

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BETONARME ÇERÇEVELERİN FARKLI HİSTERETİK
MODELLER KULLANARAK ÇÖZÜMLENMESİ**

MELİS TAŞKIN

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

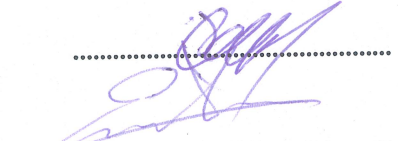
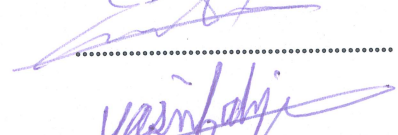
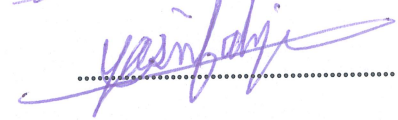
**BETONARME ÇERÇEVELERİN FARKLI HİSTERETİK
MODELLER KULLANARAK ÇÖZÜMLENMESİ**

MELİS TAŞKIN

Doç.Dr. Fuad OKAY
Danışman, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Erkan AKPINAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Yasin FAHJAN
Jüri Üyesi, GYTE


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.10.2013

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin farklı histeretik modeller kullanarak çözümlenmesi için yapılan bu çalışmada ve bütün lisans, yüksek lisans öğrenimim boyunca tüm desteğini, bilgisini, emeğini ve tecrübesini benimle paylaşan saygıdeğer hocam Doç.Dr.Fuad OKAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimimin başından sonuna fikir ve önerilerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Doç.Dr.Şevket ÖZDEN ve Doç.Dr.Seval PINARBAŞI'na katkılarından dolayı teşekkürü borç bilirim. Ayrıca saygıdeğer hocalarım Doç.Dr. Yasin FAHJAN ve Yrd.Doç.Dr.Erkan AKPINAR'a değerli eleştirileri ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca yanımda olup kıymetli desteklerini esirgemeyen sayın hocam Şener AKSU ve arkadaşım Gökhan GÜVEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca arkamda olup en doğrusunu, en iyisini yapmam için beni yüreklendiren, gerektiğinde sabır ve anlayışını esirgemeyen çok sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresinde kaybettiğim kuzenim Emre KALER, dedem Salim BAYDAR ve büyükbabam Osman TAŞKIN'ı özlemle anar ve çalışmamı, yaşamım boyunca sevgisini ve güvenini eksik etmeyen çok sevgili büyükbabam Osman TAŞKIN'a saygıyla adarım.

Eylül - 2013

Melis TAŞKIN

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | iii |
| TABLolar DİZİNİ | v |
| SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR | vi |
| ÖZET..... | ix |
| ABSTRACT | x |
| GİRİŞ | 1 |
| 1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI..... | 3 |
| 1.1. Kolonların Yatay Yük Etkisi Altında Davranışı | 3 |
| 1.2. Malzeme Modelleri | 5 |
| 1.2.1. Beton modelleri..... | 6 |
| 1.2.1.1. Hognestad modeli..... | 6 |
| 1.2.1.2. Kent ve Park modeli..... | 9 |
| 1.2.1.3. Sheikh ve Üzümeri modeli..... | 13 |
| 1.2.1.4. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli..... | 17 |
| 1.2.2. Çelik Modelleri | 19 |
| 1.2.2.1. Üç doğrusallıklı çelik modeli..... | 21 |
| 1.2.2.2. Öngermeli çelik modeli..... | 22 |
| 1.3. Kolon-Kiriş Birleşim Bölgeleri..... | 24 |
| 2. MODELLEME ve ANALİZ | 27 |
| 2.1. Deney Elemanının Tanıtılması..... | 28 |
| 2.2. OpenSees Programının Tanıtılması..... | 30 |
| 2.3. Fiber Tabanlı Analiz | 32 |
| 2.4. Beton Lifler İçin Malzeme Modeli | 34 |
| 2.5. Çelik Lifler İçin Malzeme Modeli | 37 |
| 2.6. Deney Elemanının OpenSees ile Modellenmesi ve Analizi | 38 |
| 3. ÖZDEN ve ERTAŞ HİBRİT BİRLEŞİM MODELİNİN UYGULANMASI | 50 |
| 3.1. Özden ve Ertaş Hibrit Birleşim Modeli | 50 |
| 3.2. Hibrit Birleşimde Uygulanan Malzeme Modelinin Oluşturulması | 58 |
| 3.3. OpenSees Programına Yeni Malzeme Modeli Eklenmesi | 67 |
| 3.4. Yeni Malzeme Modellerinin SAOZU6 Elemanına Uygulanması | 70 |
| 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER..... | 79 |
| KAYNAKLAR | 81 |
| EKLER | 85 |
| ÖZGEÇMİŞ | 89 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 1.1. | Değişen aksenal yük değerleri için moment-eğrilik ilişkileri | 4 |
| Şekil 1.2. | Silindir testi sonuçları | 7 |
| Şekil 1.3. | Hognestad sargısız beton modeli | 7 |
| Şekil 1.4. | Roy ve Sözen'in Eğrisi | 10 |
| Şekil 1.5. | Kent ve Park'ın sargısız ve sargılı beton modeli | 11 |
| Şekil 1.6. | Sargı donatısının hacimsel oranının σ - ε eğrisine etkisi..... | 12 |
| Şekil 1.7. | Sheikh ve Üzümeri'nin önerdiği gerilme-birim deformasyon eğrisi | 14 |
| Şekil 1.8. | Geliştirilmiş Kent ve Park modeli | 18 |
| Şekil 1.9. | Çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisi..... | 20 |
| Şekil 1.10. | Üç doğrusallıklı çeliğin σ - ε eğrisi..... | 21 |
| Şekil 1.11. | Naaman ve Mattock'un öngermeli çelik modelleri | 23 |
| Şekil 2.1. | Deney numunesinin geometrik özellikleri ve farklı tipte enine donatı yerleşimleri | 28 |
| Şekil 2.2. | OpenSees'deki temel soyutlama | 31 |
| Şekil 2.3. | Beton kesitin tanımlanması..... | 33 |
| Şekil 2.4. | Çelik kesitin tanımlanması..... | 34 |
| Şekil 2.5. | Braga'nın önerdiği beton modeli | 35 |
| Şekil 2.6. | Farklı tipte enine donatı yerleşimleri | 36 |
| Şekil 2.7. | Kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi..... | 37 |
| Şekil 2.8. | OpenSees.exe çalışma ekranı | 39 |
| Şekil 2.9. | SAOZU4 ve SAOZU6 modellerinin şematik gösterimi | 41 |
| Şekil 2.10. | UniaxialMaterial ConfinedConcrete01 malzeme kodu | 43 |
| Şekil 2.11. | UniaxialMaterial BoucWen malzeme kodu..... | 44 |
| Şekil 2.12. | Yerdeğiştirmeye dayalı yaklaşımın şematik ifadesi | 46 |
| Şekil 2.13. | Yükleme komutlarının kullanılışı | 47 |
| Şekil 2.14. | U4 numunesinin ve SAOZU4 modelinin yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri | 48 |
| Şekil 2.15. | U6 numunesinin ve SAOZU6 modelinin yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri | 49 |
| Şekil 3.1. | Özden ve Ertaş tarafından önerilen hibrit birleşimin şematik gösterimi | 51 |
| Şekil 3.2. | Geliştirilmiş Takeda modeli..... | 53 |
| Şekil 3.3. | Bayrak şekilli model | 54 |
| Şekil 3.4. | Hibrit modelin bileşenleri | 55 |
| Şekil 3.5. | Hibrit model | 56 |
| Şekil 3.6. | Deprem etkisinde elastik olmayan deformasyonların olduğu bölgeler ve yapı türleri | 59 |
| Şekil 3.7. | Bond_SP01 malzeme modeli..... | 60 |
| Şekil 3.8. | UniaxialMaterial Bond_SP01 malzeme kodu..... | 60 |
| Şekil 3.9. | Zhao ve Sritharan'ın oluşturduğu OpenSees modeli | 62 |
| Şekil 3.10. | UniaxialMaterial Ozden_Ertas malzeme kodu | 63 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.11. UniaxialMaterial SelfCentering malzeme kodu..... | 65 |
| Şekil 3.12. UniaxialMaterial Ozden_Ertas_Self malzeme kodu..... | 67 |
| Şekil 3.13. OpenSees sonlu eleman modelinin sınıf sistemi..... | 69 |
| Şekil 3.14. OpenSees.exe programında yeni malzeme modellerinin çalıştırılması | 70 |
| Şekil 3.15. Önerilen histeretik modelin uygulandığı SAOZU6 modelinin şematik gösterimi | 71 |
| Şekil 3.16. ZeroLengthSection eleman modeli | 72 |
| Şekil 3.17. ZeroLengthSection eleman modelinin kodu | 72 |
| Şekil 3.18. Değişen α değerlerine karşılık SAOZU61 modelinin davranışı | 74 |
| Şekil 3.19. Özden ve Ertaş tarafından yapılan çalışmanın sonuçları | 75 |
| Şekil 3.20. $\alpha=0,3$ ve $\alpha=0,1$ olduğunda elde edilen sonuçlar | 76 |
| Şekil 3.21. $\alpha=0,65$ ve $\alpha=0,5$ olduğunda elde edilen sonuçlar | 77 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1. Deney numunelerinin özellikleri..... | 29 |
|---|----|

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

| | |
|-----------|---|
| A | : Tanjant rijitliğin belirleyen parametre |
| A_{co} | : Çekirdek beton alanı, (mm ²) |
| A_{ec} | : Etkili sargılanmış beton alanı, (mm ²) |
| A_s | : Sargı donatısının kesit alanı, (mm ²) |
| b | : Çekirdek betonun taban uzunluğu, (mm) |
| b'' | : Sargılı çekirdek betonun kısa kenar uzunluğu, (mm) |
| c | : Tarafsız eksen derinliği, (mm) |
| c_i | : Boyuna donatılar arası mesafe, (mm) |
| d | : Kiriş etkili derinliği, (mm) |
| d_b | : Donatı çapı, (mm) |
| d_{max} | : Maksimum yerdeğiştirme, (mm) |
| d_y | : Akmadaki yerdeğiştirme, (mm) |
| d'' | : Sargılı çekirdek betonun uzun kenarı, (mm) |
| E_c | : Betonun başlangıç elastisite modülü, (N/mm ²) |
| E_r | : Boşaltma rijitliği, (N/mm ²) |
| E_0 | : Başlangıç rijitliği, (N/mm ²) |
| f_c | : Sargısız betonda oluşan gerilme, (N/mm ²) |
| f_{cc} | : Sargılanmış betonun basınç dayanımı, (N/mm ²) |
| f_{cp} | : Donatısız betonun basınç dayanımı, (N/mm ²) |
| f_c'' | : Beton silindir basınç dayanımı, (N/mm ²) |
| f_c | : Sargısız betondaki maksimum gerilme, (N/mm ²) |
| f_{py} | : Öngermeli çeliğin belirlenmiş akma dayanımı, (N/mm ²) |
| f_{pu} | : Öngermeli çeliğin çekme dayanımı, (N/mm ²) |
| f_s | : Çeliğin herhangi bir andaki gerilmesi, (N/mm ²) |
| f_{s0} | : Çeliğin referans gerilme değeri, (N/mm ²) |
| f_s | : Enine donatıda herhangi bir anda oluşan gerilme, (N/mm ²) |
| f_u | : Çekme dayanımı, (N/mm ²) |
| f_y | : Akma dayanımı, (N/mm ²) |
| f_{yh} | : Sargı donatısının akma dayanımı, (N/mm ²) |
| f^* | : f_s/f_{s0} |
| h | : Çekirdek betonun yüksekliği, kiriş kesitinin yüksekliği, (mm) |
| $h(z)$ | : Sıkıştırma (pinching) fonksiyonu |
| K | : Katsayı |
| K_i | : Başlangıç rijitliği, (N/mm ²) |
| K_p | : Akma sonrası rijitlik, (N/mm ²) |
| K_s | : Kuşatma katsayısı |
| k_0 | : Elastik rijitlik, (N/mm ²) |
| l_p | : Plastik mafsalsal boyu, (mm) |
| n | : Çekirdek betondaki sargılanmamış kısımların sayısı, katsayı |
| M_c | : Kolon-kiriş birleşiminin eğilme momenti, (Nmm) |
| M_{ms} | : Yumuşak donatının eğilme momenti, (Nmm) |
| P_{occ} | : Çekirdek betonun sargı etkisi olmadan yük taşıma kapasitesi, (N/mm ²) |
| R | : Katsayı |

| | |
|-----------------------|--|
| Q | : Katsayı |
| s | : Sargı donatıları arasındaki boyuna mesafe, (mm) |
| s_u | : Çekmedeki kayma deformasyonu, (mm) |
| s_y | : Akmadaki kayma deformasyonu, (mm) |
| \dot{u} | : Yerdeğiştirmenin zamana göre türevi |
| y_m | : Denklemce belirlenmiş uzaklık, (mm) |
| z | : Histeretik deformasyon |
| Z | : Katsayı |
| Z_m | : Katsayı |
| α | : Katsayı, yumuşak donatı oranı |
| β | : Katsayı |
| γ | : Katsayı |
| γ_{zx} | : Betonun zx düzlemindeki kayma deformasyonu |
| γ_{zy} | : Betonun zy düzlemindeki kayma deformasyonu |
| Δ_{ms} | : Yumuşak donatının uzama miktarı, (mm) |
| Δ_{pt} | : Ard-germe donatısının uzama miktarı, (mm) |
| ε | : Herhangi bir anda malzemede oluşan birim deformasyon |
| ε_c | : Sargılı betonun herhangi bir andaki birim kısalması |
| ε_{pu} | : Öngermeli çeliğin çekmedeki birim deformasyonu |
| ε_{so} | : Çeliğin referans birim deformasyon değeri |
| ε_{s1} | : Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma |
| ε_{s2} | : Maksimum basınç dayanımındaki maksimum birim kısalma |
| ε_{s85} | : $0,85 f_c$ değerine karşılık gelen birim kısalma |
| ε_z | : Betonda oluşan birim kısalma |
| ε_0 | : Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma |
| ε_{00} | : Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma |
| $\Delta\varepsilon_z$ | : Betondaki birim kısalma değişimi |
| ε_{50c} | : Sargılı betonun $0,5 f_c$ değerindeki birim kısalması |
| ε_{50h} | : Sargılı ve sargısız betonun $0,5 f_c$ değerindeki birim kısalma farkı |
| ε_{50u} | : Sargısız betonun $0,5 f_c$ değerindeki birim kısalması |
| ε^* | : $\varepsilon/\varepsilon_{so}$ |
| η | : Rijitlik faktörü |
| $\Delta\eta$ | : Rijitlik faktörü değişimi |
| θ | : Teğet açısı, (rad) |
| θ_c | : Kolon-kiriş arayüzündeki dönme açısı, (rad) |
| θ_{res} | : Kalıcı kat ötelenmesi, (%) |
| θ_y | : Akmadaki kalıcı kat ötelenmesi, (%) |
| λ | : Katsayı |
| μ | : Yerdeğiştirme sünekliği |
| ν | : Poisson oranı, dayanım faktörü |
| $\Delta\nu$ | : Dayanım faktörü değişimi |
| ρ_s | : Enine donatı hacminin çekirdek beton hacmine oranı |
| ρ | : Enine donatı hacminin çekirdek beton hacmine oranı |
| σ | : Gerilme, (N/mm ²) |
| σ_e | : Çeliğin orantılılık sınırı gerilmesi, (N/mm ²) |
| σ_p | : Çeliğin orantılılık sınırı gerilmesi, (N/mm ²) |
| σ_u | : Çekme dayanımı, (N/mm ²) |
| σ_x | : Betonun x doğrultusundaki eksenel gerilmesi, (N/mm ²) |
| σ_y | : Betonun y doğrultusundaki eksenel gerilmesi, akma dayanımı, (N/mm ²) |

| | |
|------------------|---|
| σ_z | : Sargılı betondaki gerilme, (N/mm ²) |
| $\Delta\sigma_z$ | : Betonda oluşan gerilme artışı, (N/mm ²) |
| σ_{z0} | : Sargısız betondaki gerilme, (N/mm ²) |
| Ψ | : Rijitlik oranı |

Kısaltmalar

| | |
|----------|---|
| NEES | : Network for Earthquake Engineering Simulation (Deprem Mühendisliği Simülasyonları için Ağ) |
| NIST | : National Institute of Standards and Technology (Ulusal Teknoloji ve Standartlar Enstitüsü) |
| NSF | : National Science Foundation (Ulusal Bilim Fonu) |
| OpenSees | : Open System for Earthquake Engineering Simulation (Deprem Mühendisliği Simülasyonları için Açık Sistem) |
| PEER | : Pacific Earthquake Engineering Research (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırmaları) |
| Tcl | : Tool Command Language (Komut Dili Araçları) |

BETONARME ÇERÇEVELERİN FARKLI HİSTERETİK MODELLER KULLANARAK ÇÖZÜMLENMESİ

ÖZET

Deprem gibi çevrimsel ve tekrarlı yüklere maruz kalan yapı elemanlarında meydana gelen hasarların önemli bir bölümü birleşim bölgelerinde görülür. Tasarımda rijit kabul edilen bu bölgelerin davranışının gerçeğe yakın modellenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla kolon-kiriş birleşim bölgelerinin deprem gibi yükler altındaki davranışını temsil eden histeretik modeller geliştirilmiştir. Betonarme yapıların davranışını temsil eden histeretik modellerin yanında, son yıllarda sıklıkla kullanılan ard-germeli prefabrik yapılar için de farklı modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmada ard-germe tendonlarına ek olarak yumuşak donatıların da kullanıldığı hibrit birleşimler için Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen histeretik model kullanılmıştır. Modelin uygulanması için Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan deneysel çalışmada test edilen kolon numuneler seçilmiştir. Deneysel verileri mevcut olan kolonu sayısal olarak modellemek için OpenSees sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Çalışmada önerilen hibrit modeli temsil edecek yeni malzeme modelleri oluşturulmuş ve OpenSees programı kullanılarak modellenmiş kolonun birleşim bölgesine uygulanmıştır. Daha sonra yumuşak donatı oranı değiştirilerek kolon davranışının değişimi incelenmiştir ve Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre yapının enerji tüketme kapasitesi birleşimdeki yumuşak donatı oranına göre değişmiş, yumuşak donatının birleşimin moment kapasitesine olan katkısı arttıkça yapının enerji tüketme kapasitesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca benzer şekilde kalıcı deformasyonların da yumuşak donatı oranından etkilendiği sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Hibrit Birleşimler, Histeretik Modeller, Yumuşak Donatı.

ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES USING DIFFERENT HISTERETIC MODELS

ABSTRACT

A major part of damage occurring in construction elements that are exposed to reverse cycling loads like earthquake is seen in connection areas. It is quite important to model the behavior of these areas real-like which are considered rigid in designing. Histeretic models which represent the behavior of beam-column connections, have been developed for this purpose. Besides, different models have been developed also for post-tensioned precast constructions that were used often in recent years. Histeretic model which is proposed by Özden and Ertaş (2010), has been used in this study for hybrid connections that use mild steel, in addition to post-tensioned tendons. Column samples which were tested in experimental study carried by Saatçioğlu and Özcebe (1989) have been selected to apply the model. OpenSees finite elements program is used to model the column numerically of which experimental data exists.

New material models which are proposed in the study have been created and applied to column connection that modelled by using OpenSees program. Then the change in, column's behavior was examined by changing mild steel ratio and similar results to those that Özden and Ertaş (2010) were achieved. According to this, it was seen that energy dissipation capacity of the construction was varied depending on mild steel ratio in the connection and energy dissipation capacity of the construction increased as the contribution of mild steel upon connection's moment capacity increased. Besides, the result has been obtained that in a similar way residual deformation were effected by mild steel ratio.

Keywords: Reinforced Concrete, Hybrid Connections, Histeretic Models, Mild Steel.

GİRİŞ

Deprem, insanın kişisel ve toplumsal hayatını önemli şekilde etkileyen ve içinde bulunduğu coğrafi konum nedeniyle Türkiye’de sıklıkla görülen bir doğa olayıdır. Deprem, yerkürenin üzerinde biriken gerilmelerin doğal olarak enerji şeklinde açığa çıkması ve bu enerjinin dalgalar halinde yerkürede yayılması sonucu oluşur (Canbay ve diğ., 2008). İnsanoğlu varoluşundan bu yana birçok doğal felaketle karşılaşmış ve zorunlu olarak yaşam koşullarını bu doğa olaylarına göre düzenlemek zorunda kalmıştır. Günümüzde bu görevi üstlenen meslek grupları vardır. Bunlardan biri olan inşaat mühendisliğinin temel yaklaşımlarından biri depreme dayanıklı yapı tasarımı yapmaktır. Ancak depreme dayanıklı yapı tasarımı herhangi bir etkiye karşı yapıda gerekli dayanımı sağlamayı amaçlayan tasarımdan oldukça farklıdır. Bu da yer hareketlerinin son derece karmaşık yapıda ve birbirine benzemez şekilde olmasından kaynaklanır (Canbay ve diğ., 2008).

Deprem kuvvetlerine maruz kalan yapıların yapısal performansının arttırılması için teknolojinin gelişimiyle birlikte yapı elemanlarını ve sistemlerini geliştirecek yeni malzemeler ve yeni üretim yöntemleri önerilmiştir. Son yıllarda monolitik (birdöküm) sistemlerin yanında prefabrik (önüretimli) sistemler oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İnşa süresinin büyük önem taşıdığı günümüz projelerinde, yapım süresinin kısalığı nedeniyle prefabrik sistemler büyük avantaj sağlarken, endüstri yapıları, otopark yapıları, yurt binaları ve köprülerin inşasında bu yapı sistemi kullanılmaya başlanmıştır (Meydanlı, 2010).

Prefabrik yapıların yapısal performansı (süneklik, dayanım ve rijitlik) yapı elemanlarının bir araya getirildiği birleşim bölgeleri tarafından belirlenir. Depremlerin sıklıkla yaşandığı bölgelerde elemanların sürekliliği moment aktarabilen birleşimlerin kullanıldığı çerçevelerle sağlanır. Depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerinde, moment aktarabilen tüm bağlantıların deprem etkisinde monolitik davranışa benzer yapısal performansına sahip olmaları istenir.

Bu nedenle deprem riski yüksek olan bölgelerde uygulanan prefabrik yapıların moment aktarabilen birleşim bölgesi detaylarına daha özel önem verilmelidir (Meydanlı, 2010). Bu amaçla kolon-kiriş birleşim bölgeleri için birçok birleşim modeli geliştirilmiş ve genel olarak 3 grupta toplanmıştır. Bunlar ıslak, kuru ve ard germeli birleşimlerdir (Ersoy ve Tankut, 1997). Ek olarak, kiriş merkezinden geçen ard-germe tendonu ve kiriş çekme, basınç bölgelerine yerleştirilen yumuşak donatının bir araya gelmesinden oluşan hibrit birleşimler de vardır (Meydanlı, 2010).

Özden ve Ertaş (2010) tarafından Boğaziçi ve Kocaeli üniversitelerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucu prefabrik sistemlerin moment aktarabilen kolon-kiriş bölgeleri için hibrit birleşim modeli geliştirilmiştir. Daha sonra bu modelin deprem etkisi altındaki davranışını ifade edecek yeni bir histeretik model önerilmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan deneysel çalışmada test edilmiş iki adet kolon numunesi OpenSees sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyumlu olması neticesinde Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen yeni birleşim modelini temsil edecek malzeme modelleri OpenSees programının malzeme kütüphanesine eklenmiştir. Daha sonra en uyumlu sonucu veren kolon modeline Özden ve Ertaş (2010) histeretik modeli uygulanmış ve gerekli analizler yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmada hibrit birleşimde bulunan yumuşak donatının birleşim bölgesinin moment kapasitesine olan katkısı yumuşak donatı oranı olarak belirlenmiş ve bu oran arttıkça yapı dayanımının, enerji tüketme kapasitesinin, kalıcı deformasyonlarının arttığı görülmüştür. Bu çalışma sonucunda önerilen histeretik model kullanılarak yumuşak donatının kolon davranışına olan katkısının Özden ve Ertaş (2010) tarafından elde edilen sonuçlarla benzer olduğu görülmüştür.

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde ilk olarak eksenel yük taşıyan kolonların yatay yük etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Daha sonra betonarme elemanların yapı malzemeleri olan beton ve çelik için önerilen malzeme modelleri incelenmiştir. Son olarakta, deprem gibi çevrimsel (tersinir ve tekrarlı) yüklere maruz kalan ve deprem nedeniyle oluşan hasarların büyük bölümünün görüldüğü moment aktarabilen kolon-kiriş birleşim bölgeleri hakkında inceleme yapılmıştır.

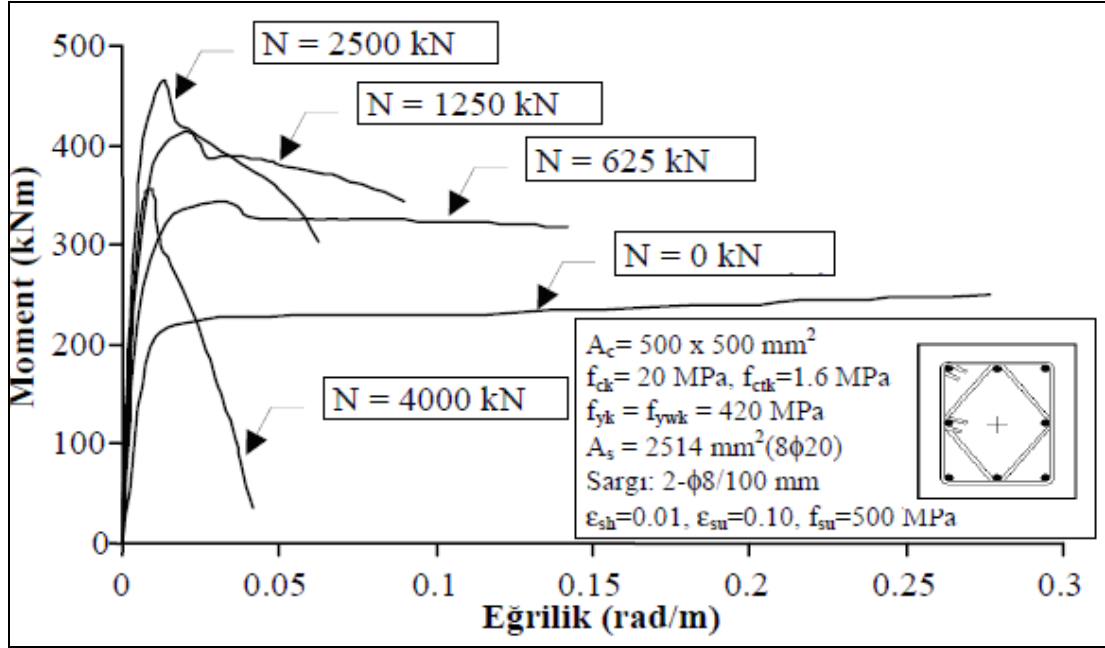
1.1. Kolonların Yatay Yük Etkisi Altında Davranışı

Yapı sistemini oluşturan düşey taşıyıcı elemanlar kolonlardır ve kolonların görevi katlara gelen yükleri taşıyıp bunları temele iletmektir. Kolonlar eksenel yük taşıyan yapı elemanları olmakla birlikte, deprem, rüzgar gibi yatay yükleri de karşılayan önemli yapı elemanlarıdır.

Eksenel yük elemanı olan kolonların, salt eksenel yük taşımasının, muhtemel imalat hatalarından kaynaklanan eksen eğrilikleri ve depremin yaratacağı eylemsizlik kuvvetlerinin moment oluşturması gibi nedenlerle olanaksız olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle yönetmeliklerde bir elemanın salt eksenel basınç taşıyormuş gibi tasarlanmasına ve hesabına izin verilmez. Ayrıca kolonun, sisteme monolitik (birdöküm) olarak bağlı bir parçası olduğu düşünüldüğünde eksenel basınca ek olarak eğilme momenti ve kesme kuvveti taşıdığı belirtilmiştir (Ersoy ve Özcebe, 2007).

Yapıya etki eden en önemli yatay yüklerden olan deprem kuvvetleri kolonlara etkidiğinde eksenel yük ve eğilmenin aynı anda etkidiği birleşik eğilme durumu ortaya çıkar. Birleşik eğilme altındaki kolon kesitinin dayanım, süneklik, rijitlik gibi özelliklerinin nasıl değiştiği moment-eğrilik ilişkisi ile belirlenir. Burada kesit sünekliği eleman sünekliğinin ve eleman sünekliği sistem sünekliğinin ön koşuludur. Buna göre depreme dayanıklı yapı tasarımında kesit sünekliğinin belirlenmesi

oldukça önemlidir (Canbay ve diğ., 2008). Betonarme kesit, kompozit malzeme olması sayesinde beton gibi gevrek davranabilirken, çelik gibi sünek de davranabilir. Bu davranışı etkileyen önemli faktörlerden biri de eksenel yük seviyesidir. Şekil 1.1’de kesit ve malzeme özellikleri verilen betonarme kolon kesitin, değişen eksenel yük değerlerine göre moment-eğrilik ilişkileri verilmiştir.



Şekil 1.1. Değişen eksenel yük değerleri için moment-eğrilik ilişkileri (Aydemir ve diğ., 2009)

Yüksek düzeyde eksenel yüke maruz kalan kesitin davranışı (Şekil 1.1’de $N=4000$ kN olduğunda) oldukça gevrek olurken, düşük düzeyde eksenel yük taşıyan kesitin davranışı (Şekil 1.1’de $N=0$ kN olduğunda) sünek olur. Süneklik, eleman kesitin taşıma kapasitesinde önemli bir kayıp olmadan deformasyon yapabilme özelliğidir ve kesitin süneklik düzeyi, süneklik (eğrilik) katsayısı ile tanımlanır. Süneklik katsayısı; kırılma anı veya dayanımın %15’ini kaybettiği andaki eğriliğin, çekme donatısının aktığı andaki eğriliğe oranıdır (Canbay ve diğ., 2008). Geçmiş yıllarda deprem davranışı açısından esnek yapıların rijit yapılardan daha uygun olduğu düşüncesi son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu değişmeye başlamıştır. Yüksek süneklikteki yapının deprem etkisi altında yaptığı büyük deformasyonlar taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında büyük hasarlara yol açmış, ayrıca yapıda oluşan ikinci mertbe momentleri nedeniyle kararlılık sorunları ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle bazı araştırmacılar yapının sünek olmasından daha çok katlar arası görelî yer değiştirme

değeri önemsenerek yapılan tasarımın etkili olacağı görüşünü benimsemişlerdir. Bu görüş de doğal olarak daha rijit bir yapı tasarımını ve dolayısıyla sünek tasarım sırasında ortaya çıkan imalat (fazla donatı ve karmaşık detaylandırma gibi) zorluklarının azalmasını beraberinde getirmiştir (Ersoy ve Tankut, 1997).

Süneklik dışında depremin yarattığı etkiyi karşılamayı sağlayan değerlerden biri de kesitin enerji tüketebilme kapasitesidir. Enerji tüketme kapasitesi moment-eğrilik ilişkisini gösteren eğrinin altında kalan alan ile ifade edilir ve süneklikle doğru orantılı şekilde değişir (Canbay ve diğ., 2008). Süneklik ve enerji tüketebilme kapasitesinin belirlendiği moment-eğrilik ilişkisini gösteren eğrinin doğru bir şekilde elde edilmesi kesit davranışını anlamada oldukça önemlidir. Bunun için birleşik eğilme altındaki kesiti oluşturan çelik ve betonun gerilme-birim deformasyon (σ - ε) eğrileri için uygun malzeme modelleri seçilmesi gerekir. Literatürde beton için önerilmiş birçok matematiksel model vardır. Bunlardan en çok kabul görmüş olan Hognestad, Kent-Park, Sheikh-Üzümeri ve geliştirilmiş Kent-Park modelleri, çelik için elasto-plastik ve öngermeli çelik modelleri bu çalışmada incelenmiştir.

Sonuç olarak aksenal basınç elemanı olan kolonların depreme dayanıklı tasarımı için moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesi ve bu ilişkinin doğru ifadesi için malzeme modellerinin en uygun şekilde seçilmesi oldukça önemlidir.

1.2. Malzeme Modelleri

Yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin ayrı ayrı davranışını bilmek, bu malzemelerden bir araya gelen kompozit malzemelerin ya da yapı elemanlarının davranışlarını kavramada etkili olur.

“Herhangi bir “mukavemet” probleminin çözümünde, gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilen “denge denklemleri” ile deformasyon cinsinden ifade edilen “uygunluk denklemleri” arasındaki ilişki, ancak kullanılan malzemenin gerilme-birim deformasyon (σ - ε) ilişkisinden yararlanılarak kurulur. Denge ve uygunluk denklemleri malzeme özelliklerinden bağımsız olduğundan, çözümdeki hata oranı büyük çapta varsayılan malzeme davranışının, yani σ - ε ilişkisinin doğruluğuna bağlıdır. Matematiksel çözümü kolaylaştırmak amacıyla deneyden elde edilen σ - ε eğrileri idealize edilip basitleştirilerek kullanılır. İdealize edilip basitleştirilen σ - ε eğrileri “matematiksel model” olarak adlandırılır (Ersoy ve Özcebe, 2007).”

