T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

BETONARME PERDELERİN BOYUT VE DONATI DÜZENİ BAKIMINDAN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY 2018) GEREĞİNCE SAYISAL OLARAK İRDELENMESİ

Yaşar Enes MUT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

BETONARME PERDELERİN BOYUT VE DONATI DÜZENİ BAKIMINDAN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY 2018) GEREĞİNCE SAYISAL OLARAK İRDELENMESİ

Yaşar Enes MUT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME PERDELERİN BOYUT VE DONATI DÜZENİ BAKIMINDAN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY 2018) GEREĞİNCE SAYISAL OLARAK İRDELENMESİ

Yaşar Enes MUT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez …/…/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN (Danışman)

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖZET

BETONARME PERDELERİN BOYUT VE DONATI DÜZENİ BAKIMINDAN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY 2018) GEREĞİNCE SAYISAL OLARAK İRDELENMESİ

Yaşar Enes MUT

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Temmuz 2025; 86 sayfa

Depreme dayanıklı yapı tasarımında betonarme perdeler büyük bir öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında perdelerin donatı düzeninin ve boyutlarının perde davranışına etkisi bilgisayar destekli olarak araştırılmıştır. İnceleme önceliği olarak perde elemanlarda yaygın olarak görülebilen kesme etkisiyle gevrek hasar alma durumu seçilmiştir. İlk başta Ibrahim (2000) tarafından betonarme perde için deneysel olarak yürütülen doktora tez çalışmasından yararlanılarak sayısal bir model oluşturulmuş ve deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar veren modelin geçerliliği anlaşılmıştır. Bu modelin farklı donatı düzenleriyle eksenel yük altında tek yönlü itme analizleri ayrıca gerçekleştirilmiştir. Daha sonra modellerden Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY 2018) uygun olanında toplam perde yüksekliği her seferinde 900 mm azaltılarak on bir adet kısaltılmış farklı model oluşturulmuştur. Bu kısaltılmış modellerden süneklik koşulunu sağlayan bir tanesi seçilip her seferinde 408 mm genişletilerek on altı farklı genişletme modeli hazırlanmıştır. Kısaltma ve genişletme modellerinin yük-deplasman eğrileri, kritik bölgelerinde donatı ve beton için maksimum gerilme değerleri ve oluşan hasar alma durumları karşılaştırılmıştır. Tüm kısaltma ve genişletme modellerinin yük-deplasman eğrileri, perde yüksekliğinin genişliğe oranıyla çarpılarak normalize edilmiş ve tek bir grafikte gösterilen tüm modellerin gevrek ve sünek davranış aralığı belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen davranış sonuçlarının TBDY 2018 kurallarına olan uyumu değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİME: Betonarme perde, Boyut etkisi, Donatı düzeni, Doğrusal ötesi analiz, Sonlu elemanlar yöntemi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018.

JURİ: Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ABSTRACT

NUMERICAL EVALUATION OF RC SHEAR WALLS IN TERMS OF DIMENSIONS AND REINFORCEMENT ARRANGEMENT IN ACCORDANCE WITH THE TURKISH SEISMIC CODE (TSC 2018)

Yaşar Enes MUT

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

July 2025; 86 pages

In earthquake-resistant building design, reinforced concrete walls play a crucial role. This thesis investigates the effect of reinforcement arrangements and dimensions on wall behavior using computer-aided methods. The study prioritizes the brittle failure mode caused by shear effects, which are commonly observed in wall elements. Initially, a numerical model was developed based on the experimental doctoral thesis conducted by Ibrahim (2000) for reinforced concrete shear walls, and the validity of the model was confirmed by results consistent with experimental data. Additionally, uniaxial push-over analyses under axial loading were performed for the model with different reinforcement arrangements. Subsequently, eleven shortened models were created by reducing the total wall height by 900 mm each time, in accordance with the Turkish Seismic Code (TSC 2018). From these shortened models, one that satisfied the ductility condition was selected and expanded by 408 mm each time, resulting in sixteen different expansion models. The load-displacement curves of the shortened and extended models, the maximum stress values for reinforcement and concrete in critical regions, and the resulting damage conditions were compared. The load-displacement curves of all shortened and extended models were normalized by multiplying them by the ratio of wall height to width and the brittle and ductile behavior range of all models was determined in a single graph. Additionally, the compliance of the obtained performance results with the TSC 2018 regulations has been evaluated.

KEYWORDS: Dimensional effect, Finite element method, Non-linear analysis, Reinforcement arrangement, Shear wall, Turkish Seismic Code 2018.

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak yapılmıştır. Bu çalışma süresince desteğini esirgemeyen, yorumlarıyla tezime katkı sağlayan ve mesleki anlamda gelişimime katkıda bulunan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu süreçte bana sabırla eşlik eden, desteği ve sevgisiyle her zaman yanımda olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ iii
AKADEMİK BEYAN vi
SİMGELER VE KISALTMALAR vii
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
1.GİRİŞ 1
2.KAYNAK TARAMASI 3
3.MATERYAL VE METOT 8
3.1. Giriş 8
3.2. Betonarme Perdelerde Gevrek ve Sünek Davranış 9
3.3. TBDY 2018'e Göre Perde Sınır Şartları 13
3.4. TBDY 2018'e Göre Donatı Düzeni ve Sınır Şartları 15
3.5. TBDY 2018'e Göre Kesme ve Eğilme Sınır Şartları 19
3.6. TDY 2007 ve TBDY 2018 Arasındaki Perde Tasarım Farklılıkları 20
3.7. Eurocode 2 ve Eurocode 8'e Göre Perdeler 21
3.8. ACI 318-19'a Göre Perdeler 21
3.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi 22
3.10. Beton Hasar Plastisite (Concrete Damage Plasticity-CDP) Malzeme Modeli 23
4. BULGULAR 25
4.1. Deneyin İncelenmesi 25
4.1.1. Giriş 25
4.1.2. Deney numunesinin tanıtılması 26
4.1.3. Deney ölçüm düzeneği 27
4.1.4. Deney yükleme düzeneği 28
4.1.5. Deneyde kullanılan malzeme özellikleri 29
4.2. Analitik Modelin Oluşturulması 29
4.2.1. Farklı donatı düzenine sahip modellerin oluşturulması 37
5. TARTIŞMA 43

5.1. Giriş 43
5.2. Deney Sonuçları (Ibrahim 2000; Adebar vd. 2007) 43
5.3. Analitik Deney Modeli 45
5.4. Kısaltma Modelleri 50
5.5. Genişletme Modelleri 59
5.6. Kalınlık (t), Genişlik (L) ve Yükseklik (H) Oranları 72
6. SONUÇLAR 75
7. KAYNAKLAR 79
8. EKLER 83
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Betonarme Perdelerin Boyut ve Donatı Düzeni Bakımından Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) Gereğince Sayısal Olarak İrdelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

…/…/2025

Yaşar Enes MUT

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a : Etriye/çiroz arasındaki yatay mesafe

A_c : Perdenin net enkesit alanı (boşluklar çıkarıldıktan sonra)

A_{ch} : Perde brüt enkesit alanı (boşluksuz)

A_{cv} : Kesme kuvvetine karşı etkili perde alanı (ACI)

A_g : Perde brüt enkesit alanı

A_p : Bina plan alanı

A_{sh} : Enine donatı kesit alanı

$A_{s\,\text{uç}}$: Perde uç bölgesindeki toplam düşey donatı alanı

b_w : Perde kalınlığı

E : Elastisite modülü

f_{ck} : Beton karakteristik basınç dayanımı

f_{ctd} : Betonun tasarım çekme dayanımı

f_{ywd} : Enine donatı tasarım akma dayanımı

f_{ywk} : Enine donatı karakteristik akma dayanımı

f_{yt} : Enine donatı karakteristik akma dayanımı (ACI)

H_{cr} : Kritik perde yüksekliği

H_{kat} : Kat yüksekliği

H_w : Perde yüksekliği (ACI)

kg : Kilogram

kN : Kilo Newton

$l_{\text{tutulmamış}}$: Perde kolunun planda yanal doğrultuda tutulmamış boyu

l_u : Perde uç bölgesinin plandaki uzunluğu

l_w : Perdenin plandaki uzun kenarı (uzunluk)

