

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**DÜŞEY ELEMAN SÜREKSİZLİĞİNE SAHİP BETONARME**  
**YAPILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN TEORİ ÇERÇEVESİNDE**  
**SAYISAL ARAŞTIRILMASI**

**ORKUN ALPER TURHAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Doç. Dr. Umut HASGÜL (Tez Danışmanı)  
Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL  
Dr. Öğr. Üyesi Serkan SAĞIROĞLU

**BALIKESİR, NİSAN - 2025**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Düşey Eleman Süreksizliğine Sahip Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan Teori Çerçevesinde Sayısal Araştırılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Orkun Alper TURHAN**

## ÖZET

**DÜŞEY ELEMAN SÜREKSİZLİĞİNE SAHİP BETONARME YAPILARIN  
DOĞRUSAL OLMAYAN TEORİ ÇERÇEVESİNDE SAYISAL ARAŞTIRILMASI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ORKUN ALPER TURHAN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. UMUT HASGÜL)**

**BALIKESİR, NİSAN - 2025**

Taşıyıcı sistemdeki kolon, perde ve kirişlerin yerleşimlerine göre farklı şekillerde ortaya çıkabilen düşey eleman süreksizliği durumu, deprem yüklerinin taşıyıcı elemanlardan temele aktarılması yolunda süreksizlikler yaratması nedeniyle sismik davranış talepleri üzerinde belirsizliklere neden olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, TBDY-2018’de B3 türü düşey düzensizlik olarak sınıflandırılan düşeyde kolon süreksizliğine sahip betonarme bina sistemlerinin DD-2 seviyesindeki deprem etkisi altındaki sismik davranışlarının doğrusal-elastik olmayan teori çerçevesinde araştırılması amaçlanmıştır. Bu sayede, yönetmeliğe göre tasarlanmış bu tür binaların öngörülen performans hedeflerini hangi oranda sağladıkları parametrik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, orta iki açıklığı değişken olarak seçilen ( $L=2^m$ ,  $3^m$  ve  $4^m$ ) ve toplam dört açıklıktan oluşan 3, 5 ve 7 katlı süneklik düzeyi yüksek çerçeve sistemlerde zemin kat orta aks kolonu kaldırılarak düşey kolon süreksizlikleri oluşturulmuş ve bina tasarımları TBDY-2018’deki esaslar çerçevesinde yapılmıştır. Planda herhangi bir düzensizliği bulunmayan bina sistemlerinde eleman süreksizliğinin bulunduğu düzlem çerçeve çıkarılarak dokuz farklı hesap modeli oluşturulmuştur. 11 adet ölçeklendirilmiş gerçek deprem yer hareketi kaydının yatay ve düşey bileşenleri altında taşıyıcı sistemlerin zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri yapılarak şekildeğiştirme bazlı davranış büyüklükleri ile gevrek davranışa ilişkin talepler elde edilmiştir. Eleman ve sistem bazlı ortalama davranış talepleri (kat yerdeğiştirmesi, görelî kat ötelemesi, kiriş ve kolonlardaki plastik şekildeğiştirmeler ve plastik mafsalların sistem üzerindeki dağılımları) TBDY-2018’de verilen sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir.

Parametrik incelemeler çerçevesinde, yönetmelik esaslarına göre tasarlanmış düşeyde kolon süreksizliğine sahip betonarme sistemlerin yatay ve düşey deprem etkileri altında öngörülen hasar sınırlarını (performans hedeflerini) sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuç üzerinde, tasarım düşey ivme spektrumunun kullanımı ile kapasite tasarım ilkelerinin büyük katkı sağladığı düşünülmektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Betonarme bina, kolon süreksizliği, düşey düzensizlik, transfer kiriş, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, plastik dönme, birim boy değişmesi

Bilim Kod / Kodları : 91102, 91104

Sayfa Sayısı : 94

## **ABSTRACT**

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH VERTICAL ELEMENT DISCONTINUITIES WITHIN THE FRAMEWORK OF NONLINEAR THEORY**

**MSC THESIS**

**ORKUN ALPER TURHAN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. UMUT HASGUL)**

**BALIKESİR, APRIL - 2025**

Vertical irregularities in structural systems, such as the discontinuity of columns, walls, or beams, can occur in various configurations depending on the layout of structural members. These irregularities introduce discontinuities in the transmission path of seismic forces from the superstructure to the foundation, creating uncertainties in seismic demand and structural response.

This thesis aims to investigate the seismic behavior of reinforced concrete building systems exhibiting vertical column discontinuity, categorized as a Type B3 vertical irregularity in the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBDY-2018), under Design Basis Earthquake (DD-2) level ground motions using nonlinear inelastic analysis methods. The study assesses how well these systems, designed according to code provisions, can meet the intended performance objectives through a detailed parametric investigation. In the study, frame systems with four spans and three different heights (3, 5, and 7 stories) are modeled with varying lengths for the two middle spans ( $L = 2^m, 3^m$  and  $4^m$ ). Vertical discontinuity is introduced by removing the mid-axis column at the ground story. The structural designs of the buildings comply with the relevant provisions of TBDY-2018. Since the structural systems lack any irregularities in plan, the analysis focuses on the critical elevation frame where the discontinuity occurs, resulting in nine distinct structural models. Nonlinear time history analyses are conducted under the horizontal and vertical components of 11 real ground motion records scaled to the DD-2 hazard level. Displacement-based response parameters and brittle behavior demands are obtained. The mean demand values for both element-level and global response quantities—including story displacements, interstory drift ratios, plastic rotations in beams and columns, and the distribution of plastic hinges—are evaluated against the performance limits specified in TBDY-2018.

The parametric evaluation reveals that the vertically irregular reinforced concrete systems, despite the column discontinuity at the ground level, generally meet the target damage limits (performance objectives) under combined horizontal and vertical seismic demands when designed according to the code. It is concluded that the use of vertical design spectra and the application of capacity design principles significantly enhance the favorable seismic performance of these systems.

**KEYWORDS:** Reinforced concrete buildings, column discontinuity, vertical irregularity, transfer beam, nonlinear time history analysis, plastic rotation, strain

Science Code / Codes : 91102, 91104

Page Number : 94

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ÖZET</b> .....  | <b>i</b>    |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>ii</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....   | <b>iii</b>  |
| <b>TABLO LİSTESİ</b> .....   | <b>vii</b>  |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....  | <b>viii</b> |
| <b>KISALTMALAR</b> .....   | <b>x</b>    |
| <b>ÖNSÖZ</b> .....   | <b>xi</b>   |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....  | <b>1</b>    |
| 1.1 Konu .....   | 1           |
| 1.2 Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar .....  | 6           |
| 1.3 Amaç ve Kapsam .....   | 10          |
| <b>2. YAPI SİSTEMLERİNİN ŞEKİLDEĞİŞTİRME BAZLI DAVRANIŞI VE TBDY-2018'DEKİ PERFORMANSA DAYALI TASARIM VE DEĞERLENDİRME KAVRAMI</b> ..... | <b>12</b>   |
| 2.1 Çözüm için Gerekli Koşullar .....  | 12          |
| 2.2 Dış Yükler Altında Yapı Sistemlerinin Doğrusal-Elastik Olmayan Davranışı .....   | 13          |
| 2.3 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler .....  | 15          |
| 2.4 Malzemelere ait Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri .....   | 16          |
| 2.4.1 Donatı için gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları .....  | 16          |
| 2.4.2 Beton için gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı .....   | 18          |
| 2.5 Betonarme Enkesitlerin Doğrusal-Elastik Olmayan Davranışı .....  | 21          |
| 2.5.1 Düzlem çubuk elemanlarda iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntıları .....   | 21          |
| 2.6 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki Çubuklar .....   | 23          |
| 2.6.1 Eğilme momenti-eğrilik ( $M-\phi$ ) davranışı .....  | 23          |
| 2.6.2 Betonarme enkesitlerde karşılıklı etki diyagramı .....   | 24          |
| 2.7 Betonarme Enkesitler için Akma Koşullarının İdealleştirilmesi .....  | 24          |
| 2.8 Moment-Eğrilik Analizine ait Temel Esaslar .....   | 27          |
| 2.9 Taşıyıcı Elemanların Doğrusal-Elastik Olmayan Davranış Modelleri .....   | 29          |
| 2.9.1 Yayılı plastik kesit modeli .....  | 30          |
| 2.9.2 Yığılı plastik kesit modeli .....  | 31          |
| 2.10 Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme Yaklaşımı .....   | 33          |
| 2.11 TBDY-2018'deki Performans Dayalı Tasarım ve Değerlendirme Esasları .....  | 34          |
| 2.11.1 Yapısal performans düzeyleri .....  | 34          |
| 2.11.2 Bina performans hedefleri .....   | 35          |
| 2.11.3 Deprem yer hareketi düzeyleri .....   | 35          |
| 2.11.4 Yatay ve düşey deprem yer hareketi spektrumu .....  | 36          |
| 2.12 Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri .....  | 38          |
| 2.12.1 Elastik-ötesi statik itme analizleri .....  | 38          |
| 2.12.2 Zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analiz .....  | 39          |
| 2.13 Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi .....  | 41          |
| 2.14 Betonarme Binaların Performans Düzeylerine ait Şekildeğiştirme Sınırları .....  | 42          |
| <b>3. BETONARME ÇERÇEVE SİSTEMLER ÜZERİNDE PARAMETRİK SAYISAL İNCELEMELER</b> .....  | <b>43</b>   |
| 3.1 Hesap Varsayımları .....   | 43          |
| 3.2 Betonarme Çerçeve Sistemlerin Özellikleri .....  | 43          |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.3       | Taşıyıcı Sistem Modellerinin Oluşturulması .....                                      | 52        |
| 3.3.1     | Eleman bazlı kuvvet-deformasyon bağıntılarının tanımlanması.....                      | 52        |
| 3.3.2     | Hasar düzeylerini ifade eden plastik şekil değiştirme sınırları .....                 | 53        |
| 3.4       | Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Özellikleri.....                                     | 54        |
| 3.5       | Çerçeve Sistemlerin Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizleri.....             | 56        |
| <b>4.</b> | <b>ŞEKİLDEĞİŞTİRME BAZLI DAVRANIŞ TALEPLERİNİN</b>                                    |           |
|           | <b>DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>  | <b>58</b> |
| 4.1       | Kat Yerdeğiştirme Talepleri.....  | 58        |
| 4.2       | Katlar Arası Öteleme Talepleri .....  | 61        |
| 4.3       | Plastik Mafsallardaki Plastik Şekildeğiştirme Talepleri .....                         | 65        |
| 4.3.1     | Kirişler için plastik dönme talepleri .....   | 65        |
| 4.3.2     | Kolon $\epsilon_c$ ve $\epsilon_s$ birim boy değişimi talepleri .....                 | 69        |
| 4.4       | Plastik Mafsalların Sistem Üzerindeki Dağılımları .....                               | 72        |
| <b>5.</b> | <b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>   | <b>83</b> |
| <b>6.</b> | <b>KAYNAKLAR .....</b>  | <b>85</b> |
|           | <b>EKLER .....</b>  | <b>90</b> |
|           | <b>EK A: Zaman Tanım Alanındaki Analizlere ait Deprem Yer Hareketi Kayıtları.....</b> | <b>90</b> |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>   | <b>94</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1: Bina türü taşıyıcı sistemlerde süreksiz kolon düzensizliği. ....  | 2  |
| Şekil 1.2: Düşey eleman süreksizliği durumları. ....   | 3  |
| Şekil 1.3: TBDY-2018’de tanımlanan düşey eleman süreksizliği düzensizliği.....   | 5  |
| Şekil 1.4: Eurocode-8’e göre düşey eleman süreksizliği düzensizliği.....   | 6  |
| Şekil 2.1: Yatay yük parametresi – yerdeğiştirme davranışları. ....  | 14 |
| Şekil 2.2: Dış yükler etkisindeki katı bir cisime ait yükleme-boşaltma diyagramı. ....   | 15 |
| Şekil 2.3: İdealleştirilmiş malzeme davranışları. ....   | 16 |
| Şekil 2.4: Yumuşak sınıftaki donatı için tipik gerilme-şekildeğiştirme-diyagramı. ....   | 17 |
| Şekil 2.5: Donatı gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarına ait idealleştirmeler. ....  | 17 |
| Şekil 2.6: Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı. ....  | 19 |
| Şekil 2.7: Betonarme eleman için sargılama parametreleri. ....   | 20 |
| Şekil 2.8: Düzlem çubuk elemanda iç kuvvetler ve şekildeğiştirmeler. ....  | 21 |
| Şekil 2.9: Farklı kesit zorlarına ait bünye denklemleri. ....  | 22 |
| Şekil 2.10: Tipik bir karşılıklı etki diyagramı. ....  | 23 |
| Şekil 2.11: Betonarme enkesitlere ait tipik moment-eğrilik davranışı.....  | 23 |
| Şekil 2.12: Betonarme kesitlerde akma eğrisi (karşılıklı etki diyagramı).....  | 24 |
| Şekil 2.13: Yayılı plastik davranış modeli ve plastik mafsallık hipotezi için idealleştirilmiş moment-eğrilik diyagramları. .... | 25 |
| Şekil 2.14: İdealleştirilmiş normal kuvvet-birim boy değişmesi diyagramı. ....   | 25 |
| Şekil 2.15: Betonarme elemanlarda akma eğrisinin doğrusallaştırılması. ....  | 26 |
| Şekil 2.16: Moment – eğrilik davranışının idealleştirilmesi. ....  | 26 |
| Şekil 2.17: Tipik bir dikdörtgen enkesit için şekildeğiştirme profili, gerilme ve kuvvetler. ....                                | 28 |
| Şekil 2.18: Farklı birim şekildeğiştirme durumlarını ifade eden tipik moment – eğrilik davranışı.....                            | 29 |
| Şekil 2.19: Yığılı ve yayılı plastik davranış modelleri.....   | 29 |
| Şekil 2.20: Tipik bir betonarme kolon üzerinde şekildeğiştirme durumu.....   | 30 |
| Şekil 2.21: Tipik kolon enkesit için fiber model.....  | 30 |
| Şekil 2.22: Betonarme enkesite ait gerçek ve idealleştirilmiş eğilme momenti-eğrilik diyagramları.....                           | 31 |
| Şekil 2.23: Elastik ve plastik bölgedeki iç kuvvet ve şekildeğiştirmeler.....  | 32 |
| Şekil 2.24: Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramının temel esasları.....   | 33 |
| Şekil 2.25: Bina performans düzeyleri ve bölgeleri.....  | 34 |
| Şekil 2.26: %5 sönümlü yatay ivme tasarım spektrumu. ....  | 36 |
| Şekil 2.27: %5 sönümlü düşey ivme tasarım spektrumu. ....  | 38 |
| Şekil 2.28: Kapasite eğrisinin elde edilmesi. ....   | 39 |
| Şekil 2.29: Tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik davranışı. ....  | 40 |
| Şekil 2.30: Rayleigh sönüm modeli. ....  | 41 |
| Şekil 3.1: Transfer kirişi uzunluğu 2m olan bina sistemleri için kat planı. ....   | 44 |
| Şekil 3.2: Transfer kirişi uzunluğu 3 <sup>m</sup> olan bina sistemleri için kat planı. ....                                     | 44 |
| Şekil 3.3: Transfer kirişi uzunluğu 4 <sup>m</sup> olan bina sistemleri için kat planı. ....                                     | 44 |
| Şekil 3.4: 3KC sistemlerde C-C aksı çerçevesi.....   | 46 |
| Şekil 3.5: 5KC sistemlerde C-C aksı çerçevesi.....   | 46 |
| Şekil 3.6: 7KC sistemlerde C-C aksı çerçevesi.....   | 46 |
| Şekil 4.1: 3KC çerçeve sistemlerine ait kat yerdeğiştirme profilleri. ....   | 59 |
| Şekil 4.2: 5KC çerçeve sistemlerine ait kat yerdeğiştirme profilleri. ....   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4.3: 7KC çerçeve sistemlere ait kat yerdeğiştirme profilleri. ....              | 60 |
| Şekil 4.4: Çerçeve sistemlere ait ortalama kat yerdeğiştirme profilleri. ....         | 60 |
| Şekil 4.5: 3KC çerçeve sistemlere ait görelı kat öteleme profilleri. ....             | 62 |
| Şekil 4.6: 5KC çerçeve sistemlere ait görelı kat öteleme profilleri. ....             | 63 |
| Şekil 4.7: 7KC çerçeve sistemlere ait görelı kat öteleme profilleri. ....             | 63 |
| Şekil 4.8: Çerçeve sistemlere ait ortalama görelı kat öteleme profilleri. ....        | 64 |
| Şekil 4.9: 3KC çerçeve sistemlerde ortalama kırış plastik dönme talepleri.....        | 66 |
| Şekil 4.10: 5KC çerçeve sistemlerde ortalama kırış plastik dönme talepleri.....       | 67 |
| Şekil 4.11: 7KC çerçeve sistemlerde ortalama kırış plastik dönme talepleri.....       | 67 |
| Şekil 4.12: Çerçeve sistemlerde ortalama kırış plastik dönme profilleri. ....         | 68 |
| Şekil 4.13: 3KC sistemlerde ortalama kolon birim boy değişmesi talepleri.....         | 70 |
| Şekil 4.14: 5KC sistemlerde ortalama kolon birim boy değişmesi talepleri.....         | 70 |
| Şekil 4.15: 7KC sistemlerde ortalama kolon birim boy değişmesi talepleri.....         | 71 |
| Şekil 4.16: Çerçeve sistemlerde ortalama kolon birim boy değişmesi profilleri. ....   | 71 |
| Şekil 4.17: 3KC_L2 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 74 |
| Şekil 4.18: 3KC_L3 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 75 |
| Şekil 4.19: 3KC_L4 çerçeve sisteminde plastik kesitlerin dağılımı. ....               | 76 |
| Şekil 4.20: 5KC_L2 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 77 |
| Şekil 4.21: 5KC_L3 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 78 |
| Şekil 4.22: 5KC_L4 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 79 |
| Şekil 4.23: 7KC_L2 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 80 |
| Şekil 4.24: 7KC_L3 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 81 |
| Şekil 4.25: 7KC_L4 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı. .... | 82 |
| Şekil A.1: EQ1– Kern County depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....              | 90 |
| Şekil A.2: EQ2– San Fernando depremine ait yatay ve dūřey bileřenler. ....            | 90 |
| Şekil A.3: EQ3– Imperial Valley-06 depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....       | 91 |
| Şekil A.4: EQ4– Irpinia_Italy-01 depremine ait yatay ve dūřey bileřenler. ....        | 91 |
| Şekil A.5: EQ5– Taiwan SMART1(45) depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....        | 91 |
| Şekil A.6: EQ6– Loma Prieta depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....              | 92 |
| Şekil A.7: EQ7– Landers” depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....                 | 92 |
| Şekil A.8: EQ8– Northridge-01 depremine ait yatay ve dūřey bileřenler. ....           | 92 |
| Şekil A.9: EQ9– Kocaeli_Turkey depremine ait yatay ve dūřey bileřenler. ....          | 93 |
| Şekil A.10: EQ10– Chi_Chi_Taiwan depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....         | 93 |
| Şekil A.11: EQ11– Nenana Mountain depremine ait yatay ve dūřey bileřenler.....        | 93 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| <b>Tablo 2.1:</b> Yapı sistemlerin doğrusal olmama nedenleri. ....                                | 13 |
| <b>Tablo 2.2:</b> Farklı donatı sınıfları için karakteristik değerler. ....                       | 18 |
| <b>Tablo 2.3:</b> Yeni yapılacak betonarme binalar için performans hedefleri. ....                | 35 |
| <b>Tablo 2.4:</b> Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları. ....                    | 37 |
| <b>Tablo 2.5:</b> 1.0 sn periyot için yerel zemin etki katsayıları. ....                          | 37 |
| <b>Tablo 2.6:</b> Performans düzeylerine karşı gelen şekildeğiştirme sınırları. ....              | 42 |
| <b>Tablo 3.1:</b> Betonarme yapıların tasarımında dikkate alınan parametreler. ....               | 45 |
| <b>Tablo 3.2:</b> Kolon elemanların enkesit boyutları ve donatı özellikleri. ....                 | 47 |
| <b>Tablo 3.3:</b> 3KC_L2 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 48 |
| <b>Tablo 3.4:</b> 3KC_L3 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 48 |
| <b>Tablo 3.5:</b> 3KC_L4 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 48 |
| <b>Tablo 3.6:</b> 5KC_L2 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 49 |
| <b>Tablo 3.7:</b> 5KC_L3 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 49 |
| <b>Tablo 3.8:</b> 5KC_L4 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 49 |
| <b>Tablo 3.9:</b> 7KC_L2 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....          | 50 |
| <b>Tablo 3.10:</b> 7KC_L3 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.....          | 50 |
| <b>Tablo 3.11:</b> 7KC_L4 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri. ....         | 51 |
| <b>Tablo 3.12:</b> Deprem yer hareketlerine ait yatay ve düşey ivme kayıtlarının özellikleri. ... | 54 |
| <b>Tablo 3.13:</b> Farklı periyotlara sahip çerçeve sistemlerin ölçek katsayıları. ....           | 55 |
| <b>Tablo 4.1:</b> Kat yerdeğiştirme taleplerine ait rölatif değişimler. ....                      | 61 |
| <b>Tablo 4.2:</b> Göreli kat öteleme taleplerine ait rölatif değişimler. ....                     | 64 |
| <b>Tablo 4.3:</b> Kiriş plastik dönme taleplerine ait rölatif değişimler. ....                    | 68 |
| <b>Tablo 4.4:</b> Kolon birim boy değişimi taleplerine ait rölatif değişimler. ....               | 72 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $A$                   | : İvme ( $m/s^2$ )  |
| $F$                   | : Kuvvet (N)  |
| $A_{sx}, A_{sy}$      | : x ve y eleman eksenleri doğrultusundaki toplam sargı donatısı alanı             |
| $a_0, a_1$            | : Herhangi bir modda istenen sönüm oranları katsayıları                           |
| $a_0$                 | : Düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklık                                  |
| $b_c, d_c$            | : Etriye eksenleri arasındaki çekirdek alanının x ve y eksenlerindeki uzunlukları |
| $b_0$                 | : Göbek betonunu sargılayan etriyenin eksenleri arasında kalan enkesit boyutu     |
| $b_w$                 | : Enkesit genişliği   |
| $c$                   | : Tarafsız eksen derinliği  |
| $C_{si}$              | : Basınç bölgesindeki donatı kuvvetleri   |
| $C_{ci}$              | : Beton dilimlerine karşı gelen basınç kuvvetleri                                 |
| $d$                   | : Etkin enkesit yüksekliği  |
| $d_b$                 | : Boyuna donatı çapı  |
| $D$                   | : Dayanım fazlalığı katsayısı   |
| $E_s$                 | : Donatının elastisite modülü   |
| $EI_{el}$             | : Elastik bölgedeki eğilme rijitliği  |
| $EI_{pl}$             | : Akma sonrası plastik eğilme rijitliği   |
| $E_{sec}$             | : Sekant elastisite modülü  |
| $EI_{ef}$             | : Enkesitin etkin (çatlamış kesit) eğilme rijitliği                               |
| $F_1$                 | : 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı                              |
| $F_S$                 | : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı                            |
| $I$                   | : Bina önem katsayısı   |
| $f_s$                 | : Donatıdaki gerilme  |
| $f_c$                 | : Beton basınç gerilmesi  |
| $f_{cc'}$             | : Sargılı betonun basınç dayanımı   |
| $f_{sy}, f_y, f_{yk}$ | : Donatının akma dayanımı   |
| $f_{co'}, f_{c'}$     | : Sargısız betonun basınç dayanımı  |
| $f_{su}, f_u$         | : Donatının kopma dayanımı  |
| $f_{yh}$              | : Sargı donatısının akma dayanımı   |
| $h$                   | : Enkesit yüksekliği  |
| $h_0$                 | : Göbek betonunu sargılayan etriyenin eksenleri arasında kalan kesit boyutu       |
| $H_N$                 | : Bina toplam yüksekliği  |
| $k$                   | : Rijitlik matrisi  |
| $l_p$                 | : Plastik mafsal uzunluğu   |
| $L_s$                 | : Kesme açıklığı  |
| $N_p$                 | : Sabit eğilme momenti altında enkesitin normal kuvvet taşıma kapasitesi          |
| $m$                   | : Kütle matrisi   |
| $M_w$                 | : Deprem yer hareketinin moment büyüklüğü   |
| $s, s'$               | : İki boyuna donatı arasındaki net uzaklık ile merkezler arası uzaklık            |
| $S_{ae}(T)$           | : Yatay elastik tasarım spektral ivme katsayısı                                   |
| $S_{aeD}(T)$          | : Düşey elastik tasarım spektral ivme katsayısı                                   |
| $S_{DS}$              | : Kısa periyot elastik tasarım spektral ivme katsayısı                            |
| $S_{D1}$              | : 1.0 saniye periyot için elastik tasarım spektral ivme katsayısı                 |
| $S_S$                 | : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı                                     |
| $S_1$                 | : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı                          |
| $PGA$                 | : En büyük yer ivmesi değeri  |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $R$                               | : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı   |
| $T$                               | : Doğal titreşim periyodu  |
| $T_A, T_B$                        | : Yatay elastik tasarım ivme spektrumunun köşe periyotları                             |
| $T_L$                             | : Yatay elastik tasarım ivme spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu |
| $T_{AD}, T_{BD}$                  | : Düşey elastik tasarım spektrumundaki köşe periyotları                                |
| $T_{LD}$                          | : Düşey elastik tasarım spektrumundaki geçiş periyodu                                  |
| $T_{si}$                          | : Çekme bölgesindeki donatı kuvvetleri   |
| $(V_s)_{30}$                      | : Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı   |
| $\delta_i$                        | : Binanın $i$ 'inci katındaki yerdeğiştirme talebi                                     |
| $\Delta_i$                        | : Binanın $i$ 'inci katındaki görelî kat öteleme talebi                                |
| $\xi$                             | : Sönüm oranı  |
| $\xi_n$                           | : $n$ . titreşim moduna ait sönüm oranı  |
| $\varepsilon$                     | : Birim boy değişmesi  |
| $\varepsilon_{co}$                | : Sargısız betonun akma şekildeğiştirmesi  |
| $\varepsilon_{sh}$                | : Donatıdaki pekleşme birim şekildeğiştirmesi  |
| $\varepsilon_c$                   | : En dış beton basınç lifindeki birim boy kısalması                                    |
| $\varepsilon_{cu}$                | : Betonun birim boy değişme kapasitesi   |
| $\varepsilon_{su}$                | : Donatının birim boy değişmesi kapasitesi   |
| $\varepsilon_s$                   | : Donatıdaki birim boy değişmesi   |
| $\varepsilon_e, \varepsilon_{sy}$ | : Donatının akma birim boy değişmesi   |
| $\varepsilon_{sm}$                | : Sargı donatısına ait birim boy değişmesi kapasitesi                                  |
| $\phi_u$                          | : Nihai akma eğriliği  |
| $\phi_{y'}$                       | : İlk akma eğriliği  |
| $\phi_y$                          | : Eşdeğer akma eğriliği  |
| $\phi$                            | : Eğrilik  |
| $\phi_p$                          | : Plastik eğrilik  |
| $w_i$                             | : Enkesitte komşu iki boyuna donatı arasındaki net uzaklık                             |
| $\omega_n$                        | : $n$ . titreşim moduna ait doğal frekans  |
| $\omega_{we}$                     | : Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı   |
| $\rho_x, \rho_y$                  | : $x$ ve $y$ eksenlerindeki enine donatının hacimsel oranı                             |
| $\rho_{cc}$                       | : Toplam boyuna donatı alanının sargılı göbek betonu alanına oranı                     |
| $\rho_s$                          | : Enkesitteki enine sargı donatısının toplam hacimsel oranı                            |
| $\sigma$                          | : Gerilme  |
| $\theta_p$                        | : Plastik dönme  |

## KISALTMALAR

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>ABYYHY-1968</b> | : Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1968)   |
| <b>ABYYHY-1975</b> | : Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1975)   |
| <b>ABYYHY-1998</b> | : Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1998)   |
| <b>BHB</b>         | : Belirgin Hasar Bölgesi   |
| <b>BKS</b>         | : Bina Kullanım Sınıfı   |
| <b>BYS</b>         | : Bina Yükseklik Sınıfı  |
| <b>DBYBHY-2007</b> | : Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) |
| <b>DTS</b>         | : Deprem Tasarım Sınıfı  |
| <b>GB</b>          | : Göçme Bölgesi  |
| <b>GÖ</b>          | : Göçmenin Önlenmesi   |
| <b>İHB</b>         | : İleri Hasar Bölgesi  |
| <b>KH</b>          | : Kontrollü Hasar  |
| <b>KK</b>          | : Kesintisiz Kullanım  |
| <b>PEER</b>        | : Pacific Earthquake Engineering Research Center                   |
| <b>SH</b>          | : Sınırlı Hasar  |
| <b>SHB</b>         | : Sınırlı Hasar Bölgesi  |
| <b>TBDY-2018</b>   | : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)                           |
| <b>PDTD</b>        | : Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme                      |
| <b>TDTH</b>        | : Türkiye Deprem Tehlike Haritası                                  |
| <b>TS-500</b>      | : Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapıl Kuralları                   |
| <b>ZTADOA</b>      | : Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz                     |

## **ÖNSÖZ**

Bu tez çalışma sürecim boyunca başta, bilgi ve tecrübesiyle bana ilham verdiği ve rehberlik ettiği için değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Umut HASGÜL'e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Sadece akademik değil, insani olarak da bana değerli katkılarından dolayı sonsuz minnettarlığımı ifade etmek isterim. Lisansüstü eğitimim boyunca yol gösteri olarak bilgi, deneyim ve yardımlarıyla güç veren ve motivasyonumu canlı tutan değerli hocam Doç. Dr. Nuray GEDİK'e derin teşekkürlerimi ifade ederim. Çalışmam boyunca sürece katkı veren çalışmanın tamamlanmasına emeği olan günlere gelmemde pay sahibi tüm hocalarıma minnettarlığımı belirtmek isterim.

Tüm bu süreçte bana sevgisi ve desteğiyle güç veren ve her zaman yanımda bulunan aileme sonsuz teşekkür ederim. Bu çalışmanın, gelecekte benzer hayalleri olan herkes için ilham kaynağı olmasını dilerim.

**Balıkesir, 2025**

**Orkun Alper TURHAN**

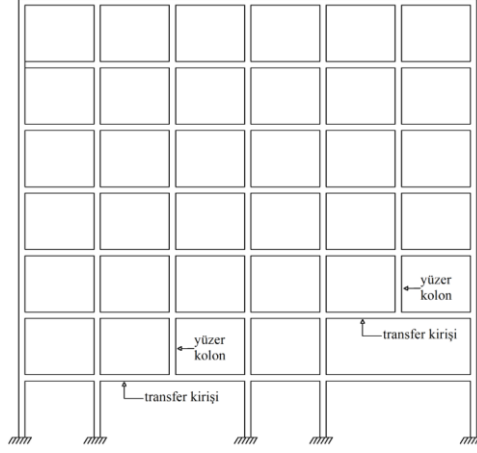
# 1. GİRİŞ

## 1.1 Konu

Geçmişten günümüze ülkemizde yaşanan şiddetli depremler sonrasında meydana gelen maddi ve manevi kayıpların en aza indirilmesi amacıyla gelişen teknoloji, mühendislik analiz yöntemlerinin hızla güncellenmesi ve inşaat yapım tekniklerine paralel olarak deprem yönetmelikleri belirli periyotlarda iyileştirilmektedir. Son yıllarda, binaların projelendirme ve tasarımında imar planlarından kaynaklı zorunluluklar, mimari ihtiyaç ve talepler doğrultusunda yapı stoğu içerisinde sıklıkla düzensiz taşıyıcı sistemli binaların öne çıktığı görülmektedir. Pek çok ülkede olduğu gibi ülkemizde de özellikle zemin katlarda işyeri, otopark, lobi, toplantı salonu vb. kullanım amaçlı mimari gereksinimleri karşılamak amacıyla bina sistemlerinin düşey taşıyıcı eleman süreksizliğini içerecek şekilde tasarlandığı ve inşa edildiği bilinmektedir. Bununla birlikte, binaların servis ömrü boyunca ilave kullanım alanları yaratmak amacıyla kontrolsüz bir şekilde tasarım dışı düşey eleman kaldırılması suretiyle yanlış ve çok tehlikeli uygulamalara gidildiği de sıklıkla görülmektedir.

Yatay deprem yükleri altında yapısal davranışı negatif etkileyebilme potansiyeli bulunan düzensizlikler, genel olarak, modern deprem yönetmeliklerinde planda ve düşeyde olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmaktadır. Bunlardan, deprem mühendisliğinin araştırma konularından biri olan ve taşıyıcı eleman süreksizliği olarak isimlendirilen düşey düzensizlik durumu, düşey taşıyıcı elemanların (kolon ve perde) bazı kat veya katlarda (çoğunlukla zemin katta) kaldırılarak doğrudan kirişlerin üstüne oturtulması ve süreksiz halde teşkil edilmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır.

Bununla birlikte, perdelerin alt katta devam etmeksizin kolonlara oturtulması ve düşey taşıyıcıların bir konsol veya guse ucuna mesnetlendirilmesi durumları da düşey düzensizlik grubu içerisinde tanımlanmaktadır. Bu tür düzensiz taşıyıcı sisteme sahip bina sistemlerinde süreksiz kolona “*yüzer kolon*” (floating column veya hanging column), kolonun mesnetlendiği kirişe “*transfer kirişi*” (transfer beam) özel isimlerinin verildiği görülmektedir (Şekil 1.1).



**Şekil 1.1:** Bina türü taşıyıcı sistemlerde süreksiz kolon düzensizliği.

Transfer kirişlerinde sünek davranışın sağlanması ve gevrek kırılmanın önlenmesine yönelik deprem yönetmeliklerinde özel tasarım kriterleri getirmekle birlikte, kolon süreksizliğinin tasarım dışında kontrolsüz yapılması halinde bu elemanların yatay ve düşey deprem etkileri altında muhtemel gevrek davranış göstererek kırılması sonucunda yapı sisteminde, yeniden dağılım etkisi ile birlikte, sistemsel bazlı istenmeyen mekanizma durumları oluşabilir. Bu düzensizlik durumu, mevcut malzeme kalitesindeki yetersizlikler, tasarım, işçilik ve uygulama hataları ile yerel zemin koşullarındaki büyütme etkileri ile birleştiğinde, sismik yer hareketi altında bina sistemi için kısmi veya toptan göçme potansiyeli oldukça yüksek hale gelecektir.

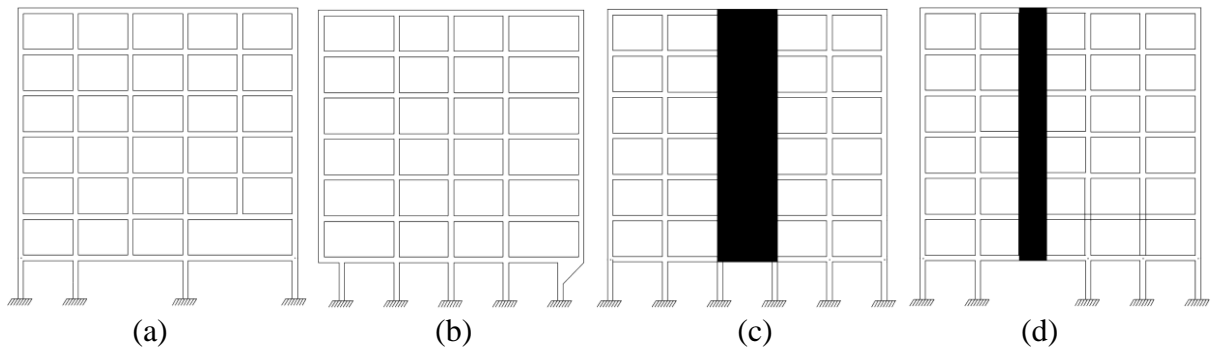
Kolon, perde ve kirişlerin taşıyıcı sistemdeki yerleşimlerine göre farklı şekillerde ortaya çıkabilen düşey eleman süreksizliği düzensizliği, deprem yüklerinin taşıyıcı elemanlardan temele aktarılması yolunda süreksizlik yaratması nedeniyle iç kuvvet, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme büyüklükleri üzerinde olumsuz ve belirsiz etkilere neden olabilmekte ve ayrıca, sismik etkiler altında ikinci mertebeye etkiler ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, kaldırılan düşey taşıyıcı eleman nedeniyle kat rijitliğinde azalma ve buna bağlı sismik yükler altında görece öteleme ve kat kesme kuvvetlerinde önemli artışlar olması kaçınılmazdır.

Ülkemizde yaşanan ve yıkıcı karakter gösteren depremler sonrası sahada yapılan incelemeleri içeren raporlarda, bina sistemlerinde gözlemlenen hasarların başlıca nedenleri; projelendirme, tasarım, malzeme ve uygulama hataları gibi çeşitli etmenler ile kontrol aşamasındaki denetimsizlik olarak sayılabilir.

Düsey eleman süreksizliği düzensizliğine Eurocode 8 (2004), ASCE 41-17 (2017), ASCE 7-16 (2016), FEMA 356 (2000) ve TBDY (2018) gibi modern deprem yönetmelikleri dışındaki yönetmelik, standart ve teknik raporlarda ayrıntılı yer verilmemekle birlikte, belirtilen bu yönetmeliklerde bu düzensizlik durumu özel bir başlıkta ele alınmaktadır.

*Türk Deprem Yönetmeliklerinde Düşeyde Kolon Süreksizliği Düzensizlik Durumu:*

1968 ve 1975 deprem yönetmeliklerinde düşeyde eleman süreksizliği için özel bir tasarım kriteri bulunmamakla birlikte, ABYBHY (1998)'de ve DBYBHY (2007)'de kolon veya perdelerin bir alt katta devam ettirilmeyerek kirişlerin veya guseli kolonların üstüne veya ucuna oturtulması veya üst kat seviyelerinde bulunan perde elemanların alt katta yer alan kolon ya da kirişlere oturtulması durumları şeklinde ifade edilen B3 türünde düşey düzensizlik durumları için özel tasarım esasları sınırlandırmaları getirilmiştir. Her iki yönetmelikte, düşey kolon süreksizliğine sahip taşıyıcı sistemlerde kolonun iki ucundan destekli bir kirişe mesnetlenmesi durumunda, gözönüne alınan deprem doğrultusu için transfer kirişi ile kirişe düğüm noktalarında bağlı tüm elemanların sabit düşey ve deprem yüklerinin ortak etkisi altındaki iç kuvvet değerlerinin %50 oranında artırılmaktadır (Şekil 1.2a). Tüm deprem bölgelerinde geçerli olmak üzere, kolonların konsol kirişlerin üzerine veya alt kat kolonlarında oluşturulan guselerin üstüne veya ucuna oturtulmasına izin verilmemektedir (Şekil 1.2b). Benzer şekilde, perdelerin hiçbir şekilde alt kattaki kolonlara veya kirişlerin üstüne mesnetlendirilmesine izin verilmemektedir (Şekil 1.2c-d).



**Şekil 1.2:** Düşey eleman süreksizliği durumları (ABYBHY, 1998; DBYBHY, 2007; TBDY, 2018).

TBDY (2018)'de, önceki deprem yönetmeliklerine benzer şekilde B3 türü sınıflandırılan düşey düzensizliğe sahip binaların sismik tasarımında %50'lik iç kuvvet artırımı yaklaşımı kaldırılarak, sismik analizlere ait yük birleşimlerinde deprem etkisinin düşey bileşeninin de gözönünde

bulundurulması koşulu getirilmiştir. Buna karşın, 1998 ve 2007 deprem yönetmeliklerinde belirtilen tasarım sınırlandırmaları korunmuştur.

TBDY (2018)'de, a) açıklıkların yataydaki izdüşümü 20<sup>m</sup>'den fazla olan kirişleri bulunan binalar, b) açıklıkların yataydaki izdüşümü 5<sup>m</sup>'den fazla olan konsolları bulunan binalar, c) kirişlere oturan kolonları bulunan binalar ile d) kolonları düşeye göre eğimli olan binalarda (Şekil 1.3) düşey deprem hesabı, bu elemanların yerel düşey titreşim modları esas alınarak sadece bu elemanlar için düşey elastik ivme spektrumu kullanılarak yapılmaktadır. Düşey deprem etkisi  $E_d^{(z)}$ 'in hesabında tüm taşıyıcı sistemler için  $R/I=1$  ve  $D=1$  alınmaktadır (TBDY, 2018). (a)-(d) ile tanımlanan elemanlar dışındaki taşıyıcı sistemde düşey deprem etkisi  $E_d^{(z)}$ , özel bir hesap yapmaksızın (1.1) denklemleri ile hesaplanmakta ve betonarme sistemler için düşey deprem etkisini içeren yük birleşimleri için (1.2) ve (1.3) denklemleri kullanılmaktadır.

$$E_d^z = \frac{2}{3} S_{DS} G \quad (1.1)$$

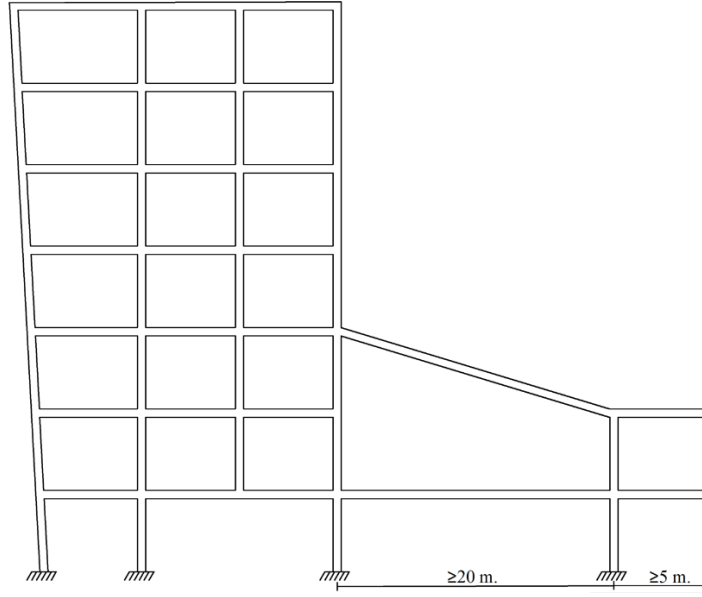
$$G + Q + 0.2S \pm E_d^X \pm 0.3E_d^Y + 0.3E_d^z \quad (1.2a)$$

$$G + Q + 0.2S \pm 0.3E_d^X \pm E_d^Y + 0.3E_d^z \quad (1.2b)$$

$$0.9G + H \pm E_d^X \pm 0.3E_d^Y - 0.3E_d^z \quad (1.3a)$$

$$0.9G + H \pm 0.3E_d^X \pm E_d^Y - 0.3E_d^z \quad (1.3b)$$

Burada;  $G$  sabit yük etkisini,  $S_{DS}$  kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını göstermektedir.  $S$  kar yükü etkisini,  $H$  yatay zemin etkisini,  $E_d^{(X)}$ ,  $E_d^{(Y)}$  ve  $E_d^{(Z)}$ , sırasıyla, X , Y ve Z etkilerini ifade etmektedir.



**Şekil 1.3:** TBDY-2018’de tanımlanan düşey eleman süreksizliği düzensizliği.

*ASCE 7-16 ve 41-17’de Düşey Sınıftaki Düzensizlikler:*

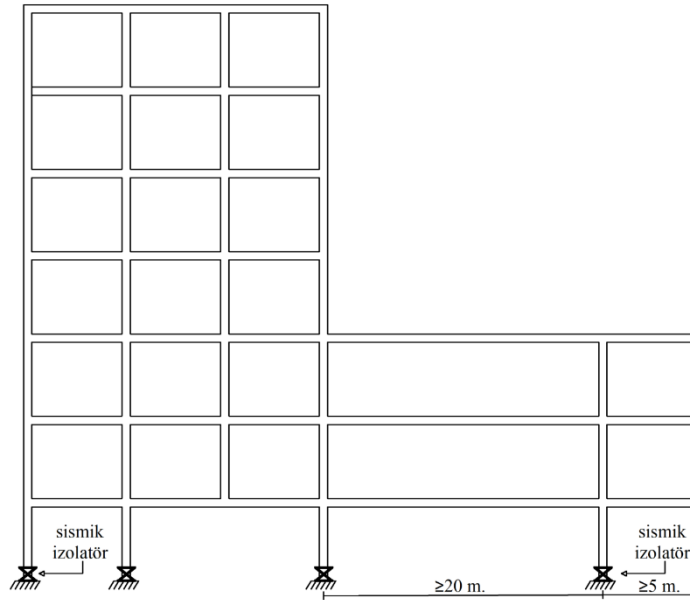
ASCE 7-16 (2016) ve ASCE 41-17 (2017) yönetmeliklerinde düşey yapısal düzensizlikler, yatay deprem yüklerini taşıyan elemanların yapı yüksekliği boyunca plan düzlemindeki sürekliliğini bozacak şekilde kaymış veya ofsetli bir konumda olması veya ani kesintiye uğraması durumu için tanımlanmıştır. Bu düzensizlik altında yatay yük akışı kesintiye uğradığından alt kat elemanlarında ilave devrilme momenti ve kesme kuvvetleri taleplerinin ortaya çıkmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Bu düzensizliğe sahip binaların sismik tasarım kategorisi ve bina yüksekliği parametrelerine göre elastik ötesi statik itme (pushover) analizi veya zaman tanım alanında doğrusal veya doğrusal olmayan analiz yaklaşımlarının kullanılması öngörülmektedir. Ayrıca, bu tür binaların analizleri sonucunda eleman tasarım kuvvetlerinin %25 oranında artırılması gerektiği belirtilmiştir. Bu tür düzensizliğe sahip yapı sistemleri için özel tasarım koşulları gerekmele birlikte, analizlerde doğrusal-elastik statik/dinamik yöntemlerinin kullanımına izin verilmemektedir. ASCE 41-17’ye göre,

Düşey deprem etkileri aşağıda verilen durumlarda hesaba dahil edilmelidir:

- Taşıyıcı sistemde uzun konsol giriş elemanların bulunması,
- Ön germeli elemanları bulunan betonarme sistemlerde,
- Servis yüklemesi altında (sabit ve hareketli) taşıyıcı sistemdeki elemanlarında (kolon/kiriş/döşeme/perde vb.) taşıma gücü kapasitesinin %80’e ulaşılması.