Yapılan bu çalışmada literatürde geçen en temel matematiksel malzeme modellerinden bazıları bu bölümde tanıtılmıştır.

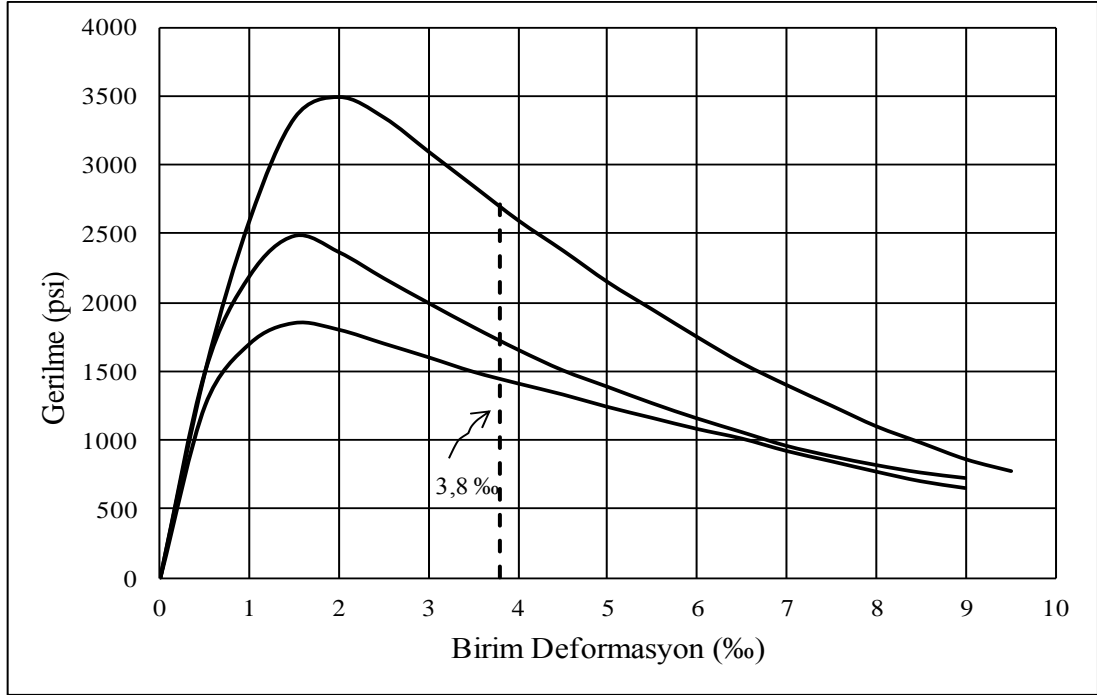
1.2.1. Beton modelleri

Beton; farklı malzemelerden oluşmuş, “homojen ve elastik” olmayan bir malzemedir. Her beton numunenin davranışı birbirinden farklı ve aynı zamanda kendine özgüdür. Bu nedenle betonun gerilme-birim deformasyon ilişkisini gösteren birçok değer elde edilmiştir ve bunlar genelleştirilerek tek bir σ - ϵ eğrisi şeklinde farklı kişiler tarafından farklı yaklaşımlarla modelleştirilmiştir. Beton modelleri sargılı ve sargısız beton modelleri olmak üzere iki gruba ayrılmıştır ve bu bölümde sargısız beton modellerinin başlıcalarından Hognestad modeli incelenmiştir. Daha sonra da sargılı beton modellerinden Kent-Park, Sheikh-Üzümeri, ve geliştirilmiş Kent-Park modelleri incelenmiştir.

1.2.1.1. Hognestad modeli

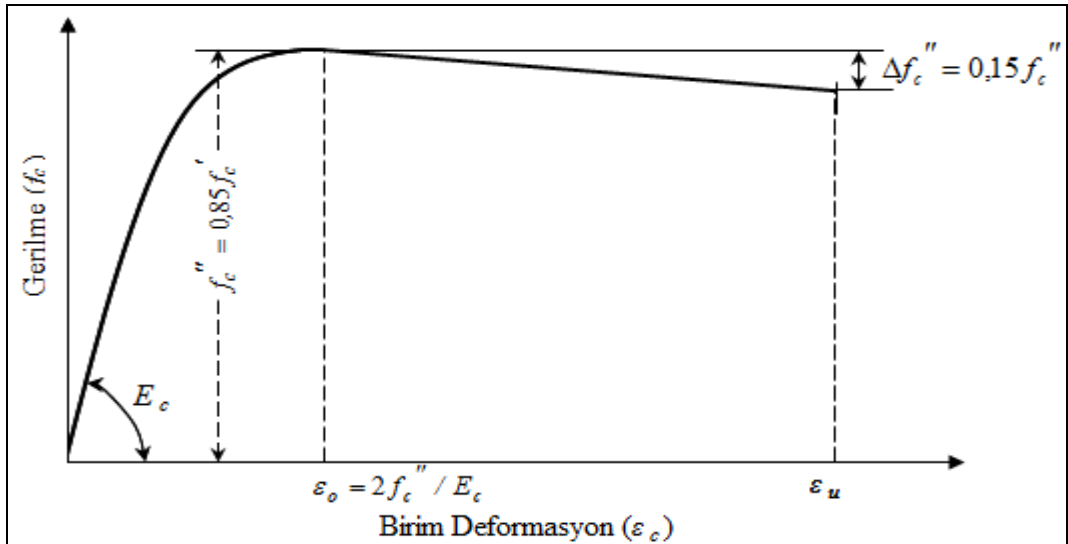
Sargısız beton modellerinin en önemlilerinden olan Hognestad modeli Eivind Hognestad tarafından yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Hognestad (1951) çalışmasında, öncüllerinin önerdiği beton modellerini tartışarak bu modellerin bazılarında yararlanmıştı. 1950’li yıllardan önce yapılan elastik olmayan eğilme davranışı hakkındaki çalışmalar, betonarme kesitin yalnızca basınç ve çekme altındaki değerlerini dikkate almış, çelikte meydana gelen pekleşmeyi pratik nedenlerle değersiz saymışlardır. Önerilen birçok matematiksel ifadede eş merkezli basınç altında, maksimum gerilme değerine ulaşan kesitin bu değerden hemen sonra göçtüğü düşünülmüştür. Eğilme etkisi altındaki kesitte ise en dış lifin maksimum gerilmeye ulaştığı ve oluşan birim deformasyonun eş merkezli basınç altındaki kesitte oluşan birim deformasyondan biraz daha fazla olduğu kabul edilmiştir (Hognestad, 1951).

Hognestad (1951), bu çalışmalardan farklı olarak sunduğu sargısız beton modelinde; eğilme etkisi altındaki kesitin yaptığı birim deformasyonun, eş merkezli basınç altında kesitte oluşan birim deformasyondan önemli ölçüde büyük olduğunu kabul etmiştir. Bu kabule göre; büyük birim deformasyon yapan en dış lif aktığında daha az birim deformasyon yapmış olan life gerilmeyi aktarır ve bu aktarım değişerek tarafsız eksene doğru ilerler. Şekil 1.2’de eğilme etkisi altındaki kesitin genel karakteristiğine uygun olan eğriler verilmiştir.



Şekil 1.2. Silindir testi sonuçları (Hognestad, 1951)

Şekil 1.2’de gösterilen gerilme-birim deformasyon eğrisinin, maksimum basınç gerilmesine ulaşana kadarki kısmı parabol ve ikinci kısmı doğrusal azalacak şekilde genelleştirilerek sargısız beton modeli elde edilmiştir. Buna göre elde edilen sargısız beton modeli Şekil 1.3’deki gibidir.



Şekil 1.3. Hognestad sargısız beton modeli (Hognestad, 1951)

Hognestad (1951), ikinci derecede bir parabol olan Ritter parabolünü başlangıç eğrisi olarak kabul etmiştir. Eğilme etkisi altında elde edilen başlangıç eğrisi, yalnızca

basınç etkisi altında elde edilen başlangıç gerilme-birim deformasyon eğrisiyle benzerdir. Kabul edilen parabolün ifadesi ve maksimum gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon sırasıyla;

$$f_c = f_c'' \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_0 = 2 \frac{f_c''}{E_c} \quad (1.2)$$

olarak verilmiştir (Hognestad, 1951). Burada f_c ve ε sırasıyla herhangi bir anda sargısız betonda oluşan gerilme ve birim deformasyon, f_c'' sargısız betonun ulaştığı maksimum gerilme, ε_0 maksimum gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon olarak tanımlanmıştır. Sargısız betonun başlangıç elastisite modülü E_c 'nin değeri silindir testlerinin sonuçlarına göre;

$$E_c = 1800000 + 460 f_c'' \quad (\text{psi}) \quad (1.3)$$

ampirik denklemi ile ifade edilmiştir (Hognestad, 1951).

Yapılan birçok çalışmada eş merkezli ve düşey yüklenmiş kolon numunelerden elde edilen ortalamalar sonucu, sargısız betonun maksimum basınç dayanımı (f_c''), beton silindir dayanımının (f_c') 0,85 katı olarak alınmıştır. Kolonun şekli, boyutları ve üretimden kaynaklanan farklılıklar da bu değerle genelleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda göçme birim deformasyonu kolon numunelerin eşmerkezli olmayan basınç yüklemelerinden elde edilmiş ve test sonuçlarının genelleştirilmesiyle 0,0038 olarak kabul edilmiştir. Böylece Hognestad (1951), gerilme-birim deformasyon eğrisinin 0,0038 değerinden sonraki bölümünü dikkate almamıştır ve kopma birim deformasyonuna karşılık gelen gerilme değerini de maksimum basınç gerilmesinin (f_c'') %85'i olarak tanımlamıştır.

Sargısız beton, kabuk beton olarak da adlandırılır ve betonarme bir kesitte etriye veya fret ile sargılanmış çekirdek betonun dışında kalan kısmı temsil eder. Sargısız betonun maksimum basınç dayanımı ve buna karşılık gelen birim kısalma değeri sargılı betona göre çok daha düşüktür. Sargı, aksenal basınca maruz kalan betona

yanal basınç uygulayarak beton dayanımının ve sünekliğinin artmasını sağlar (Ersoy ve Özcebe, 2007). Bu nedenle sargısız beton modellerinden sonra enine donatının beton davranışına olan etkisini belirlemek için sargılı beton modelleri geliştirilmiştir.

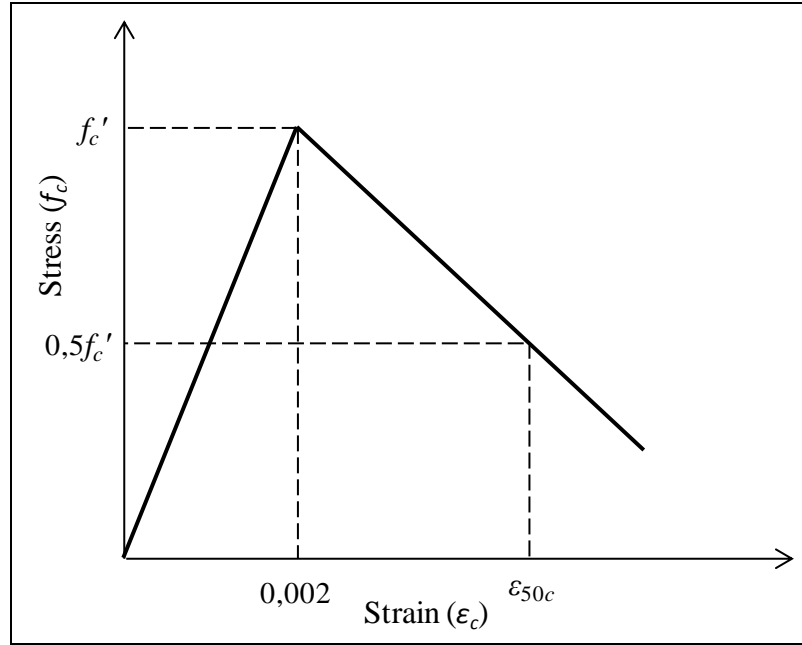
1.2.1.2. Kent ve Park modeli

Sargılı beton davranışını tanımlamak amacıyla Kent ve Park (1971) tarafından önerilen bu modeldeki yaklaşımlar, Hognestad modelindeki belirlemelerle benzerlik gösterse de sargılı ve sargısız beton davranışı birbirinden oldukça farklıdır.

Kent ve Park (1971)'in yaptığı çalışmada farklı tiplerde enine donatılarla sargılanmış betonun gerilme birim deformasyon eğrisiyle ilgili Roy ve Sözen (1964)'in yaptığı deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak, eğilme etkisi altında beton basınç bloğunun özellikleri belirlenmiştir. İlk olarak sargısız ve sargılı betonun anlatıldığı bu çalışmada, sargısız beton modeli için genel kabul görmüş Hognestad modeli incelenmiştir. Sargılı betonun tanımı yapılırken, aktif ve pasif sargı kavramlarından bahsedilmiştir. Aktif sargı; sargının bir dış kuvvet gibi dışarıdan etki etmesidir. Örneğin aksenal yüklenmiş bir silindirin hidrostatik su basıncına maruz kalması aktif sargı etkisi olarak tanımlanmıştır. Gerçekte betonun enine donatılarla sarılması pasif sargı olarak adlandırılmıştır. Bunun nedeniyse betonda çok düşük aksenal yüklemeler altında gerilmeler oluşurken, sargı donatısında gerilmelerin oluşma olasılığının oldukça düşük olmasıdır. Betonun sargılı olması onu saran enine donatının tek aksenal dayanımına ulaşmasıyla olur. Çekirdek betonun hacminin, iç çatlak oluşumu nedeniyle artışına enine donatılar karşı koyar. Bu durum enine donatılarda oluşan gerilmelerin artmasını, dolayısıyla sargılamanın oluşmasını sağlar (Kent ve Park, 1971). Sargılama Poisson etkisidir. Bir yönde basınca maruz kalan beton çekirdeği diğer yönde genişlemeye çalışır ve beton çekirdeğinin bu genişleme davranışına sargı donatıları karşı koyar. Ancak küçük kesite sahip olan sargı donatılarında bu karşı koymadan kaynaklanan gerilme yalnızca köşelerde olur ve donatıların her bölgesinde gerilme oluşmaması durumu pasif sargılama olarak adlandırılır.

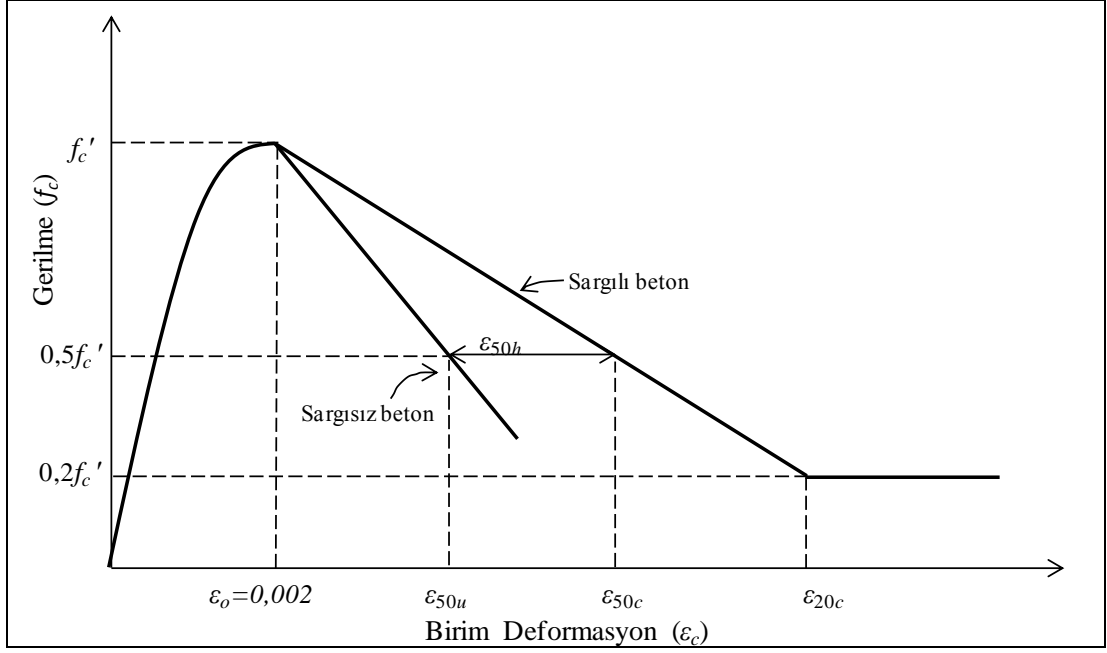
Kent ve Park modeli Roy ve Sözen (1964)'in yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu geliştirilen sargılı beton modeli temel alınarak oluşturulmuştur. Roy ve Sözen (1964)'in yaptığı deneysel çalışmada, betonun yük-deformasyon karakteristiğine

dikdörtgen sargıların etkisi tartışılmıştır. Sargı etkisini görebilmek için enine donatılar arasındaki mesafe değiştirilerek hazırlanmış prizmatik numuneler test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda; kare veya dikdörtgen sargı donatısının aksel yüklemeye altında çekirdek betona yalnızca köşelerinden etki edebildiği, betonun basınç dayanımını arttırmadığı ve eğilme etkisi altında yeterli olmadığı görülmüştür. Buna karşın sargı donatılarının numunenin sünekliğini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Önerilen model çift doğrusallıklı bir model olup betonun ulaştığı maksimum dayanıma karşılık gelen birim kısalma 0,002 olarak kabul edilmiştir (Roy ve Sözen, 1964). Önerilen model Şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.4. Roy ve Sözen’in Eğrisi (Kent ve Park, 1971)

Kent ve Park (1971) yaptıkları çalışmada, Roy ve Sözen’in önerdikleri modeli ve enine donatıların beton dayanımını arttırmadığı görüşlerini de destekleyerek yeni bir model sunmuşlardır. Bu modeldeki değerler yine Kent ve Park tarafından önerilen sargısız beton modeliyle birlikte verilmiştir ancak bu bölümde yalnızca sargılı beton modeli incelenmiştir.



Şekil 1.5. Kent ve Park'ın sargısız ve sargılı beton modeli (Kent ve Park, 1971)

Şekil 1.5'de verilen modelin çıkış eğrisi, Hognestad sargısız beton modelindeki gibi ikinci dereceden bir parabol olarak kabul edilmiştir ve parabolün ifadesi;

$$f_c = f_c' \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

Hognestad sargısız beton modelindeki ifadeye benzer olarak verilmiştir. Ancak, Hognestad'ın önerdiği modelde maksimum basınç dayanımı (f_c''), $0,85f_c'$ olarak kabul edilirken Kent ve Park'ın modelinde 0,85 değeri 1 olarak alınmıştır. Dolayısıyla Denklem (1.1)'de geçen maksimum basınç dayanımı ifadesi f_c'' , Denklem (1.4)'de f_c' ve ε ifadesi de sargılı betondaki birim deformasyonu belirtmek amacıyla ε_c olarak değiştirilmiştir. Maksimum dayanıma ulaştıktan sonraki ikinci bölüm doğrusal azalır. Bu doğrusal kısmın sırasıyla gerilme ve gerilmedeki azalmayı gösteren Z değeri;

$$f_c = f_c' [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \quad (1.5)$$

$$Z = \frac{0,5}{\varepsilon_{50h} + \varepsilon_{50u} - \varepsilon_0} \quad (1.6)$$

şeklinde verilmiştir. Burada sargılı ve sargısız betonun $0,5f_c'$ değerine karşılık gelen birim kısalma değerleri, ε_{50c} ve ε_{50u} arasındaki fark;

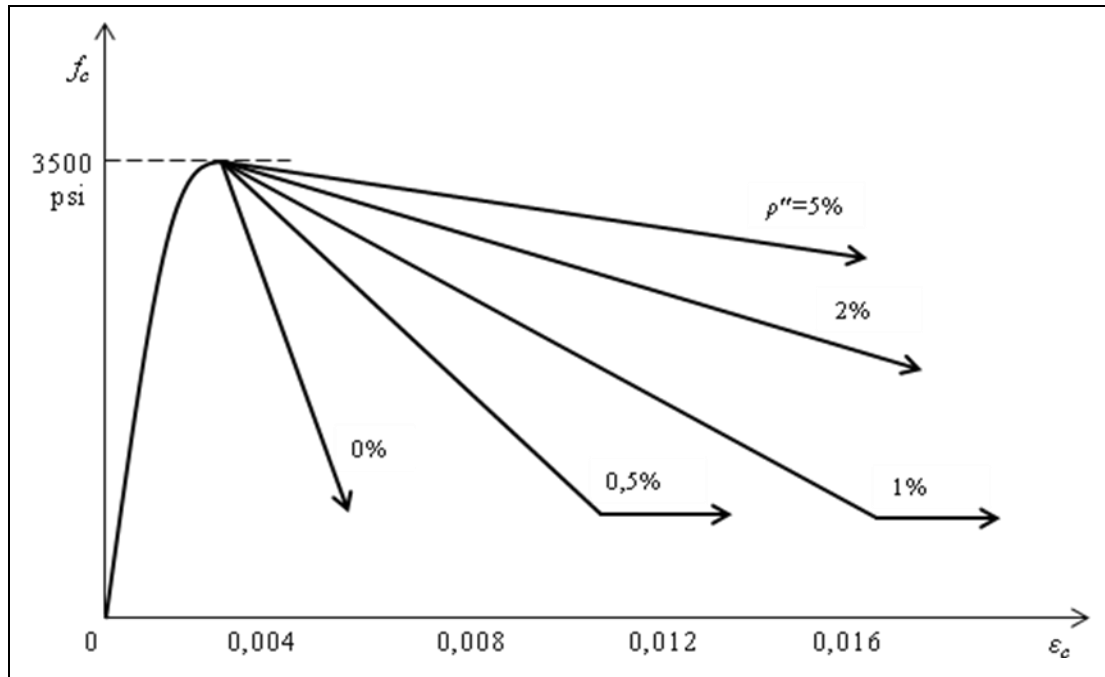
$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho'' \sqrt{\frac{b''}{s}} \quad (1.7)$$

olarak verilmiştir ve ρ'' ifadesi enine donatı hacminin çekirdek betonun hacmine oranı olarak tanımlanmıştır. Buna göre donatı hacimsel oranı;

$$\rho'' = \frac{2(b'' + d'')A_s''}{b''d''s} \quad (1.8)$$

olarak verilmiştir. Modelde sargılanmış çekirdek alanı enine donatının dışından dışına alınarak hesaplanır. Buna göre b'' ve d'' sırasıyla kısa ve uzun kenarının uzunluğudur. A_s'' sargı donatısının kesit alanı ve s iki sargı donatısı arasındaki merkezden merkeze alınan (boyuna) mesafedir (Kent ve Park, 1971).

Sargı donatısının hacimsel oranı arttıkça önerilen $\sigma-\varepsilon$ eğrisinde doğrusal azalan kısmın eğiminin giderek azaldığı ve sargı donatısının hacimsel oranı değişmediği durumlarda bile s/b'' oranı değişerek daha etkili sargılama yapılabileceği gözlenmiştir (Kent ve Park, 1971).



Şekil 1.6. Sargı donatısının hacimsel oranının $\sigma-\varepsilon$ eğrisine etkisi (Kent ve Park, 1971)

Şekil 1.6'da verilen beton modelinin üçüncü kısmı sabit bir doğrudan oluşmaktadır. Maksimum basınç dayanımının %20'si olan gerilme değerinde sabit olarak sonsuza

giden bir doğru varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım daha önceleri yapılan çalışmalar sonucunda, birim kısalma değerinin gerçekçi olmayan kısma girmeden önce beton göçmesinin gerçekleşeceği düşüncesine dayandırılarak geliştirilmiştir. Ayrıca birim kısalma değeri 0,004 değerinden büyük olduğunda kabuk betonun tamamen çatladığı ve dayanımının sıfıra düştüğü kabul edilmiştir (Kent ve Park, 1971).

Kent ve Park (1971) yaptıkları bu çalışmada sargı donatısının beton basınç dayanımını arttırmadığı, yalnızca kesitin sünekliğini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca sargılı beton davranışını, enine donatılar arasındaki mesafe ve sargı donatısı hacimsel oranı gibi değişkenlerin etkilediğini vurgulamışlardır.

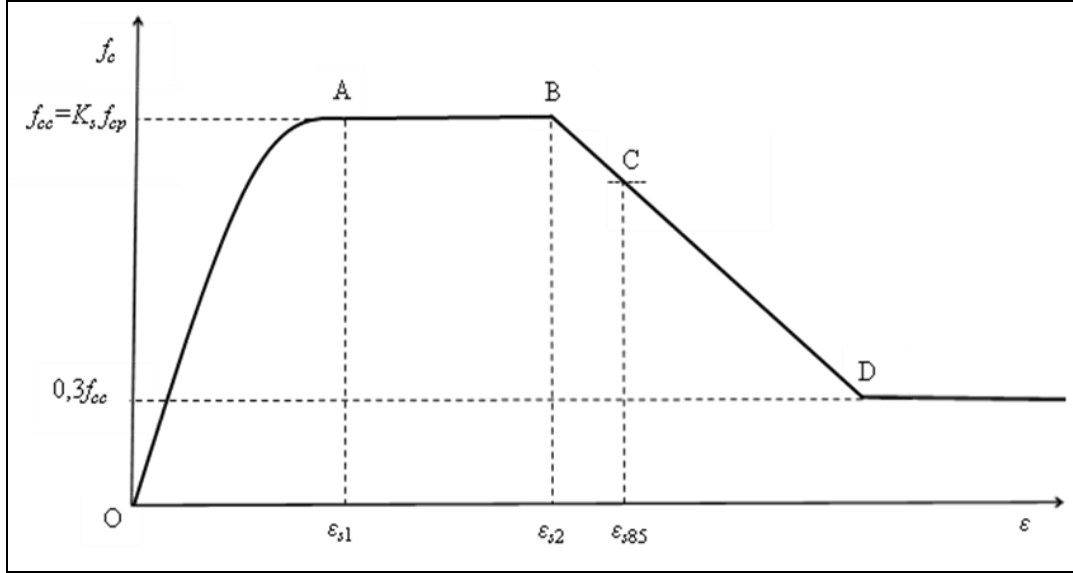
1.2.1.3. Sheikh ve Üzümeri modeli

Sargılı beton modellerinden biri olan Sheikh ve Üzümeri modeli, deneysel ve analitik çalışmaların sonucu olarak bir gerilme-birim deformasyon eğrisi geliştirilmesi ihtiyacıyla ortaya çıkmıştır.

Çeşitli araştırmacılar tarafından kare veya dikdörtgen biçiminde enine donatılarla sargılanmış betonun davranışı hakkında analitik modeller önerilmiş ve bu modellerle ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Önerilen bu modellerde sargı donatısının beton davranışına olan etkileri, boyuna donatı oranı veya donatı kalitesi gibi değişkenlere bağlanmıştır. Sheikh ve Üzümeri (1982) yaptıkları çalışmada bu değişkenler kadar önemli bazı değişkenleri daha dikkate alınmışlardır. Bunlar; çekirdek çevresindeki boyuna donatının dağılımı, buna karşı gelen sargı donatısının konfigürasyonu ve sargı donatıları arasındaki mesafedir.

Daha önce yapılmış birçok deneysel çalışmada küçük kesit alanına sahip numuneler ve boyuna donatı sayısının 4 adet olmasından kaynaklanan basit sargı donatısı konfigürasyonları kullanılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde enine donatının merkezinden geçen doğruyla sınırlanmış çekirdek alanının, toplam kesit alanına oranının çok küçük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, sargılı betondaki dayanım artışına rağmen, kabuk beton tamamen çatladıktan sonra kesit kapasitesi sargısız kısmın kapasitesini aşamamıştır. Bu durum sargı donatısının dayanıma olan katkısı hakkında araştırmacılar arasındaki fikir ayrılığının olası nedeni olarak görülmüştür (Sheikh ve Üzümeri, 1982).

Sheikh ve Üzümeri (1982), sargılanmış beton davranışı hakkındaki tartışmalara açıklık getirmek amacıyla önerdikleri çekirdek betonun davranışını Şekil 1.7'deki gibi ifade etmişlerdir.



Şekil 1.7. Sheikh ve Üzümeri'nin önerdiği gerilme-birim deformasyon eğrisi (Sheikh ve Üzümeri, 1982)

Önerilen model üç bölümden oluşmuştur. İlk bölüm OA , ikinci dereceden bir parabolüdür ve f_{cc} ile ε_{s1} değerlerinin kesiştiği A noktasına kadar devam etmiştir. Burada f_{cc} sargılanmış betonun basınç dayanımı, ε_{s1} maksimum basınç dayanımına karşılık gelen minimum birim kısalma, f_{cp} donatısız betonun basınç dayanımı ve K_s kuşatma katsayısı olup, sargılı beton dayanımının, donatısız beton dayanımına oranı olarak tanımlanmıştır. İkinci bölüm maksimum basınç dayanımına karşılık gelen maksimum birim kısalma (ε_{s2}) değerinin okunduğu B noktasına kadar düz bir doğruyla geçilmiştir. BC bölümüyse gerilmenin, maksimum basınç gerilmesinin %85'ine düştüğü andaki birim kısalma değeri ε_{s85} 'e kadar doğrusal azalarak devam etmiştir. C noktasından sonraki bölüm, aynı eğimle maksimum basınç gerilmesinin 0,3 katına düştüğü D noktasına kadar devam etmiştir ve bu noktadan sonraki kısım beton davranışını gösteren yatay bir çizgi olarak varsayılmıştır. Ancak C noktasından sonraki bölümle ilgili mevcut deneysel veri olmadığından bu bölümün geçerliliği doğrulanamamıştır (Sheikh ve Üzümeri, 1982).

Sheikh ve Üzümeri (1982)'nin vurguladığı önemli kavramlardan biri de etkili sargılanmış çekirdek alanı (A_{ec}) kavramıdır. Bu kavram boyuna donatı dağılımı, sargı

donatısının seçimi ve enine donatılar arasındaki mesafe gibi değişkenlere bağlıdır. Dikdörtgen sargı donatısının oluşturduğu sargılama gerilmesi, çekirdeğin çevresi boyunca düzgün dağılmaz. Köşelere yakın bölgelerde sargılama gerilmeleri fazlayken orta bölgelerde daha azdır. Bu durum çekirdek alanından daha küçük olan, etkili sargılanmış çekirdek alanının oluşmasına neden olmuştur. Etkili sargılanmış çekirdek alanı;

$$A_{ec} = \lambda(b - 2y_m)(h - 2y_m) \quad (1.9)$$

olarak tanımlanmıştır. Enine donatının merkezinden geçirilen çizgiyle sınırlanmış çekirdeğin boyutları b ve h olmak üzere, alanı $A_{co}=bh$ dir. Denklem (1.9)'da yer alan λ katsayısı etkili sargılanmış beton alanının çekirdek alanına oranı olup,

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n c_i^2}{\alpha A_{co}} \quad (1.10)$$

olarak tanımlanmıştır (Sheikh ve Üzümeri, 1980). Denklem (1.10)'daki terimler sırasıyla, c_i boyuna donatılar arasındaki mesafe, n çekirdek betonda donatı yerleşimi sonucu sargılanamamış kısımların sayısı, α sabit bir katsayı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca Denklem (1.9)'daki y_m değeri, elemana boyuna donatılar doğrultusunda baktığımızda enine donatılar doğrultusunda olan y ekseninin, sargılanamayan alanı ifade eden eğrinin tepe noktasından geçen doğruyu kestiği yerdir. Maksimum y değeri;

$$y_m = 0,25s \tan \theta \quad (1.11)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada, s sargı donatıları arasındaki mesafe ve θ ise boyuna donatılar doğrultusunda sargılanamayan alanı ifade eden eğriye çizilen teğet açısıdır. Önerilen sargılı beton modelinde kuşatma katsayısı olarak ifade edilen K_s değeri kare kesitli numuneler için,

$$K_s = 1 + \frac{b^2}{140 P_{occ}} \left[\left(1 - \frac{nc^2}{5,5b^2} \right) \left(1 - \frac{0,5s}{b} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f'_s} \quad (1.12)$$

olarak verilmiştir. İfadede yer alan P_{occ} değeri; çekirdek betonun sargı etkisi olmadığı durumdaki yük taşıma kapasitesidir ve birimi kN'dur. Ayrıca ρ_s değeri de toplam enine donatı hacminin çekirdek hacmine oranı, f_s' enine donatıdaki gerilme olarak verilmiştir (Sheikh ve Üzümeri, 1980).

Şekil 1.7'de verilen sargılı beton modelinde maksimum gerilmeye karşılık gelen minimum birim kısalma değeri, Kent ve Park modelindeki 0,002 değerinden farklı olarak, Soliman ve Yu tarafından önerilen eşitlik geliştirilerek,

$$\varepsilon_{s1} = 80 K_s f_c' \times 10^{-6} \quad (1.13)$$

şeklinde verilmiştir (Sheikh ve Üzümeri, 1982). Eşitlikteki f_c' değeri betonun silindir dayanımıdır ve birimi MPa olarak alınmıştır. Kare ve dikdörtgen sargı donatısının beton sünekliğine olan etkisini ifade eden maksimum birim kısalma değerinin yer aldığı eşitlik, Sargın ve Vallenias'ın önerdiği eşitlikle benzer olarak,

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{00}} = 1 + \frac{248}{c} \left(1 - 5 \left(\frac{s}{b} \right)^2 \right) \frac{\rho_s f_s'}{\sqrt{f_c'}} \quad (1.14)$$

şeklinde verilmiştir. Eşitlikteki ε_{00} değeri donatısız betonun maksimum basınç gerilmesine karşılık gelen birim kısalmasıdır. Maksimum gerilmeye ulaştıktan sonra gerilmedeki azalmayı ifade eden Z değeri Kent ve Park'ın önerdiği eşitlik geliştirilerek,

$$Z = \frac{0,5}{\frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b}{s}}} \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilmiştir. $0,85f_{cc}$ değerine karşılık gelen birim kısalma değeriye,

$$\varepsilon_{s85} = 0,225 \rho_s \sqrt{\frac{b}{s}} + \varepsilon_{s2} \quad (1.16)$$

olarak verilmiştir (Sheikh ve Üzümeri, 1982). Yapılan birçok deneyde elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrisinin C noktasından sonraki değerlere ulaşamadığından ε_{s85} değerinin hesaplanarak bulunması gerekir.

