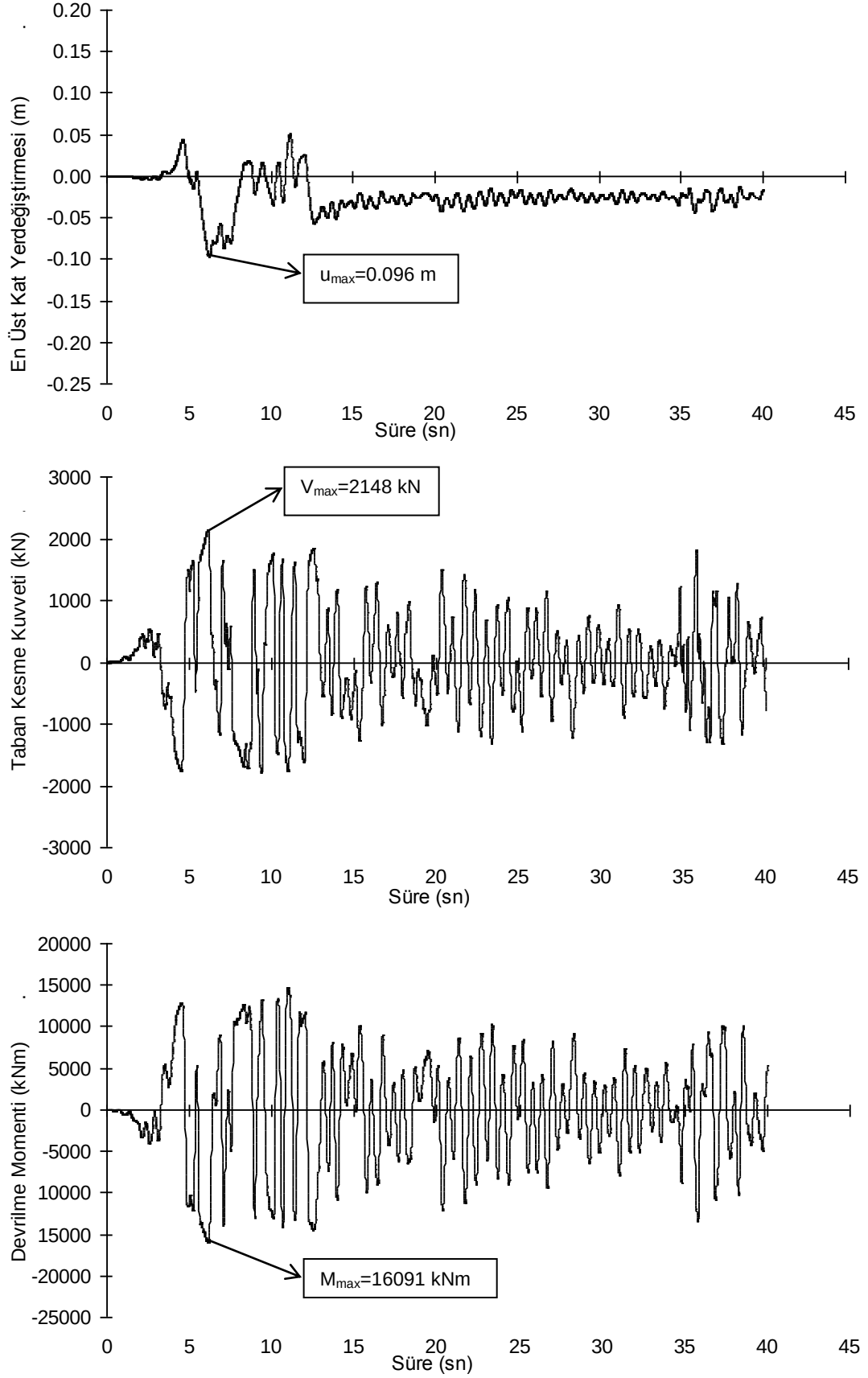
**EK-A**

**GÜÇLENDİRME ÖNCESİ DURUMDA YAPIDA OLUŞAN  
KARŞILIKLARIN DEĞİŞİM GRAFİKLERİ**

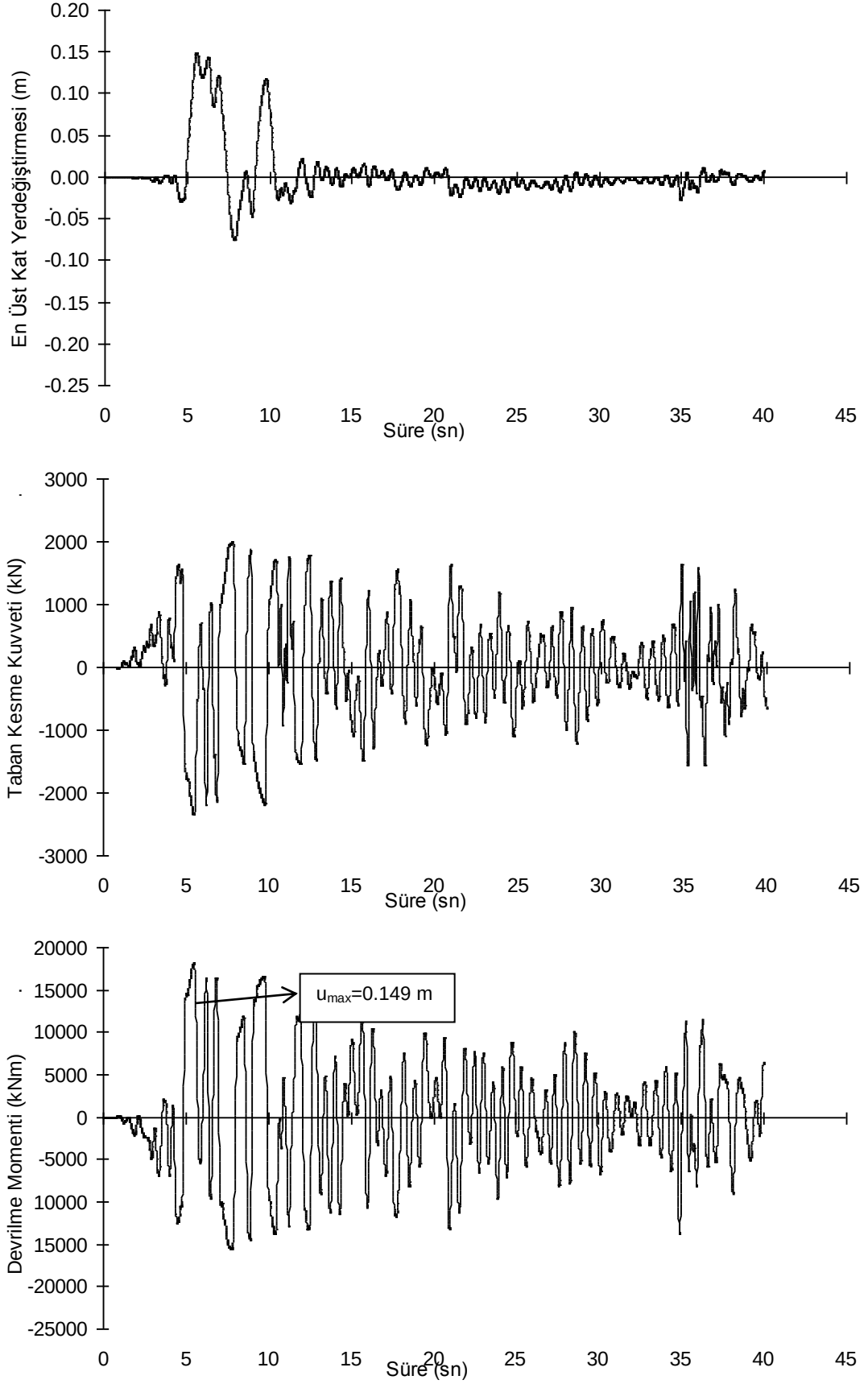




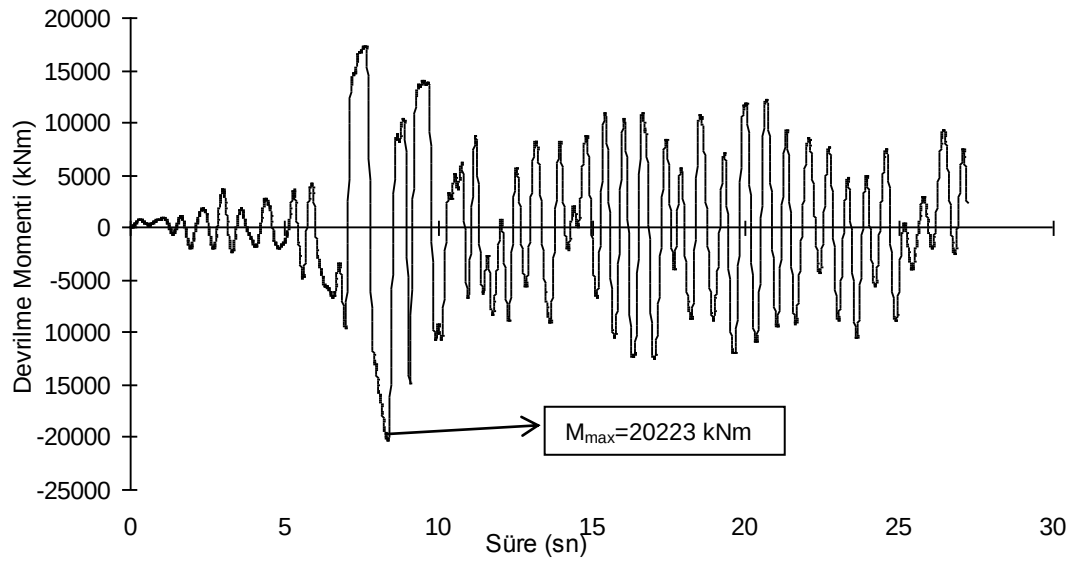
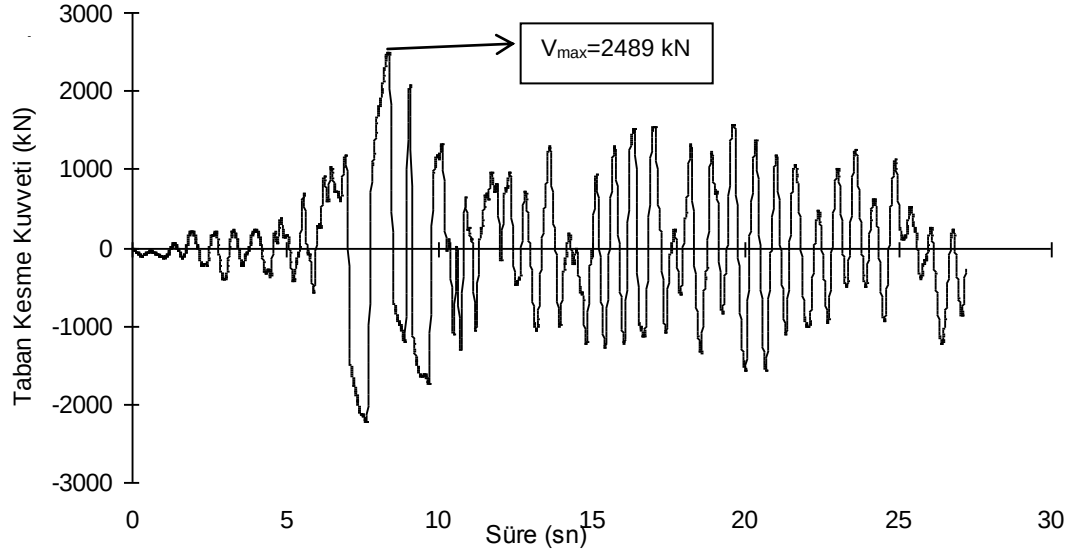
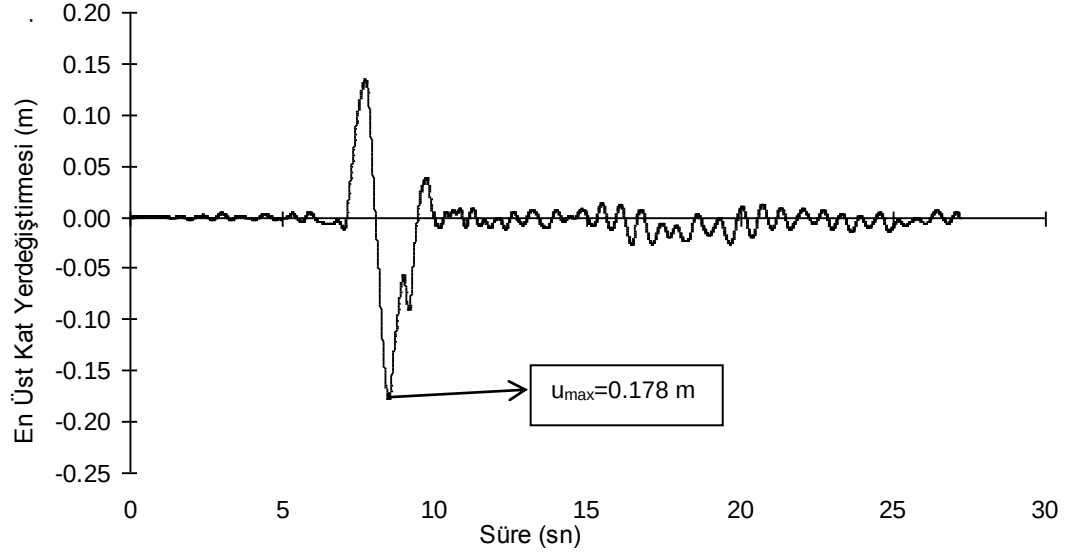
**Şekil A.1 :** Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