M_p : Perde güç tükenmesi momenti

M_r : Kesit kapasitesi (tasarım dayanımı)

mm : Milimetre

MPa : Megapaskal

N : Newton

N_{dm} : Eksenel basınç kuvveti (G+Q+E yük kombinasyonu)

V_d : Hesaplanan kesme kuvveti

V_r : Kesme dayanımı

V_t : Deprem etkisi altında hesaplanan toplam taban kesme kuvveti

a_c : Kesme katsayısı (ACI)

βv : Kesme kuvveti dinamik büyütme katsayısı

δ : Yer değiştirme

ε : Şekil değiştirme

λ : Beton tipi katsayısı (ACI)

μ : Sürtünme katsayısı

ρ : Donatı oranı

ρ_{govde} : Gövde donatı oranı (brüt enkesit alanına oranı)

ρ_{sh} : Yatay donatı oranı

ρ_t : Yatay donatı oranı (ACI)

ρ_{uc} : Perde uç bölgesi boyuna donatı oranı

ϕ : Donatı çapı

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute
CAE	: Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CDP	: Concrete Damaged Plasticity (Beton Hasar Plastisite Modeli)
DT	: Deplasman Transdüseri
Eurocode	: Avrupa Yapı Tasarım Standartları (EN 1990–EN 1999)
LC	: Load Cell (Yükleme Hücresi)
SG	: Strain Gauge (Şekil Değiştirme Ölçer)
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)
TDY	: Türkiye Deprem Yönetmeliği (2007)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Perdeye etkiyen temel kuvvetler (ACI 318-9) 8
Şekil 3.2. Perde deformasyon şekilleri 9
Şekil 3.3. Kesme kırılması örneği (Pohl vd. 2022) 10
Şekil 3.4. Eğilme-kesme kırılması örneği (Yang vd. 2016) 11
Şekil 3.5. Diyagonal çatlama örneği (Wenlong vd. 2019) 11
Şekil 3.6. Beton ezilmesi örneği (Yang vd. 2017) 12
Şekil 3.7. Sünek kırılma örneği (Tong vd. 2019) 12
Şekil 3.8. TBDY 2018'e göre perde donatı düzeni 17
Şekil 3.9. TBDY 2018'e göre uygulanabilecek örnek perde donatı düzenleri 18
Şekil 3.10. Tasarım eğilme momenti ve tasarım kesme kuvveti diyagramları (TBDY) 19
Şekil 3.11. TDY 2007 donatı düzeni 20
Şekil 3.12. TBDY 2018 donatı düzeni 20
Şekil 3.13. Gerilme birim şekil değiştirme diyagramı (Kaya 2023) 24
Şekil 3.14. Tek eksenli yük altındaki betonun davranışı **a)** çekme; **b)** basınç (Kaya 2023) 24
Şekil 4.1. Üretilen perde modeli (Ibrahim 2000) 25
Şekil 4.2. Üretilen perde modeli ölçeği 25
Şekil 4.3. Perde yatay kesiti 26
Şekil 4.4. Perde düşey kesiti (Adebar vd. 2007) 27
Şekil 4.5. Deneyde ölçüm için kullanılan elemanlar (Adebar vd. 2007) 28
Şekil 4.6. Deneyde kullanılan yatay yükleme döngüleri (Ibrahim, 2000) 28
Şekil 4.7. Perdenin flanşlı kesitinin oluşturulması 30
Şekil 4.8. ABAQUS CDP Generator (Elkady 2023) 30
Şekil 4.9. Assembly modülünde tüm donatıların oluşturulması 32
Şekil 4.10. Referans noktalarının oluşturulması 32
Şekil 4.11. Aderansın tanımlanması 33
Şekil 4.12. Yüklemenin tanımlanması 33
Şekil 4.13. Ankastreliğin tanımlanması 34
Şekil 4.14. Sonlu eleman tipleri 34
Şekil 4.15. Mesh ağının tanımlanması 35
Şekil 4.16. Yatay ve düşey yükleme durumları 36
Şekil 4.17. "Constraint" tanımıyla kısıtlanan perde uç dönmesi 36
Şekil 4.18. Kısıtlama "Constraint" uygulanması 37
Şekil 4.19. X yönünde dönmenin sabitlenmesi 37
Şekil 4.20. Deneyde kullanılan perde modelinin donatı şeması (Donatı düzeni-1) 38
Şekil 4.21. Çift sıralı dışarıdan donatılı model (Donatı düzeni-2) 38
Şekil 4.22. Çift sıralı içeriden donatılı model (Donatı düzeni-3) 39
Şekil 4.23. TBDY 2018'e uygun oluşturulan model (Donatı düzeni-4) 39
Şekil 4.24. Deney modelindeki perdenin yatay donatı şeması 40
Şekil 4.25. TBDY 2018'e göre oluşturulan perdenin yatay donatı şeması 40
Şekil 4.26. Kısaltma 11 modeli 41
Şekil 4.27. Genişletme 1 modeli donatı düzeni 42
Şekil 4.28. Genişletme 2 modeli donatı düzeni 42

Şekil 5.1. Perdede oluşan çatlaklar (Ibrahim, 2000) 43
Şekil 5.2. Perdede oluşan çatlaklar (Adebar vd. 2007) 44
Şekil 5.3. Yük-deplasman eğrisi (Ibrahim, 2000) 44
Şekil 5.4. Yük-deplasman zarf eğrisi (Ibrahim 2000) 45
Şekil 5.5. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması 45
Şekil 5.6. Deneysel duruma ait model için Von Mises gerilme dağılımı 46
Şekil 5.7. Deneysel duruma ait model için beton çekme hasar dağılımı 46
Şekil 5.8. Deneysel duruma ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı 46
Şekil 5.9. Donatı düzeni-2'ye ait model için Von Mises gerilme dağılımı 47
Şekil 5.10. Donatı düzeni-2'ye ait model için beton çekme hasar dağılımı 47
Şekil 5.11. Donatı düzeni-2'ye ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı 47
Şekil 5.12. Donatı düzeni-3'e ait model için Von Mises gerilme dağılımı 47
Şekil 5.13. Donatı düzeni-3'e ait model için beton çekme hasar dağılımı 48
Şekil 5.14. Donatı düzeni-3'e ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı . 48
Şekil 5.15. Donatı düzeni-4'e ait model için Von Mises gerilme dağılımı 48
Şekil 5.16. Donatı düzeni-4'e ait model için beton çekme hasar dağılımı 48
Şekil 5.17. Donatı düzeni-4'e ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı . 49
Şekil 5.18. Donatı düzeni-4 C25 modeli için Von Mises gerilme dağılımı..... 49
Şekil 5.19. Donatı düzeni-4 C25 modeli için beton çekme hasar dağılımı..... 49
Şekil 5.20. Donatı düzeni-4 C25 modelinde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı 50
Şekil 5.21. Donatı düzeni farklı modellerin yük-deplasman eğrisi karşılaştırmaları 50
Şekil 5.22. Kısaltılmamış, Kısaltma 1-3 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri..... 51
Şekil 5.23. Kısaltma 4-7 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 51
Şekil 5.24. Kısaltma 8-11 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 52
Şekil 5.25. Tüm modellerin kuvvet-deplasman grafikleri 52
Şekil 5.26. Kısaltılmamış, Kısaltma 1-3 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 53
Şekil 5.27. Kısaltma 4-7 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 53
Şekil 5.28. Kısaltma 8-11 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 54
Şekil 5.29. Tüm modellerin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri..... 54
Şekil 5.30. Kısaltılmamış, Kısaltma 1-3 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri 55
Şekil 5.31. Kısaltma 4-7 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri..... 55
Şekil 5.32. Kısaltma 8-11 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri..... 56
Şekil 5.33. Tüm modellerin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri 56
Şekil 5.34. Kısaltılmamış model beton çekme hasarı 57
Şekil 5.35. Kısaltma 1 modeli beton çekme hasarı 57
Şekil 5.36. Kısaltma 2 modeli beton çekme hasarı 57
Şekil 5.37. Kısaltma 3 modeli beton çekme hasarı 57
Şekil 5.38. Kısaltma 4 modeli beton çekme hasarı 57
Şekil 5.39. Kısaltma 5 modeli beton çekme hasarı 58
Şekil 5.40. Kısaltma 6 modeli beton çekme hasarı 58
Şekil 5.41. Kısaltma 7 modeli beton çekme hasarı 58
Şekil 5.42. Kısaltma 8 modeli beton çekme hasarı 58