### *Eurocode 8’de Düşeyde Düzensizlik Durumu:*

Eurocode 8 (2004)’de, TBDY (2018)’de belirtilen kriterlere benzer şekilde, 20 m veya daha fazla açıklığa sahip sistemler, 5m’yi aşan yatay konsolları bulunan sistemler, öngermeli kirişleri bulunan sistemler, kolonların bir alt katta devam etmeyerek kirişe mesnetlendirildiği sistemlerden en az birinin oluşması veya sismik taban izolasyonu teşkil edilen yapı sistemlerinin sismik analizlerinde yatay deprem etkisine ilave olarak depremin düşey bileşenin de dikkate alınması zorunludur (Şekil 1.4). Bunun yanısıra, perdelerin doğrudan transfer kirişlerine veya döşemelerin üzerine mesnetlendirilmesine izin verilmemektedir. Süreksiz kolon doğrudan kiriş açıklığının ortasına birleşmeli ve transfer kirişi her iki uçta kolon veya perde eleman ile mesnetlenmelidir. Ayrıca, kolon süreksizliği olan bölgedeki transfer kirişlerinde yeterli sünekliği sağlayabilmek için düğüm noktasının her iki tarafında, kiriş yüksekliğinin iki katı uzunluğunda kapasitesi korunmuş bölgeler oluşturulmaktadır (Eurocode, 2004).



**Şekil 1.4:** Eurocode-8’e göre düşey eleman süreksizliği düzensizliği.

## **1.2 Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar**

Taşıyıcı sisteminde düşey eleman süreksizliği içeren betonarme sistemlerin sismik yükler altındaki davranışları literatürde farklı başlıklar altında incelenmesine karşın, bunlardan şekildeğiştirme esaslı parametreleri ele alan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Sezgin (2022)’de, düşeyde kolon süreksizliği bulunan betonarme binalardaki sismik davranış taleplerini ve bu düzensizliğin yapısal davranışa etkisini irdelemek amacıyla, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerine uygun 7 katlı betonarme perde-çerçeve bir binanın zaman tanım

alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri yapılarak plastik dönme, görelî kat ötelemesi, taban kesme kuvveti, tepe yerdeğiştirme talepleri değerlendirilmiştir. 11 deprem kaydı altındaki sismik analizler sonucunda, kolon süreksizliğinin bulunduğu yapısal elemanlarda plastik mafsalları oluşunu gözlemlenmediği ve bina için kontrollü hasar performans düzeyinin sağlandığı belirlenmiştir.

Koçluk (2019)'da, düşey kolon süreksizliği içeren betonarme binalar için deprem yönetmeliklerindeki yapısal sınırlandırmaların etkisini irdelemek amacıyla, 20 katlı ve 7 açıklıklı perde-çerçeve bir binanın 10. katında kolon süreksizliği oluşturularak tasarımı yapılmıştır. DBYBHY-2007'de yer alan esaslar dahilinde binanın zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri yapılarak, plastik dönme talepleri, görelî kat ötelenme oranları, taban kesme kuvveti ve tepe yerdeğiştirmesi talepleri açısından sistem davranışı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşeyde süreksizliğe sahip bina sisteminde kritik perde yüksekliği boyunca perde enkesitlerindeki oluşan plastik şekildeğiştirmelerin minimum hasar sınırını aşmadığı, ancak kirişe oturan kolonların alt uçlarında büyük plastik dönme değerleri nedeniyle kolonun göçme bölgesine eriştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, kolonun mesnetlendiği transfer kirişlerinde plastik mafsalları oluşmadığı gözlenmiştir. İç kuvvet değerlerinde %50 oranında artım uygulanarak tasarlanan elemanların sınırlı hasar bölgesinde kaldığı tespit edilmiş olup, iki ucu mesnetli kirişlere oturtulan kolonların alt düğüm noktalarında moment aktaran rijit bağlantı yerine mafsalı birleşim şeklinde modellenmesi önerilmiştir.

Faraj (2017)'de, farklı katlarda düşey kolon süreksizliği içeren ve içermeyen (düzenli) betonarme çerçeve binaların deprem etkileri altında plastik dönme, taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme davranışları incelenmiştir. Bunun için, üç ve yedi katlı çerçeve sistemlerde farklı kat ve konumlarda kolonlar kaldırılarak düşeyde düzensizlik durumları oluşturulmuştur. Parametrik çalışma kapsamında ele alınan çerçeve sistemlerin elastik ötesi statik itme (pushover) analizleri sonucunda düzenli sistemlere göre düşeyde süreksiz olan 3 katlı sistemdeki yerdeğiştirmenin aynı kaldığı, buna karşın taban kesme kuvveti değerlerinin %50 oranında azaldığı belirlenmiştir. 7 katlı sistemlerde ise, yerdeğiştirmeler %50 oranında artarken, taban kesme kuvveti %40 azalmıştır.

Ateş (2013)'de, DBYBHY-2007'de düşey kolon süreksizliği içeren sistemler için geçerli olan %50'lik iç kuvvet arttırılması yaklaşımı sayısal olarak irdelenmiştir. Bunun için, 7 katlı ve 4 açıklıklı düzenli çerçeve sistem ile bu sistemin 1. kat orta aksındaki kolonun kaldırıldığı hesap

modellerinin elastik ötesi artımsal statik itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, bu tür düzensizliğe sahip binaların sismik tasarımında iç kuvvetlerin %50 artırılması yaklaşımının yönetmelikteki hedefler bakımından yeterli olduğu belirtilmiştir.

Bozat (2013)'de, DBYBHY-2007'ye göre tasarlanmış ve 16. katından itibaren düşeyde kolon süreksizliği içeren 26 katlı betonarme çerçeve bir yapı sistemi üzerinde %50 oranında iç kuvvetlerin arttırılması koşulu plastik dönme, görelî kat ötelemeleri, taban kesme kuvveti ve yerdeğîştirme talepleri açısından değîlendirilmiştir. Depremin düşey bileşeninin dahil edildiğî zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizler sonucunda, süreksiz kolonların alt ucu ile kirişlere mesnetlik yapan kolonların üst uçlarında plastik mafsâl oluşumları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, düşey kolon süreksizliğî nedeniyle arttırılmış iç kuvvetlere göre tasarlanan elemanlardaki plastik dönme taleplerinin yönetmeliğî belirlediğî güvenlik sınırı ve geçme sınırlarını sağladığî tespit edilmiştir.

Can (2012)'de, düşey kolon süreksizliğînin yapısal davranışa etkisini araştırmak amacıyla, 8 katlı ve 4 açıklıklı bir betonarme bina sisteminin en alt kat kolonlarından biri kaldırılarak tasarımı DBYBHY-2007'e uygun yapılmıştır. Daha sonra, kolon süreksizliğine sahip iki düzlem çerçeve sistemden çıkarılarak zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri gerçekleştirilmiş ve plastik dönme ve kat yerdeğîştirme talepleri değîlendirilmiştir. Kat yerdeğîştirmeleri X doğrultusunda %13 ile %32 arasında, Y doğrultusunda ise %1 ile %15 arasında artış gösterdiğî tespit edilmiştir. Bununla birlikte, zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizlerde ilk plastik mafsâlın yüzer kolonların alt uçlarında oluştuğû belirtilmiştir.

Üner (2009)'de, B3 tipi düzensizlik türlerinden olan perdelerin kirişlere oturtulması durumunun yapısal davranışa olan etkisini incelemek amacıyla, DBYBHY-2007'e göre tasarlanmış 4 katlı betonarme bir binanın zemin katındaki 2 adet perde eleman kaldırılarak elastik ötesi statik itme analizleri yapılmış ve taban kesme kuvveti, tepe yerdeğîştirmesi, plastik dönme talepleri değîlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşeyde kirişlerin üzerine oturtulan perde düzensizliğine sahip bina sisteminde "Can Güvenliğî" performans hedefinin sağladığî belirlenmiştir.

Turhan (2007)'de, B3 türü düzensizliklerden biri olan kolonların alttaki kolonlarda oluşturulan guselerin ucuna oturtulması durumu, 1975 deprem yönetmeliğîne göre tasarlanmış asmolen

döşemeli 7 katlı bir bina üzerinde incelenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen elastik ötesi statik itme analizleri sonucunda, taban kesme kuvveti, tepe yerdeğiştirmesi ve görelî kat ötelemeleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşey düzensizliğe sahip binadaki görelî kat ötelemelerinin %2'nin altında kaldığını göstermiştir. Çalışmada, bu tür yapı sistemlerinin sismik analizlerinde düşey deprem bileşenin de hesaba katılması önerilmiştir.

Gujar ve Jadhav (2019)'da, mimari ihtiyaçlar doğrultusunda zemin katlarda oluşturulan kolon süreksizliği düzensizliğinin yapısal performans üzerindeki etkileri doğrusal-elastik olmayan statik yöntem (inşaat aşamalı analiz) ve doğrusal statik analiz (eşdeğer deprem yükü analizi) yaklaşımları çerçevesinde irdelenmiştir. Bunun için, 11 katlı betonarme bir binanın köşe ve orta akslarındaki bazı zemin kat kolonları kaldırılarak iki farklı model oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda, eşdeğer deprem yükü yöntemine göre inşaat aşamalı analizlerde elde edilen transfer kiriş düşey yerdeğiştirmelerinin kolonun köşede kaldırıldığı model için %60, ortada kaldırıldığı model için ise %45 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, eğilme momenti ve kesme kuvveti bakımından köşe kolonun kaldırıldığı modelde, sırasıyla, %40 ile %50, orta kolonun kaldırıldığı modelde de %26 ile %44 oranlarında arttığı belirlenmiştir.

Aşkoğlu ve Avşar (2017)'de, betonarme yapıların zemin katlarında teşkil edilen düşey kolon süreksizliği durumu doğrusal-elastik olmayan analizler çerçevesinde incelenmiştir. 3, 5 ve 8 katlı düşeyde düzenli çerçeve sistemler ile bunların en alt kat orta aksındaki kolonların kaldırıldığı düzensiz hesap modelleri üzerinde gerçekleştirilen zaman-tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analiz ve elastik ötesi statik itme analizleri sonucunda kat kesme kuvveti ve görelî kat ötelemeleri karşılaştırılmıştır. Bu tür düzensizlik içeren yapı sistemleri için elde edilen sonuçlar, DBYBHY (2007)'de öngörülen tasarım kriterlerinin yeterli olduğunu göstermiştir.

Celep vd. (2013)'de, DBYBHY 2007'de B3 türü düşey düzensizliklerden biri olarak tanımlanan kolonların konsol kirişlere oturtulması durumunun sismik davranışa etkisi incelenmiştir. Bunun için, 7 katlı ve konsol kirişleri olan düzenli bir çerçeve taşıyıcı sistem ile bazı kolonların konsol kirişler üzerine oturtulduğu düzensiz taşıyıcı sistemin elastik-ötesi statik itme ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşeyde düzensiz sisteme ait taban kesme kuvvetinin (yatay yük taşıma kapasitesi) düzenli sisteme kıyasla azaldığını, elastik-ötesi şekildeğiştirmelerin arttığını göstermiştir. Ayrıca, kat yüksekliği arttıkça bu tür yapı sistemlerindeki tepe yerdeğiştirmesi talebinin arttığı belirlenmiştir.

Kara ve Celep (2012)'de, 8 katlı betonarme düzlem çerçeve bir sistemin farklı katlarında kolon süreksizliği durumları oluşturularak düşey düzensizliğin sismik davranış üzerindeki etkileri parametrik incelenmiştir. Her katta kolon süreksizliğinin oluşturulduğu 7 adet hesap modeli üzerinde gerçekleştirilen elastik ötesi artımsal statik analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri sonucunda, kat ötelemesi taleplerinin zaman tanım alanında doğrusal-elastik analize göre %100'den daha fazla arttığı belirlenmiş ve 2007 deprem yönetmeliğinde bu tür sistemler için %50 oranında iç kuvvet arttırımı tasarımı kriterinin yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Thuat (2013)'de, düşey kolon süreksizliğinin sismik davranış talepleri üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla, 1. ve 2. katlarında kolon süreksizliği bulunan 7, 8 ve 15 katlı betonarme düzlem çerçeve sistemlerin 29 adet deprem yer hareketi altında zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kolon süreksizliği bulunan katlarda göçme durumunun önlenmesi için tasarımı yönelik bir kat dayanım faktörü önerilmiş ve maksimum göreceli kat ötelemesine bağlı olarak bu parametre karşılaştırılmıştır. Önerilen faktörün değeri arttıkça sistemlere ait göçme mekanizması olasılığının azaldığı belirtilmiştir.

Doğan ve Elmas (2004)'de, düşey kolon süreksizliği bulunan betonarme bir bina sistemi üzerinde düşey deprem etkisinin yapısal davranışa etkisini incelemek amacıyla, 9 katlı, 3 açıklıklı ve 2 katlı, 3 açıklıklı iki adet çerçeve sistemde zemin kat orta aksında kolon süreksizliği oluşturularak tasarımları ABYYH (1998)'e uygun yapılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal analizleri çerçevesinde kolon süreksizliği ile 9 katlı sistemdeki iç kuvvetlerde belirgin bir değişim olmaz iken, 2 katlı sistemde iç kuvvetlerde artışlar belirlenmiştir.

### **1.3 Amaç ve Kapsam**

Bu tez çalışmasında, TBDY-2018'de B3 türü düşey düzensizlik olarak sınıflandırılan düşeyde kolon süreksizliğine sahip betonarme bina sistemlerinin DD-2 seviyesindeki deprem etkisi altındaki sismik davranışlarının doğrusal-elastik olmayan teori çerçevesinde araştırılması amaçlanmıştır. Bu sayede, yönetmeliğe göre tasarlanmış bu tür binaların öngörülen performans hedeflerini hangi oranda sağladıkları parametrik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, orta iki açıklığı değişken olarak seçilen ( $L=2^m$ ,  $3^m$  ve  $4^m$ ) ve toplam dört açıklıktan oluşan 3, 5 ve 7 katlı süneklilik düzeyi yüksek çerçeve sistemlerde zemin kat orta aks kolonu kaldırılarak düşey kolon süreksizlikleri oluşturulmuş ve bina tasarımları TBDY-2018'deki esaslar çerçevesinde yapılmıştır. Planda herhangi bir düzensizliği bulunmayan bina sistemlerinde eleman

süreksizliğinin bulunduğu düzlem çerçeve çıkarılarak dokuz farklı hesap modeli oluşturulmuştur. Bu sistemlerin 11 adet ölçeklendirilmiş gerçek deprem yer hareketi kaydının yatay ve düşey bileşenleri altında zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizleri yapılarak şekildeğiştirme bazlı davranış büyüklükleri ile gevrek davranışa ilişkin talepler elde edilmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonuçlarına ait ortalama değerler esas alınarak, eleman ve sistem bazlı davranış talepleri (kat yerdeğiştirmesi, görelî kat ötelemesi, kiriş ve kolonlardaki plastik şekildeğiştirmeler ve plastik mafsalların sistem üzerindeki dağılımları) TBDY-2018'de verilen sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir.

## 2. YAPI SİSTEMLERİNİN ŞEKİLDEĞİŞTİRME BAZLI DAVRANIŞI VE TBDY-2018'DEKİ PERFORMANSA DAYALI TASARIM VE DEĞERLENDİRME KAVRAMI

İşletme yükleri ile küçük deprem yer hareketleri altında yapı sistemlerinin doğrusal-elastik davranış göstermesi beklenir. Bir yapı sisteminin yatay deprem yüklerini güvenle zemine aktarabilmesi için yeterli dayanım, rijitlik ve sünekliğe sahip olması gereklidir. Yapı sistemleri için öngörülen süneklik sayesinde, deprem etkileri altında istenmeyen hasar ve göçme modlarının önüne geçilerek güvenli ve kontrollü bir bina performans hedefinin sağlanması amaçlanır. Bu bağlamda, hemen hemen tüm deprem yönetmeliklerinde uygulanan dayanım (kuvvet) esaslı geleneksel tasarım yaklaşımında, dış etkiler altında taşıyıcı elemanlarda oluşacak artırılmış iç kuvvetler elemanların mevcut malzeme özellikleri kullanılarak hesaplanan taşıma güçleri ile kontrol edilir. Bu tasarım yaklaşımında, temel olarak, yapı sistemi için hesaplanan doğrusal-elastik deprem kuvvetleri öngörülen süneklik düzeyine bağlı bir taşıyıcı sistem katsayısı ( $R$ ) ile azaltılarak sismik yer hareketleri altındaki doğrusal-elastik olmayan davranışın elde edilmesi beklenir. Bu sayede, işletme yükleri ve küçük servis depremleri altında malzeme/enkesit/eleman ve sistem bazında doğrusal-elastik davranış büyük ölçüde sağlanırken, yönetmeliklerde öngörülen tasarım depremi seviyesi ve ötesindeki deprem yer hareketleri altında kontrollü bir elastik ötesi davranışın oluşması beklenmektedir. Sismik yükler altında yapı sistemlerinde oluşacak hasar oluşumları doğrudan eleman ve sistem bazlı şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmeler ile ilişkili olduğundan, taşıyıcı sistemde oluşacak hasar dağılımı ile bunların düzeyi kuvvete dayalı bir tasarım yaklaşımı ile belirlenmez. Pek çok deprem yönetmeliğinde de yer almaya başlayan performans dayalı tasarım ve değerlendirme kavramı içerisinde yapılan şekildeğiştirme bazlı analizler sayesinde hasara ilişkin değerlendirmeler daha gerçekçi elde edilebilmektedir. Bu noktada, malzeme/enkesit/eleman ve sistem bazlı davranış büyüklüklerinin doğrusal-elastik olmayan teori çerçevesinde ele alınması büyük önem arz etmektedir.

### 2.1 Çözüm için Gerekli Koşullar

Dış etkiler altındaki bir yapı sisteminin taşıyıcı sistem elemanlarında oluşacak iç kuvvet, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmelerin çözümü için üç denge koşulunun sağlanması gereklidir. Bunlar;

- *Bünye denklemleri*: Malzemenin gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarıdır.
- *Denge denklemleri*: Sistem elemanlarında ve düğüm noktalarında yazılan moment ve izdüşüm denge denklemleridir.

- *Geometrik uygunluk koşulları*: Sistem elemanlarında ve düğüm noktalarının süreklilik denklemleri ile mesnetlerdeki geometrik koşullardır. (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).

## 2.2 Dış Yükler Altında Yapı Sistemlerinin Doğrusal-Elastik Olmayan Davranışı

Servis yükleri ile yatay deprem yüklerine etkisinde maruz bir yapı sisteminin doğrusal-elastik davranış göstermemesi, genel olarak, malzemenin doğrusal-elastik olmaması nedeniyle bünye bağıntılarının doğrusal olmaması ve geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin ve süreklilik denklemlerinin doğrusal olmaması sebebiyledir (Özer, 2009). Yatay yükler altında yapı sistemlerinin doğrusal-elastik davranış göstermeme nedenleri ve bunlara ait hesap yöntemleri Tablo 2.1’de özetlenmiştir. Yerdeğiştirmelerin küçük olmadığı durumlarda; denge denklemleri sistemin şekildeğiştirmiş eksenini üzerinde yazılırken, geometrik süreklilik denklemlerinin de şekildeğiştirmiş sistem ekseninde yazılması gerekmektedir (Özer, 2009).

**Tablo 2.1:** Yapı sistemlerin doğrusal olmama nedenleri (Özer, 2009).

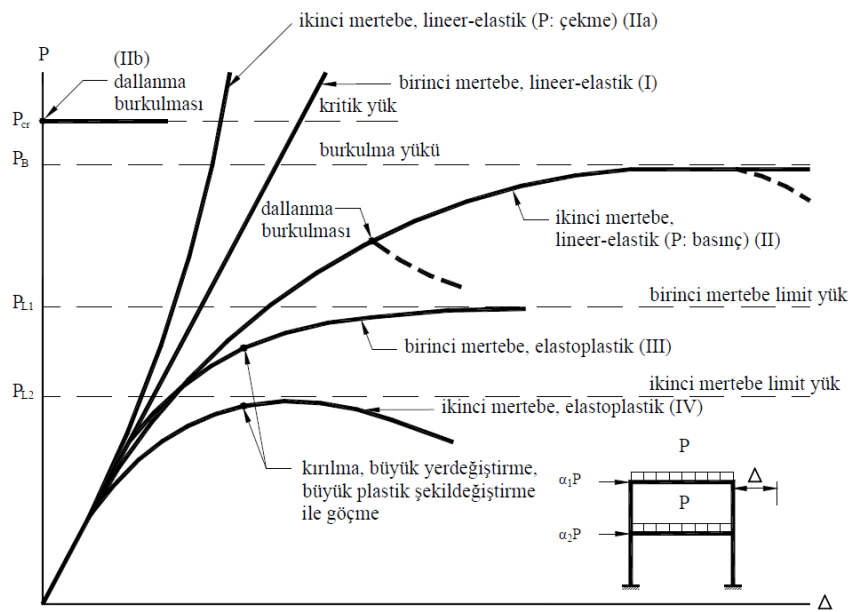
| Çözümün sağlanması gereken koşullar              | Doğrusal-elastik davranış gösteren sistemler | Doğrusal-elastik davranış göstermeyen sistemler |  |                             |  |                             |
|--|--|---|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
|  |  | Sadece malzeme bakımından                       | Sadece geometri değişimleri bakımından |                             | Malzeme ve Geometri değişimleri bakımından |                             |
|  |  |   | İkinci merteye teorisi                 | Sonlu yerdeğiştirme teorisi | İkinci merteye teorisi                     | Sonlu yerdeğiştirme teorisi |
| Bünye bağıntıları                                | <i>L</i>                                     | <i>NL</i>                                       | <i>L</i>                               | <i>L</i>                    | <i>NL</i>                                  | <i>NL</i>                   |
| Denge denklemlerinde yerdeğiştirmeler            | <i>K</i>                                     | <i>K</i>  | <i>B</i>                               | <i>B</i>                    | <i>B</i>                                   | <i>B</i>                    |
| Geometrik uygunluk koşullarında yerdeğiştirmeler | <i>K</i>                                     | <i>K</i>  | <i>K</i>                               | <i>B</i>                    | <i>K</i>                                   | <i>B</i>                    |

*L*: Doğrusal-elastik    *NL*: Doğrusal-elastik değil    *K*: Küçük    *B*: Büyük

Dış yükler etkisindeki bir yapı sisteminin doğrusal ve doğrusal-elastik olmayan davranışlarına ilişkin tipik yük-yatay yerdeğiştirme davranışları Şekil 2.1’de özetlenmiştir. Burada, (I eğrisi) ile gösterilen *birinci merteye teorisine* göre davranışta, malzeme davranışının tamamen doğrusal-elastik kaldığı varsayımı ile dış yüklerin şiddetini ifade eden yük parametresi (*P*) ile yerdeğiştirme orantılı artacaktır. Denge denklemlerinde yerdeğiştirmelerin dikkate alındığı *ikinci merteye teorisine* göre davranışta, normal kuvvetin basınç olması hali için (II eğrisi) artan dış yüklere karşı yerdeğiştirmeler daha hızlı artacaktır. Bunun sonucunda, *P* yük parametresi doğrusal-elastik burkulma yüküne (*P<sub>B</sub>*) ulaştığında, yerdeğiştirmeler aniden sonsuza gider ve sistem burkularak geçer. Normal kuvvetin çekme olması hali için yük parametresi-yerdeğiştirme

grafiği (IIa eğrisi) pekleşme özelliği gösterir (Şekil 2.1). Ayrıca, yatay yük etkisinde olmayan ve burkulmadan önce şekildeğiştirme değiştirmeyen sistemlerde,  $P$  yük parametresi burkulma yüküne eşit veya ondan bir miktar büyük olan kritik yük ( $P_{cr}$ ) değerine eriştiğinde dallanma burkulması (IIb eğrisi) meydana gelir ve sistem aniden göçer. Bu davranış, burkulmadan önce şekildeğiştiren sistemlerde de (bkz. II eğrisi) meydana gelebilir (Özer, 2009).

Malzeme bakımından doğrusal-elastik olmayan davranış gösteren sistemlerde, artan dış yükler sonucunda kritik kesitlerdeki bağımsız veya birleşik iç kuvvetler akma (yield) sınırına ulaştığında, elastik ötesi plastik şekildeğiştirmeler meydana gelir. Enkesit bazlı bu kalıcı şekildeğiştirmeler eleman boyunca yayılı (sürekli) haldedir. Buna ilaveten, sünek malzemeden yapılmış yapı sistemlerinde, *Plastik Mafsallı Hipotezi (Yığılı plastik davranış modeli)* ile plastik şekildeğiştirmelerin plastik mafsal (plastik kesit) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde eleman/sistem davranışının doğrusal-elastik davranış gösterdiği kabul edilebilir. *Plastik mafsallı hipotezinin* esas alındığı ve I. mertebe teorisine göre hesap altında (*I.mertebe elasto-plastik*) oluşacak plastik mafsallar nedeniyle sistemin tümü veya bir kısmı taşıma gücünü kaybeder göçme durumu meydana gelir (III eğrisi). Analizlerin II. mertebe elasto-plastik olması halinde yük parametresi – yerdeğiştirme ilişkisi (IV eğrisi), doğrusal-elastik sınıra kadar II eğrisini izlerken eğrisini izlenirken oluşan plastik şekildeğiştirmeler ve hızlı artan yerdeğiştirme davranışı sonucunda rijitliği azalan sistemin burkulma yükü ( $P_{L2}$ ) dış yük parametresinin altına düşer. Bu durum stabilite yetersizliği nedeniyle sistemi göçme durumuna getirir (Şekil 2.1) (Özer, 2009).

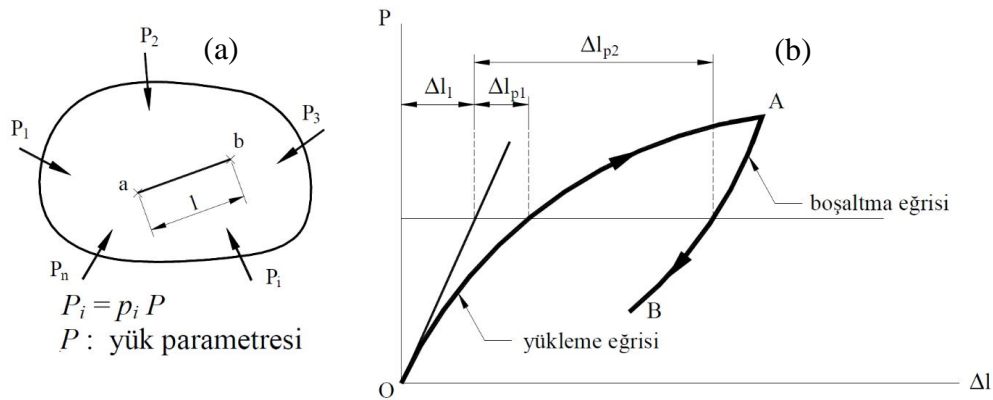


Şekil 2.1: Yatay yük parametresi – yerdeğiştirme davranışları (Özer, 2009).

### 2.3 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler

Malzemenin doğrusal-elastik davranış gösterdiği sistemlerde, gerilme ve şekildeğiştirmeler elastik sınırlar içerisinde. Buna karşın, yatay yüklerin artması ile birlikte iç kuvvet ve şekildeğiştirmeler akma sınırını aşarak plastik bölgeye geçecektir. Buradaki şekildeğiştirmelerin bir kısmı veya tamamı kalıcı (plastik) haldedir. Elastik-ötesi malzeme davranışını göstermek üzere dış yükler ( $P_i$ ) etkisindeki bir cisim Şekil 2.2a'da, uygulanan  $P$  yük parametresi ile  $l$  uzunluğundaki  $\Delta l$  boy değişiminin yükleme ve boşaltma davranışı Şekil 2.2b'de verilmiştir (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).

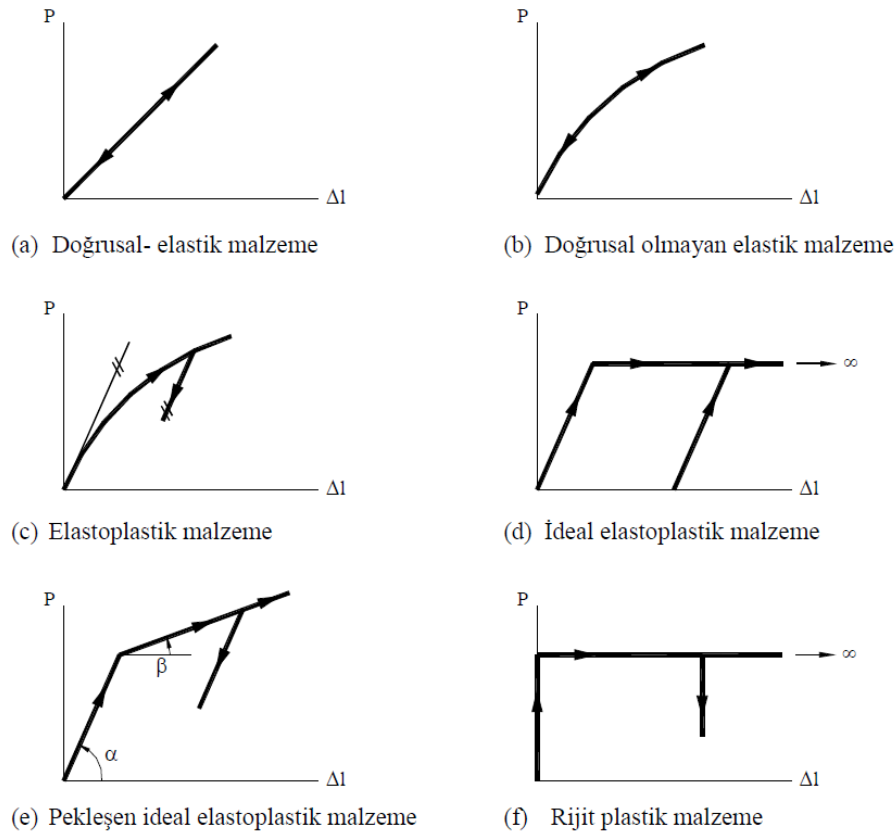
Artan yük parametresi altında diyagramdaki OA kısmı *yükleme eğrisini*, AB kısmı ise yükün kaldırılmasına ilişkin *boşaltma eğrisini* göstermektedir. Eğrinin başlangıç teğeti ile ordinat eksenindeki  $\Delta l_1$  boy değişimleri doğrusal-elastik, başlangıç teğeti ile yükleme ve boşaltma eğrileri arasında kalan  $\Delta l_{p1}$  ve  $\Delta l_{p2}$  boy değişimleri ise doğrusal-elastik olmayan (plastik) şekildeğiştirmelerdir (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).



**Şekil 2.2:** Dış yükler etkisindeki katı bir cisime ait yükleme-boşaltma diyagramı (Özer, 2009).

Yük parametresi ( $P$ )- şekildeğiştirme ( $\Delta l$ ) davranışında idealleştirmeler yapılarak doğrusal olmayan problem daha basit hale getirilebilir (Şekil 2.3). Buna göre, doğrusal-elastik davranışta (a) yük parametresi şekildeğiştirmeler ile doğrusal artarken, doğrusal olmayan elastik davranışta (b) yük parametresi arttıkça şekildeğiştirmeler daha hızlı artan bir karakter gösterir. Her iki elastik davranışta da yükleme ve boşaltma eğrileri aynı eğri üzerindedir (Şekil 2.3a-b). Yükleme ve boşaltma davranışları aynı olmayan, buna karşın teğetleri paralel olan elasto-plastik malzemeler (c), pekleşmesiz (d) ve pekleşmeli (e) karakterlerde iki doğru parçalı idealleştirilebilir. Rijit plastik davranış gösteren malzemelerde (f) ise, doğrusal-elastik şekildeğiştirmeler ihmal edilerek, akma sonrasında sadece plastik şekildeğiştirmeler meydana

gelir ve boşaltma eğrisi  $\Delta l=0$  için OA üzerinde iken,  $\Delta l>0$  için OA'ya paralel haldedir (Şekil 2.3f) (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).



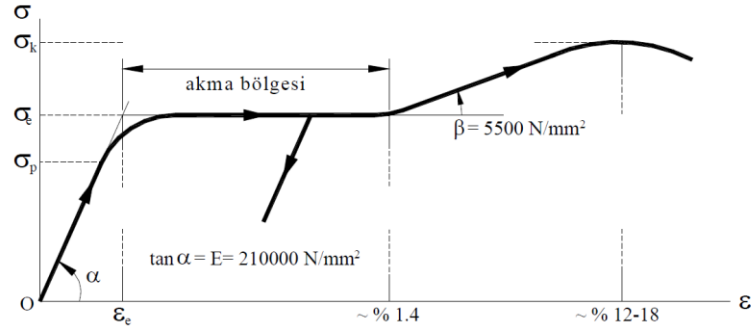
Şekil 2.3: İdealleştirilmiş malzeme davranışları (Özer, 2009).

## 2.4 Malzemelere ait Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

Deprem etkisindeki altındaki yapı sistemlerinin ait doğrusal-elastik olmayan davranışı incelenirken, malzemenin doğrusal-elastik olmayan davranışı önemli bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, taşıyıcı elemanları oluşturan beton ve donatıya (beton çeliği) ilişkin gerilme-şekildeğiştirme davranışları aşağıda ele alınacaktır.

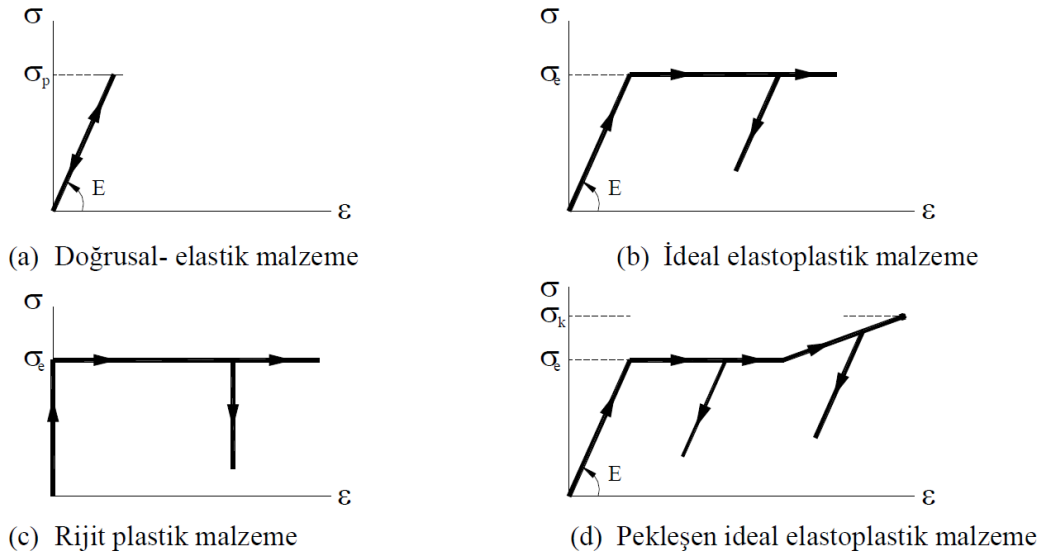
### 2.4.1 Donatı için gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları

Yapı sistemlerinde yaygın olarak kullanılan yumuşak sınıftaki donatı için tek eksenli tipik gerilme-şekildeğiştirme davranışı Şekil 2.4'te verilmiştir. Burada,  $\sigma_e$ ,  $\sigma_p$  ve  $\sigma_k$ , sırasıyla, akma gerilmesi, orantılı akma gerilmesi ve kopma gerilmesidir.  $\varepsilon_e = \varepsilon_{sy}$  malzemenin akma durumundaki sınır şekildeğiştirmesidir. Betonarme sistemlerde sıklıkla kullanılan B420C donatı sınıfı için,  $\sigma_e = 420 \text{ MPa}$  ve  $1.15 < \sigma_k/\sigma_e \leq 1.35$  olmalıdır.



**Şekil 2.4:** Yumuşak sınıftaki donatı için tipik gerilme-şekildeğiştirme-diyagramı (Özer, 2009).

Yapı sistemlerinin şekildeğiştirme esaslı sismik statik veya dinamik analizlerini basitleştirmek için donatının gerilme-şekildeğiştirme davranışları doğrusal-elastik, ideal/ pekleşen elasto-plastik veya rijit plastik şeklinde idealleştirilebilir (Şekil 2.5a-d). TBDY-2018’de tanımlanan gerilme-şekildeğiştirme davranışı (2.1a-c) denklemleri ile elde edilmekle birlikte farklı donatı sınıfları için karakteristik değerler ve sınırlar Tablo 2.2’de verilmiştir. (2.1a-c) denklemlerinde  $f_s$ ,  $f_{sy}$  ve  $f_{su}$ , sırasıyla, donatıdaki gerilme, akma gerilmesi ve kopma gerilmesidir.  $\epsilon_e = \epsilon_{sy}$  akma halinde donatı birim şekildeğişmesi ve  $\epsilon_{sh}$  pekleşme davranışının başladığı birim boy değışmesidir.  $\epsilon_{su}$  ise donatının kopmadaki birim boy değışmesidir.



**Şekil 2.5:** Donatı gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarına ait idealleştirmeler (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad \text{Elastik bölge} \quad ; \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \quad (2.1a)$$

$$f_s = f_{sy} \quad \text{Akma bölgesi} \quad ; \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \quad (2.1b)$$

$$f_s = f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} \quad \text{Pekleşme bölgesi} \quad ; \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \quad (2.1c)$$

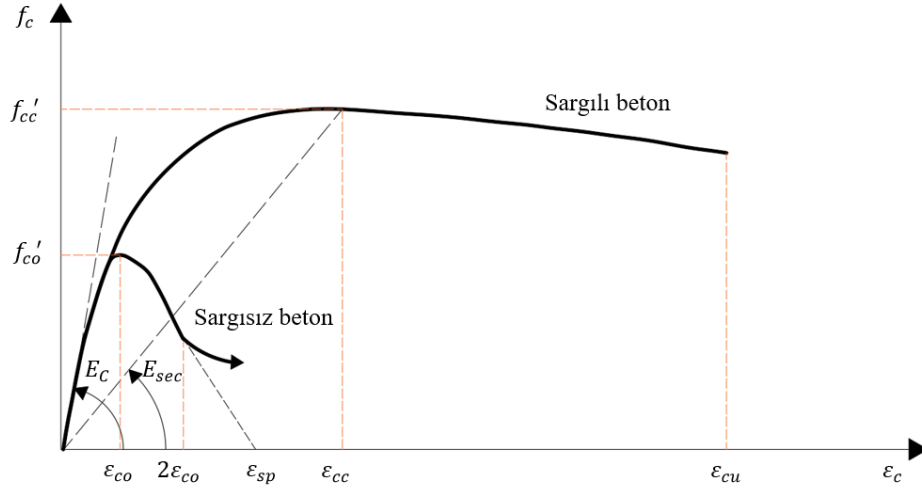
**Tablo 2.2:** Farklı donatı sınıfları için karakteristik değerler (TBDY, 2018).

| Donatı           | $f_{sy}$<br>(MPa) | $\varepsilon_{sy}$ | $\varepsilon_{sh}$ | $\varepsilon_{su}$ | $f_{su}/f_{sy}$     |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| S220 {Düz}       | 220               | 0.0011             | 0.012              | 0.12               | $\geq 1.2$          |
| S420 {Nervürlü}  | 420               | 0.0021             | 0.008              | 0.08               | $\geq 1.15$         |
| B420C {Nervürlü} |                   |                    |                    |                    | $\geq 1.15; < 1.35$ |
| B500C {Nervürlü} | 500               | 0.0025             | 0.008              | 0.08               | $\geq 1.15; < 1.35$ |

#### 2.4.2 Beton için gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı

Beton, basınç dayanımı güçlü bir yapı malzemesi olmakla birlikte dış yükler altında gevrek bir davranış gösterir. Sargısız betonda en dış basınç lifindeki birim kısalmalar, genel olarak,  $\varepsilon_s = 0.003 - 0.004$  değerine ulaştığında ezilmesi sonucunda taşıma gücüne ulaşılır. Malzemenin sınırlı şekildeğiştirme kapasitesini artırmak amacıyla betonarme elemanlara yerleştirilen enine sargı donatıları gerilme davranışını tek eksenli halden üç eksenli hale dönüştürür. Eleman bazında sağlanacak sargılama etkisi ile çok büyük şekildeğiştirme kapasitesinin yanısıra dayanımda önemli kazançlar elde edilebilir. Betonarme sistemlerin malzeme ve eleman bazındaki davranışlarının daha gerçekçi modellenmesi için literatürde çok sayıda araştırma yapılmış ve gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları önerilmiştir (Hognestad vd., 1955; Sheikh ve Uzumeri, 1982; Kent ve Park, 1971; Saatçioğlu ve Ravzi, 1992; Mander vd., 1988).

TBDY-2018 çerçevesinde binaların şekildeğiştirme bazlı analizlerinde Mander vd. (1988)'deki sargılı ve sargısız beton modelinin kullanılması önerilmektedir (Şekil 2.6). Bu model prensip olarak, beton ve sargı donatısı tarafından enerjinin eşitliğini esas alınmaktadır. Beton basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesinin belirlenmesinde enine donatının çapı, aralığı, kol sayısı gibi sargılama parametreleri oldukça belirleyicidir. (2.2)-(2.4) denkleminde sargılı ve sargısız beton için verilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, temel olarak Popovic (1973)'deki yaklaşımı esas almakla birlikte, sargılı beton basınç dayanımı ( $f_{cc}'$ ), bu dayanıma karşılık gelen birim kısalma değeri ( $\varepsilon_{cc}$ ), ve sargılı betonun şekildeğiştirme kapasitesi ( $\varepsilon_{cu}$ ) ile etkin sargılama parametreleri Mander vd. (1988)'de yürütülen deneysel çalışmaların sonucunda geliştirilmiştir.



**Şekil 2.6:** Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı (Dinçer, 2022; Kurt, 2023).

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (2.2)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad ; \quad \{0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}\} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (2.4a)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} \quad (MPa) \quad (2.4b)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.4c)$$

(2.2)-(2.4) denklemlerinde  $x$  betona ait birim şekildeğiştirme oranını,  $r$  başlangıç ve sekant elastisite modüllerine bağlı bir oranı ( $r < 1.0$ ),  $\varepsilon_c$  basınç lifindeki birim boy değişmesini,  $f'_{co}$  sargısız betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir. Sargılı betona ait  $f'_{cc}$  ile  $\varepsilon_{cc}$  değerleri, (2.5)-(2.6) denklemleri ile hesaplanmaktadır.  $\varepsilon_{co}$ , sargısız betonda plastik davranışın başladığı akma birim şekildeğiştirmesidir ve normal dayanımlı betonlarda  $\varepsilon_{co} \approx 0.002$  alınabilir.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[ -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right] \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.6)$$

Dikdörtgen enkesitlerde sargılı beton basınç dayanımı, (2.7)–(2.9) denklemlerindeki  $f_l$  betondaki yanal basıncı,  $f'_l$  sargı donatılarınca sağlanan etkin sargılama basıncı ve  $K_e$  sargılama çarpanı ile hesaplanmaktadır (Mander vd., 1988).