Önerilen modele göre yalnızca dört köşesinde boyuna donatı bulunan kolonun, kabuk beton parçalandıktan sonra yük taşıma kapasitesini koruması pratikte olanaksız kabul edilmiştir. Bu nedenle bu tür kolonların tasarımına izin veren yönetmeliklerin güvenilir olmadığı vurgulanmıştır. Yönetmeliklerin farklı tipte sargılanmış kesitler arasında ayırım yapmaması ve enine donatılar arasındaki mesafe kavramını tam olarak tanımlamaması Sheikh ve Üzümeri (1982) tarafından eleştirilmiştir.

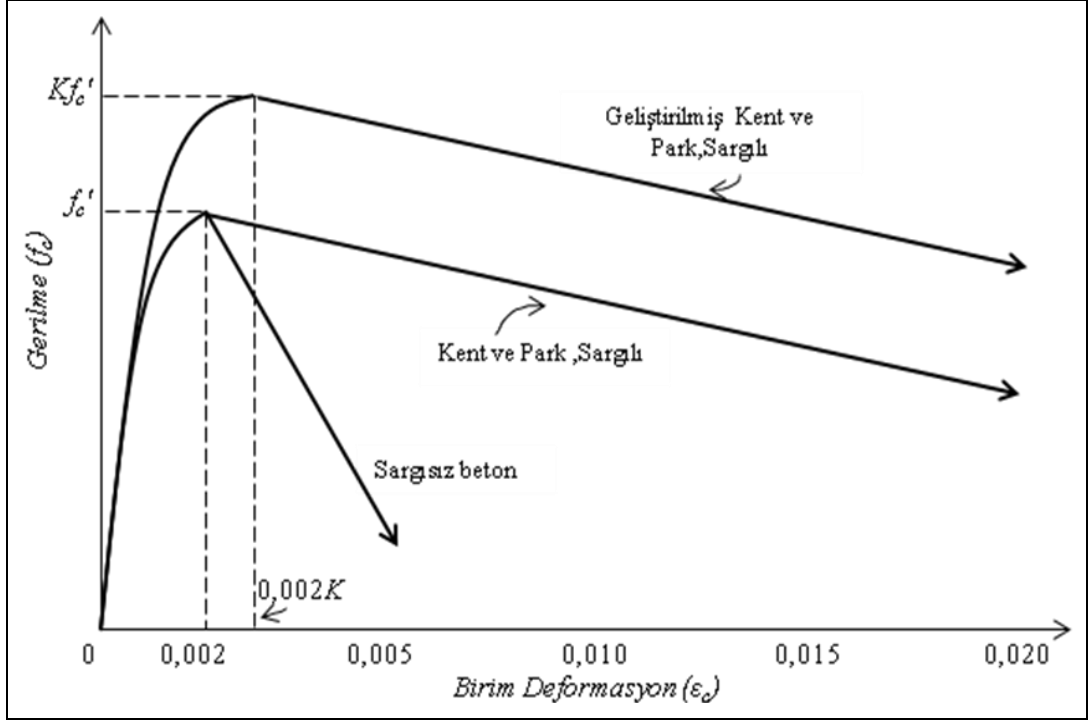
Sonuç olarak Sheikh ve Üzümeri (1982) diğer araştırmacılardan farklı olarak belirledikleri; etkili sargılanmış beton alanı, enine donatı çeşitliliği ve enine donatı etrafındaki boyuna donatı dağılımı gibi değişkenlerin, beton dayanımını ve sünekliğini arttırdığını ortaya çıkarmışlardır.

1.2.1.4. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli

Roy ve Sözen (1964)'in yaptığı deneysel çalışmaların sonucunu temel alarak Kent ve Park (1971) tarafından önerilen sargılı beton modeli, gerçek boyuta yakın numunelerle yapılan deney sonuçları kullanılarak geliştirilmiştir (Mander ve diğ., 1988). Geliştirilen bu modele göre, daha önce önerilen modelden farklı olarak sargı donatısının betonun maksimum basınç dayanımını ve buna karşılık gelen birim kısalma değerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Kent ve Park tarafından önerilen modelde sargısız ve sargılı betonun maksimum basınç gerilmelerinin aynı olduğu varsayımı yalnızca sargısı az olan elemanlar için düşük hata oranıyla kabul edilebilirken, iyi sargılanmış elemanlarda hata oranının yüksek olması modelin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (Ersoy ve Özcebe 1998).

Geliştirilmiş Kent ve Park modelinin çıkış eğrisi ikinci dereceden bir parabolüdür ve parabolün tepe noktası maksimum basınç gerilmesini ifade eder. Maksimum basınç gerilmesine ulaşıldıktan sonraki kısım doğrusal olarak azalır ve azalan kısmın eğimi Kent ve Park sargılı beton modelinin eğimiyle aynıdır (Scott, 1980).



Şekil 1.8. Geliştirilmiş Kent ve Park modeli (Scott, 1980)

Şekil 1.8’de görüldüğü gibi Kent ve Park, Geliştirilmiş Kent ve Park modellerinin her ikisinin de başlangıç elastisite modülleri aynıdır. Kent ve Park modeli için önerilen denklemler Geliştirilmiş Kent ve Park modeli içinde geçerlidir. Geliştirilmiş Kent ve Park modelinde farklı olarak, maksimum basınç gerilmesi ve buna karşılık gelen birim kısalma değerlerinin K katsayısıyla çarpılmış halleri denklemlerde yer alır. Buna göre K katsayısı;

$$K = 1 + \frac{\rho^n f_{yh}}{f'_c} \quad (1.17)$$

olarak verilmiştir (Scott, 1980). Burada f_{yh} sargı donatısının akma dayanımıdır. Şekil 1.8’de verilen başlangıç eğrisi olan parabolün ifadesi;

$$f_c = Kf'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{0,002 K} + \left(\frac{\varepsilon_c}{0,002 K} \right)^2 \right] \quad (1.18)$$

olacak şekilde değiştirilmiştir. Maksimum gerilmeye ulaşıktan sonraki doğrusal azalan kısmın ifadesiyse;

$$f_c = Kf'_c [1 - Z_m (\varepsilon_c - 0,002 K)] \quad (1.19)$$

olarak verilmiştir, ancak bu ifade gerilme değeri $0,2K f_c'$ değerinden küçük olduğunda geçerli değildir. Burada Z_m sargılı betonda oluşan gerilmenin en büyük değerine ulaştıktan sonraki azalışını gösterir ve ifadesi;

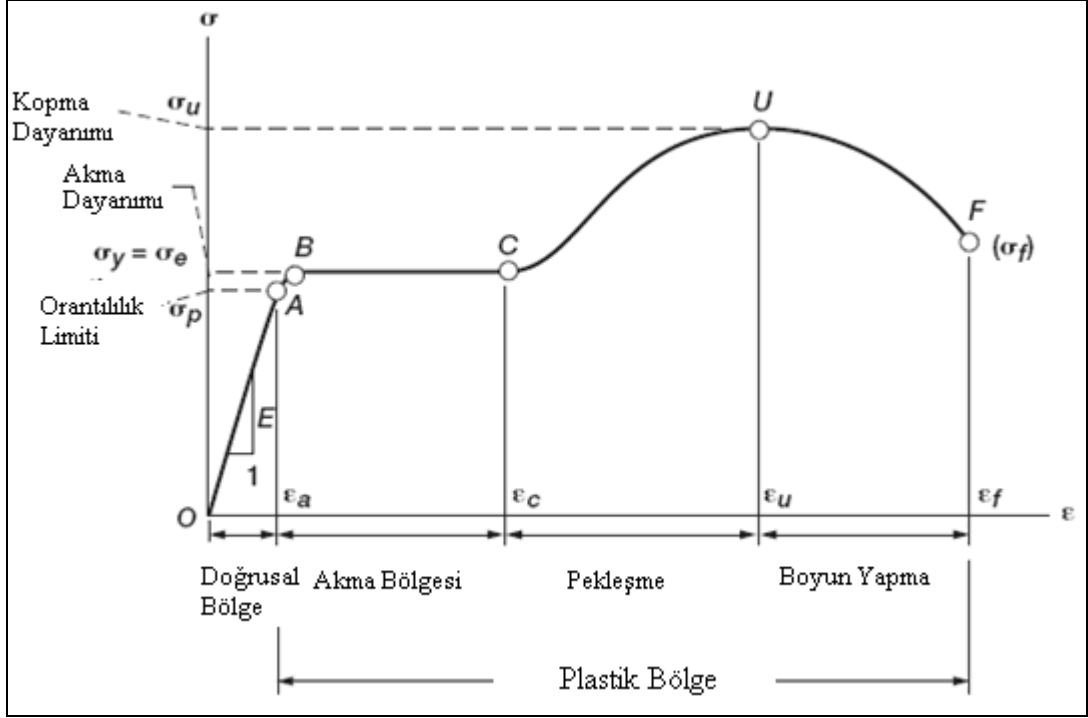
$$Z_m = \frac{0,5}{\frac{3 + 0,29f_c'}{145f_c' - 1000} + \frac{3}{4}\rho''\sqrt{\frac{b''}{s}} - 0,002K} \quad (1.20)$$

olarak verilmiştir. Burada f_c' değerinin birimi MPa alınmıştır. Denklemlerde yer alan ρ'' , b'' ve s ifadeleri Kent ve Park (1971) modelinde tanımlanan ifadelerle aynıdır (Scott, 1980).

Geliştirilmiş Kent ve Park (1982) modelinde daha önce önerilen modelden farklı olarak sargı donatısının beton basınç dayanımını ve buna karşılık gelen birim kısalma değerini arttırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca sargı etkisinin beton sünekliğini arttırdığı sonucu desteklenmiştir.

1.2.2. Çelik Modelleri

Çelik betondan farklı olarak basınç ve çekme altında benzer davranış gösteren bir malzemedir. Betonun çekme dayanımının düşük olduğu bölgede oluşan gerilmeyi karşılamak üzere betonarme kesitte çelik çubuklar kullanılır (Ersoy ve Özcebe, 2007). Çeliğin mekanik davranışının belirlenmesi için uygulanan en yaygın yöntem çekme deneyidir. Tipik bir yapı çeliğine uygulanan çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrisi Şekil 1.9'daki gibidir.



Şekil 1.9. Çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisi (Patnaik ve Hopkins, 2004)

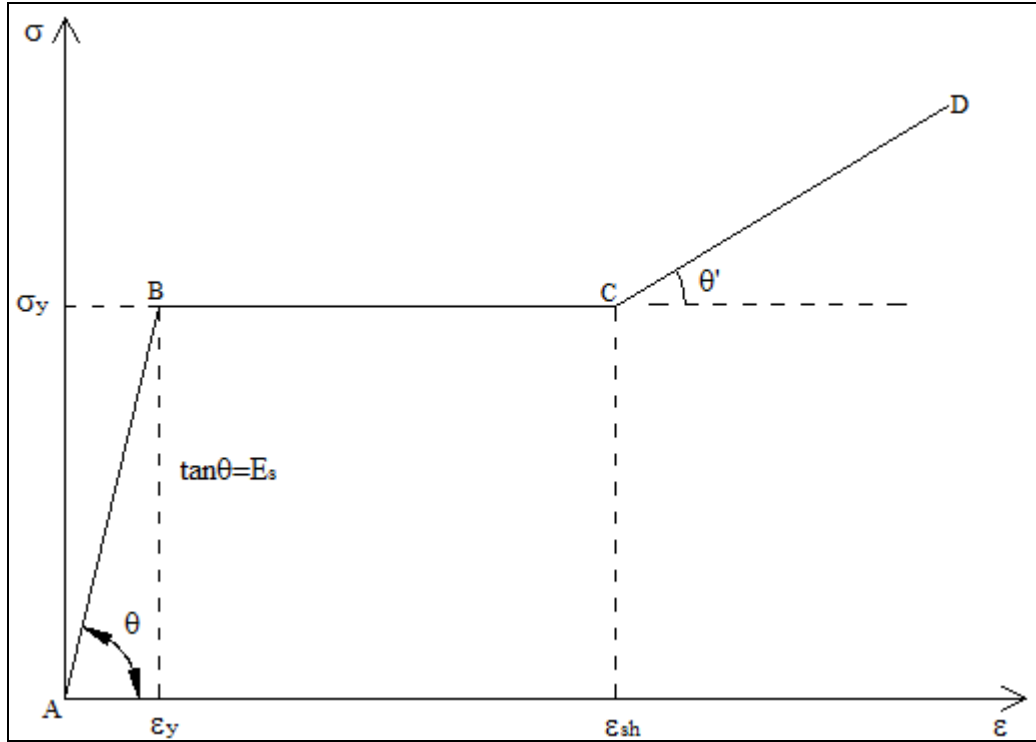
Eksenel çekme etkisi altındaki çeliğin düşük eksenel yükler etkisindeki birim deformasyonu elastiktir. Yük kalktığında kalıcı deformasyon olmaksızın malzeme başlangıçtaki durumuna döner. Şekildeki eğrinin başlangıç kısmı doğrusal elastiktir ve burada gerileme-şekil değiştirme oranı elastisite modülünü verir. Doğrusal elastik davranış orantılılık sınırına (σ_p) ulaşıncaya kadar devam eder. Bu sınırı aştıktan sonra Hooke kanunu geçerli olmaz ve doğrusal olmayan elastik davranış görülür. Gerilmeler elastik sınırı (σ_e) aştığında plastik şekil değiştirmeler oluşur ve bu bölgede boşaltma ve yeniden yükleme eğrisi başlangıçtaki doğruya paralel bir doğrudur. Ancak elastik sınır deneylerle belirlenebilse de pratik olmadığından plastik bölgenin başlangıcı olarak akma dayanımı (σ_y) alınır (Onaran, 2006). Donatının akma noktasındaki gerilmesi, akma dayanımına eşittir. Bu çelik için önemli bir malzeme özelliğidir (Park ve Paulay, 1975). Akma dayanımına karşılık gelen birim deformasyon değeri 0,002 olarak alınır. Akma dayanımından sonra artan yükleme ile çelik taşıyabileceği maksimum gerilmeye (çekme gerilmesi) ulaşır. Çekme gerilmesine (σ_u) ulaşıldıktan sonra kesit daralır gerilmeye düşüş başlar. Yükleme çelik kopana kadar devam eder (Onaran, 2006).

Tipik bir yapı çeliğinin mekanik özellikleri çekme deneyi gibi deneylerle elde edilir. Ancak deneyle elde edilen σ - ϵ eğrisinin basitleştirilip idealize edilerek matematiksel

çözümü kolaylaştıracak σ - ϵ modellerine dönüştürülmesi gerekir. Literatürde çelik için kullanılan doğrusal elastik, elasto-plastik ve elasto-plastik pekleşmeli çelik modelleri en temel modellerdir. Bu bölümde tipik bir betonarme çeliği için elasto-plastik pekleşmeli çelik modeli ve öngermeli betonlarda, prefabrik yapılarda, çeşitli birleşim bölgelerinde kullanılan öngermeli çelik modeli incelenmiştir.

1.2.2.1. Üç doğrusallıklı çelik modeli

Aynı yönde sürekli uygulanan aksenal basınç veya aksenal çekme altında önerilen çelik modellerinden üç doğrusallıklı model, özellikle depreme dayanıklı yapı tasarımında yaygın olarak seçilen bir modeldir ve gerilme-birim deformasyon eğrisi Şekil 1.10'da verilmiştir (Park ve Paulay, 1975).



Şekil 1.10. Üç doğrusallıklı çeliğin σ - ϵ eğrisi (Park ve Paulay1975)

Eğrinin ilk bölümü elastik ve doğrusaldır. Bu bölümde yük kaldırıldığında kalıcı deformasyon olmaksızın çelik yüklemeye önceki durumuna döner. Bu bölümün eğimi olarak tanımlanan elastisite modülü 200GPa'dır. İkinci bölüm akma platosudur. Bu bölümde, çelik akma dayanımına ulaşır ve gerilme sabit kalırken birim uzama sürekli artar. Akma platosunun uzunluğu çelik dayanımının bir fonksiyonudur. Yüksek dayanımlı, yüksek karbon içeriğine sahip çelikler genellikle

kısa akma platosuna sahipken, daha düşük dayanımlı ve düşük karbonlu çelikler uzun akma platosuna sahiptir. Dolayısıyla yüksek dayanımlı çelik kopmadan önce daha az uzama gösterir. Bu durum soğukta işlenmiş çelikler için de benzerdir, soğukta işlenmiş çelikler kısa akma platosu ve platodan hemen sonra ani bir çıkışla üçüncü bölüm olan pekleşme bölgesine geçer. Bu bölümde gerilme akma dayanımından sonra tekrar artmaya başlar (Park ve Paulay, 1975). Pekleşme bölgesi denilen bu bölgede gerilme belirli bir değere ulaştıktan sonra donatı kesit alanı birim uzamanın artması nedeniyle bir noktada küçülür ve donatı kopar (Ersoy ve Özcebe, 2007).

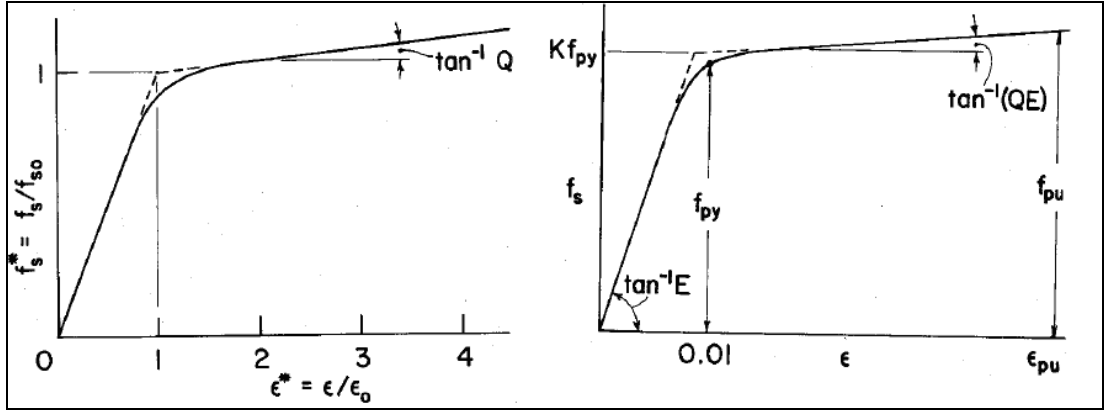
1.2.2.2. Öngermeli çelik modeli

Son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılan öngermeli çeliğin ortaya ilk çıkışı oldukça eskiye dayanır. Öngerme tekniğini ilk olarak 1851 yılında Cyrsital Palace'ın yapımında Paxton kullanmıştır. Koenen ise 1907 yılında öngermeli çelik çubukları önermiştir. Ancak öngermenin tarihinde başlangıç sayılacak en önemli kişi Eugène Freyssinet olmuştur. Eugène Freyssinet (1879-1962), daha önce yapılan uygulamalardan farklı olarak yüksek mukavemetli ve yüksek uzama kabiliyeti olan çeliğin kullanılması gerektiğini öne sürmüştür. 1928 yılında betonarme kesitte oluşan çekme gerilmelerini azaltmak için öngerilmiş kabloları kullanarak öngerme tekniğini geliştirmiştir (Masulla ve Nunziata, 2003).

Aderanslı öngermeli çeliğin eğilmedeki kopma dayanımı için ACI'da tanımlanan denklemler yaklaşık sonuçlar veren geleneksel çözümler olarak bilgisayarla hesap yöntemlerinin gelişimine kadar kullanılmıştır. Naaman'ın yaptığı çalışmada yeni bir yaklaşım tartışmıştır. Naaman yaptığı bu çalışmada, öngermeli çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisi cebirsel olarak ifade edilirse, bilgisayar kullanılarak çözülen denge ve uygunluk denklemlerinden daha doğru eğilme dayanımı değerlerinin elde edileceğini göstermiştir (Mattock, 1979). Öngermeli çelik için Naaman'ın sunduğu gerilme-birim deformasyon eğrisi üç bölümden oluşmaktadır. Buna göre birinci ve üçüncü bölümü doğrusal, birim deformasyon değerlerinin 0,006-0,014 olduğu aralığı ifade eden ikinci bölümü dördüncü dereceden bir parabol olarak ifade edilmiştir. Naaman öngermeli çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisinin elde edildiği denklemi;

$$f_s^* = (1-Q) \frac{\varepsilon^*}{(1+(\varepsilon^*)^R)^{1/R}} + Q\varepsilon^*, \quad f_s^* = f_s / f_{so} \text{ ve } \varepsilon_s^* = \varepsilon / \varepsilon_o \text{ iken} \quad (1.21)$$

olarak önermiştir. Burada f_s herhangi bir andaki ε değerine karşılık gelen gerilme değeri, f_{so} ve ε_o referans gerilme ve birim deformasyon değerleridir. R ve Q ise bilgisayar hesaplamaları sonucu elde edilen katsayılardır (Mattock, 1979). Naaman'ın önerdiği öngermeli çelik modeli Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11. Naaman ve Mattock'un öngermeli çelik modelleri (Mattock, 1979)

Naaman'ın önerdiği modelde ilk ve üçüncü bölüm doğrusaldır. Pekleşmenin olduğu üçüncü bölümün eğimi Q katsayısına eşittir. İkinci bölümü oluşturan eğrinin eğrilik yarıçapı R katsayısı azaldıkça artar. Naaman'ın önerdiği öngermeli çelik modeli Mattock tarafından değiştirilerek Şekil 1.11(b)'deki model elde edilmiştir. Şekil 1.11(b)'de görülen K katsayı, E elastisite modülü, f_{py} öngermeli çeliğin belirlenmiş akma dayanımı, f_{pu} ve ε_{pu} sırasıyla öngermeli çeliğin çekme dayanımı ve buna karşılık gelen birim deformasyonudur. Mattock $f_{so} = Kf_{py}$ ve $\varepsilon_o = Kf_{py} / E$ olmak üzere Denklem (1.21)'i;

$$f_s = \varepsilon E \left[Q + \frac{1-Q}{\left\{ 1 + \left(\frac{\varepsilon E}{Kf_{py}} \right)^R \right\}^{1/R}} \right] \quad (1.22)$$

şeklinde yeniden ifade etmiştir. Mattock yaptığı bu çalışmada önerdiği Denklem (1.22)'de K, Q ve R katsayılarına uygun değerler vererek deneysel sonuçlardan elde

edilen gerilme-birim deformasyon eğrilerine oldukça yakın gerilme-birim deformasyon eğrileri elde etmiştir (Mattock, 1979). Bu çalışmada sunulan öngermeli çelik modelleri literatürde geçen önemli modellerdendir. Ancak daha sonraki yıllarda birçok araştırmacı tarafından yeni öngermeli çelik modelleri önerilmiştir.

Öngermeli çeliğin kullanılarak elde edilen öngermeli betonun betonarmeye göre birçok üstün yönü bulunmaktadır. Yüksek mukavemetli öngermeli çelik sayesinde yüksek dayanımlı betonarme kesitler elde edilir, klasik betonarmede kullanılan malzemedan daha az malzeme kullanılır, dolayısıyla daha hafif elemanlar elde edilir, oldukça büyük açıklıklar geçilir. Öngermeli betonda çatlak oluşumu gözlenmez, korozyona karşı direnci oldukça iyidir. En sık kullanıldığı yapılar, köprüler, büyük açıklıkları olan binaların döşemeleri, beton kuleler, su tankları, ince kabuk yapılar ve nükleer tesislerdir (Chomprea, 2010).

1.3. Kolon-Kiriş Birleşim Bölgeleri

Moment aktarabilen betonarme çerçevelerin tüm yapının davranışını etkileyen en önemli kısımlarından biri birleşim bölgeleridir. Bu nedenle bu çalışmada kolon-kiriş birleşim bölgeleri için önerilen yeni bir histeretik model incelenmiştir. Özden ve Ertaş (2010) tarafından önüretim betonların hibrit birleşimleri için önerilen bu yeni histeretik model oluşturulan yeni malzeme modelleriyle ifade edilerek test edilmiştir.

Tasarımda rijit olarak kabul edilen bu bölgelerin özellikle deprem etkisi altında meydana gelen göçmesi yüksek kesme kuvvetleri ve donatının sıyrılması nedeniyle olur. Depremlerin sık yaşanmadığı ülkelerdeki yapıların göçmesinde birincil etkisi olmayan birleşim bölgeleri, 1999 yılında Türkiye ve Tayvan'da yaşanan depremlerde yıkıcı sonuçlara neden olmuştur (Uma ve Prasad, 2002). Benzer şekilde 1964 Alaska ve 1971 San Fernando depremlerinde hasar gören prefabrik yapılar incelendiğinde hasarlı bölgelerin birleşim bölgeleri olduğu görülmüştür (Meydanlı, 2010).

Endüstrileşme hareketiyle birlikte yaygınlaşmaya başlayan prefabrik yapılara yakın geçmişe kadar kuşkuyla bakılmasının en önemli nedeni, birleşim bölgelerinin deprem dayanımının düşük olduğu inancı olmuştur. Ancak daha sonraları yapılan çalışmalarda prefabrik yapıların birleşim bölgelerinin de bilinçli detaylandırıldıkları

takdirde monolitik (birdöküm) birleşimler gibi davrandıkları deneylerle kanıtlanmıştır (Ersoy ve Tankut, 1997).

Prefabrik birleşim bölgeleri birçok araştırmacının ilgilendiği bir konu olmuştur ve bunun sonucunda birçok birleşim modeli önerilmiştir. Moment aktarabilen düğüm bölgesine sahip prefabrik yapılarda uygulanan birleşim tipleri genel olarak üç grupta toplanmıştır (Meydanlı, 2010).

- En yaygın olarak kullanılan yerinde döküm ve geçmeli birleşimlerdir. Islak birleşim olarak da adlandırılan bu birleşimlerde donatı bindirme ve ya manşonla eklendikten sonra yerinde beton dökümü yapılarak elde edilir (Ersoy ve Tankut, 1997).
- Prefabrik elemanların imalatında çelik plakalar gerekli bölgelere kaynatılarak ve ya gerektiğinde bulon kullanılarak yapılan kuru birleşimlerdir (Ersoy ve Tankut, 1997).
- Prefabrik elemanların, kiriş merkezine yerleştirilen ard germe donatısı ile birleştirilmesi sonucu oluşan ard germeli birleşimlerdir. Ayrıca alt ve üst bölgelerine yumuşak donatı yerleştirilen ard germeli birleşimler hibrit birleşim olarak adlandırılır (Meydanlı, 2010).

Ard germeli birleşimlerin tasarımındaki temel yaklaşım, deprem etkisi altında prefabrik elemanlarda oluşacak hasarların ihmal edilebilir düzeyde kalması, hasarların birleşim ara yüzünde oluşan birincil çatlağın açılıp kapanmasıyla bu bölgede birikmesini sağlamaktır. Ard germeli birleşimlerde kiriş merkezine yerleştirilen ard germe donatısı aderanssız olarak, ya tüm kiriş boyunca ya da kirişlerin uç bölgelerinde belirli bir boyda olacak şekilde uygulanır. Ard germe donatısının aderanssız olması donatıda oluşacak elastik ötesi deformasyonları geciktirerek, kiriş-kolon ara yüzünde büyük elastik dönmelere ulaşıldıktan sonra bile ard germe kuvvetinin korunması sağlamaktadır. Ard germe donatısının enerji tüketmesi monolitik çerçevelerdeki gibi plastik mafsal ile değil, içinde bulunduğu kanalla arasındaki sürtünme ile olur. Ancak ard germe donatısının sağladığı enerji tüketme deprem etkisi altında sünek davranış için yeterli değildir. Bu nedenle ard germe donatısına ek olarak kiriş alt ve üst bölgesine yerleştirilen yumuşak donatı ile yapının enerji yutma kapasitesi artırılır. Birleşim bölgesinde kiriş alt ve üst

bölgesine yerleştirilen eşit miktardaki yumuşak donatının düşük kat ötelenme seviyelerinde kopmasını engellemek için bir miktar aderanssız kısım bırakılır. Yumuşak donatının alt ve üst bölgede eşit miktarda olmasının nedeni birleşimin enerji tüketme kapasitesini arttırmaktır (Meydanlı, 2010).

Çalışmada kullanılan Özden ve Ertaş (2010) hibrit modeli, değişken yumuşak donatı içeriğine sahip hibrit birleşimlerin performansı hakkında, Boğaziçi ve Kocaeli üniversitelerinde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucu geliştirilmiştir. Çalışmada betonarme yapılar için uygulanan kesit analizi yöntemleri beton kesitiyle kısmi aderanslı yumuşak çelik ve aderanssız ard-germe tendonu arasındaki birim deformasyon uyumsuzluğu nedeniyle prefabrik hibrit birleşimlere uygulanamamış ve yeni bir kesit analizi yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yöntemle hibrit birleşimin moment-dönme kapasitesi elde edilmiştir. Son olarak sıyrıлма davranışı olan yumuşak donatılı hibrit birleşim için kalıcı (artık) deformasyonların (kat ötelenmelerinin) hesaba katıldığı yeni bir histeretik model önerilmiştir (Özden ve Ertaş, 2010). Bu model hakkında bilgi ileriki bölümlerde detaylı şekilde verilecektir.

2. MODELLEME ve ANALİZ

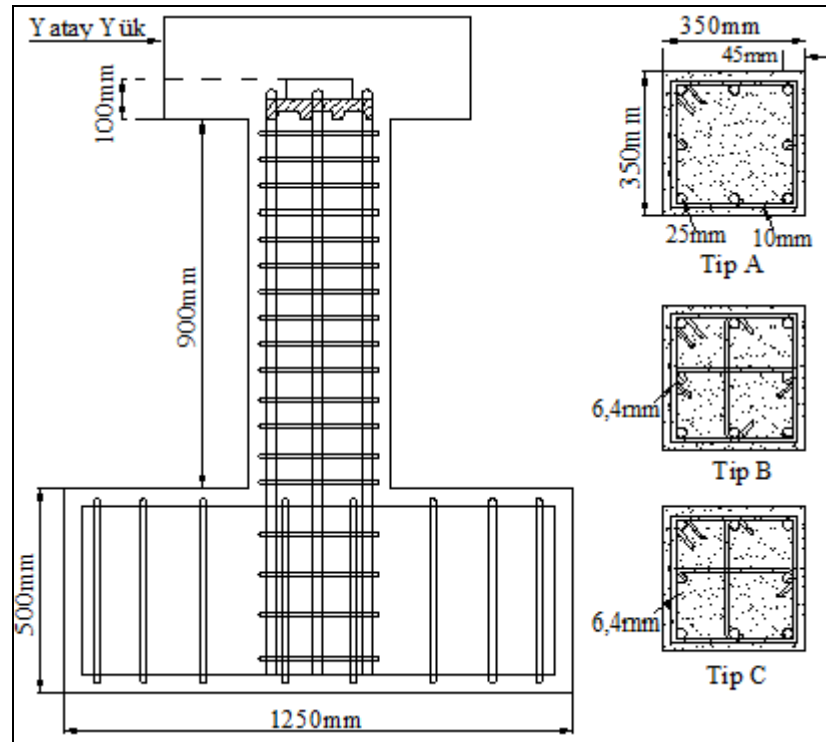
Yatay yük etkisi altında eğilmeye maruz kalan ve bu çalışmada modellenmiş olan kolon numuneler daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Kolon numunelerin kritik eğilme davranışını deneysel ve analitik olarak hesaplamak için PEER (Pasific Earthquake Engineering Research) ve Washington üniversitesinin yapısal performans veritabanı olarak adlandırılmış, ortak veritabanı kullanılmıştır.