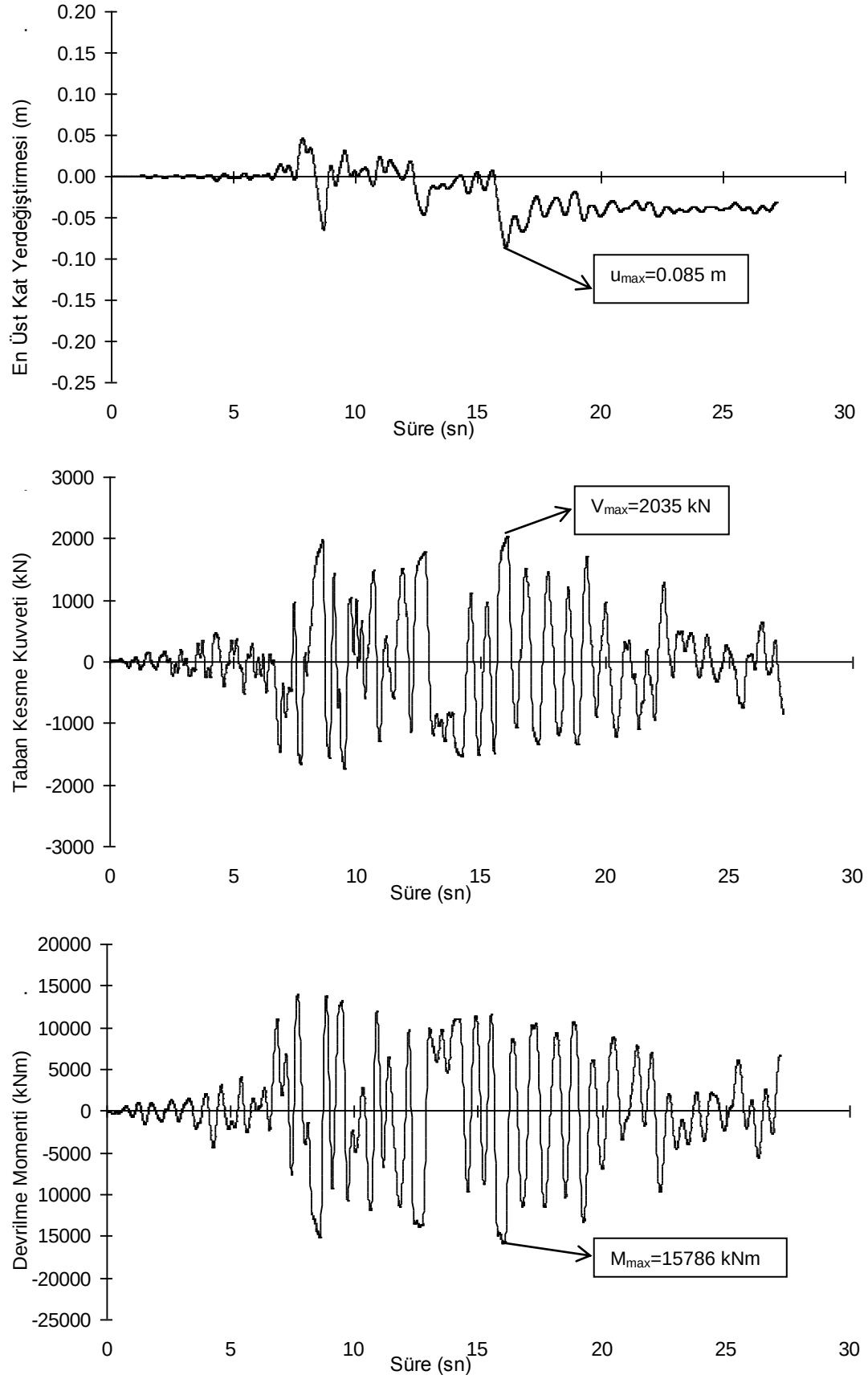
**Şekil A.2 :** Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımcı DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



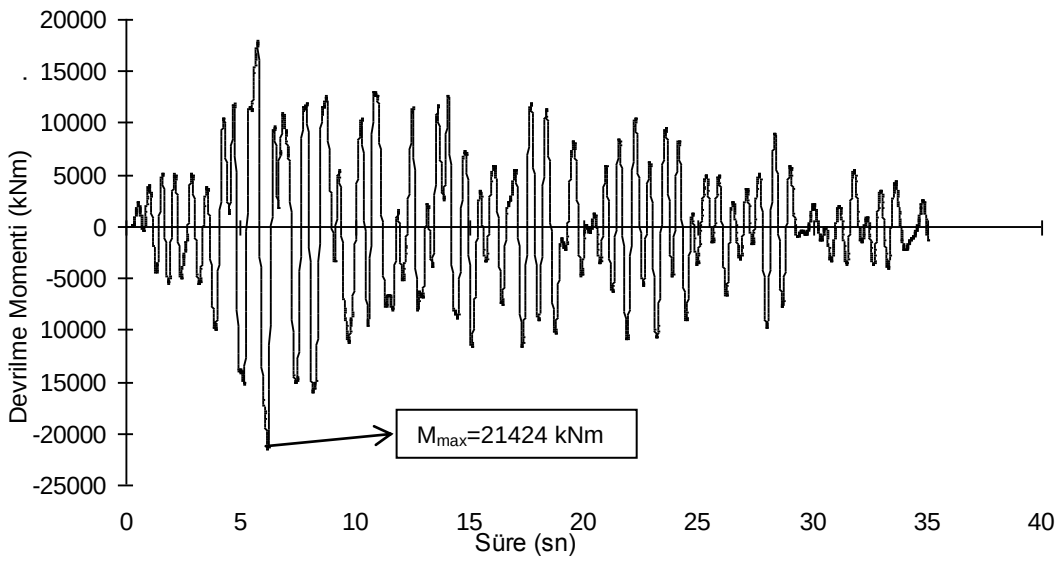
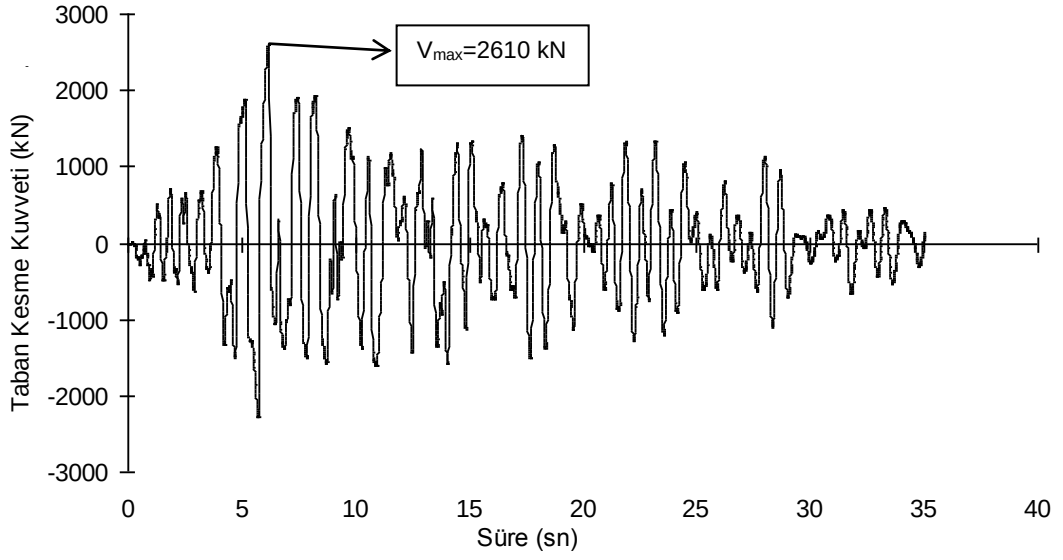
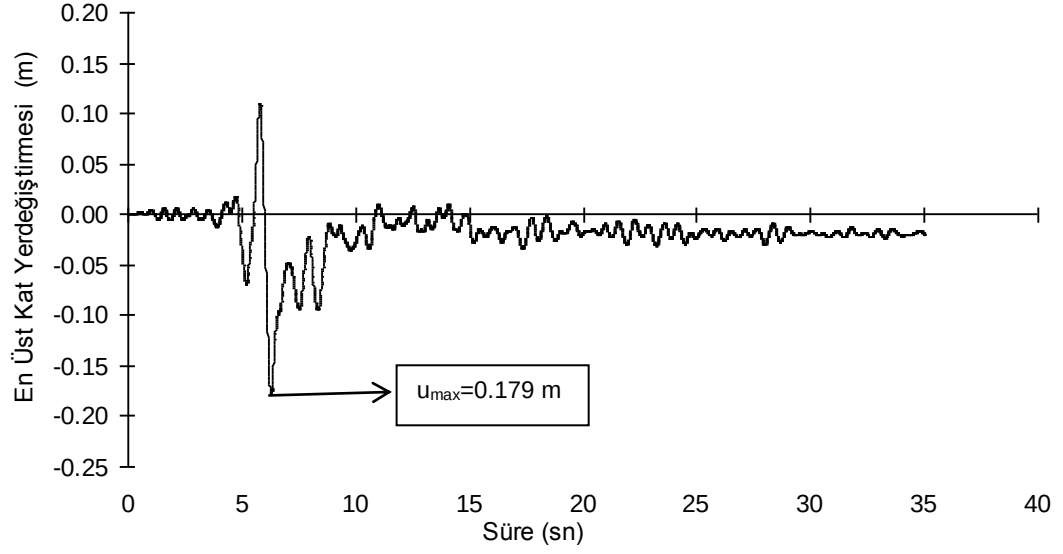
**Şekil A.3 :** Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımcı KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri



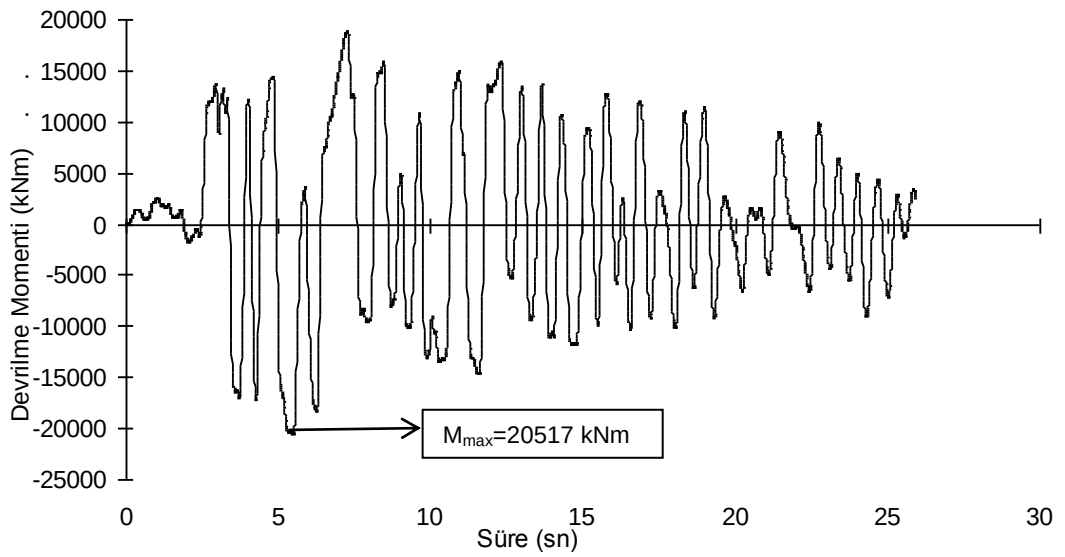
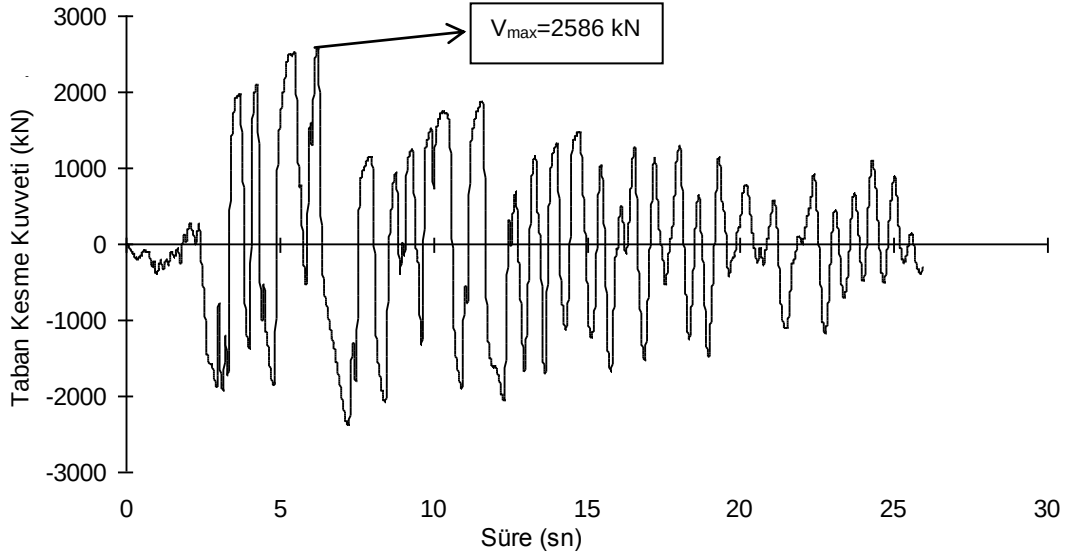
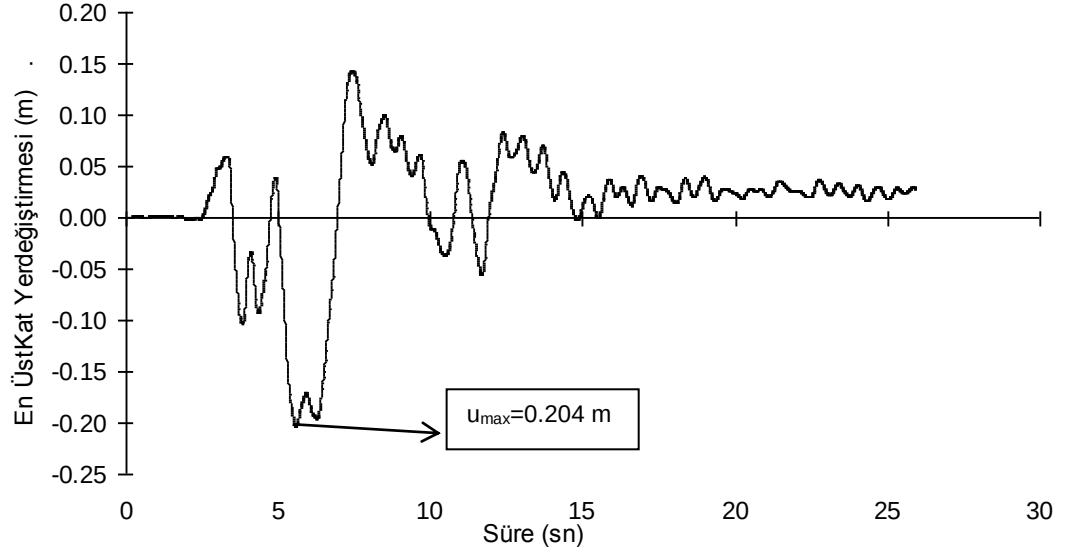
**şekil A.4 :** Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