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{s d_c} ; f_{yh} = \rho_x f_{yh} \quad (2.7a)$$

$$f_{ly} = \frac{A_{sy}}{s b_c} ; f_{yh} = \rho_y f_{yh}$$

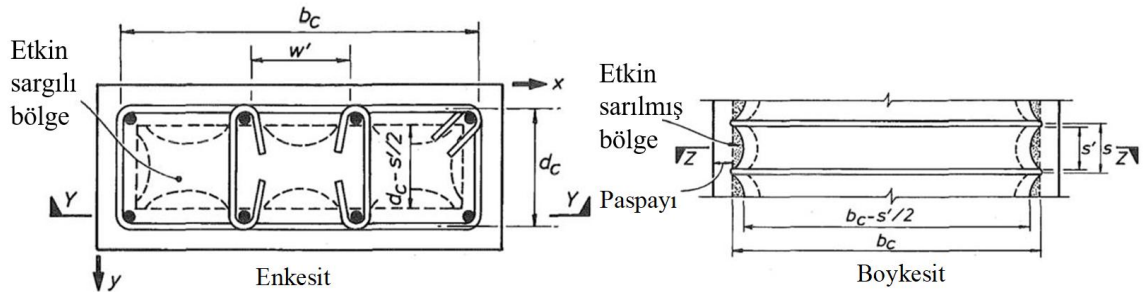
$$f_l = \frac{1}{2} (f_{lx} + f_{ly}) \quad (2.7b)$$

$$f_{lx}' = K_e f_{lx} ; f_{ly}' = K_e f_{ly} \quad (2.8a)$$

$$f'_l = \frac{1}{2} \left( \frac{f_{lx}' + f_{ly}'}{2} \right) \quad (2.8b)$$

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6 b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (2.9)$$

Bu denklemlerde,  $A_{sx}$  ve  $A_{sy}$  eleman eksenlerindeki toplam sargı donatısı alanlarını,  $s$  ve  $s'$  sargı donatıları arasındaki temiz ve eksenler arasındaki uzaklığı,  $f_{yh}$  sargı donatısı akma dayanımını  $\rho_x$  ve  $\rho_y$ , eleman eksenlerindeki sargı donatısının hacimsel oranını,  $\rho_{cc}$  enkesitteki boyuna donatı alanının sargılı beton alanına oranını,  $w_i$  boyuna donatı arasındaki temiz uzaklığı,  $b_c$  ve  $d_c$ , sargı donatısı eksenleri arasındaki çekirdek alanın x ve y eksenlerindeki uzunluklarını göstermektedir (Şekil 2.7) (Mander vd., 1988).



**Şekil 2.7:** Betonarme eleman için sargılama parametreleri (Mander vd., 1988).

Sargılı betonun birim şekildeğiştirme kapasitesi  $\varepsilon_{cu}$ , (2.10) denklemi ile hesaplanmaktadır. Burada,  $\rho_s$  hacimsel sargı donatısı oranı ( $\rho_s = \rho_x + \rho_y$ ),  $\varepsilon_{sm}$  sargı donatısının birim şekildeğiştirme kapasitesidir.

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \varepsilon_{sm}}{f_{cc}'} \quad (2.10)$$

(2.2) denklemi ile ifade edilen gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı  $\varepsilon_c \leq 2\varepsilon_{c0}$  sınır değerine kadar hem sargısız hem sargılı beton için ortaktır. Sargısız betonda,  $\varepsilon_c > 2\varepsilon_{c0}$  için şekildeğiştirmeler  $\varepsilon_{sp} = 0.0064$  dökülme sınırına kadar doğrusal olarak azalacaktır.

## 2.5 Betonarme Enkesitlerin Doğrusal-Elastik Olmayan Davranışı

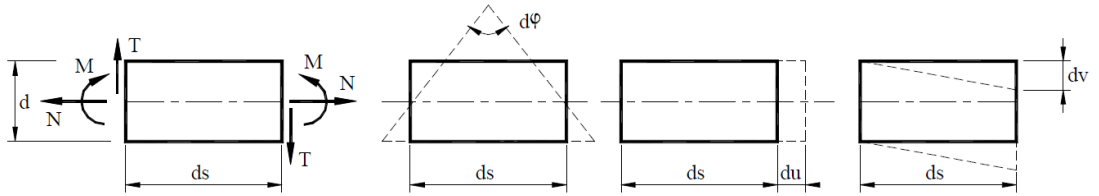
### 2.5.1 Düzlem çubuk elemanlarda iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntıları

Düzlemi içindeki yüklerin etkisindeki düzlem çubuk sistemlerde  $ds$  boyundaki bir çubuk elemanın bir yüzünün diğer yüzüne göre rölatif yerdeğiştirmelerinin, kesit zorları doğrultusundaki şekildeğiştirme bileşenleri (2.11a-c) denklemlerinde ile verilmiştir. Burada,  $\phi$  enkesitin birim dönmesini (eğriliği),  $u$  ve  $v$  çubuk ekseni ve çubuk eksenine dik doğrultudaki yerdeğiştirmeleri göstermektedir (Şekil 2.8). Düzlem çubuk sistemler için kesit zorları ile birim şekildeğiştirmeler arasındaki ilişkiler (2.12a-c) denklemlerinde verilmiştir (Çakıroğlu ve Özer, 1980).

$$\phi = d\phi/ds \quad : \text{ birim dönme (eğrilik)} \quad (2.11a)$$

$$\varepsilon = du/ds \quad : \text{ birim boy değişmesi (birim uzama veya birim kısalma)} \quad (2.11b)$$

$$\gamma = dv/ds \quad : \text{ birim kayma} \quad (2.11c)$$



**Şekil 2.8:** Düzlem çubuk elemanda iç kuvvetler ve şekildeğiştirmeler (Özer, 2009).

$$\phi = \frac{d\phi}{ds} = F_1(M, N, T) + \frac{\alpha_t \Delta t}{d} \quad (2.12a)$$

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} = F_2(M, N, T) + \alpha_t t \quad (2.12b)$$

$$\gamma = \frac{dv}{ds} = F_2(M, N, T) \quad (2.12c)$$

Bu denklemlerde,  $F_1, F_2, F_3$  malzeme ve enkesit özelliklerine bağlı belirlenen fonksiyonları,  $t$  ve  $\Delta t$ , sırasıyla, düzgün ve farklı sıcaklık değişmesini,  $\alpha_t$  ısı genleşme çarpanını ifade etmektedir. Enkesitteki kesit zorları artarak, sınır duruma ulaştığında kırılma, akma veya büyük yerdeğiştirmeler sonucunda taşıma gücü sona erer. Bu durumu ifade eden kesit zorlarına enkesitin *taşıma gücü* adı verilir (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009). Kesit zorları veya birim şekildeğiştirmelere bağlı ifade edilebilen akma/kırılma koşulları, (2.13a-b) denklemlerinde verilmiştir. Eğilme ve uzama şekildeğiştirmelerinin yanında kayma şekildeğiştirmeleri terkedilebilir ve kesme kuvvetinin birim dönme ve birim boy değişmesine etkisi ihmal edilebilirse, bünye bağıntıları (2.14a-b)'de, akma koşulları (2.15a-b) denklemlerinde verilen halde gösterilebilir (Çakıroğlu ve Özer, 1980).

$$K_1(M, N, T) = 0 \quad (2.13a)$$

$$K_2(\phi, \varepsilon, \gamma) = 0 \quad (2.13b)$$

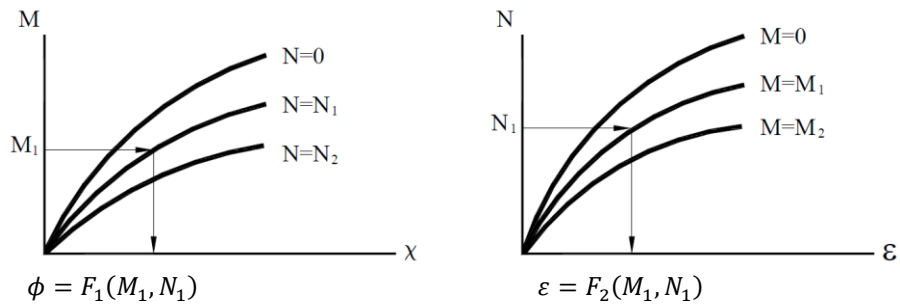
$$\phi = \frac{d\varphi}{ds} = F_1(M, N) + \frac{\alpha_t \Delta t}{d} \quad (2.14a)$$

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} = F_2(M, N) + \alpha_t t \quad (2.14b)$$

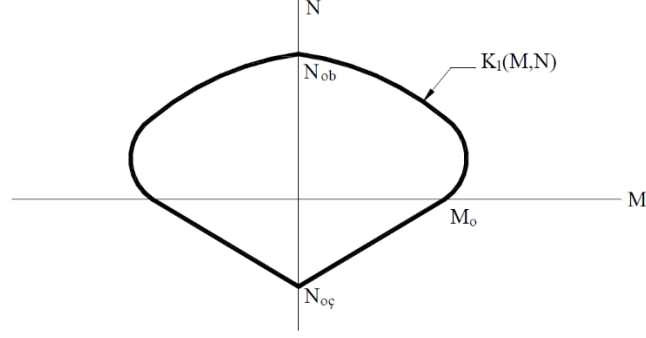
$$K_1(M, N) = 0 \quad (2.15a)$$

$$K_2(\phi, \varepsilon) = 0 \quad (2.15b)$$

Bünye bağıntılarının belirlediği yüzeyler, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi genellikle eğri grupları halindedir. Kesit zorları cinsinden ifade edilen akma koşulu denkleminin ( $K_1(M, N) = 0$ ) sınırladığı alan *akma (kırılma) eğrisi* veya karşılıklı etki diyagramı olarak isimlendirilir (Şekil 2.10) (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).



**Şekil 2.9:** Farklı kesit zorlarına ait bünye denklemleri (Özer, 2009).

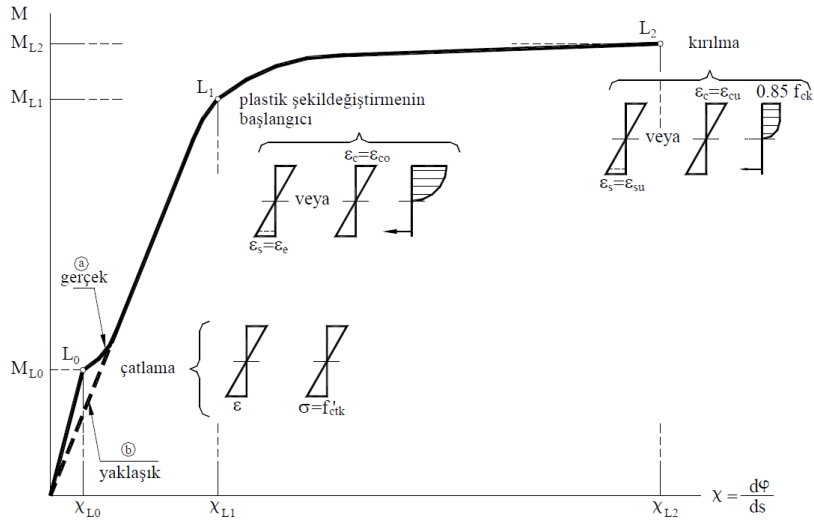


Şekil 2.10: Tipik bir karşılıklı etki diyagramı (Özer, 2009).

## 2.6 Eğilme Momenti ve Normal Kuvvet Etkisindeki Çubuklar

### 2.6.1 Eğilme momenti-eğrilik ( $M-\phi$ ) davranışı

Sabit aksenal normal kuvvet ve artan eğilme momenti altındaki betonarme bir enkesit için eğilme momenti ( $M$ ) ile eğrilik ( $\phi$ ) arasındaki davranış genel olarak üç bölgede açıklanabilir. Birinci bölgeyi sınırlayan  $L_0$ , enkesitin en dış çekme lifindeki normal gerilmenin betonun çekme dayanımına ulaşması sonucunda çatlak oluşumunu ifade eden noktadır (Şekil 2.11). İkinci bölgeyi sınırlayan  $L_1$  noktası, enkesitin en dış beton basınç lifindeki veya tarafsız eksene en uzak çekme donatısındaki akma durumunu ifade eder. Akma durumunun betonda  $\varepsilon_{co} = 0.002$ 'lik birim kısalma değerinde, donatıda ise  $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$ 'lik akma şekildeğiştirmesinde başladığı kabul edilir. Plastik bölgeyi tanımlayan  $L_2$  noktası ise, enkesitteki eğilme momenti artarak  $M_{L2} = M_p$  taşıma gücü sınırına ulaşınca betonda ezilme ve/veya donatıda kopma sonucu kırılma durumu meydana gelir (Şekil 2.11). Sargısız kabuk betonunda ezilme  $\varepsilon_{cu} \cong 0.003 \sim 0.004$ 'lik birim kısalma değerinde oluşurken, sargı parametrelerine bağlı olarak göbek betonundaki ezilme çok daha ileri şekildeğiştirme değerlerinde meydana gelir (Çakıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).



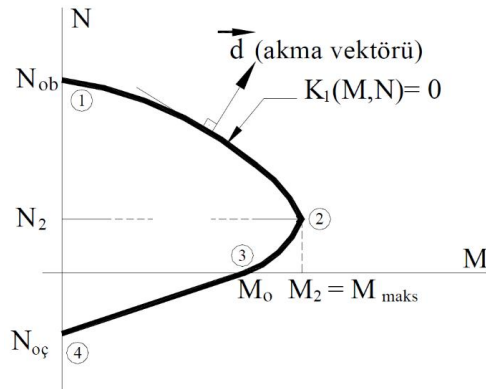
Şekil 2.11: Betonarme enkesitlere ait tipik moment-eğrilik davranışı (Özer, 2009).

Taşıma gücü yöntemi kullanılarak betonarme sistemlerin tasarımda, beton ve donatıya ait karakteristik gerilmeler (dayanımlar) malzeme güvenlik katsayıları ile azaltılmaktadır. Buna karşın, şekildeğiştirme bazlı doğrusal-elastik olmayan analizlerde malzeme güvenlik katsayıları gözönünde bulundurulmaksızın karakteristik değerler doğrudan kullanılır.

## 2.6.2 Betonarme enkesitlerde karşılıklı etki diyagramı

Eksenel normal kuvvet ve eğilme momenti altındaki betonarme bir enkesitte taşıma gücünü ifade eden tipik bir karşılıklı etki diyagramı Şekil 2.12’de verilmiştir. Plastik mafsal davranış modelinin kullanıldığı yapısal analizlerde, iç kuvvetlerin *karşılıklı etki diyagramı (akma eğrisi)* üzerinde olması elemanın kritik kesitinde bir plastikleşme ve bunun sonucunda sonlu bir plastik şekildeğiştirmenin oluştuğunu ifade eder (Özer, 2009).

Şekil 2.12’de gösterildiği üzere, akma eğrisi üzerindeki her normal kuvvet değerine farklı bir eğilme momenti taşıma gücü ( $M_p$ ) karşılık gelecektir. Betonarme enkesitler için akma eğrisi, genel olarak, eksenel basınç (1), dengeli durum (2), basit eğilme (3) ve eksenel çekme (4) davranışlarındaki taşıma gücü noktaları birleştirilerek oluşturulabilir (Özer, 2009). Akma eğrisinin ve buna bağlı idealleştirilmenin daha gerçekçi yapılmasına yönelik, (1)-(2)-(3) noktaları arasında seçilecek yeter sayıda normal kuvvet düzeyi için moment-eğrilik analizleri yapılmalıdır.

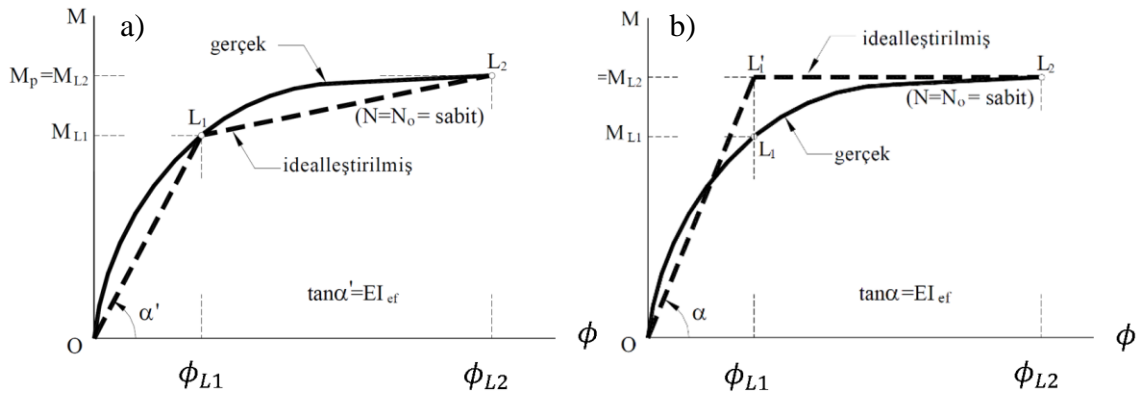


Şekil 2.12: Betonarme kesitlerde akma eğrisi (karşılıklı etki diyagramı) (Özer, 2009).

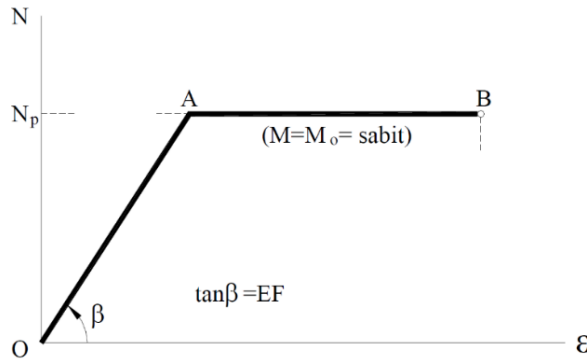
## 2.7 Betonarme Enkesitler için Akma Koşullarının İdealleştirilmesi

$\varepsilon_{cu} = 0.003 \sim 0.004$  ve/veya  $\varepsilon_{su} = 0.01$ 'lik birim şekildeğiştirmeler sonucunda taşıma gücüne ulaşılan sargısız betonarme kesitlerde, eğilme momenti-eğrilik davranışları Şekil 2.13'te gösterildiği gibi iki doğru parçası ile idealleştirilebilir (Çakıroğlu ve Özer, 1980). Plastik şekildeğiştirmelerin sistem üzerinde yayılı olduğu yaklaşımın kullanıldığı hesap yöntemlerinde moment-eğrilik davranışı, genel olarak, başlangıç – akma – taşıma gücü noktalarını ifade eden  $O - L_1 - L_2$  birleştirilerek idealleştirilir (Şekil 2.13a).

Plastik şekildeğiştirmelerin plastik mafsal bölgelerinde noktalarında toplandığı davranışa ilişkin idealleştirmede,  $L_1$  akma noktasından çıkılan dik ile  $L_2$  taşıma gücü noktasından uzatılan yatay doğruyunun kesişimi, eşdeğer akma eğriliğinin koordinatlarını ( $L_1'$ ) oluşturmaktadır (şekil 2.13b). İdealleştirilen diyagramın birinci kısmının eğimi enkesitin *etkin eğilme rijitliğini* ( $EI_{ef}$ ), ikinci kısmın eğimi *plastik rijitliği* ifade eder (şekil 2.13) (Özer, 2009). Eğilme momenti-eğrilik bağıntısına benzer şekilde, normal kuvvet-birim boy değişmesi diyagramı da iki doğru parçasından oluşacak şekilde idealleştirilebilir (şekil 2.14) (Özer, 2009).

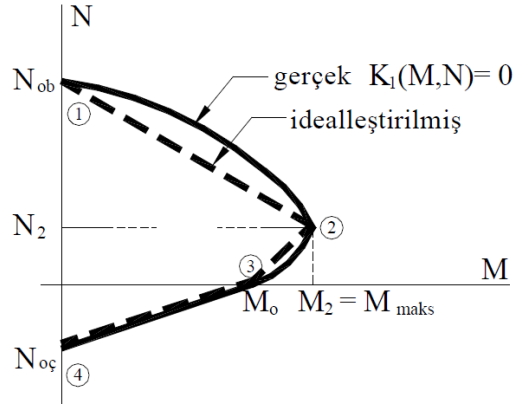


**şekil 2.13:** Yayılı plastik davranış modeli ve plastik mafsal hipotezi için idealleştirilmiş moment-eğrilik diyagramları (Özer, 2009).



**şekil 2.14:** İdealleştirilmiş normal kuvvet-birim boy değişmesi diyagramı (Özer, 2009).

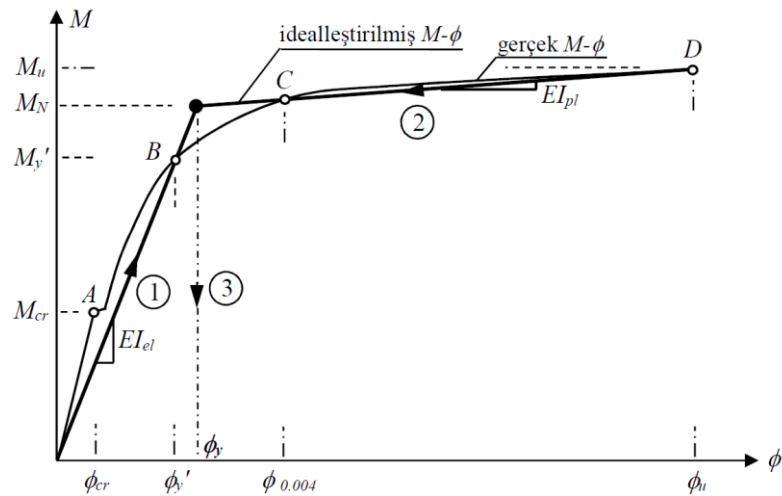
Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisindeki bir betonarme kesitin karşılıklı etki diyagramından elde edilen idealleştirilmiş akma eğrisi, (1), (2), (3) ve (4) noktalarını birleştiren doğru parçalarıyla ifade edilebilir (şekil 2.15). Belirtilen bu noktalar arasında daha fazla sayıda nokta gözönüne alınması ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. Enkesit geometrisinin ve donatıların simetrik olması halinde karşılıklı etki diyagramları normal kuvvet ekseninde simetrik halde oluşacaktır. İdealleştirilmiş etki diyagramları her bölgede gerçek diyagramının altına kalması nedeniyle daha güvenli sonuçlar verecektir (akıroğlu ve Özer, 1980; Özer, 2009).



Şekil 2.15: Betonarme elemanlarda akma eğrisinin doğrusallaştırılması (Özer, 2009).

Sargı donatısı eksenleri dışındaki sargısız kabuk betonu, sargı donatısı sayesinde büyük şekildeğiştirme kapasitelerinin olduğu göbek betonu ve donatıdaki akma sahanlığı sonrasındaki pekleşme bölgesinin hesaba katıldığı modeller altında gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri sonucunda elde edilen davranışların idealleştirilmesinde farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Literatürde sıklıkla kullanılan Priestley vd., (2007)'deki idealleştirmede, ilk olarak O noktasından ilk akma noktası B'den  $(\phi_y', M_y')$  geçen birinci doğru çizilir. Daha sonra, enkesitin nihai taşıma gücü olan D noktasından  $(\phi_U, M_U)$  başlayan ve C nominal noktadan  $(\phi_N, M_N)$  geçen ikinci bir doğru çizilerek birinci doğru ile kesiştirilir. İki doğru parçası ile idealleştirilen bu diyagramın kesişim noktası eşdeğer akma eğriliği  $(\phi_y)$  olarak ifade edilir (Şekil 2.16).

(2.16) denklemleri ile de elde edilebilen eşdeğer akma eğriliği sayesinde enkesit davranışına ilişkin elastik ve plastik bölge sınırları ile süneklik talebi belirlenebilir (Şekil 2.16). Ayrıca, bu idealleştirme yardımı ile enkesite ait etkin eğilme rijitliği  $(EI_{el})$  (2.17)-(2.18) denklemleri ile plastik rijitlik  $(EI_{pl})$  hesaplanabilir (bkz. (2.17) ve (2.18) denklemleri).



Şekil 2.16: Moment – eğrilik davranışının idealleştirilmesi (Çalışkan, 2019).

$$\phi_y = \frac{M_N}{M_y} \phi_y' \quad (2.16)$$

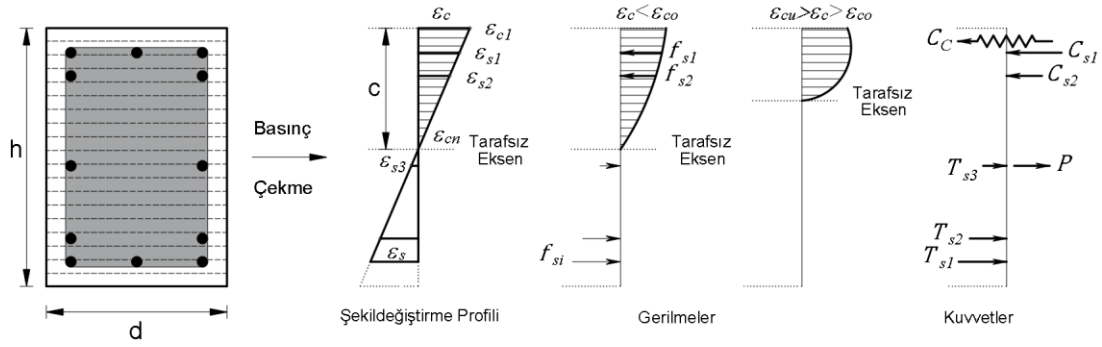
$$EI_{el} = \frac{M_y}{\phi_y'} = \frac{M_N}{\phi_y} \quad (2.17)$$

$$EI_{pl} = \frac{M_y - M_N}{\phi_u - \phi_y} \quad (2.18)$$

## 2.8 Moment-Eğrilik Analizine ait Temel Esaslar

Betonarme kiriş, kolon, perde gibi taşıyıcı elemanlarındaki ilk çatlak durumu, elastik ve plastik davranışa ilişkin büyüklüklerin şekildeğiştirme kontrollü belirlenmesi, akma noktası sonrasındaki hasar sınırlarını tanımlayan *Servis, Hemen Kullanım, Can Güvenliği, Göçmenin Önlenmesi* performans düzeylerine karşılık gelen şekildeğiştirme sınırlarının tanımlanması, kesme ve burkulma gibi gevrek karakter gösteren istenmeyen davranışın kontrolü ve kuvvet – yerdeğiştirme – süneklik davranışlarının elde edilmesine yönelik moment – eğrilik analizleri şekildeğiştirme bazlı analiz yöntemlerinin başlangıç adımını oluşturur (Çalışkan, 2019).

Moment-eğrilik analizinde, sargılı ve sargısız beton ile donatıya ait geometrik özellikler ve gerilme – şekildeğiştirme bağıntıları tanımlandıktan sonra, en dış basınç lifindeki kontrol beton birim şekildeğiştirmesinin monotonik artan değerleri için (örneğin,  $\varepsilon_c^* = 0.00025$  veya  $0.0005$ ) öncelikle tarafsız eksen derinliği ( $c$ ) tahmin edilir. Enkesitte basınç liflerinin yeter sayıda dilimlere ayrılması sayesinde, malzemeye ilişkin gerilme-şekildeğiştirme davranışları da dilim kalınlığınca ( $\Delta_i$ ) doğrusallaştırılmış olur. Daha sonrasında, beton ve donatı dilim merkezlerinin tarafsız eksene uzaklıkları, dilimlerdeki  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  birim şekildeğiştirmeleri ile  $\sigma_c$  ve  $\sigma_s$  gerilmeleri hesaplanır (Şekil 2.17). İlgili kontrol şekildeğiştirmesi için tarafsız eksenin üstündeki dilimlerinin ait basınç kuvvetleri toplamı ile tarafsız eksenin altındaki toplam çekme kuvvetleri arasındaki kuvvet denge kontrol edilir  $\Sigma C_{ci} + \Sigma C_{si} - \Sigma T_{si} + P = 0$  (Şekil 2.17) (Çalışkan, 2019). Enkesit için yazılacak kuvvet dengesinin yeterli toleransı (örneğin 2kN veya 3kN) sağlamaması durumunda, hesabın başında tahmin edilen  $c$  değeri değiştirilir ve kuvvet dengesi sağlanana kadar bir iterasyon uygulanır. Kontrol şekildeğiştirmesinin ilgili değeri için denge durumu sağlandıktan sonra, enkesitteki eğrilik ve moment büyüklükleri, sırasıyla, (2.19) ve (2.20) denklemleri ile belirlenebilir (Çalışkan, 2019).



**Şekil 2.17:** Tipik bir dikdörtgen enkesit için şekildeğiştirme profili, gerilme ve kuvvetler (Kurt, 2023).

$$\phi_y = \frac{\epsilon_c}{c} \text{ veya } \phi_y = \frac{\epsilon_s}{d - c} \quad (2.19)$$

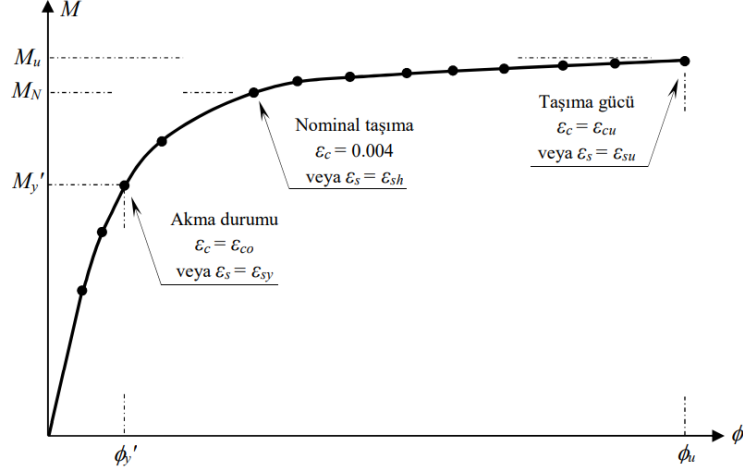
$$M = \sum_{i=1}^n C_{ci}^{göbek} \times x_i + \sum_{i=1}^n C_{ci}^{kabuk} \times x_i + \sum_{i=1}^n C_{si}^{donatı} \times k_i + \sum_{i=1}^n T_{si}^{donatı} \times k_i + P \times \left(\frac{h}{2} - c\right) \quad (2.20)$$

Sabit normal kuvvet ( $P$ ) etkisindeki enkesit için kontrol beton birim şekildeğiştirmesinin ( $\epsilon_c$ ) monotonik artan değerleri altında analiz adımları tekrarlanarak her birim şekildeğiştirme durumuna karşılık eğrilik ve moment büyüklükleri elde edilir (Şekil 2.18) (Çalışkan, 2019).

Moment – eğrilik analizinin herhangi bir adımında;

- Sargılı betondaki en büyük birim şekildeğiştirmenin  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  nihai şekildeğiştirme kapasitesine ulaşması,
- Çekme donatısının  $\epsilon_s = \epsilon_{su}$  sınır değerine ulaşarak kopması,
- Basınç bölgesindeki donatı(lar)da burkulma,
- Sargı donatısında kırılma,
- Kesme kapasitesine ulaşılması,
- Davranıştaki moment değerlerinde %20'lik bir kaybın oluşması

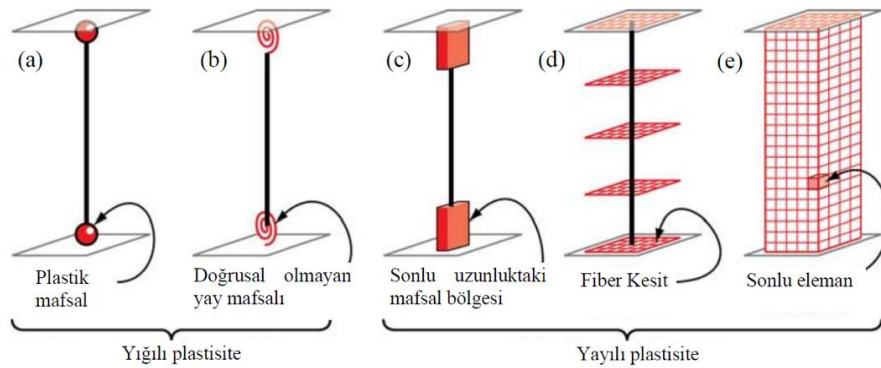
durumlarından en az birinin meydana gelmesi halinde analize son verilir ve bu nokta enkesitin *nihai taşıma gücü* olarak belirlenir (Priestley vd., 2007).



**Şekil 2.18:** Farklı birim şekildeğiştirme durumlarını ifade eden tipik moment – eğrilik davranışı (Çalışkan, 2019).

## 2.9 Taşıyıcı Elemanların Doğrusal-Elastik Olmayan Davranış Modelleri

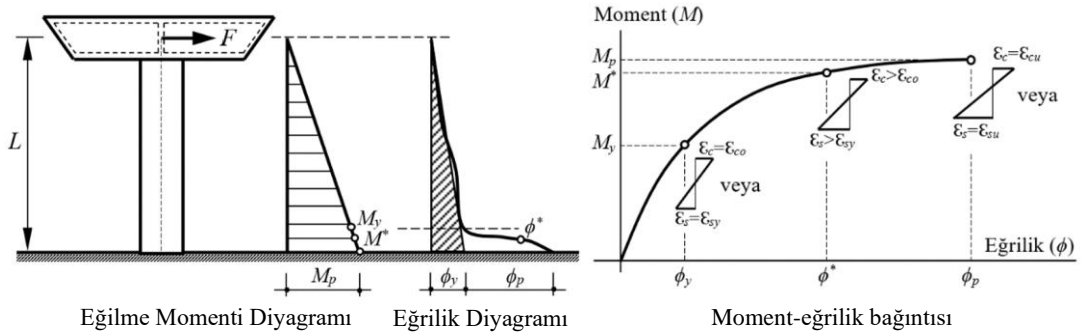
Deprem yönetmeliklerinde belirtilen tasarım esasları altında boyutlandırılan bina sistemlerinin tasarım veya daha ötesindeki deprem seviyeleri altında kontrollü bir elastik-ötesi davranış göstermesi beklenir. Bunun için, sismik yükler altında taşıyıcı sistem elemanlarında hasar oluşumu doğrudan plastik, plastik dönme ve birim boy değişmesi gibi şekildeğiştirmeler ile ilişkilidir. Bu bağlamda, yapı sistemlerinin doğrusal-elastik olmayan statik/dinamik analizlerinde kuvvet-deformasyon bağıntılarının gerçekçi modellenmesi, sismik yükler altındaki davranışın daha gerçekçi elde edilmesinde önemli rol oynayacaktır. Taşıyıcı sistem elemanlarındaki (kiriş, kolon, perde vb.) plastik davranışın modellenmesinde, genel olarak, iki yaklaşım bulunmaktadır (Şekil 2.19).



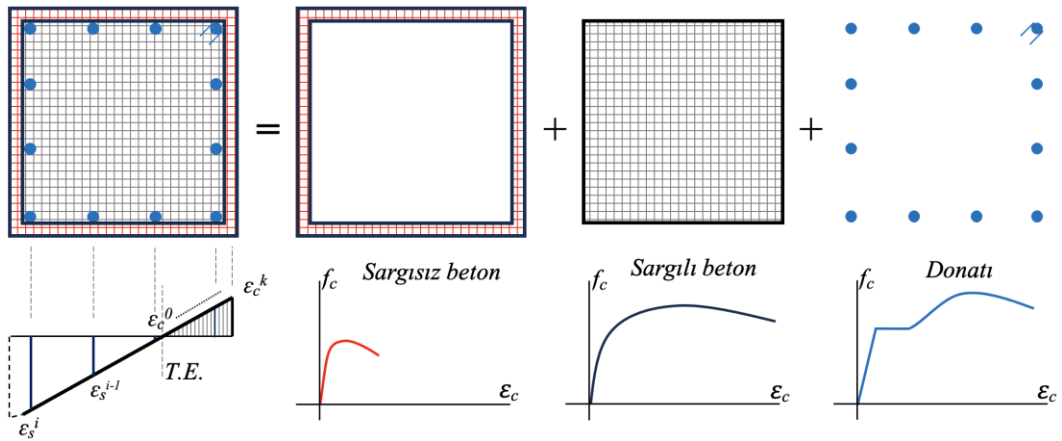
**Şekil 2.19:** Yığılı ve yayılı plastik davranış modelleri (Deierlein vd., 2010).

## 2.9.1 Yayılı plastik kesit modeli

Yayıllı plastik davranış modelinde plastik şekildeğiştirmelerin sonlu uzunluktaki uç bölgelerinde veya elemanın tüm uzunluğu boyunca sürekli bir biçimde yayılı olduğu gözönüne alınmaktadır (Şekil 2.19 c-d-e). Sabit düşey yükler ve yatay yükler etkisindeki bir taşıyıcı sistemin eğilme momenti diyagramı II. mertebe etkiler sonrasında doğrusal formdan parabolik hale gelecektir. İlk olarak eleman uçlarında meydana gelen plastik şekildeğiştirmeler, yatay yüklerin artması ile eleman uzunluğu boyunca yayılı hale gelecektir. Elemandaki mukavemet haline (basit eğilme, bileşik eğilme, eğik eğilme vb.) bağlı olarak, eleman uzunluğunca her enkesitte farklı bir kuvvet - şekildeğiştirme davranışı ve akma fonksiyonu oluşacaktır (Şekil 2.20) (Reinhorn vd., 2009). Şekildeğiştirme bazlı büyüklüklerin daha gerçekçi elde edildiği yayılı plastik davranış yaklaşımında eleman uzunluğuna enkesitler yeter sayıda dilimlere (enkesit hücrelerine) ayrılarak fiber enkesitler oluşturulabilir (Şekil 2.20). Her fiber kesitindeki sargılı ve sargısız beton dilimleri ile her donatı diliminin ağırlık merkezindeki gerilme ve şekildeğiştirmeler artan yatay yüklerin her adımında hesaplandıktan sonra integre edilerek eleman bazlı şekildeğiştirme davranışı elde edilir (Şekil 2.21). Bu noktada, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek açısından gözönüne alınan fiber boyutları, fiber kesit sayısı ve dilim sayısı, analizlerde önem teşkil etmektedir.



Şekil 2.20: Tipik bir betonarme kolon üzerinde şekildeğiştirme durumu.

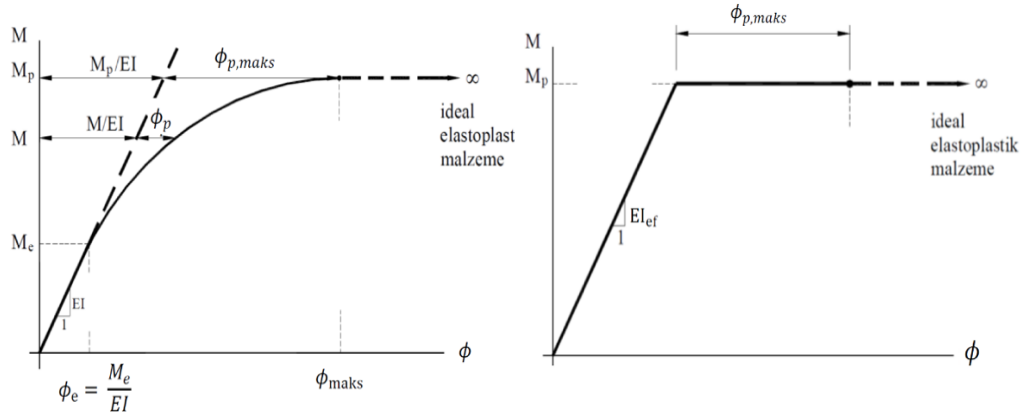


Şekil 2.21: Tipik kolon enkesit için fiber model.

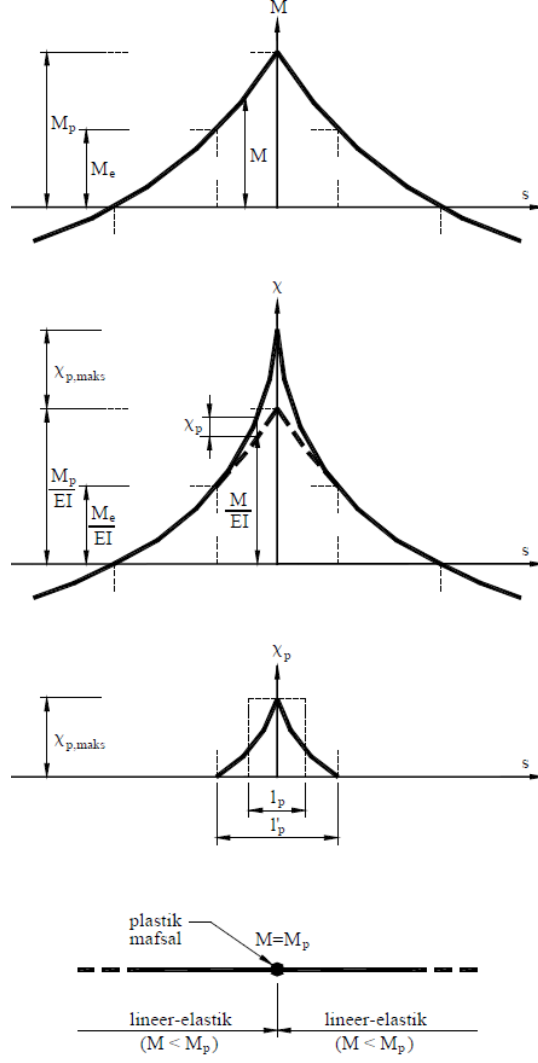
## 2.9.2 Yığılı plastik kesit modeli

Yığılı plastik davranış (plastik mafsal) modelinde, plastik mafsal hipotezinin geçerli olduğu sünek yapı sistemlerde plastik şekildeğiştirmelerin plastik mafsal boyu olarak tanımlanan sonlu bölgelerde düzgün yayıldığı, bunun dışındaki bölgede eleman ve sistem davranışının doğrusal- elastik kaldığı varsayılır (Şekil 2.19 a-b). Şekildeğiştirme bazlı doğrusal – elastik olmayan statik ve dinamik analizlerde bu yaklaşımın kullanılması modelleme ve analiz hacmini önemli oranda kısaltmaktadır.

Gerçek ve idealleştirilmiş eğilme momenti–eğrilik davranışları Şekil 2.22’de verilen betonarme bir elemanın kritik bir bölgesindeki elastik ve plastik şekildeğiştirmeleri Şekil 2.23’te verilmiştir. Yığılı plastik davranış modelinde,  $l_p$  uzunluğundaki bölgede plastik şekildeğiştirmeler düzgün yayıldığı haldedir ve plastik mafsal davranışının bu sonlu bölgenin merkezinde toplandığı varsayılır (Özer, 2009) (Şekil 2.23). Burada,  $l_p$  uzunluğu genellikle enkesit yüksekliğinin yarısı olarak ( $l_p = 0.5h$ ) alınmaktadır.



Şekil 2.22: Betonarme enkesite ait gerçek ve idealleştirilmiş eğilme momenti-eğrilik diyagramları (Özer, 2009).



**Şekil 2.23:** Elastik ve plastik bölgedeki iç kuvvet ve şekildeğişmeler (Özer, 2009).

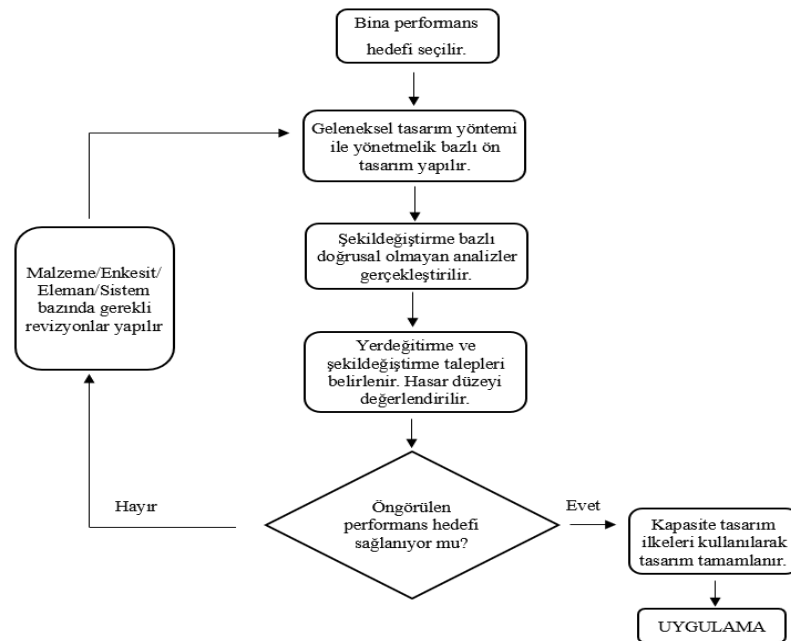
Bileşik eğilme (eğilme momenti + normal kuvvet) etkisindeki taşıyıcı elemanlar ait akma koşulu için basit eğilmedeki  $M_p$  plastik momenti yerine, normal kuvvete bağlı hesaplanan indirgenmiş  $M_p'$  plastik momentinin kullanılması gereklidir. Böylece, plastik mafsaldaki plastik eğrilik değerleri,  $l_p$  uzunluğunca integre edilerek elde edilir (bkz. (2.22) denklemi) (Özer, 2009).

$$\phi_p = \int l_p \phi_p ds \quad (2.21)$$

## 2.10 Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme Yaklaşımı

Güçlü deprem yer hareketleri altında yapı sistemlerinin tasarımı, değerlendirilmesi ve ayrıca yapısal davranışın daha iyi anlaşılması amacıyla Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme (PDTD) kavramı deprem mühendisliği alanında önem kazanmıştır. PDTD kavramı, son yıllarda VISION 2000 (1995), ATC 40 (1996), FEMA 273 (1997), FEMA 356 (2000) ve ASCE 41-17 (2017) gibi standart ve raporlarda ortaya konulmuş ve geliştirilmiştir. Bununla birlikte, bina türü yapı sistemlerinin geleneksel kuvvete (dayanıma) dayalı tasarımını esas alan yönetmeliklerde de bu kavram yer almaya başlamıştır. PDTD, bina sahibinin, kullanıcıların ve sosyal çevrenin çeşitli ihtiyaç ve hedefleri doğrultusunda öngörülen bir veya çok seviyeli bina performans düzeyi için binaların tasarımını, değerlendirilmesini ve yapımını esas alan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, yeni binaların tasarımında kullanılabileceği gibi mevcut binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesi amacıyla da kullanılabilmektedir (Hasgül, 2011).