Şekil 5.43. Kısaltma 9 modeli beton çekme hasarı 58
Şekil 5.44. Kısaltma 10 modeli beton çekme hasarı 58
Şekil 5.45. Kısaltma 11 modeli beton çekme hasarı 59
Şekil 5.46. Kısaltılmamış, Kısaltma 5, Genişletme 1 ve Genişletme 2 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 59
Şekil 5.47. Genişletme 3-6 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 60
Şekil 5.48. Genişletme 7-10 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 60
Şekil 5.49. Genişletme 11-16 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 61
Şekil 5.50. Tüm genişletme modellerinin kuvvet deplasman grafikleri 61
Şekil 5.51. Kısaltılmamış, Kısaltma 5, Genişletme 1 ve Genişletme 2 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 62
Şekil 5.52. Genişletme 3-6 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 62
Şekil 5.53. Genişletme 7-10 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 63
Şekil 5.54. Genişletme 11-16 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 63
Şekil 5.55. Tüm genişletme modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 64
Şekil 5.56. Kısaltılmamış, Kısaltma 5, Genişletme 1 ve Genişletme 2 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri 64
Şekil 5.57. Genişletme 3-6 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri 65
Şekil 5.58. Genişletme 7-10 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri 65
Şekil 5.59. Genişletme 11-14 ve Genişletme 16 modellerinin basınç-deplasman grafikleri 66
Şekil 5.60. Tüm genişletme modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri 66
Şekil 5.61. Genişletme 1 modeli beton çekme hasarı 67
Şekil 5.62. Genişletme 2 modeli beton çekme hasarı 67
Şekil 5.63. Genişletme 3 modeli beton çekme hasarı 67
Şekil 5.64. Genişletme 4 modeli beton çekme hasarı 67
Şekil 5.65. Genişletme 5 modeli beton çekme hasarı 68
Şekil 5.66. Genişletme 6 modeli beton çekme hasarı 68
Şekil 5.67. Genişletme 7 modeli beton çekme hasarı 68
Şekil 5.68. Genişletme 8 modeli beton çekme hasarı 69
Şekil 5.69. Genişletme 9 modeli beton çekme hasarı 69
Şekil 5.70. Genişletme 10 modeli beton çekme hasarı 69
Şekil 5.71. Genişletme 11 modeli beton çekme hasarı 70
Şekil 5.72. Genişletme 12 modeli beton çekme hasarı 70
Şekil 5.73. Genişletme 13 modeli beton çekme hasarı 70
Şekil 5.74. Genişletme 14 modeli beton çekme hasarı 71
Şekil 5.75. Genişletme 15 modeli beton çekme hasarı 71
Şekil 5.76. Genişletme 16 modeli beton çekme hasarı 71
Şekil 5.77. Kısaltma 1-5 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)] 72
Şekil 5.78. Kısaltma 6-11 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)] 72
Şekil 5.79. Genişletme 1-5 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)] 73
Şekil 5.80. Genişletme 6-16 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)] 73
Şekil 5.81. Tüm sayısal modeller için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)] 74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. ABAQUS programında kullanılan birim sistemi 29
Çizelge 4.2. Beton malzeme özellikleri 31
Çizelge 4.3. Çelik plastik deformasyon değerleri 31
Çizelge 4.4. Yeni kısaltma modelleri 41
Çizelge 4.5. Yeni genişletme modelleri 42

1. GİRİŞ

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alması sebebiyle dünyanın en aktif deprem bölgelerinden sayılmaktadır (Ergünay 2007). 1999 İstanbul, 2011 Van ve en son gerçekleşen 2023 Kahramanmaraş depremleri ülkemizdeki yapı stoğunun tamamen güvenli olmadığını gözler önüne sermiştir. Bu depremlerde birçok can ve mal kaybı yaşanması, bazı yapıların deprem altındaki davranışının gereken sünekliğe ve yeterli dayanıma sahip olmadığını göstermektedir.

Yapılarda bahsedilen sünek tasarımın sağlanması, deprem gibi yatay kuvvetlere karşı gereken rijitliğe sahip olunması, yatay ötelenmelerin sınırlanması ve burulmanın önlenmesinde perdeler büyük öneme sahiptir. Perdelerin eleman bazında donatı düzeninin, kalınlık, genişlik ve yükseklik parametrelerinin davranışa etkisinin anlaşılması, perde tasarımında ekonomikliği, daha işlevsel elemanlar tasarlanmasını, bunun sonucunda daha güvenli yapılar inşa edilmesini amaçlamaktadır. Tezin ikinci kısmındaki literatür taraması bölümünde perde boyutunun ve donatı farklılıklarının perde davranışına etkilerini inceleyen çalışmalar gösterilmiştir.

Yapıların tasarlanması için kullanılan Eurocode 8, ACI 318-19, TDY 2007 ve TBDY 2018 gibi yönetmeliklerin perde sınır koşulları, kabaca incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. TBDY 2018'deki sınır koşullarına göre perde boyutlarının tasarlanması üzerine bazı maddeler incelenmiştir. Donatı düzenlerinin karşılaştırılmasının yapılması için Adebar vd. yaptığı çalışmadaki tek gövde donatılı perde modeli sonlu elemanlar yöntemi kullanan ABAQUS programında modellenmiştir. Malzeme eğrilerinin gerçeğe yakın kullanılabilmesi için doğrusal ötesi analiz kullanılmış, analizde küçük ve hızlı zaman adımlarını saptayabilmek için Explicit analiz modülü kullanılmıştır. Analitik modellerin ABAQUS programında oluşturulması ve modellerin kalibre edilmesi amacıyla uygulanan yöntemler tezin üçüncü kısmında anlatılmıştır.

Deneyde kullanılan malzeme bilgileri, deney düzeneği, yükleme düzeneği ve deney numunesinde kullanılan donatı düzeni tezin dördüncü bölümünde bahsedilmiştir. Deneyde uygulanılanın aksine iki yönde çevrimsel yükleme yapılmamış, tek bir yönde itme yapılmıştır. Oluşturulan ana modelde deney sonucuna yakın veriler elde edildikten sonra donatı düzeni çift gövdeli ve çift sıra olacak şekilde güncellenerek yeni bir model elde edilmiştir. Daha sonra donatı düzeni TBDY 2018'e uygun şekilde düzenlenerek optimize edilmiştir. Tanımlanan Concrete Damaged Plasicity (CDP) modeli yardımıyla beton modellenmiş ve oluşan hasarlar incelenmiştir. Modellerde oluşan beton ve donatı gerilmeleri de karşılaştırılarak farklı donatı düzenlerinin davranışı yorumlanmıştır.

Betonarme perdelerde sünek davranış hedeflenmekle birlikte, bazı durumlarda gevrek göçme mekanizmaları da ortaya çıkabilmektedir. Bu göçme türlerinden ilki, boyuna donatılar çekme altında henüz akmadan basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle meydana gelmekte; bu da taşıma kapasitesinde ani düşüşlere neden olmaktadır. İkinci tip gevrek göçme ise kesme etkisiyle oluşmakta olup, bu durum doğrudan kesit boyutları ve enine donatı düzeniyle ilişkilidir. Bu tür göçmeler, yapıların deprem performansını ciddi şekilde zayıflatmakta ve sünek tasarım ilkesinden sapılmasına yol açmaktadır.