Bu yapısal performans veri tabanı ilk olarak NIST (National Institute of Standards and Technology) tarafından oluşturulmuştur. NIST veri tabanında 107 dikdörtgen ve 92 spiral kesitli betonarme kolon deneyleri ve sonuçları verilmiştir. Daha sonra PEER veritabanının desteğiyle Washington Üniversitesi araştırmacıları tarafından yeni deney verileri eklenmiş ve mevcut deneylerin bilgileri genişletilmiştir (Berry ve diğ., 2004). Şu anda 306 dikdörtgen ve 177 spiral kesitli betonarme kolonun bulunduğu veri tabanında, çevrimsel ve monotonik yükleme durumları altında test edilmiş numunelerin sonuçları yer almaktadır. Veri tabanındaki deney elemanları spiral ve dikdörtgen kesitli olmak üzere gruplandırılmıştır. Her bir grubun içinde özellik tablosu, kuvvet-yerdeğiştirme geçmişi, hasar-yerdeğiştirme tablosu ve deneyle ilgili kaynak listesi verilmiştir. Ek olarak, deney elemanlarının özellikler tablosunda bulunan ifadeleri, deney verilerinin organizasyonunu, deneyler hakkında yapılan istatistiksel çalışmaların sonuçlarını açık bir şekilde anlatan bir kullanıcı kitabı da mevcuttur. Bu kitaba göre deney elemanları hakkındaki bilgileri; malzeme özellikleri, kolon geometrisi, sargılama detayları, test konfigürasyonu ve göçme sınıflandırması başlıkları altında verilmiştir. Solmaz (2010) tarafından yapılan istatistiksel çalışmada PEER veritabanında bulunan 306 adet dikdörtgen kesitli betonarme kolonun 220 tanesinin göçme modu eğilme, 35 tanesinin eğilme ve kesmenin birleşimi ve 51 tanesinin de kesme olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada PEER veritabanında bulunan 306 adet dikdörtgen kesitli kolon deneyinden Saatçioğlu ve Özcebe tarafından yapılmış olan konsol kolon deneyi seçilmiştir. Bu konsol kolonun modellenmesinde nesneye dayalı, açık kod bir sonlu eleman programı olan OpenSees programı kullanılmıştır ve elde edilen sonuçların deney sonuçlarına yakın çıkması hedeflenmiştir. Bu bölümde modellenen deney elemanı, modellemede kullanılan program, malzeme modelleri, deney elemanın modellenmesi ve son olarak da analiz yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Deney Elemanının Tanıtılması

Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan deneyde 14 adet gerçek boyutlu konsol kolon farklı yükleme koşulları altında test edilmiştir. Yapılan bu çalışmada aksel yükün, enine donatının ve iki yönlü yüklemenin depreme dayanıklı betonarme kolonun sünekliğine olan etkisi tartışılmıştır. Yükleme koşullarına göre numuneler 3 farklı grupta toplanmıştır. Ayrıca 3 farklı enine donatı konfigürasyonu kullanılarak enine donatı yerleşiminin kolon davranışına etkisi incelenmiştir. Şekil 2.1’de deney elemanının geometrik özellikleri ve farklı enine donatı yerleşimine sahip eleman kesitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Deney numunesinin geometrik özellikleri ve farklı tipte enine donatı yerleşimleri (Saatçioğlu ve Özcebe, 1989)

Yapılan çalışmada test edilen kolonların hepsi aynı geometrik özelliklere sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Ancak kullanılan beton ve çeliğin akma dayanımları, enine ve boyuna donatı oranı, enine donatılar arasındaki mesafe (s) gibi değerler birbirinden farklı seçilmiştir. Test edilen 14 adet numunenin özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Deney numunelerinin özellikleri (Saatçioğlu ve Özcebe, 1989)

| Numuneler | Beton Dayanımı (Mpa) | Boyuna Donatı | Enine Donatı | | | Konfigürasyon | Eksenel Yük (kN) |
|-----------|----------------------|---------------|--------------|---------|------------|---------------|------------------|
| | | f_y (Mpa) | f_y (Mpa) | Oran(%) | $s_{(mm)}$ | | |
| U1 | 43.6 | 430 | 470 | 0.85 | 150 | Tip A | 0 |
| U2 | 30.2 | 453 | 470 | 0.85 | 150 | Tip A | 600 |
| U3 | 34.8 | 430 | 470 | 1.69 | 75 | Tip A | 600 |
| U4 | 32.0 | 438 | 470 | 2.54 | 50 | Tip A | 600 |
| U5 | 49.3 | 430 | 470 | 0.85 | 120 | Tip A | Değişken |
| U6 | 37.3 | 437 | 425 | 1.95 | 65 | Tip B | 600 |
| U7 | 39.0 | 437 | 425 | 1.95 | 65 | Tip C | 600 |
| D1 | 40.3 | 453 | 470 | 0.85 | 150 | Tip A | 0 |
| D2 | 30.2 | 453 | 470 | 0.85 | 150 | Tip A | 600 |
| D3 | 34.8 | 430 | 470 | 1.69 | 75 | Tip A | 600 |
| D4 | 43.6 | 430 | 470 | 2.54 | 50 | Tip A | 600 |
| D5 | 49.3 | 430 | 470 | 0.85 | 150 | Tip A | Değişken |
| B1 | 32.0 | 438 | 470 | 2.54 | 50 | Tip A | 600 |
| B2 | 39.5 | 437 | 470 | 1.69 | 75 | Tip A | 600 |

Tablo 2.1’de özellikleri verilen numunelerin boyuna donatı oranları her bir numune için eşit ve %3.27 olarak alınmıştır. Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan bu çalışmanın sonucunda, sabit eksenel basınç yükünün betonarme kolonun sünekliğini azaltıp dayanım ve rijitlikte meydana gelen bozulmayı hızlandırdığı sonucuna varılmıştır. Buna karşın eksenel basıncın kolonun eğilmedeki akma dayanımını arttırdığı ve değişken eksenel basınca maruz kalan kolonların sabit eksenel basınca maruz kalan kolonlardan farklı davrandığı görülmüştür. Yine deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, eksenel basınca ve eğilmeye maruz kalan ve iyi sargılanmış kolonun sünekliğinin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Ek olarak boyuna donatıların her birinin etriye ve çirozlarla çevrelendiği numunelerin, boşta kalan boyuna donatıya sahip numunelerde daha iyi davranış sergilediği sonucuna varılmıştır (Saatçioğlu ve Özcebe, 1989).

Yapılan çalışmada test edilen 14 adet numunenin 4 tanesinin PEER veritabanında yer almıştır. Burada yer alan U3, U4, U6 ve U7 numuneleri arasından U4 ve U6 bu çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir. Seçilen numuneler OpenSees programı kullanılarak modellenmiştir. Sargılama tipleri birbirinden farklı olan bu iki numune aynı geometrik özelliklere sahiptir fakat malzeme özellikleri, etriye aralıkları gibi özellikleri birbirinden farklıdır.

Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan bu deneysel çalışmadaki numuneler karmaşık geometrik özelliklere ve donatı konfigürasyonuna sahip olmadığından modelleme sırasında kolaylık sağlayacağı düşünülerek seçilmiştir. Aynı zamanda histeretik modellerin kullanıldığı bu çalışmada yükleme durumu depremi temsil edecek bir model olması istendiğinden, çevrimsel ve tekrarlı yüklere maruz kalan deney elemanları referans numune olarak seçilmiştir. Farklı özelliklere sahip numunelerin modellenmesinin elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından uygun olacağı düşünülerek U4 ve U6 numuneleri modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu iki numunenin modellenmesi ve analizinden elde edilen sonuçlardan ilgili bölümde bahsedilecektir.

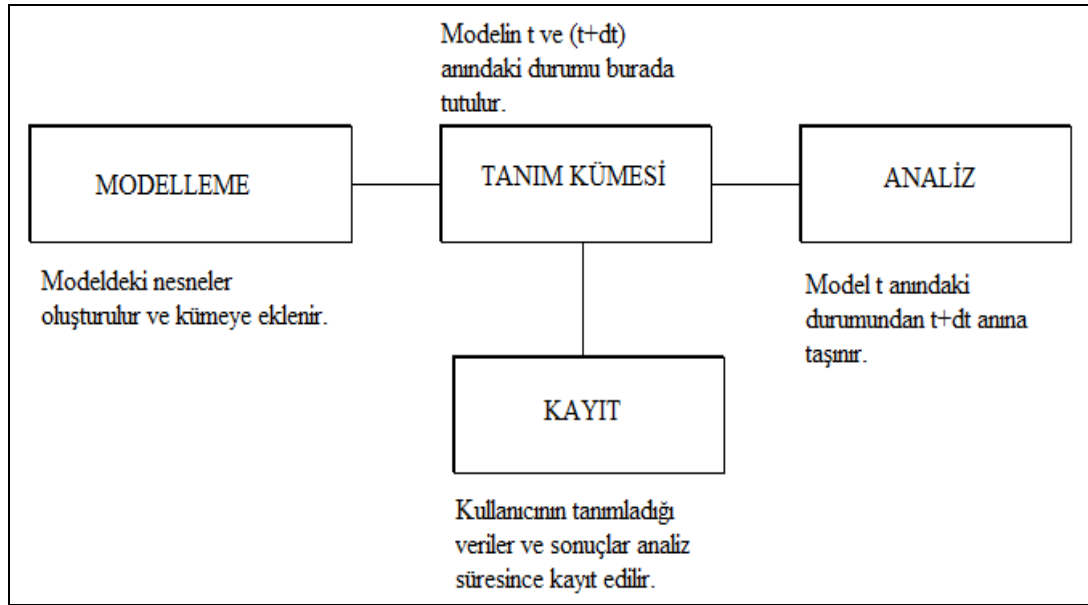
2.2. OpenSees Programının Tanıtılması

Bu çalışmada daha önce yapılmış deneysel çalışmada kullanılan konsol kolonları modellemek ve önerilen hibrit birleşim modelini test etmek için OpenSees isimli sonlu eleman programı kullanılmıştır. Deprem mühendisliği modellemeleri için açık sistem olarak tanımlanan programın (Open System for Earthquake Engineering Simulation) hakları 1999 yılında California üniversitesi tarafından korunmaya başlanmıştır. Program Frank McKenna and Gregory L. Fenves tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra Filip C. Filippou, Silvia Mazzoni, ve TBA yazılım mühendisleri tarafından yapılan önemli katkılarla bugünkü haline gelmiştir (Mazzoni, 2005).

Deprem mühendisliği ve geoteknik alanındaki uygulamalarda kullanılan sonlu eleman programının nesneye dayalı programlama dili C++'dır. Program kodları C++ ile yazılmıştır. Program, PEER, NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation) ve NSF (National Science Foundation) gibi kuruluşlar tarafından ekonomik olarak desteklenmiştir (McKenna, 2006).

OpenSees programının kendi komutları dışında kullandığı bir diğer programlama dili de Tcl (Tool Command Language) dir. Tcl ilk olarak 1988 yılında John Ousterhout tarafından geliştirilmiştir ve birlikte çalıştığı bir de Tk kütüphanesi oluşturulmuştur (Welch, 1995). OpenSees'in mevcut komutları dışında değişken tanımlama, döngü oluşturma, matematiksel ifadelerle işlem yapma ve ya mantıksal sınav komutları oluşturma gibi işlemler Tcl'in güçlü programlama araçları kullanılarak yapılır. Bu nedenle OpenSees programını öğrenmeden önce Tcl programlama dili hakkında bilgiye sahip olmak OpenSees'in daha etkin kullanılması açısından gereklidir.

OpenSees malzeme eleman ve analiz yöntemleri bakımından zengin bir kütüphaneye ve oldukça güçlü sayısal modelleme araçlarına sahiptir. Programın en önemli özelliklerinden biri de kullanıcıların kendi malzeme, eleman veya geliştirdikleri analiz yöntemlerini programın içine dahil edebiliyor olmasıdır. C++ dışında C ve Fortran programlama dilleri de yeni eklenecek malzeme, eleman ve ya analiz yöntemlerinin kaynak kodunun yazılmasında kullanılır. OpenSees'deki işleyişi tanımlayan temel soyutlama Şekil 2.2'deki gibidir (Mazzoni ve diğ., 2007).



Şekil 2.2. OpenSees'deki temel soyutlama (Mazzoni ve diğ., 2007)

OpenSees'in program dosyası ve kaynak kodları <http://opensees.berkeley.edu/> internet adresinde mevcuttur. Ayrıca program hakkında sınırlı sayıda kaynak olsa da komutların ve programın anlatıldığı temel kitap ve bir de örnek kitabı vardır. Bu kaynakların dışında kullanıcılar ve programın geliştiricileri arasındaki iletişimi

sağlayan bir forum yine programın sitesinde yer almaktadır. Programın geliştiricileri tarafından hazırlanan eğitim seminerleri her yıl belirli zamanlarda düzenlenir ve bu seminerlerde gösterilen sunumlar daha sonra kaynak olarak kullanıcılarla paylaşılır. OpenSees programına başlamadan önce öğrenilmesi gereken programlama dili Tcl hakkında mevcut olan en temel kaynak Practical Programming in Tcl and Tk isimli kitaptır. Ayrıca yine Tcl hakkında mevcut internet sitesi adresleri OpenSees'in temel kitabı olan OpenSees Command Language Manual'da verilmiştir.

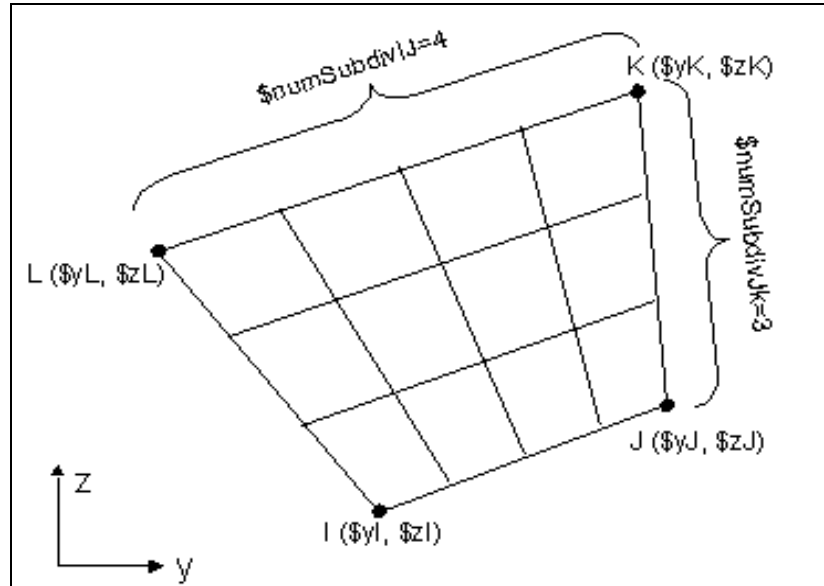
2.3. Fiber Tabanlı Analiz

Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerdeki yapılar, kullanılabilir ömürleri boyunca beklenen en büyük şiddetteki depremlere maruz kaldıklarında elastik davranış gösteremezler. Mevcut deprem yönetmelikleri bu binaların yalnızca küçük şiddetteki depremlerde elastik davrandığını ancak orta ve güçlü yer hareketlerinin farklı derecede hasara neden olacağını belirlemiştir. Betonarme yapıların hasara neden olan bu davranışı, deprem karakteristiği, zemin kalitesi ve yapısal özellikler gibi değişkenlerden etkilenir. Yapısal özelliklerin belirlenmesindeki en önemli adım deprem tepkisinin hesaplanmasıdır. Başlangıç rijitliği, kopma kapasitesi, farklı global ve yerel süneklik değerleri yapının deprem tepkisinin belirlenmesinde gerekli olan parametrelerdir. Bazı durumlarda güçlü yer hareketleri sonrasında yapının taşıma kapasitesi ve rijitliği gibi değerlerin de bilinmesi gerekir (Taucer ve diğ., 1991).

Betonarme yapıların depreme dayanıklı tasarımı için genellikle doğrusal olmayan dinamik analiz gerekir. Fakat gerçek yapıların birçok bileşeni arasındaki karmaşık etkileşimden dolayı bu yapıların göçme anına kadarki dinamik karakteristikleri yalnızca dinamik testlerden elde edilemez. Geçmişte bu zorluğun üstesinden gelmek için çevrimsel yük tekrarları altındaki yapıların küçük ölçekli numuneleri ve bileşenlerine statik test yöntemleri uygulanmıştır. Bu testlerin sonuçlarından bütün yapının dinamik tepkisinin verilere dayalı tahminine olanak sağlayan histeretik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sınırlı test verilerinin olduğu yapıların dinamik analizlerinin yapılmasında da kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmalar betonarme yapıların doğrusal olmayan analizi için çeşitli modellerin gelişmesini sağlamıştır. Bu modeller 3 gruba ayrılır. Bunlar; global modeller, soyut sonlu eleman modelleri, mikroskobik sonlu eleman modelleridir (Taucer ve diğ., 1991).

Bu çalışmada OpenSees programında mevcut olan ve 2. grup modellere dahil olan fiber analiz modeli kullanılmıştır. Zhao ve Sirtharan'a göre, fiber analiz bir doğrultudaki çelik ve beton lifler tarafından eğilme elemanlarının temsil edilmesidir. Fiber analiz kesit şekli ve yatay yükün uygulanma doğrultusundan bağımsız olarak eğilme elemanlarını modellemek için kullanılır (Zhao ve Sritharan, 2004).

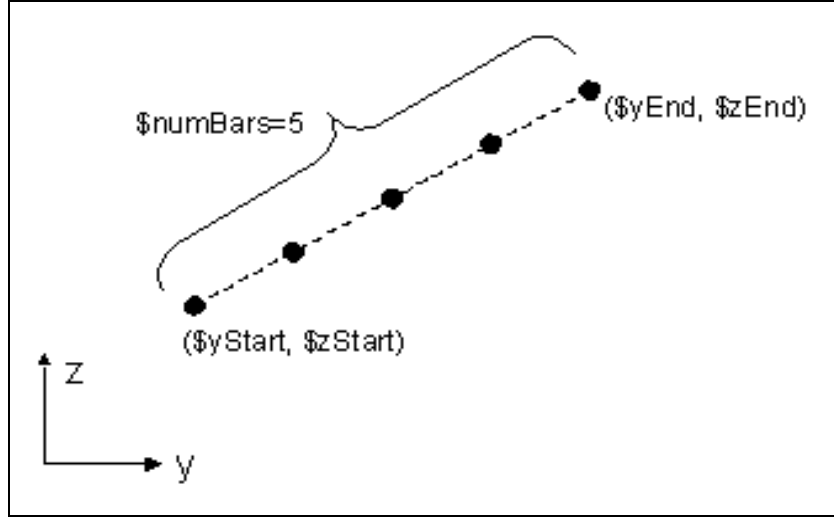
OpenSees programı kullanılarak yapılan bu modellemeye göre, geometrik özellikleri bilinen kolon kesiti modelleme tercihinin göre her iki doğrultuda ve ya belirlenen bir doğrultuda daha basit, düzgün şekilli alt bölümlere bölünür. Betonarme kesiti oluşturan beton ve çelik kesitleri ayrı ayrı tanımlanır. Beton kesiti, kare, dikdörtgen ve dairesel alt bölümlere ayrılır ve bunların her biri parça (patch) olarak adlandırılan alt komutla tanımlanır. Çelik elemanlar ise tabaka ya da katman (layer) alt komutlarıyla tanımlanır. Beton ve çelik kesitlerin her birinin koordinatları bu alt komutlarla tanımlanır ve böylece kolon kesitinin hem geometrik özellikleri hemde donatı yerleşimi belirlenmiş olur. Betonarme elemanın dikdörtgen veya kare beton kesiti Şekil 2.3'de görüldüğü gibi 4 nokta ile tanımlanır. Bu noktaların yerel eksenlere uzaklığı I noktasından başlamak üzere saat yönünün tersinde ilerleyerek girilir.



Şekil 2.3. Beton kesitin tanımlanması (Mazzoni ve diğ., 2007)

Çelik elemanların kesitinin yerel eksenlere olan mesafeleri, donatının merkezine olan uzaklık hesaplanarak girilir. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi aynı doğrultuda bulunan

elemanların başlangıç ve bitiş koordinatları ve bu aralıkta kaç adet eleman bulunduğu yazılarak çelik elemanın kesiti tanımlanır.



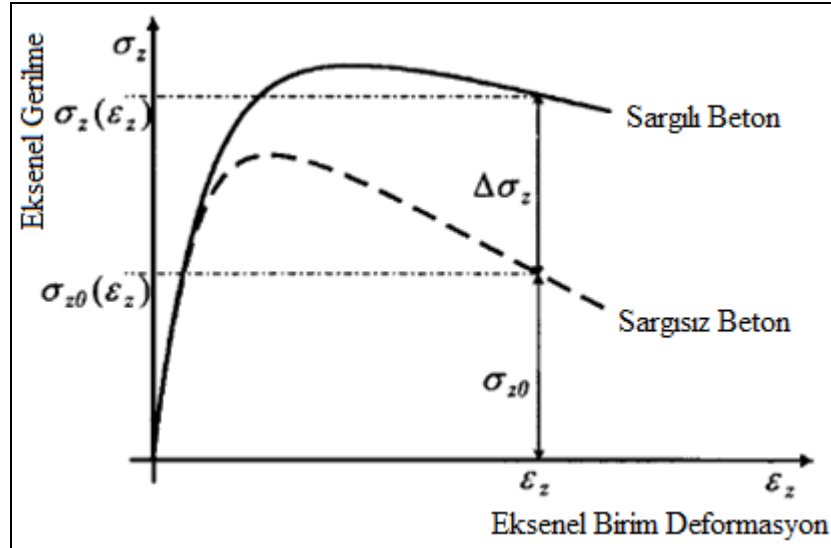
Şekil 2.4. Çelik kesitin tanımlanması (Mazzoni ve diğ., 2007)

Fiber analiz yöntemi rijitlik yöntemi olarak tanımlanan bir yöntemdir. Rijitlik yöntemi ise, noktasal yerdeştirmelerin tüm sistemin denge denklemleri çözülerek bulunduğu bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Buna göre noktanın yerdeştirmesinden eleman yerdeştirmeleri elde edildikten sonra eleman kuvvetleri ve rijitliği belirlenir, daha sonra genel rijitlik matrisi bir sonraki adım için yeniden düzenlenir. Fiber olarak tanımlanmış elemanların rijitliği ve kuvvetleri kesit deformasyonlarına göre, kesit rijitliği ve kuvvetlerinden sayısal olarak elde edilir. Kesit deformasyonunda düzlem kesitler düzlem kalır yaklaşımı kullanılarak her bir lifin birim deformasyonu elde edilir. Kesitin kuvvet ve ilgili rijitlik değerlerinin düzenlenmesinin ardından lifin gerilme ve rijitlik değerleri kullanılan malzeme modellerine göre güncellenir (Zhao ve Sritharan, 2006). Bu nedenle fiber analiz kullanılarak yapılan sayısal çalışmalarda seçilen malzeme modelleri oldukça önemlidir.

2.4. Beton Lifler İçin Malzeme Modeli

ConfinedConcrete01 beton modeli OpenSees'in malzeme kütüphanesinde bulunan sargılı beton modellerindendir. Bu çalışmada U4 ve U6 kolonlarında kullanılan betonu modellerken ConfinedConcrete01 sargılı beton modeli kullanılmıştır.

Braga ve diğ., (2006) tarafından yapılan çalışmada enine donatıların çekirdek betona uyguladığı basıncı belirlemek için elastisite teorisine dayanan düzlem birim deformasyon analitik modeli sunulmuştur. Analitik çalışma ilk olarak kare ve dairesel enine donatılar kullanılarak basit sargılama modelleri üzerine yapılmıştır. Daha sonra karmaşık enine donatı konfigürasyonları ve lif takviyeli polimer sargı gibi farklı malzemeler kullanılarak beton çekirdeğinde meydana gelen genişlemeye karşı koyan sargılama kuvvetleri incelenmiştir. Önerilen modeli diğer modellerden farklı kılan nokta; beton kesitinde herhangi bir düzlem birim deformasyon olmaksızın gerilmelerin artmasıdır. Bu da enine donatıların oluşturduğu sargılamanın düzlem birim deformasyon koşullarında olduğu anlamına gelir (Braga ve diğ., 2006). Önerilen modelin gerilme birim deformasyon eğrisi Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Braga'nın önerdiği beton modeli (Braga ve diğ., 2006)

Önerilen beton modelinin sargılı ve sargısız durumlarındaki gerilmeleri arasındaki ilişki,

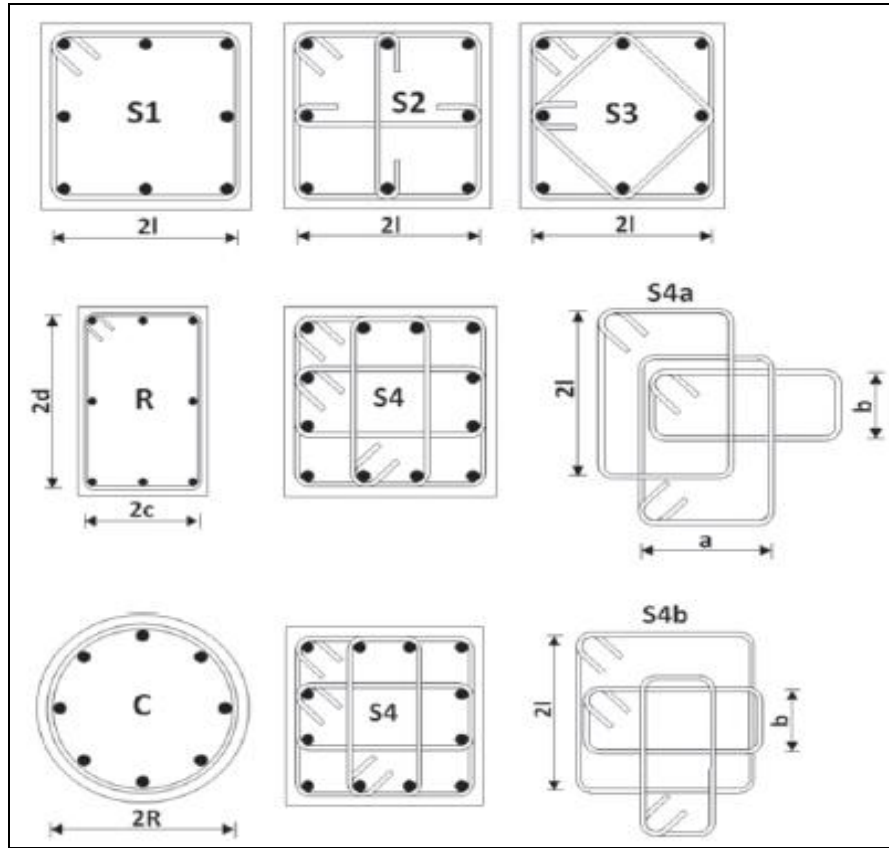
$$\sigma_z(\varepsilon_z) = \sigma_{z0}(\varepsilon_z) + \Delta\sigma_z(\varepsilon_z) \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada σ_z sargılı betondaki gerilme, σ_{z0} sargısız betondaki gerilme, ε_z ilgili birim kısalma, $\Delta\sigma_z$ ise gerilme artışıdır. Düzlem birim deformasyon koşullarında $\Delta\varepsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{zy} = 0$ (γ_{zx} ve γ_{zy} sırasıyla zx ve zy düzlemlerindeki kayma deformasyonlarıdır) olur. Buna göre;

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{1}{E_c} \left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \right] = 0 \quad (2.2)$$

$$\Delta \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.3)$$

olarak elde edilir. Burada σ_x ve σ_y betonun x ve y doğrultularındaki aksenal gerilmesi, ν Poisson oranı, E_c betonun elastisite modülüdür (Braga ve diğ., 2006). Önerilen bu modeli daha önce önerilen sargılı beton modellerinden ayıran özelliklerinden biri birbirinden farklı çok sayıda sargılama konfigürasyonu geliştirmiş olmasıdır (D'Amato, 2012). Şekil 2.6'da bu sargılama tiplerinden bazıları verilmiştir.



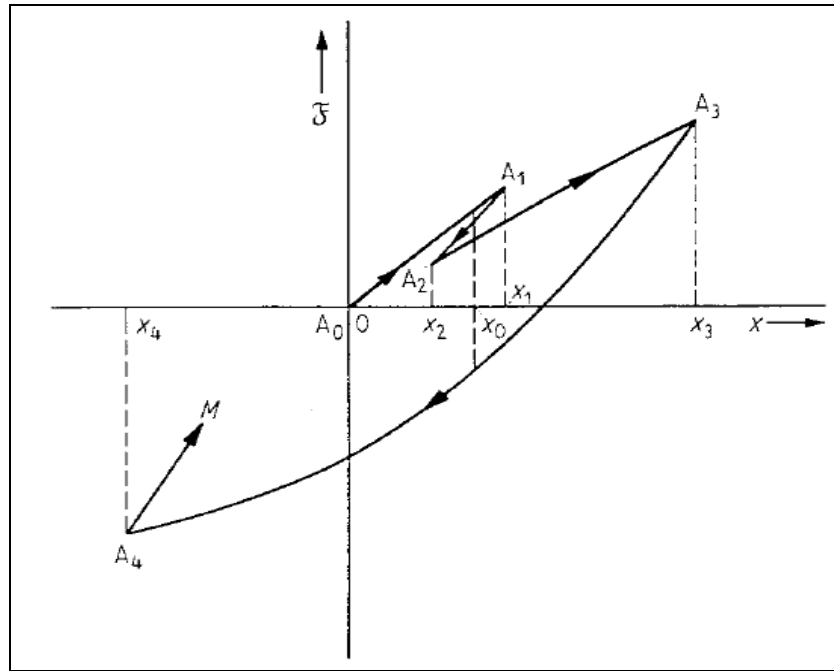
Şekil 2.6. Farklı tipte enine donatı yerleşimleri (D'Amato, 2012)

Modelin sahip olduğu bu çeşitlilik açık kod bir program olan OpenSees programına dahil olmasını sağlamış ve program kullanıcılarına daha gerçeğe yakın sargılı beton modelleri oluşturma imkanı vermiştir. Braga tarafından önerilen model literatürde var olan sargılı beton modelleriyle ve yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak geçerli kabul edilmiştir (Braga ve diğ., 2006).

2.5. Çelik Lifler İçin Malzeme Modeli

Bu çalışmada deney elemanında yer alan donatıyı modellemek için OpenSees programının malzeme kütüphanesinde yer alan birçok çelik modeli arasından farklı alanlarda da kullanılan BoucWen histeretik modeli seçilmiştir.

BoucWen modeli yapı mühendisliğinde doğrusal olmayan sistemleri tanımlamak için yaygın olarak kullanılan bir modeldir. İlk olarak Bouc tarafından 1971 yılında önerilmiş ve daha sonra Wen tarafından 1976 yılında geliştirilmiştir. BoucWen modeli değişkenlik (veya çok yönlülük) ve matematiksel olarak çözümlenebilirlik özellikleri nedeniyle çok serbestlik dereceli sistemler, binalar, çerçeveler, izolatörler gibi mühendislik problemlerine yaygın şekilde uygulanır. Özellikle sönümleyicilerin davranışını modellemede sıkça kullanılan bu malzeme modeli buna ek olarak betonarme, çelik, yığma, ahşap gibi yapı malzemelerinin analiz ve modellemesinde de kullanılır (URL-1). Bouc (1971) tarafından önerilen model Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi (Bouc, 1971)

Bouc-Wen modelinde verilen gerilme ifadesi doğrusal ve histeretik olmak üzere iki kısımdan oluşmuştur. Buna göre gerilme ifadesi,

$$\sigma = \alpha k_0 \varepsilon + (1 - \alpha) k_0 z \quad (2.4)$$

şeklinde verilmiştir. Burada α akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranı, k_0 elastik rijitlik, z histeretik deformasyon olarak tanımlanmıştır (Haukaas ve Kiureghian, 2004). Ancak z fiziksel olarak bir anlam taşımaz yalnızca matematiksel olarak anlam taşıyan sanal bir deformasyondur (Zhang ve Ma, 2002). BoucWen modeli son yıllarda deneysel çalışmaların analizinde çok yakın sonuçlar vermesi nedeniyle sıklıkla kullanılan bir model olmuştur. Mevcut literatürde BoucWen modeli karakutu yaklaşımı içinde kullanılır. Bu yaklaşıma göre deneysel sonuçlara uygun şekilde model parametreleri ve girdi-çıkı kümesi çeşitli yöntemlerle yeniden düzenlenir (İsmail ve diğ., 2009).

BoucWen modeli Baber ve Noori tarafından 1985 yılında yapılan önemli değişikliklerle yeniden düzenlenmiştir. Baber ve Noori tarafından BoucWen modeline uygun fonksiyonlarla dayanım ve rijitlik bozulmaları ile birlikte sıkıştırma (pinching) etkisi de dahil edilmiştir. Oluşturulan bu yeni modelin ifadesi,

$$\dot{z} = h(z) \left\{ \frac{A\dot{u} - v \left(\beta |\dot{u}| |z|^{n-1} z + \gamma \dot{u} |z|^n \right)}{\eta} \right\} \quad (2.5)$$

şeklinde verilmiştir. Buna göre; \dot{u} , yerdeğiştirmenin zaman göre türevi, β , γ ve n histeretik eğrinin şekil ve ölçeğini belirleyen parametreler, A tanjant rijitliğini belirleyen parametre olarak tanımlanmıştır. v , η ve $h(z)$ değerleri sırasıyla dayanım rijitlik ve sıkıştırma (pinching) bozulmalarını etkilemektedir. $\Delta v=0$, $\Delta \eta=0$ ve $h(z)=1$ olduğunda bozulmanın olmadığı belirlenmiştir (Sengupta ve Li, 2011).

Baber ve Noori tarafından geliştirilmiş BoucWen modeli OpenSees programında tanımlıdır ve dolayısıyla dayanım, rijitlik ve sıkıştırma (pinching) etkileri modele dahil edilmiştir. Mevcut deneyin modellendiği programda BoucWen histeretik malzeme parametreleri için uygun değerler seçilmiştir.