Yapı sistemlerinde oluşacak hasarı temsil eden şekildeğiştirme bazlı davranış büyüklüklerinin esas alındığı bu tasarım kavramı Şekil 2.24'te özetlenmiştir. Temel olarak, birinci aşamada, bina için bir performans hedefi seçilir. Daha sonra, öngörülen deprem tehlike seviyesi (veya seviyeleri) için doğrusal veya doğrusal-elastik olmayan statik/dinamik analiz yöntemleri ile binanın sismik performansı belirlenir. Son aşamada ise, öngörülen bina performans hedefinin gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilir (Şekil 2.24) (Hasgül, 2011).



Şekil 2.24: Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramının temel esasları (Dinçer, 2022).

## 2.11 TBDY-2018'deki Performans Dayalı Tasarım ve Değerlendirme Esasları

TBDY-2018'e göre yeni yapılacak binaların şekildeğiştirme esaslı tasarımı ile mevcut binaların sismik performans değerlendirmesine yönelik temel esaslar aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

### 2.11.1 Yapısal performans düzeyleri

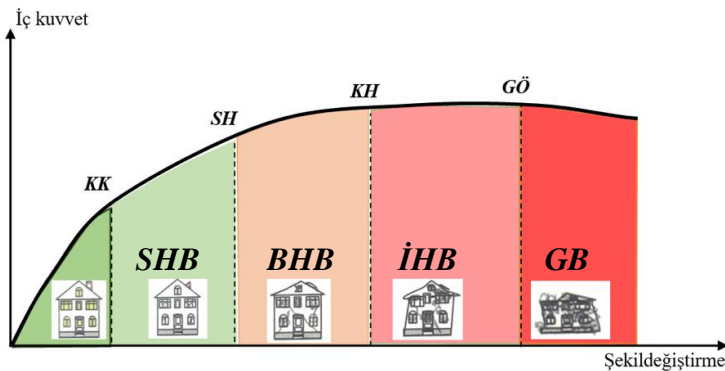
Bina performans düzeyi, taşıyıcı sistemdeki yapısal ve yapısal olmayan hasar durumu için öngörülen sınırlardır. TBDY-2018'de, bina performans hedef(ler)ini belirlemek için eleman bazlı dört performans düzeyi (hasar durumu) tanımlanmıştır (Şekil 2.25). Bunlar;

- *Kesintisiz Kullanım performans düzeyi (KK)*: Taşıyıcı elemanlarındaki malzeme davranışının elastik düzeyde kaldığı veya çok az sayıda elemanın akma sınırını geçtiği için hasarın henüz oluşmadığı varsayılır. Bu seviyede, sistem elemanları tarafından yutulan enerji elastik sınırlardadır.

- *Sınırlı Hasar performans düzeyi (SH)*: Sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasar oluşumunu ifade etmektedir. Yatay yükler sonucunda birçok kritik kesitte iç kuvvetler akma sınırını geçtiğinden betonarme elemanlarda sınırlı çatlak oluşumları meydana gelir. Sismik etki sonrasında taşıyıcı sistemin dayanım ve rijitliğinde belirgin bir değişiklik olmaz.

- *Kontrollü Hasar performans düzeyi (KH)*: Taşıyıcı sistemde onarılması mümkün hasar düzeyini ifade etmektedir. Bu performans düzeyi, birçok yönetmelikte *Can Güvenliği* olarak ta isimlendirilir. Sismik etki sonrasında taşıyıcı sistemin dayanım ve rijitliğinde belirgin düzeyde kayıplar meydana gelmesine karşın artçı depremlere karşı sistem yeterli kapasiteye sahiptir. Bina türü yapı sistemlerinin tasarım depremi altında bu performans düzeyini sağlaması hedeflenir.

- *Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi (GÖ)*: Sistem elemanlarında ileri düzeyde hasar oluşumunu ifade etmekle birlikte göçme öncesi kırılma durumu ait üst sınırı tanımlar. Sismik etki sonrasında taşıyıcı sistemde büyük ve kalıcı şekildeğiştirmeler oluşacağından, artçı depremlere karşı yeterli rijitlik ve dayanım kalmamış olabilir. Buna karşın, sistem düşey yükleri taşıyacak stabiliteye sahip olmalıdır.



Şekil 2.25: Bina performans düzeyleri ve bölgeleri (Dinçer, 2022).

### 2.11.2 Bina performans hedefleri

Bina performans hedefi, öngörülen deprem tehlike seviyesi altında bina sistemi için hedeflenen performans düzeyidir. Bina sistemi için bir adet hedef seçilebileceği gibi, farklı deprem seviyeleri gözönünde bulundurularak birden fazla performans hedefi de seçilebilir. TBDY-2018’de bina sistemleri için normal ve ileri düzey performans hedefleri tanımlanmıştır (Tablo 2.3). Normal performans hedefleri yönetmelikçe minimum kriter olmakla birlikte, tasarımcının sistemsel tercih ve önemine göre ileri performans hedefleri de seçilebilir. TBDY-2018’ye göre konut türü bina sistemleri için normal performans hedefi, DD-2 deprem seviyesi altında *Kontrollü Hasar* performans düzeyinin oluşmasıdır (Tablo 2.3).

**Tablo 2.3:** Yeni yapılacak betonarme binalar için performans hedefleri (TBDY, 2018).

|      | Normal (DTS=1, 1a, 2, 2a, 3, 3a, 4, 4a) |                                 | İleri (DTS=1a, 2a) |                                 |
|------|---|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|
|      | Performans hedefi                       | Değerlendirme/Tasarım yaklaşımı | Performans hedefi  | Değerlendirme/Tasarım yaklaşımı |
| DD-3 | -                                       | -                               | SH                 | ŞGDT                            |
| DD-2 | KH                                      | DGT                             | KH                 | DGT                             |
| DD-1 | -                                       | -                               | KH                 | ŞGDT                            |

### 2.11.3 Deprem yer hareketi düzeyleri

TBDY-2018’de, bina türü yapı sistemlerinin doğrusal-elastik olmayan statik/dinamik analizlerinde kullanılmak üzere 50 yılda aşılma olasılığı ve geri dönüş (tekrarlanma) periyotlarına bağlı dört farklı deprem seviyesi tanımlanmıştır.

- *DD-1 deprem yer hareketi düzeyi:* 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve geri dönüş periyodu 2475 yıl olan ve çok nadir görülen depremleri temsil eder. Literatürde, “*Maksimum deprem*” veya “*Gözönüne alınan en büyük deprem*” olarak da ifade edilmektedir.
- *DD-2 deprem yer hareketi düzeyi:* 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve geri dönüş periyodu 475 yıl olan ve seyrek görülen depremlerdir. Bu deprem seviyesi, “*Tasarım depremi*” olarak da ifade edilmektedir.
- *DD-3 deprem yer hareketi düzeyi:* 50 yılda aşılma olasılığı %50 ve geri dönüş periyodu 72 yıl olan sık depremlerdir. Bu deprem seviyesi, orta büyüklükte deprem yer hareketini temsil eder.
- *DD-4 deprem yer hareketi düzeyi:* 50 yılda aşılma olasılığı %68 (30 yılda %50) ve geri dönüş periyodu 43 yıl olan çok sık depremlerdir. Hafif şiddetli bu deprem seviyesi, “*Servis depremi*” olarak da ifade edilmektedir (TBDY, 2018).

### 2.11.4 Yatay ve düşey deprem yer hareketi spektrumu

Yerdeğiştirme, hız ve ivme büyüklüklerine ait davranış spektrumları, geniş bir periyot aralığında farklı rijitlik ve kütleye sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin çok sayıda deprem yer hareketi kaydı altında ve %5 elastik sönüm için hareket denklemlerinin çözülmesi sonrasındaki zarf (maksimum) davranışı temsil eder.

Yatay elastik tasarım ivme spektrumları genel olarak üç karakteristik bölgede tanımlanabilir. Titreşim periyodunun  $T_A$ - $T_B$  arasındaki kısmı tek serbestlik dereceli sisteme ait *sabit ivme bölgesi*,  $T_B$ - $T_L$  arası *sabit hız bölgesi*,  $T_L$  sonrası kısım ise *sabit yerdeğiştirme bölgesidir* (Şekil 2.26). TBDY-2018'deki %5 sönümlü yatay elastik ivme davranış spektrumu (2.22a-d) denklemleri ile hesaplanmaktadır. Yatay tasarım spektrumunun köşe periyotları  $T_A$  ve  $T_B$  tasarım spektral ivme katsayıları  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ 'e bağlı olarak (2.23) denklemi ile hesaplanır.  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ , tasarım spektral büyüklükleri,  $S_S$  ve  $S_1$ , harita spektral ivmelerinin Tablo 2.4 ve 2.5'te verilen  $F_S$  ve  $F_1$  yerel zemin etki katsayıları ile çarpımıyla hesaplanır (TBDY, 2018).

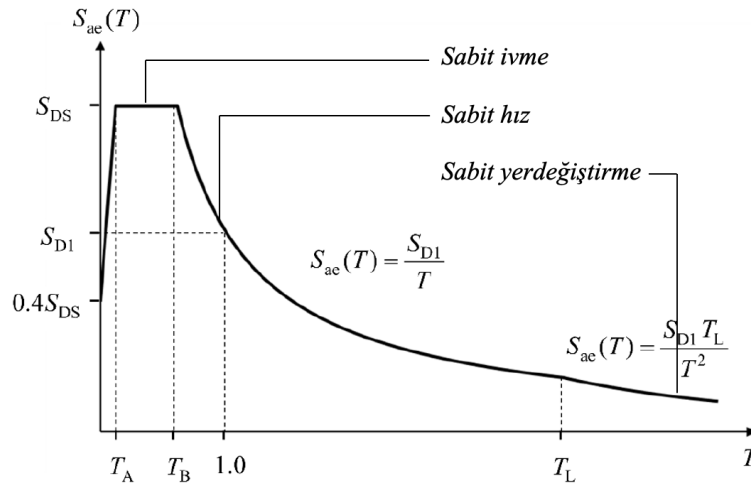
$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \quad 0 \leq T \leq T_A \quad (2.22a)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (\text{Sabit ivme bölgesi}) \quad T_A \leq T \leq T_B \quad (2.22b)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad (\text{Sabit hız bölgesi}) \quad T_B \leq T \leq T_L \quad (2.22c)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (\text{Sabit yerdeğiştirme bölgesi}) \quad T_L \leq T \quad (2.22d)$$

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad T_L = 6 \text{ s} \quad (2.23)$$



Şekil 2.26: %5 sönümlü yatay ivme tasarım spektrumu (TBDY, 2018).

**Tablo 2.4:** Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).

| Yerel zemin sınıfı | Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı $F_s$ |              |              |              |              |                 |
|--------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
|                    | $S_s \leq 0.25$  | $S_s = 0.50$ | $S_s = 0.75$ | $S_s = 1.00$ | $S_s = 1.25$ | $S_s \geq 1.50$ |
| ZA                 | 0.8  | 0.8          | 0.8          | 0.8          | 0.8          | 0.8             |
| ZB                 | 0.9  | 0.9          | 0.9          | 0.9          | 0.9          | 0.9             |
| ZC                 | 1.3  | 1.3          | 1.2          | 1.2          | 1.2          | 1.2             |
| ZD                 | 1.6  | 1.4          | 1.12         | 1.1          | 1.0          | 1.0             |
| ZE                 | 2.4  | 1.7          | 1.3          | 1.1          | 0.9          | 0.8             |
| ZF                 | Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.           |              |              |              |              |                 |

**Tablo 2.5:** 1.0 sn periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).

| Yerel zemin sınıfı | 1.0 sn periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı $F_1$ |                 |                 |                 |                 |                 |
|--------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                    | $S_1 \leq 0.10$  | $S_1 \leq 0.10$ | $S_1 \leq 0.10$ | $S_1 \leq 0.10$ | $S_1 \leq 0.10$ | $S_1 \leq 0.10$ |
| ZA                 | 0.8  | 0.8             | 0.8             | 0.8             | 0.8             | 0.8             |
| ZB                 | 0.8  | 0.8             | 0.8             | 0.8             | 0.8             | 0.8             |
| ZC                 | 1.5  | 1.5             | 1.5             | 1.5             | 1.5             | 1.4             |
| ZD                 | 2.4  | 2.2             | 2.0             | 1.9             | 1.8             | 1.7             |
| ZE                 | 4.2  | 3.3             | 2.8             | 2.4             | 2.2             | 2.0             |
| ZF                 | Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.             |                 |                 |                 |                 |                 |

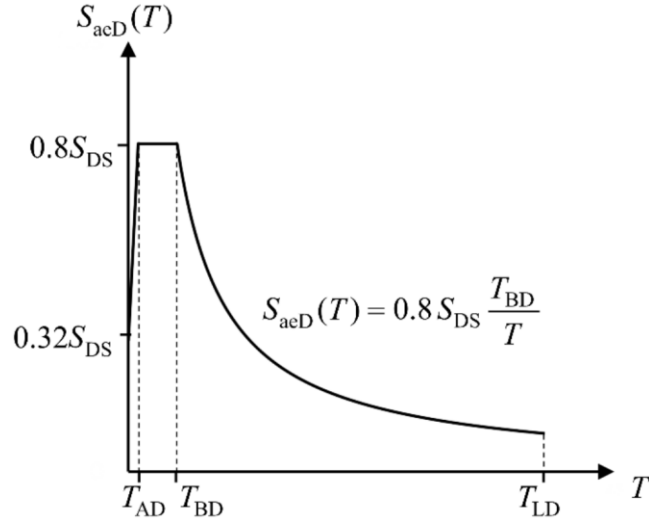
Gözönüne alınan deprem yer hareketi düzeyi için düşey elastik tasarım ivme spektrumunun uç bölgedeki  $S_{aeD}(T)$  spektral ivmeleri, yatay ivme spektrumu için tanımlanan  $S_{DS}$  değerine ve  $T$  doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi [g] cinsinden (2.24)-(2.25) denklemleri yardımıyla hesaplanır (Şekil 2.27) (TBDY, 2018).

$$S_{aeD}(T) = \left(0.32 + 0.48 \frac{T}{T_{AD}}\right) S_{DS} \quad 0 \leq T \leq T_{AD} \quad (2.24a)$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8S_{DS} \quad T_{AD} \leq T \leq T_{BD} \quad (2.24b)$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} \quad T_{BD} \leq T \leq T_{LD} \quad (2.24c)$$

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3} \quad ; \quad T_{BD} = \frac{T_B}{3} \quad ; \quad T_{LD} = \frac{T_L}{3} \quad (2.25)$$



Şekil 2.27: %5 sönümlü düşey ivme tasarım spektrumu (TBDY, 2018).

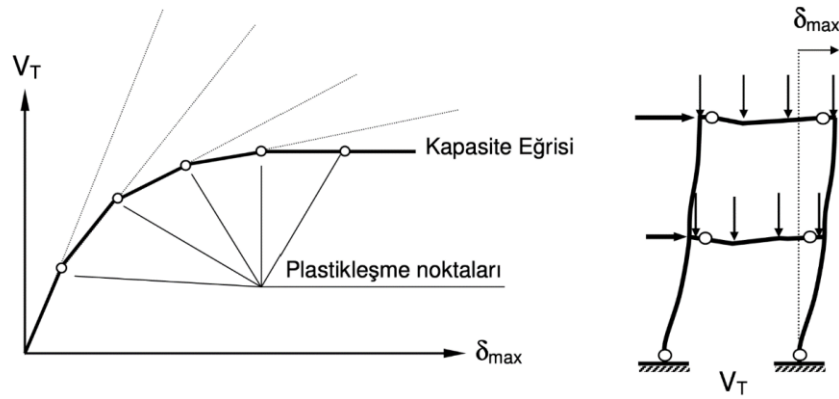
## 2.12 Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri

TBDY-2018’de verilen esaslar çerçevesinde yeni binaların şekildeğiştirme esaslı tasarımı ile, mevcut binaların sismik etkiler altında değerlendirilmesine yönelik doğrusal-elastik olmayan analiz yöntemleri, elastik-ötesi statik itme analizi (pushover analizi) ve zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analiz başlığı altında genel olarak gruplanabilir. Bu noktada, gözönüne alınan deprem yer hareketi altında taşıyıcı sistemlerin statik veya dinamik esaslı analizleri sonrasında sünek davranışa ilişkin malzeme/enkesit/eleman/sistem bazlı iç kuvvet ve şekildeğiştirme talepleri, mevcut kapasiteler ve şekildeğiştirme sınırları ile karşılaştırılır. Ayrıca, gevrek davranışa ilişkin iç kuvvetlerin mevcut taşıma kapasitelerini aşıp aşmadığı analiz süresince kontrol edilir.

### 2.12.1 Elastik-ötesi statik itme analizleri

Öngörülen deprem yer hareketi seviyesi altında yapı sistemlerinde oluşacak sismik davranış taleplerinin belirlenmesine yönelik elastik-ötesi statik itme analizi (pushover analiz), taşıyıcı sistemin monotonik artan yatay yükler altında malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal-elastik olmayan teoriye göre statik analizini esas almaktadır. Kapasite eğrisi olarak ifade edilen *yatay kuvvet – kritik tepe yerdeğiştirmesi* davranışının belirlenmesi sayesinde, sistemdeki zayıf elemanlar ile bunların yerleri, stabilite ve mekanizma durumları ve ayrıca, taşıyıcı elemanlardaki şekildeğiştirme talepleri yerdeğiştirme kontrollü belirlenebilmektedir (Şekil 2.28). Bu noktada, öngörülen deprem seviyesi için hesaplanan hedef yerdeğiştirmesi talebi referans alınarak, yapı sistemi için öngörülen performans düzeyinin (hasar durumunun) gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilir (Hasgül, 2004). Elastik-ötesi statik itme analizi,

başlangıç adımından son yük artımına kadar sabit yatay yük profilinin (çoğunlukla 1.doğal titreşim modu şekli) kullanıldığı *Sabit Mod* şeklinde veya sistemde meydana gelen her plastik mafsal sonrasında yeniden hesaplanan modal özelliklere bağlı olarak *Değişken Mod* ile uygulanabilir. TBDY-2018'e göre tek modlu statik itme analizinin uygulanabilmesi için bina yükseklik sınıfı  $BYS \geq 5$ , dış merkezlik gözönüne alınmaksızın her kattaki burulma düzensizliği katsayısı  $\eta_{bi} < 1.4$  ve ilgili deprem doğrultusunda birinci doğal titreşim moduna ait etkin kütle katılım oranının en az %70 olması koşullarının tümü sağlanmalıdır.



Şekil 2.28: Kapasite eğrisinin elde edilmesi (Hasgül, 2004).

### 2.12.2 Zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analiz

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramı içerisinde, belirli deprem yer hareketleri etkisindeki yapı sistemlerinde meydana gelecek iç kuvvet ve şekildeğiştirme bazlı sismik taleplerinin belirlenmesine en güvenilir yöntem, *Zaman Tanım Alanında Doğrusal-Elastik Olmayan Analiz* (ZTADOA) yöntemidir. Bu yöntemden elde edilecek taleplerin kesin olduğu belirli varsayımlar altında kabul edilmekle birlikte, deprem yer hareketine ait ivme kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi, iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntılarının tersinir yükler için idealleştirilmesi, modellemeye ilişkin varsayımlar, sönüm etkisi vb. parametrelerin seçimi analiz sonuçları üzerinde önemli etkiye sahiptir (Hasgül, 2011).

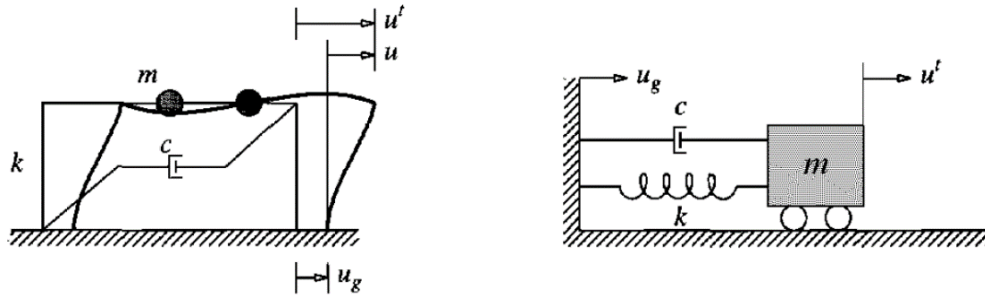
ZTADOA yöntemi, genel olarak, belirli bir ivme-zaman kaydı için taşıyıcı sisteme ait dinamik hareket denklemlerinin çok küçük  $\Delta t$  zaman artımlarında için *adım adım integrasyonunu* esas almaktadır. Bu sayede, malzeme / enkesit / eleman / sistem bazlı iç kuvvet ve şekildeğiştirmeler zamana bağlı elde edilmektedir. TBDY-2018'e göre, yeni yapılacak yüksek katlı binalar ile düzensizlik içeren mevcut binaların sismik etkiler altındaki değerlendirilmeleri için ZTADOA yöntemi zorunlu olmakla birlikte, yönetmelik kapsamındaki tüm bina sistemlerinin sismik analizlerinde herhangi bir sınırlama olmaksızın uygulanabilmektedir.

Doğrusal-elastik davranış gösteren tek serbestlik dereceli bir sisteme ait hareket denklemi (2.26) denklemlerinde verilmiştir (Şekil 2.29).  $t=0$  anındaki başlangıç koşulları  $\{\dot{u}(0) \text{ ve } u(0)\}$  altında hareket denkleminin çözülmesi ile yerdeğiştirmeler zamana bağlı elde edilebilir. Böylece, sisteme ait diğer davranış talepleri ( $\theta_p, \phi_p, \delta, \Delta, M, \text{vb.}$ ) zamana bağlı olarak hesaplanabilir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.26a)$$

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = \ddot{u}_g(t) \quad (2.26b)$$

(2.26a-b) denklemlerinde  $m$  kütle,  $c$  sönüm çarpanını,  $k$  rijitliği göstermektedir.  $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  ve  $u$ , sırasıyla, ivme, hız ve yerdeğiştirme davranış bileşenleri olmakla birlikte  $\ddot{u}_g(t)$  deprem yer hareketi ivmesidir.  $\xi$  sönüm oranını ve  $\omega_n$  doğal açısal frekansı göstermektedir.

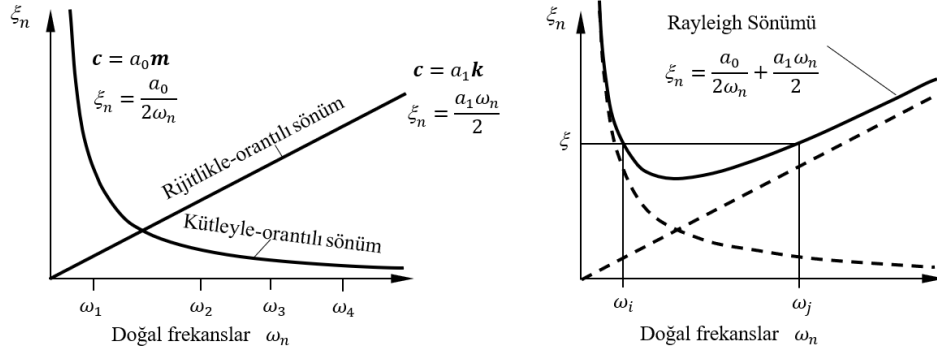


**Şekil 2.29:** Tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik davranışı (Chopra, 2000).

Hareket denkleminin sayısal çözümünde sönüm için en uygun modelleme tekniği, elastik ve histeretik sönümün toplamı olarak ifade edilen eşdeğer viskoz sönüm'ün kullanılmasıdır. Elastik sönüm daha çok malzeme özelliğine bağlı olmakla birlikte betonarme sistemler için genellikle %5 alınmaktadır. Histeretik sönüm ise, sistemin bir çevrimsel hareketinde yutulan enerji ile ilişkilidir. Sismik yükler etkisindeki yapı sistemlerinin ZTADOA'lerinde viskoz sönüm için en yaygın kullanılan yaklaşım *Rayleigh Sönüm* modelidir (Şekil 2.30). Bu modelde sönüm, kütle orantılı ve rijitlik orantılı bileşenlerin doğrusal süperpozisyonu elde edilir (bkz. (2.27) denklemi).

$$c = a_0m + a_1k \quad (2.27)$$

Burada,  $m$  kütle matrisi,  $k$ , rijitlik matrisi,  $a_0$  ve  $a_1$  herhangi bir moddaki sönüm oranlarıdır.



Şekil 2.30: Rayleigh sönüm modeli (Chopra, 2000).

### 2.13 Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

TBDY-2018 kapsamında bina sistemlerinin ZTADOA'lerinde kullanılacak deprem yer hareketi kayıtlarının seçiminde, depremin büyüklüğü, faya olan uzaklık, kaynak mekanizması, yerel zemin koşulları vb. parametrelerin gözönünde bulundurulması ve ayrıca, binanın bulunduğu bölge için kaydedilmiş geçmiş deprem verilerinin bulunması halinde öncelikle bu kayıtların ölçeklendirilmesi gerekir. Analizler için en az 11 deprem kaydı seçilmeli ve aynı deprem kaydından seçilecek istasyon verileri 3'ü geçmemelidir. Yeterli sayı ve nitelikte deprem kaydının elde edilememesi halinde, binanın bulunduğu bölgenin yerel zeminin özellikleri altında benzeştirilmiş kayıtlarda kullanılabilir (TBDY, 2018).

Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının ölçeklendirilmesi, genel olarak, *Zaman Tanım Alanında* veya *Frekans Alanında* çözümler üreten yöntemler ile yapılabilmektedir. Zaman tanım alanındaki ölçekleme (basit ölçeklendirme) yönteminde, ivme-zaman kaydının frekans içeriği değiştirilmeksizin genlikler bir ölçek katsayısı ile büyütüp/küçültülerek hedef spektrumla eşleştirilir. Frekans alanında (spektral uyuşum şeklinde) ölçeklendirmede ise, tasarım ivme spektrumu ile mümkün olduğunca uyuşacak kayıtların oluşturulması hedeflenir. Bu yöntemde, ölçeklenen deprem kaydının frekans içeriği değişmektedir.

TBDY-2018'ye göre ZTADOA'lerde kullanılacak deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesine ait hesap esasları aşağıda özetlenmiştir. Buna göre;

- Bir veya iki boyutlu hesaplar için seçilen tüm kayıtlara ait ivme spektrumlarının ortalamasının  $0.2 T_p$  ve  $1.5 T_p$  periyotları arasındaki genlikleri, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmamalıdır (TBDY, 2018).

- Üç boyutlu hesapta seçilen deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumlarının kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumlarının ortalamasının  $0.2T_p$  ve  $1.5T_p$  periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilir (TBDY, 2018).

## 2.14 Betonarme Binaların Performans Düzeylerine ait Şekildeğiştirme Sınırları

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramı çerçevesinde, TBDY-2018'de tanımlanan *KK*, *SH*, *KH* ve *GÖ* performans düzeylerine ait şekildeğiştirme sınırları plastik mafsallı davranışı ile modellenen elemanlar için  $\theta_p$  plastik dönme, yayılı plastik davranış modeli ile modellenen elemanlar için beton ve donatıdaki  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  birim boy değişmesi cinsinden Tablo 2.6'da özetlenmiştir. Bununla birlikte, performans düzeyleri arasındaki hasar durumunu gösteren performans bölgeleri (*Sınırlı Hasar Bölgesi* {*SHB*}, *Belirgin Hasar Bölgesi* {*BHB*}, *İleri Hasar Bölgesi* {*İHB*} ve *Göçme Bölgesi* {*GB*}) tanımlanmıştır (Şekil 2.25).

**Tablo 2.6:** Performans düzeylerine karşı gelen şekildeğiştirme sınırları (TBDY, 2018).

| Performans düzeyi              | Yayılı plastik davranış modeli  | Plastik mafsallı modeli  |
|--------------------------------|---|--|
| <b>Sınırlı Hasar (SH)</b>      | $\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$<br>$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$  | $\theta_p^{(SH)} = 0$  |
| <b>Kontrollü Hasar (KH)</b>    | $\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_s^{(GÖ)}$<br>$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_c^{(GÖ)}$                    | $\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)}$   |
| <b>Göçmenin Önlenmesi (GÖ)</b> | $\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4 \varepsilon_{su}$<br>$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04 \sqrt{\omega_{\omega e}} \leq 0.018$ | $\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[ (\phi_u - \phi_y) L_p \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right]$ |

$\omega_{\omega e}$ : Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı  $\phi_u$ : Nihai eğrilik  $\phi_y$ : Eşdeğer akma eğriliği

$L_s$ : Kesme açıklığı  $L_p$ : Plastik mafsallı boyu  $D_b$ : Boyuna donatı çapı

Tablo 2.6'daki şekildeğiştirme sınırları  $V_e/(b_w d f_{ctm}) \leq 0.65$  için geçerlidir. Enkesitteki kesme kuvveti oranının  $\geq 1.30$  olması halinde, bu sınırlar değerler %50 oranında azaltılmalıdır.  $1.30 > V_e/(b_w d f_{ctm}) > 0.65$  için şekildeğiştirme sınırlarının azaltılmasında doğrusal enterpolasyon uygulanır (TBDY, 2018).

### 3. BETONARME ÇERÇEVE SİSTEMLER ÜZERİNDE PARAMETRİK SAYISAL İNCELEMELER

Bu tez çalışmasının sayısal analizleri kapsamında, zemin katında düşey kolon süreksizliğine sahip betonarme çerçeve sistemlerin sismik davranışları doğrusal olmayan teori çerçevesinde parametrik incelenmiştir. Bunun için, düşey süreksizliğin olduğu bölgede farklı transfer kirişi uzunluklarına sahip ( $L=2^m$ ,  $3^m$  ve  $4^m$ ) 9 adet çerçeve sistemin Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizleri (ZTADOA) yapılarak şekildeğiştirme bazlı talepleri belirlenmiştir. Daha sonra, ölçeklendirilmiş deprem yer hareketleri için elde edilen davranış taleplerinin aritmetik ortalamaları alınarak bu tür düzensizliğe sahip bina sistemleri çerçevesinde yönetmeliğin performans hedefleri sayısal olarak irdelenmiştir.

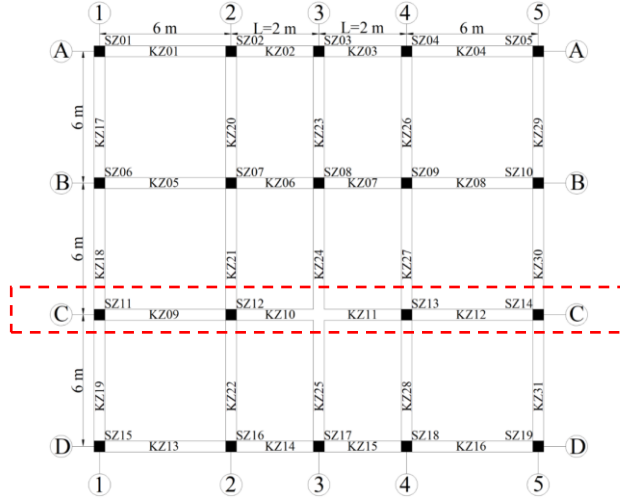
#### 3.1 Hesap Varsayımları

Betonarme çerçeve sistemlere ait hesap modellerinin oluşturulması ve doğrusal-elastik olmayan analizlerde yapılan kabuller aşağıda sunulmuştur.

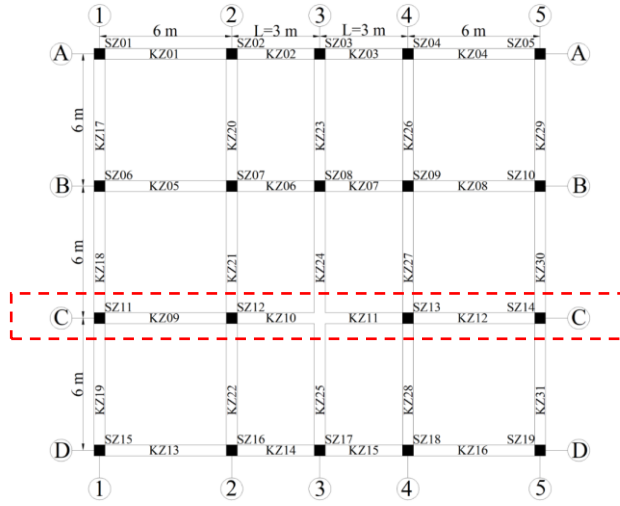
- Düzlem kesitler sistem şekildeğiştirdikten sonra da düzlem kalmaktadır.
- Beton ve donatı arasında tam aderans bulunmaktadır.
- Sargılı ve sargısız betonun gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı için Mander vd. (1988)'deki model, donatı için ise pekleşmenin gözönüne alındığı malzeme modeli kullanılmıştır.
- Doğrusal-elastik olmayan analizlerde kiriş ve kolonlara ait etkin (çatlamış) enkesit rijitlikleri TBDY-2018 Bölüm 4.5.8'e göre hesaplanmıştır. Beton çekme dayanımı ihmal edilmiştir.
- Analizlerde, yerdeğiştirmelerin denge denklemlerindeki etkisi ( $P-\Delta$ ) gözönünde bulundurulmuş, buna karşın geometrik uygunluk koşullarındaki etkisi ihmal edilmiştir.

#### 3.2 Betonarme Çerçeve Sistemlerin Özellikleri

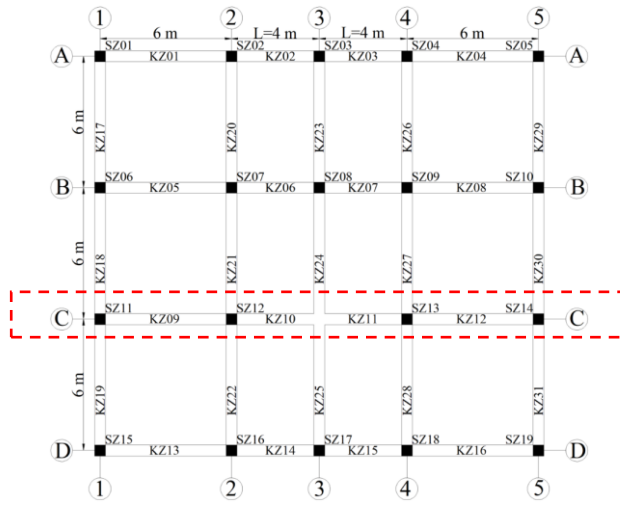
Düşey kolon süreksizliğine sahip farklı taşıyıcı sistemler üzerinde, düşey düzensizliğin sismik davranış talepleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla kat sayısı (3, 5 ve 7) ve transfer kirişi uzunluğunun ( $L=2^m$ ,  $3^m$  ve  $4^m$ ) değiştirildiği bina sistemlerinin zemin kat orta aksındaki kolonları kaldırarak üç boyutlu hesap modelleri ProtaStructure (2024) yazılımında oluşturulmuş ve tasarımlar TBDY-2018'deki esaslar çerçevesinde yapılmıştır (Şekil 3.1-3.3). Binaların tasarımlarına esas parametreler Tablo 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1: Transfer kirişi uzunluğu 2<sup>m</sup> olan bina sistemleri için kat planı.



Şekil 3.2: Transfer kirişi uzunluğu 3<sup>m</sup> olan bina sistemleri için kat planı.



Şekil 3.3: Transfer kirişi uzunluğu 4<sup>m</sup> olan bina sistemleri için kat planı.

**Tablo 3.1:** Betonarme yapıların tasarımında dikkate alınan parametreler.

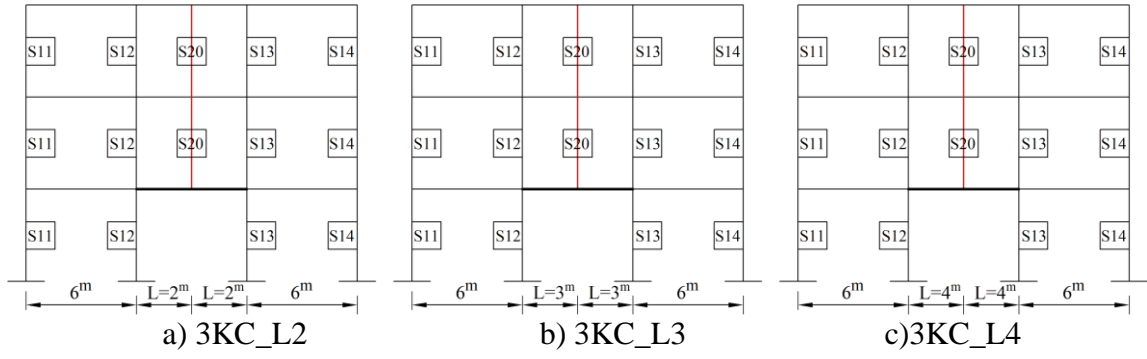
|   |               |                          |   |                |
|---|---------------|--------------------------|---|----------------|
| Bina kullanım sınıfı  |               | <i>BKS</i>               | 3   |                |
| Deprem yer hareketi düzeyi  |               |                          | DD-2  |                |
| Deprem tasarım sınıfı   |               | <i>DTS</i>               | 1   |                |
| Yerel zemin sınıfı  |               |                          | ZC  |                |
| Bina önem katsayısı   |               | <i>I</i>                 | 1   |                |
| Bina yükseklik sınıfı   |               | <i>BYS</i>               | 7   |                |
| Beton ve beton çeliği sınıfı  |               |                          | C30, B420C                                    |                |
| Tasarım ivme spektrumu katsayıları  |               | $S_D(g)$                 | $S_{DS}=1.020$                                | $S_{D1}=0.315$ |
| Yerel zemin çarpanları  |               |                          | $F_S=1.2$                                     | $F_1=1.5$      |
| Beton ve beton çeliğinin karakteristik dayanımları  |               | $f_c'$<br>$f_y, f_u$     | $f_c'=30$ MPa<br>$f_y=420$ MPa, $f_u=550$ MPa |                |
| Kat yüksekliği  |               | $h_i$                    | 3 <sup>m</sup>                                |                |
| Döşeme yükleri  | Normal katlar | $G$ (kN/m <sup>2</sup> ) | G=6.125                                       | Q=2.0          |
|   | Çatı katı     | $Q$ (kN/m <sup>2</sup> ) |   | Q=1.5          |
| Duvar yükleri   | İç duvarlar   | 10 cm                    | 5.35 kN/m                                     |                |
|   | Dış duvarlar  |                          |   |                |
| Spektrum karakteristik periyotları  | $T$ (sn)      | $T_A=0.062$              | $T_B=0.309$                                   | $T_L=6.0$      |
| Süneklik düzeyi,<br>Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R),<br>Dayanım fazlalığı katsayısı (D), |               | Yüksek                   | R=8   | D=3            |

Sayısal incelemelerde, tasarımları yapılan 9 adet betonarme bina için düşey düzensizliğin bulunduğu C-C aksı çerçeveleri çıkarılarak iki boyutlu taşıyıcı sistem modelleri oluşturulmuştur (Şekil 3.5-3.6). Bu sistemlerin isimlendirilmesi kat sayısı ve transfer kirişi uzunluklarını içermektedir. Buna göre;

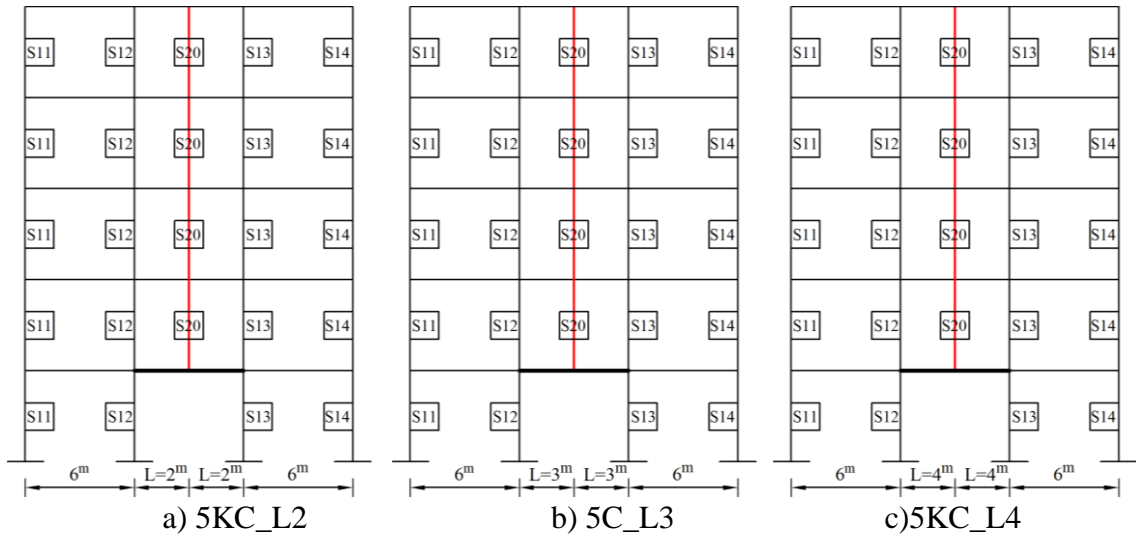
**Transfer kirişi uzunluğu**

| Kat sayısı | L=2 <sup>m</sup> | L=3 <sup>m</sup> | L=4 <sup>m</sup> |
|------------|------------------|------------------|------------------|
| 3          | 3KC_L2           | 3KC_L3           | 3KC_L4           |
| 5          | 5KC_L2           | 5KC_L3           | 5KC_L4           |
| 7          | 7KC_L2           | 7KC_L3           | 7KC_L4           |

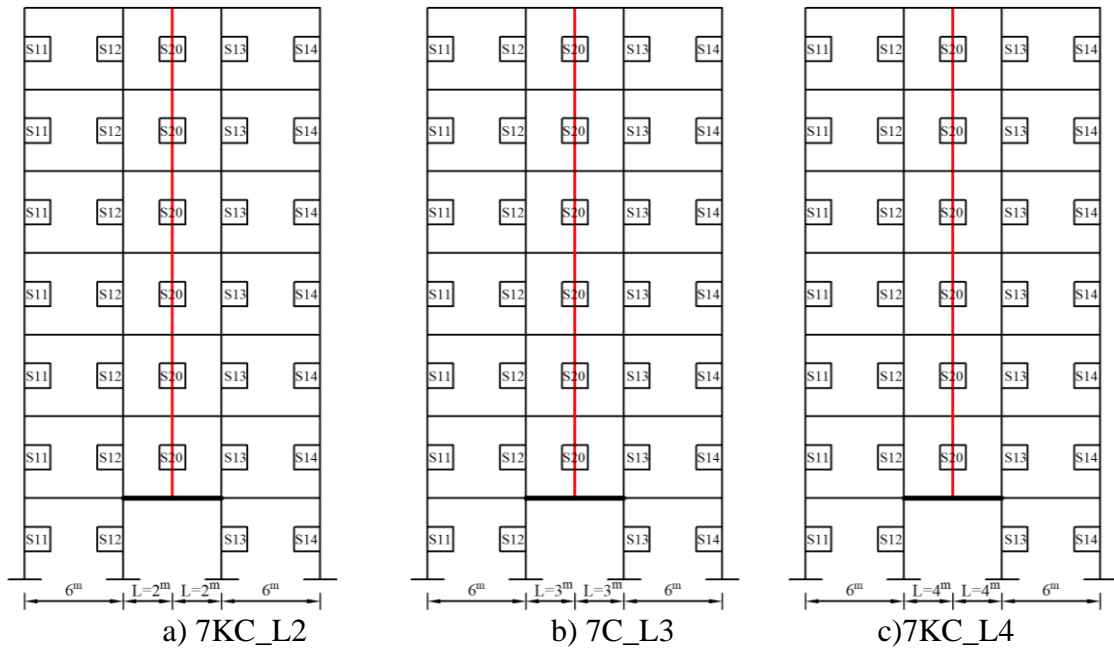
Düzlem çerçeve sistemlere ait enkesit boyutları ve donatıları kolonlar için Tablo 3.2’de, kirişler için Tablo 3.3-3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.4: 3KC sistemlerde C-C aksı çerçevesi.



Şekil 3.5: 5KC sistemlerde C-C aksı çerçevesi.



Şekil 3.6: 7KC sistemlerde C-C aksı çerçevesi.