Perde elemanlarının kalınlık (t), genişlik (L) ve yükseklik (H) gibi boyutsal özellikleri ile bu oranların birbirlerine göre ilişkileri, sünek veya gevrek davranışa geçiş

üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu kapsamda, TBDY 2018'de yer alan $t/H \geq 1/16$ ve $t/L \geq 1/30$ sınır koşulları, perdelerin sünek davranış sınırları içinde kalmasını sağlamak amacıyla tanımlanmıştır. Kısaltma ve genişletme modellerinin yük-deplasman eğrileri, her modelin perde yüksekliği ve genişlik oranı (H/L) ile normalize edilerek karşılaştırılmış ve modeller arasında gevrek ile sünek davranış aralığı belirlenmiştir. Söz konusu oranların altında kalan geometrilere sahip perdelerde, özellikle kesme kuvvetlerinin etkisiyle gevrek göçme davranışları gözlemlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında betonarme perde yüksekliğinin değişiminin davranışa olan etkisini anlamak amacıyla TBDY 2018'e uygun donatı düzeni ile teşkil edilen model, her 900 mm'de bir kısaltılarak 11 adet kısaltma modeli oluşturulmuştur. Kısaltma modellerinin beton hasarları, yük-deplasman eğrileri, beton ve donatı gerilmeleri karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca başlangıçta sünek davrandığı görülen Kısaltma 5 modeli baz alınarak donatı düzenini bozmayacak şekilde perde genişliği 408 mm arayla arttırılmıştır. Bu yöntemle 16 adet genişletme modeli oluşturulmuştur. Genişletme modellerinin de kısaltma modellerinde olduğu gibi beton hasarları, yük-deplasman eğrileri, beton ve donatı gerilmeleri karşılaştırılarak perde boyutlarının davranışa etkisi ve TBDY 2018'de yer alan boyutsal kuralların geçerliliği hakkında fikir edinilmeye çalışılmıştır.

TBDY 2018 gibi yönetmelikler betonarme perdeler için geometrik ve donatı düzeni açısından kurallar sunsa da perde düzlem içi narinlik (yükseklik/genişlik oranı) değişiminin perde davranış modunu (sünek eğilme davranışından gevrek kesme davranışına geçişi) nasıl etkilediğine dair sayısal ve parametrik çalışmalar halen sınırlıdır. Bu tezde, TBDY 2018 kapsamında farklı donatı düzenleri ve geometrik oranların perde davranışına olan etkisi sayısal yöntemlerle incelenerek bu kritik sınırlarının performansa etkisinin belirlenmesi amaçlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında aşağıda belirtilen temel araştırma konuları yer almaktadır:

- Perde gövdesinde farklı donatı yerleşimlerinin yatay yük taşıma kapasitesi ve süneklik düzeyi üzerindeki etkisi

- Perde yüksekliği (H) ve genişliği (L) sistematik olarak değiştirildiğinde, perde elemanlarında gelişen göçme mekanizmasının (eğilme, kesme ya da bileşik etkiler) belirlenmesi

- TBDY-2018'de tanımlanan geometrik sınır oranları (örneğin, kalınlık/yükseklik [t/H] ve kalınlık/genişlik [t/L]) ile sayısal modellerde gözlemlenen sünek-gevrek davranış geçişi arasındaki ilişkinin tutarlılığı

2. KAYNAK TARAMASI

Perde düzlem içi narinliği, yani perde yüksekliğinin genişliğine oranı (H/L), betonarme perde duvarların göçme davranışını belirleyen önemli bir parametredir. Perde kalınlığını sabit tutulduğu bir durumda bu oranın artması ya da azalması, perdenin sünek eğilme davranışı göstermesi ya da gevrek kesme kırılması yaşaması üzerinde doğrudan etkilidir. Literatürde boyut değişiminin deneysel ve sayısal olarak incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Bununla birlikte donatı oranı, düzeni ve yerleşimi gibi detaylar betonarme perdelerin taşıma kapasitesini, sünekliğini ve göçme davranışını doğrudan etkileyen en önemli tasarım parametrelerindendir. Bu kapsamda literatürde, donatı oranı ve yerleşiminin betonarme perdelerin kesme dayanımı, sünekliği ve göçme mekanizması üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır.

Ibrahim (2000), çalışmasında bu tezde de deneysel olarak ele alınıp modellenen ince ve yüksek H/L oranına sahip betonarme perde elemanlarının eğilme davranışı incelenmiştir. H/L oranı 7.5 olan, düşük düşey donatıya ve yüksek eksenel yüke sahip betonarme bir perde üzerinde yapılan büyük ölçekli deney ile, üç doğrusal parçalı (trilinear) moment-eğrilik modeli geliştirilmiş ve kalibre edilmiştir. Geliştirilen model, çatlamamış ve çatlamış kesit rijitliği ile plastikleşme bölgesini temsil edecek şekilde idealize edilmiş; elde edilen sonuçlara göre etkin eğilme rijitliğinin 0.1 ile 1.0 arasında değiştiği ve bu değişimin kesit geometrisi, donatı oranı ve eksenel yük gibi parametrelere bağlı olduğu gösterilmiştir. Modelin doğrusal olmayan statik analizlerde kullanılarak yüksek katlı eşlenmiş perde sistemlerinin yer değiştirme kapasitesini ve sünekliğini gerçekçi biçimde öngörebildiği belirtilmiştir.

Massone (2009), yaptığı çalışmada kısa perdelerde kesme ve eğilme davranışını incelemiştir. Oluşturulan modellerde farklı perde yüksekliklerindeki ortalama birim deformasyonlar ölçülmüştür ve iki boyutlu bir sonlu eleman formülasyon modeliyle kalibre edilmiştir. Modelin kayma kapasitesi tahminleri, 252 numunelik bir veri tabanı ile karşılaştırılmış ve model/deneysel kayma kapasitesi oranı (V_{model}/V_{exp}) ortalama 1.13, değişim katsayısı ise 0.25 olarak bulunmuştur.

Nguyen vd. (2014), tarafından yapılan çalışmada iki farklı en-boy oranına sahip 0.67 (kısa) ve 2.5 (ince) hafif donatılı perde teşkil edilmiştir. Farklı güçlendirme yöntemleri tartışılmış ve CFRP malzemesi ile güçlendirmede karar kılınmıştır. Betonarme modele iki farklı yaklaşımla itme testi uygulanmıştır. İlk yaklaşımda iki boyutlu düzlemsel gerilme kırılma enerjisi arttıkça oluşan çatlaklar incelenmiştir. İkinci yaklaşımda elasto-plastik hasar modeli iki ve üç boyutlu simülasyonlarda incelenmiştir. Analitik çalışmadaki veriler ve hasar modları güçlendirme yapılmış ve yapılmamış modellerin ikisinde de deney verileriyle uyum göstermektedir.

Jin vd. (2022), yaptıkları çalışmada kesme açıklıkları 1.0 m ve 2.0 m olan, deformasyon hızları farklı iki farklı türdeki perdedeki göçme modlarını ve plastik deformasyonları incelemişlerdir. Kesme açıklıkları 1.0 m olan 7 m, 14 m ve 21 m boyutlarına sahip kare perdelerdeki göçme modları ve kesme çatlakları incelenmiştir.

Deformasyon hızı arttıkça perdelerin taşıma kapasitesi ve sünekliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Deformasyon hızının boyut etkisi üzerindeki rolünü niceliksel olarak açıklamak için betonarme perde duvarların dinamik boyut etkisi formülü önerilmiştir.

Massone vd. (2021), perdelerin çevrimsel yükleme altında eksenel, kesme ve eğilme davranışlarının doğrusal ötesi olarak tahmin edebilmek için bir modelleme yaklaşımı araştırılmıştır. Oluşturulan modelde kısa, orta ve uzun perdelerin hesaplamaları için genelleştirilmiş formülasyonlar öne sürülmüştür. Kesme eğilme davranışını temel alan iki boyutlu model, perdenin iç serbestlik derecelerini sıfır olarak kabul edip yüzey normal deformasyonlarından hesaplama yapmaktadır. Modeli kalibre etmek için farklı (kesme uzunluğu/derinlik) oranına sahip kısa orta ve uzun üç farklı perde deney modeli seçilmiştir. Analitik modeller ile test edilen deneysel perde modellerinin histerezis davranışının benzer olduğu anlaşılmıştır.