**şekil A.5 :** Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



**Şekil A.6 :** Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri

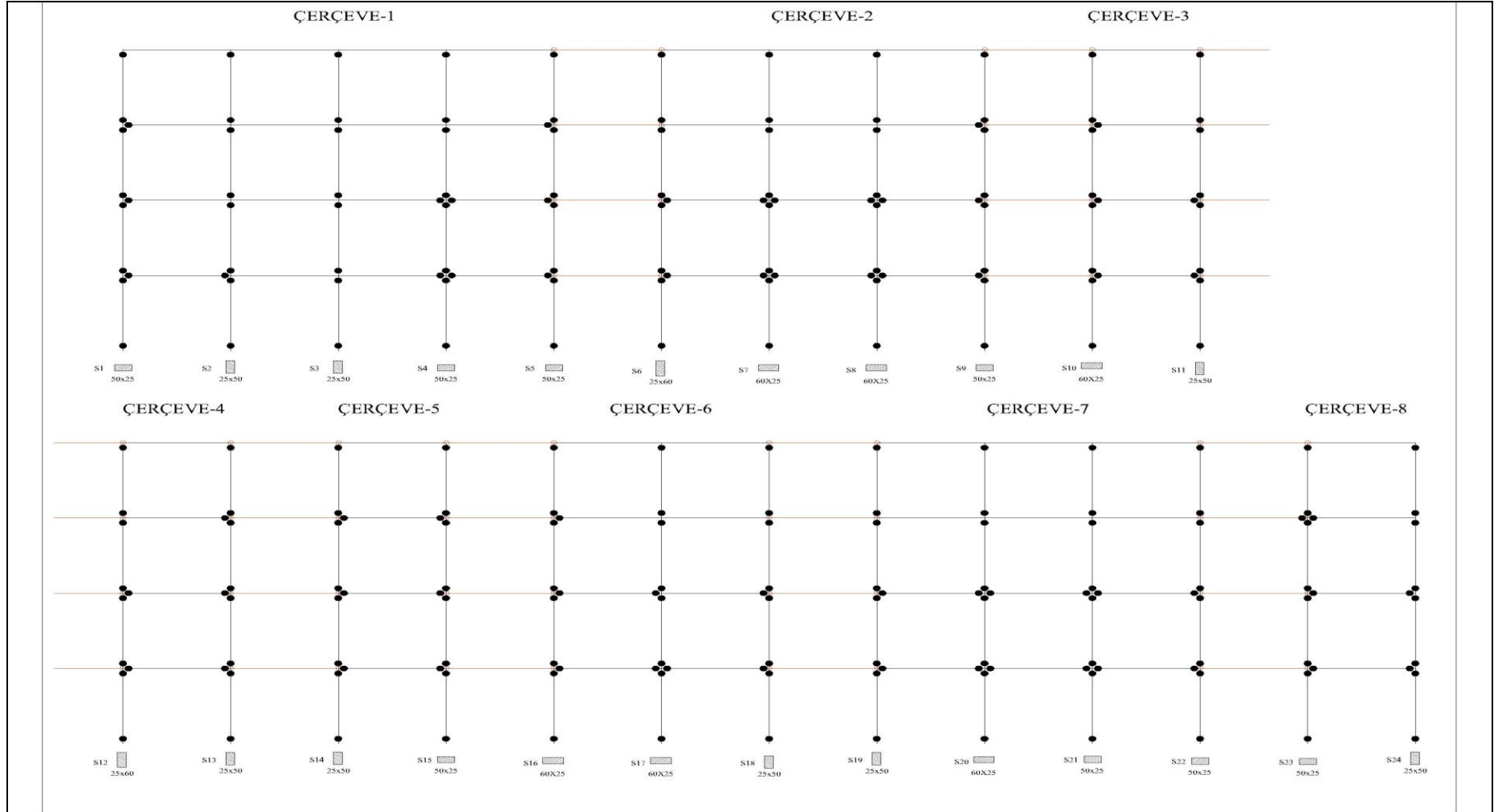


**şekil A.7 :** Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri

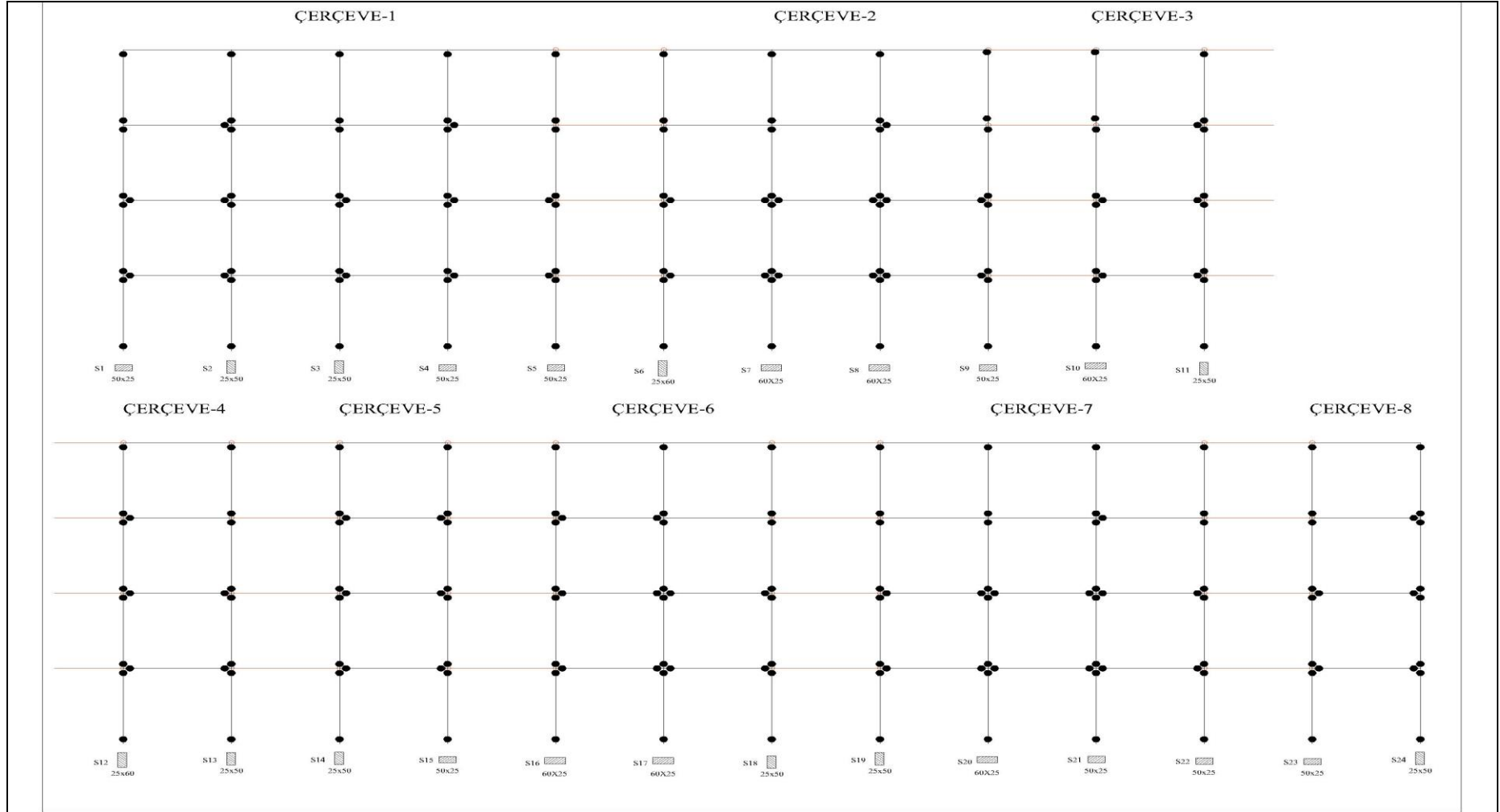
**EK-B**

**GÜÇLENDİRME ÖNCESİ DURUM İÇİN YAPIDAKİ MAFSAL  
OLUŞUMLARI**

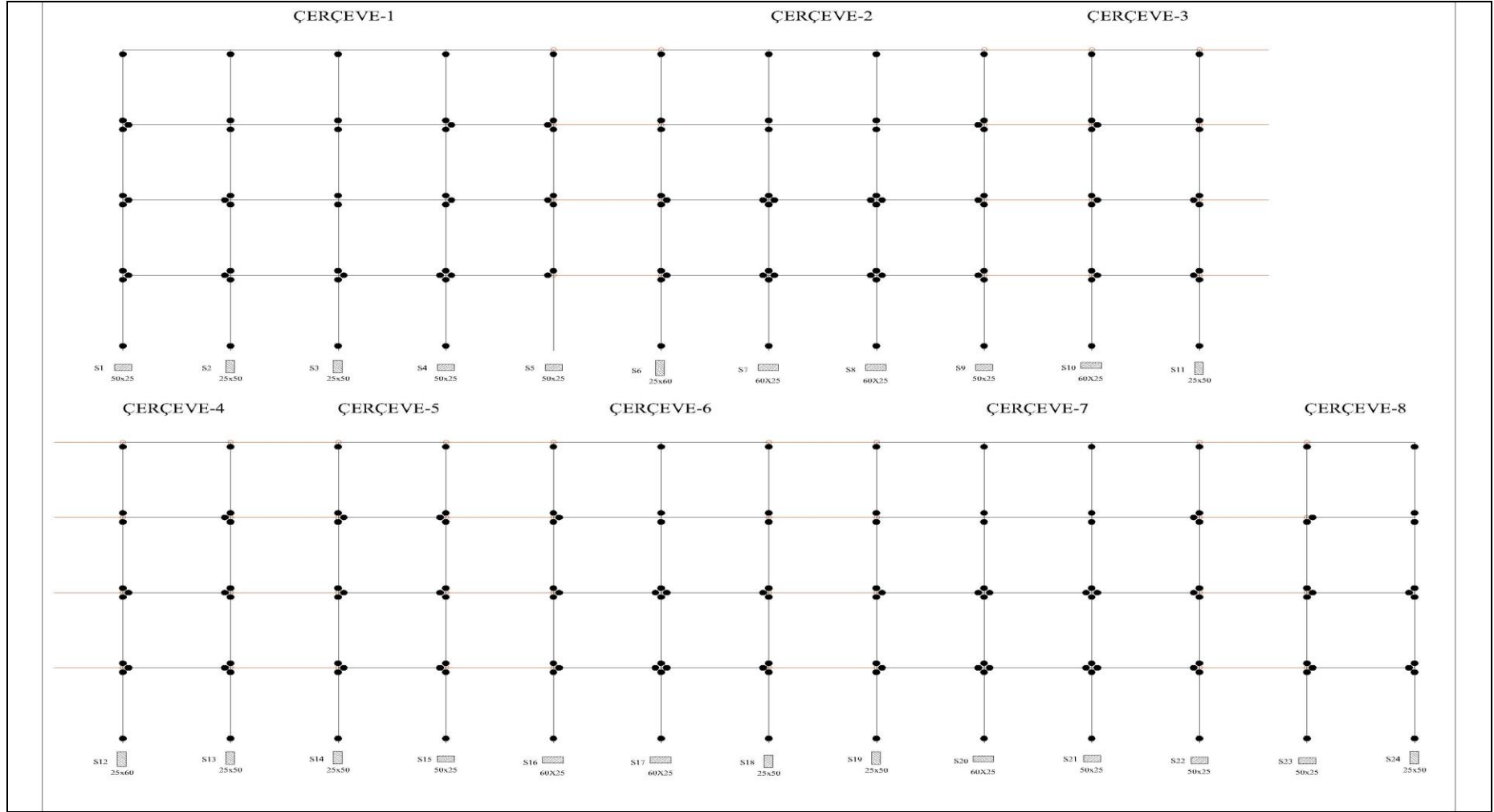




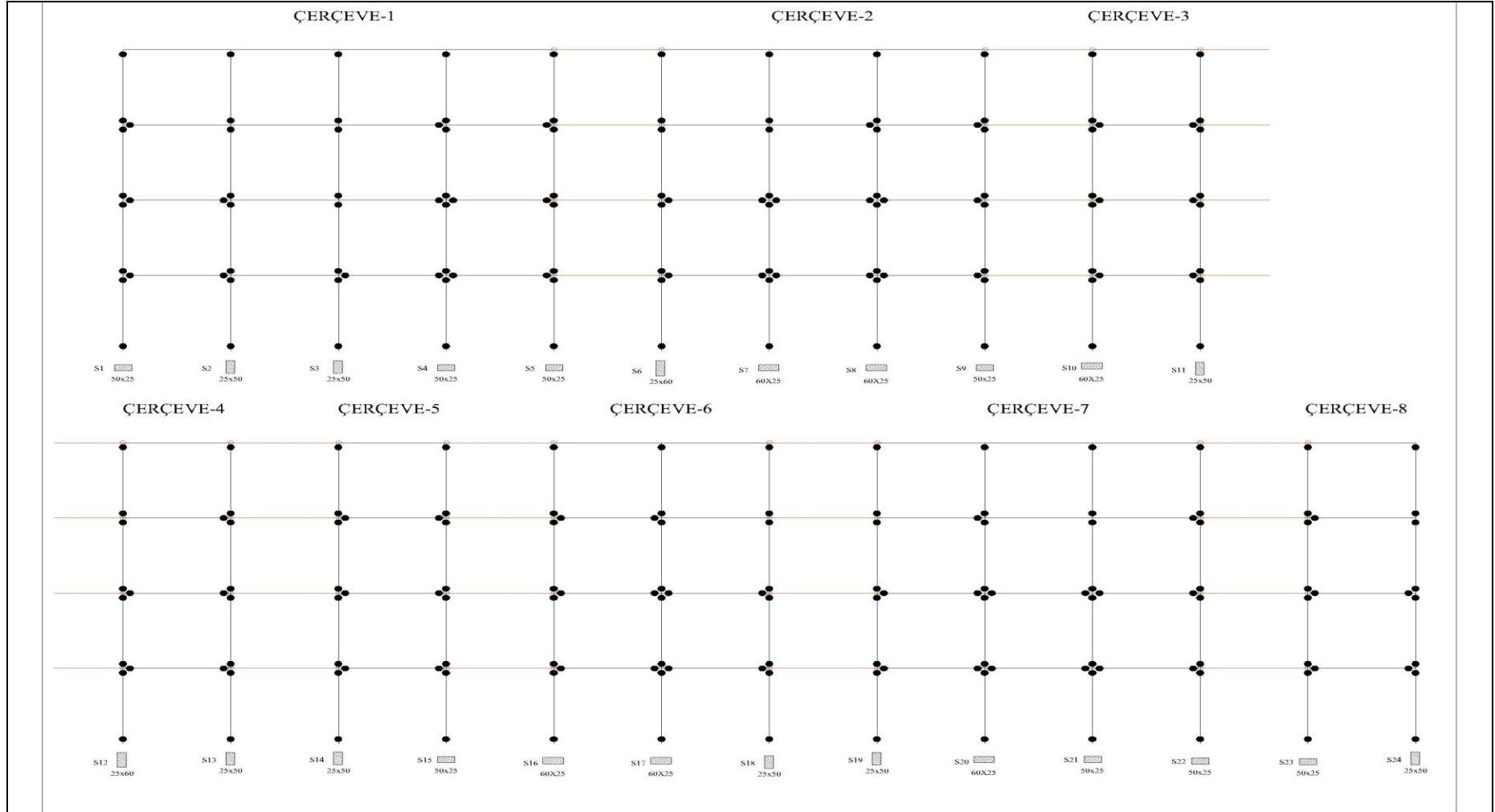
Şekil B.1 : Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu



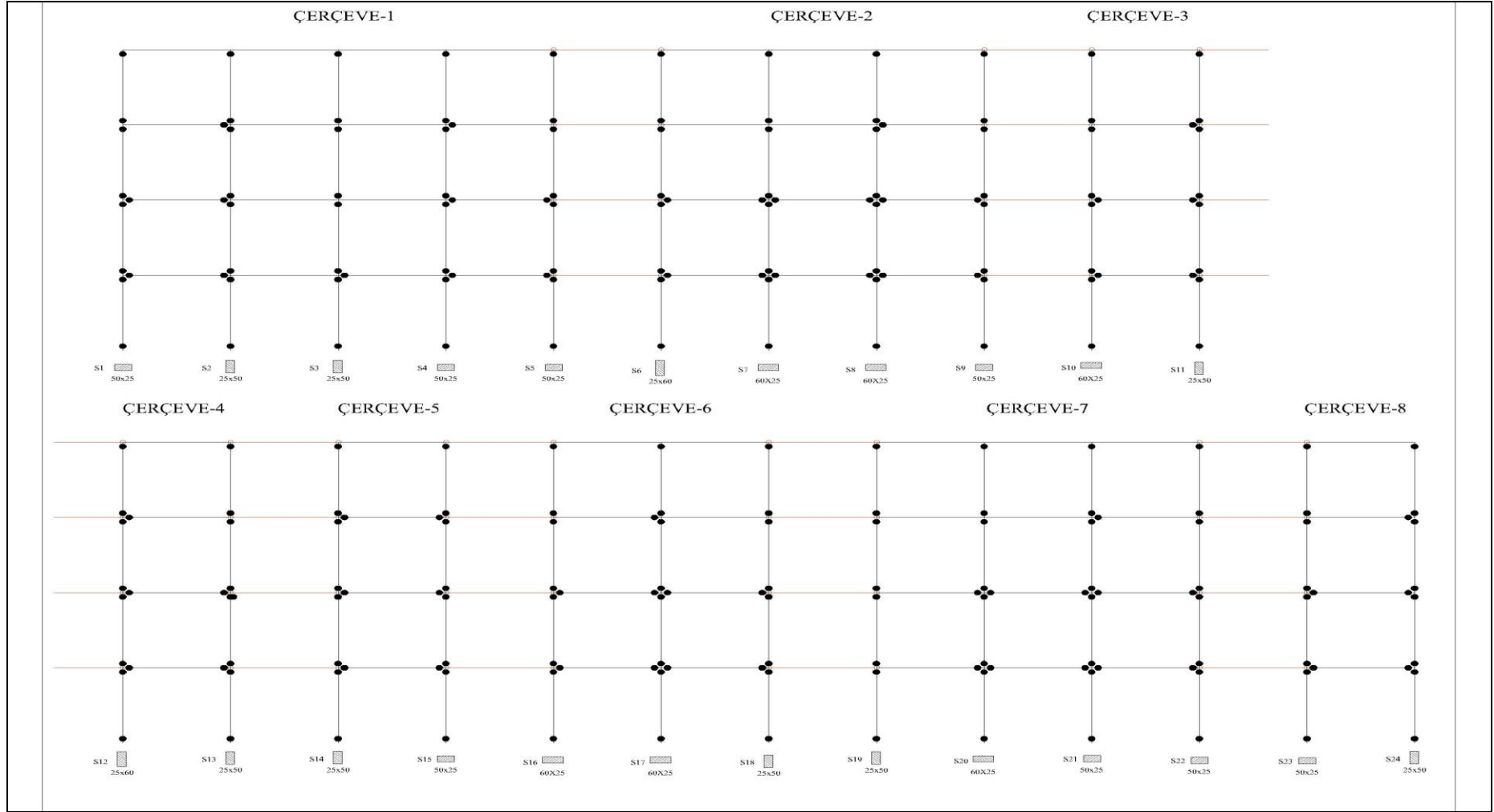
Şekil B.2 : Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımcı DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu



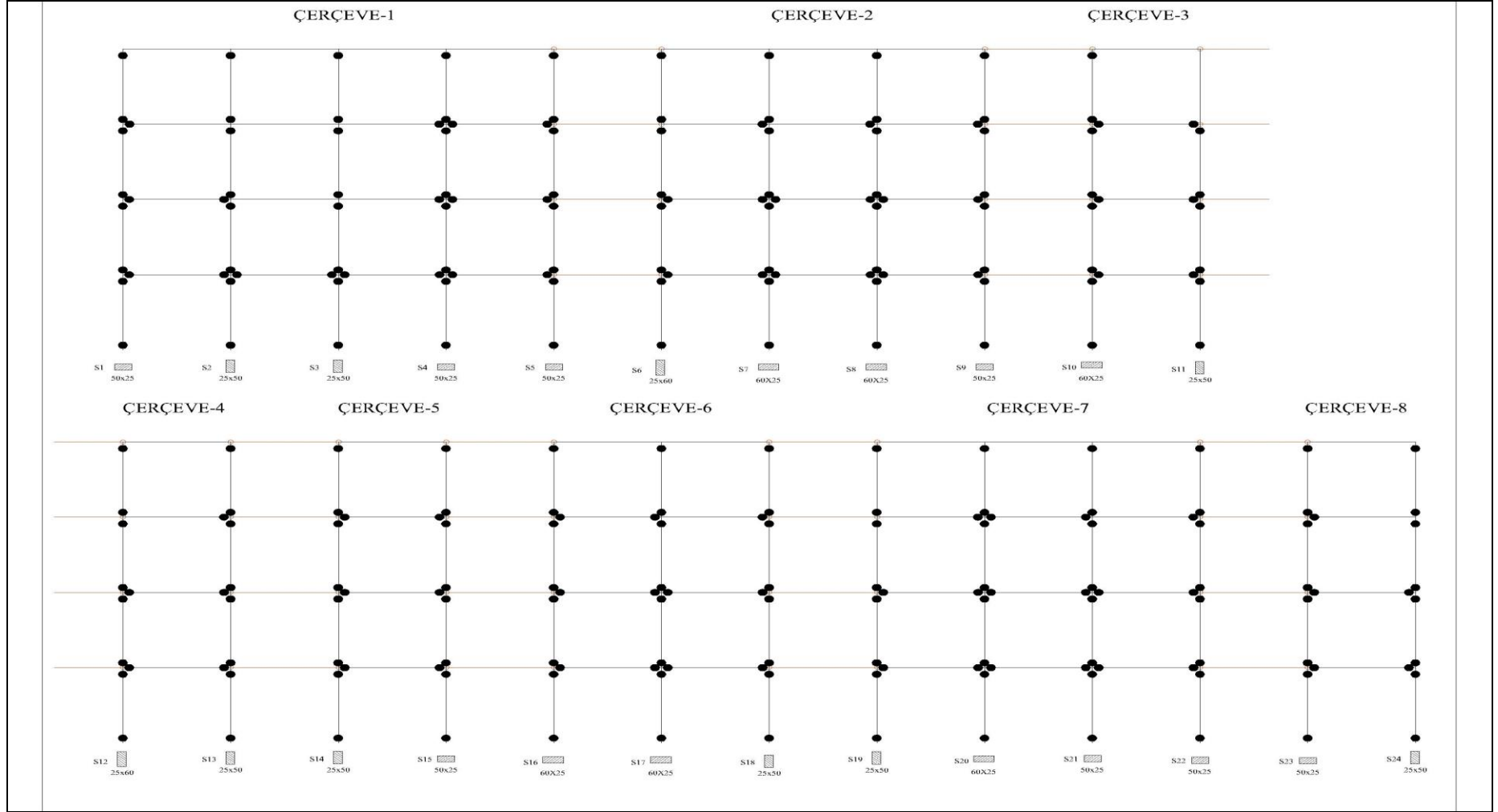
Şekil B.3 : Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Yarımcı KG kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu



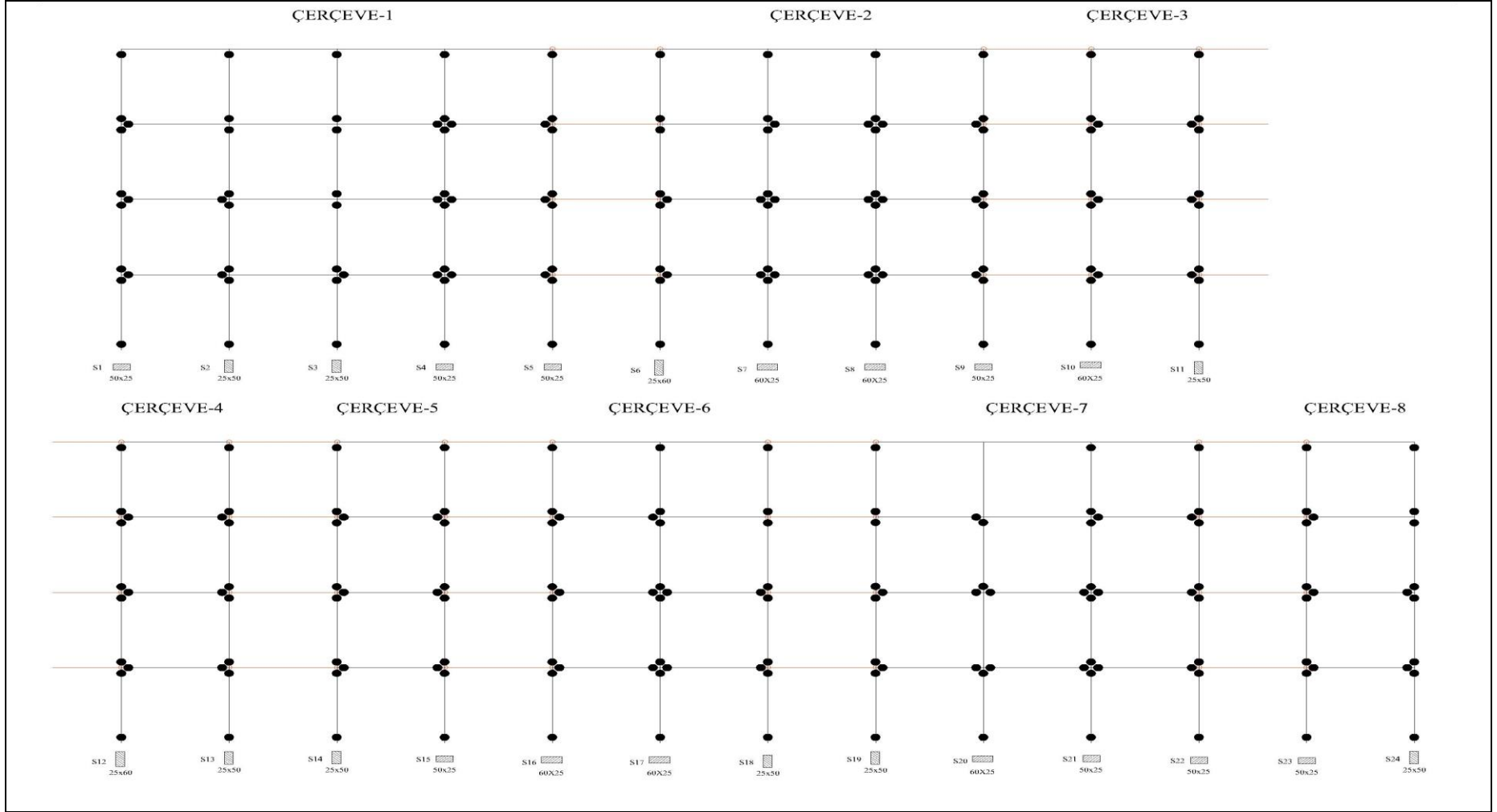
Şekil B.4 : Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu



Şekil B.5 : Güçlendirme öncesi durumda Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu



Şekil B.6 : Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu

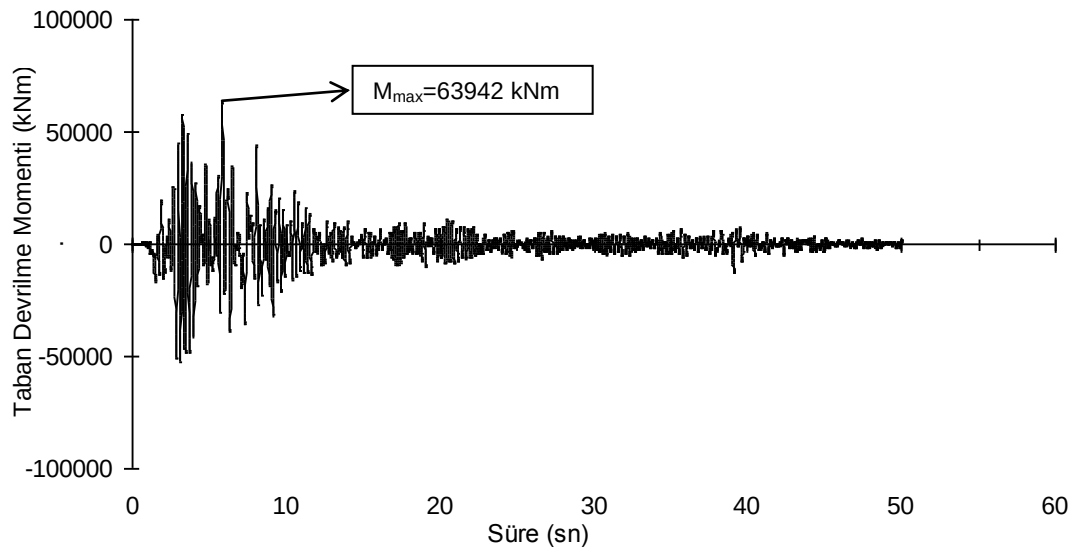
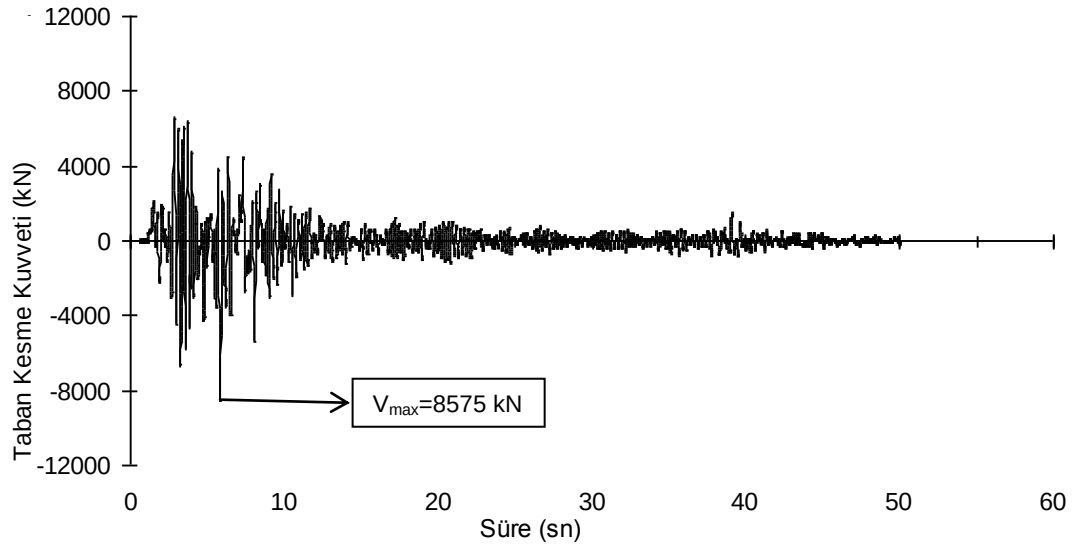
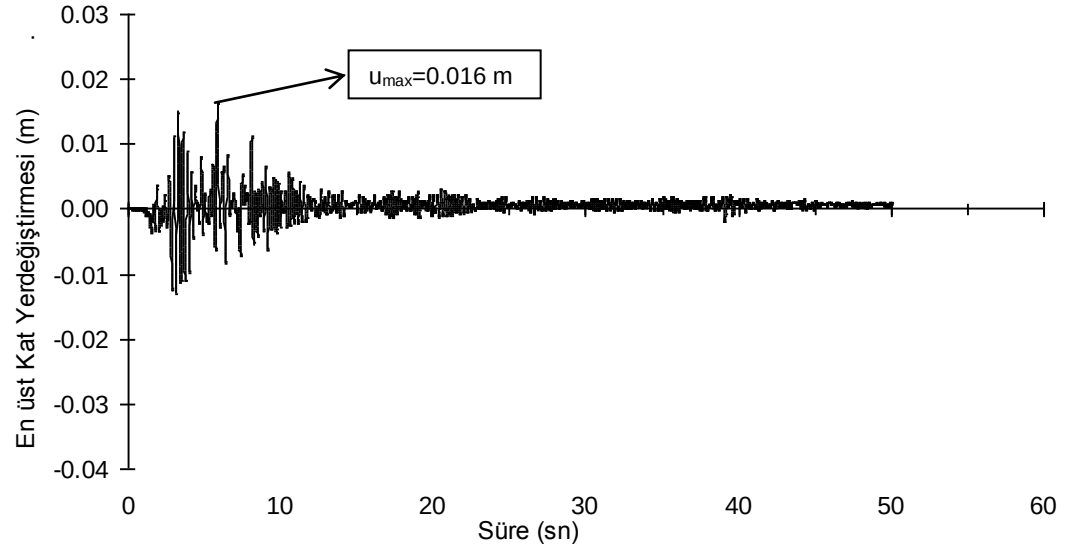