**Tablo 3.2:** Kolon elemanların enkesit boyutları ve donatı özellikleri.

| Bina   | Kat | Kolon aksları | Enkesit boyutları<br>(cm x cm) | Boyuna donatılar<br>$A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | Boyuna donatı<br>oranı (%) | Enine<br>donatılar |
|--------|-----|---------------|--------------------------------|--|----------------------------|--------------------|
| 3KC_L2 | 1-3 | C1; C3; C5    | 40 x 40                        | 8Φ16<br>(16.08 cm <sup>2</sup> )             | % 1.01                     | Φ8/16/8            |
|        |     | C2; C4        | 50 x 50                        | 16Φ16<br>(32.17 cm <sup>2</sup> )            | % 1.29                     | Φ8/16/8            |
| 3KC_L3 | 1-3 | C1; C3; C5    | 45 x 45                        | 12Φ16<br>(24.13 cm <sup>2</sup> )            | % 1.19                     | Φ8/16/8            |
|        |     | C2; C4        | 55 x 55                        | 16Φ16<br>(32.17 cm <sup>2</sup> )            | % 1.06                     | Φ8/16/8            |
| 3KC_L4 | 1-3 | C1; C3; C5    | 50 x 50                        | 16Φ16<br>(32.17 cm <sup>2</sup> )            | % 1.29                     | Φ8/16/8            |
|        |     | C2; C4        | 60 x 60                        | 20Φ16<br>(40.21 cm <sup>2</sup> )            | % 1.12                     | Φ8/16/8            |
| 5KC_L2 | 1-5 | C-1; C-3; C-5 | 50 x 50                        | 12Φ18<br>(30.54 cm <sup>2</sup> )            | % 1.22                     | Φ8/16/8            |
|        |     | C-2; C-4      | 60 x 60                        | 16Φ18<br>(40.72 cm <sup>2</sup> )            | % 1.13                     | Φ8/16/8            |
| 5KC_L3 | 1-5 | C-1; C-3; C-5 | 55 x 55                        | 12Φ18<br>(30.54 cm <sup>2</sup> )            | % 1.01                     | Φ8/16/8            |
|        |     | C-2; C-4      | 65 x 65                        | 20Φ18<br>(50.89 cm <sup>2</sup> )            | % 1.2                      | Φ8/16/8            |
| 5KC_L4 | 1-5 | C-1; C-3; C-5 | 60 x 60                        | 16Φ18<br>(40.72 cm <sup>2</sup> )            | % 1.13                     | Φ8/16/8            |
|        |     | C-2; C-4      | 70 x 70                        | 20Φ18<br>(50.89 cm <sup>2</sup> )            | % 1.04                     | Φ8/16/8            |
| 7KC_L2 | 1-7 | C-1; C-3; C-5 | 60 x 60                        | 12Φ20<br>(37.68 cm <sup>2</sup> )            | % 1.05                     | Φ 8/16/8           |
|        |     | C-2; C-4      | 70 x 70                        | 16Φ20<br>(50.24 cm <sup>2</sup> )            | % 1.03                     | Φ 8/16/8           |
| 7KC_L3 | 1-7 | C-1; C-3; C-5 | 65 x 65                        | 16Φ20<br>(50.24 cm <sup>2</sup> )            | % 1.19                     | Φ 8/16/8           |
|        |     | C-2; C-4      | 75 x 75                        | 20Φ20<br>(62.80 cm <sup>2</sup> )            | % 1.12                     | Φ 8/16/8           |
| 7KC_L4 | 1-7 | C-1; C-3; C-5 | 70 x 70                        | 16Φ20<br>(50.24 cm <sup>2</sup> )            | % 1.03                     | Φ 8/16/8           |
|        |     | C-2; C-4      | 80 x 80                        | 24Φ20<br>(75.36 cm <sup>2</sup> )            | % 1.18                     | Φ 8/16/8           |

**Tablo 3.3: 3KC\_L2 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 3   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>1Φ12                          | 2Φ16+<br>1Φ20 | 2Φ16+<br>1Φ20 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ20 | 2Φ16+<br>1Φ20 | 2Φ16+<br>1Φ12 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 2   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ16                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ16 |
|     |   | Alt               | 3Φ16                                   | 3Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16          |
| 1   | 30x60                                     | Üst               | 2Φ18+<br>1Φ16                          | 2Φ18+<br>3Φ14 | 2Φ18+<br>3Φ14 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>3Φ14 | 2Φ18+<br>3Φ14 | 2Φ18+<br>1Φ16 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          |

**Tablo 3.4: 3KC\_L3 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 3   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>1Φ14                          | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>1Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 3Φ14+<br>1Φ14 | 3Φ14+<br>1Φ14 | 3Φ14+<br>1Φ14 | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 2   | 30x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>3Φ14                          | 2Φ16+<br>3Φ18 | 2Φ16+<br>3Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>3Φ18 | 2Φ16+<br>3Φ18 | 2Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ20          | 2Φ20+<br>1Φ18 | 2Φ20+<br>1Φ18 | 2Φ20          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 1   | 35x65                                     | Üst               | 3Φ16+<br>1Φ14                          | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>1Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ16                                   | 3Φ16          | 3Φ18          | 3Φ18          | 3Φ18+<br>2Φ14 | 3Φ18          | 3Φ16          | 3Φ16          |

**Tablo 3.5: 3KC\_L4 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 3   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ12                          | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ20+<br>2Φ16 | 2Φ20          | 2Φ20          | 2Φ20+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>2Φ12 |
|     |   | Alt               | 2Φ16                                   | 2Φ16          | 2Φ20          | 2Φ20+<br>1Φ12 | 2Φ20          | 2Φ20          | 2Φ16          | 2Φ16          |
| 2   | 35x55                                     | Üst               | 2Φ18+<br>2Φ16                          | 2Φ18+<br>4Φ20 | 2Φ18+<br>4Φ20 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>4Φ20 | 2Φ18+<br>4Φ20 | 2Φ18+<br>2Φ16 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>3Φ12 | 3Φ20+<br>3Φ12 | 3Φ20          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 1   | 40x70                                     | Üst               | 3Φ18+<br>1Φ12                          | 3Φ18+<br>4Φ20 | 3Φ20+<br>4Φ20 | 3Φ20          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>4Φ20 | 3Φ18+<br>4Φ20 | 3Φ18+<br>1Φ12 |
|     |   | Alt               | 3Φ18                                   | 3Φ18          | 4Φ20          | 4Φ20+3Φ12     | 4Φ20          | 4Φ20          | 3Φ18          | 3Φ18          |

**Tablo 3.6: 5KC\_L2 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 5   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>1Φ14                          | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16+<br>1Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 4   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ16                          | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>2Φ16 | 2Φ16+<br>2Φ16 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 3   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>3Φ14                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | Φ16+<br>2Φ18  | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ14 | 2Φ16+<br>1Φ14 | 2Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 2   | 30x60                                     | Üst               | 2Φ18+<br>3Φ12                          | 2Φ18+<br>3Φ16 | 2Φ18+<br>3Φ16 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>3Φ16 | 2Φ18+<br>3Φ16 | 2Φ18+<br>3Φ12 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 1   | 30x70                                     | Üst               | 3Φ16+<br>1Φ14                          | 3Φ16+<br>3Φ16 | 2Φ20+<br>3Φ16 | 2Φ20          | 2Φ20          | 2Φ20+<br>3Φ16 | 2Φ20+<br>3Φ16 | 3Φ16+<br>1Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ16                                   | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>1Φ14 | 3Φ16+<br>1Φ14 | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16          |

**Tablo 3.7: 5KC\_L3 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 5   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ12                          | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16+<br>1Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ12 |
|     |   | Alt               | 2Φ16                                   | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          |
| 4   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>3Φ14                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 3   | 35x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>3Φ16                          | 2Φ16+<br>3Φ16 | 2Φ16+<br>3Φ16 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>3Φ16 | 2Φ16+<br>3Φ16 | 2Φ16+<br>3Φ16 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>1Φ16 | 3Φ16+<br>1Φ16 | 3Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 2   | 45x65                                     | Üst               | 4Φ16+<br>1Φ16                          | 4Φ16+<br>5Φ16 | 4Φ16+<br>5Φ16 | 4Φ16          | 4Φ16          | 4Φ16+<br>5Φ16 | 4Φ16+<br>5Φ16 | 4Φ16+<br>1Φ16 |
|     |   | Alt               | 4Φ16                                   | 4Φ16          | 4Φ20          | 4Φ20+<br>1Φ20 | 4Φ20+<br>1Φ20 | 4Φ20          | 4Φ16          | 4Φ16          |
| 1   | 45x75                                     | Üst               | 3Φ20                                   | 3Φ20+<br>3Φ20 | 3Φ20+<br>3Φ20 | 3Φ20          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>3Φ20 | Φ20+<br>3Φ20  | 3Φ20          |
|     |   | Alt               | 3Φ20                                   | 3Φ20          | 5Φ16          | 5Φ16+<br>2Φ16 | 5Φ16+<br>2Φ16 | 5Φ16          | 3Φ20          | 3Φ20          |

**Tablo 3.8: 5KC\_L4 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 5   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>1Φ18                          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>1Φ18 |
|     |   | Alt               | 2Φ16                                   | 2Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18          | 2Φ16          | 2Φ16          |

**Tablo 3.8** (devam)

|   |       |     |               |               |               |               |               |               |               |               |
|---|-------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 4 | 25x50 | Üst | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ18+<br>2Φ20 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ18 |
|   |       | Alt | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>1Φ12 | 3Φ16+<br>1Φ12 | 3Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 3 | 35x50 | Üst | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14+<br>4Φ18 | 2Φ18+<br>4Φ18 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>4Φ18 | 3Φ14+<br>4Φ18 | 3Φ14+<br>2Φ18 |
|   |       | Alt | 2Φ18          | 2Φ18          | 4Φ16          | 4Φ16+<br>2Φ12 | 4Φ16+<br>2Φ12 | 4Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 2 | 50x65 | Üst | 3Φ20+<br>1Φ14 | 3Φ20+<br>6Φ20 | 3Φ20+<br>6Φ20 | 3Φ20          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>6Φ20 | 3Φ20+<br>6Φ20 | 3Φ20+<br>1Φ14 |
|   |       | Alt | 3Φ20          | 3Φ20          | 8Φ16          | 8Φ16+<br>2Φ20 | 8Φ16+<br>2Φ20 | 8Φ16          | 3Φ20          | 3Φ20          |
| 1 | 50x75 | Üst | 4Φ18          | 4Φ18+<br>5Φ20 | 4Φ20+<br>5Φ20 | 4Φ20          | 4Φ20          | 4Φ20+<br>5Φ20 | 4Φ18+<br>5Φ20 | 4Φ18          |
|   |       | Alt | 4Φ18          | 4Φ18          | 5Φ20          | 5Φ20+<br>2Φ18 | 5Φ20+<br>2Φ18 | 5Φ20          | 4Φ18          | 4Φ18          |

**Tablo 3.9:** 7KC\_L2 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 7   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>1Φ16                          | 2Φ16+<br>2Φ12 | 2Φ16+<br>2Φ12 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ12 | 2Φ16+<br>2Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ16 |
|     |   | Alt               | 2Φ16                                   | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          |
| 6   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>1Φ16                          | 2Φ16+<br>1Φ16 | 2Φ16+<br>1Φ16 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ16 | 2Φ16+<br>1Φ16 | 2Φ16+<br>1Φ16 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 5   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>3Φ14                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 4   | 30x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ18                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ14 | 2Φ16          | 2Φ16+<br>1Φ14 | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 3   | 30x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ18                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ14+<br>2Φ12 | 3Φ14+<br>2Φ12 | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 2   | 40x70                                     | Üst               | 3Φ18+<br>1Φ14                          | 3Φ18+<br>3Φ16 | 3Φ18+<br>3Φ16 | 3Φ18          | 3Φ18          | 3Φ18+<br>3Φ16 | 3Φ18+<br>3Φ16 | 3Φ18+<br>1Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ18                                   | 3Φ18          | 4Φ16          | 4Φ16+<br>2Φ16 | 4Φ16+<br>2Φ16 | 4Φ16          | 3Φ18          | 3Φ18          |
| 1   | 40x80                                     | Üst               | 3Φ20                                   | 3Φ20+<br>3Φ16 | 3Φ20+<br>3Φ16 | 3Φ20          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>3Φ16 | 3Φ20+<br>3Φ16 | 3Φ20          |
|     |   | Alt               | 3Φ20                                   | 3Φ20          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>1Φ12 | 3Φ20+<br>1Φ12 | 3Φ20          | 3Φ20          | 3Φ20          |

**Tablo 3.10:** 7KC\_L3 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |      |            |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|------|------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |      | 3. açıklık |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ  | Sol        | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 7   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ18                          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16 | 2Φ16       | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 |
|     |   | Alt               | 2Φ18                                   | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ16          | 2Φ16 | 2Φ16       | 2Φ16          | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18          |

**Tablo 3.10 (devam)**

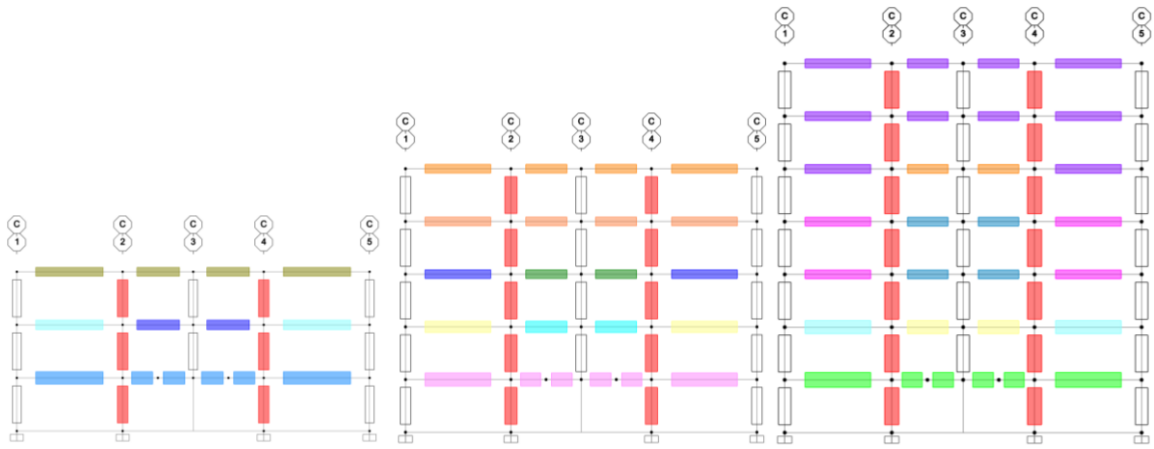
|   |       |     |               |               |               |               |               |               |               |               |
|---|-------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 6 | 25x50 | Üst | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ18 | 2Φ16+<br>2Φ20 |
|   |       | Alt | 3Φ14+<br>1Φ12 | 3Φ14+<br>1Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ12 | 2Φ16+<br>1Φ12 | 3Φ14+<br>1Φ12 | 3Φ14+<br>1Φ12 |
| 5 | 25x50 | Üst | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 |
|   |       | Alt | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18          | 2Φ18          | 2Φ18          |
| 4 | 35x50 | Üst | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14+<br>2Φ18 |
|   |       | Alt | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>2Φ12 | 3Φ16+<br>2Φ12 | 3Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 3 | 35x50 | Üst | 3Φ14+<br>2Φ18 | 3Φ14+<br>2Φ20 | 3Φ14+<br>2Φ20 | 3Φ14          | 3Φ14          | 3Φ14+<br>2Φ20 | 3Φ14+<br>2Φ20 | 3Φ14+<br>2Φ18 |
|   |       | Alt | 3Φ14          | 3Φ14          | 2Φ20          | 2Φ20+<br>2Φ14 | 2Φ20+<br>2Φ14 | 2Φ20          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 2 | 55x75 | Üst | 6Φ16          | 6Φ16+<br>4Φ18 | 6Φ16+<br>4Φ18 | 6Φ16          | 6Φ16          | 6Φ16+<br>4Φ18 | 6Φ16+<br>4Φ18 | 6Φ16          |
|   |       | Alt | 6Φ16          | 6Φ16          | 6Φ18          | 6Φ18+<br>3Φ16 | 6Φ18+<br>3Φ16 | 6Φ18          | 6Φ18          | 6Φ16          |
| 1 | 55x85 | Üst | 4Φ20          | 4Φ20+<br>4Φ18 | 4Φ20+<br>4Φ18 | 4Φ20          | 4Φ20          | Φ20+<br>4Φ18  | 4Φ20+<br>4Φ18 | 4Φ20          |
|   |       | Alt | 4Φ20          | 4Φ20          | 4Φ20          | 4Φ20+<br>2Φ18 | 4Φ20+<br>2Φ18 | 4Φ20          | 4Φ20          | 4Φ20          |

**Tablo 3.11: 7KC\_L4 çerçeve sisteminde kiriş enkesit boyutları ve özellikleri.**

| Kat | Enkesit<br><i>b</i> x <i>h</i><br>(cmxcm) | Mesnet<br>bölgesi | Kiriş mesnetlerindeki boyuna donatılar |               |               |               |               |               |               |               |
|-----|---|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|     |   |                   | 1. açıklık                             |               | 2. açıklık    |               | 3. açıklık    |               | 4. açıklık    |               |
|     |   |                   | Sol                                    | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           | Sol           | Sağ           |
| 7   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ14                          | 2Φ16+<br>3Φ14 | 2Φ16+<br>3Φ14 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>3Φ14 | 2Φ16+3Φ14     | 2Φ16+<br>2Φ14 |
|     |   | Alt               | 2Φ16                                   | 2Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14+<br>1Φ12 | 3Φ14+<br>1Φ12 | 3Φ14          | 2Φ16          | 2Φ16          |
| 6   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>3Φ14                          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 2Φ18          | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18+<br>1Φ12 | 2Φ18          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 5   | 25x50                                     | Üst               | 2Φ16+<br>2Φ18                          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16          | 2Φ16          | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ20 | 2Φ16+<br>2Φ18 |
|     |   | Alt               | 3Φ14                                   | 3Φ14          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>1Φ12 | 3Φ16+<br>1Φ12 | 3Φ16          | 3Φ14          | 3Φ14          |
| 4   | 40x50                                     | Üst               | 3Φ16+<br>3Φ14                          | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ16                                   | 3Φ16          | 4Φ16          | 4Φ16+<br>2Φ12 | 4Φ16+<br>2Φ12 | 4Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16          |
| 3   | 40x50                                     | Üst               | 3Φ16+<br>3Φ14                          | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16          | 3Φ16          | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ20 | 3Φ16+<br>3Φ14 |
|     |   | Alt               | 3Φ16                                   | 3Φ16          | 3Φ20          | 3Φ20+<br>1Φ14 | 3Φ20+<br>1Φ14 | 3Φ20          | 3Φ16          | 3Φ16          |
| 2   | 60x75                                     | Üst               | 4Φ20                                   | 4Φ20+<br>7Φ20 | 4Φ20+<br>7Φ20 | 4Φ20          | 4Φ20          | 4Φ20+<br>7Φ20 | 4Φ20+<br>7Φ20 | 4Φ20          |
|     |   | Alt               | 6Φ16                                   | 6Φ16          | 8Φ18          | 8Φ18+<br>3Φ20 | 8Φ18+<br>3Φ20 | 8Φ18          | 6Φ16          | 6Φ16          |
| 1   | 60x85                                     | Üst               | 6Φ18                                   | 6Φ18+<br>6Φ20 | 6Φ18+<br>6Φ20 | 6Φ18          | 6Φ18          | 6Φ18+<br>6Φ20 | 6Φ18+<br>6Φ20 | 6Φ18          |
|     |   | Alt               | 6Φ18                                   | 6Φ18          | 6Φ20          | 6Φ20+<br>3Φ18 | 6Φ20+<br>3Φ18 | 6Φ20          | 6Φ18          | 6Φ18          |

### 3.3 Taşıyıcı Sistem Modellerinin Oluşturulması

Kolon süreksizliği içeren 9 adet betonarme çerçeve sistemin ZTADOA'lerine ait hesap modelleri SAP2000 (2021) programında tanımlanan 1 boyutlu çubuk elemanlar ile oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Eleman eksenlerinin düğüm noktalarında birleştikleri noktada rijit uç bölgeleri oluşturularak, plastik mafsalların eleman uçlarında meydana gelmesi sağlanmıştır. Çerçeve sistemin her kat seviyesindeki kütleler, 3 serbestlik derecesi dikkate alınarak düğüm noktalarına taşınmıştır. Kat kütlelerinin hesabında, hareketli yükler  $n=0.3$  hareketli yük katılım katsayısı ile azaltılmıştır. ZTADOA bölümünün başlangıç kısmında ise  $1.0G+0.3Q$  düşey yük kombinasyonu esas alınmıştır.

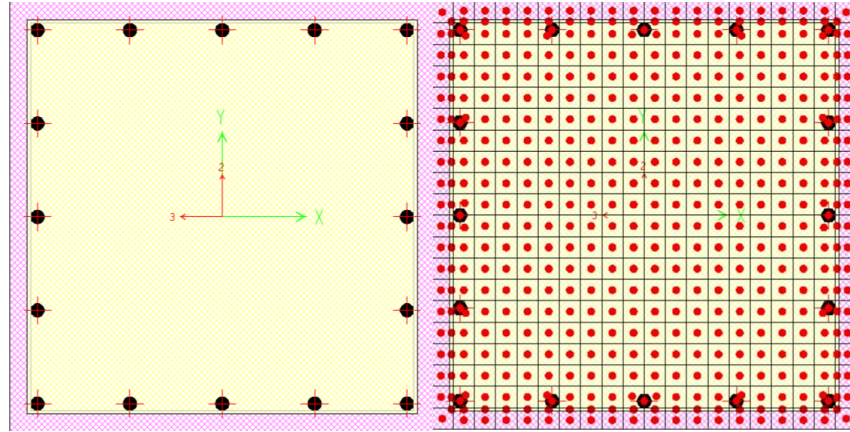


Şekil 3.7: 3KC-5KC ve 7KC sistemler için hazırlanan hesap modelleri.

#### 3.3.1 Eleman bazlı kuvvet-deformasyon bağıntılarının tanımlanması

Yatay ve düşey deprem etkisindeki betonarme taşıyıcı sistemlerine ait kiriş ve kolonların doğrusal-elastik olmayan malzeme davranışları, detayları Bölüm 2.9'da sunulan yaklaşımlar esas alınarak modellenmiştir. Buna göre, basit eğilme etkisindeki kiriş elemanların elastik ötesi bölgedeki davranışları, plastik şekildeğiştirmelerin eleman uçlarında toplandığını varsayan plastik mafsallık hipotezi ile karakterize edilmiştir. Bunun için, kiriş uç bölgelerinde enkesit ve malzeme özellikleri altında moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilerek akma momenti ve plastik dönme kapasitesi hesaplanmıştır. Daha sonra, akma sonrası %10'luk bir pekleşme davranış altında moment-plastik dönme bağıntıları hazırlanmıştır. Her kiriş ucunda ayrı hesaplanan bu bağlantılar plastik mafsallık uzunluklarının orta noktasına sıfır uzunluklu M3 mafsallık olarak tanımlanmıştır.

Bileşik eğilme etkisindeki kolon elemanlarda doğrusal-elastik olmayan malzeme davranışı, fiber kesit hücreleri kullanılarak yayılı plastik davranış modeli ile gözönüne alınmıştır (Şekil 3.8). Buna göre, kolon enkesitlerindeki etriye eksenini dışındaki kabuk betonu ve iç kısmında kalan göbek betonu  $2.5^{cm} \times 2.5^{cm}$  boyutlarında dilimlere bölünerek bu dilimlerin merkezindeki şekildeğiştirme ve gerilmeler Mander beton modelindeki bünye bağıntılarını sağlamaktadır. Bununla birlikte, kolon enkesitindeki her donatı  $A_s$  alana sahip ayrı bir dilim olarak modellenmiş ve bunların ağırlık merkezindeki şekildeğiştirme ve gerilmeler donatıya ait malzeme modelini sağlamaktadır (Şekil 2.21 ve 3.8).



Şekil 3.8: Tipik bir kolon enkesiti için fiber enkesit hücresi.

### 3.3.2 Hasar düzeylerini ifade eden plastik şekildeğiştirme sınırları

Taşıyıcı sistemi oluşturan kiriş ve kolon elemanlardaki hasar düzeylerini ifade eden plastik şekildeğiştirme sınırları (SH, KH ve GÖ), detayları Bölüm 2.14'te verilen bağıntılara uygun olarak hesaplanmıştır. Plastik mafsallı davranışlarının esas alındığı kiriş plastik mafsalları için  $\theta_p$  plastik dönme sınırları ile yayılı plastik davranışın esas alındığı fiber kesiti için  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  birim boy değişmesi sınırlarına ait tipik örnek aşağıda sunulmuştur.

*KİRİŞ:*  $b \times h = 25^{cm} \times 50^{cm}$  ; Üst donatı:  $2\Phi 16 + 1\Phi 14$  ; Alt donatı:  $3\Phi 14$  ;  $L_s = 0.5L = 3^m$

$$\theta_y = 0.00604^{1/m} ; \theta_u = 0.1642^{1/m}$$

$$\theta_p^{G\ddot{O}} = \frac{2}{3} [0.1642 - 0.00604] \times 0.25 \times \left( 1 - 0.5 \times \frac{0.25}{3} \right) + 4.5 \times 0.1642 \times 0.014 = 0.032$$

$$\theta_p^{KH} = 0.75 \times \theta_p^{G\ddot{O}} = 0.024 \quad \theta_p^{SH} = 0$$

*KOLON:*  $b \times h = 40^{cm} \times 40^{cm}$  ;  $A_s = 8\Phi 16$  ; Etriye =  $\Phi 8/8$  ;  $f_y = 420 \text{ MPa}$  ;  $f'_c = 30 \text{ MPa}$

$$\varepsilon_c^{(G\ddot{O})} = 0.0035 + 0.04 \sqrt{\omega_{\omega e}} \leq 0.018$$

$$\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} = 0.4 \varepsilon_{su}$$

$$\rho_{sh}^{min} = 0.0051 ; \alpha_{se} = 0.624 ; \omega_{oe} = 0.046$$

$$0.035 + 0.04\sqrt{0.046} = 0.012 < 0.018$$

$$\varepsilon_c^{(G\ddot{O})} = \mathbf{0.012}$$

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75x\varepsilon_c^{(G\ddot{O})}$$

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75x0.012 = \mathbf{0.009}$$

$$\varepsilon_c^{(SH)} = \mathbf{0.0025}$$

$$\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} = 0.4x0.08 = \mathbf{0.032}$$

$$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75x\varepsilon_s^{(G\ddot{O})}$$

$$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75x0.032 = \mathbf{0.024}$$

$$\varepsilon_s^{(SH)} = \mathbf{0.0075}$$

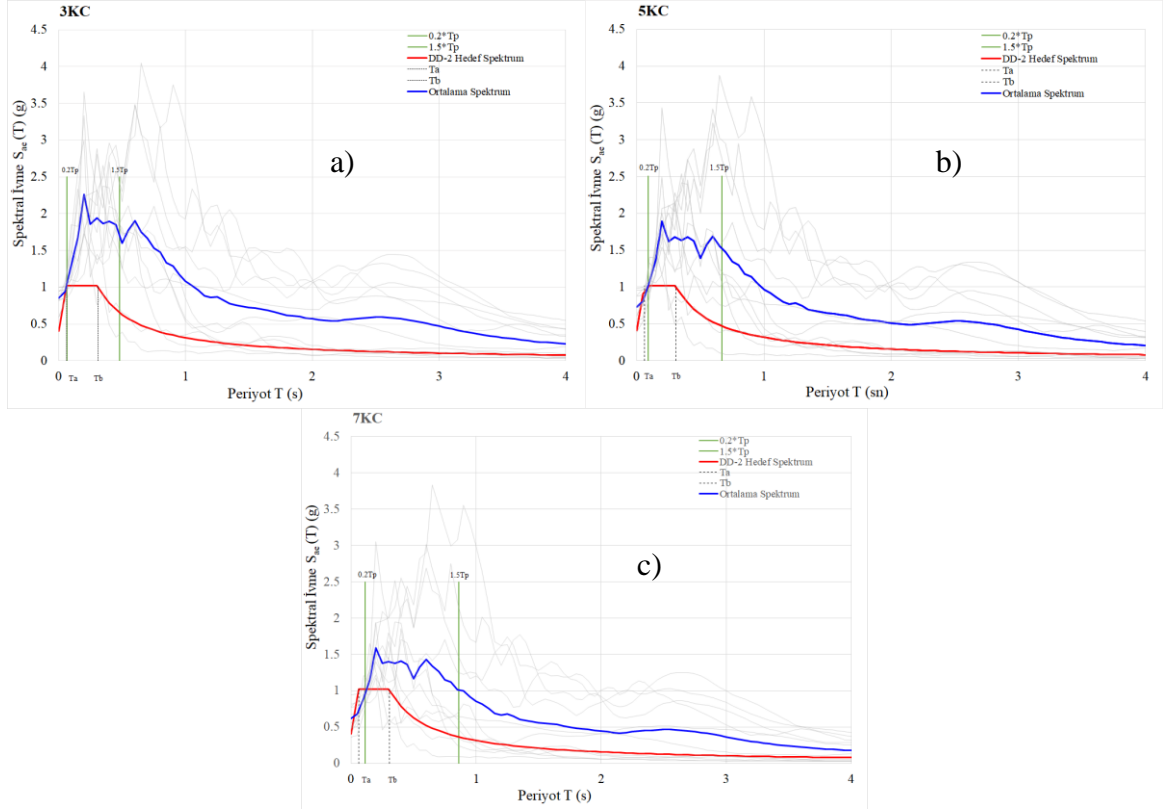
### 3.4 Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Özellikleri

ZTADOA kapsamında kullanılacak deprem yer hareketi kayıtlarının seçiminde TBDY-2018'ye uygun olarak seçilen 11 adet gerçek deprem kaydının yatay ve düşey bileşenleri “*PEER Ground Motion Database*” veri tabanından elde edilmiştir. İvme kayıtlarının seçiminde yakın fay etkisi dikkate alınmamıştır. Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının genel özellikleri Tablo 3.12’de, ivme-zaman grafikleri Ek-A’da sunulmuştur.

**Tablo 3.12:** Deprem yer hareketlerine ait yatay ve düşey ivme kayıtlarının özellikleri.

| PEER Kayıt No | No   | Deprem yer hareketi    | Yıl  | Yatay bileşen | Düşey bileşen | İstasyon                    | Moment büyüklüğü (M <sub>w</sub> ) | Faylanma Mekanizması | PGA (m/sn) | Kayma dalgası hızı (V <sub>s</sub> ) <sub>30</sub> (m/sn) |
|---------------|------|------------------------|------|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------|------------|---|
| RSN13         | EQ1  | Kern County            | 1952 | PAS270        | PAS-UP        | Pasadena - CIT Athenaeum    | 7.36                               | Ters fay             | 0.053      | 415.13  |
| RSN83         | EQ2  | San Fernando           | 1971 | PUD325        | PUDDWN        | Puddingstone Dam (Abutment) | 6.61                               | Ters fay             | 0.073      | 421.44  |
| RSN190        | EQ3  | Imperial Valley-06     | 1979 | SUP135        | SUP-UP        | Superstition Mtn Camera     | 6.53                               | Yanal atımlı         | 0.146      | 362.38  |
| RSN292        | EQ4  | Irpinia_Italy-01       | 1980 | STU270        | STU-UP        | Stumo (STN)                 | 6.9                                | Normal               | 0.320      | 382   |
| RSN582        | EQ5  | Taiwan Smart1(45)      | 1986 | 45008NS       | 45008DN       | SMART1 O08                  | 7.3                                | Ters fay             | 0.164      | 357.43  |
| RSN792        | EQ6  | Loma Prieta            | 1989 | SFS360        | SFS-UP        | SF - 1295 Shafter           | 6.93                               | Yanal ve ters fay    | 0.104      | 362.4   |
| RSN855        | EQ7  | Landers                | 1992 | FTI090        | FTI-UP        | Fort Irwin                  | 7.28                               | Yanal atımlı         | 0.122      | 367.43  |
| RSN1064       | EQ8  | Northridge-01          | 1994 | RIV270        | RIV-UP        | Riverside Airport           | 6.69                               | Ters fay             | 0.063      | 389.95  |
| RSN1160       | EQ9  | Kocaeli                | 1994 | FAT090        | FAT-UP        | Fatih                       | 7.51                               | Yanal fay            | 0.188      | 386.75  |
| RSN1431       | EQ10 | Chi-Chi                | 1992 | TAP043        | TAP043        | TAP043                      | 7.62                               | Yanal ve ters fay    | 0.083      | 388.16  |
| RSN2078       | EQ11 | Nenana Mountain_Alaska | 2002 | K218360       | K218-UP       | Anchorage - K2-18           | 6.7                                | Yanal atımlı         | 0.005      | 435.21  |

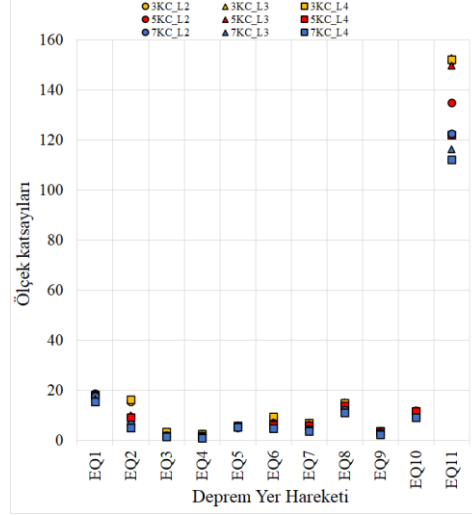
TBDY-2018’de verilen “Basit Ölçekleme Yöntemi” kullanılarak seçilen deprem kayıtlarının yatay bileşeni DD-2 deprem yer hareketi düzeyine ait elastik tasarım ivme spektrumu ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. 3KC, 5KC ve 7KC sistemler için yöntemin grafik uygulaması Şekil 3.9a-c’de, ölçek çarpanları Şekil 3.10 ve Tablo 3.13’te verilmiştir. Yatay bileşenler için hesaplanan ölçek çarpanları depremin düşey bileşeni içinde uygulanmıştır.



Şekil 3.9: Analizlere esas ivme kayıtlarının a) 3KC b) 5KC ve c) 7KC için ölçeklendirilmesi.

Tablo 3.13: Farklı periyotlara sahip çerçeve sistemlerin ölçek katsayıları.

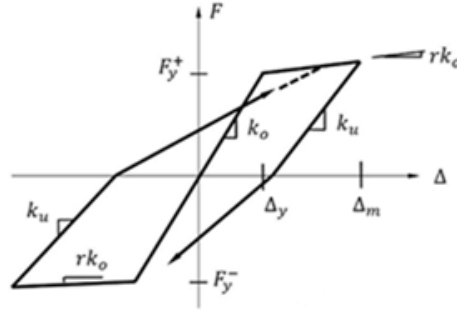
| No   | 3KC_L2 | 3KC_L3 | 3KC_L4 | 5KC_L2 | 5KC_L3 | 5KC_L4 | 7KC_L2 | 7KC_L3 | 7KC_L4 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| EQ1  | 18.74  | 18.53  | 18.15  | 17.93  | 17.9   | 18     | 17.75  | 16.56  | 15.38  |
| EQ2  | 15.62  | 16.26  | 16.26  | 9.4    | 10.15  | 9.1    | 6.35   | 5.25   | 4.96   |
| EQ3  | 2.95   | 3.15   | 3.44   | 1.91   | 1.98   | 1.91   | 2.08   | 1.77   | 1.58   |
| EQ4  | 2.54   | 2.6    | 2.55   | 1.9    | 1.97   | 1.86   | 1.48   | 1.29   | 1.09   |
| EQ5  | 5.75   | 5.89   | 5.92   | 5.32   | 5.75   | 5.36   | 4.97   | 4.99   | 5.27   |
| EQ6  | 9.08   | 9.3    | 9.33   | 6.89   | 7.18   | 6.28   | 4.71   | 4.68   | 4.7    |
| EQ7  | 6.69   | 7      | 7.09   | 6.08   | 6.36   | 5.94   | 4.6    | 4.24   | 3.75   |
| EQ8  | 14.7   | 15.1   | 14.87  | 13.81  | 13.85  | 13.9   | 12.29  | 11.33  | 11.14  |
| EQ9  | 3.69   | 3.8    | 3.8    | 3.75   | 3.53   | 3.69   | 3.03   | 2.82   | 2.3    |
| EQ10 | 11.91  | 11.91  | 11.66  | 11.71  | 11.77  | 11.61  | 9.21   | 9.16   | 9.17   |
| EQ11 | 151.66 | 152.76 | 152.37 | 135.03 | 149.84 | 122.21 | 122.72 | 116.4  | 112.39 |



Şekil 3.10: Yatay ve düşey ivme kayıtlarının ölçek katsayıları.

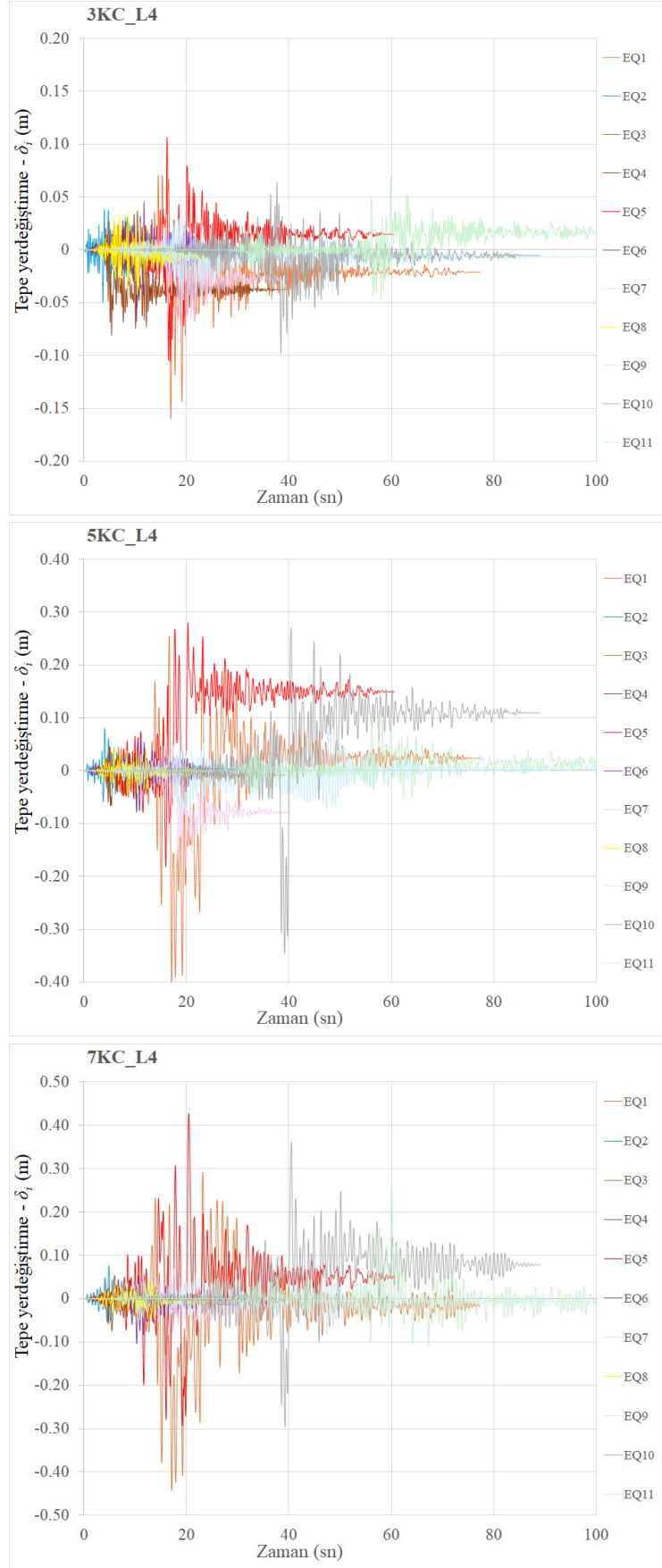
### 3.5 Çerçeve Sistemlerin Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizleri

Sayısal incelemeler kapsamında ele alınan betonarme çerçeve sistemlerin ZTADOA'leri, ayrıntıları Bölüm 2.12.2'de sunulan esaslar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Newmark-Beta sayısal integrasyon yöntemi kullanılmış olup, ortalama sabit ivme yaklaşımı için  $\gamma = 1/2$  ve  $\beta = 1/4$  katsayıları kullanılmıştır. Çoklu çevrim hareketi etkisindeki kiriş ve kolon plastik kesitlerinin histeretik davranışları, rijitlik azalmasını dikkate alan Takeda modeli ile gözönüne alınmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Kiriş ve kolon elemanlar için histeretik çevrim modeli (Takeda modeli).

ZTADOA'lerin başlangıç adımı için 1.0G+0.3Q'luk düşey yük birleşimi altında doğrusal olmayan statik analiz yapılmıştır. Bu yükleme sonrasında hiçbir kritik kesitte akma sınırı aşılmamıştır. 3KC, 5KC ve 7KC çerçeve sistemlerin yatay ve düşey ivme kayıtları altında SAP2000 (2021) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilen ZTADOA'leri sonucunda sismik davranış parametrelerinin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. Örnek olması açısından, 3KC\_L4, 5KC\_L4 ve 7KC\_L4 çerçeve sistemlerindeki tepe yerdeğiştirmesinin zamana bağlı değişimleri gözönüne alınan her deprem yer hareketi için Şekil 3.12'de verilmiştir.



**Şekil 3.12:** 3KC, 5KC ve 7KC sistemlerde farklı deprem yer hareketleri için tepe yerdeğiştirmesinin zamana bağlı değişimleri.

## 4. ŞEKİLDEĞİŞTİRME BAZLI DAVRANIŞ TALEPLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

TBDY-2018'e uygun olarak tasarlanan ve düşey kolon süreksizliğine sahip düzensiz betonarme çerçeve sistemlerin yatay ve düşey deprem kayıtları altındaki ZTADOA'lerinden elde edilen sismik davranış talepleri, ortalama değerler esas alınarak değerlendirilmiştir. Yapısal değerlendirmeye esas davranış talepleri:

- 1) Kat yerdeğiştirme talepleri
- 2) Katlar arası öteleme talepleri
- 3) Kat düzeyinde plastik şekildeğiştirme talepleri
  - a) Kiriş plastik dönme talepleri
  - b) Kolon birim boy değişimi
- 4) Plastik mafsalların sistem üzerindeki dağılımları

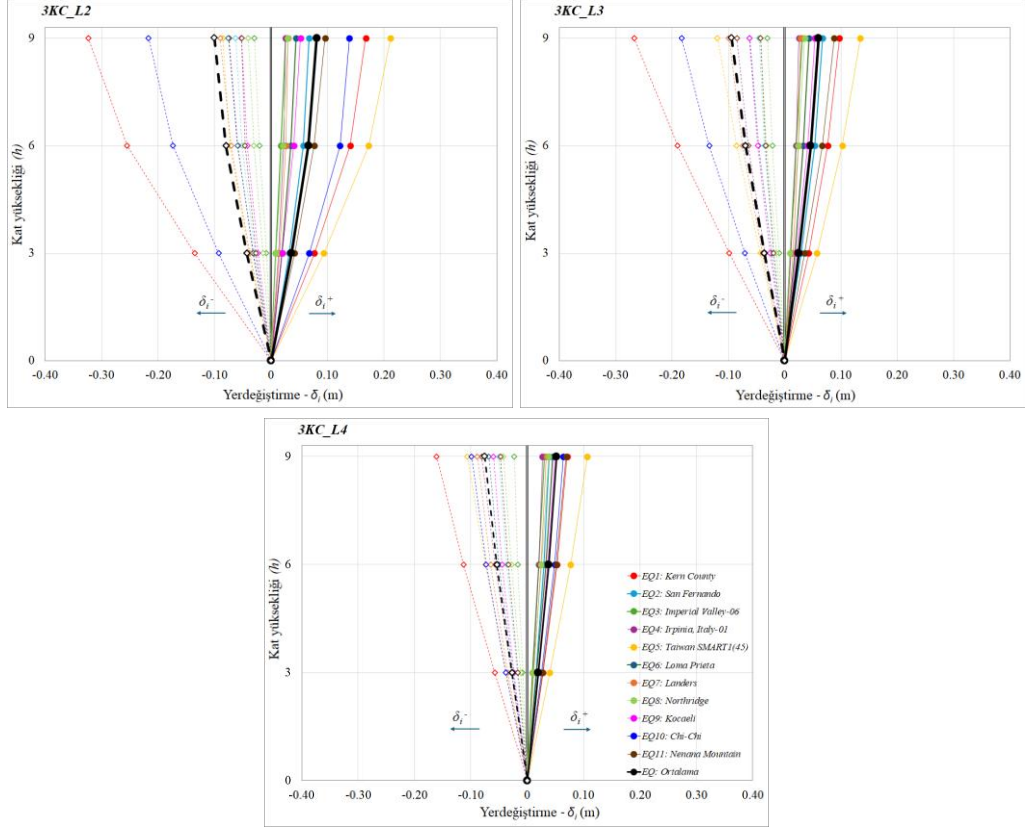
### 4.1 Kat Yerdeğiştirme Talepleri

Kolon süreksizliğine sahip 3KC, 5KC ve 7KC çerçeve sistemlerin gözönüne alınan her deprem kaydı için ZTADOA'lerden elde edilen yerdeğiştirme ( $\delta_i$ ) profilleri ile bunların pozitif ve negatifteki ortalama davranışları Şekil 4.1-4.3'teki grafiklerde sunulmuştur.