Çınar (2022), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında plastik mafsal boyunu değiştiren etkenleri belirlemek amacıyla 59 perde ABAQUS programı yardımıyla modellenmiştir. Yapılan analitik çalışmada perde uzunluğu, perde yüksekliğinin perde uzunluğuna oranı, eksenel kuvvet oranı, perde uç bölgesi donatı oranı ve perde başlık bölgesi donatı oranı değişken olarak belirlenmiştir. Perde yüksekliğinde ve uzunluk/yükseklik oranındaki artışla birlikte plastik mafsal boyunda artma, eksenel kuvvet oranı artışında ise azalma görülmüştür. Gövde bölgesindeki yatay donatı ve uç bölgesindeki enine donatı miktarının artırılmasının plastik mafsal boyunu kısalttığı, buna karşılık sadece uç bölgesi enine donatı oranındaki artışın ise plastik mafsal boyunu arttırdığı gözlemlenmiştir.

Bastami vd. (2023), tarafından yapılan çalışmada üç adet tam ölçekli perde ACI 318-19 yönetmeliğinde bulunan özel perdeler kriterine göre donatılandırılmış ve inşa edilmiştir. Perdelere farklı yatay ve eksenel kombinasyonlara göre çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Histeretik yük-deplasman eğrileri, beton ve donatı deformasyonları, harcanan enerji ve rijitlik deney sonuçlarına göre elde edilip yorumlanmıştır. ASCE 41-17 tarafından önerilen %10 brüt kesit basınç kapasitesi (fcAg) eksenel yüke sahip analitik modellerde etkin rijitliğin abartıldığı iddia edilmiştir. Etkin rijitliğin eksenel yüke göre bir fonksiyon olması gerektiği açıklanmış, kuvvet-deplasman eğrisini daha iyi tahmin etmek için bir model önerilmiştir.

Liang vd. (2023), yaptıkları çalışmada depreme dayanıklı olarak tasarlanmamış orta açıklık/uzunluk oranlı ve ortalama kesme açıklığına sahip perdeleri normalden yüksek eksenel kuvvete maruz bırakıp performanslarını değerlendirmişlerdir. Farklı kesme eğilme dayanımı, eksenel yükleme ve açıklık/uzunluk oranına sahip 4 farklı perde modeli üretilmiş, çevrimsel yük altında test edilmiştir. Deney sonuçlarında rijitlik azalması, göçme modları, enerji dağılımı, donatı deformasyonu ve histeretik davranış incelenmiştir. Deneyden elde edilen veriler ASCE 41-17 ve FEMA 356'daki tavsiye edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Kesme eğilme davranışını, kuvvet deplasman eğrisini ve rijitlik azalmasını belirlemek için yeni bir teorik model önerilmiştir.

Peng vd. (2011), yaptıkları deneysel çalışmada 8 adet yarım ölçekli konsol davranışı sergileyen perdeyi monotonik etkiyen burulmaya maruz bırakmışlardır. Perde duvar deneysel modelleri aynı kalınlıkta fakat farklı genişliklerde ve farklı burulma şiddetlerinde teşkil edilmiştir. Deney sonuçlarında perdelerin moment-dönme açıları grafikleri, burulma dayanımları ve burulma rijitlikleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları en yüksek en/boy oranına sahip perdenin burulma davranışı için en uygun perde olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçlarıyla ACI yönetmeliği karşılaştırılmıştır orta ve yüksek donatı oranı içeren perdelerde güvenli olmayan maksimum burulma vermesi dışında deney sonuçlarıyla uyumlu veriler elde edilmiştir.

Li vd. (2016), yaptıkları çalışmada 1/3 ölçekli beşi boşluklu biri boşluksuz olarak altı adet perde teşkil etmişlerdir. Boşluklu perdelerde boşluklar farklı büyüklüklere sahip olup bazıları simetrik, bazıları ise simetrik olmayan şekildedir. Deneylerde çatlak oluşumu, göçme mekanizmaları, rijitlik azalmaları ve enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılıp tartışılmıştır. Yanez vd. tarafından da üretilip test edilen aynı perdelerin flanş başlıklı hallerinin davranışları da diğer altı perdeyle karşılaştırılmıştır. Perdenin başlığına eklenen flanşların nihai dayanımı arttırdığı fakat deformasyon kapasitesini azalttığı gözlenmiştir. Dahası başlıktaki flanşların göçme modunu sünekten gevrek davranışa götürebileceği düşünülmüştür. Flanşların beton ezilmesini, dökülmesini ve düşey donatı kırılmasını arttırabileceği de tartışılmıştır. Bununla birlikte beton ezilmesi ve donatı kırılması flanşlarda yoğunlaşmaktadır.

Susam (2019), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında perde duvarlı çerçeveli sistemde donatı oranlarının irdelenmesi için analitik bir çalışma yapılmıştır. Aynı donatı düzenine sahip farklı donatı oranlarına sahip on üç adet model elde edilmiştir. Modeller üzerinde düşey ve yatay yükler altında doğrusal ötesi sismik performans değerlendirmeleri yapılmış, kullanılabilecek minimum donatı oranları önerilmiştir.

Hung vd. (2020), yaptıkları çalışmada dört adet yüksek dayanımlı beton ve donatıya sahip kısa perdeyi deneysel olarak incelemiştir. Deneydeki değişkenler SD420 ve SD785 çelik sınıfları, çelik lifli ve lifsiz ultra yüksek dayanımlı betonlardır. Perdelere çevrimsel olarak deplasman uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre kesme hasar modunda çelik lifli beton malzemesi uygulanan perdede lokal boyuna çatlaklar görülürken, lifsiz beton uygulanan modelde beton dökülmesi görülmüştür. %0.75 hacim oranında çelik lif içeren perdeyle %1.5 oranında çelik lif içeren perde benzer enerji sönümleme kapasitesi, yük-deplasman davranışı ve kesme dayanımı sergilemiştir. Ayrıca lifsiz beton kullanılan perdelerdeki yatay donatı deney sonunda akmaya ulaşamazken lifli perdelerde yatay donatı tam kapasiteyle kullanılmıştır.

Christidis vd. (2021), yaptıkları çalışmada yetersiz donatılandırılmış perde duvarların deplasman kapasitelerine odaklanmıştır. Eğilme ve kesme davranışlarının ne kadar bir deplasmana yol açtığını ve oranlarını dört farklı orta yükseklikte betonarme perdenin deneysel sonuçlarını inceleyerek belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre kesme donatısı fazla bulunan modelde kesme-eğilme deplasman oranı sabit kalmış, toplam deplasman artmıştır. Kesme donatısının yetersiz olduğu modellerde kesme davranışı toplam deplasmanın çoğunluğunu oluşturmuştur. Kesme donatısı oranı ve

deplasman ilişkisini anlamak için doğrusal ötesi üç boyutlu analizler de yapılmış, öncekilere kıyasla daha gelişmiş bir analitik model önerilmiştir.

Kazaz vd. (2012), yaptıkları çalışmada perde duvarlarda oluşan plastik dönmeleri, çelik ve betonda oluşan deformasyonları sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal ötesi olarak incelemişlerdir. Sonlu eleman yöntemiyle oluşturulan modellere itme testi uygulanmıştır. ASCE/SEI 41, Eurocode 8 ve TDY 2007 yönetmeliklerindeki sınır şartlar karşılaştırılmıştır. Düşük eksenel yükleme durumları haricinde akma seviyesinde en doğru limitleri ASCE/SEI 41 yönetmeliğinin belirlediği anlaşılmıştır. EC8-3 ve TDY 2007 yönetmeliklerinin tutarlı deformasyon sonuçları vermediği gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı performans seviyelerinde plastik dönme limitlerini sınırlamada da eksik kaldığı düşünülmektedir. Daha tutarlı plastik dönme limitleri önerilmiştir.

Epakachi vd. (2018), yaptıkları çalışmada kısa en/boy oranlı ve az donatılı perde duvarların düzlem içi çevrimsel yüklemeli davranışını incelemek için bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Modeli doğrulamak için yirmi iki farklı kısa perde için deney verileri farklı laboratuvarlardan elde edilmiştir. Oluşturulan test modellerinde farklı en/boy oranları, basınç dayanımları, donatı oranları ve donatı çeşitleri kullanılmıştır. Kısa perdelerin tepe kesme dayanımını tahmin etmek için dört farklı denklem kullanılmıştır. Denklemlerin doğruluğu deney verileri analiz edilerek değerlendirilmiştir.