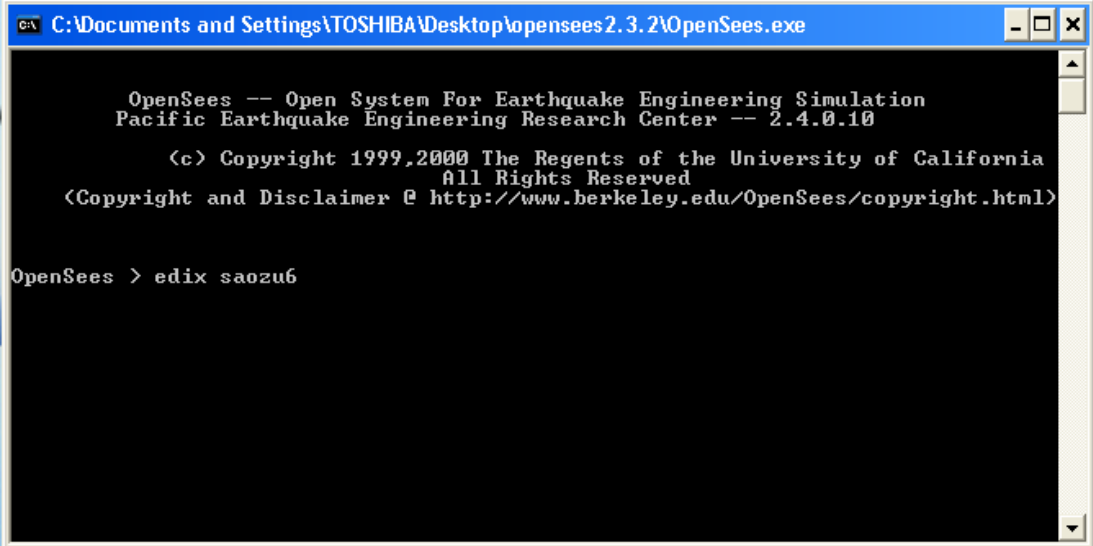
2.6. Deney Elemanının OpenSees ile Modellenmesi ve Analizi

Bu çalışmada PEER veritabanında bulunan, Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan deneyin numunelerinden U4 ve U6 OpenSees sonlu eleman programıyla modellenmiştir. Bu çalışmanın modellemeye ilgili ilk basamağında programın elde

edilmesi ve kullanıma hazır olması için oldukça çaba harcanmıştır. Bu nedenle programın yüklenmesi ve bileşenlerinin kurulması hakkında bilgi verilecektir.

OpenSees programı ücretsiz bir programdır ve programın internet sitesine (<http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/user/download.php>) üye olunması programı yüklemek için yeterlidir. OpenSees programının yanında programın kullandığı Tcl programının da yüklenmesi gereklidir. Ancak OpenSees'in internet sitesinde yer alan yönlendirmelere uyulsa da Tcl'nin kurulacağı bilgisayara uyumlu sürümünü elde etmek vakit almıştır. Tcl'nin yüklenmesi kendine ait ayrı bir internet sitesinden sağlanmıştır. Tcl'nin internet sitesi; <http://www.activestate.com/activetcl/downloads> adresidir. Bu aşamalardan sonra yüklenen dosyalar aynı klasörde toplanmıştır. Buna göre elde edilen klasörde OpenSees.exe ve Active Tcl 8.5.9 program dosyaları yer almıştır.

OpenSees.exe editör olarak kullanılmaya elverişli olmadığından kodun yazımı sırasında 1991 yılında üretilen Notepad++ isimli editör kullanılmıştır. OpenSees.exe programında yeni model kurulurken “edix program ismi” şeklinde yazılır. OpenSees.exe çalışma ekranı Şekil 2.8’de verilmiştir.



```
C:\Documents and Settings\TOSHIBA\Desktop\opensees2.3.2\OpenSees.exe

OpenSees -- Open System For Earthquake Engineering Simulation
Pacific Earthquake Engineering Research Center -- 2.4.0.10

(c) Copyright 1999,2000 The Regents of the University of California
All Rights Reserved
(Copyright and Disclaimer @ http://www.berkeley.edu/OpenSees/copyright.html)

OpenSees > edix saozu6
```

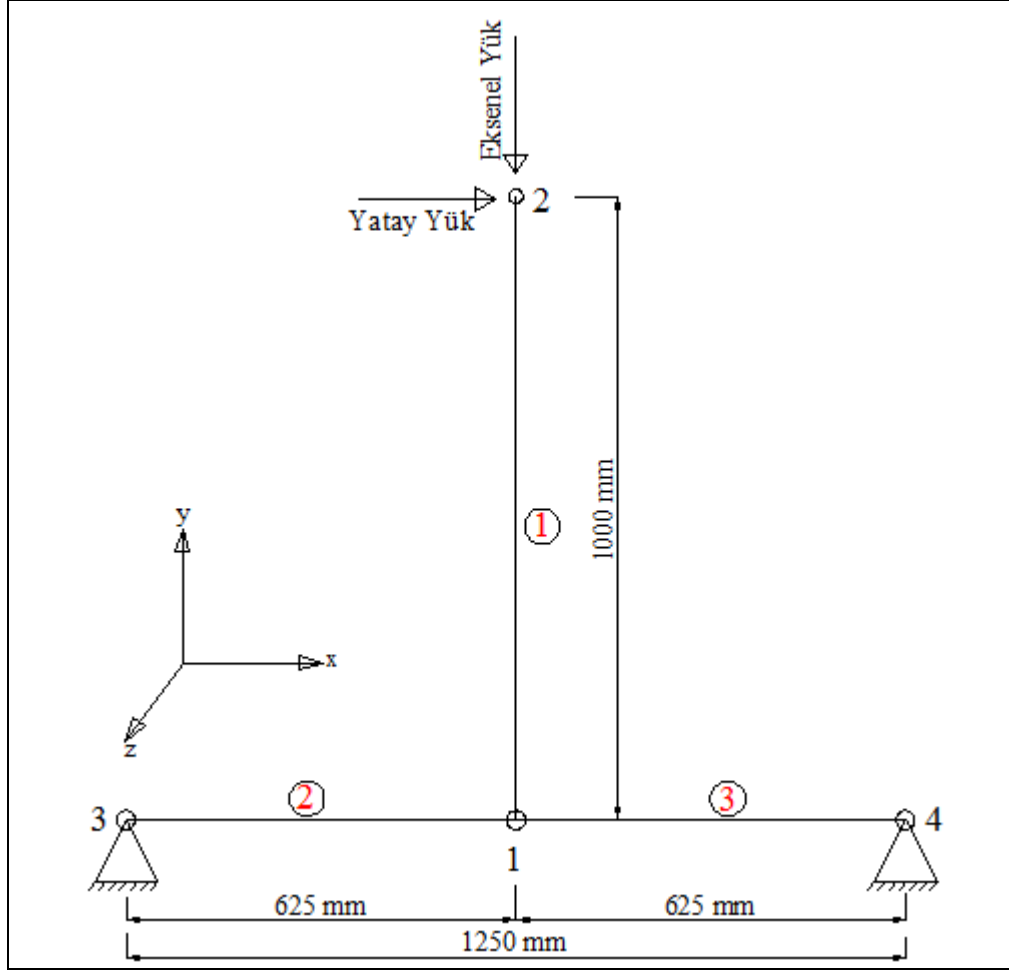
Şekil 2.8. OpenSees.exe çalışma ekranı

Modellemeye başlarken oluşturulan program dosyaları SAOU4 ve SAOU6 olarak adlandırılmıştır. Bu programlar sırasıyla U4 ve U6 deney elemanlarının modellendiği programlardır. OpenSees birimleri kullanıcı tarafından belirlenen bir programdır. Bu

nedenle modele başlarken ilk önce kullanılacak birimler seçilmiştir. Bu çalışmada SI birim sistemi kullanılmıştır ve N, mm olacak şekilde bütün değerler düzenlenmiştir.

SAOZU4 ve SAOZU6 programlarının ikisi de modelleme aşamaları ve analiz yöntemleri bakımından aynıdır. Bu nedenle yalnızca bir model üzerinde modelleme aşamaları anlatılacak, analiz sonuçları her iki model içinde ayrı ayrı verilecektir.

OpenSees programında modellemeye başlarken modelin kaç boyutlu ve buna bağlı olarak kaç serbestlik derecesine sahip olduğunu bildiren “model BasicBuilder” komutu kullanılır. Program büyük küçük harfe duyarlıdır. Bu nedenle kod yazarken programın bu özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Modelin boyut ve serbestlik derecesiyle ilgili bilgiler tanımlandıktan sonra, modellenecek elemanın geometrik özellikleri ve mesnet koşulları tanımlanır. İlk olarak elemanı oluşturan düğüm noktaları ve bu noktaların koordinatları belirlenir. Her bir noktaya birbirinden farklı sayılar atanır. OpenSees yeni tanımlanan bütün komutlarında “tag” olarak adlandırdığı tanımlama sistemini kullanır. Buna göre aynı işlevi yapan komutlar ile tanımlanacak farklı nokta, eleman, malzeme veya yükleme durumu için birbirinden farklı sayıların kullanılması zorunludur. Koordinatlar “x, y, z” sırasıyla olacak şekilde tanımlanır. U4 ve U6 numunelerinin OpenSees programında modellenmiş hali global eksen takımıyla birlikte Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. SAOZU4 ve SAOZU6 modellerinin şematik gösterimi

Şekil 2.9’da görülen 1, 2, 3, 4 numaraları düğümleri, daire içine alınmış 1, 2, 3 numaraları ise elemanları ifade eder. Kolon yüksekliği ve temel kirişi olarak temsil edilen 3-4 düğüm noktaları arasında kalan elemanın boyutları deney verilerinden alınmıştır. 3 ve 4 numaralı düğüm noktalarına basit mesnet atanarak deney sırasında oluşturulan koşullar temsil edilmiştir. Mesnet koşulları ve koordinatları tanımlandıktan sonraki adım yapıyı oluşturan elemanlarda kullanılan malzemelerin tanımlanmasıdır.

OpenSees’in malzeme kütüphanesi oldukça zengindir. Bu nedenle çalışmanın başlangıcında malzeme modellerini tanımaya yönelik basit modeller kurularak analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçları daha sonra modellenen deney elemanında kullanılacak malzemelerin seçiminde öngörü oluşturmuştur. Bahsedilen malzeme kütüphanesi iki ana başlık altında toplanmıştır. Bunlardan ilki malzemelerin gerilme-birim deformasyon veya kuvvet-deformasyon ilişkilerinin tanımlandığı uniaxial Material

malzeme sınıfıdır. Bu malzeme sınıfında elik, beton, histeretik ve viskoz malzeme modelleri tanımlanmıştır. İkinci malzeme sınıfı ise nD Material isimli zeminle ilgili modellemelerde kullanılan malzemelerin bulunduğu kısımdır. Bu çalışmada kullanılan bütün malzeme modelleri uniaxial Material sınıfına dahildir.

Beton lifler için malzeme modeli bölümünde bahsedildiği gibi kullanılan betonu modellemek için ConfinedConcrete01 malzemesi kullanılmıştır. Braga tarafından 2006 yılında önerilen modelin kodu 2005 yılında yayımlanmış olan OpenSees Command Language Manual kitabında bulunmamaktadır. Ancak model programın malzeme kütüphanesine dahil edilmiştir ve malzeme kodu hakkında bilgiler OpenSeesWiki internet kütüphanesinde yer almaktadır. Buna göre malzemenin bu çalışmada kullanılan kısmının komutu ve komutta yer alan değerlerin açıklaması Şekil 2.10'da verilmiştir.

| | |
|---|--|
| uniaxialMaterial ConfinedConcrete01 <i>Stag SsecType S_{fpc} S_{Ec} -eps_{cu} Sep_{scu} -nu S_{nu} SL1 S_{phis} SS S_{fyh} S_{Es0} S_{haRatio} S_{mu} S_{phiLon} -stRatio SstRatio</i> | |
| <i>tag</i> | Malzemeyi tanımlayan tam sayı |
| <i>secType</i> | Enine donatı konfigürasyonunu belirleyen tam sayı |
| <i>fpc</i> | Betonun silindir basınç dayanımı |
| <i>Ec</i> | Betonun elastisite modülü |
| <i>eps_{cu}</i> | Sargılı betonun kopmadaki birim kısalması |
| <i>nu</i> | Poisson oranı |
| <i>L1</i> | Etriyenin merkezinden geçen çizgiye göre çekirdek betonun kenar uzunluklarının toplamı |
| <i>phis</i> | Etriye çapı |
| <i>S</i> | Etriyeler arasındaki boyuna mesafe |
| <i>fyh</i> | Etriyenin akma dayanımı |
| <i>Es0</i> | Etriyenin elastisite modülü |
| <i>haRatio</i> | Etriyenin pekleşme oranı |
| <i>mu</i> | Etriyenin süneklik faktörü |
| <i>phiLon</i> | Boyuna donatının çapı |
| <i>stRatio</i> | Beton akma dayanımının silindir basınç dayanımına oranı |

Şekil 2.10. UniaxialMaterial ConfinedConcrete01 malzeme kodu (URL-2)

Bu çalışmada OpenSees'in temel kitabında yer almayan birçok malzeme modeline internet kütüphanesinden ve ya OpenSees'in sitesinde yer alan ve kullanıcıların iletişimini sağlayan mesaj platformundan ulaşılmıştır. Bu da OpenSees'in mevcut kaynaklarının her türlü problemi çözmek için yeterli olmadığını gösterir.

Programda kullanılan değerler deneyde kullanılan betonun değerleriyle aynı alınmıştır. Deneysel çalışmada belirtilmeyen stRatio değeri en geçerli beton modellerinden Hognestad (1951) beton modelinde olduğu gibi 0,85 alınmıştır ve her bir enine donatı konfigürasyonuna göre yeniden hesaplanması gereken *L* değeri her

iki program içinde hesaplanmıştır. UniaxialMaterial ConfinedConcrete01 beton modelinin OpenSees'in malzeme kütüphanesindeki diğer beton modellerinden en önemli farkı enine donatı özellikleri, yerleşimi ve donatı oranı değerleri gibi sargılı betonu tanımlayan değerleri içinde barındırıyor olmasıdır. Programda bulunun diğer birçok beton modeli akma dayanımı, birim deformasyon ve elastisite modülü gibi yalnızca betonla ilgili olan değerleri kullanmaktadır. Bu nedenle sargılı betonu tanımlayabilmek için en uygun malzeme modeli uniaxialMaterial ConfinedConcrete01 olarak seçilmiştir.

Betonarme kolondaki donatıyı modellemek için "BoucWen" malzeme modeli kullanılmıştır. Beton modeli gibi "uniaxial Material" sınıfında yer alan modelin kodu yine beton modelinde olduğu gibi internet kütüphanesinde yer almaktadır. Modelin komutu ve komutta yer alan değerlerin tanımı Şekil 2.11'de verilmiştir.

| uniaxialMaterial BoucWen <i>Stag Salpha Sko Sn Sgamma Sbeta SAo SdeltaA SdeltaNu SdeltaEta</i> | |
|---|--|
| <i>tag</i> | Malzemeyi tanımlayan tam sayı |
| <i>alpha</i> | Rijitlik oranı ($0 < \alpha < 1$) |
| <i>k₀</i> | Başlangıç elastisite modülü |
| <i>n</i> | Histeretik eğrinin doğrusal bölgeden doğrusal olmayan bölgeye geçişinin şeklini belirleyen parametre |
| <i>gamma, beta</i> | Histeretik eğrinin şeklini etkileyen parametreler |
| <i>A₀, deltaA</i> | Tanjant rijitliğini etkileyen parametreler |
| <i>deltaNu, deltaEta</i> | Dayanım ve rijitlik bozulmalarını belirleyen parametreler |

Şekil 2.11. UniaxialMaterial BoucWen malzeme kodu (URL-3)

BoucWen malzeme modelinin kodunda yer alan parametrelerin seçimi ilgili incelenen çalışmalarda birbirinden oldukça farklı değerlerin kullanıldığı görülmüştür (Leenen, 2002; Sireteanu ve diğ., 2009; Sengupta ve Li, 20011). Bunun nedeniyse model parametrelerinin elde edilen girdi-çıkış verilerinin istenen deney sonuçlarına uyumuna göre yeniden düzenlenebiliyor olmasıdır. Bu parametrelerin seçiminde deneme-yanılma, genetik algoritma gibi en iyi veriyi bulma yöntemleri daha önce

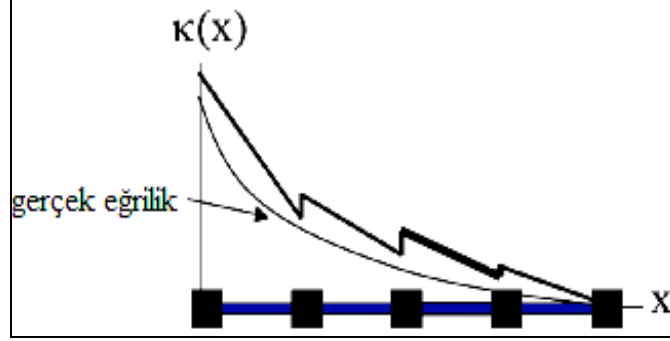
yapılan çalışmalarda kullanılmıştır (Sengupta ve Li, 2011). Bu çalışmada da deney sonuçlarıyla en iyi uyumu gösterecek şekilde uygun değerler seçilmiştir.

Koordinat eksen takımındaki yeri, mesnet koşulları ve malzeme modelleri bilinen betonarme kolonun kesitini tanımlamak için OpenSees programındaki kesit tiplerinden fiber kesit tipi kullanılmıştır. Dikdörtgen veya kare kesitler için kullanılan patch quad komutu eleman kesitinin küçük parçalara bölündüğünü bildiren komuttur. Donatı için kullanılan layer straight komutundaysa tanımlanan doğrultuda kaç adet donatı olduğu ve kullanılan donatı alanı bilgileri girilir. Malzeme modelleri tanımlanırken kullanılan tanımlayıcı tam sayılar (\$tag) kesit parçalarına istenen malzemenin atanması için kullanılır. Program patch komutuyla bölünen kesitin en az bir boyutunun en az iki parçaya bölünmesini zorunlu kılar. Bunun dışında yapılan bölme işlemlerinde program hata verir çünkü bu durum kesitin küçük parçalara bölünerek çözümlenmesi prensibine uymamaktadır.

OpenSees’de bir elemanı tanımlamanın 3 önemli adımı vardır. Öncelikle elemanın koordinat eksen takımındaki yeri ve mesnet koşulları tanımlanır. Daha sonra elemanın hangi malzemelerden oluştuğunu anlatan malzeme modelleri tanımlanır. Son olarak da elemanın kesit özellikleri, tanımlanan malzemelerin kesitteki yeri belirlenir. Bu aşamalardan sonra seçilen eleman modelinde daha önce tanımlanmış olan tüm bilgiler kullanılır ve eleman yükleme koşullarının tanımlanması için hazır duruma gelir. Bu çalışmada OpenSees’in eleman kütüphanesinde bulunan düğüm ve zemin modelleri hariç 21 adet eleman modelinden Displacement Based Beam Column Element modeli kullanılmıştır.

Model noktasal plastisitesi olan dönel yaya sahip elastik elemanların aksine plastisitenin eleman boyunca yayılmasına izin verir. Yayılı plastisite modelleri bütün eleman boyunca herhangi bir noktada akmanın olmasına olanak sağlar. Bu durum üzerinde yayılı yük bulunan elemanlar için oldukça önemlidir. Yerdeğiştirmeye dayalı (displacement-based) yaklaşım standart sonlu eleman yöntemlerini izler. Buna göre yaklaşık yerdeğiştirmelerin elde edildiği alandan kesit deformasyonlarının ara değerleri hesaplanır ve sonra elemanın denge koşullarının sağlanması için sanal yerdeğiştirme prensibi kullanılır. Yaklaşık doğrusal olmayan eleman tepkisi, sabit eksenel deformasyon ve doğrusal eğrilik dağılımı eleman uzunluğu boyunca

uygulanır (Terzic, 2011). Buna göre uygulanan yöntemin eleman üzerindeki gösterimi Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Yerdeğiştirmeye dayalı yaklaşımın şematik ifadesi (Terzic, 2011)

Elemanın çözüm yönteminde kullanılan integrasyon noktalarının sayısı kullanıcı tarafından belirlenir ve bu sayının 5’den az olmaması önerilir. Elemanı tanımlarken kullanılan bu modelin kodunda elemanın tam sayı olarak ifade edilmiş ismi (tag), hangi iki düğüm noktası arasında yer aldığı, integrasyon noktalarının sayısı, hangi kesite sahip olduğu ve daha önce tanımlanmış koordinat dönüşümü bilgisi yer alır.

Eleman modeli seçildikten sonra bütün bilgileri tamamlanmış olan modelin, yükleme koşulları belirlenir. OpenSees programının yük tanımlama bölümünde bulunan 4 farklı yükleme durumundan ikisi seçilmiştir. Hem 600kN eksenel basınç yüküne hemde yatay yönde değişken yerdeğiştirmeye maruz kalan deney elemanının modelinde, sabit eksenel yükü uygulamak için load komutuyla tanımlanan noktasal yükleme modeli seçilmiştir. Deneyde kolon, yatay yönde değişen yerdeğiştirme değerleri ile yüklenmiştir. Yatay yöndeki bu yükleme ise single point (sp) komutuyla tanımlanmıştır. Bu yükleme durumunun özelliği yatay yönde bir kuvvet değilde yerdeğiştirme uygulanmasına olanak sağlamasıdır. Kullanılan her iki yükleme modeli de plain Pattern olarak adlandırılan yükleme kümesi içinde tanımlanır. Buna göre yükleme komutlarının kullanılışı ve her bir komutun hangi bilgilere ihtiyaç duyduğu Şekil 2.13’de verilmiştir.

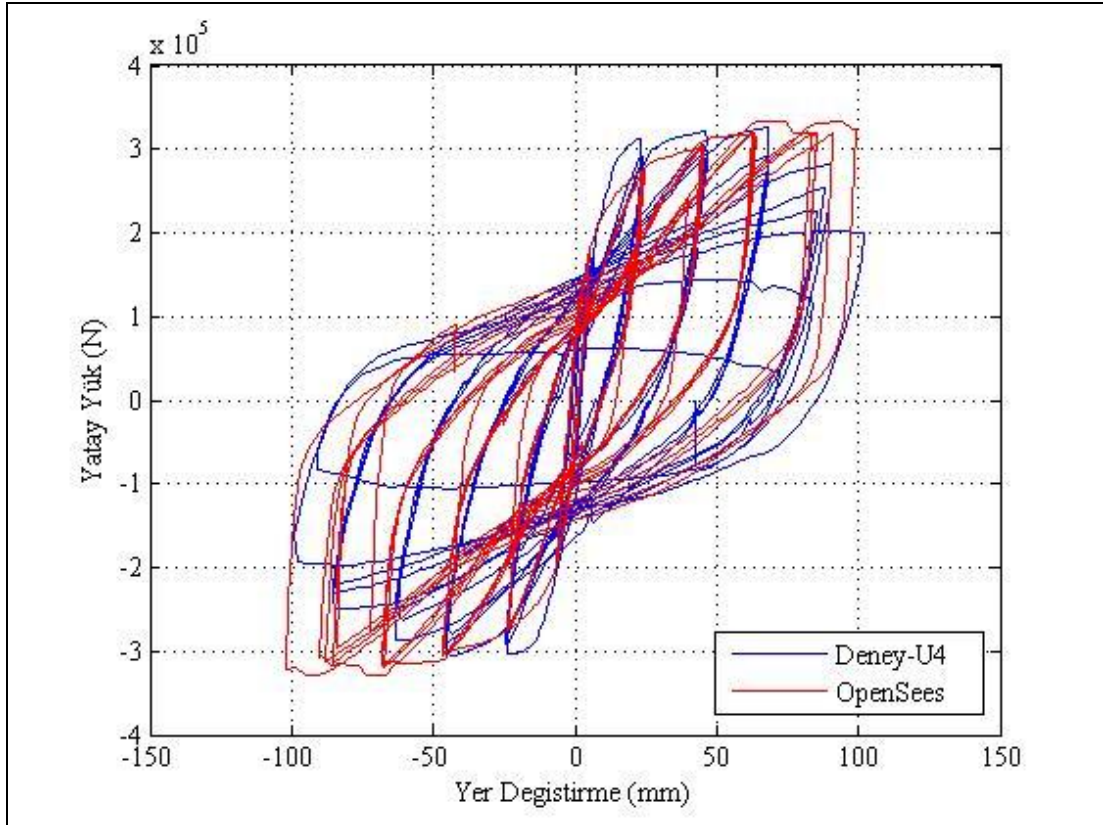
| | |
|---|---|
| pattern Plain \$tag Constant { | |
| load \$nodeTag \$loadValues | |
| } | |
| <i>tag</i> | Yükleme durumunun tanımlandığı tamsayı |
| <i>nodeTag</i> | Yükün uygulandığı noktayı belirten tamsayı |
| <i>loadValues</i> | Sırasıyla <i>x, y</i> ve <i>z</i> doğrultularında uygulanan yüklerin değeri |
| pattern Plain \$tag \$loadFileName { | |
| sp \$nodeTag \$dofTag \$dofValue | |
| } | |
| <i>loadFileName</i> | Uygulanan yükün yer aldığı metin dosyasının adı |
| <i>dofTag</i> | Yükün uygulandığı doğrultuyu belirten tamsayı |
| <i>dofValue</i> | Uygulanan yüke çarpım şeklinde etki eden sabit değer |

Şekil 2.13. Yükleme komutlarının kullanılışı (Mazzoni ve diğ., 2007)

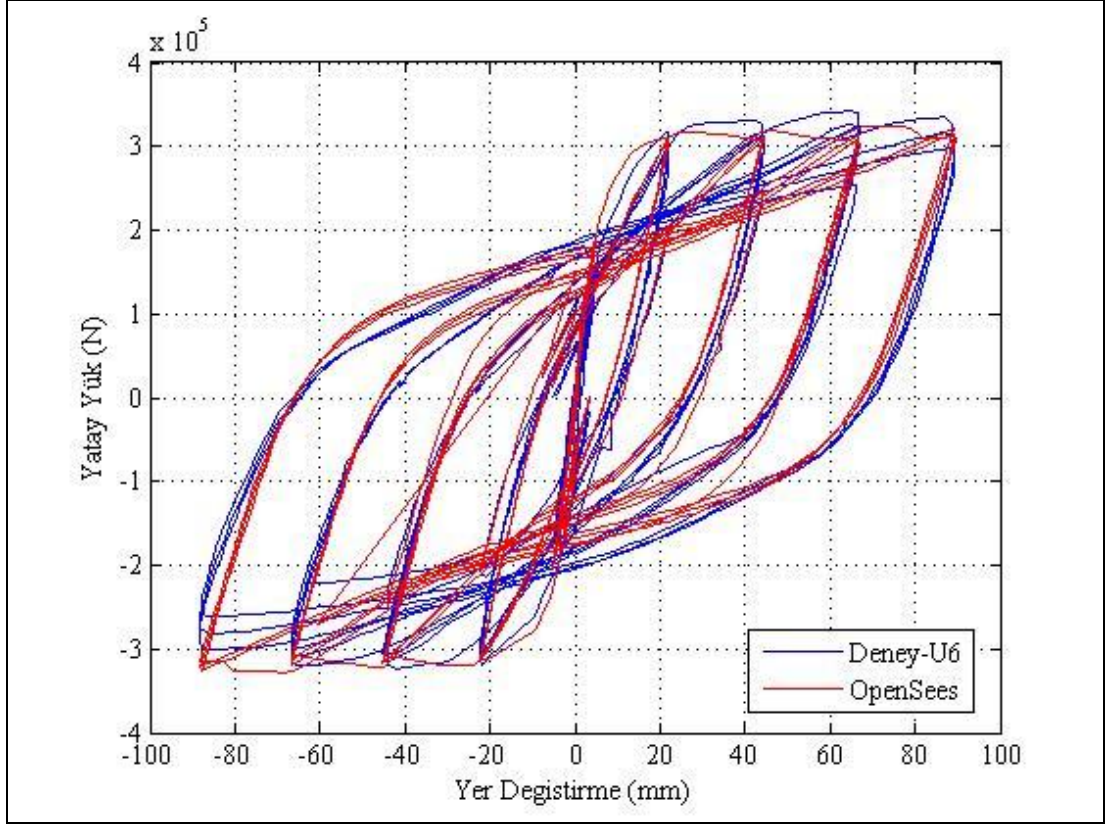
OpenSees programı, aynı kodun içinde Şekil 2.13’de gösterildiği şekilde tanımlanan yükleme durumlarının her biri için farklı analiz yöntemleri kullanılmasına olanak sağlar. OpenSees programının analiz kütüphanesinde her model için kullanılması zorunlu olan analiz nesnelere bulunmaktadır. Bunlar; modelin serbestlik derecesiyle ilgili olan eşitliklerin kullanıldığı *constraint* ve *numberer* komutu, analizdeki eşitliklerin çözüldüğü sistemi belirleyen *system* komutu, problemin çözümü için kullanılacak yöntemin belirlendiği *algorithm* komutu, bu yöntemin yakınsama testi için kullanılan *test* komutu, analiz türünün ve süresinin belirlendiği *analysis* ve *analyze* komutlarıdır. Analiz için kullanılan bu nesnelere modelle ve modelden elde edilen sonuçlara uygun olacak şekilde seçilmiştir.

Saatçioğlu ve Özcebe tarafından yapılan deneysel çalışmanın OpenSees programında deney verilerine uygun olarak modellenmesi ve analizinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonucuna en yakın sonuçları elde etmek için modelleme aşamasında farklı malzeme modelleri deneyerek en uygun sonucu veren malzeme modelleri seçilmiştir. Deneyde kullanılan yerdeğiştirmeye dayalı yükleme durumunun uygulanması için OpenSees

örnekleri arasında nadiren görülen yatay yönde yerdeğiştirme değerlerinin yüklendiği yükleme durumu seçilmiştir. Bu yüklemede PEER veri tabanında bulunan U4 ve U6 deneylerinin sonuçlarından yerdeğiştirme değerleri alınarak kolonun serbest ucu olan 2 numaralı düğümüne yatay yük olarak etki ettirilmiştir. Analiz sonrasında 2 numaralı düğümün yerdeğiştirme değerlerinin uygulanan değerlerle aynı olduğu görüşmüştür. Analiz sonuçları kolonun serbest ucundaki yerdeğiştirme ve yatay yük değerleri olarak deney sonuçlarına benzer şekilde kaydedilmiştir. Buna göre sırasıyla U4-SAOZU4 ve U6-SAOZU6 deney ve model sonuçları Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.14. U4 numunesinin ve SAOZU4 modelinin yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 2.15. U6 numunesinin ve SAOZU6 modelinin yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’de verilen yatay yük-yer değiştirme eğrileri, deney ve model sonuçlarının birbirine oldukça benzer olduğunu göstermiştir. U4 ve U6 numunelerinin OpenSees programında oluşturulan modellerinden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla benzer olması, yapılan modellemenin doğru olduğunu gösterir.

Yapılan bu çalışmada bir deney elemanın modellenmesi ve yaklaşık sonuçların elde edilmesi, Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen hibrit birleşim modelinin test edilmesi açısından güvenilir bir model oluşturulduğu söylenebilir. SAOZU4 ve SAOZU6 modellerinden SAOZU6 modeli, elde edilen değerler deney sonuçlarına daha yakın olduğu için hibrit modelin uygulanacağı kolon modeli olarak seçilmiştir. SAOZU4 modeliyse farklı özelliklere sahip bir başka kolonunda doğru sonuç verdiğini görmek için oluşturulmuştur.

3. ÖZDEN ve ERTAŞ HİBRİT BİRLEŞİM MODELİNİN UYGULANMASI

Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan U6 kolon deneyinin modellenip benzer sonuçların elde edilmesiyle, Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen hibrit modelin OpenSees programında tanımlanacak kolon modelinin de güvenli bir şekilde kullanılabilceği öngörölmüştür.

Bu bölümde önerilen hibrit birleşim modeli hakkında bilgi, modelin OpenSees programına C++ programlama dili kullanılarak eklenen yeni malzeme modelleriyle ifade edilmesi ve elde edilen malzeme modellerinin SAOZU6 programında modellenen kolona uygulanışı anlatılacaktır.

Yapılan bu çalışmada Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen hibrit birleşim modelinde yer alan yumuşak donatının içeriğinin değişiminin kolon davranışına etkisi incelenmiştir.

3.1. Özden ve Ertaş Hibrit Birleşim Modeli

Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmada daha önce Pampanin tarafından önerilmiş olan denge denklemleri yaklaşımı temel alınmıştır. Pampanin ve diğ., (2001)'nin çalışmasında mevcut analiz yöntemlerinden farklı olarak, denge ve uygunluk koşulları için geçerli olacak bir deneme yanılma yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemin “aderanssız” kavramını içeren ve aşağıda belirtilen türdeki birleşimlerin herhangi biri için geçerli olduğu kabul edilmiştir (Pampanin ve diğ., 2001).