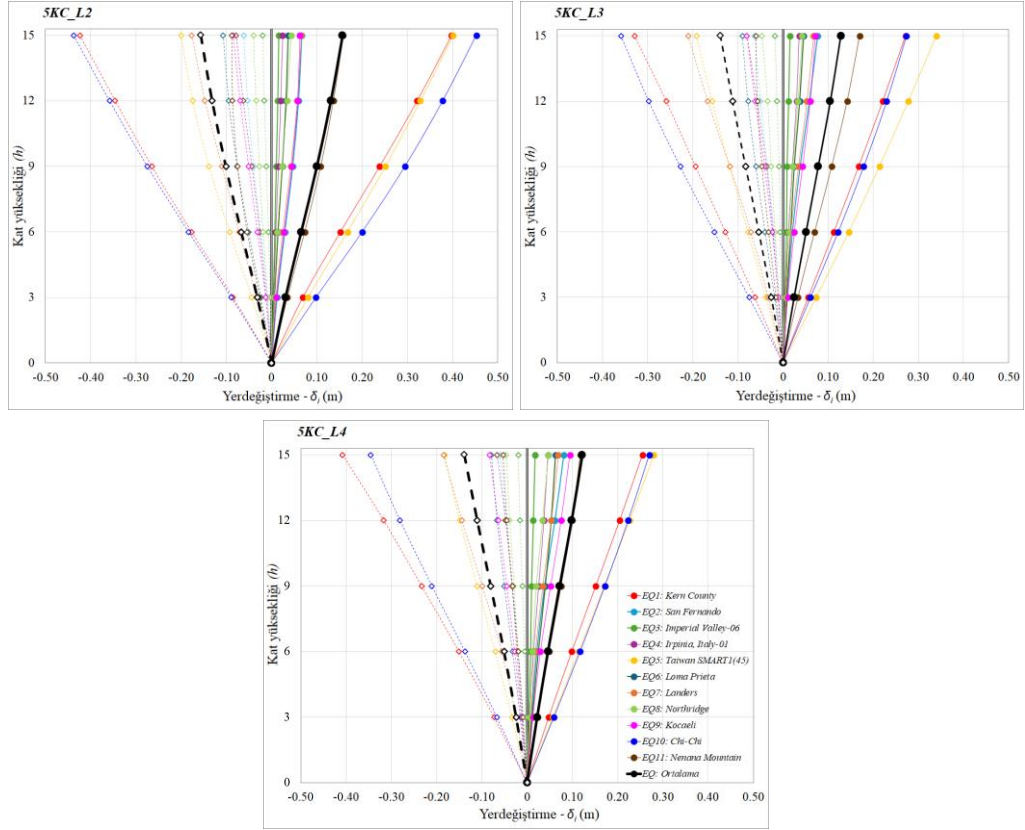
Grafiklerden görüleceği üzere, zemin katlardaki kolon süreksizliği nedeniyle azalan yatay öteleme rijitliklerindeki azalmalara rağmen 3KC ve 5KC sistemlerin yerdeğiştirme profillerinde bir süreksizlik meydana gelmemesine rağmen, 7KC\_L2 / L3 / L4 sistemlerinde ikinci mertebe etkiler nedeniyle oluşan hızlı plastikleşmeler sonucunda yerdeğiştirmelerin hızla arttığı görülmüştür. İncelenen taşıyıcı sistemde, transfer kirişi açıklığı arttıkça yerdeğiştirme davranışı, genel olarak, azalan bir eğilim göstermekle birlikte, 5KC ve 7KC sistemlerde L3 ve L4 modelleri için elde edilen yerdeğiştirme profilleri hemen hemen aynıdır (Şekil 4.4).

Transfer kirişi en kısa olan 3KC\_L2'ye göre L3 ve L4 sistemlerin tepe yerdeğiştirme talepleri, sırasıyla, %5.6 ve %25 oranında daha küçük iken, 1. kattaki yerdeğiştirmelere ait rölatif farklar %15 ve %36.3 olarak hesaplanmıştır.

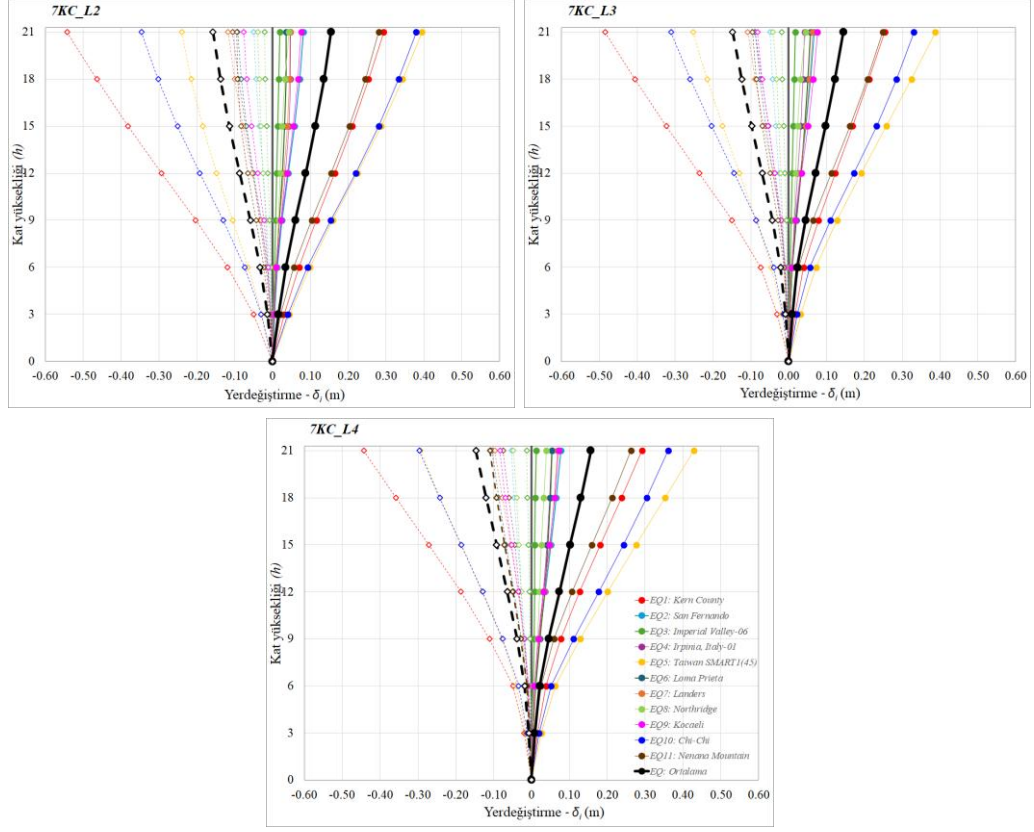
5KC ve 7KC sistemlerde tepe yerdeğiştirme talepleri %11.3 ve %5.8 oranlarında daha küçük iken, kat yüksekliği azaldıkça kat yerdeğiştirmeleri arasındaki oran hızla artmıştır. (Tablo 4.1).



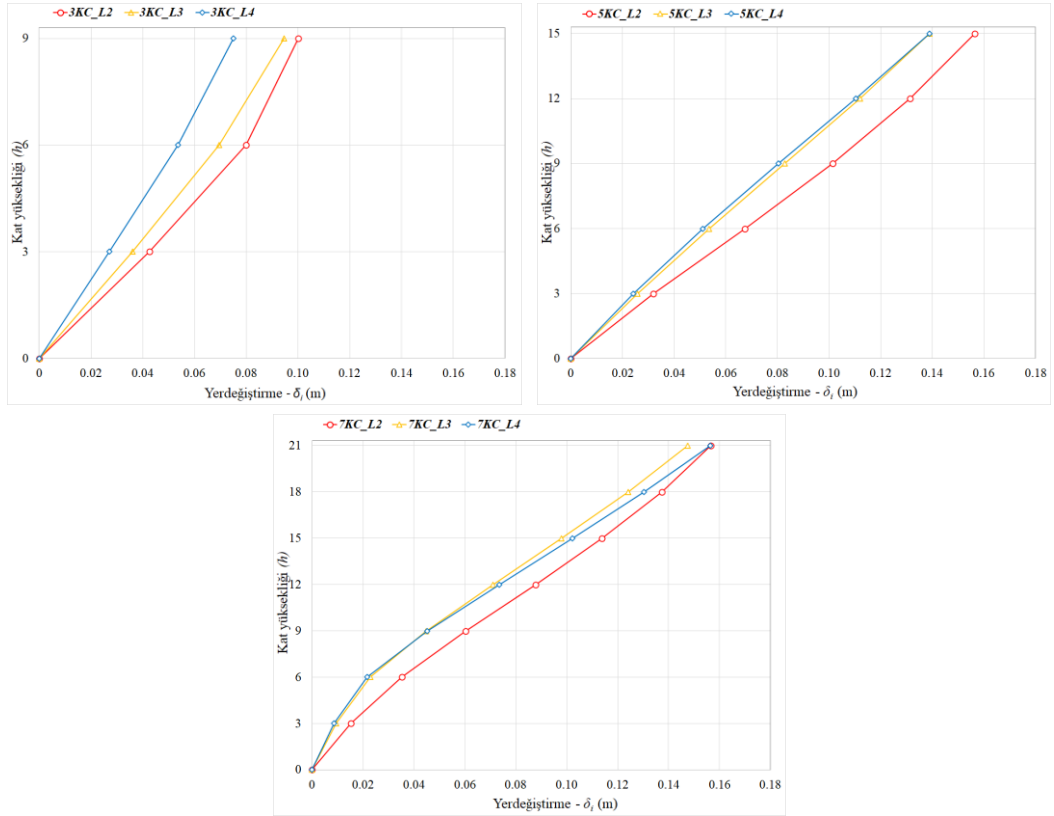
Şekil 4.1: 3KC çerçeve sistemlerine ait kat yerdeğiştirme profilleri.



Şekil 4.2: 5KC çerçeve sistemlerine ait kat yerdeğiştirme profilleri.



Şekil 4.3: 7KC çerçeve sistemlere ait kat yerdeğiştirme profilleri.



Şekil 4.4: Çerçeve sistemlere ait ortalama kat yerdeğiştirme profilleri.

**Tablo 4.1:** Kat yerdeğiştirme taleplerine ait rölaf değişimler.

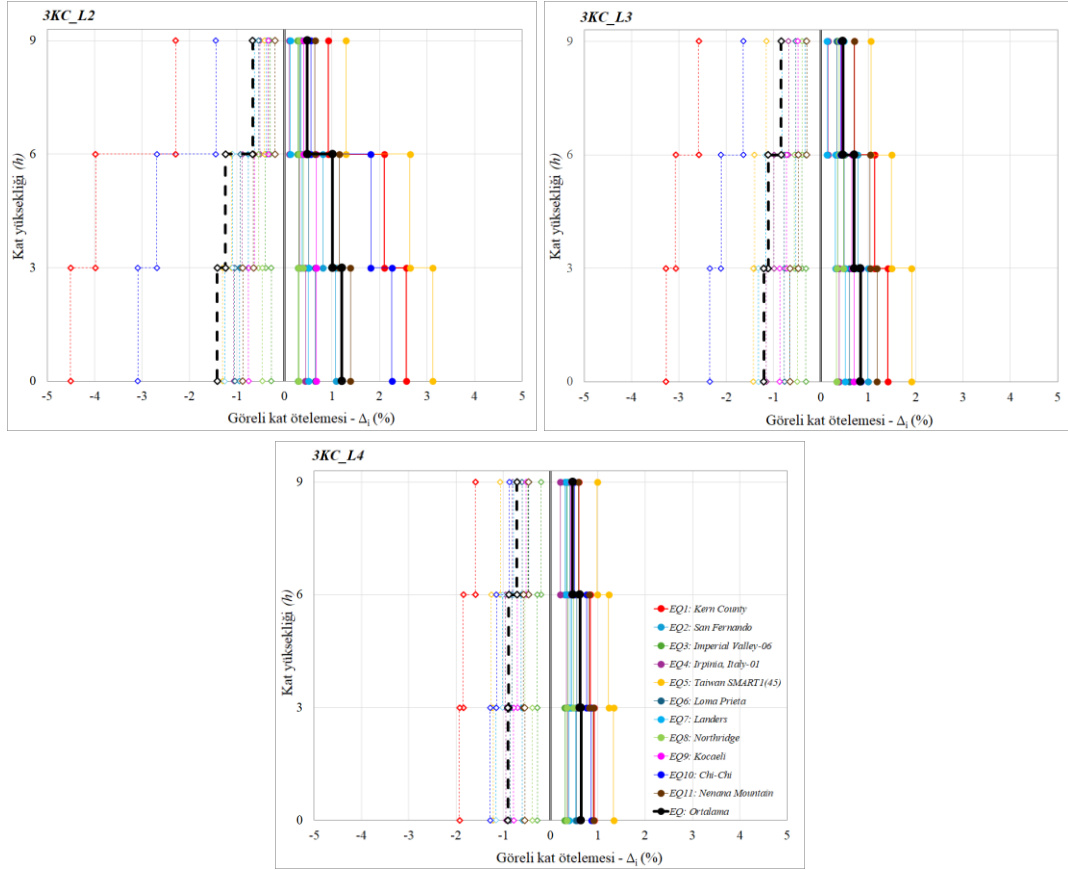
| Kat yerdeğiştirme taleplerindeki değişimler |     |          |                |                           |                           |
|---|-----|----------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| Çerçeve                                     | Kat | Sonuçlar | L2 [1]         | L3 [2]                    | L4 [3]                    |
|   |     |          | $\delta_i (m)$ | $\frac{[2]-[1]}{[1]} (%)$ | $\frac{[3]-[1]}{[1]} (%)$ |
| 3KC   | 3   | Ortalama | 0.10020        | -5.6%                     | -25.0%                    |
|   | 2   | Ortalama | 0.07995        | -13.1%                    | -32.8%                    |
|   | 1   | Ortalama | 0.04258        | -15.0%                    | -36.3%                    |
| 5KC   | 5   | Ortalama | 0.15654        | -11.3%                    | -11.3%                    |
|   | 4   | Ortalama | 0.13143        | -14.7%                    | -16.1%                    |
|   | 3   | Ortalama | 0.10134        | -18.2%                    | -20.6%                    |
|   | 2   | Ortalama | 0.06744        | -20.5%                    | -24.4%                    |
|   | 1   | Ortalama | 0.03194        | -19.3%                    | -24.5%                    |
| 7KC   | 7   | Ortalama | 0.15655        | -5.8%                     | -0.1%                     |
|   | 6   | Ortalama | 0.13730        | -9.6%                     | -5.1%                     |
|   | 5   | Ortalama | 0.11387        | -14%                      | -10.3%                    |
|   | 4   | Ortalama | 0.08780        | -19.1%                    | -16.4%                    |
|   | 3   | Ortalama | 0.06038        | -25.9%                    | -25.1%                    |
|   | 2   | Ortalama | 0.03518        | -35.2%                    | -38.2%                    |
|   | 1   | Ortalama | 0.01526        | -37.9%                    | -43.1%                    |

#### 4.2 Katlar Arası Öteleme Talepleri

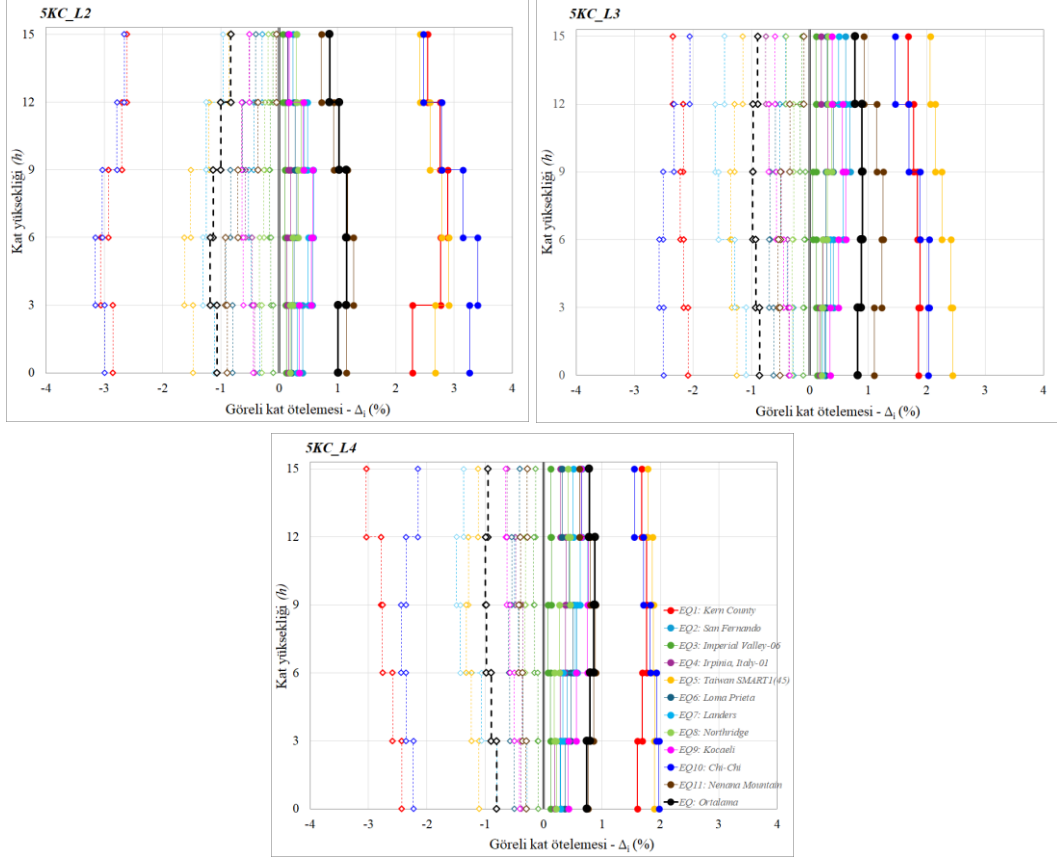
Yatay yükler altında kat yerdeğiştirmeleri arasındaki rölaf değişim oranlarını gösteren görel kat öteleme taleplerinin ( $\Delta_i = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{h_i}$ ) gözönüne alınan her deprem kaydı ve ortalama değişimleri Şekil 4.5-4.7’de, her bina sistemi için hesaplanan ortalama kat öteleme profilleri Şekil 4.8’de karşılaştırılmalı sunulmuştur. Kat yükseklikleri ve transfer kirişi açıklıkları değişken olan çerçeve sistemlerde, bireysel deprem kayıtları altında 3KC için %4.51, 5KC için %3.41 ve 7KC için %3.01’e ulaşan kat öteleme talepleri oluşmakla birlikte, ortalama davranış esas alındığında tüm taşıyıcı sistemler için görel kat öteleme taleplerinin %1.5’ten daha küçük olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.5-4.7).

3KC sistemlerde en büyük öteleme talepleri zemin katta oluşmakla beraber, 5KC ve 7KC sistemlerde en büyük taleplerin dağılımlar sistem özelliklerine ve transfer kirişi uzunluğuna bağlı olarak farklı katlarda oluşabildiği belirlenmiştir. Bu noktada, 5KC\_L2’de en büyük ötelenmeler tüm deprem kayıtları ve ortalama davranış için 2. kat seviyesinde, 7KC\_L2 için ise 4. kat seviyesinde elde edilirken, transfer kirişi uzunluğu arttıkça ötelemelerin üst katlara doğru artış eğiliminde olduğu görölmektedir (Şekil 4.6-4.7).

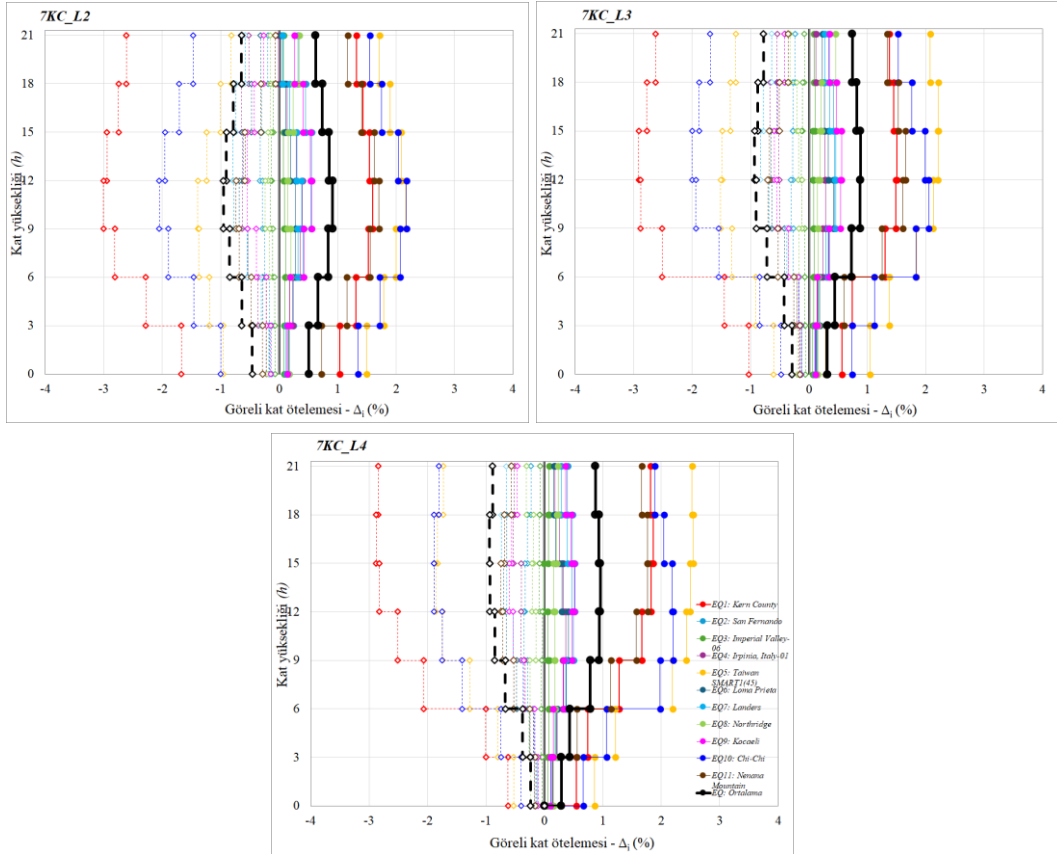
Çerçeve sistemlerde transfer kirişi uzunluğu arttıkça alt katlarda hesaplanan öteleme talepleri, yerdeğiştirme taleplerindeki rölatif değişimlere benzer şekilde, azalan bir eğilim gösterirken, üst katlarda artan bir karakter göstermiştir. Davranıştaki bu değişim 3KC çerçevelerde daha sınırlı iken, 7KC çerçevelerde çok daha belirgin haldedir (Şekil 4.8 ve Tablo 4.2).



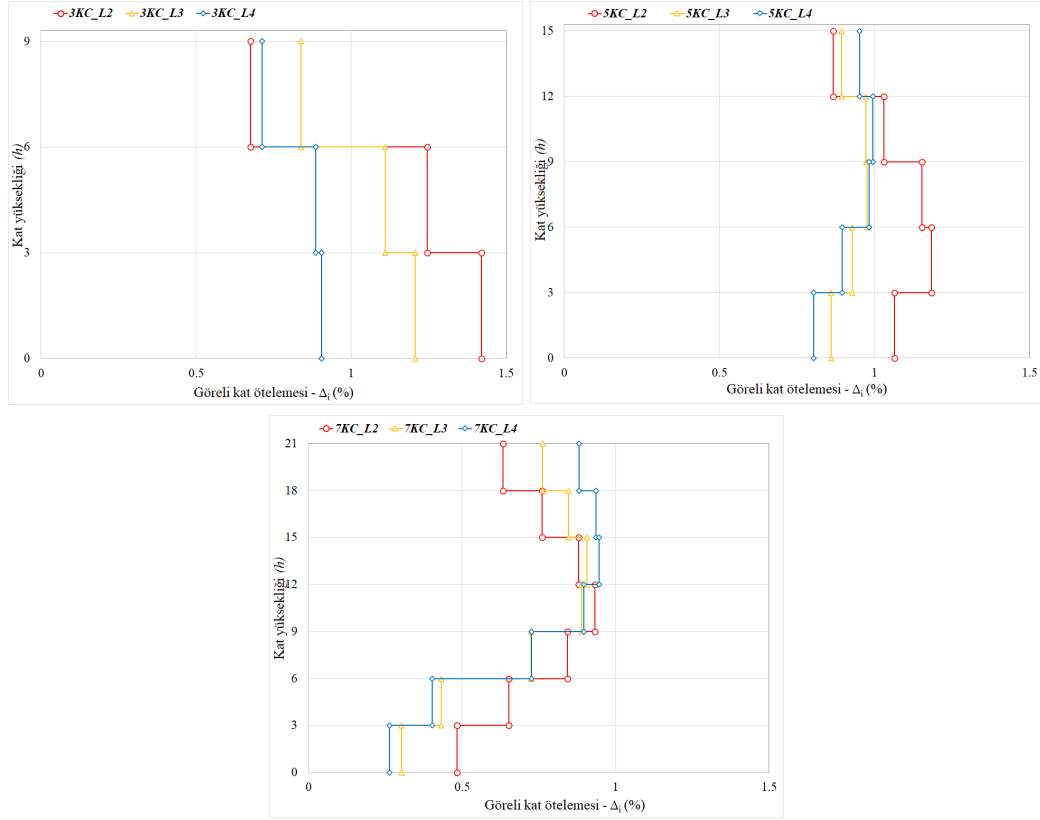
Şekil 4.5: 3KC çerçeve sistemlere ait görelî kat öteleme profilleri.



Şekil 4.6: 5KC çerçeve sistemlere ait görelî kat öteleme profilleri.



Şekil 4.7: 7KC çerçeve sistemlere ait görelî kat öteleme profilleri.



Şekil 4.8: Çerçeve sistemlere ait ortalama görel kat öteleme profilleri.

Tablo 4.2: Görel kat öteleme taleplerine ait rölatif değişimler.

| Kat öteleme taleplerindeki değişimler |     |          |  |                           |                           |
|---------------------------------------|-----|----------|--|---------------------------|---------------------------|
| Çerçeve                               | Kat | Sonuçlar | L2 [1]   | L3 [2]                    | L4 [3]                    |
|                                       |     |          | $\Delta_i = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{h_i}$ | $\frac{[2]-[1]}{[1]}$ (%) | $\frac{[3]-[1]}{[1]}$ (%) |
| 3KC                                   | 3   | Ortalama | 0.67   | 24.1%                     | 5.7%                      |
|                                       | 2   | Ortalama | 1.25   | -11.0%                    | -28.9%                    |
|                                       | 1   | Ortalama | 1.42   | -15.0%                    | -36.3%                    |
| 5KC                                   | 5   | Ortalama | 0.87   | 3.1%                      | 9.8%                      |
|                                       | 4   | Ortalama | 1.03   | -5.6%                     | -3.4%                     |
|                                       | 3   | Ortalama | 1.15   | -15.4%                    | -14.9%                    |
|                                       | 2   | Ortalama | 1.18   | -21.6%                    | -24.3%                    |
|                                       | 1   | Ortalama | 1.06   | -19.3%                    | -24.5%                    |
| 7KC                                   | 7   | Ortalama | 0.63   | 20.5%                     | 39.1%                     |
|                                       | 6   | Ortalama | 0.76   | 11.3%                     | 23.2%                     |
|                                       | 5   | Ortalama | 0.88   | 3.1%                      | 7.8%                      |
|                                       | 4   | Ortalama | 0.93   | -4.6%                     | -3.9%                     |
|                                       | 3   | Ortalama | 0.84   | -13.9%                    | -13.7%                    |
|                                       | 2   | Ortalama | 0.65   | -33.7%                    | -38.1%                    |
|                                       | 1   | Ortalama | 0.48   | -37.2%                    | -45.3%                    |

### 4.3 Plastik Mafsallardaki Plastik Şekildeğiştirme Talepleri

TBDY-2018’de düşey eleman süreksizliği olarak tanımlanan B3 türü düzensizliğe sahip betonarme binalardaki hasar düzeylerini ve dolayısıyla yönetmeliğin performans hedeflerini değerlendirmek için transfer kirişi uzunluğu ve kat yüksekliklerinin parametrik değıştirildiği çerçeve sistemlerin kiriş ve kolonlarındaki şekildeğiştirme talepleri, yatay ve düşey deprem kayıtları altındaki ZTADOA’lerden elde edilen sonuçlar çerçevesinde değerlendirilmiştir. Taşıyıcı sistemlere ait hasar durumlarının araştırılmasında:

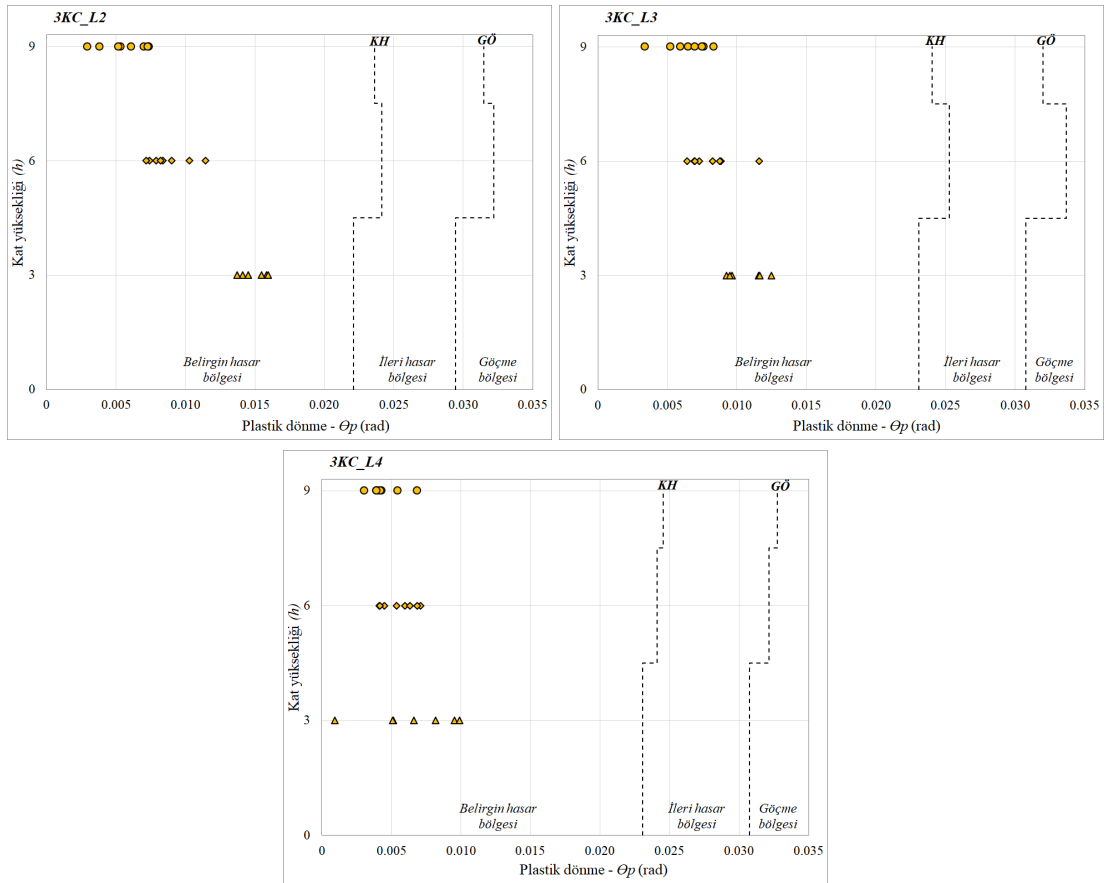
- Basit eğilme etkisindeki kiriş elemanlarda plastik mafsal hipotezi altında plastik dönme talepleri
- Bileşik eğilme etkisindeki kolon elemanlarda yayılı plastik davranış modeli altında fiber kesit hücreesindeki en büyük  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  birim boy değışmeleri esas alınmıştır.

#### 4.3.1 Kirişler için plastik dönme talepleri

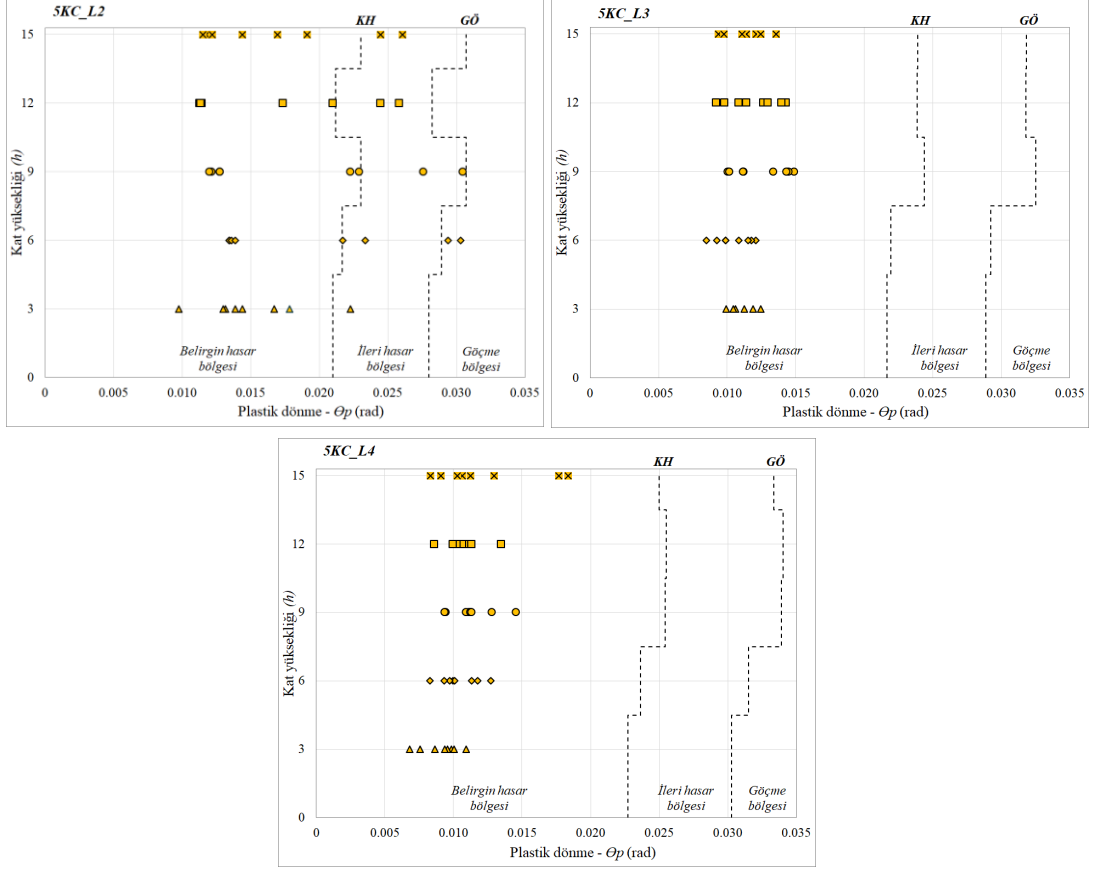
Düşeyde düzensiz çerçeve sistemlerde mutlak değerce hesaplanan ortalama plastik dönme talepleri yönetmelikte tanımlanan hasar sınırları (performans seviyeleri) ile birlikte Şekil 4.9-4.11’deki grafiklerde sunulmuştur. Bununla birlikte, transfer kirişi değışimlerinin etkisini değerlendirmek kat bazındaki plastik dönme taleplerinin ortalamaları alınarak kiriş dönme profilleri Şekil 4.12’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.9-4.11’deki grafiklerden görüleceği üzere, yönetmeliğe göre tasarlanmış 3KC, 5KC ve 7KC sistemlerin kritik kiriş uçlarında oluşan plastik dönme taleplerinin, 5KC\_L2 sistem dışında, yönetmeliğin hedeflediği üzere *Belirgin Hasar Bölgesinde (BHB)* kalmıştır. Transfer kirişi kısa olan 5KC\_L2’nin 2. ve 3. katlarında *İleri Hasar Bölgesinde (İHB)* ve *Göçmenin Önlenmesi (GÖ)* performans düzeyinde birkaç plastik mafsal olmasına karşın, genel olarak, hasar dağılımının *BHB*’nde olduğu söylenebilir. Ayrıca, gözönüne alınan her deprem kaydı için 3KC, 5KC ve 7KC sistemlerin analizleri süresince yüzer kolonun transfer kirişine birleştiği kritik uçlarda hesaplanan en elverişsiz kesme kuvveti taleplerinin kirişin kesme kuvveti taşıma kapasitesinin altında kaldığı, diğer bir ifade ile herhangi bir gevrek kırılmanın oluşmadığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, TBDY-2018’deki tasarım esaslarına göre boyutlandırılmış ve kolon düzensizliğine sahip betonarme sistemlerin DD-2 tasarım depremi seviyesi altında öngörülen kiriş hasar (performans) düzeylerini sağladıklarını göstermiştir.

Şekil 4.12’deki ortalama kat plastik dönme profillerinin, çerçeve sistemlere ait kat ötelenmesi dağılımları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Buna göre, transfer kirişi uzunluğu arttıkça alt katlarda hesaplanan kiriş plastik dönmeleri, genel olarak, azalma yönünde bir eğilim

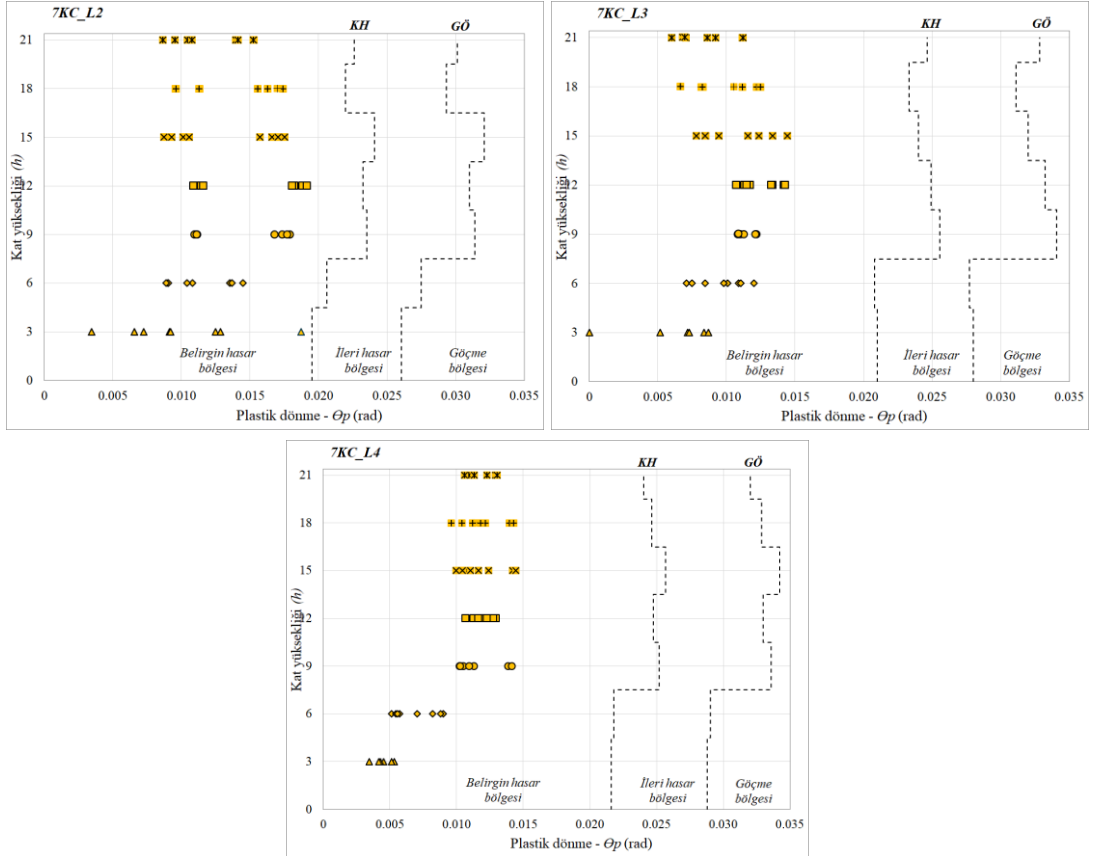
göstermesine karşın, kat yüksekliği arttıkça ikinci mertebeye etkiler ile birlikte üst katlardaki plastik dönmelerin kritik hale gelebildiği belirlenmiştir (Şekil 4.9-4.11). Buna göre, transfer kirişinin en kısa olduğu 3KC\_L2'ye göre L3 ve L4 sistemlerin zemin kattaki ortalama kat plastik dönmeleri, sırasıyla, %28.6 ve %50.4 daha küçük iken, çatı seviyesinde bu rölatif fark 3KC\_L3 için %14 daha büyük elde edilmiştir (Şekil 4.12 ve Tablo 4.3). 5KC sistemlerde, en büyük plastik dönmeler 2. ve 3. kat seviyelerinde oluşmakla birlikte, L3 ve L4 sistemler için ortalama kat plastik dönme talepleri 5KC\_L2'ye göre, sırasıyla, %46.4 ve %48 oranında daha küçüktür (Tablo 4.3). 7KC sistemlerde en büyük plastik dönmeler 3. katın üzerindeki kat seviyelerinde meydana gelmesine karşın, hesaplanan en büyük rölatif değişimler zemin katta hesaplanmıştır. Burada, 7KC\_L2'ye göre L3 ve L4 sistemlerin ortalama plastik dönmeleri, sırasıyla, %38.7 ve %55 azalmıştır (Şekil 4.11-4.12 ve Tablo 4.3).



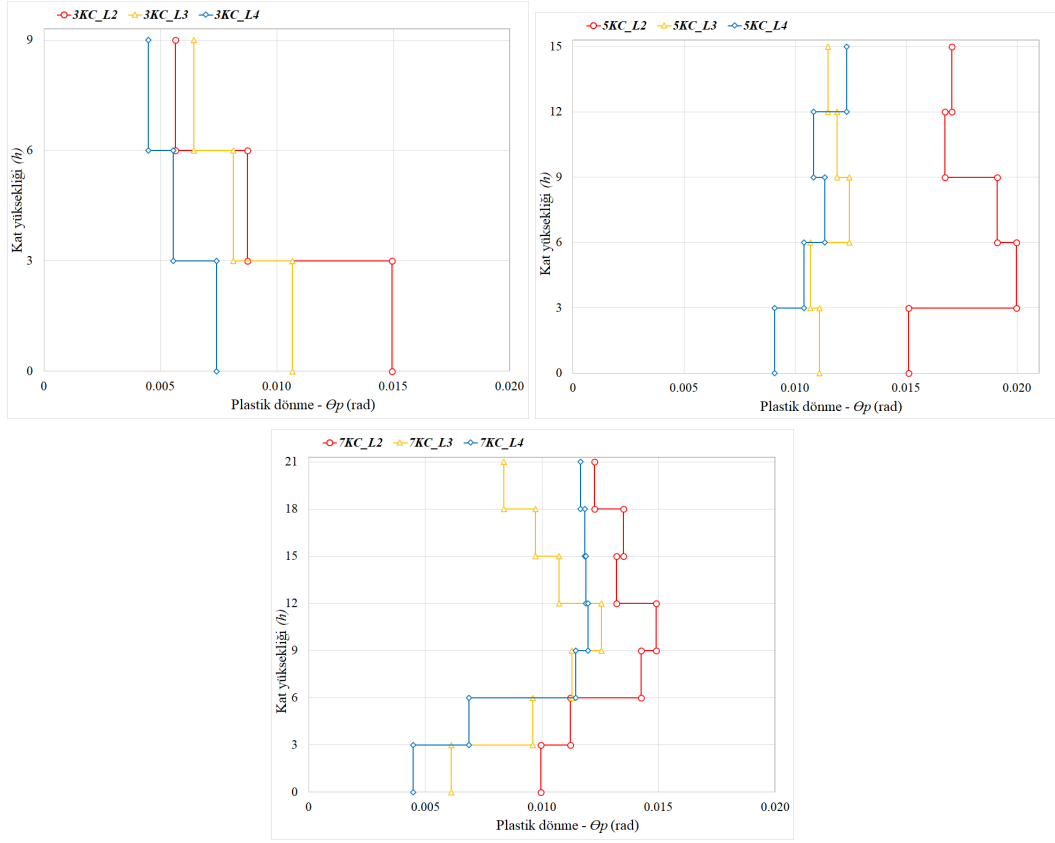
Şekil 4.9: 3KC çerçeve sistemlerde ortalama giriş plastik dönme talepleri.



Şekil 4.10: 5KC çerçeve sistemlerde ortalama giriş plastik dönme talepleri.



Şekil 4.11: 7KC çerçeve sistemlerde ortalama giriş plastik dönme talepleri.



Şekil 4.12: Çerçeve sistemlerde ortalama giriş plastik dönme profilleri.

Tablo 4.3: Giriş plastik dönme taleplerine ait rölatif değişimler.