Shen vd. (2024), tarafından yapılan çalışmada CFRP ve çelik ızgaralarla güçlendirilmiş perdelerde dayanımın belirlenmesi için bir analitik model oluşturulmuştur. Kullanılan hesaplama metodu yükleme kapasitesi ve basınç kopma deformasyonu için stabil sonuçlar vermiştir. Tasarım için en dıştaki boyuna CFRP ızgaranın kırılma birim deformasyonu ve kenar betonunun kopma basınç birim deformasyonun dikkate alınması önerilmiştir. Model, numunenin histeretik davranışını, tepe yükü, zarf eğrisini, kalıcı deformasyon ve rijitlik azalmasını dahil başarıyla yansıtabilmektedir. Son olarak, eksenel basınç oranı ve en-boy oranının CFRP ızgara-çelik donatılı perdeler üzerindeki etkilerini incelemek için parametrik analiz gerçekleştirilmiştir.

Betonarme perdelerin karmaşık davranışları (çatlama, ezilme, donatı akması vb.) sonlu eleman yöntemi gibi ileri modelleme teknikleriyle sayısal olarak analiz edilebilmektedir. Literatürde ABAQUS, OPENSEES, ETABS ve SAP2000 gibi yazılımlarla yapılan çok sayıda doğrusal ötesi analiz çalışması mevcuttur.

Gregori vd. (2007), yaptıkları çalışmada eksenel kuvvet, çift eksenli eğilme, burulma ve çift eksenli kesme kuvveti gibi birleşik yükleme koşulları altında donatılı ve öngerilmeli beton çerçeve elemanlarının analizi için bir model oluşturmuştur. Oluşturulan model Timoshenko kiriş teorisine dayanarak üç boyutlu değişken kesit alanına sahip eğrisel çerçeve elemanlar için uygundur. Çerçeve kontrol noktaları bir, iki ve üç boyutlu bölgelere bölünmüştür. Donatı ve beton için malzeme modeli modifiye edilmiş basınç alanı teorisinin temel varsayımlarını alarak oluşturulmuştur. Modelin geçerliliği literatürde var olan bazı eğilme, kesme ve burulma altındaki çeşitli yükleme kombinasyonlarını içeren testlerle karşılaştırılarak kanıtlanmıştır. Numunenin nihai dayanımı ve çatlak oluşumu deneysel verilerle uyum göstermektedir.

Lu vd. (2015), yaptıkları çalışmada perdeler için yeni bir sonlu eleman modeli oluşturmayı amaçlamışlardır. Açık kaynak kodu kullanan OPENSEES yazılımı kullanılarak perdelerin doğrusal ötesi sismik analizi yapılmıştır. Analizi yapılan perdeler 632 m yüksekliğindeki Shanghai kulesinden ve 141.8 m yüksekliğindeki bir yüksek binadan alınmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modelinin analitik verileri deneysel verilerle de karşılaştırılmış güvenilirliği arttırılmıştır.

Yıldırım (2021), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında yedi adet farklı bina SAP2000 programıyla eşdeğer deprem yükü ve mod birleştirme yöntemiyle modellenmiştir. TBDY 2018 in izin verdiği göreli ötelemeler incelenerek perde boyutları virtüel iş metoduyla belirlenmiştir. Yapıların gerekli dayanımı ve davranışı göstermesini sağlayabilecek perde boyutları ve adetlerinin belirlenmesinde kullanılan kriterlerden bahsedilmiştir.

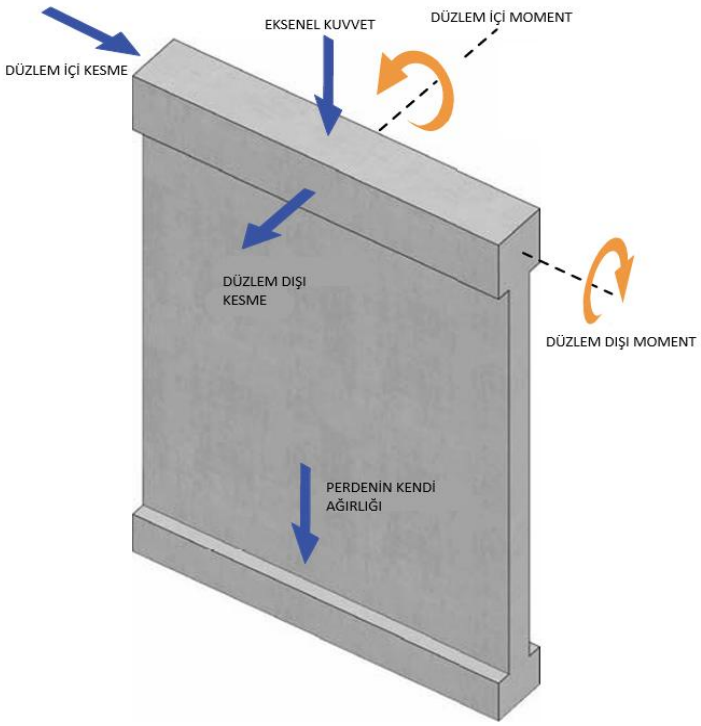
Al Wawi (2022), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında 21 katlı perde-çerçeve sistemli bir binayı Bağdat ve Kahire deprem haritalarını esas alarak ETABS programında modellemiştir. Mısır (ECP 201-2012), Eurocode 8 (2004) ve Irak (2019) deprem yönetmeliklerinin performansı kıyaslanmış; Irak yönetmeliğinin taban kesme kuvveti, katlar arası deplasman ve toplam yer değiştirme değerlerinde en düşük sonuçları ürettiği görülmüştür. 5-21 katlı yapılar için dinamik ve statik analizlerle oluşturulan modal değerler, yüksek binalarda perde duvar kullanımının sismik davranışı optimize ettiğini ortaya koymuştur.

Literatürde perde davranışı üzerine yapılan birçok deneysel ve sayısal çalışma mevcut olsa da genellikle ya tek bir geometriye (örneğin sadece kısa perdeler) ya da sınırlı sayıda donatı düzenine odaklanılmıştır. Özellikle düzlem içi narinlik oranlarının sistematik olarak değiştirilip sayısal sünek/gevrek davranış geçişlerinin incelendiği çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bu tezin, düzlem içi narinlik ve donatı düzeninin perde davranışına olan etkisini TBDY 2018'e uygun şekilde modellenen çok sayıda perde örneğiyle belirlemesi ve normalize edilmiş grafiklerle göstermesi açısından literatüre özgün bir katkı sunması hedeflenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Giriş

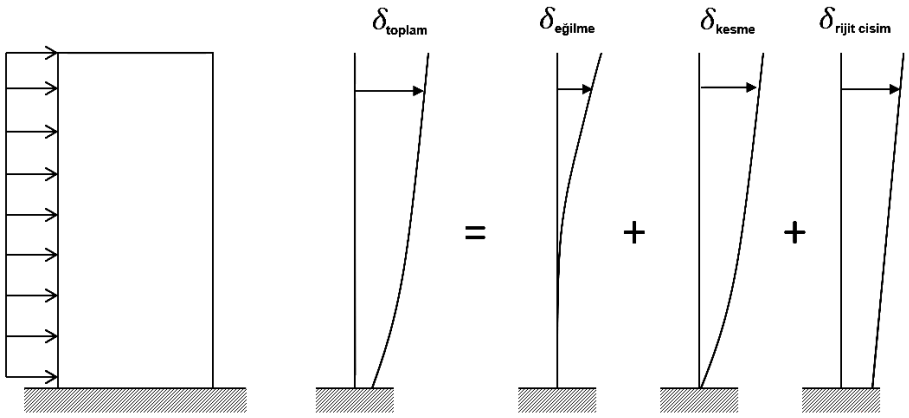
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY 2018) göre planda uzun kenarının kısa kenarına oranı altı veya daha büyük olan yapı elemanları perde olarak kabul edilmektedir. Perde duvarlar yapılardaki yatay kuvvetleri (deprem, rüzgâr vb.) karşılayan, yapının rijitliğini arttıran ve burulmaya karşı direnç göstermesini sağlayan yapı elemanlarıdır. Ayrıca yapıdaki yatay deplasmanları sınırlayıp yatay kuvvetleri temele aktarmaktadır. Perdeler etkiyen kuvvetler temel olarak düzlem içi kesme, düzlem içi moment, düzlem dışı kesme, düzlem dışı moment, eksenel kuvvet ve perdenin zati ağılığı olmak üzere Şekil 3.1'deki gibi gösterilebilmektedir.