Şekil B.7 : Güçlendirme öncesi durumda Düzce depremi Düzce DB kaydına göre yapıdaki mafsall oluşumu

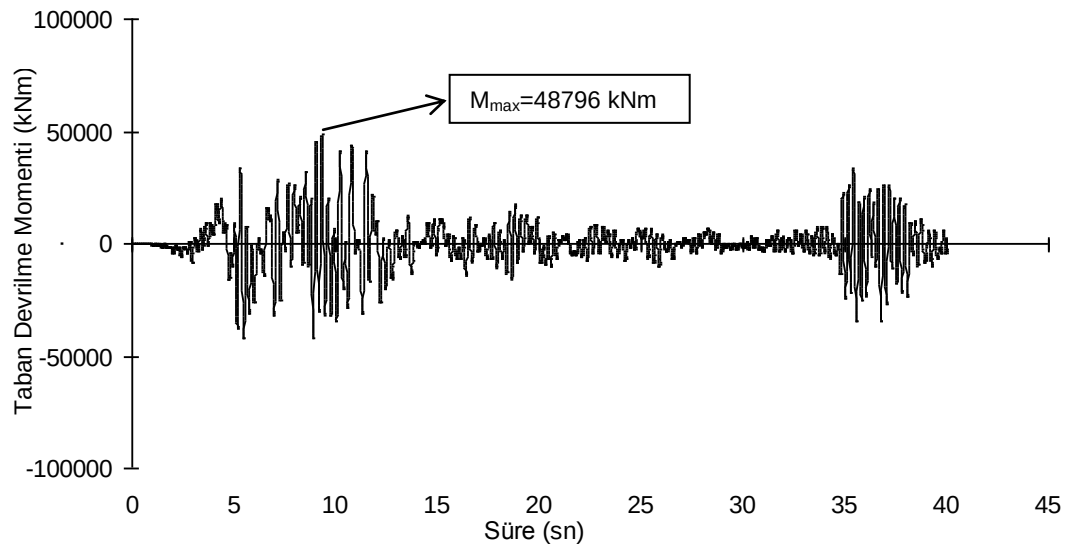
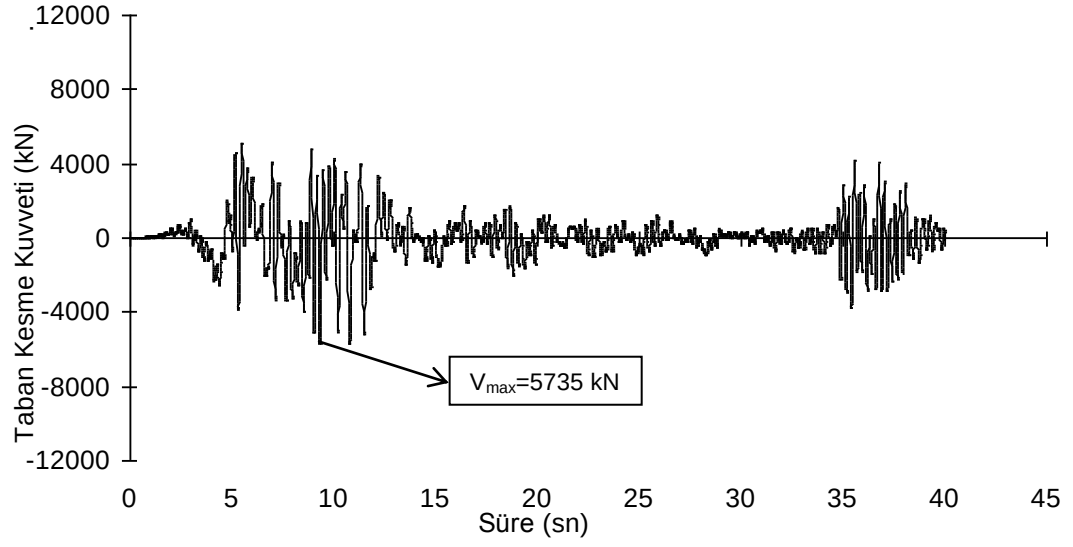
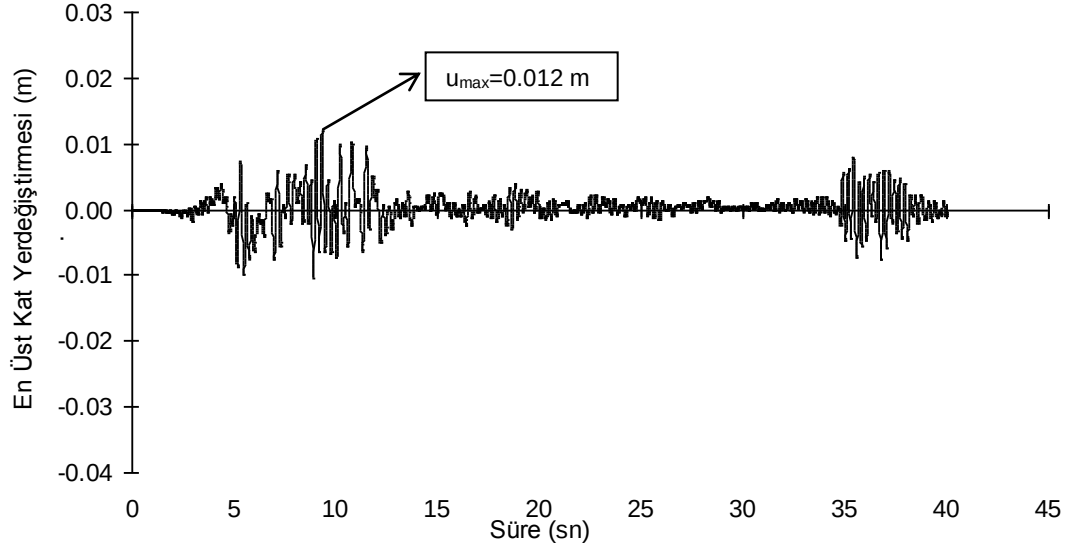
**EK-C**

**GÜÇLENDİRME SONRASI DURUMDA YAPIDA OLUŞAN  
KARŞILIKLARIN DEĞİŞİM GRAFİKLERİ**

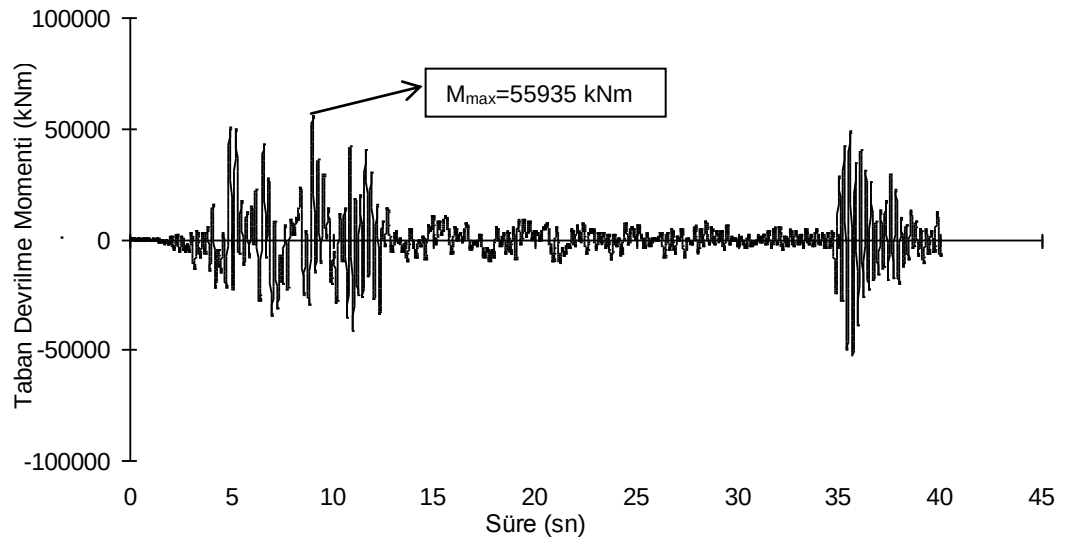
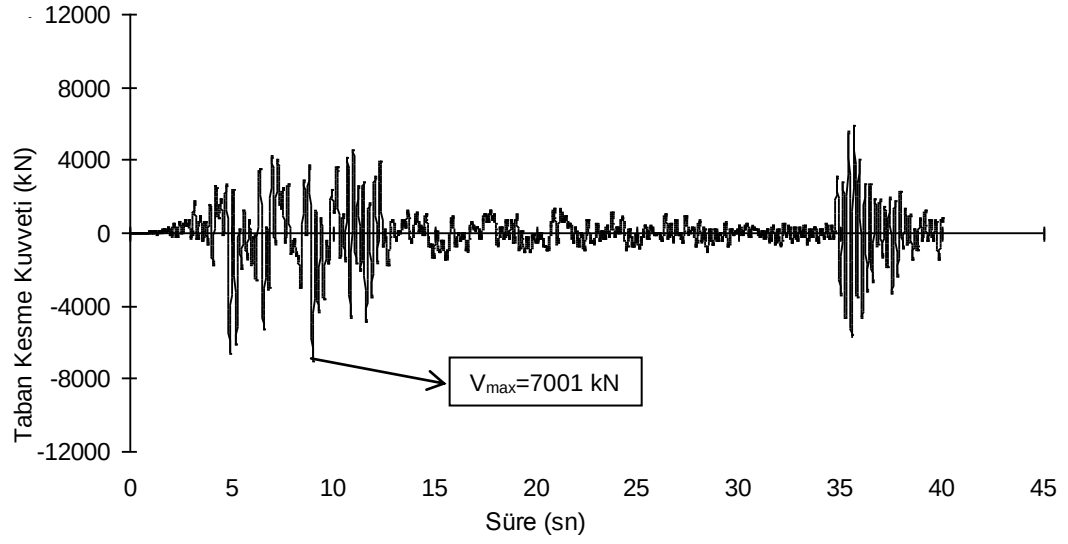
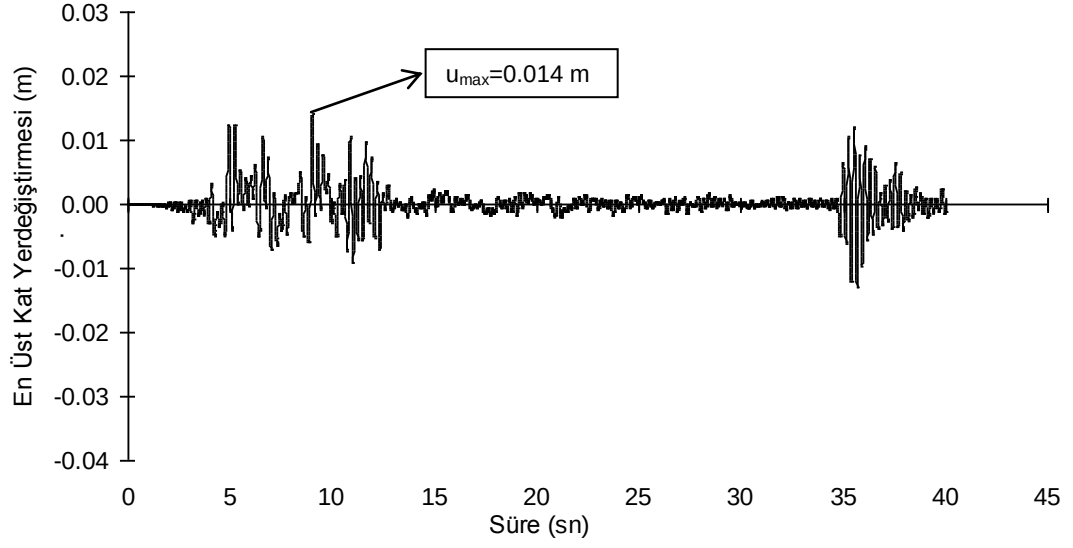