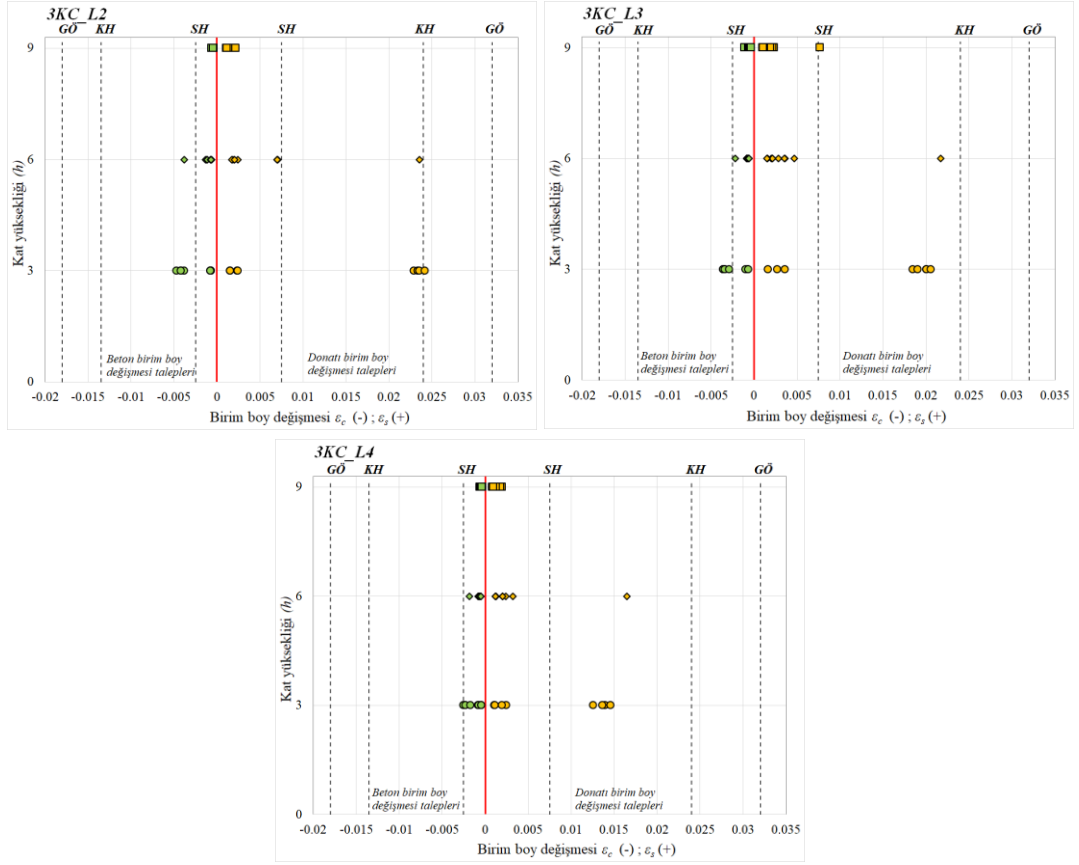
| Giriş plastik dönme taleplerindeki değişimler |     |          |                         |                           |                           |
|---|-----|----------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Çerçeve                                       | Kat | Sonuçlar | L2 [1]                  | L3 [2]                    | L4 [3]                    |
|   |     |          | $\theta_p(\text{rad.})$ | $\frac{[2]-[1]}{[1]}$ (%) | $\frac{[3]-[1]}{[1]}$ (%) |
| 3KC   | 3   | Ortalama | 0.005636                | 14.0%                     | -20.6%                    |
|   | 2   | Ortalama | 0.008728                | -6.8%                     | -36.4%                    |
|   | 1   | Ortalama | 0.014938                | -28.6%                    | -50.4%                    |
| 5KC   | 5   | Ortalama | 0.017064                | -32.7%                    | -27.8%                    |
|   | 4   | Ortalama | 0.016752                | -29.0%                    | -35.3%                    |
|   | 3   | Ortalama | 0.019105                | -34.8%                    | -40.6%                    |
|   | 2   | Ortalama | 0.019979                | -46.4%                    | -48.0%                    |
|   | 1   | Ortalama | 0.015122                | -26.6%                    | -39.9%                    |
| 7KC   | 7   | Ortalama | 0.012249                | -31.6%                    | -4.8%                     |
|   | 6   | Ortalama | 0.013498                | -27.9%                    | -12.3%                    |
|   | 5   | Ortalama | 0.013195                | -18.6%                    | -10.0%                    |
|   | 4   | Ortalama | 0.014908                | -15.8%                    | -19.6%                    |
|   | 3   | Ortalama | 0.014259                | -20.9%                    | -19.6%                    |
|   | 2   | Ortalama | 0.011223                | -14.4%                    | -38.8%                    |
|   | 1   | Ortalama | 0.009957                | -38.7%                    | -55.0%                    |

### 4.3.2 Kolon $\epsilon_c$ ve $\epsilon_s$ birim boy değişimi talepleri

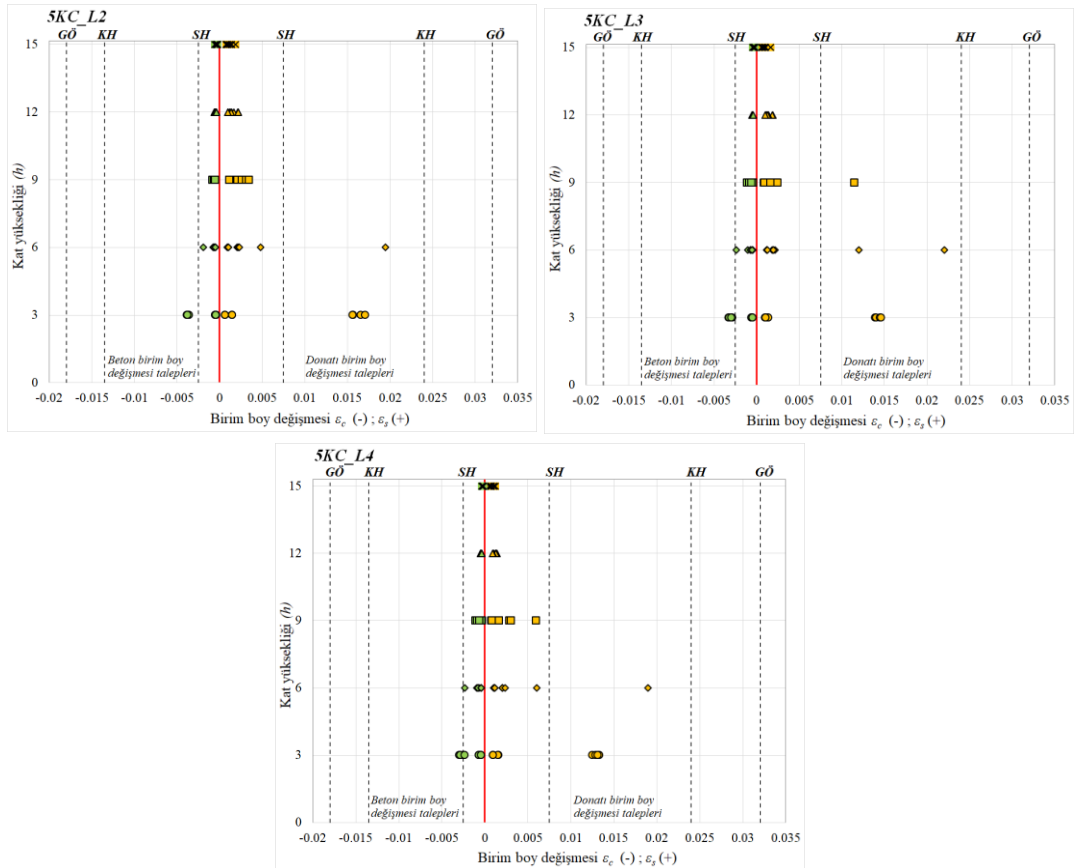
İncelenen düzensiz çerçeve sistemlerin kolon uçlarında tanımlanan fiber enkesitlerde, en dış sargılı beton lifindeki  $\epsilon_c$  ile tarafsız eksene en uzak donatıdaki  $\epsilon_s$  birim boy değişmesi talepleri yönetmelikteki hasar sınırlarını ifade eden performans düzeyleri gözönünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Şekil 4.13-4.15'teki grafiklerden görüleceği üzere, incelenen tüm çerçeve sistemlere ait kolon enkesitlerindeki  $\epsilon_c$  beton birim boy değişmesi taleplerinin akma sınırı ile *Sınırlı Hasar (SH)* arasındaki *Sınırlı Hasar Bölgesi*'nde (*SHB*) kaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, kolon donatılarında da  $\epsilon_s$  birim boy değişmesi talepleri, büyük çoğunlukta, *SHB* bölgesinde kalmakla birlikte *BHB*'ne geçen bazı kolon kesitlerinin olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kat bazındaki ortalama  $\epsilon_c$  ve  $\epsilon_s$  birim boy değişmesi taleplerinin kat yüksekliği arttıkça azalan bir eğilimde olduğu sonucu çıkarılabilir.

Bu sonuçlara göre, yönetmelik esaslarına göre tasarlanmış düşeyde kolon süreksizliğine sahip betonarme sistemlerin DD-2 deprem seviyesi için öngörülen hasar sınırlarını (performans hedeflerini) sağladığını göstermektedir. Yatay ve düşey sismik deprem etkileri altında bu tür sistemlere ait şekildeğiştirme taleplerinin öngörülen düzeyin altında daha sınırlı halde kalmasında kapasite tasarım ilkelerinin büyük katkı sağladığı düşünülmektedir.

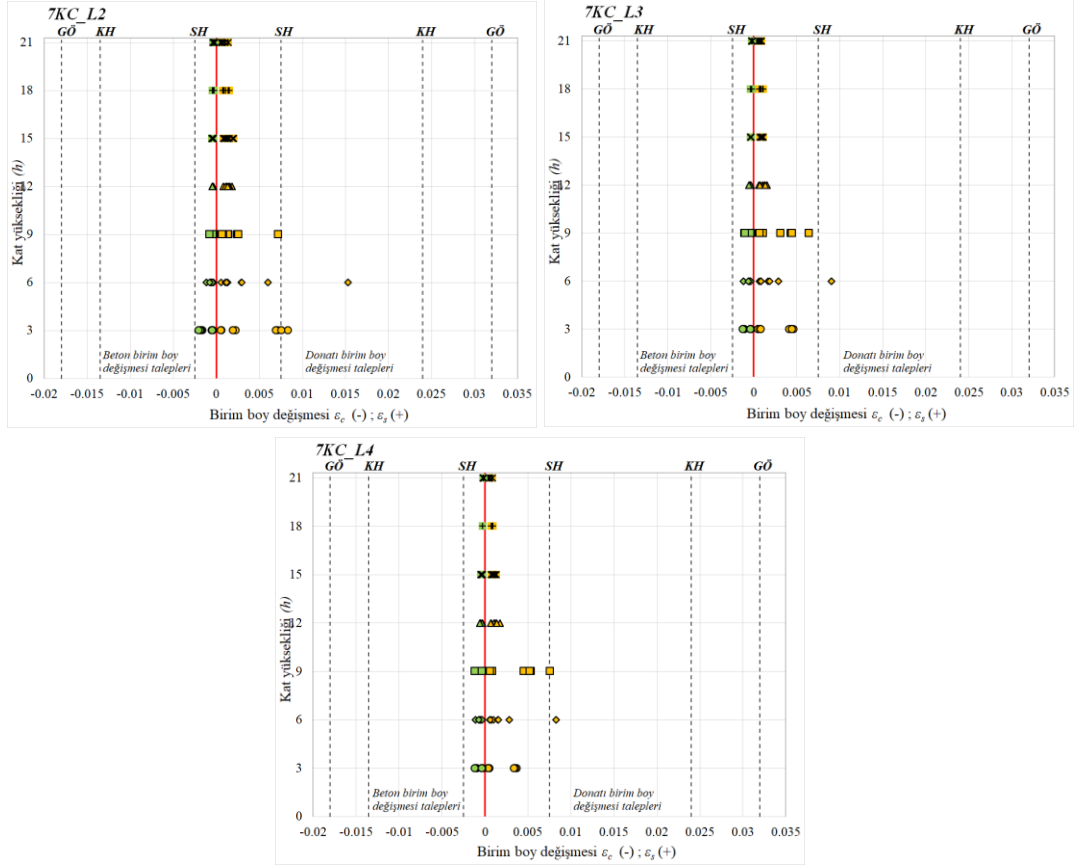
Elde edilen sonuçlar, kat yüksekliğinden bağımsız olarak kolonlardaki  $\epsilon_c$  ve  $\epsilon_s$  birim boy değişmesi taleplerinin transfer kirişi uzunluğu ile ters orantılı olarak azaldığını göstermektedir. Buna göre, 3KC\_L2'ye göre L3 ve L4 sistemlerin en alt kolon uçlarındaki  $\epsilon_c$  taleplerinin, sırasıyla, %15.4 ve %43;  $\epsilon_s$  taleplerinin ise %14 ve %34.3 oranlarında daha küçük olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.4). 5KC sistemlerde, 5KC\_L2'ye göre L3 ve L4 sistemlerinde en alt kolon uçlarındaki  $\epsilon_c$  talepleri, sırasıyla, %14.5 ve %29.9;  $\epsilon_s$  için ise %14 ve %18 oranlarında daha küçüktür (Tablo 4.4). Benzer şekilde 7KC\_L2'ye göre L3 ve L4 sistemlerde  $\epsilon_c$  talepleri, sırasıyla, %31.5 ve %30.4;  $\epsilon_s$  için ise %43 ve %37.9 oranlarında daha küçüktür (Tablo 4.4). İncelenen çerçeve sistemlerin üst kat kolon uçlarında daha büyük/küçük olabilen rölatif değişimler olsa da bu kesitlerdeki birim boy değişmesi talepleri oldukça küçük düzeylerde (Şekil 4.13-4.16 ve Tablo 4.4).



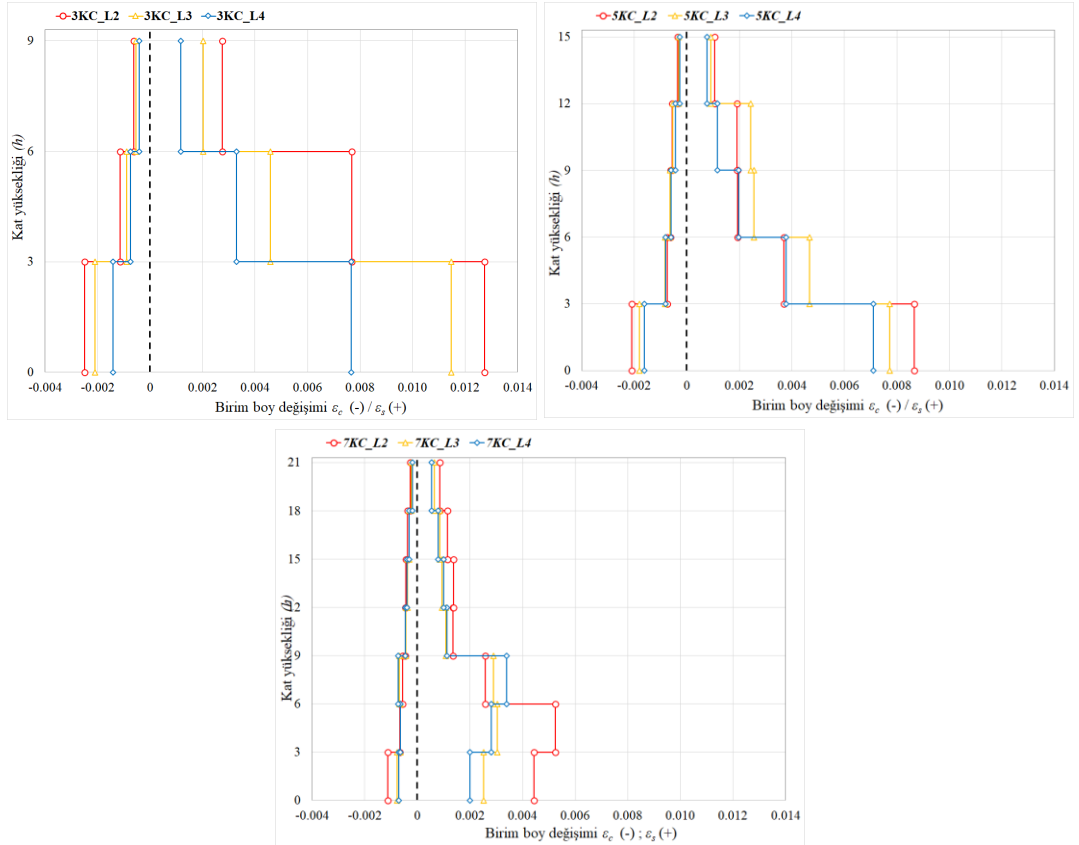
Şekil 4.13: 3KC sistemlerde ortalama kolon birim boy değişimi talepleri.



Şekil 4.14: 5KC sistemlerde ortalama kolon birim boy değişimi talepleri.



Şekil 4.15: 7KC sistemlerde ortalama kolon birim boy değişimi talepleri.



Şekil 4.16: Çerçeve sistemlerde ortalama kolon birim boy değişimi profilleri.

**Tablo 4.4:** Kolon birim boy değişimi taleplerine ait rölâtif değişimler.

| Kolon birim boy değişimi taleplerindeki değişimler |     |          |              |              |                           |        |                           |        |
|--|-----|----------|--------------|--------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| Çerçeve  | Kat | Sonuçlar | L2 [1]       |              | L3 [2]                    |        | L4 [3]                    |        |
|  |     |          | $\epsilon_c$ | $\epsilon_s$ | $\frac{[2]-[1]}{[1]}$ (%) |        | $\frac{[3]-[1]}{[1]}$ (%) |        |
| 3KC  | 3   | Ortalama | -0.000627    | 0.002756     | -15.4%                    | -9.8%  | -43.0%                    | -39.8% |
|  | 2   | Ortalama | -0.001143    | 0.007683     | -21.4%                    | -40.5% | -34.0%                    | -57.1% |
|  | 1   | Ortalama | -0.002485    | 0.012732     | -14.0%                    | -26.6% | -34.3%                    | -57.4% |
| 5KC  | 5   | Ortalama | -0.000355    | 0.001066     | -15.5%                    | -10.9% | -35.0%                    | -27.5% |
|  | 4   | Ortalama | -0.000561    | 0.001909     | -3.0%                     | 26.6%  | -29.4%                    | -38.5% |
|  | 3   | Ortalama | -0.000611    | 0.001930     | 3.0%                      | 32.4%  | -2.5%                     | 2.8%   |
|  | 2   | Ortalama | -0.000748    | 0.003698     | 10.2%                     | 27.7%  | 7.2%                      | 2.4%   |
|  | 1   | Ortalama | -0.002095    | 0.008669     | -14.5%                    | -14.0% | -29.9%                    | -18.0% |
| 7KC  | 7   | Ortalama | -0.000265    | 0.000863     | -15.7                     | -24.2% | -37.7%                    | -54.9% |
|  | 6   | Ortalama | -0.000372    | 0.001150     | -15.8                     | -25.6% | -3.8%                     | -46.4% |
|  | 5   | Ortalama | -0.000425    | 0.001383     | -13.4                     | -31.8% | 30.2%                     | 31.6%  |
|  | 4   | Ortalama | -0.000447    | 0.001353     | -2.5%                     | -19.6% | 1.4%                      | -16.0% |
|  | 3   | Ortalama | -0.000554    | 0.002575     | 22.2%                     | 12.4%  | -7.7%                     | -27.4% |
|  | 2   | Ortalama | -0.000670    | 0.005255     | -3.4%                     | -42.2% | -19.3%                    | -30.0% |
|  | 1   | Ortalama | -0.001114    | 0.004433     | -31.5%                    | -43%   | -30.4%                    | -37.9% |

#### 4.4 Plastik Mafsalların Sistem Üzerindeki Dağılımları

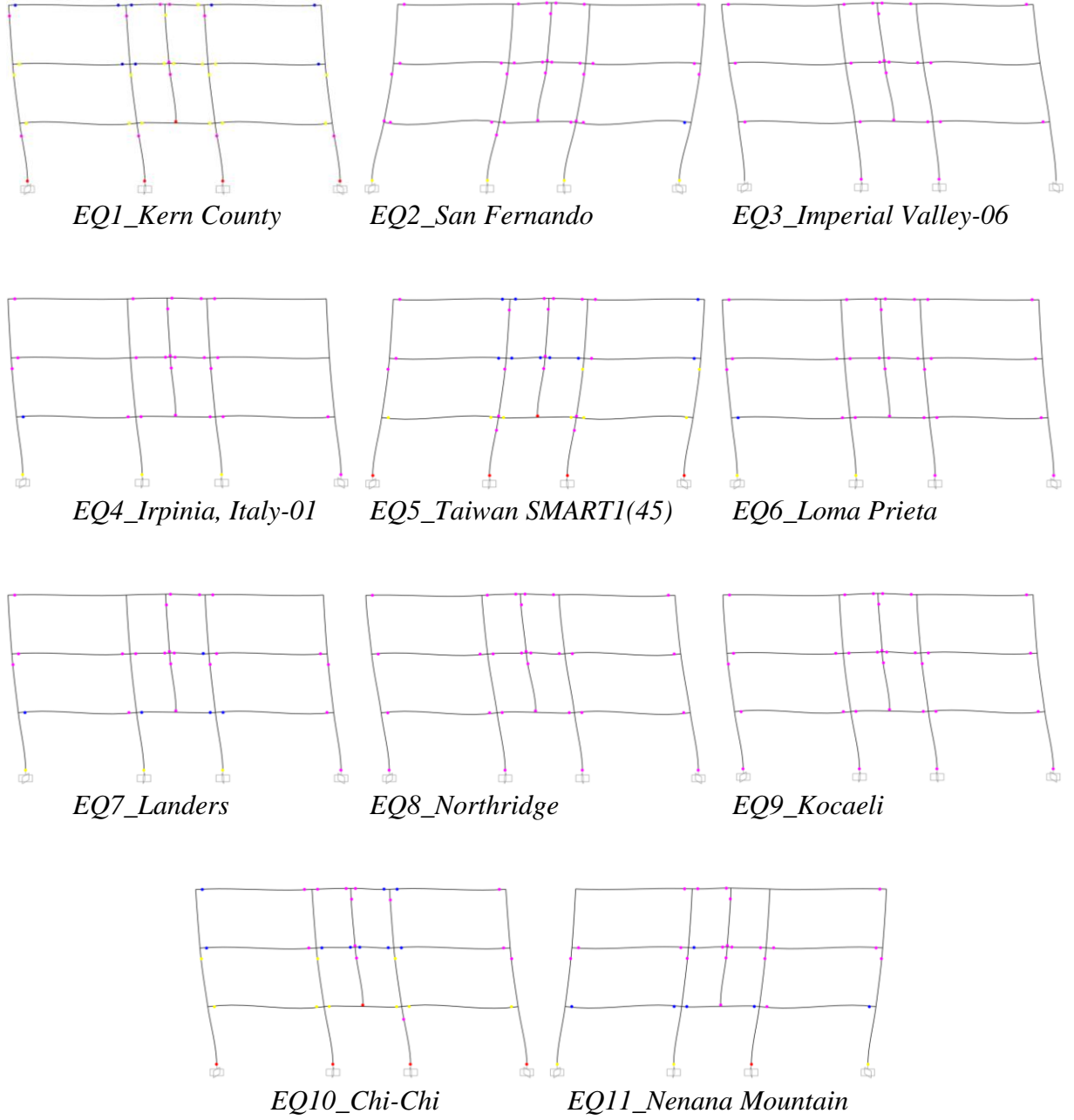
Çalışma kapsamında ele alınan betonarme çerçeve sistemlerin 11 adet gerçek deprem yer hareketinin yatay ve düşey bileşenleri altındaki ZTADOA'leri sonucunda en büyük tepe yerdeğiştirmesi anındaki plastik mafsalların dağılımları 3KC için Şekil 4.17-4.19'da 5KC için Şekil 4.20-4.22'de ve 7KC için Şekil 4.23-4.25'te sunulmuştur. İncelenen taşıyıcı sistemlerde transfer kirişleri dahil kiriş uçlarının birkaç deprem dışında akma durumuna ulaşarak mafsallaştığı belirlenmiştir. Tüm deprem kayıtları süresince taşıyıcı sistemlerde gevrek davranış oluşturacak kesme kırılması modu meydana gelmemiştir. Buna karşın, sistemdeki kolon uçlarında meydana gelen plastikleşme dağılımları seçilen deprem kayıtlarına, transfer kirişi uzunluğuna ve kat sayısına bağlı olarak farklılıklar göstermiştir.

Buna göre, incelenen taşıyıcı sistemlerden transfer kirişi en uzun olan L4 kodlu modellerde plastikleşmeler, genel olarak, kiriş uçlarının yanısıra en alt kolonlarının alt uçları, yüzer kolonun ve bunun üstündeki birkaç kolon ucunda oluşmuştur. Bu noktada, özellikle "Kern County", "Taiwan Smart1" ve "Chi-Chi" depremleri için kat yüksekliği arttıkça yüzer kolona komşu kolonlardaki plastik mafsalların arttığı görülmüştür. Buna karşın, bu taşıyıcı sistemlerde stabilite yetersizliği nedeniyle göçme durumu meydana gelebilecek kat mekanizması (panel mekanizması) durumu oluşmamıştır (Şekil 4.19, 4.22 ve 4.25).

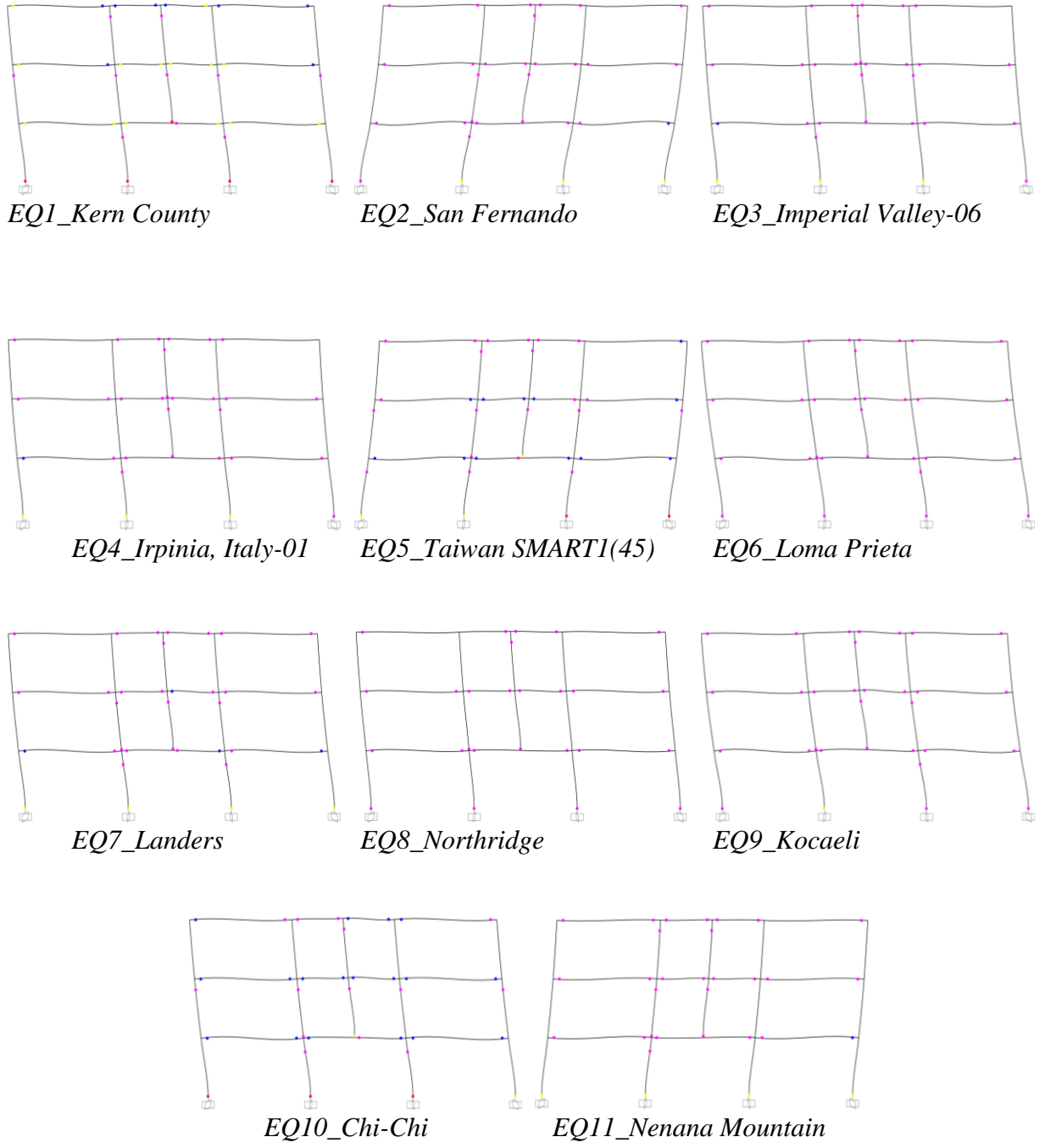
L3 kodlu çerçeve sistemlerde, özellikle “Kern County”, “Taiwan Smart1” ve “Chi-Chi” depremleri başta olmak üzere süreksizliğe sebep olan yüzer kolonun bulunduğu aks ile buna komşu her iki aksta yer alan kolon uçlarındaki plastik mafsalları sayısının belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda, 3KC\_L3 ve 5KC\_L3 sistemlerde bu deprem kayıtları için kat mekanizması durumları oluşurken, 7KC sistemde stabilite yetersizliği meydana getirecek herhangi bir durum meydana gelmemiştir (Şekil 4.18, 4.21 ve 4.24).

Transfer kirişi en kısa olan L2 kodlu sistemlerde, belirtilen üç deprem ivme kaydı için kolon uçlarındaki plastik mafsalları sayılarının kat yüksekliği ile çok hızlı arttığı ve bunun sonucunda, birden fazla katta kat mekanizması durumları tespit edilmiştir (Şekil 4.17, 4.20 ve 4.23).

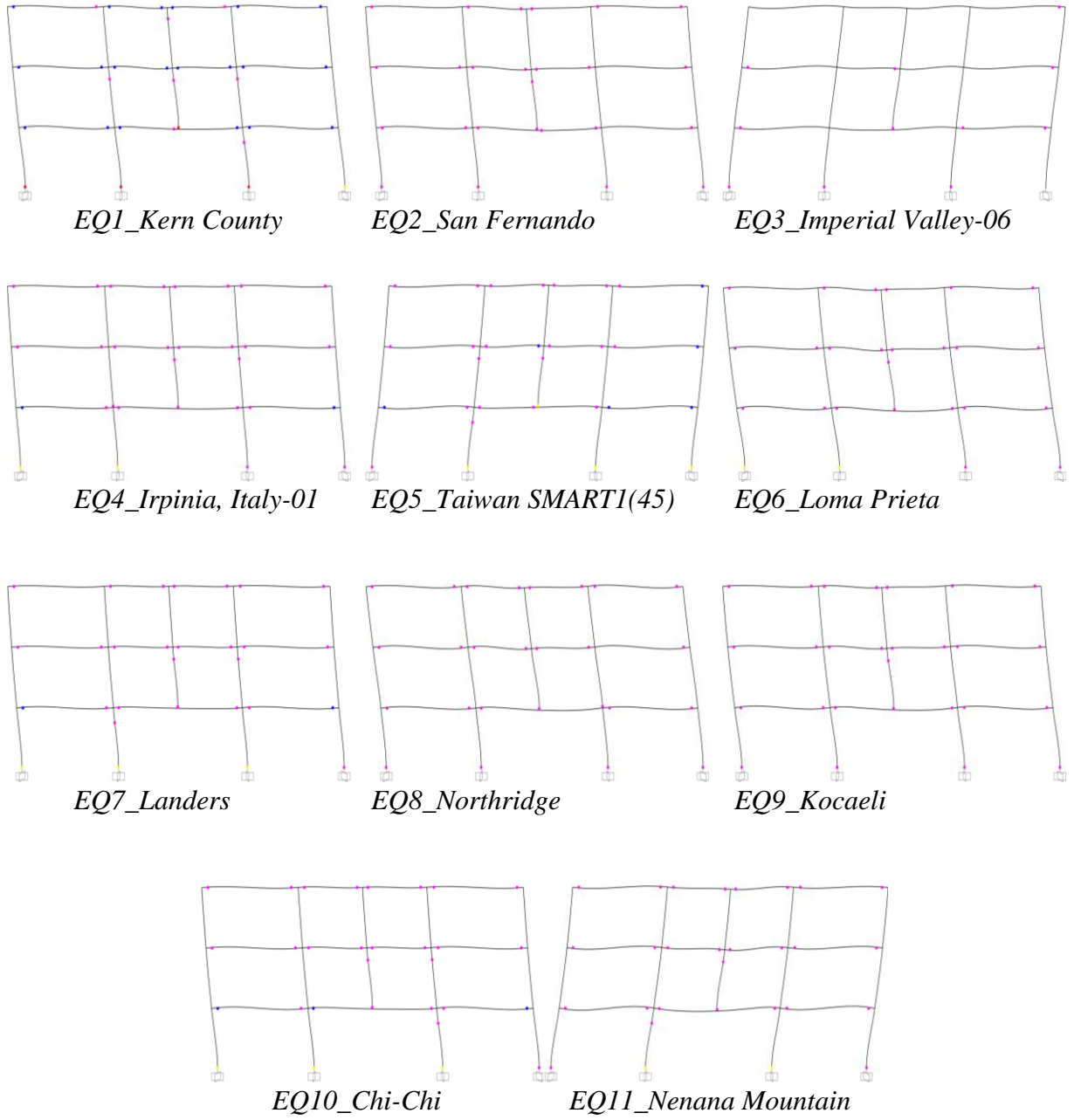
Bu tür düşey düzensizliğe sahip sistemlerde sismik yüklerin dolaylı aktarılması nedeniyle, süreksizliğe sebep olan kolon aksı ile buna komşu kolonlardaki davranışın belirli deprem kayıtları için oldukça kritik hale gelebildiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, TBDY-2018’de sadece süreksizliğin bulunduğu elemanlar için düşey ivme spektrumu altındaki tasarımın, süreksizliğin olduğu kolon aksı ve buna komşu kolonlar için de uygulanmasının kapasite tasarım ilkesi çerçevesinde bir çözüm olabileceği düşünülmektedir.



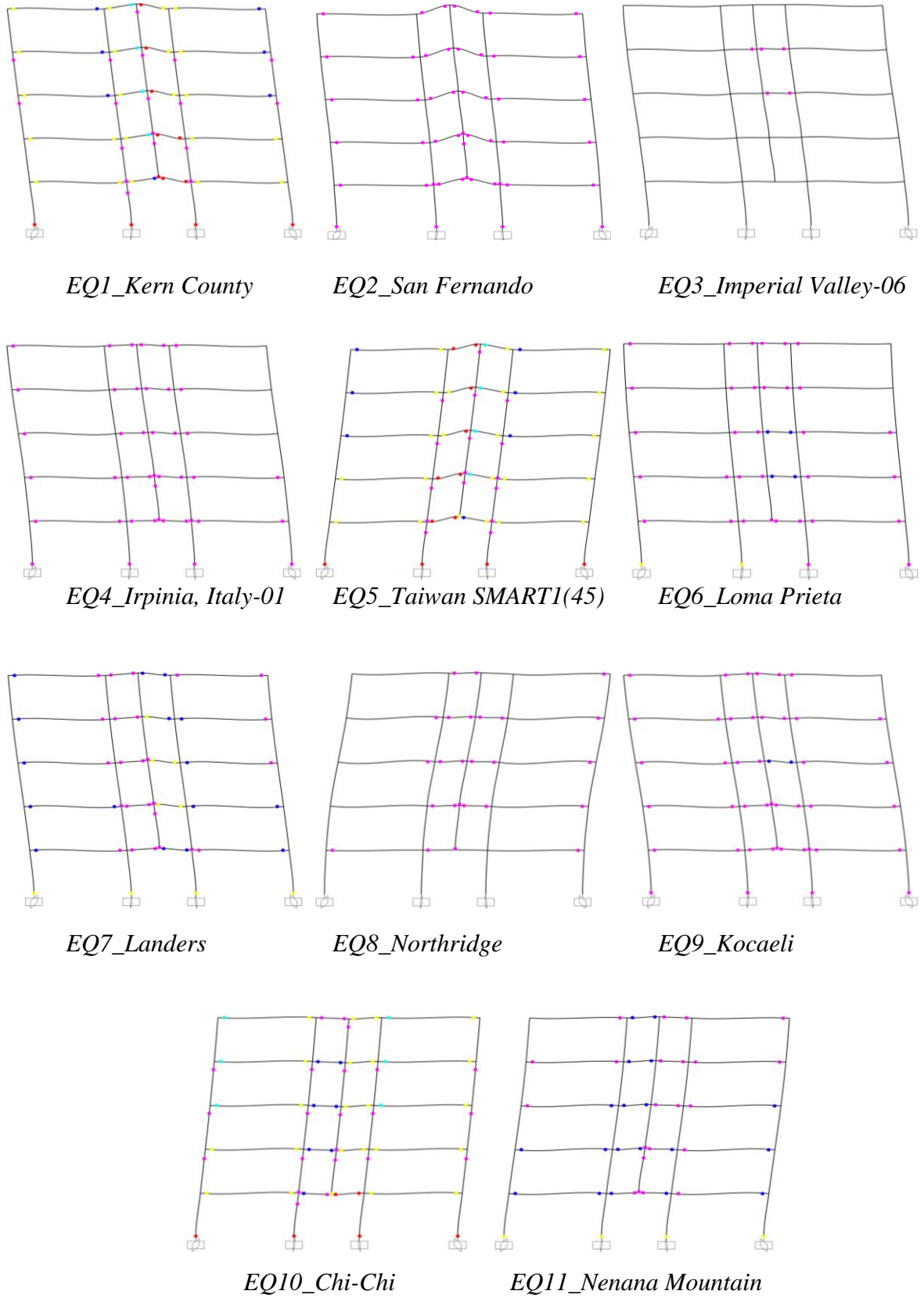
Şekil 4.17: 3KC\_L2 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



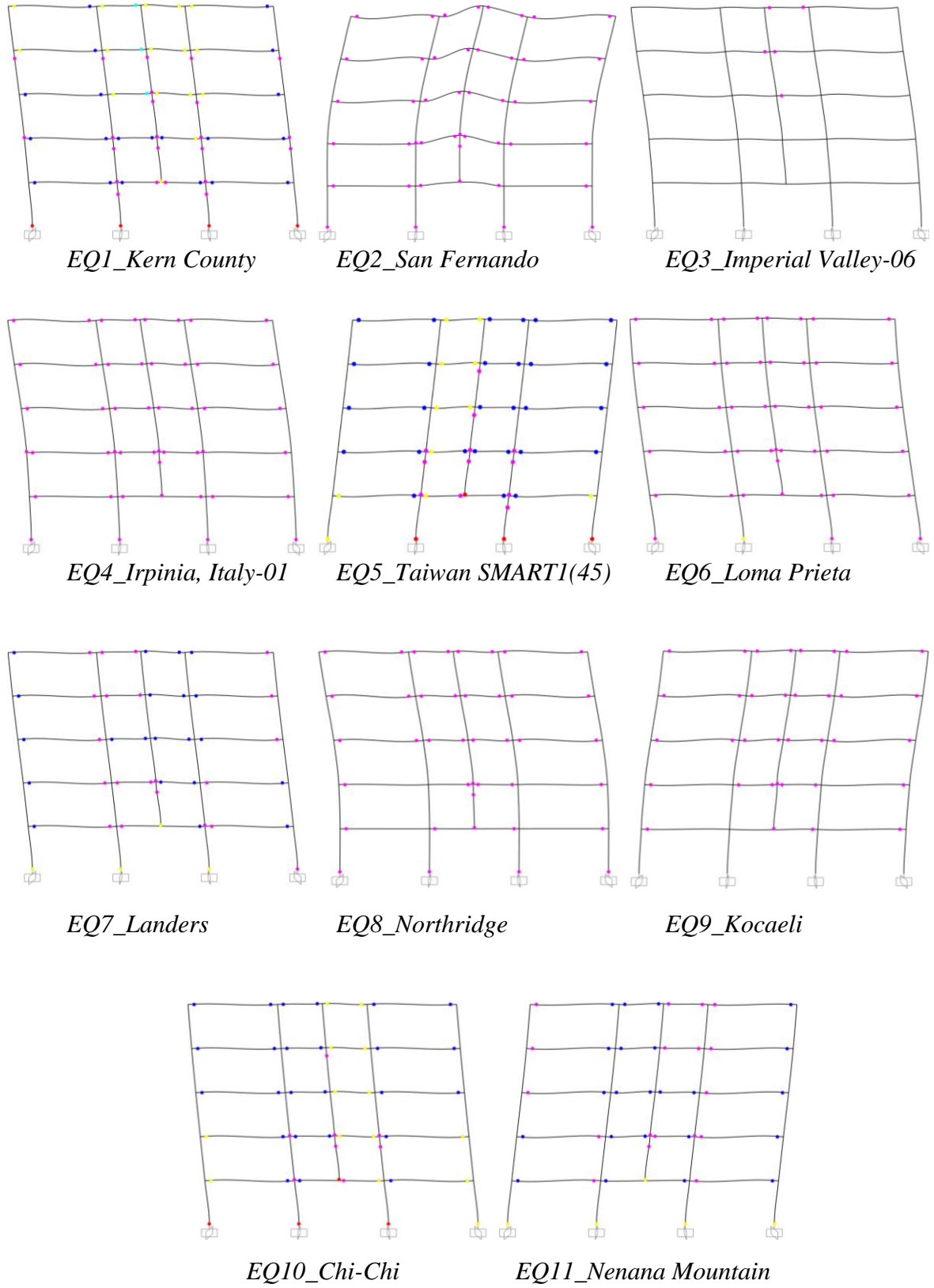
Şekil 4.18: 3KC\_L3 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



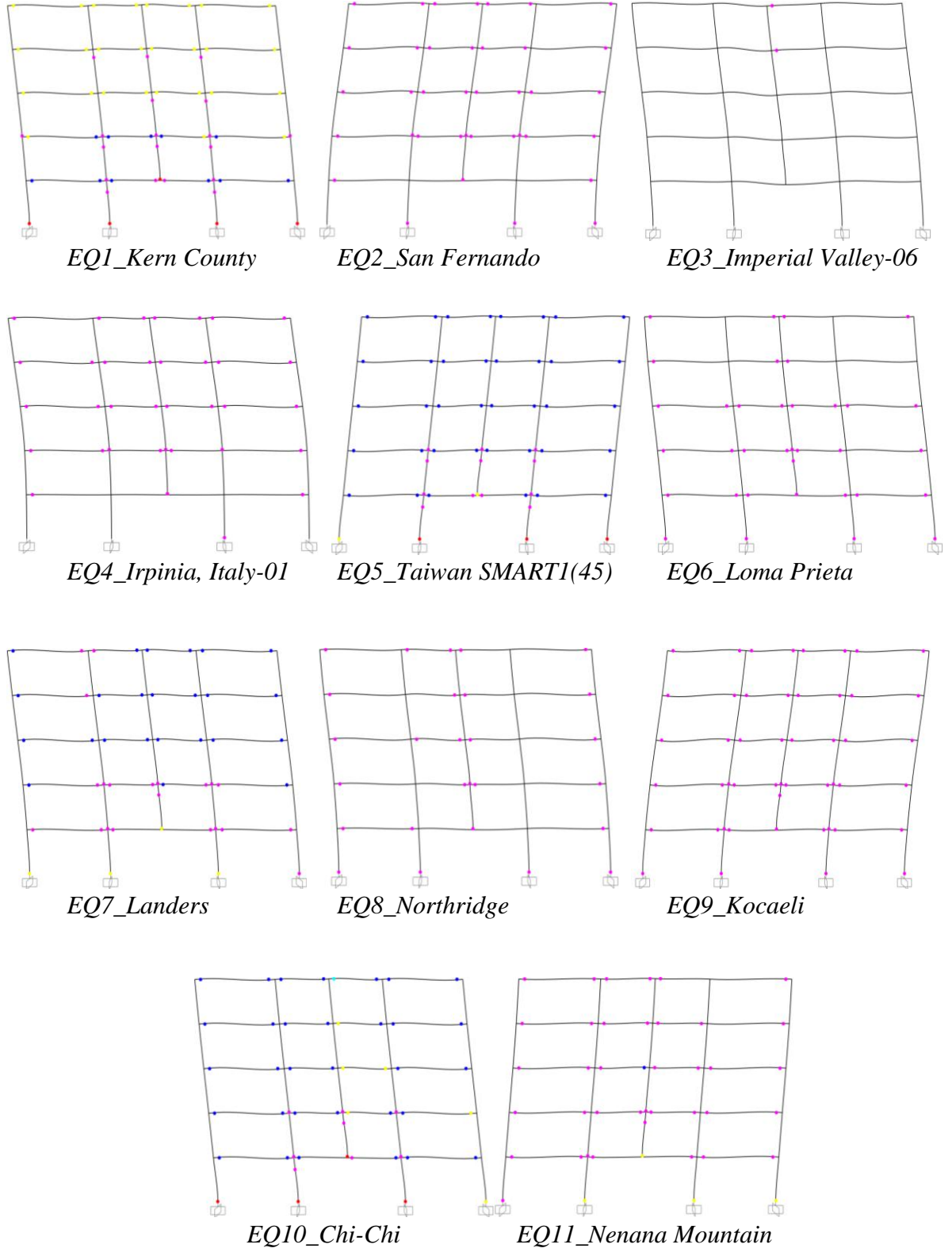
**Şekil 4.19:** 3KC\_L4 çerçeve sisteminde plastik kesitlerin dağılımı.