Şekil 3.1. Perdeye etkiyen temel kuvvetler (ACI 318-9)

Perde duvarlar, pratikte geniş kolon işlevi gören bir sistemdir. Perde duvarların üzerine gelen moment, kesme ve eksenel kuvvetlere gereken dayanımı göstermesi ve yatay deplasmanları azaltması için yeterli rijitliğe sahip olması gerekmektedir.

Perdeler şekillerine göre (dikdörtgen, flanşlı, boşluklu bağ kirişli, çekirdek perdesi vb.), davranışlarına göre (kesme, eğilme vb.) genişlik-uzunluk oranlarına göre (bodur, orta, narin vb.) olarak sınıflandırılabilmektedir. Perde duvarlarda gelen yatay kuvvetlere göre perdenin yaptığı deformasyonlar Şekil 3.2'deki gibi gösterilebilmektedir. Perde duvarlarda yatay yük etkisiyle oluşan toplam deformasyon; temel-zemin etkisinden kaynaklanan rijit cisim hareketi, düşey donatıya hâkim olan eğilme deformasyonu ve enine donatıda (etriye) kesme gerilmelerini belirleyen kayma deformasyonu bileşenlerinin süperpozisyonu ile betimlenebilmektedir.



Şekil 3.2. Perde deformasyon şekilleri

3.2. Betonarme Perdelerde Gevrek ve Sünek Davranış

Perdelerin yaptığı deformasyonlar, kesme veya eğilme etkisinin baskınlığına bağlı olarak farklılık gösterir. Yüksekliklerinin plan uzunluklarına oranı ikiden büyük olan narin perdelerin eksenel kuvvet ve düzlem içi yatay yükler altındaki davranışları, klasik eğilme (kiriş) teorisiyle açıklanabilir (Ersoy vd., 2019). Bu tür perdelerde betonarme davranış büyük ölçüde eğilme etkisiyle şekillenir. Eğilme etkisi altında, çekme bölgesindeki donatıda akma meydana gelirken, basınç bölgesinde beton ezilmesi oluşur. Betonun çekme dayanımının düşüklüğü nedeniyle çatlamalar genellikle çekme bölgesinde gelişir ve moment dağılımına bağlı olarak özellikle perde alt bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Bu çatlakların yayılımı, sünek davranışa işaret eden plastik mafsal oluşumunun da bir göstergesidir.

Narin perdelerde meydana gelebilecek plan dışı burkulmalar, kat döşemeleri ile sınırlanır. Uygun detaylandırma sayesinde büyük depremler altında perde alt bölgesinde sünek davranışa uygun plastik mafsal gelişebilir (Ersoy vd. 2019). Bu bölgede sünek davranışın sağlanabilmesi için boyuna donatının yeterli ankrajla yerleştirilmesi ve enine donatı ile etkin şekilde sarılması gerekmektedir. Bu düzenleme, çekme etkisi altındaki donatının burkulmasını engelleyerek betonun kontrollü biçimde hasar geliştirmesine olanak tanımaktadır. Özellikle bu tür sünek davranışlar, güncel deprem yönetmeliklerince hedeflenen davranış biçimi olarak kabul edilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar, düşük performanslı beton kullanımının sünek davranışı azalttığını; buna karşın ultra yüksek performanslı beton ya da çelik lif katkılı betonların hem ilk çatlak yükünü hem de enerji tüketme kapasitesini artırarak sünekliği belirgin biçimde iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Li vd. 2023; Ganesan vd. 2015). Bu tür gelişmiş beton türleri, özellikle kesme etkisiyle oluşan gevrek hasarların önlenmesinde kritik öneme sahiptir.

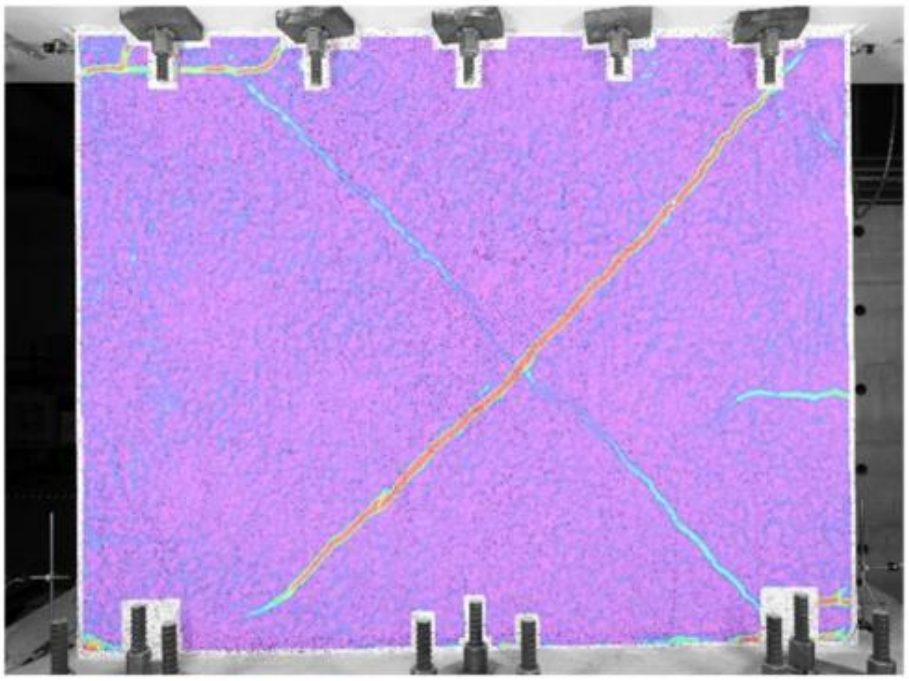
Perdeler genel olarak konsol benzeri davranış sergiler. Temel seviyesinde en yüksek değere ulaşan eğilme momenti, yükseklik boyunca yukarı doğru azalarak devam eder (Celep, 2022). Eğilme etkisi altındaki perdelerde, özellikle kesit uçlarında yüksek çekme ve basınç gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu uç bölgelerde, betonun ezilmesi ve donatının çekme altında akması gibi hasar türleri belirginleşir. Bu nedenle uç bölgelerdeki donatı düzeni hem kesit kapasitesinin artırılması hem de sünek davranışın

sağlanması amacıyla iyileştirilmelidir. Donatı oranının artırılması ve etriye aralıklarının azaltılması bu bağlamda kritik önem taşımaktadır.

Bu nedenle perde uç bölgeleri, kolon benzeri davranış sergilemeleri amacıyla özel olarak detaylandırılır. Bu bölgelerde eğilme etkisinin yoğunluğu göz önüne alınarak hem boyuna hem de enine donatı düzenlemesi yapılır. Doğru detaylandırma ile plastikleşmenin bu bölgede yoğunlaşması sağlanabilmektedir; böylece yapı elemanının göçme öncesi yüksek şekil değiştirme kapasitesi kazanması mümkün olmaktadır.

Yapılan araştırmalar, betonarme perdelerde farklı hasar türlerinin geliştiğini ortaya koymuştur: kesme kırılması, eğilme-kesme birleşik kırılması, kesme kayması (shear sliding), diyagonal çatlama, beton ezilmesi, sünek kırılma ve gevrek kırılma (Habib vd., 2025). Bu hasar türlerinin gelişimi, büyük ölçüde malzeme özelliklerine, detaylandırmaya ve yükleme koşullarına bağlıdır.

Kesme kırılması, perde gövdesinde ani ve eğik çatlakların oluştuğu bir hasar türüdür (Şekil 3.3). Bu kırılma, sünek olmayan ani göçmelere yol açmakta ve yapının uyarı vermeden davranış kapasitesini yitirmesine neden olmaktadır. Bu tür hasar, sık aralıklı enine donatı düzenlemesi ve yatay donatı oranının artırılması ile sınırlandırılabilmektedir.