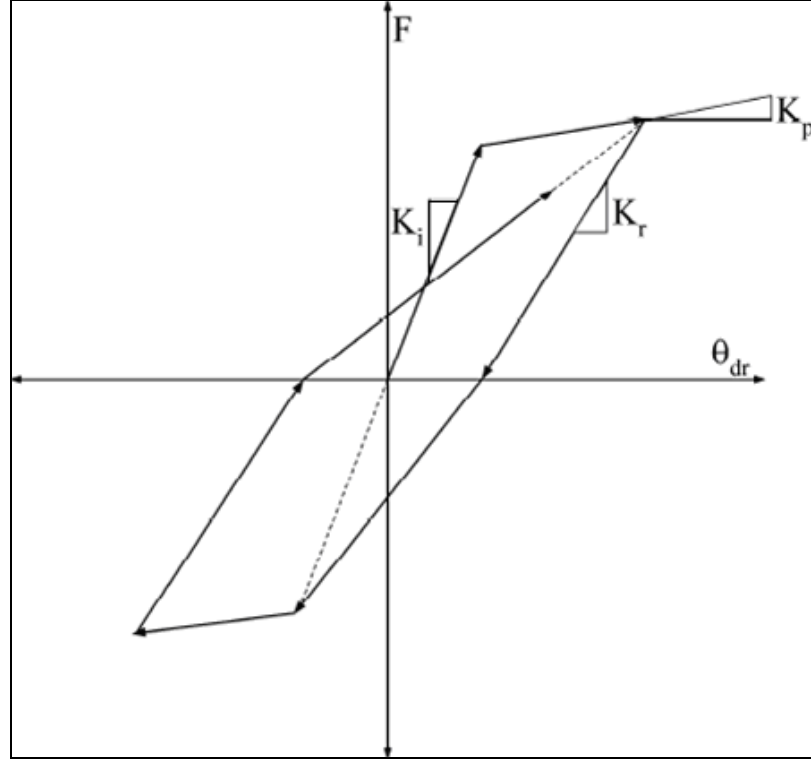
- Kısmi aderanslı ve ya aderanssız tendon/donatı
- Aderanssız boyu olan yumuşak donatı
- Bu iki tür detayın içinde bulunduğu hibrit birleşim

Özden ve Ertaş (2010) temel aldıkları bu deneme yanılma yaklaşımına kısmi aderanslı yumuşak çeliğın aderans kaybına uğrayan kısmının tahmini uzunluğunun elde edildiği denklemi de dahil etmişlerdir. Ayrıca yeni bir gelişme olarak kalıcı

Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmada daha önce yapılmış olan deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmak üzere hibrit birleşimin çevrimsel tekrarlı yükler altında davranışını ifade eden histeretik bir birleşim modeli önerilmiştir. Önerilen model literatürde bulunan üç histeretik model temel alınarak oluşturulmuştur. Bunlar, iki doğrulu kendinden merkezlenebilen yay modeli, geliştirilmiş Takeda modeli ve bayrak şekilli (flag-shaped) histeretik modelidir.

İki doğrulu kendinden merkezlenebilen yay (bilinear self-centering spring) modelinin aderanssız ard-germe donatılarının davranışını temsil etmek için uygun olduğu Priestley ve Tao tarafından 1993 yılında yapılan deneysel çalışma sonucu kanıtlanmıştır. Bu modelde artık yerdeğiştirme ve plastik deformasyon oluşmaz. Yükleme ve boşaltma eğrileri çakışık ve doğrusaldır. Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen hibrit birleşimdeki aderanssız ard germe donatısının davranışı bu model ile temsil edilmiştir.

Takeda modeli geleneksel betonarme çerçeve elemanları temsil etmek için yaygın olarak kullanılan histeretik modeldir. Takeda (1970) yaptığı çalışmada güçlü yer hareketlerine maruz kalan betonarme yapıların tepkisini gerçekçi olarak ifade edebilmek için dinamik yüklemeye maruz bırakılan betonarme kolonu test etmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda farklı rijitlikleri ve enerji yutma karakteristiği olan yapıları temsil eden histeretik modeli sunmuştur. Önerilen histeretik model Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Geliştirilmiş Takeda modeli (Özden ve Ertaş, 2010)

Takeda (1970) modeli iki doğrusal bölgeden oluşur. Rijitlik kaybı olan modelde yükleme boşaltma rijitlikleri birbirinden farklıdır. K_i ve K_p sırasıyla başlangıç ve akma sonrası rijitlikleridir. Boşaltma rijitliği K_r ;

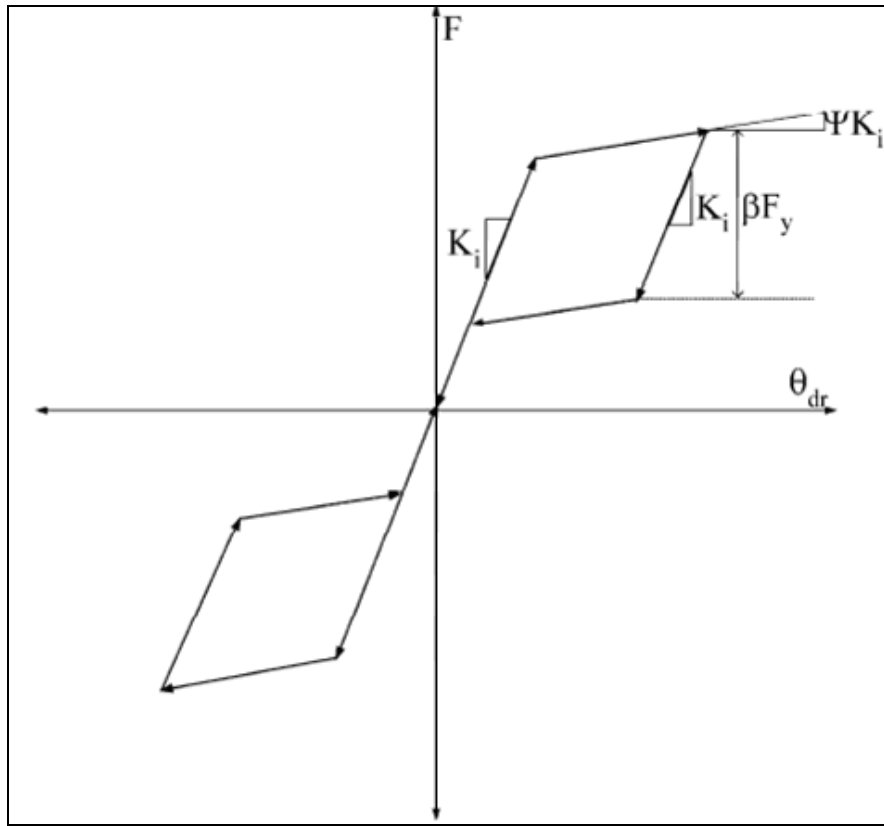
$$K_r = \frac{K_i}{\mu^\gamma} \quad (3.3)$$

başlangıç rijitliğine bağlı olarak ifade edilmiştir. Betonarme eleman ve yapılar için γ katsayısı 0,3 olarak alınır. Burada, d_{max} son histeretik çevrimde elde edilen en büyük yerdeğiştirme, d_y akmadaki yerdeğiştirme olmak üzere μ yerdeğiştirme sünekliğinin ifadesi;

$$\mu = \frac{d_{max}}{d_y} \quad (3.4)$$

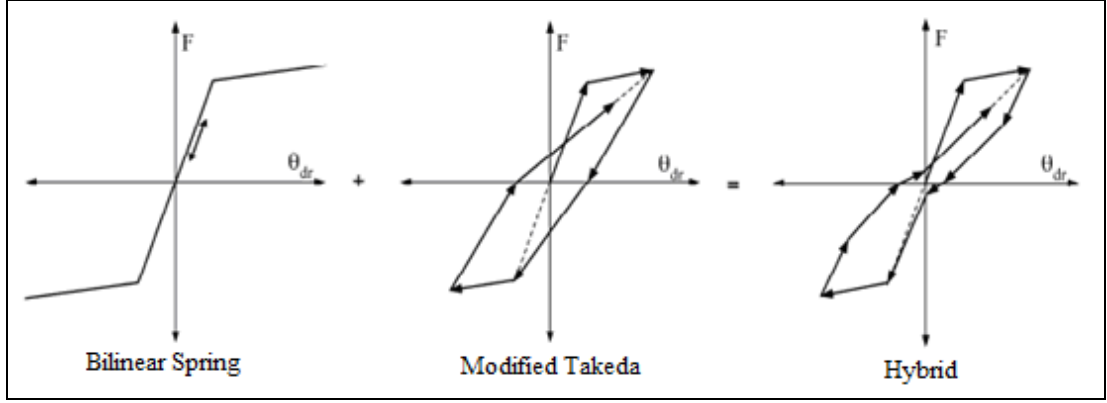
olarak verilmiştir (Christopoulos, 2003). Bayrak şekilli histeretik modelin kendinden merkezlenebilen ard germeli elemanlar için Christopoulos tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde akma sonrası rijitlik oranı Ψ ve enerji yutma katsayısı β yumuşak çeliğin gerilme-birim deformasyon davranışına ve yumuşak çeliğin birleşimin eğilme

momenti kapasitesine olan katkısına göre belirlenir. Tipik ard germeli birleşim için bu değerler sırasıyla 0,1 ve 0,7 olarak önerilmiştir (Christopoulos, 2003). Bayrak şekilli modelin kendinden merkezlenme özelliği nedeniyle kalıcı yerdeğiştirmeler doğal olarak göz ardı edilir. Ancak Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmada yumuşak çeliğin birleşimin eğilme momentine katkısını %30'dan fazla olduğu numunelerde kalıcı yerdeğiştirmelerin oluştuğu bildirilmiştir. Bu nedenle bayrak şekilli modelin yumuşak çelik içeriği fazla olan hibrit birleşimlerin histeretik davranışını ifade etmek için yeterli değildir (Özden ve Ertaş, 2010).



Şekil 3.3. Bayrak şekilli model (Özden ve Ertaş, 2010)

Şekil 3.3'de görülen histeretik modelde rijitlik bozulması ve kalıcı yerdeğiştirmeler görülmez. Ancak bayrak şekilli modelin boşaltma kolunun dik kenarının ifadesinde yer alan eşitlik geliştirilerek önerilen histeretik modele dahil edilmiştir. Önerilen modelin yüklem kolu aderanssız ard germe donatısını temsil eden iki doğrulu kendinden merkezlenebilen yay modeli ve betonarme kısmı temsil eden geliştirilmiş Takeda modelinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur (Özden ve Ertaş, 2010). Hibrit model ve bileşenleri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Hibrit modelin bileşenleri (Özden ve Ertaş, 2010)

Aderanssız ard germe donatısının davranışını temsil eden yay modeli dışında kalan kısım bir döküm betonarme elemanların davranışı gibidir ve böyle yapılara kısmi betonarme elemanlar denir. Hibrit sistemler ve klasik betonarme sistemler arasındaki bu benzerlik birleşimdeki yumuşak donatı içeriğinin değişimine göre belirlenir. Yumuşak donatının birleşimin moment kapasitesine olan katkısı Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilere göre karekök içerisinde ($\alpha^{0,5}$) verilmiştir, buna göre,

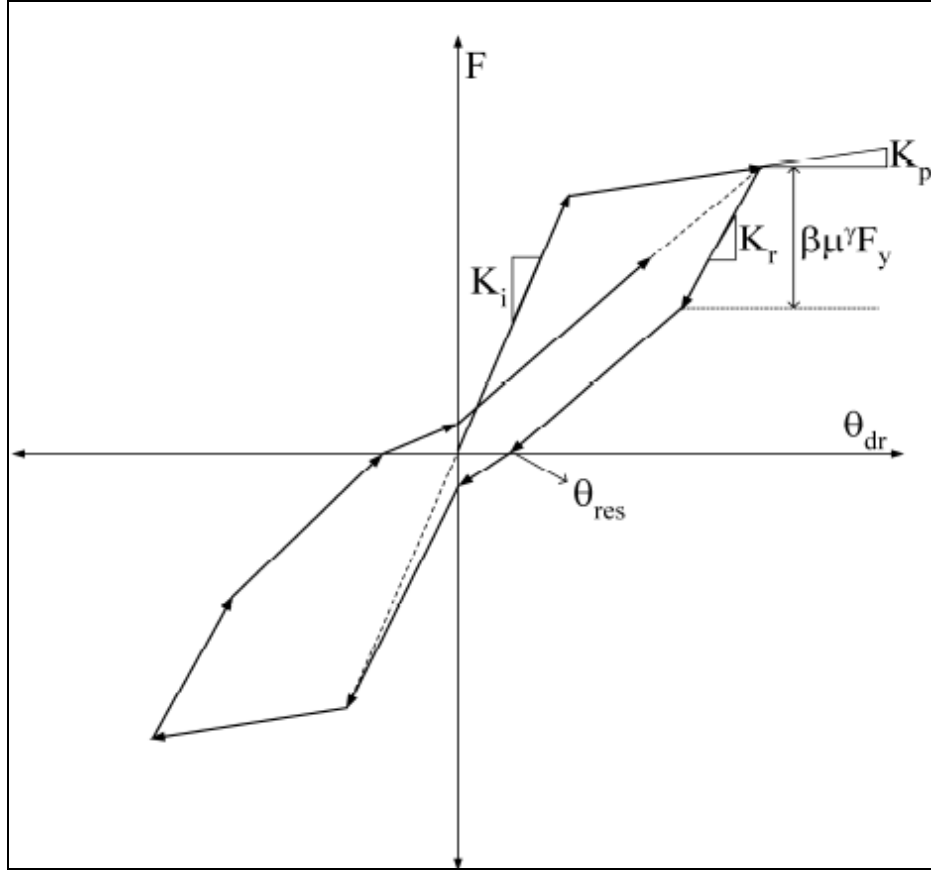
$$\alpha = \frac{M_{ms}}{M_c} \quad (3.5)$$

olarak verilmiştir. Burada M_{ms} yumuşak donatının eğilme momenti ve M_c birleşimin eğilme momenti kapasitesidir. Önerilen modelin boşaltma kolunun analitik ifadesi geliştirilmiş Takeda modeli ve bayrak modelinin birleşimi olarak varsayılmıştır. Boşaltma kolunun rijitliği Takeda modeli ile benzerdir ancak γ değeri yumuşak donatının, birleşimin eğilme momenti kapasitesine olan katkısı da dahil edilerek hesaplanır. Buna göre,

$$\gamma = 0,3 \times \alpha^{0,5} \quad (3.6)$$

olarak verilmiştir. Denklem (3.6)'ya göre yumuşak donatının katkısı 1 olduğunda $\gamma=0,3$ olur ve bu klasik betonarme yapıyı temsil eder. Diğer taraftan eğer yumuşak donatının katkısı 0 ise $\gamma=0$ olur ve bu saf ard germeli sistemi temsil eder (Özden ve Ertaş, 2010). Yükleme ve boşaltma kolunun farklı histeretik modellerin bir araya

gelmesiyle temsil edildiği Özden ve Ertaş (2010) hibrit modeli Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Hibrit model (Özden ve Ertaş, 2010)

Özden ve Ertaş (2010) hibrit modelinde boşaltma rijitliği Takeda (1970) modeline benzer olarak ifade edilmiştir ancak boşaltma kolunun dik kenarının ifadesi bayrak şekilli modelden farklı verilmiştir. Bu ifadede yer alan β değeri enerji tüketme katsayısıdır. Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan deney sonuçlarına göre enerji tüketme katsayısının (β) 0,3 ile 0,75 arasında değişen değerler aldığı ve bu değerleri yumuşak donatı içeriğine göre değiştiği görülmüştür. Hibrit birleşim modelinin histeretik eğrisinde görülen bir diğer önemli değer ise kalıcı kat ötelenmesi değeridir. Buna göre λ 0,1 ile 1,0 arasında değişen ve deney sonuçlarından elde edilmiş bir katsayı olmak üzere kalıcı kat ötelenmesinin ifadesi,

$$\theta_{res} = \lambda \alpha^{0,5} \left(1 - \frac{K_p}{K_i} \right) (\mu - 1) \theta_y \quad (3.7)$$

olarak verilmiştir. Burada θ_y akmadaki kalıcı kat ötelenmesi değeridir. Düşük yumuşak donatı içeriğine sahip hibrit birleşimlerde kalıcı kat ötelenmesi önemsiz seviyede kabul edilmiştir (Özden ve Ertaş, 2010).

Önerilen histeretik modelin doğruluğunu irdelemek için 4 farklı yumuşak donatı içeriğine sahip numune test edilmiştir. Bu numuneler yumuşak donatının moment kapasitesinin birleşimin moment kapasitesine oranı %10, 30, 50, ve 65 olmak üzere PTM10, PTM30, PTM50 ve PTM65 olarak adlandırılmıştır. PTM10 numunesi yumuşak donatının kopma değeri hakkında iyi sonuç vermiş ancak aderans kaybına uğrayan bölgenin uzunluğu hakkındaki öngörü deneysel değerden daha büyük çıkmıştır. PTM30 ve PTM50 numunelerinde deneysel ve sayısal sonuçlar aynı çıkmış ve önerilen modelin kalıcı kat ötelenmesi hakkında iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır. PTM65 numunesinin davranışı bir döküm eleman davranışı ile büyük ölçüde aynı olmuştur. Enerji tüketme kapasitesi hakkında elde edilen sonuçlarsa PTM10 numunesi dışında, öngörülene çok yakın çıkmıştır (Özden ve Ertaş, 2010).

Elde edilen bu sonuçlara bakılarak yumuşak donatılı aderanssız ardgermeli birleşimlerin test sonuçlarıyla, önerilen hibrit modelin birbirine iyi uyum sağladığı görülmüştür. Ayrıca enerji yutma katsayısının yumuşak donatı katkısının kareköküyle direk olarak ilgili olduğu ve aynı şekilde kalıcı deformasyon ve yumuşak donatı katkısı arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla yumuşak donatı oranı büyük olan birleşimlerin enerji yutma kapasitelerinin daha fazla olduğu elde edilen sonuçlardan çıkarılmıştır. Çalışmanın sonunda, önerilen histeretik modelin, hibrit birleşimlerin ve hibrit birleşimli önüretim beton çerçevelerin doğrusal olmayan tepkisinin öngörüsünde geçerli olduğu belirtilmiştir (Özden ve Ertaş, 2010).

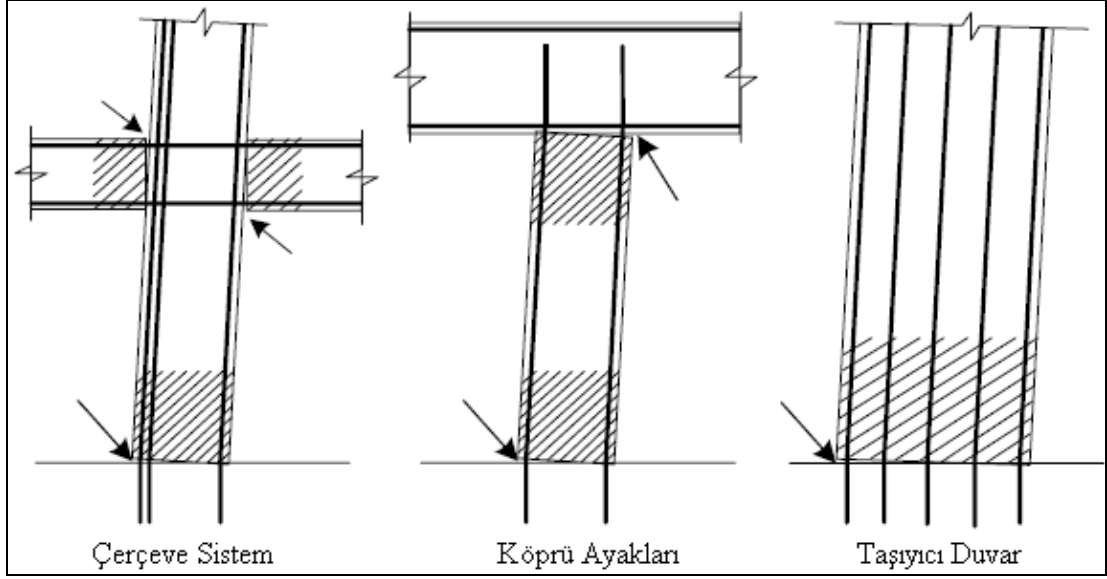
Yapılan bu çalışmada Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen hibrit birleşim modeli OpenSees programı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar Özden ve Ertaş (2010) tarafından sunulan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3.2. Hibrit Birleşimde Uygulanan Malzeme Modelinin Oluşturulması

Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmalar sonucu ön üretim beton kolon-kiriş birleşim bölgeleri için ard germeli birleşim modelinden farklı olarak içinde yumuşak donatının da bulunduğu hibrit birleşim modeli önerilmiştir. Hibrit birleşimdeki yumuşak donatının birleşimin moment kapasitesine olan katkısı α 'nın değişen değerlerine karşılık deney elemanının davranışı incelenmiştir. Ayrıca önerilen bu yeni histeretik modelde deney sonuçlarıyla benzer şekilde kalıcı deformasyonların olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada OpenSees programında oluşturulan kolon modelinde kullanılmak üzere Özden ve Ertaş tarafından önerilen histeretik modelin oluşturulduğu malzeme modelleri C++ programı kullanılarak kodlanmıştır. OpenSees'in malzeme kütüphanesinde önerilen bu yeni histeretik modeli tarifleyecek tek bir malzeme modeli bulunmamaktadır. Ayrıca hibrit birleşim modelini oluşturan histeretik modellerden Takeda modeli de OpenSees'de bulunan malzeme modelleri arasında yoktur. Bu nedenle mevcut malzeme modellerinden Takeda modeline en yakın malzeme modeli seçilerek, C++ kodunda yapılan değişikliklerle Takeda modelini temsil edecek yeni bir model oluşturulmuştur. Yine hibrit birleşim modelinde kullanılan bayrak şekilli histeretik modeli SelfCentering Material olarak OpenSees'in malzeme kütüphanesinde yer almaktadır. Ancak hibrit birleşim modelinde birçok parametreye etki eden yumuşak donatının katkısı bu modelde bulunmadığından, bu malzeme kodu da C++ programı kullanılarak hibrit birleşimdeki histeretik modele benzer hale getirilmiştir.

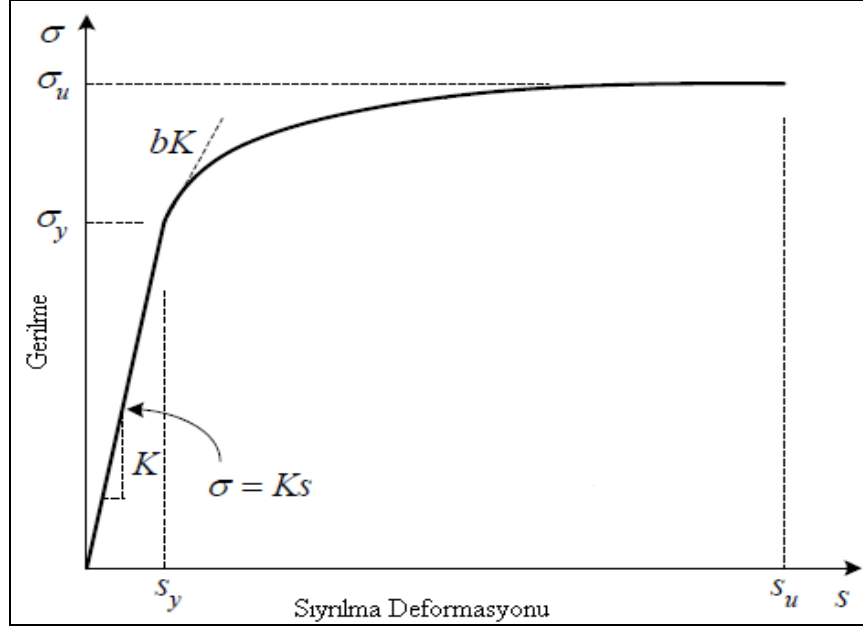
Yeni malzeme modeli oluşturmak için kullanılan mevcut malzeme modellerinden ilki Takeda modelinin oluşturulduğu Bond_SP01 malzemesidir. Bu malzeme modeli 2004 yılında Zhao ve Sritharan tarafından yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkarılmıştır. Zhao ve Sritharan (2004), orta ve büyük şiddetteki depremlere maruz kalan betonarme yapıların yapısal davranışının ve bununla ilişkili olan eleman birleşim bölgelerinde meydana gelen bölgesel elastik olmayan deformasyonların doğru ifade edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu tür deformasyonların olduğu bölgelerin üzerinde gösterildiği yapı türleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Deprem etkisinde elastik olmayan deformasyonların oluştuğu bölgeler ve yapı türleri (Zhao ve Sritharan, 2004)

Şekil 3.6’da taralı olarak gösterilen bölgelerde oluşan deformasyonların iki nedeni vardır. Bunlar boyuna donatı ve betonda elastik olmayan birim deformasyonlara neden olan eğilme deformasyonları ve birleşim arayüzündeki donatının sıyrılmasından kaynaklanan dönme davranışdır (Zhao ve Sritharan, 2004). Yapılan bu çalışmada deprem nedeniyle birleşim bölgesinde oluşan deformasyonlara neden olan bu iki etki göz önüne alınarak Bond_SP01 malzeme modeli oluşturulmuştur.

1996 yılında Sritharan ve diğ., tarafından betonarme, T şeklinde köprü ayağı modeli kurularak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra bu çalışmalardan elde edilen deneysel sonuçlardan faydalanılarak davranışı doğru ifade edecek analitik model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model birleşim bölgesindeki sıyrılma davranışı, bu bölgede kullanılan donatının ankraj boyu ve aderans etkilerini dikkate alarak modellenmiştir (Zhao ve Sritharan, 2004). OpenSees programının malzeme kütüphanesine de eklenmiş olan Bond_SP01 malzemesinin gerilme-birleşimdeki sıyrılma deformasyonu eğrisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Bond_SP01 malzeme modeli (Zhao ve Sritharan, 2007)

Başlangıç rijitliği K olarak tanımlanmış bu modelde akmadan sonraki kısmın rijitliği ise K 'ya bağlı olarak ifade edilmiştir. Bond_SP01 malzeme modeli OpenSees malzeme kütüphanesinde uniaxialMaterial grubuna dahildir. Modellemede kullanılan komutu ve kullanıcının girmesi gereken değerlerin ifadesi Şekil 3.8'de verilmiştir.

| uniaxialMaterial Bond_SP01 $\$tag$ $\$Fy$ $\$Sy$ $\$Fu$ $\$Su$ $\$b$ $\$R$ | |
|---|---|
| tag | Malzemeyi tanımlayan tam sayı |
| Fy | Donatının akma dayanımı |
| Sy | Akma gerilmesine karşılık gelen sıyırılma deformasyonu |
| Fu | Donatının kopma dayanımı |
| Su | Kopma dayanımına karşılık gelen sıyırılma deformasyonu |
| b | Pekleşme bölgesindeki rijitliğin başlangıç rijitliğine oranı |
| R | Tekrarlı ve çevrimsel yüklemelerde oluşacak sıkıştırma (pinching) faktörü |

Şekil 3.8. UniaxialMaterial Bond_SP01 malzeme kodu (URL-4)

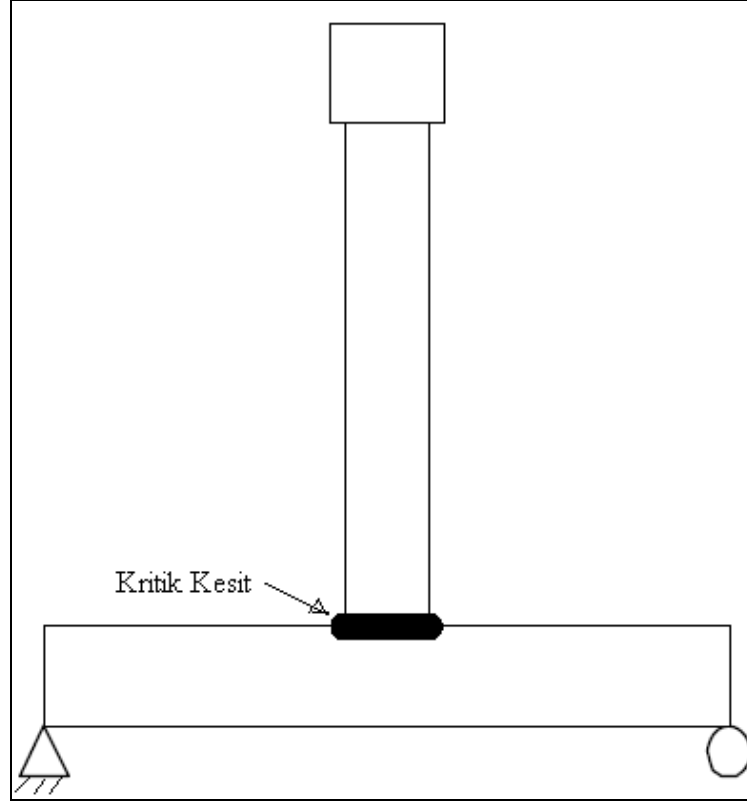
Zhao ve Sritharan (2004) tarafından yapılan çalışmada akma dayanımı bilinen çelik malzemenin bu akma dayanımına karşılık gelen sıyrılma deformasyonunun bulunması için,

$$s_y (\text{mm}) = 2,54 \left(\frac{d_b (\text{mm})}{8437} \frac{f_y (\text{MPa})}{\sqrt{f_c'} (\text{MPa})} (\alpha + 1) \right)^{1/\alpha} + 0,34 \quad (3.8)$$

amprik denklemi verilmiştir. Burada d_b donatı çapı, f_c' beton basınç dayanımı ve α birleşimdeki aderans kayma ilişkisini belirleyen parametredir. α parametresi için 0,4 değeri alınması önerilmiştir (URL-5). Aynı ifadenin inç cinsinden denklemi de mevcuttur ancak bu çalışmada SI birim sistemi kullanıldığı için mm olarak ifade edilmiş Denklem (3.8) kullanılmıştır. Malzeme modeli tanımlanırken gerek duyulan diğer değerlerden $F_u=1,5F_y$ ve $s_u=30\sim 40s_y$ olarak verilmiştir. Rijitlik azaltma faktörü $b=0,3\sim 0,5$ arasında, sıkıştırma faktörü $R=0,5-1,0$ arasında değişen değerler almıştır (Zhao ve Sritharan, 2007).

Yeni malzeme modelinin oluşturulmasında kaynak olarak bu malzeme modelinin kullanılmasının önemli nedenlerinden biri, bu modele benzer olarak Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmada kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki sıyrılma davranışının ve aderans etkilerinin göz önüne alınmış olmasıdır.

Zhao ve Sritharan (2004) tarafından yapılan çalışmada malzeme modelinin dahil edildiği ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmak üzere modellemenin yapıldığı OpenSees programı kullanılmıştır. Daha sonra modelden elde edilen sonuçlarla deney sonuçları karşılaştırılarak malzeme modelinin doğruluğu kanıtlanmıştır. 1996 yılında Sritharan ve diğerleri tarafından yapılan T şeklinde betonarme köprü elemanı OpenSees programındaki modeli Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Zhao ve Sritharan'ın oluşturduğu OpenSees modeli (Zhao ve Sritharan, 2007)

Şekil 3.9'da görülen OpenSees modeli bu çalışmanın modelleme ve analiz kısmında anlatılan Saatçioğlu ve Özcebe (1989)'nin deney çalışmasından modellenen konsol kolonla büyük ölçüde benzerdir. Zhao ve Sritharan (2004) kolon-kiriş birleşim bölgesi için önerdikleri malzeme modelini test etmek için T şeklindeki deney elemanını Şekil 3.9'daki gibi modellemişlerdir. Bu durum Özden ve Ertaş (2010) tarafından kolon-kiriş birleşim bölgeleri için önerilen histeretik modelin konsol kolonun temel kirişine bağlandığı kesite uygulanmasının kavramsal olarak yanlış olmayacağını göstermiştir. Bu açıdan Zhao ve Sritharan (2004) tarafından yapılan çalışma hem malzeme modelinin kullanılması hem de eleman modelinde benzerlik taşıması yönünden önemli katkı sağlamıştır.

Bond_SP01 malzeme modelinde gerekli değişiklikler yapılarak Takeda modeline benzer modelin oluşturulması için ilk olarak Bond_SP01 malzemesinin C++ kaynak kodları elde edilmiştir. Daha sonra koda tanımlanan değişkenlerin modelin hangi kısımlarını etkilediği anlaşıldıktan sonra Takeda modeline benzer hale getirilmesi için boşaltma kolonun eğimi değiştirilmiştir. Bond_SP01 malzemesinin histeretik

modelinde boşaltma kolunun eğimi başlangıç eğimiyle aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Ancak hibrit birleşim modelinin bileşenlerinden Takeda modelinin boşaltma rijitliği başlangıç rijitliğinin bir fonksiyonu olarak Denklem (3.3)'deki gibi başlangıç rijitliğinin μ^γ değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Bond_SP01 kaynak kodunda başlangıç rijitliğinin ifade edildiği E_0 değeri μ^γ 'ya bölünerek boşaltma rijitliği,

$$E_r = \frac{E_0}{\mu^\gamma} \quad (3.9)$$

olarak yeniden ifade edilmiştir. Denklem (3.9)'da kullanılan yeni ifadelerin elde edilmesi için öncelikle yumuşak donatı oranına bağlı olarak değişen γ değeri Denklem (3.6)'daki gibi ifade edilmiştir. Yumuşak donatı oranı (α) ve yerdeğiştirme sünekliği (μ) değerlerinin kullanıcı tarafından girilmesi istendiğinden bu değişkenler Şekil 3.8'de verilen uniaxialMaterial Bond_SP01 komutuna eklenerek uniaxialMaterial Ozden_Ertas malzeme modeli oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan bu malzemenin OpenSees'de yer alan komutu ve komutta adı geçen değişkenlerin tanımı Şekil 3.10'da verilmiştir.

| uniaxialMaterial Ozden_Ertas \$tag \$Fy \$Sy \$Fu \$Su \$b \$R \$alpha \$mu | |
|--|---|
| <i>tag</i> | Malzemeyi tanımlayan tamsayı |
| <i>Fy</i> | Donatının akma dayanımı |
| <i>Sy</i> | Akma gerilmesine karşılık gelen sıyrılma deformasyonu |
| <i>Fu</i> | Donatının kopma dayanımı |
| <i>Su</i> | Kopma dayanımına karşılık gelen sıyrılma deformasyonu |
| <i>b</i> | Pekleşme bölgesindeki rijitliğin başlangıç rijitliğine oranı |
| <i>R</i> | Tekrarlı ve çevrimsel yüklemelerde oluşacak sıkıştırma (pinching) faktörü |
| <i>alpha</i> | Yumuşak donatı oranı |
| <i>mu</i> | Yerdeğiştirme sünekliği |

Şekil 3.10. UniaxialMaterial Ozden_Ertas malzeme kodu

Yeni oluşturulan bu malzeme kodu her birim sistemi için uygundur ve boşaltma kolunun rijitliği Takeda modelinde belirlenen denklemle ifade edilmiştir. Takeda modeline ek olarak önerilen histeretik modelin en önemli parametrelerinden yumuşak donatı oranı malzeme koduna dahil edilmiştir. hibrit birleşimde kullanılan Takeda modeline benzer malzeme modeli yumuşak donatı oranından etkilenecek şekilde ifade edildikten sonra, boşaltma kolunu etkileyen bayrak şekilli histeretik modeli uygun şekilde değiştirilerek hibrit modeli oluşturan ikinci malzeme elde edilmiştir.