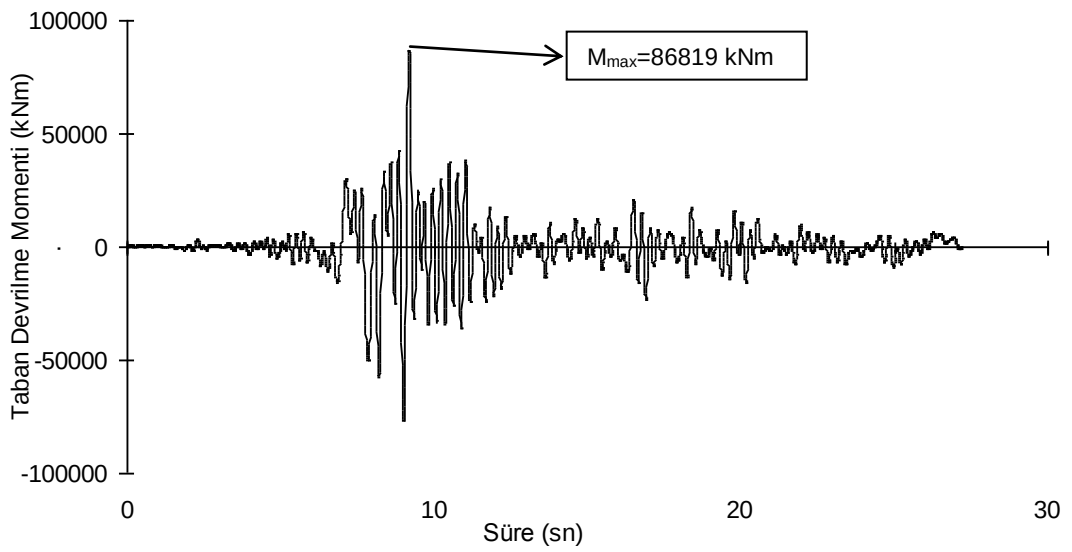
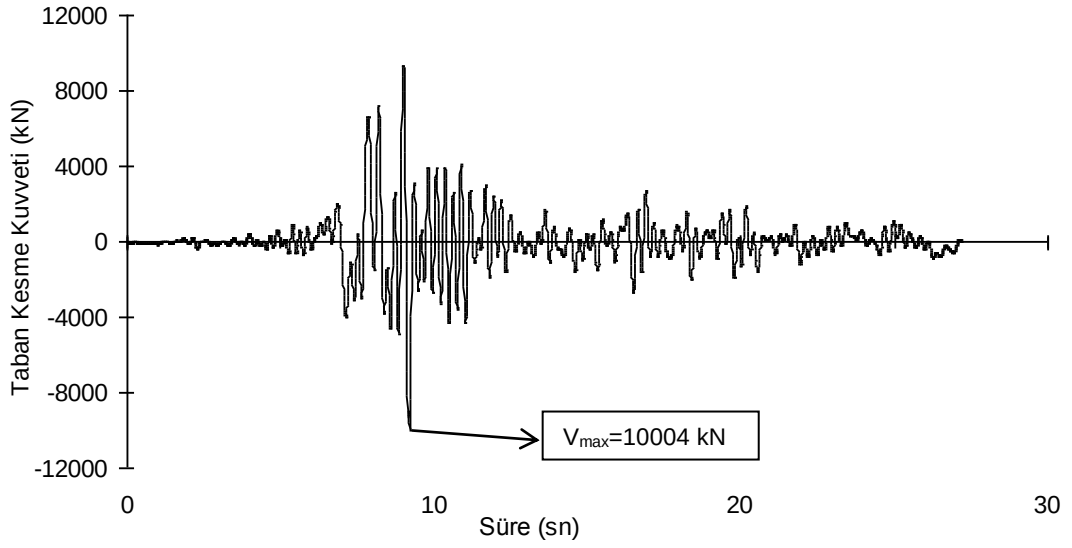
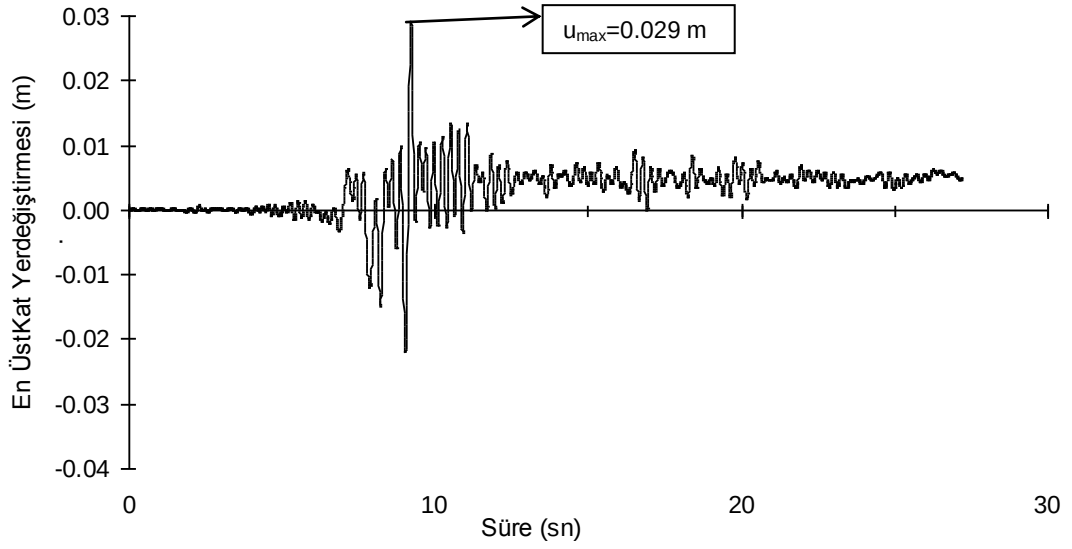
**Şekil C.1 :** Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Sakarya DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



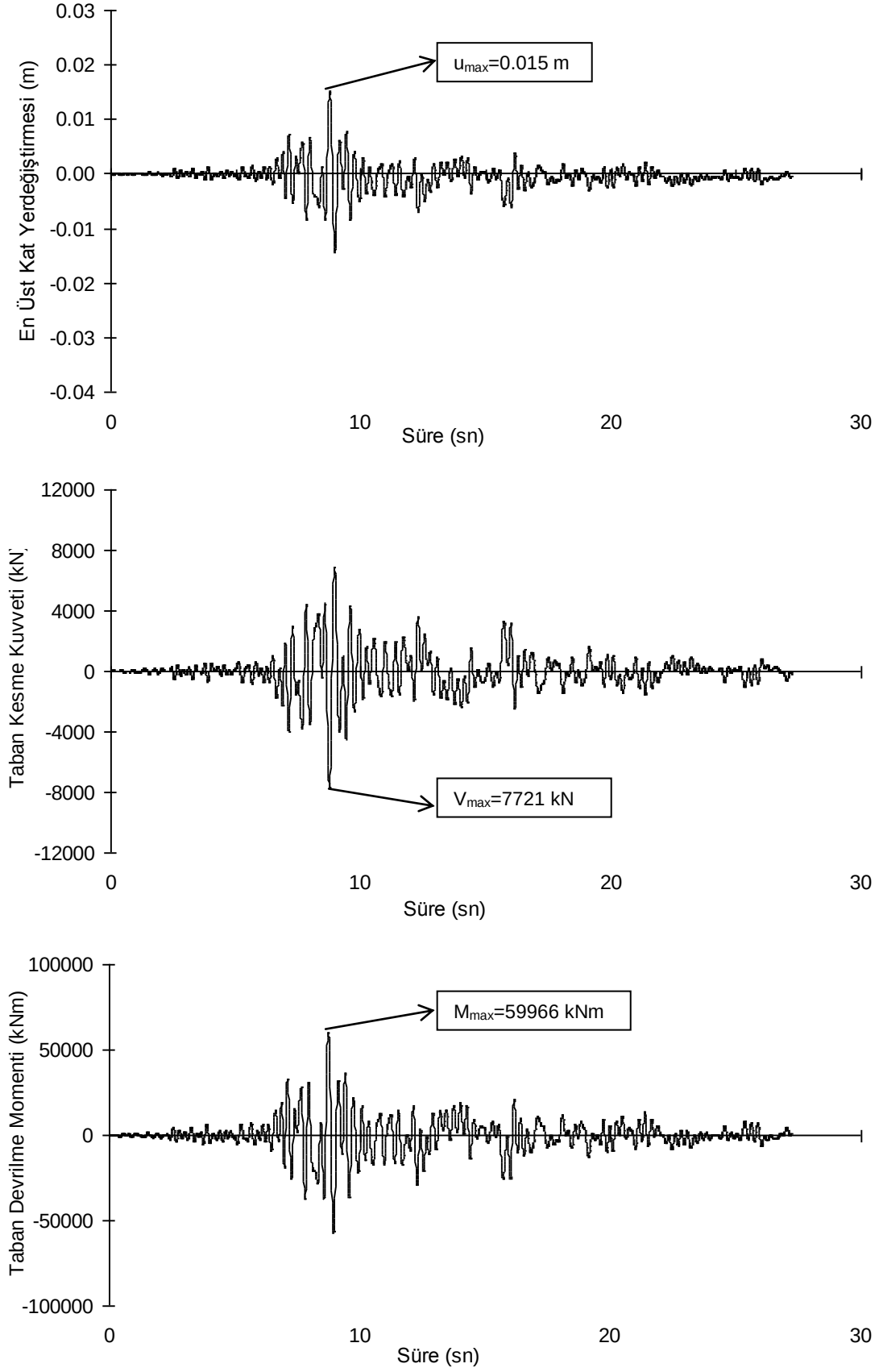
**Şekil C.2 :** Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Yarımcı DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri



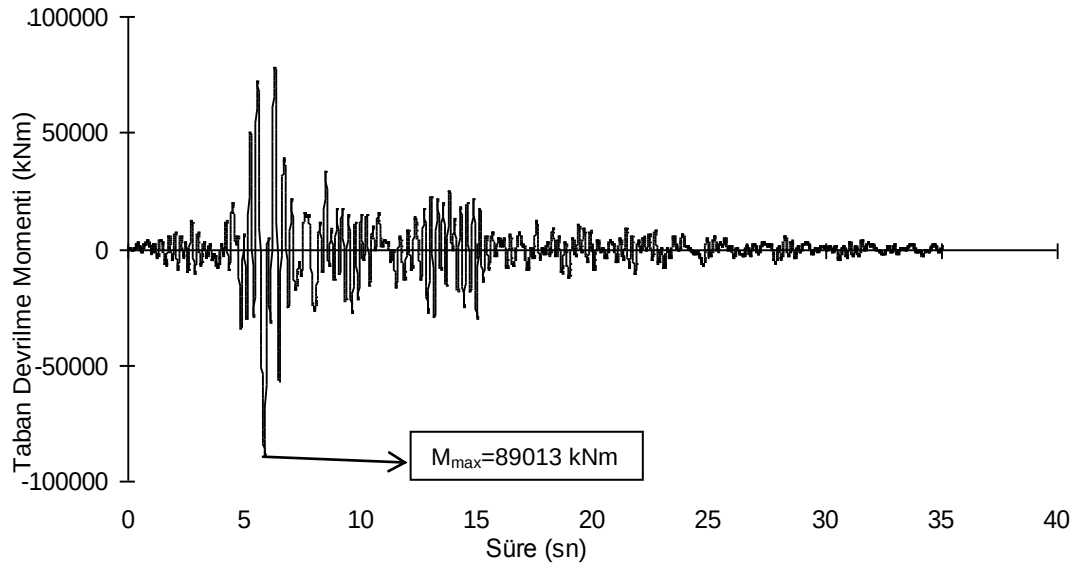
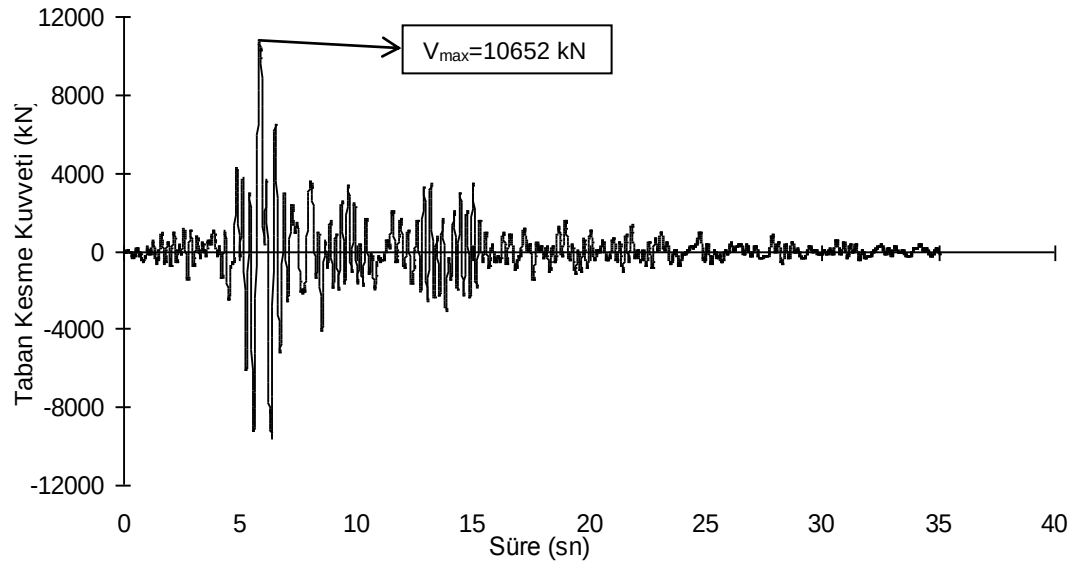
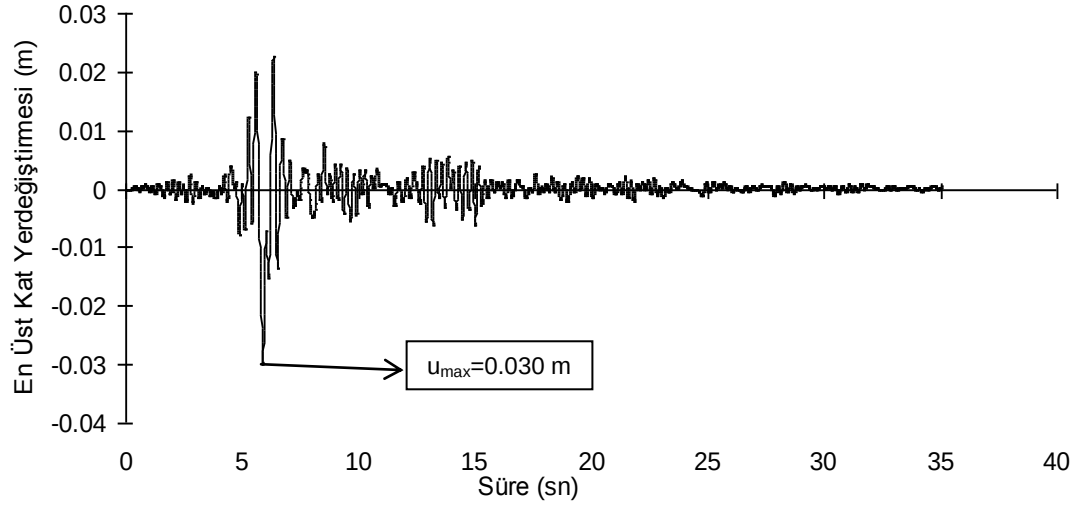
**şekil C.3 :** Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Yarımca KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



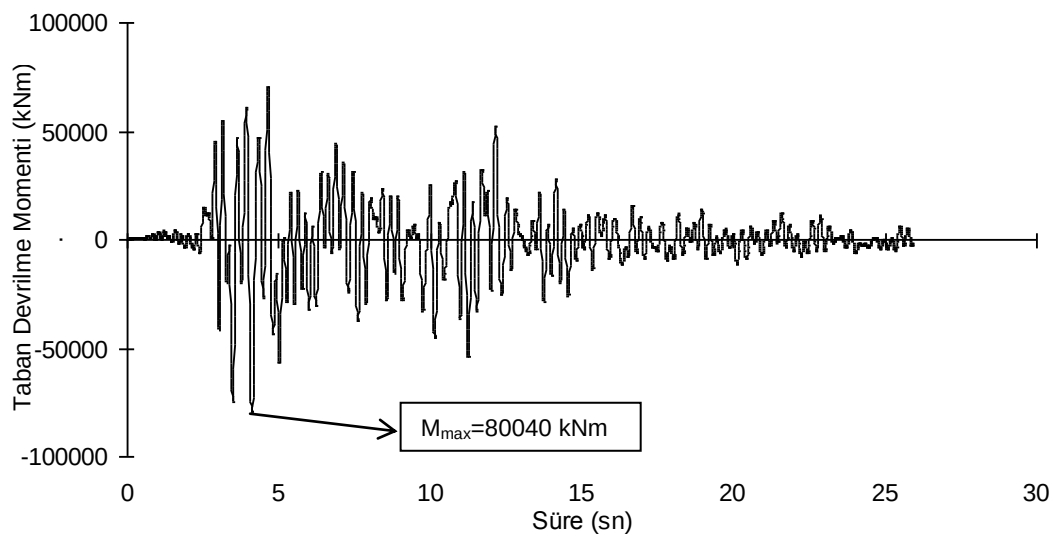
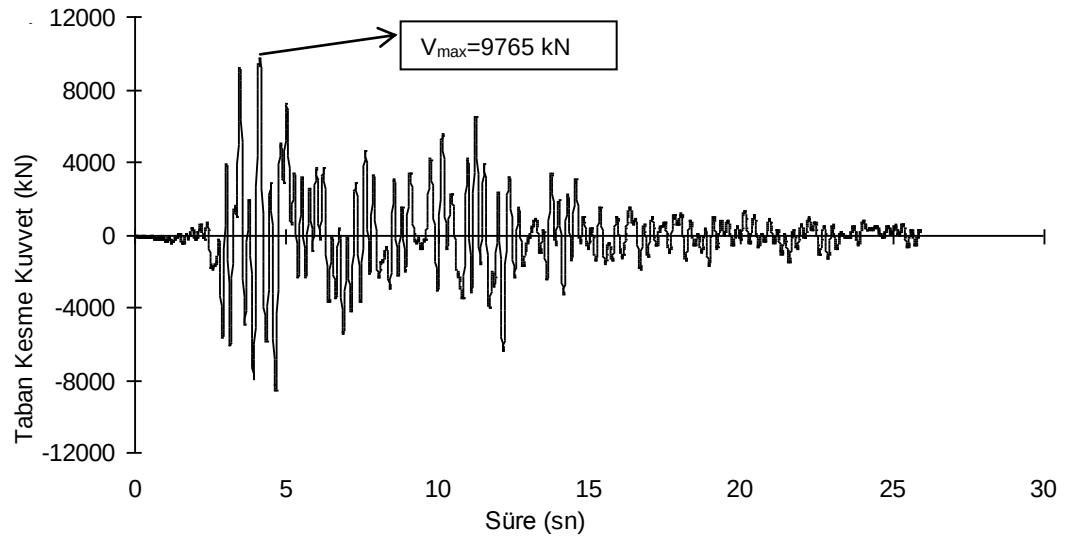
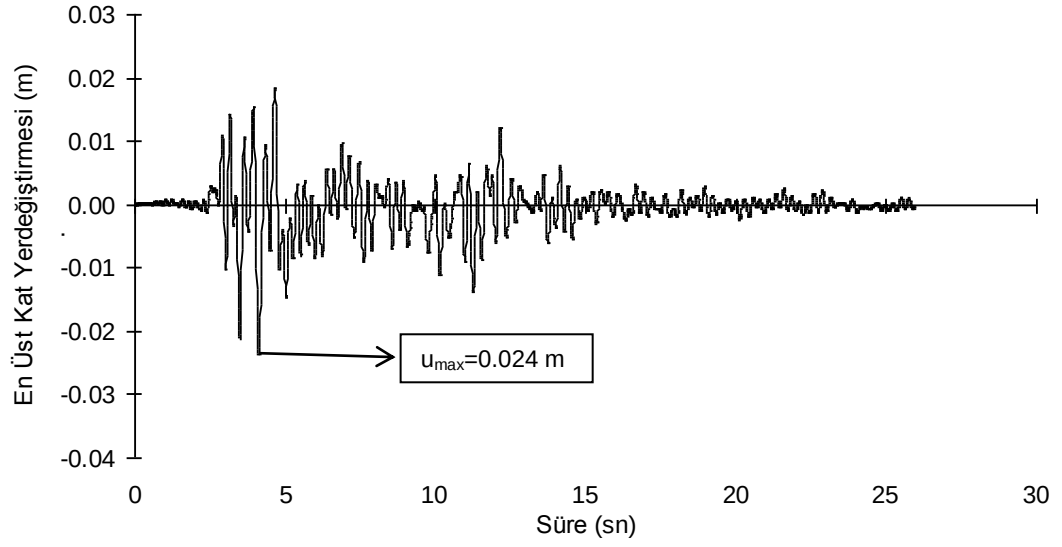
**şekil C.4 :** Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri



**Şekil C.5 :** Güçlendirme sonrası durumda Kocaeli depremi Düzce KG kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri



**Şekil C.6 :** Güçlendirme sonrası durumda Düzce depremi Bolu DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değişimleri



**şekil C.7 :** Güçlendirme sonrası durumda Düzce depremi Düzce DB kaydına göre yapıda oluşan karşılıkların deprem süresince değışimleri

## **ÖZGEÇMİŞ**

Emrah Yılmaz 1981 yılında İstanbul’da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Mersin Erdemli Sultan Akın İlköğretim okulu, Sivas Fen Lisesi ve Erdemli Lisesinde tamamladıktan sonra, 1998 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmiştir. 2003 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği anabilim dalı Deprem Mühendisliği programında yüksek lisans yapmaya başlamıştır. Halen aynı bölümde yüksek lisansına devam etmektedir.