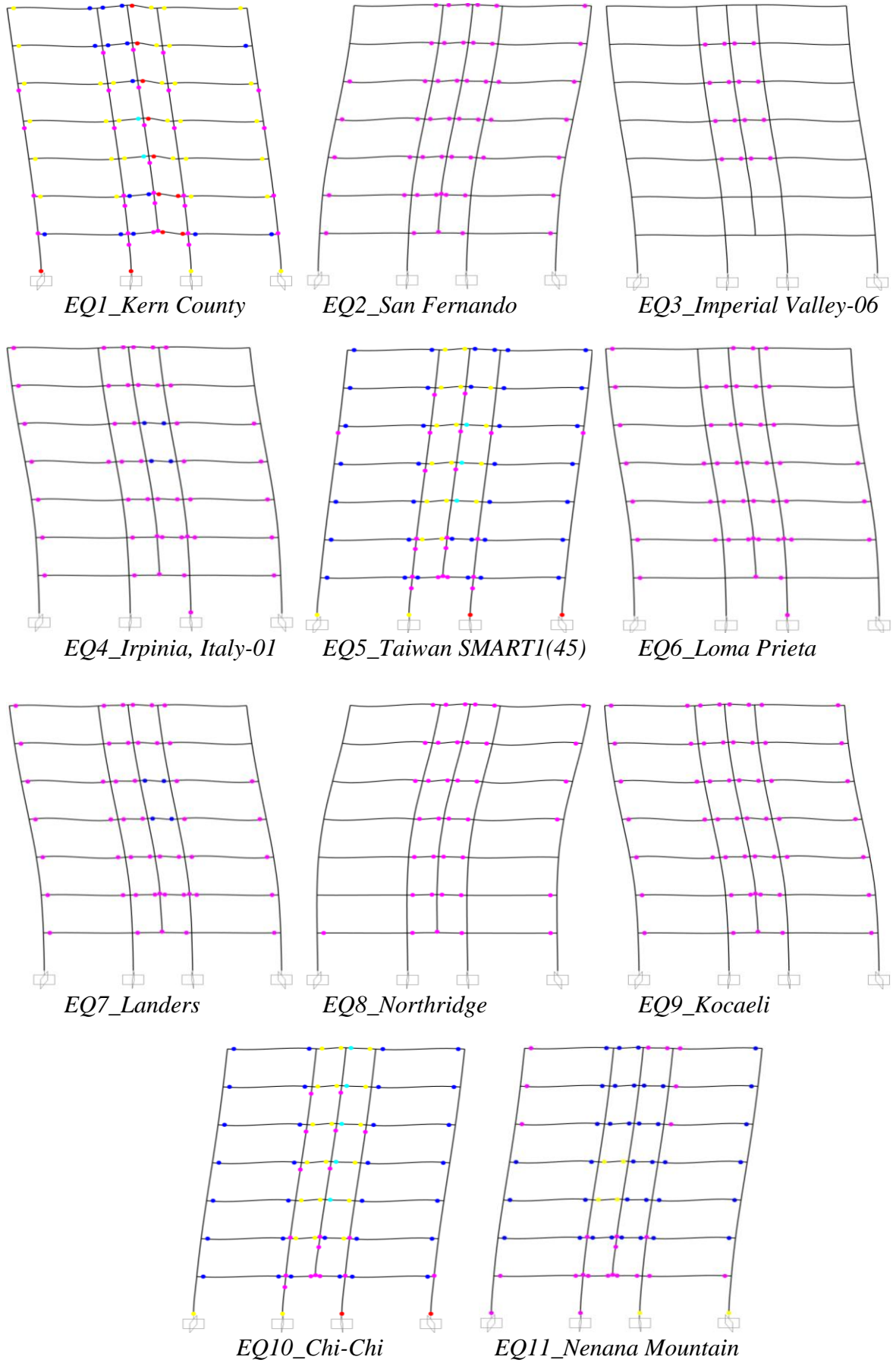
Şekil 4.20: 5KC\_L2 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



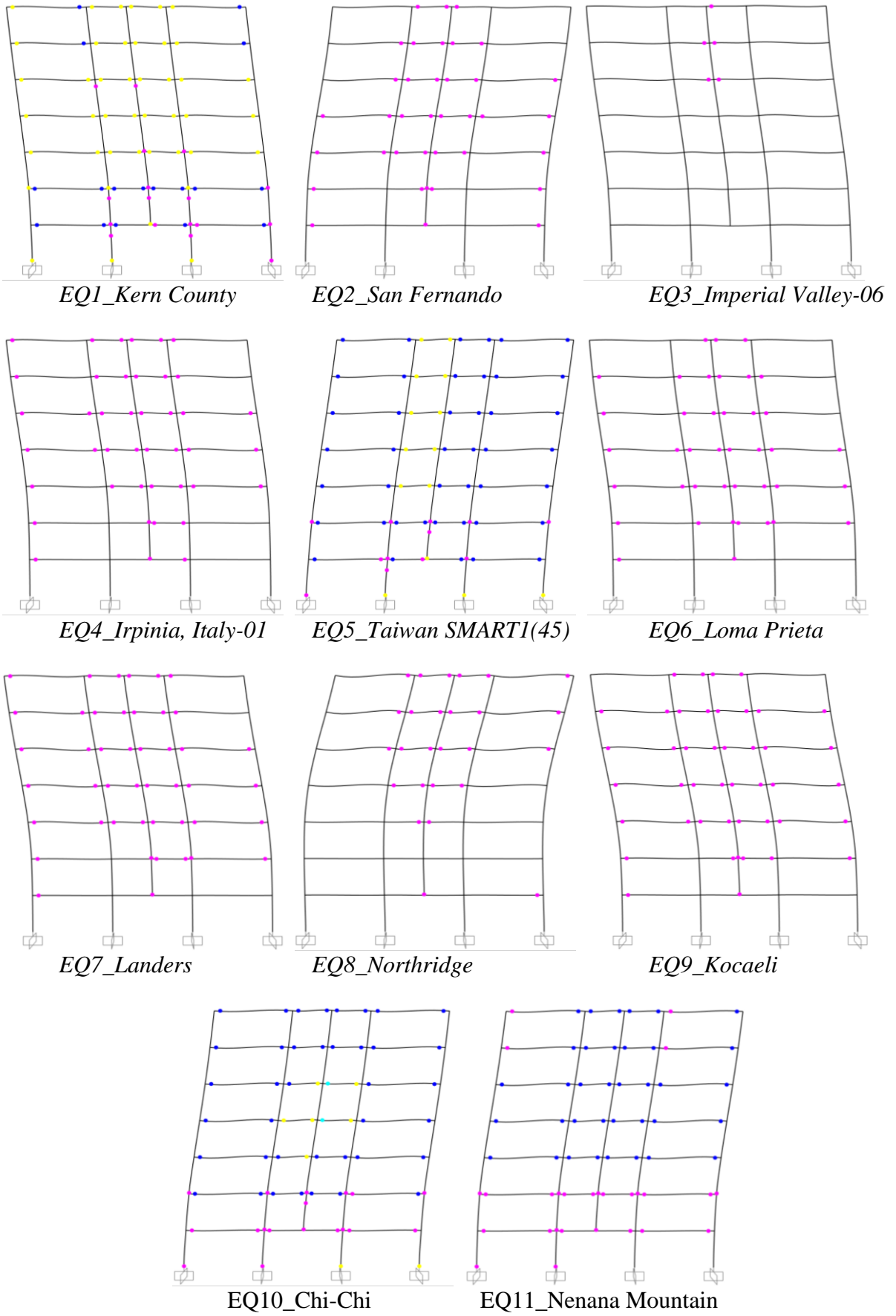
Şekil 4.21: 5KC\_L3 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



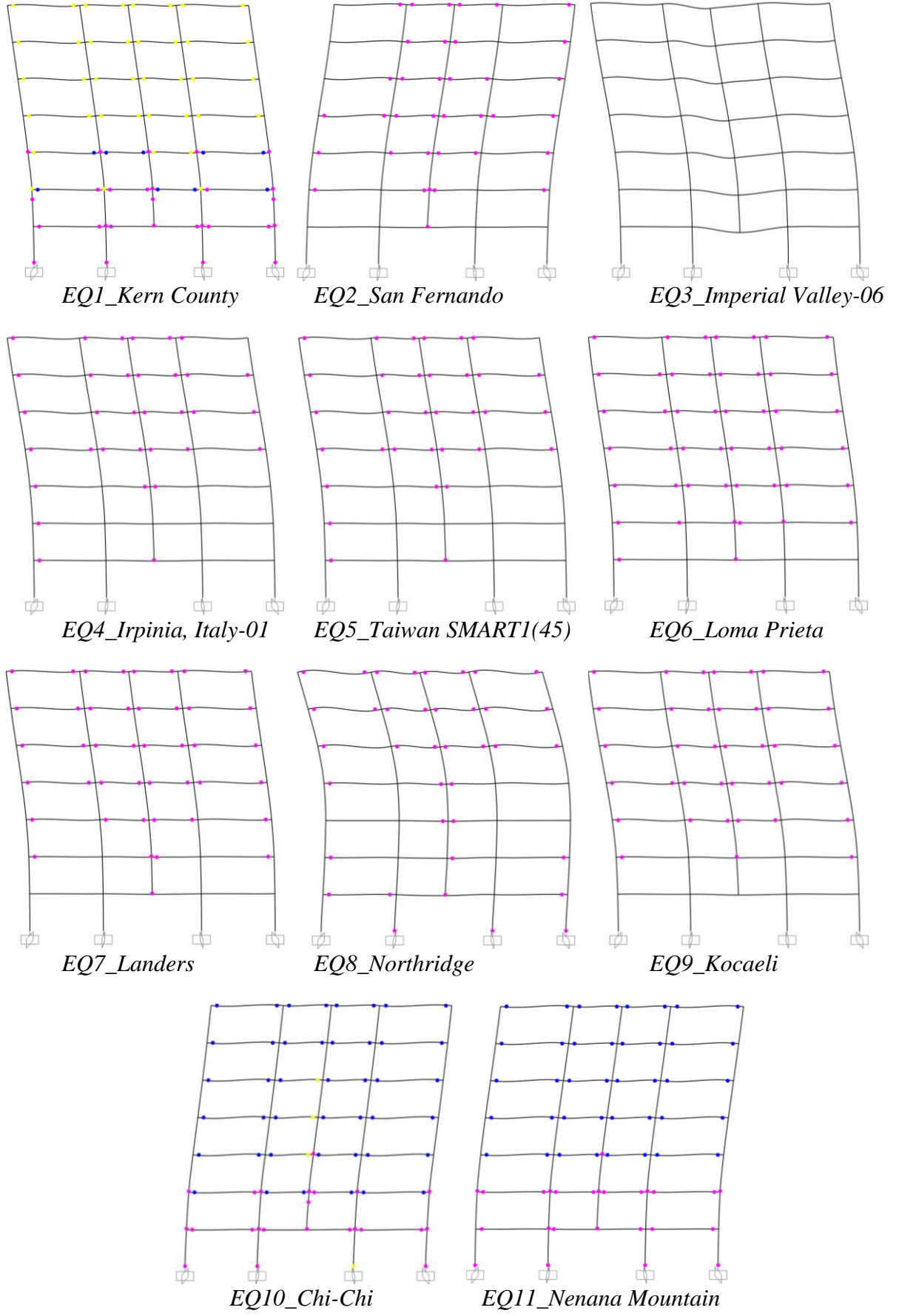
Şekil 4.22: 5KC\_L4 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



Şekil 4.23: 7KC\_L2 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



Şekil 4.24: 7KC\_L3 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.



Şekil 4.25: 7KC\_L4 çerçeve sisteminde meydana gelen plastik kesitlerin dağılımı.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, TBDY-2018’de B3 türü düşey düzensizlik olarak sınıflandırılan düşeyde kolon süreksizliğine sahip betonarme taşıyıcı sistemlerinin DD-2 seviyesindeki deprem etkisi altındaki sismik davranışları zaman tanım alanında doğrusal-elastik olmayan analizler çerçevesinde araştırılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında, üç farklı transfer kirişi uzunluğuna sahip 3, 5 ve 7 katlı toplam 9 adet çerçeve taşıyıcı sistemin 11 adet yatay ve düşey deprem kayıtları altında sayısal analizleri yapılarak şekildeğiştirme bazlı davranış talepleri (kat yerdeğiştirmesi, görelî kat ötelemesi, kiriş ve kolonlardaki plastik şekildeğiştirmeler ve plastik mafsalların sistem üzerindeki dağılımları) TBDY-2018’de verilen sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir.

- 1) Betonarme çerçeve sistemlerin zemin katlarındaki kolon süreksizliği nedeniyle yatay öteleme rijitliklerindeki azalmalara rağmen 3KC ve 5KC sistemlerin yerdeğiştirme profillerinde bir süreksizlik meydana gelmemiştir. 7KC sistemlerde ise ikinci merteye etkiler nedeniyle oluşan hızlı plastikleşmeler sonucunda yerdeğiştirmelerin hızla arttığı görülmüştür. Taşıyıcı sistemlerdeki transfer kirişi açıklığı arttıkça yerdeğiştirme davranışı, genel olarak, azalan bir eğilim göstermekle birlikte, 5KC ve 7KC sistemlerin L3 ve L4 modellerinde elde edilen yerdeğiştirme profilleri birbirlerine çok yakındır.
- 2) Kat yükseklikleri ve transfer kirişi açıklıkları değişken olan çerçeve sistemlerde, bireysel deprem kayıtları altında 3KC için %4.51, 5KC için %3.41 ve 7KC için %3.01’e ulaşan görelî kat öteleme talepleri oluşmakla birlikte, tüm taşıyıcı sistemlerdeki ortalama kat ötelemelerinin %1.5’un altında kaldığı belirlenmiştir.
- 3) Taşıyıcı sistemlerdeki kiriş plastik dönme talepleri, yönetmeliğin hedeflediği *Belirgin Hasar Bölgesinde (BHB)* kalmıştır. Çerçeve sistemlerde transfer kirişi uzunluğu arttıkça alt katlarda hesaplanan kiriş plastik dönmeleri, genel olarak, azalma yönünde bir eğilim göstermesine karşın, kat yüksekliği arttıkça ikinci merteye etkiler ile birlikte üst katlardaki plastik dönmelerin kritik hale gelebildiği belirlenmiştir.

Ayrıca, yüzer kolonun transfer kirişine birleştiği kritik uçlarda hesaplanan en elverişsiz kesme kuvveti taleplerinin kirişin kesme kuvveti taşıma kapasitesinin altında kaldığı, diğer bir ifade ile herhangi bir gevrek kırılmanın oluşmadığı belirlenmiştir.

- 4) İncelenen tüm çerçeve sistemlere ait kolon enkesitlerindeki  $\epsilon_c$  beton birim boy değişmesi taleplerinin akma sınırı ile *Sınırlı Hasar* arasındaki *Sınırlı Hasar Bölgesi*’nde (*SHB*) kaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, kolon donatılarına ait  $\epsilon_s$  birim boy değişmesi talepleri, büyük

çoğunlukta, *SHB* bölgesinde kalmakla birlikte *BHB*'ne geçen bazı kolon kesitlerinin olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kat bazındaki ortalama birim boy değişmesi talepleri kat yüksekliği ve transfer kirişi uzunluğu arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir.

- 5) İncelenen taşıyıcı sistemlerdeki plastik mafsalların dağılımları seçilen deprem kayıtlarına, transfer kirişi uzunluğuna ve kat sayısına bağlı olarak farklılıklar göstermiştir. Buna göre, transfer kirişi en uzun olan L4 kodlu çerçevelerde plastikleşmeler, genel olarak, giriş uçlarının yanısıra en alt kolonlarının alt uçları, yüzer kolonun ve bunun üstündeki birkaç kolon ucunda oluşmuştur. L3 kodlu çerçevelerde, özellikle “Kern County”, “Taiwan Smart1” ve “Chi-Chi” depremleri başta olmak üzere süreksizliğe sebep olan yüzer kolonun bulunduğu aks ile buna komşu her iki aksta yer alan kolon uçlarındaki plastik mafsal sayısının belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda, 3KC\_L3 ve 5KC\_L3 sistemlerde bu deprem kayıtları için kat mekanizması durumları oluşmuştur. Transfer kirişi en kısa olan L2 kodlu sistemlerde ise, belirtilen üç deprem kaydı için kolon uçlarındaki plastik mafsal sayılarının kat yüksekliği ile çok hızlı arttığı ve bunun sonucunda, birden fazla katta kat mekanizması durumları tespit edilmiştir.

Bu tür düşey düzensizliğe sahip sistemlerde sismik yüklerin dolaylı aktarılması nedeniyle, süreksizliğe sebep olan kolon aksı ile buna komşu kolonlardaki davranışın belirli deprem kayıtları için oldukça kritik hale gelebildiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında yürütülen parametrik incelemelere dayanarak, TBDY-2018’de sadece süreksizliğin bulunduğu elemanlar için düşey ivme spektrumu altında hesaplanan azaltılmamış deprem yüklerine göre tasarımın, süreksizliğin olduğu kolon aksı ve buna komşu kolonlar için de uygulanmasının kapasite tasarım ilkesi çerçevesinde bir çözüm olabileceği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- ABYYHY (1968). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İmar ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- ABYYHY (1975). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İmar ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- ABYYHY (1998). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İmar ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- ASCE 7-16 (2006). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 7-16, Reston, Virginia.
- ASCE 41-17 (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Aşıkoğlu, A. ve Avşar, Ö. (2017). Deprem Yönetmeliği'ndeki süreksiz kolon düzensizliği kriterinin irdelenmesi, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Anadolu Üniversitesi, 11–13 Ekim, Eskişehir.
- ATC 40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Vol. 1, Redwood City, California.
- Ateş, A.O. (2013). Kolon Süreksizliğinin Taşıyıcı Sistem Deprem Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bozat, F. U. (2013). Düşey Süreksizlik Bulunan Bir Binanın Tasarımı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Elastik ve Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Can, Ç. (2012). TDY2007'de Belirtilen Düşey Süreksizlik Durumunun Zaman Tanım Alanında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chopra, A.K. (2000). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Çakıroğlu, A. ve Özer, E. (1980). Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler (Cilt 1), İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Çalışkan, M. S. (2019). Dairesel Enkesitli Betonarme Kolonların Direkt Yerdeğiştirme Esaslı Tasarımında Eşdeğer Akma Eğriliğinin Parametrik İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- DBYBHY (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.

- Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M. and Willford, M. R. (2010). Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers, NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4, Applied Technology Council, California.
- Dinçer, H. (2022). Çift Doğrultulu Dişli Döşemeye Sahip Betonarme Binaların Şekildeğiştirme Bazlı Doğrusal Olmayan Davranışında Perde Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Doğan, E. ve Elmas, M. (2004). Binalarda düşey deprem etkisinin zaman tanım alanında hesap yöntemi ile incelenmesi, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 9-17.
- Eurocode 8, (2004). Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Standard EN 1998- 1:2003, Comite' Europe' en de Normalisation, Brussels.
- Faraj, R. K. D. (2017). Performance Assessment of Vertically Irregular Low-Rise and Mid-Rise Reinforced Concrete Structures, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- FEMA 273 (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA 356 (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Gujar, A. ve Jadhav, H. S. (2019). Performance of multi-story RCC structure with floating column, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(3), 7843–7847.
- Hasgül, U. (2004). Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Boyutlandırılan Betonarme Binaların Performanslarının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hasgül, U. (2011). Betonarme Binaların Şekildeğiştirme Esaslı Doğrusal Olmayan Analizinde Deprem Doğrultusu Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kara, N. ve Celep, Z. (2012). Nonlinear seismic response of structural systems having vertical irregularities due to discontinuities in columns, *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, Lizbon.
- Kent, D. C. ve Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete, *Journal of Structural Division*, 97(7), 1969-1990.

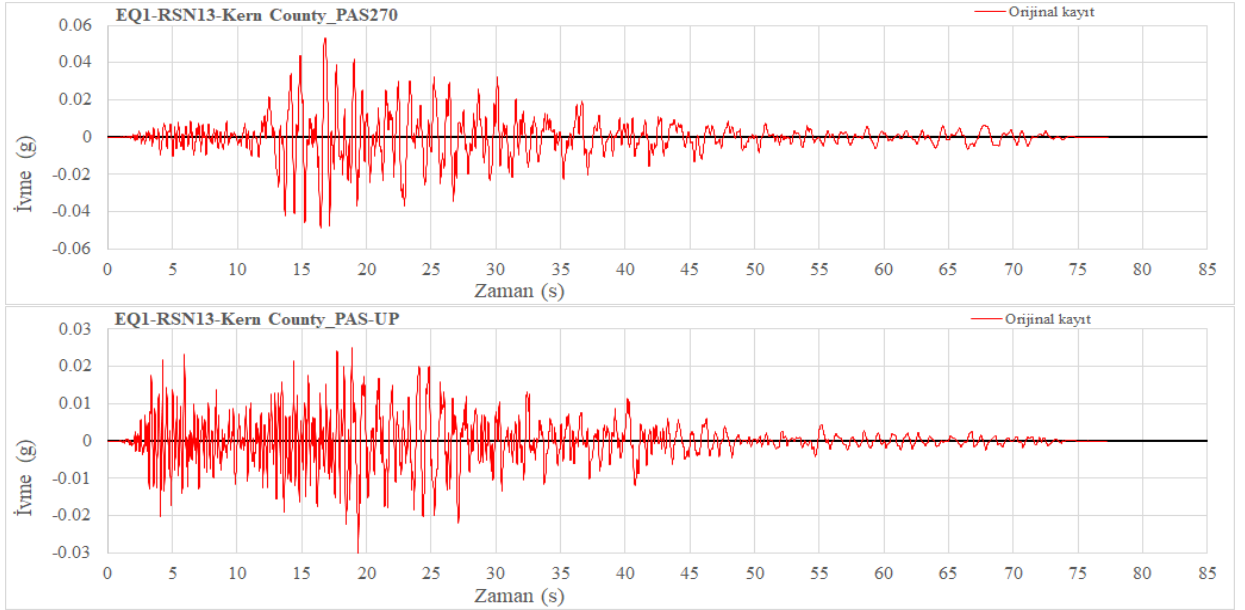
- Koçluk, U. Ç. (2019). Kolon Süreksizliği Bulunan Betonarme Bir Binanın Tasarımı ve Deprem Etkisi Altındaki Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kurt, M. Ş. (2023). Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizler Çerçevesinde Süneklik Düzeyi Karma Betonarme Sistemlerde Perde Oranının Etkisi Üzerine Parametrik Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Division*, 114(8), 1804-1826.
- Newmark, N. M. (1959)., A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 85(3), 67–94.
- Özer, E. (2009). Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Analizi, Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Paulay, T. and Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Popovic, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583-599.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G. M. and Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia.
- ProtaStructure (2024). Yapı Sistemlerinin Modellenmesi, Sonlu Elemanlar Analizi, Yönetmelik Destekli Tasarımı, Performans Değerlendirmesi ve Güçlendirilmesi için Çözüm Paketi Programı, Prota Yazılım, Ankara.
- Reinborn, A. M., Roh, H., Sivaselvan, M., Kunnath, S. K., Valles, R. E., Madan, A., Li, C., Lobo, R. and Park, Y. J. (2009). IDARC2D version 7.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Structures, Technical Report MCEER-09-006, University at Buffalo.
- Saatçioğlu, M. and Razvi, S. R. (1992). Strength and ductility of confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 118(6), 1590-1607.
- SAP2000 (2021). *Integrated Software for Structural Analysis and Design Program*, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- Sezgin, M. (2022). Düşey Düzensizliği Bulunan Betonarme Bir Binanın DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 Esaslarına Göre İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M. (1982). Analytical model for concrete confinement in tied columns, *Journal of Structural Division*, 108(12), 2703-2722.

- TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Toker, H., Ateş, A. O. ve Celep, Z. (2013). Konsola mesnetli kolonun süreksizliğinin taşıyıcı sistemin deprem davranışına olan etkisi, 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25–27 Eylül, Hatay.
- Turhan, E. (2007). Düşey Düzensizliğe Sahip Betonarme Bir Konut Binasının Sismik Performansının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Üner, E. (2009). Düşeyde Düzensiz Betonarme Bir Binanın Deprem Etkisi Altındaki Yapısal Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Thuat, D. V. (2013). Story strength demands of irregular frame buildings under strong earthquakes, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(9), 687–699.
- VISION 2000 (1995). Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.

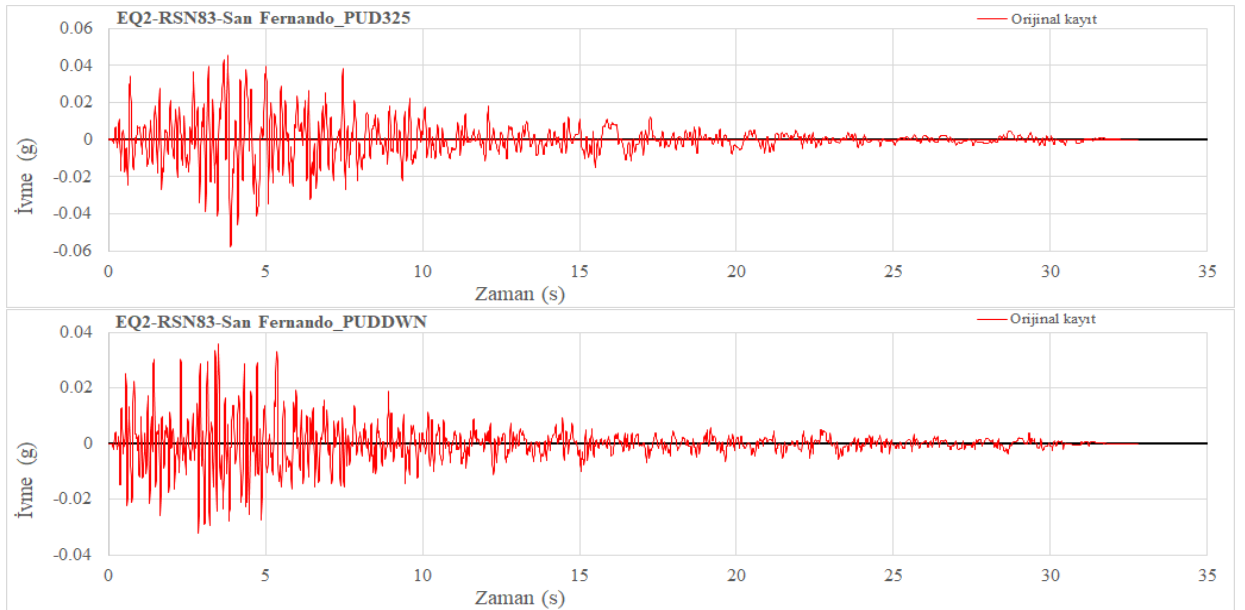
# **EKLER**

## EKLER

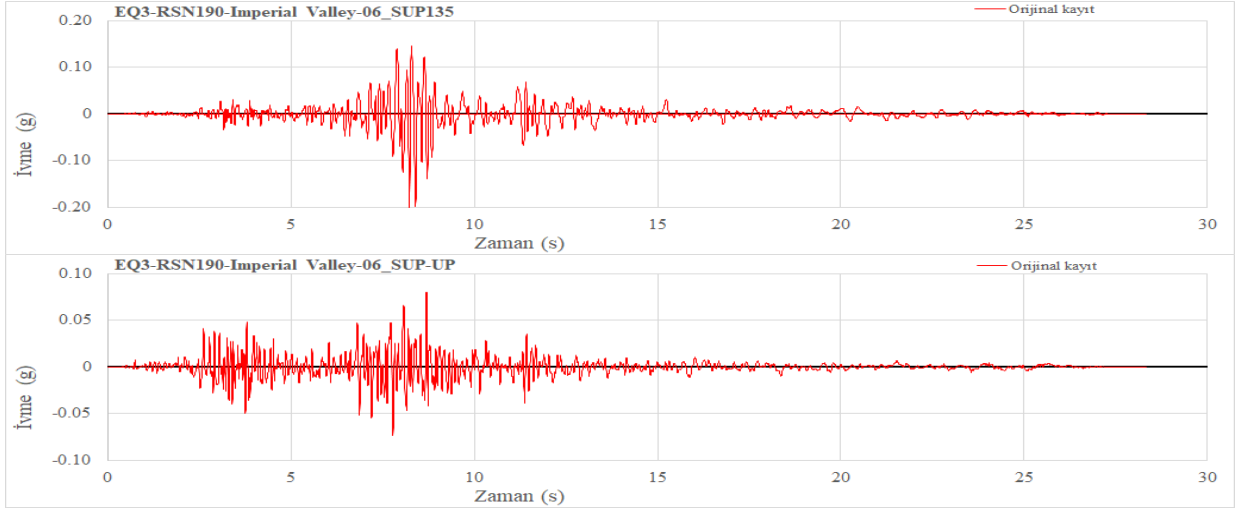
### EK A: Zaman Tanım Alanındaki Analizlere ait Deprem Yer Hareketi Kayıtları



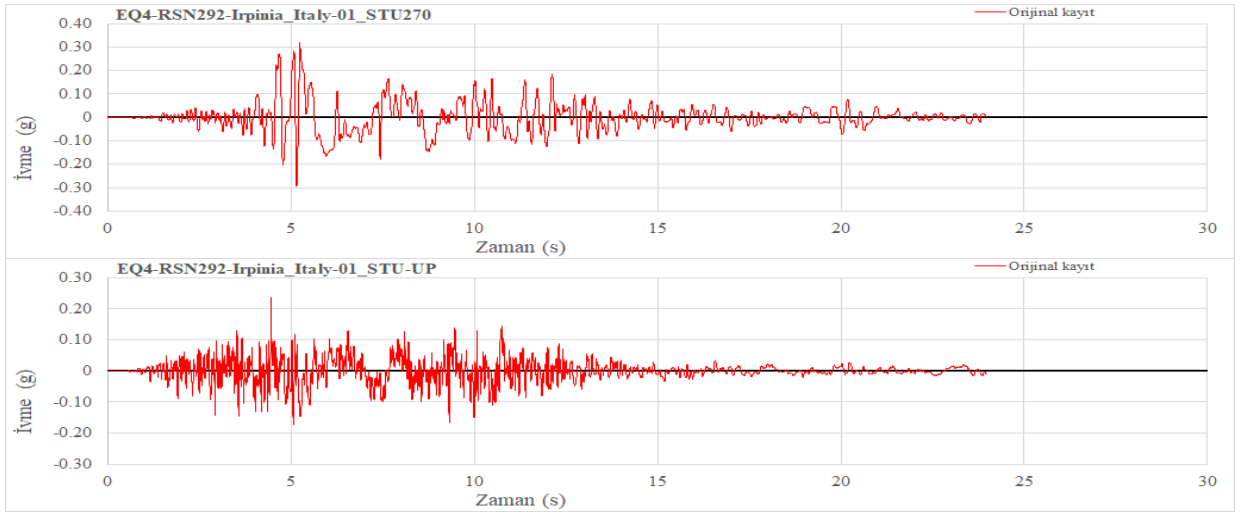
Şekil A.1: EQ1 – Kern County depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



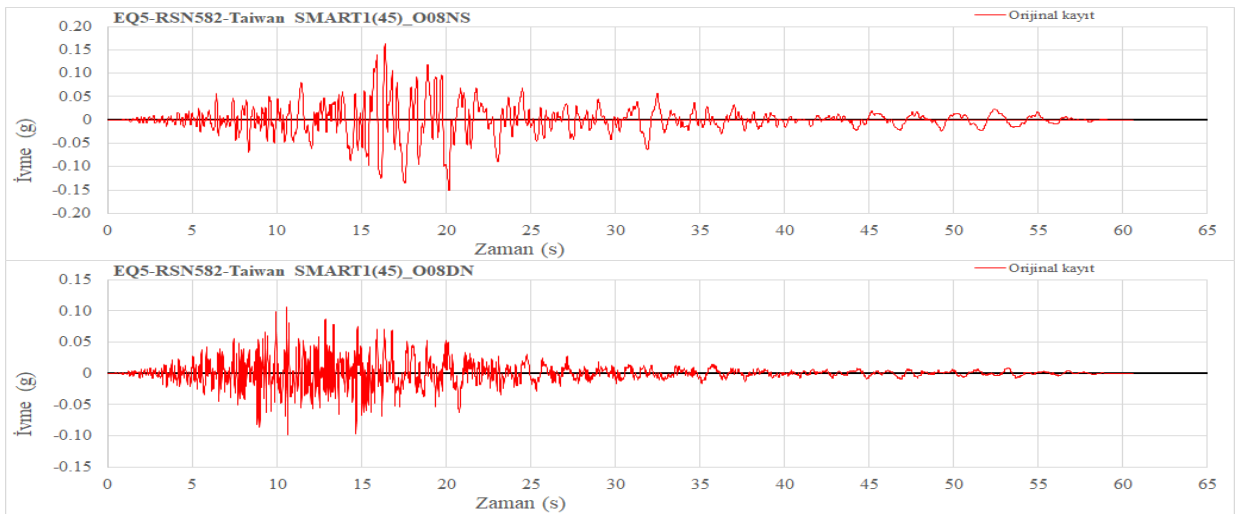
Şekil A.2: EQ2 – San Fernando depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



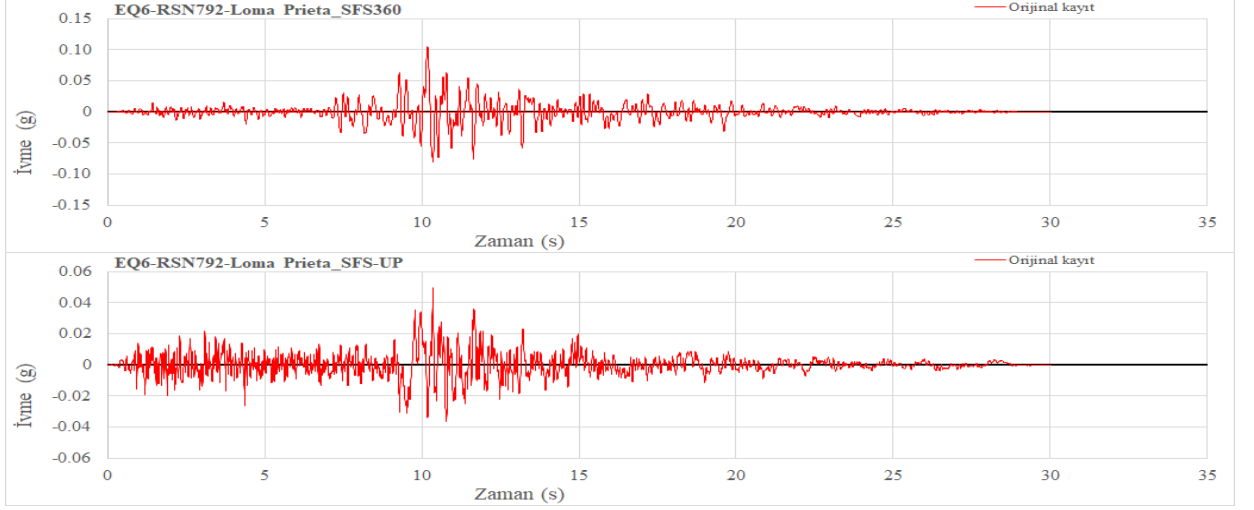
**Şekil A.3:** EQ3 – Imperial Valley-06 depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



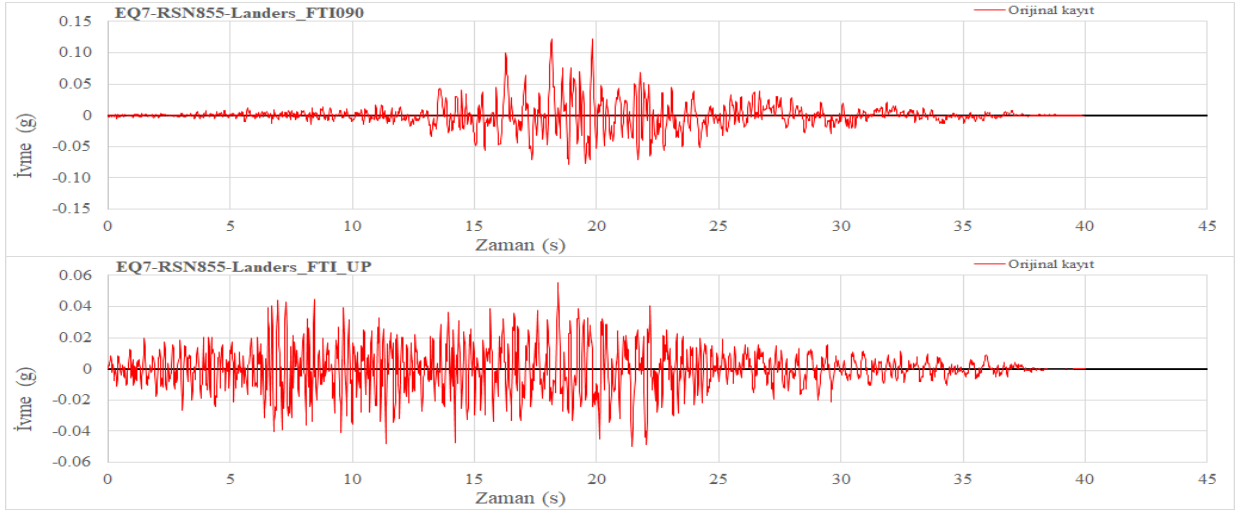
**Şekil A.4:** EQ4 – Irpinia\_Italy-01 depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



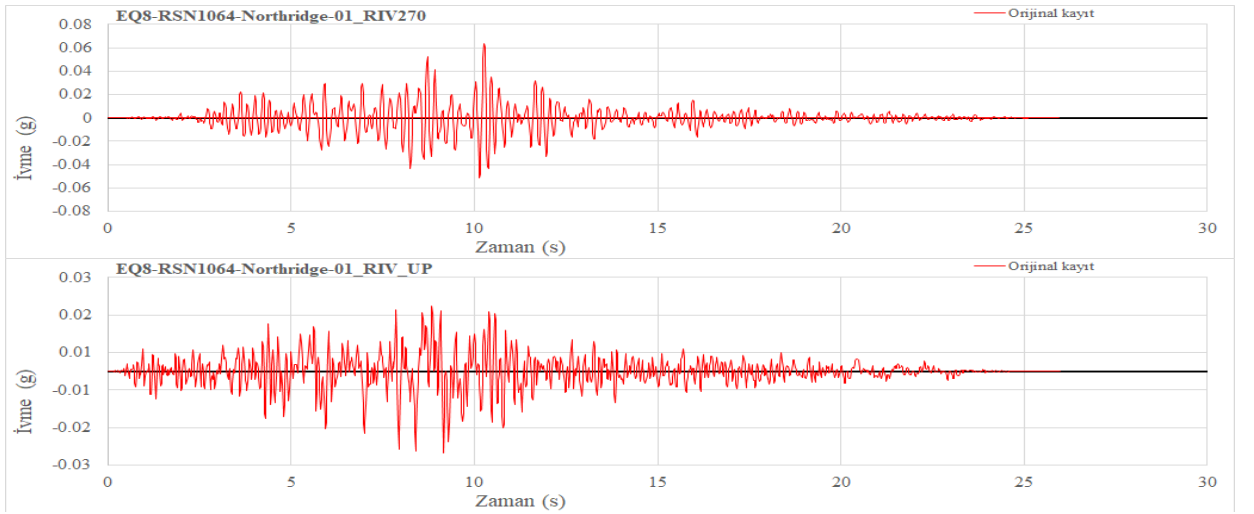
**Şekil A.5:** EQ5 – Taiwan SMART1(45) depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



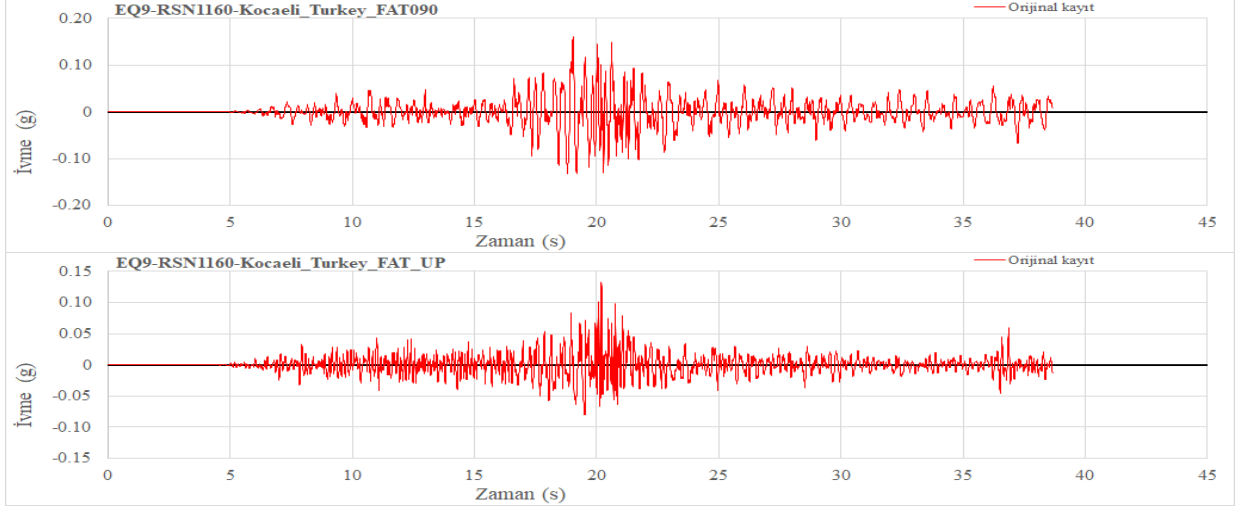
Şekil A.6: EQ6 – Loma Prieta depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



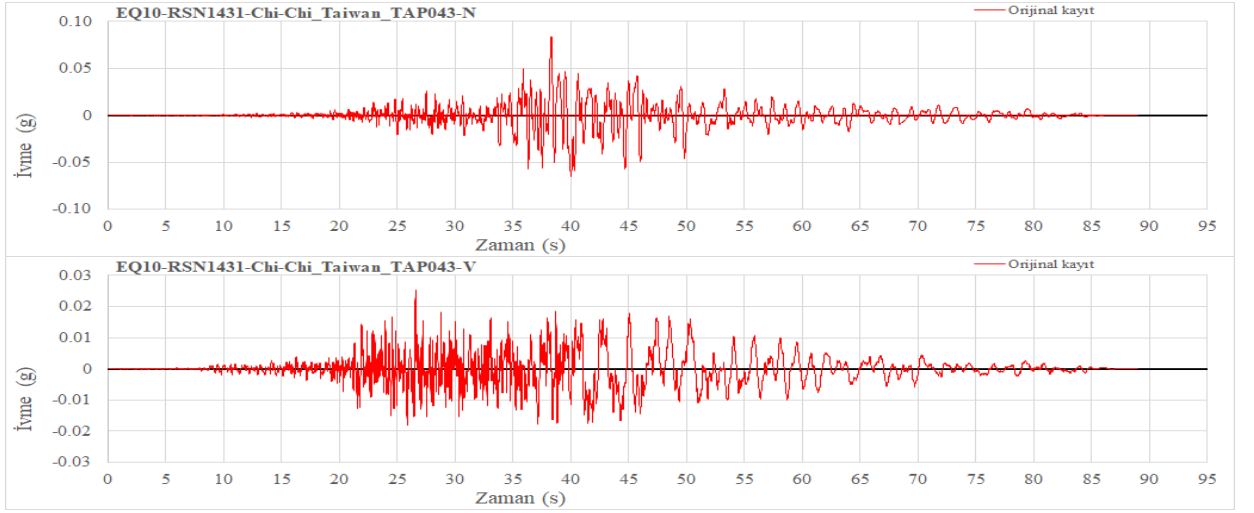
Şekil A.7: EQ7 – Landers depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



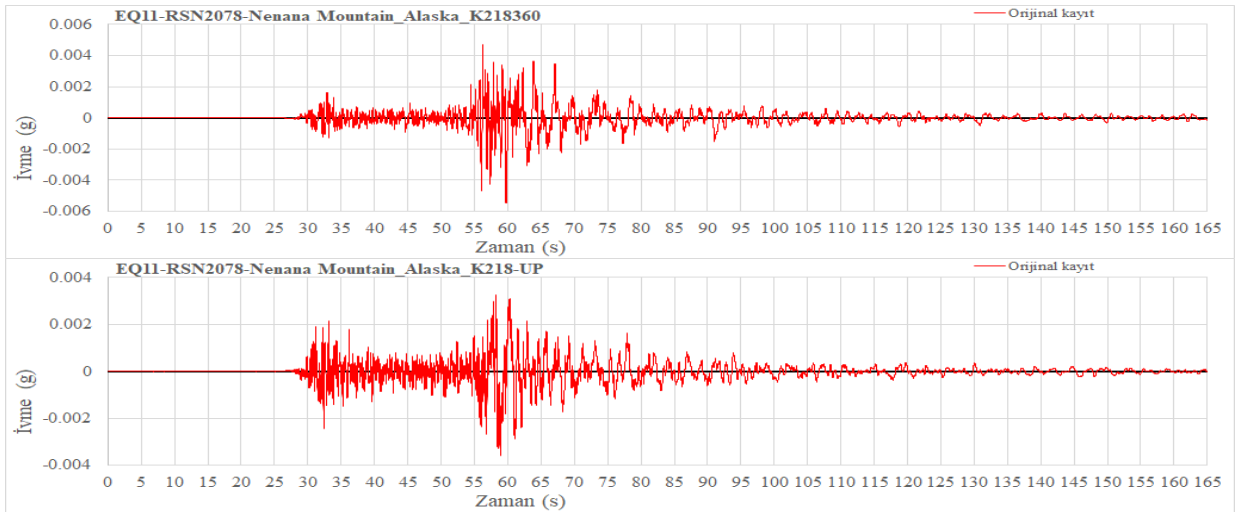
Şekil A.8: EQ8 – Northridge-01 depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



**Şekil A.9:** EQ9 – Kocaeli depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



**Şekil A.10:** EQ10 – Chi-Chi depremine ait yatay ve düşey bileşenler.



**Şekil A.11:** EQ11 – Nenana Mountain depremine ait yatay ve düşey bileşenler.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

### Öğrenim Bilgileri

| Derece    | Okul/Program                                 | Yıl  |
|-----------|--|------|
| Y. Lisans | Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği   | 2025 |
| Lisans    | Dumlupınar Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği | 2016 |
| Lise      | Ömer Seyfettin Anadolu Lisesi                | 2011 |