OpenSees'in malzeme kütüphanesinde uniaxialMaterial SelfCentering olarak tanımlanmış malzeme modeli Christopoulos ve diğ., tarafından 2008 yılında OpenSees'in kütüphanesine eklenmiştir. Deprem etkisi altındaki yapıların, performansa dayalı dizaynında yapabilecekleri en büyük deformasyonu yapmaları ve enerji yutma kapasitelerinin fazla olması istenir. Aynı zamanda oluşan deformasyonlar sonucu ortaya çıkan kalıcı kat ötelenmeleri yapının performansı hakkında bilgi verir (Christopoulos ve diğ., 2003). Bu durumda kalıcı kat ötelenmeleri performansa dayalı dizayn prosedürleri için kullanılan bir parametre haline gelir. Ancak Christopoulos ve diğ., (2003) tarafından önerilen bayrak şekilli histeretik model ile kalıcı deformasyonlar ortadan kaldırılmıştır. Bayrak şekilli histeretik modeli, kendinden merkezlenebilme özelliğine sahip birçok sönümleyicide, moment aktarabilen çelik çerçevelerde kullanılmıştır. Tremblay ve diğ., (2008) tarafından yapılan çalışmadaysa kendinden merkezlenebilme davranışı ön-germeli fiber tendonlarla sağlanmıştır. Kendinden merkezlenebilen bayrak şekilli histeretik modelin yük-kalıcı kat ötelenmesi grafiği Şekil 3.3'de verilmiştir. Bu malzeme modelinin yük-kalıcı kat ötelenmesi eğrisinin başlangıç eğimi ve boşaltma kolunun eğimi birbirine eşittir. Ayrıca modelde rijitlik bozulması yoktur. Akmadan sonrası rijitlik de yine başlangıç rijitliğine bağlı olarak,

$$K_p = \psi K_i \quad (3.10)$$

İfade edilmiştir ve burada K_p akmadan sonraki rijitlik ψ akma sonrası rijitlik oranıdır. Bu değer öngermeli sistemler için $\psi=0,1$ şeklinde ifade edilmiştir (Christopoulos ve diğ., 2003). 2008 yılında OpenSees programına dahil edilmiş olan bayrak şekilli

histeretik modelinin OpenSees programındaki komutu ve komutta kullanıcıdan istenen değişkenlerin açıklaması Şekil 3.11’de verilmiştir.

| uniaxialMaterial SelfCentering <i>\$tag \$k1 \$k2 \$sigAct \$beta <\$epsSlip></i> | |
|--|--|
| <i><\$epsBear> <rBear></i> | |
| <i>tag</i> | Malzemeyi tanımlayan tamsayı |
| <i>k1</i> | Başlangıç rijitliği |
| <i>k2</i> | Akmadan sonraki rijitlik ($0 < k2 < k1$) |
| <i>sigAct</i> | Aktive eden gerilme veya kuvvet |
| <i>beta</i> | Bayrak-şekli histeretik model parametresi |
| <i>epsSlip</i> | Sıyırılma deformasyonu (isteğe bağlı) |
| <i>epsBear</i> | Eğilme deformasyonu (isteğe bağlı) |
| <i>rBear</i> | Eğilme rijitliğinin başlangıç rijitliğine oranı (isteğe bağlı) |

Şekil 3.11. UniaxialMaterial SelfCentering malzeme kodu (URL-6)

Şekil 3.6’da OpenSees komutu verilen uniaxialMaterial SelfCentering malzemesinin C++ kaynak kodu elde edilerek, bayrak şekilli histeretik modeli hibrit birleşim için önerilen histeretik modelin Takeda modeli dışında kalan kısmını ifade etmek için geliştirilmiştir. C++ kodu incelenerek değişkenlerin histeretik modeli nasıl etkilediği anlaşıldıktan sonra hibrit modelin boşaltma kolunun düşey uzunluğuna eşit olan $\beta \mu' F_y$ ifadesindeki değişkenler hibrit modelde verilen eşitliklerle ifade edilerek mevcut kodun içine gerekli parametreler eklenmiştir. İlk olarak Şekil 3.11’de verilen malzeme komutunun içinde yer alan değişkenlere ek olarak yumuşak donatı oranı ve yerdeğiştirme sünekliği değerinin kullanıcı tarafından belirlenebilmesi için malzeme komutuna iki yeni parametre eklenmiştir. Bayrak şekilli modelinde mevcut olan β değeri Özden ve Ertaş (2010) tarafından

$$\beta = 0,94a^{0,5} \quad (3.11)$$

olarak yumuşak donatı oranına bağlı şekilde ifade edilmiştir. Buna göre β değeri artık α 'ya bağlı olarak ifade edilebildiğinden kullanıcı tarafından girilen parametrelerin arasından kaldırılmış C++ koduna eşitliği eklenerek her α değeri için yeniden hesaplanacak hale getirilmiştir. Önerilen histeretik modelin dönüş kolunun düşey uzunluğunu etkileyen μ' değeriye γ yine Denklem (3.6)'daki gibi ifade edilerek kaynak koda eklenmiş, μ değeriye kullanıcı tarafından belirlenen parametreler arasına eklenmiştir. Böylece mevcut boşaltma kolunun düşey uzunluğu βF_y olan SelfCentering histeretik modelinde yapılan değişikliklerle önerilen histeretik modelin boşaltma kolunun özellikleri elde edilmiştir. Bayrak şekilli histeretik modelin önemli davranış özelliklerinden olan kalıcı kat ötelenmelerinin kendinden merkezlenebilme davranışıyla ortadan kaldırılmış olması önerilen histeretik modele uymamaktadır. Bu nedenle zden ve Ertaş (2010) tarafından Denklem (3.7)'de verilen θ_{res} değerinin SelfCentering histeretik modelinin C++ koduna eklenmesi gerekmiştir. Bu değişiklik yapılırken histeretik modelin kendinden merkezlenme özelliği değiştirilmemiş ancak değişen yumuşak donatı oranına bağlı olarak boşaltma kolundan sonraki eğrinin x eksenini kestiği nokta önerilen histeretik modele benzer şekilde ifade edilmiştir. Yapılan bu değişiklikler sonrasında elde edilen malzeme modelinin OpenSees komutu ve komuttaki parametrelerin açıklaması şekil 3.12'de verilmiştir.

| | |
|---|--|
| uniaxialMaterial Ozden_Ertas_Self <i>\$tag \$k1 \$k2 \$sigAct \$alpha <\$epsSlip></i> <i><\$epsBear> <rBear> \$mu</i> | |
| <i>tag</i> | Malzemeyi tanımlayan tamsayı |
| <i>k1</i> | Başlangıç rijitliği |
| <i>k2</i> | Akmadan sonraki rijitlik ($0 < k2 < k1$) |
| <i>sigAct</i> | Aktive eden gerilme veya kuvvet |
| <i>alpha</i> | Yumuşak donatı oranı |
| <i>epsSlip</i> | Sıyrıma deformasyonu (isteğe bağlı) |
| <i>epsBear</i> | Eğilme deformasyonu (isteğe bağlı) |
| <i>rBear</i> | Eğilme rijitliğinin başlangıç rijitliğine oranı (isteğe bağlı) |
| <i>mu</i> | Yerdeğiştirme sünekliği |

Şekil 3.12. UniaxialMaterial Ozden_Ertas_Self malzeme kodu

Bu çalışmada kullanılan, önerilen histeretik modelin özelliklerini taşıyan ve Şekil 3.12'de kodu verilen ikinci malzeme modeli gerekli değişiklikler yapılarak elde edilmiştir. Böylece hibrit modeli oluşturacak Ozden_Ertas ve Ozden_Ertas_Self malzemeleri bu çalışmanın ikinci bölümünde bahsedilen SAOZU6 modelinde uygulanmak üzere OpenSees malzeme kütüphanesine eklenmiştir. Malzemelerin C++ kodlarının değiştirilmesi ve OpenSees programına eklenmesi için yapılan çalışmalar bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

3.3. OpenSees Programına Yeni Malzeme Modeli Eklenmesi

Yapılan bu çalışmada OpenSees programının seçilmiş olmasının en önemli nedenlerinden biri açık kod özellikli bir program olmasıdır. C++ programlama dili kullanılarak yazılmış olan OpenSees programını diğer birçok programdan ayıran özelliği kullanıcıya kendi analiz yöntemini, malzeme ve eleman modelini programın içine dahil etmesine olanak sağlamasıdır. Programın geniş bir malzeme

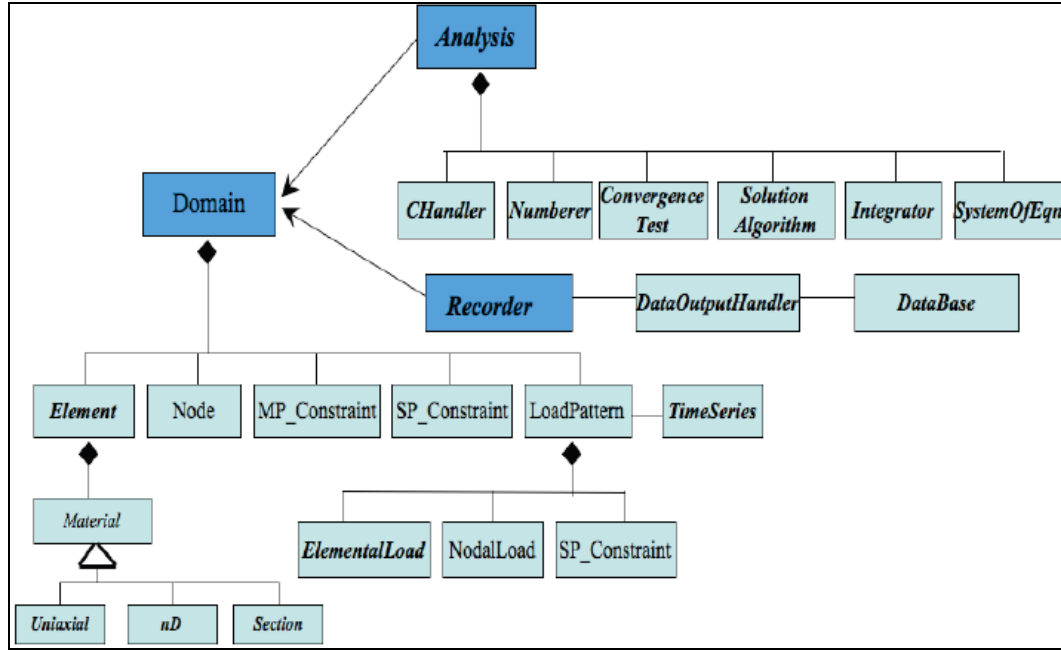
kütüphanesine sahip olmasının nedeni birçok kullanıcı ve araştırmacı tarafından programa eklenen yeni malzeme modellerinin olmasıdır.

Program kullanıcı tarafından yazılacak yeni kodların C, C++ veya Fortran programlama dillerinden biriyle yazılmış olmasını gerektirir. Bu çalışmada yeni malzeme kodunun oluşturulmasında C++ programlama dili kullanılmıştır. C++ 1979 yılında Bjarne Stroustrup tarafından geliştirilmiş C'yi kapsayan bir programlama dilidir (URL-4). OpenSees'in kullanıcılar tarafından oluşturulan yeni malzeme kodlarını kütüphanesine kabul etmesi için birçok bileşenin bir araya getirilmesi gerekir. Bu çalışma sırasında OpenSees programına 2 yeni malzeme eklenmiştir ve bu bölümde C++'da oluşturulmuş kodların OpenSees programına dahil edilmesi anlatılacaktır.

Programlama dili olarak C++ programlama dilinin seçilmesi kaynak kodların çalıştırılması için gerekli programın elde edilmesini zorunlu kılmıştır. C++'da yeni bir kod oluşturmak için iki ayrı dosyaya ihtiyaç duyulur. Bunlardan ilki programın içeriğinde kullanılan bütün değişkenlerin tanımlandığı üstbilgi (header) dosyadır ve .h uzantılıdır. Diğer de sınıf sistemiyle çalışan bu programlama dilinin hangi alt sınıfları kullanacağını ve oluşturulacak algoritmaların yazıldığı kaynak (source) dosyadır ve .cpp uzantılıdır. Çalışmada bu dosyaların oluşturulması ve çalıştırılması için Microsoft Visual Studio 2010 programı kullanılmıştır.

OpenSees programı kullanıcılarla paralel çalışma olanağına sahip bir programdır ve kullanıcılar tarafından geliştirilecek yeni malzemelerin veya elemanların programa eklenmesi için geliştiricileri tarafından oluşturulmuş programın bütün kaynak kodlarının bulunduğu veri tabanına ulaşılmasına izin verir. Bu aşamada kullanıcı bu kaynak kodları kullanarak mevcut malzeme kütüphanesinin içine yeni bir malzeme eklemek için OpenSees geliştiricilerinin kullanıcı bilgisayarına uzaktan erişimine izin verir. OpenSees geliştiricileri ve kullanıcı arasındaki bu paralel çalışma TortoiseSVN isimli program kullanılarak sağlanır. Program Windows kullanıcıları için önerilir ve ücretsiz olarak <http://tortoisesvn.tigris.org/> internet adresinden kolaylıkla elde edilir. OpenSees Şekil 3.13'de verildiği temel kümelerden ve onlara bağlı alt kümeler şeklinde ifade edilebilecek sınıf sisteminden oluşmuştur. Bu

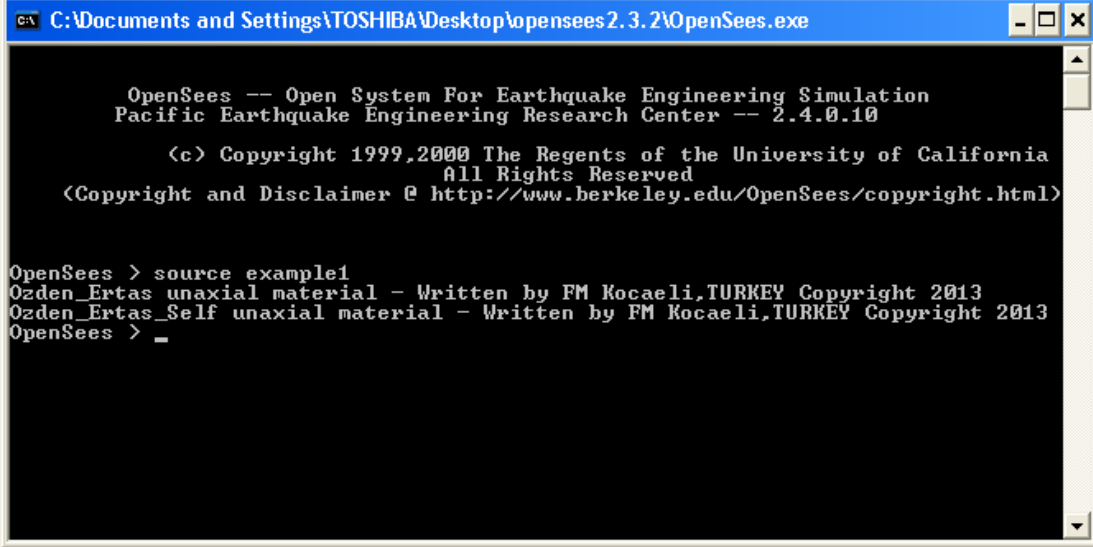
nedenle alt sınıflarda yapılan herhangi bir değişikliğin inşa edilmesi için onun bağlı olduğu diğer sınıfların da birlikte çalıştırılması gerekir.



Şekil 3.13. OpenSees sonlu eleman modelinin sınıf sistemi (McKenna, 2012)

Teknik olarak gerekli programların elde edilmesinden sonra kullanıcının bilgisayarında OpenSees programının C++ ile yazılmış bütün kaynak kodları Şekil 3.13’de verildiği gibi bütün sınıf sistemi mevcut olacak şekilde kurulur. OpenSees’in sahip olduğu bu sistemin önemli avantajlarından biri kullanıcının bütün sınıfları bilmesini gerektirmez, yalnızca katkı yapacağı sınıfta oluşturduğu değişiklikler bu sistem sayesinde diğer sınıfları da etkiler (McKenna, 2012). Bu aşamadan sonraki bölüm C++ ile yazılan yeni malzeme kodlarının OpenSees malzeme kütüphanesine eklenmesidir. İlk olarak yeni malzeme için OpenSees malzeme kütüphanesinde yer açılır ve oluşturulan malzeme daha önceki malzeme kodlarının bulunduğu class.h dosyasında daha önce kullanılmamış bir isimle tanımlanır. Geliştiriciler tarafından oluşturulmuş kaynak kodları, yeni oluşturulacak malzeme kodunun kaynak dosyasının içine dahil edilir. Kod C++ programında doğru şekilde çalıştırdıktan sonra oluşturulan klasörde OpenSees gibi .exe programlarının çalıştırması için gerekli olan .dll (dinamik bağ kütüphanesi) uzantılı Windows bileşeni oluşturulur. OpenSees’in kaynak kodlarında yapılan tüm değişiklikler bu dosya türü ile OpenSees’e tanıtılır. OpenSees tanımlanan bütün C++ kodlarının .dll uzantılı

dosyalarıyla çalışır. Buna göre gerekli dosyaları oluşturulmuş yeni malzeme modellerinin OpenSees.exe programında çalıştırılmış hali Şekil 3.14’de verilmiştir.



```
C:\Documents and Settings\TOSHIBA\Desktop\opensees2.3.2\OpenSees.exe

OpenSees -- Open System For Earthquake Engineering Simulation
Pacific Earthquake Engineering Research Center -- 2.4.0.10

(c) Copyright 1999,2000 The Regents of the University of California
All Rights Reserved
(Copyright and Disclaimer @ http://www.berkeley.edu/OpenSees/copyright.html)

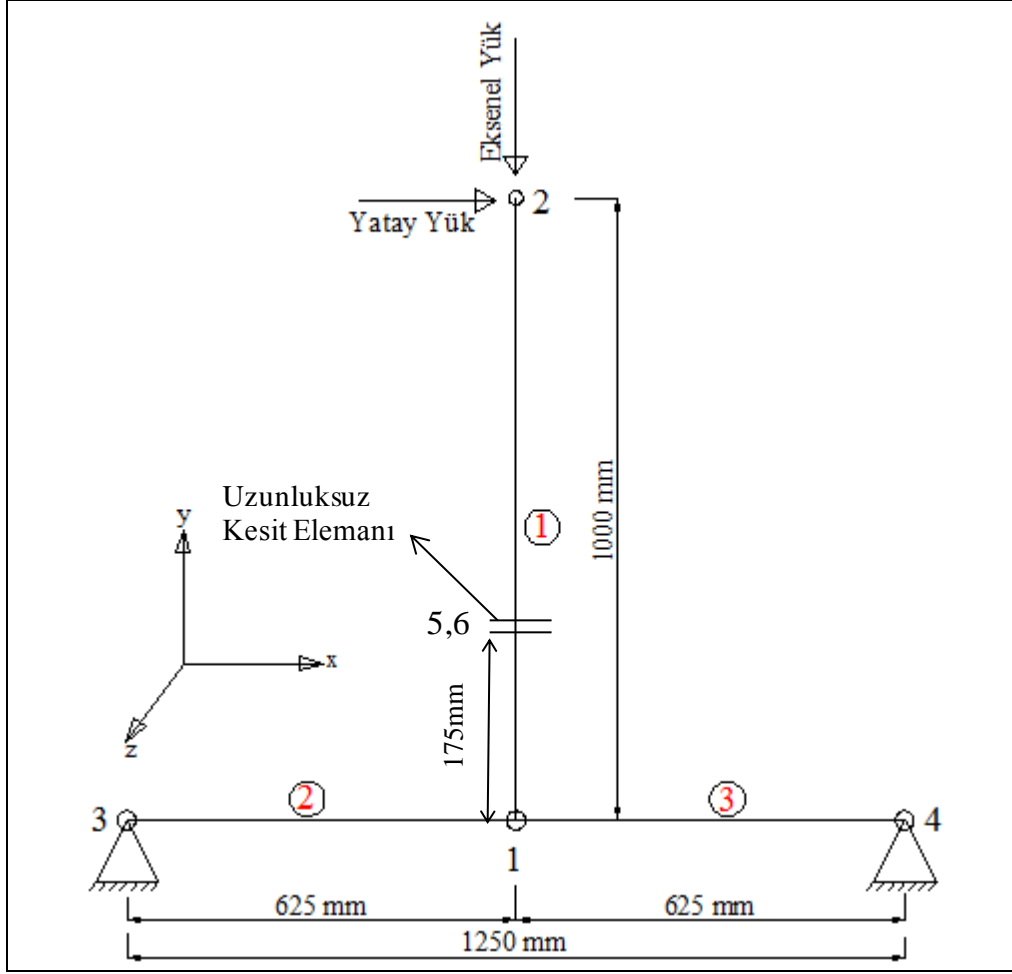
OpenSees > source example1
Ozden_Ertas uniaxial material - Written by FM Kocaeli,TURKEY Copyright 2013
Ozden_Ertas_Self uniaxial material - Written by FM Kocaeli,TURKEY Copyright 2013
OpenSees > _
```

Şekil 3.14. OpenSees.exe programında yeni malzeme modellerinin çalıştırılması

Böylece oluşturulan yeni malzeme modelleri OpenSees’in malzeme kütüphanesine eklenmiş ve kullanıcılar tarafından .dll dosyası mevcut olduğu sürece kullanılabilir hale getirilmiştir. Malzeme modellerinde yapılacak değişiklikler yine aynı yöntemler izlenerek elde edilir.

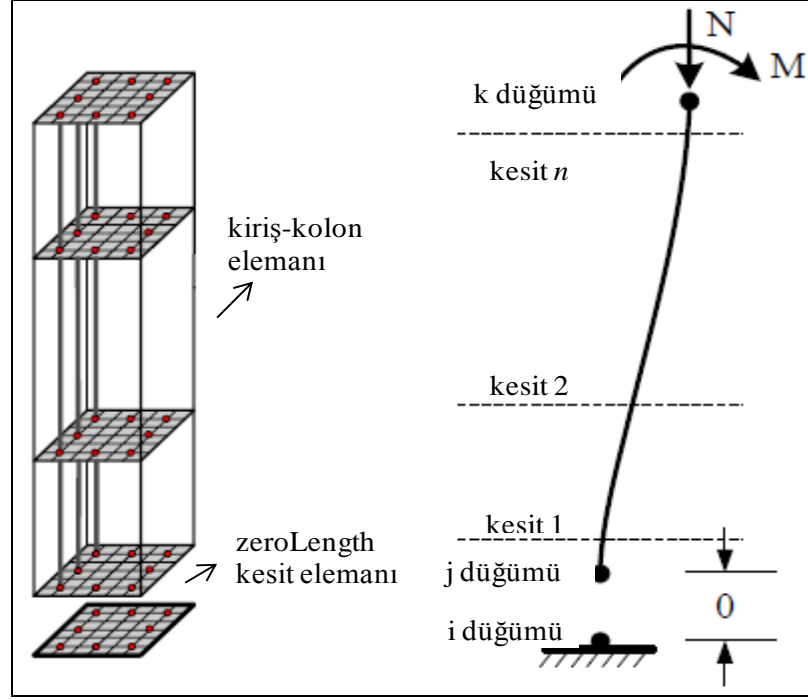
3.4. Yeni Malzeme Modellerinin SAOZU6 Elemanına Uygulanması

Hibrit birleşim modelini temsil eden malzeme modelleri program kütüphanesine eklendikten sonra SAOZU6 modeline uygulanabilir hale gelmiştir. Kolonun temel kirişi olarak temsil edilen elemanlara bağlandığı birleşim bölgesi için önerilen hibrit modelin kolon davranışına olan etkisinin elde edilmesi için model yeni malzemelerin uygulanabileceği hale dönüştürülmüştür. Buna göre Şekil 2.9’da şematik olarak gösterilen deney elemanı Şekil 3.15’deki gibi değiştirilmiştir.



Şekil 3.15. Önerilen histeretik modelin uygulandığı SAOUZ6 modelinin şematik gösterimi

Bu değişikliğin yapılmasının nedeni SAOUZ6 modelinde kullanılan malzeme modellerinden farklı ve onlara ek olarak yani malzeme modellerinin kullanılmış olmasıdır. Özden ve Ertaş tarafından önerilen histeretik model bir birleşim bölgesi modeli olduğundan, elde edilen malzemelerin kolon-kiriş birleşim bölgesini temsil edecek bir kesit elemanına uygulanması doğru bulunmuştur. Bu nedenle OpenSees'in eleman kütüphanesinde yer alan zeroLengthSection elemanı kullanılmıştır. Bu eleman Zha ve Sritharan (2004) tarafından birleşim bölgeleri için önerilmiştir. Eleman fiber analiz yöntemine uygun olarak geliştirilmiştir (Zhao ve Sritharan, 2007). Eleman modeli Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. ZeroLengthSection eleman modeli (Zhao ve Sritharan, 2007)

Eleman modelde görüldüğü gibi iki düğüm noktası arasında tanımlanmıştır ancak bu iki düğüm noktası da aynı yerdedir. Dolayısıyla eleman aslında bir kesiti ifade eder. Birleşim bölgeleri için geliştirilmiş bu elemana diğer elemanlarda olduğu gibi herhangi bir kesit atanabilir. Bu durumda fiber kesite sahip kolon elemanın kesiti değiştirilmeden yalnızca kesitte yer alan çeliğin malzeme modeli değiştirilerek yeniden analiz edilmesine olanak sağlar. ZeroLengthSection elemanı genel olarak moment-eğrilik değerlerini hesaplamak için kesit analizinde kullanılır (Zhao ve Sritharan, 2007). ZeroLengthSection elemanın OpenSees’de kullanılan komutu Şekil 3.17’de verilmiştir.

| element zeroLengthSection \$tag \$iNode \$jNode \$secTag | |
|---|--|
| <i>tag</i> | Elemanı tanımlayan yasmayı |
| <i>iNode</i> | Elemanın tanımlandığı başlangıç düğüm noktası |
| <i>jNode</i> | Elemanın tanımlandığı bitiş düğüm noktası |
| <i>secTag</i> | Elemanın daha önce tanımlanmış kesiti tanımlayan tamsayı |

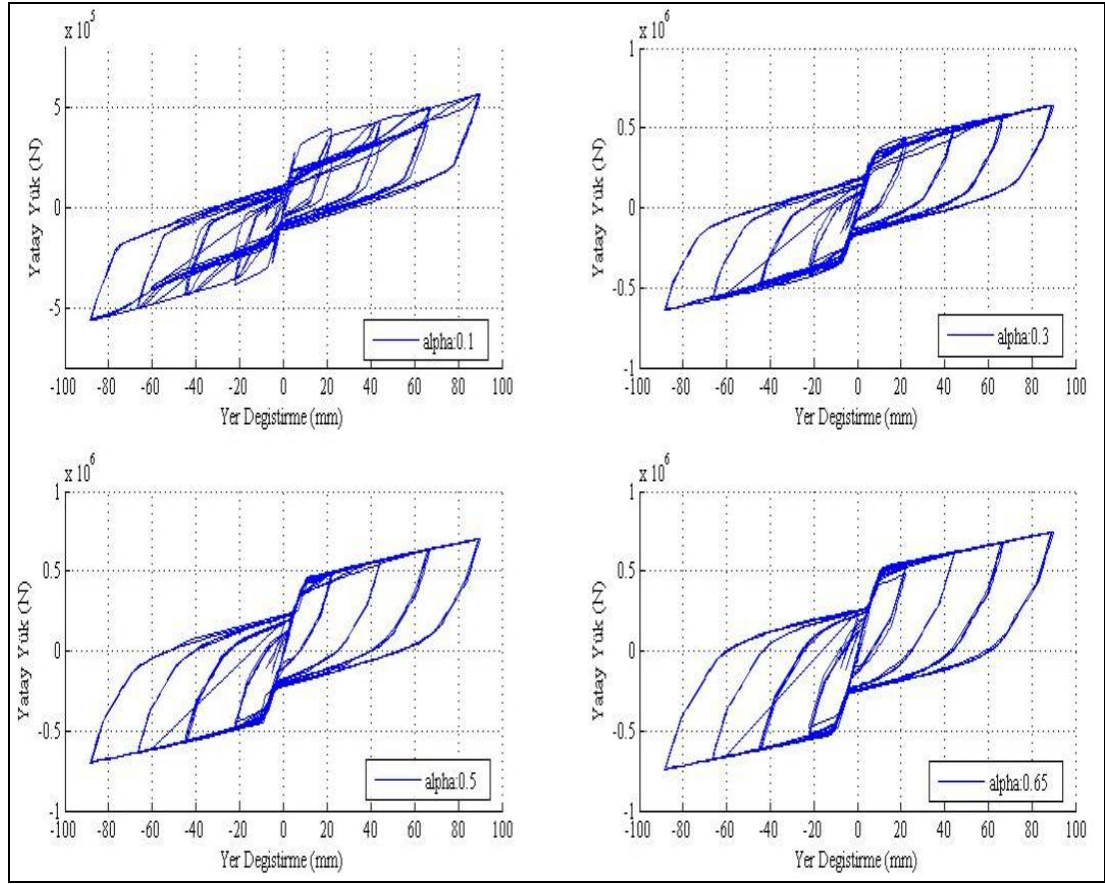
Şekil 3.17. ZeroLengthSection eleman modelinin kodu (URL-7)

Yapılan bu çalışmada zeroLengthSection elemanı Şekil 3.15’de görüldüğü gibi 1 numaralı düğüm bölgesinden plastik mafsal boyu kadar uzaklığa yeni tanımlanan 5 ve 6 numaralı düğümlerin arasına tanımlanmıştır. Düğüm 5 ve düğüm 6 aynı x ve y değerleriyle ifade edilmiştir. OpenSees programı elemanın tam 1 numaralı düğüme tanımlanmasına izin vermesine karşın, bu şekilde yapılan modelleme sonucunda modelin tanımlanan bu elemanı aktif hale getirmediği görülmüştür. Yeni tanımlanan 5 ve 6 düğümlerinin y koordinatını veren plastik mafsal boyu,

$$l_p = 0,5h \quad (3.12)$$

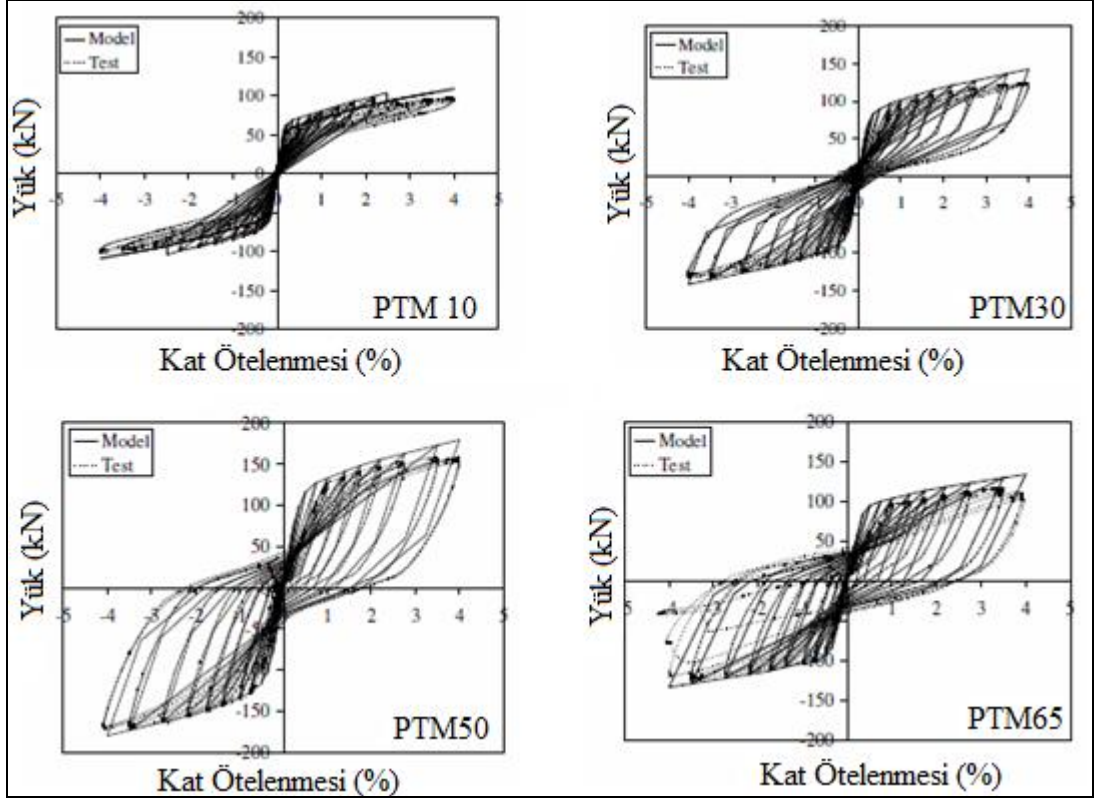
olarak hesaplanmıştır ve burada h kesit yüksekliğidir (Celep, 2007). Önerilen hibrit modelin uygulanacağı zeroLengthSection elemanın konumu belirlendikten sonra elemanın sahip olduğu kesitin ve dolayısıyla bu kesitte kullanılan malzemelerin tanımlanması gerekir. Bunun için kesitte yer alan donatılara yeni oluşturulan uniaxialMaterial Ozden_Ertas ve uniaxialMaterial Ozden_Ertas_Self malzemeleri tek bir malzeme olarak atanmalıdır. Özden ve Ertaş (2010) tarafından oluşturulan hibrit modeldeki gibi mevcut iki malzeme modeli birbirine paralel bağlanarak tek malzemeye dönüştürülmüştür. OpenSees programının uniaxialMaterial kütüphanesinde bulunan uniaxialMaterial Paralel komutu iki veya daha fazla malzemenin birbirine paralel bağlanarak tek malzeme haline getirilmesini sağlar. Mevcut olan malzemeler ayrı ayrı tanımlandıktan sonra malzemeleri tanımlayan tamsayı isimleri uniaxialMaterial Paralel \$tag \$material1 \$material2 komutunda yazılarak tek bir isimle ifade edilebilen yeni bir malzeme elde edilmiştir. Elde edilen bu malzeme zeroLengthSection eleman kesitindeki çeliği tanımlamak için kullanılmıştır. SAOZU6 modeli geliştirilerek elde edilen yeni model SAOZU61 olarak adlandırılmıştır. Oluşturulan yeni modelde her iki malzeme için de ayrı ayrı yumuşak donatı oranları belirlenebilir olduğundan, yumuşak donatı oranları değiştirilerek SAOZU61 modeli analiz edilmiştir. SAOZU6 modelindeki yükleme koşulları ve analiz yöntemleri SAOZU61 modeli içinde değiştirilmeden uygulanmıştır. Böylece deneysel sonuçlarla benzer sonuçların elde edildiği bir OpenSees modeli üzerinden yalnızca yeni önerilen hibrit birleşim modeliyle ilgili gerekli değişiklikler yapılarak güvenilir bir model elde edilmiştir. Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmaya benzer olarak α değeri sırasıyla, $\alpha=0,1$, $\alpha=0,3$,

$\alpha=0,5$ ve $\alpha=0,65$ alınmış ve her bir değer için analiz tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar her bir değer için ayrı ayrı olacak şekilde verilmiştir.



Şekil 3.18. Değişen α değerlerine karşılık SAOZU61 modelinin davranışı

Şekil 3.18’de yatay yük-yerdeğiştirme eğrileri verilen kolon davranışının yumuşak donatı oranı (α) değiştikçe birbirinden farklılaştığı görülmüştür. Oluşturulan yeni malzeme modelleri doğru şekilde çalışmış ve yumuşak donatı oranına bağlı olarak davranışı değiştirmişlerdir. Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar da bu çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi bakımından Şekil 3.19’ da verilmiştir.

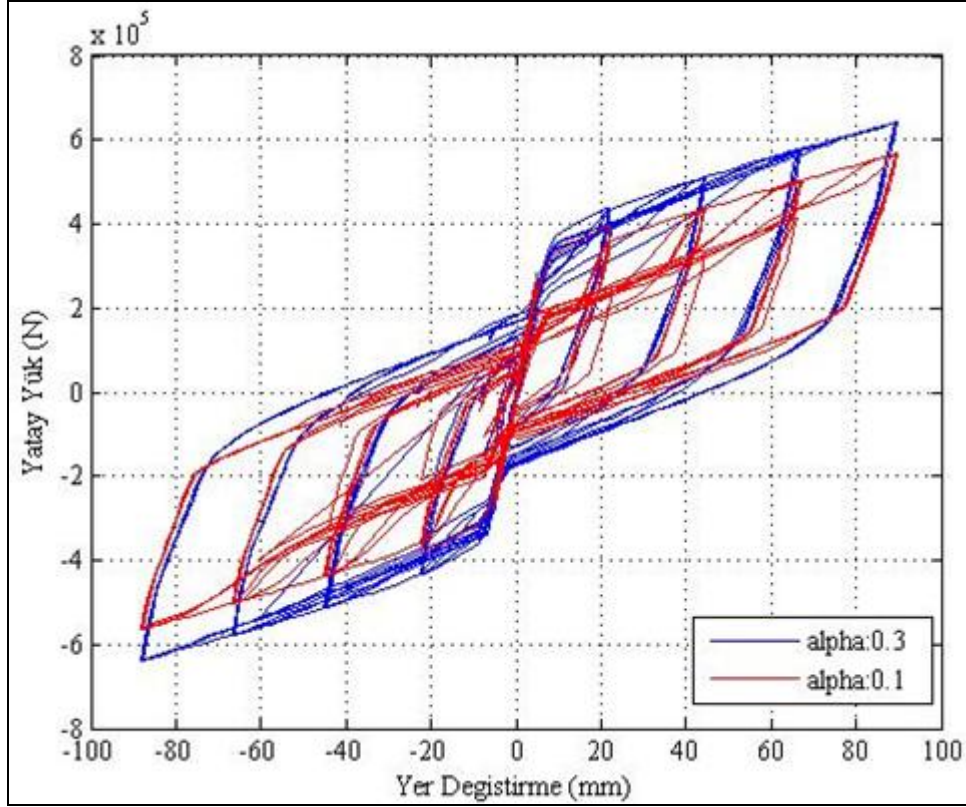


Şekil 3.19. Özden ve Ertaş tarafından yapılan çalışmanın sonuçları (Özden ve Ertaş, 2010)

Şekil 3.19’da PTM10, PTM30, PTM50 ve PTM65 numuneleri içerdikleri yumuşak donatının birleşimin moment kapasitesine olan katkısı dikkate alınarak isimlendirilmişlerdir. Buna göre, önerilen modelin Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan deney sonuçlarına iyi uyum gösterdiği, enerji tüketme katsayısı β ’nın doğrudan yumuşak donatı oranının kareköküyle orantılı olduğu ve benzer şekilde kalıcı kat ötelenmesinin de $\alpha^{0,5}$ ’e bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca kalıcı kat ötelenmesi katsayısı λ ’nın yumuşak donatı oranıyla doğrusal bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.19’da verilen sonuçlara göre en az yumuşak donatı oranına sahip PTM10 numunesinin enerji tüketme kapasitesinin oldukça düşüktür ve davranışının bi-linear self-centering histeretik modeline benzerdir. PTM65 numunesi birdöküm numuneye benzer davranış göstermiştir. PTM30 ve PTM50 numuneleriye beklenen kalıcı kat ötelenmesi değerlerine ulaşmış ve yumuşak donatı oranı arttıkça enerji tüketme kapasitelerinin artmıştır.

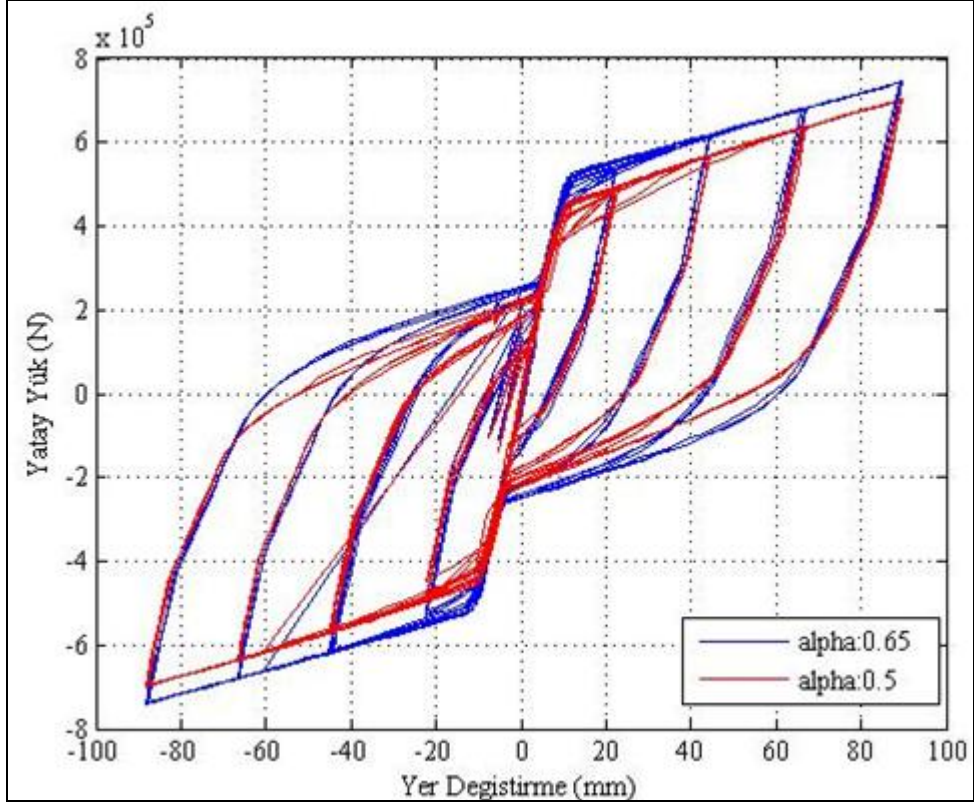
Şekil 3.18’de verilen sonuçlara göre $\alpha=0,1$ olduğunda kalıcı kat ötelenmelerinin ve enerji tüketme kapasitesinin en az olduğu, α ’nın artan değerlerine karşılık bu

değerlerinde arttığı görülmüştür. Yumuşak donatı oranı değiştirilerek elde edilen sonuçlar değerlendirme yapılması için ikili gruplar halinde Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20. $\alpha=0,3$ ve $\alpha=0,1$ olduğunda elde edilen sonuçlar

Şekil 3.20’de verilen sonuçlara göre $\alpha=0,1$ olduğunda boşaltma kolunun eğimi daha büyük, ancak boşaltma kolunun düşey mesafesinin daha kısa olduğu görülmüştür. Bu durum oluşan kalıcı deformasyonların daha az ve self-centering davranışının daha baskın olmasını beraberinde getirmiştir. $\alpha=0,3$ olduğunda kolunun akma dayanımının ve akmadan sonra oluşan pekleşmenin arttığı görülmüştür. Ek olarak boşaltma kolunun eğimi daha küçük fakat düşey mesafesi daha büyüktür. Bu da kalıcı deformasyonların ve dolayısıyla yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi altında kalan alanın artmasını beraberinde getirmiştir. Genel olarak yükleme çevrim sayısı arttıkça iki sonuç arasındaki farkın arttığı görülmüştür.



Şekil 3.21. $\alpha=0,65$ ve $\alpha=0,5$ olduğunda elde edilen sonuçlar

Şekil 3.21’de verilen sonuçlara göre $\alpha=0,65$ ve $\alpha=0,5$ olduğunda boşaltma kolları arasındaki eğimde büyük bir fark görülmemiş ancak $\alpha=0,65$ değerinde boşaltma kolunun düşey mesafesi beklenildiği gibi artmıştır. Aynı şekilde $\alpha=0,65$ olduğunda yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan diğer değerlerle karşılaştırıldığında en büyük olmuştur. Dolayısıyla kalıcı deformasyonun en fazla olduğu değer yumuşak donatı oranı 0,65 olduğunda elde edilmiştir. Özden ve Ertaş (2010) tarafından elde edilen sonuçlardan farklı olarak $\alpha=0,65$ olduğunda da kolonun akma dayanımı artmaya devam etmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kolonun temel kirişine bağlandığı birleşim bölgesine tanımlanan hibrit birleşim modelindeki yumuşak donatının kolon davranışına olan etkisi görülmüştür. Buna göre birleşim bölgesinde en az yumuşak donatı oranına sahip kolon elemanın akma dayanımının, enerji tüketme kapasitesinin en düşük olduğu, boşaltma kolunun düşey uzunluğunu etkileyen μ^v ve yumuşak donatı oranı gibi parametrelere bağlı olarak da kalıcı deformasyonunun en az olduğu görülmüştür. Artan yumuşak donatı oranıyla birlikte boşaltma kolunun eğimi dışındaki, kalıcı deformasyonlar, enerji tüketme kapasitesi ve eleman dayanımı

değerlerinde artış görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar deprem gibi çevrimsel yüklemelere maruz kalan kolon-kiriş birleşim bölgelerinin enerji tüketme kapasitelerinin arttırılması, önerilen hibrit birleşim modelinde görüldüğü gibi yumuşak donatı oranının artmasıyla mümkün olduğunu göstermiştir.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada deprem gibi çevrimsel ve tekrarlı yüklemeler altında prefabrik yapılardaki hasarların büyük çoğunluğunun görüldüğü kolon-kiriş birleşim bölgeleri hakkında önerilen birçok modelden Özden ve Ertaş (2010) tarafından geliştirilmiş hibrit birleşim modeli incelenmiştir. Programlama aşamasında Berkeley üniversitesi tarafından geliştirilmiş olan OpenSees sonlu eleman programı kullanılmıştır. Çalışma için ayrılan zamanın önemli bir bölümü programın öğrenilmesi ve güvenilir bir model kurulabilmesi aşamasında harcanmıştır. Bu durumun ön önemli nedeni seçilen sonlu eleman programı hakkında mevcut kaynakların ve program geliştiricileri tarafından kullanıcılara sağlanan desteğin sınırlı düzeyde olmasıdır. Ancak bu çalışmanın programlama kısmı için bu programın seçilmesindeki en önemli neden programın açık kaynak kod özelliğine sahip olmasıdır. Bu durum kullanıcıların C++, C veya Fortran programlama dillerinden birini kullanarak yazacakları yeni malzeme modelini programın malzeme kütüphanesine dahil edebilmesine olanak tanır.

Çalışma kendi içinde iki ayrı bölüme ayrılmıştır. Bunlardan ilki Saatçioğlu ve Özcebe (1989) tarafından yapılan ve deney verilerinin PEER veritabanından elde edildiği deney elemanlarından iki tanesinin modellenmesidir. Bu aşamada OpenSees’de modeli hazırlanan kolon için programın malzeme kütüphanesinde bulunan mevcut malzeme modellerinden yararlanılmıştır. Yapılan modelleme ve analiz sonrasında deney sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir ve modellenen iki kolon elemandan deney sonucuna daha yakın sonuçları olan SAOZU6 modeli bir sonraki aşamada kullanılmak üzere seçilmiştir.

İkinci bölümde sonuçların kıyaslanmasıyla güvenilirliği belirlenmiş SAOZU6 modeline Özden ve Ertaş (2010) tarafından önerilen hibrit birleşim modeli uygulanmıştır. Ancak önerilen histeretik modelin davranışının ifade edilebileceği malzeme modeli OpenSees kütüphanesinden elde edilememiştir. Bu nedenle amaçlanan davranışın elde edilmesi için yeni malzeme modelleri oluşturulmuştur. Bu aşamada C++ malzeme kodları bulunan iki malzeme önerilen histeretik modeldeki

parametrelere ve verilen denklemlere uygun olarak yeniden ifade edilmiştir. Oluşturulan yeni malzemeler Ozden_Ertas ve Ozden_Ertas_Self isimleriyle malzeme kütüphanesine eklenmiştir. Malzeme modelleri elde edildikten sonra SAOZU6 modeli malzemelerin uygulanabilmesi için gerekli değişiklikler yapılarak SAOZU61 modeli elde edilmiştir. histeretik modele benzer yeni malzemeler birleşim bölgesine uygulanıp analiz edilmiştir.

Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmada test değişkeni olarak belirlenmiş olan yumuşak donatı oranı bu çalışmada da değişken olarak belirlenmiştir. Özden ve Ertaş (2010) tarafından yapılan çalışmaya paralel olarak yumuşak donatı oranı α 'nın 0,1, 0,3 0,5 0,65 olduğu değerler için analiz tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yapı performansını etkileyen enerji tüketme kapasitesinin yumuşak donatı oranı artışına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Aynı şekilde kalıcı deformasyonların ve dayanımın da yumuşak donatı oranı 0,1 olduğunda en düşük 0,65 olduğunda en yüksek olduğu görülmüştür. Önerilen histeretik modelin bileşenlerinden kendinden merkezlenme özelliğine sahip modelin etkisi en fazla $\alpha=0,1$ olduğunda görülmüştür. Rijitlik kaybının görüldüğü ve hibrit modelde yer alan Takeda modelinin etkisiyle α 'nın artan değerlerine karşılık boşaltma rijitliğinin azaldığı görülmüştür. Ek olarak $\alpha=0,5$ ve $\alpha=0,65$ değerlerinde elde edilen sonuçların birbirlerine yakın çıktığı görülmüş yalnızca $\alpha=0,65$ olduğunda dayanımın ve kalıcı deformasyonların arttığı sonucu elde edilmiştir.

Bu çalışmada sonucunda göre kolon-kiriş birleşim bölgelerinde bulunan yumuşak donatı içeriğinin yapı performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. önerilen hibrit model bu çalışmada da kullanılarak Özden ve Ertaş (2010) tarafından elde edilen sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmiş ve modelin davranışı bir kez daha test edilmiştir. Bu çalışma sonrasında yapılacak olan yeni çalışmalarda, hibrit birleşim için önerilen histeretik modeli tam olarak ifade edecek tek bir malzeme kodu yazılması elde edilen davranışın daha iyi sonuç vermesi açısından olumlu bir katkı olacaktır. Ayrıca bu çalışmada modellenen konsol kolon gibi daha basit bir yapı sistemi yerine daha karmaşık bir sistem modellenerek önerilen histeretik modelin uygulanması, modelin geçerliliğinin bir başka şekilde de kanıtlanmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Aydemir C., Zorbozan M., Alacalı N. S., Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların M_p Moment Kapasitelerinin Belirlenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 2009, **301**, 4545-4565.

Berry M., Parrish M., Eberhard M., *Peer Structural Performance Databases User's Manual*, Version 1, California University, Berkeley, 2004.

Bouc R., Modele Mathematique d'hysteresis, *International Journal on Acustica*, 1971, **24**, 16-25.

Braga F., Gigliotti R., Laterza M., Analytical Stess-Strain Relationship for Concrete Confined by Steel Stirrups and/or FRP Jackets, *Journal of Structural Engineering*, DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:9(1402).

Canbay E., Ersoy U., Özcebe G., Sucuoğlu H., Wasti S.T., *Binalar için Deprem Mühendisliği Temel İlkeler*, 1.baskı, Bizim Büro Basımevi, Ankara, 2008.

Celep Z., Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Plastik Mafsal Kabulü ve Çözümleme, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 16-20 Ekim 2007.

Christopoulos C., Pampanin S., Priestley M. J. N., Performance-Based Seismic Response of Frame Structures Including Residual Deformations. Part I: Single-Degree of Freedom Systems, *Journal of Earthquake Engineering*, 2003, **7**, 97-118.

Chompreda P., Prestressed Concrete Bridge Design-Basic Principles, Mahidol University, <http://www.mahidol.ac.th/en/>, (Ziyaret Tarihi: 31 Ağustos 2013).

D'Amato M., Braga F., Gigliotti R., Kunnath S., Laterza M., A numerical general-purpose confinement model for non-linear anlysis of R/C members, *Journal of Elsevier*, 2012, **102-103**, 64-75.

Ersoy U., Özcebe G., *Betonarme*, 2.baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2007.

Ersoy U., Özcebe G., Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme, *İMO Teknik Dergi*, 1998, **129**, 1799-1827.

Ersoy U., Tankut T., Depreme Dayanıklı Prefabrik Yapılar Temel İlkeler, *Türkiye İnşaat Mühendisliği IX. Teknik Kongre*, Ankara, 16-20 Kasım 1997.

Hognestad E., A Study of Combined Bending and Axial Load in R.C. Members, *University of Illinois Engineering Exprement Station*, Bull. No.399, 1951.

Haukaas T., Kiureghian A. D., Finite Element Reliability and Sensitivity Methods

for Performance-Based Earthquake Engineering, *California University*, Peer Report 2003/14, 2004

İsmail M., Ikhouane F., Rodellar J., The Hysteresis Bouc-Wen Model, A Survey, *Arch Comput Methods Eng*, DOI 10.1007/s11831-009-9031-8.

Kent D. C., Park R., Flexural Members with Confined Concrete, *Journal of the Structural Div.*, 1971, **97**, 1969-1990.

Leenen R., The Modelling and Identification of an Hysteretic System, *Eindhoven University of Technology*, 2002, **72**, 1-44.

Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 1988, **114**, 1804-1826.

Masullo A., Nunziata V., Prestressed Steel Structures Historical and Technological Analysis, <http://www.studionunziata.com/download/ISEC-02-339%20en.pdf>, (31 Ağustos 2013).

Mattock A. H., Flexural Strength of Prestressed Concrete Sections by Programmable Calculator, *PCI Journal*, 1979, **24**, 32-54.

Mazzoni S., OpenSees Tutorial, Berkeley, <http://opensees.berkeley.edu/workshop>, (Ziyaret Tarihi: 31 Ağustos 2013).

Mazzoni S., McKenna F., Scott M. H., Fenves G. L., *OpenSees Command Language Manual*, Version 2, California University, California, 2007.

McKenna F., Discovering OpenSees: Surfing the Waves of OpenSees, Adding your Code to OpenSees, Berkeley, <http://opensees.berkeley.edu/AddingYourCode.pdf> (Ziyaret Tarihi: 8 Haziran 2013).

McKenna F., Introduction to OpenSees and Tcl, Berkeley, <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/workshops/parallel/IntroductionOpenSees.pdf>, (Ziyaret Tarihi:31 Ağustos 2013).

Meydanlı A. H., Moment Aktarabilen Prefabrike Kolon-Kiriş Birleşimlerinin Tersinir Yükler Etkisindeki Performansı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275773.

Onaran K., *Malzeme Bilimi*, 10. baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 2006.

Özden Ş., Ertuş O., Modelling of pre-cast concrete hybrid connections by considering the residual deformations, *International Journal of the Physical Sciences*, 2010, **5**, 781-792.

Pampanin S., Priestley M. J., Sritharan S., Analytical Modelling of the Seismic Behaviour of Precast Concrete Frames Designed with Ductile Connections, *Journal of Earthquake Engineering*, 2001, **5**, 329-357.

- Park R., Paulay T., *Reinforced Concrete Structures*, 1. Edition, A Wiley-Interscience Publication, New Zealand, 1975.
- Patnaik S., Hopkins D., *Strength of Materials*, Second Edition, Elsevier, Oxford, 2004.
- Reddiar M. K. M., Stress-Strain Model of Unconfined and Confined Concrete and Stress-Block Parameters, Master of Science, Pondicherry Engineering College, India, 2009.
- Roy H. E. H., Sözen M. A., Ductility of Concrete, *Proceedings of the International Symposium on Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, Miami, 1964.
- Saatcioğlu M., Özcebe G., Reponse of reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading, *ACI Structural Journal*, 1989, **86-S1**, 1-13.
- Scott D. B., Stress-Strain Relationships For Confined Concrete: Rectangular Sections, *University of Canterbury*, Research Report No. 80-6, 1-102 ,1980.
- Sengupta P., Li B., Hysteresis Behaviour of Reinforced Concrete Non-Ductile Beam-Column Joints, *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 14-16 April 2011.
- Sheikh S. A., A Comparative Study of Confinement Model, *ACI Journal*, 1982, **79**, 296-306.
- Sheikh S. A., Üzümeri S. M., Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, *Journal of the Structural Division*, 1982, **108**, 2703-2722.
- Sheikh S. A., Üzümeri S. M., Mechanism of Confinement in Tied Columns, *Preprint from the Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, İstanbul, Türkiye, 1980.
- Sireteanu T., Giuclea M., Mitu A. M., An Analytical Approach for Approximation of Experimental Hysteretic Loops By Bouc-Wen Model, *Proceedings of the Romanian Academy*, 2009, **10**, 1-12.
- Solmaz T., Evaluation of Performance Based Displacement Limits for Reinforced Concrete Columns Under Flexure, Master of science, ODTÜ, Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 269006.
- Takeda T., Sozen M. A., Nielsen N. N., Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division*, 1970, **96**, 2557-2573.
- Taucer F. F., Spacone E., Filippou F. C., A fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures, *California University*, Report No. UCB/EERC-91/17, 1-133, 1991.
- Terzic V., Force-Based Element vs. Displacement-Based Element, Berkeley, <http://opensees.berkeley.edu/wiki/images/c/c5/FBEvsDBE.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 31 Ağustos 2013).

Tremblay R., Lacerte M., Christopoulos C., Seismic Response of Multistory Buildings with Self-Centering Energy Dissipative Steel Braces, *Journal of Structural Engineering*, DOI: 10.1061/_ASCE_0733-9445_2008_134:1_108.

Uma S. R., Prasad M. A., Seismic Behavior of Beam Column Joints in R.C. Moment Resisting Frames, *Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology, IITK-GSDMA-EQ31-V1.0*, 2000.

URL-1: http://en.wikipedia.org/wiki/Bouc%E2%80%93Wen_model_of_hysteresis, (Ziyaret Tarihi: 2 Eylül 2013).

URL-2: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/ConfinedConcrete01_Material, (Ziyaret Tarihi: 2 Eylül 2013).

URL-3: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/BoucWen_Material, (Ziyaret Tarihi: 2 Eylül 2013).

URL-4: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Bond_SP01_-_Strain_Penetration_Model_for_Fully_Anchored_Steel_Reinforcing_Bars, (Ziyaret Tarihi: 1 Eylül 2013).

URL-5: https://pantherfile.uwm.edu/jzhao/ww/Bond_SP01_pages/Bond_index.html, (Ziyaret Tarihi: 1 Eylül 2013)

URL-6: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/SelfCentering_Material, (Ziyaret Tarihi: 2 Eylül 2013)

URL-7: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/ZeroLengthSection_Element, (Ziyaret Tarihi: 2 Eylül 2013).

Welch B., *Practical Programming in Tcl and Tk*, 4th Edition, Prentice Hall, US, 1995.

Zhang H., Ma F., Parameter Sensitivity Analysis of the Extended Bouc-Wen Model of Hysteresis, *ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences*, Montreal, Canada, 29 September-2 October, 2002.

Zhao J., Sritharan S., Nonlinear analysis of RC structures with strain penetration effects, *Proceedings of 8th National Conference on Earthquake Engineering*, San Fransisco, 2004.

Zhao J., Sritharan S., Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures, *ACI Structural Journal*, 2007, **104**, 133.

EKLER

EK-A

```
#http://www.ce.washington.edu/~peera1/proprect.htm
#105 Saatcioglu and Ozcebe 1989, U6
#Units; N,mm
wipe
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
file mkdir DataU61
source DisplayPlane.tcl
source DisplayModel2D.tcl
node 1 0.0 0.0 0.0
node 2 0.0 1000. 0.0
node 3 -625.0 0.0 0.0
node 4 625.0 0.0 0.0
node 5 0.0 175.0 0.0
node 6 0.0 175.0 0.0
fix 3 1 1 0
fix 4 1 1 0
fix 5 1 1 0
fix 6 1 1 0
set cb 350.
set cby [expr $cb/2.0]
set ch 350.
set chy [expr $ch/2.0]
set cpas 26.
set y1 [expr $cby-$cpas]
set z1 [expr $chy-$cpas]
set A25 [expr (3.14159*25.*25.)/4.]
set dbar 25.
set rbar [expr $dbar/2.]
set detr 6.4
set barcent [expr $rbar+$detr]
set stratio 0.85 ;#fc/fc
# MATERIAL PROPERTIES
set alpha 0.9
set ko 9500.
set n 2.
set gamma 980.
set beta 980.
set Ao 60.
set deltaA -1.15
set deltaNu 0.00001
set deltaEta 0.006
#self-cent-prop
```

```

set k1 20.0e2
set k2 50
set sigAct 400
set alpha 0.10
set epsSlip 15
set epsBear 90
set rBear 0.0
set mu 10
uniaxialMaterial ConfinedConcrete01 1 S2 -37.3 18000.0 -eps cu -0.03 -nu 0.2
1166.4 6.4 65.0 425.0 200000.0 0.0 1000.0 25.0 -stRatio $stratio
uniaxialMaterial BoucWen 2 $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu
$deltaEta
uniaxialMaterial Bond_SP01 3 437 0.559 600 19.565 0.3 0.7
uniaxialMaterial Elastic 4 200e3

uniaxialMaterial Ozden_Ertas 22 437 0.559 600 19.565 0.3 0.3 0.10 10
uniaxialMaterial Ozden_Ertas_Self 23 $k1 $k2 $sigAct $alpha $epsSlip $epsBear
$rBear $mu

uniaxialMaterial Parallel 8 22 23
set mat 8
section Fiber 1 {
patch quad 1 8 8 -$cby -$chy $cby -$chy $cby $chy -$cby $chy #1
layer straight 4 3 $A25 [expr -($y1-$barcent)] [expr -($z1-$barcent)] [expr -($y1-
$barcent)] [expr ($z1-$barcent)]
layer straight 4 3 $A25 [expr ($y1-$barcent)] [expr -($z1-$barcent)] [expr ($y1-
$barcent)] [expr ($z1-$barcent)]
layer straight 4 2 $A25 0 [expr -($z1-$barcent)] 0.0 [expr ($z1-$barcent)]
}
puts "section 1 is defined"
section Fiber 2 {
patch quad 1 8 8 -$cby -$chy $cby -$chy $cby $chy -$cby $chy #1
layer straight 4 3 $A25 [expr -($y1-$barcent)] [expr -($z1-$barcent)] [expr -($y1-
$barcent)] [expr ($z1-$barcent)]
layer straight 4 3 $A25 [expr ($y1-$barcent)] [expr -($z1-$barcent)] [expr ($y1-
$barcent)] [expr ($z1-$barcent)]
layer straight 4 2 $A25 0 [expr -($z1-$barcent)] 0.0 [expr ($z1-$barcent)]
}
puts "section 2 is defined"
section Fiber 3 {
#patch quad 1 8 8 -$cby -$chy $cby -$chy $cby $chy -$cby $chy #1
layer straight $mat 3 $A25 [expr -($y1-$barcent)] [expr -($z1-$barcent)] [expr -($y1-
$barcent)] [expr ($z1-$barcent)]
layer straight $mat 3 $A25 [expr ($y1-$barcent)] [expr -($z1-$barcent)] [expr ($y1-
$barcent)] [expr ($z1-$barcent)]
layer straight $mat 2 $A25 0 [expr -($z1-$barcent)] 0.0 [expr ($z1-$barcent)]
}
geomTransf PDelta 1
set np 5

```

```

element dispBeamColumn 1 1 5 $np 1 1
element dispBeamColumn 2 6 2 $np 1 1
element elasticBeamColumn 3 1 3 250e3 20e3 5.208e9 1
element elasticBeamColumn 4 1 4 250e3 20e3 5.208e9 1
element zeroLengthSection 5 5 6 3

#recorder
recorder Node -file DataU61/disp2-10.txt -node 2 -dof 1 disp
recorder Node -file DataU61/force1-10.txt -node 2 -dof 1 reaction
DisplayModel2D DeformedShape
set maxNumIter 1000
set Tol 1.e-8
set TestType NormDispIncr;
set printFlag 0;
set algorithmType KrylovNewton
#####axial load analysis#####
pattern Plain 1 Constant {
load 2 0 -600.e3 0
}
system SparseGeneral
constraints Penalty 10e16 10e-16
numberer Plain
test $TestType $Tol 10
algorithm $algorithmType
integrator LoadControl 1
analysis Static
analyze 1

set dispu6 "Series -dt 1 -filePath dispu6.txt"
pattern Plain 2 $dispu6 {
sp 2 1 1
}
system SparseGeneral
constraints Penalty 10.e16 10.e-16
numberer Plain
test $TestType $Tol $maxNumIter $printFlag
algorithm $algorithmType
integrator LoadControl 1
analysis Static
analyze 1917
wipe

```

ÖZGEÇMİŞ

Melis Taşkın 20 Eylül 1986 yılında Kocaeli'nin Gebze ilçesinde doğmuştur. İlk ve orta öğretimini Eşrefbey ilköğretim okulunda tamamladıktan sonra Gebze Anadolu Lisesi'nde lise öğrenimini sonlandırmıştır. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazanmış ve 2009 yılında mezun olmuştur. 2010 yılı Şubat ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başlamıştır. 2012 Eylül ayında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Halen aynı üniversitede görev yapmaktadır.