Şekil 3.3. Kesme kırılması örneği (Pohl vd. 2022)

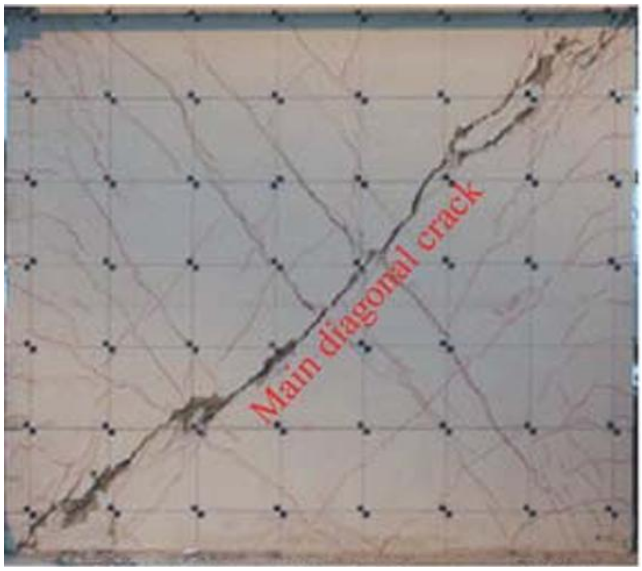
Eğilme-kesme birleşik kırılması, plastik mafsal bölgesinde oluşan eğilme çatlaklarına kesme çatlaklarının eşlik ettiği karmaşık bir kırılma biçimidir (Şekil 3.4). Bu hasar türü, yapının plastik şekil değiştirme kapasitesini düşürmekte ve yük taşıma performansını olumsuz etkilemektedir. Bu tür kırılma, geçiş bölgelerinin uygun detaylandırılması ve yük aktarım ekseninin düzenli sağlanması ile kontrol altına alınabilmektedir.



Şekil 3.4. Eğilme-kesme kırılması örneği (Yang vd. 2016)

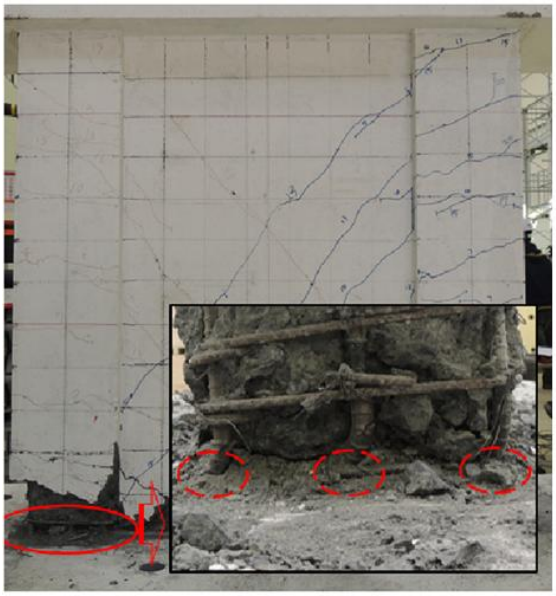
Kesme kayması (shear sliding), perde ile temel arasında ya da yatay derzlerde gelişen yatay çatlaklar ile tanımlanan bir hasar biçimidir. Bu çatlaklar, yapının rijitliğini azaltmakta ve kesme kuvvetlerinin etkin şekilde aktarılmasını engellemektedir. Bu hasar türü, yüzey aderansının iyileştirilmesi, yatay donatı artırımı ve ankraj detaylarının güçlendirilmesi ile sınırlandırılabilmektedir.

Diyagonal çatlama, gövde boyunca yaklaşık 45° açıyla gelişen çatlaklar ile karakterize edilmektedir. Bu çatlaklar, yapının kesme kapasitesine ulaşmadan gevrek davranış göstermesine ve çatlakların ilerlemesiyle kesme kırılmasına dönüşmesine neden olmaktadır (Şekil 3.5). Bu hasar, yeterli enine donatı ve sıklaştırılmış etriye düzenlemesi ile kontrol altına alınabilmektedir.



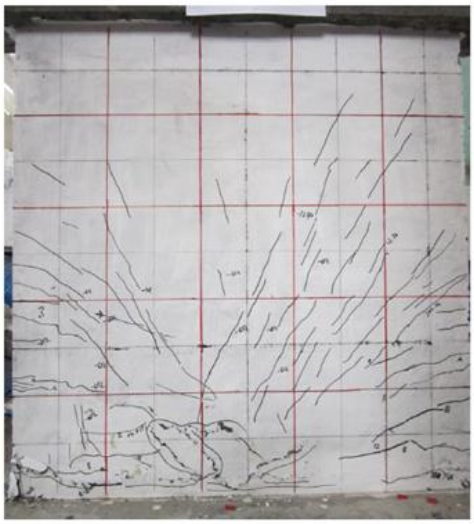
Şekil 3.5. Diyagonal çatlama örneği (Wenlong vd. 2019)

Beton ezilmesi, basınç etkisinin yoğunlaştığı uç bölgelerde gözlemlenmektedir. Betonun ani şekilde ezilmesi, sünek davranışın kaybına neden olmaktadır. Bu hasar türü, yüksek dayanımlı beton kullanımı ve etkili sargı donatısı ile sınırlandırılabilmektedir. Beton ezilmesinin örneği Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Beton ezilmesi örneği (Yang vd. 2017)

Sünek kırılma, enerji tüketimi ile kontrollü şekil değiştirmenin mümkün olduğu bir hasar biçimidir. Bu davranış tipi, yapıların göçmeden önce uyarı verebilmesini sağlayarak hedeflenen performans düzeyine ulaşmasına katkı sunmaktadır. Bu davranış, yeterli donatı oranı, uygun beton kalitesi ve çevrimsel yüklemelere karşı dayanıklı detaylandırma ile sağlanabilmektedir.



Şekil 3.7. Sünek kırılma örneği (Tong vd. 2019)

Perde yüksekliğinin plan uzunluğuna oranı düşük olan perdelerde, eğilme kapasitesi büyük yatay kuvvetler gerektirir. Bu nedenle söz konusu perdelerde kesme gerilmeleri baskın hâle gelir (Ersoy vd. 2019). Kesme etkisi altındaki bu tür betonarme elemanlar, eğilme kapasitesine ulaşmadan çatlayabilir veya göçer. Diyagonal çatlaklar genellikle bu süreçte ilk olarak ortaya çıkar ve ilerledikçe gevrek karakterli kesme kırılmasına dönüşebilmektedir. Bu durum, yapının uyarı vermeden göçmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bodur perdelerde eğilme kapasitesi değil, kesme dayanımı belirleyici olmaktadır.

Bu tür bodur perdeler çevrimsel yüklemeler altında, klasik eğilme davranışından farklı olarak, daha yoğun ve düzensiz çatlak desenleri geliştirir. Özellikle yüksek eksenel yüke sahip veya açıklıklı perdelerde, çevrimsel yükleme etkisiyle kayma kırılmasının daha erken evrede geliştiği tespit edilmiştir (Sivaguru vd. 2021; Jin vd. 2023). Bu durum, sünekliği azaltmakta ve ani göçme olasılığını artırmaktadır.

Kritik perde yüksekliği boyunca eğilme ve kesme etkileri birlikte etkindir. Bu bölge, plastik mafsal oluşumunun beklendiği alan olup sünek davranışın sağlanması açısından büyük önem taşır. Bu bölgede betonun ezilmesini ve kesme çatlaklarının gelişimini sınırlamak için özel detaylandırma gereklidir. Uç bölge donatı düzeni ve sargı donatısı yerleşimi bu nedenle titizlikle ele alınmalıdır. Ayrıca, perde geometrisi de taşıyıcı davranış üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük yükseklik/uzunluk oranına sahip bodur perdeler, daha yüksek kesme deformasyonları gösterir ve sünek davranış kapasiteleri daha düşüktür (Gulec vd. 2008). Yapılan çalışmalar, yatay doğrultuda yerleştirilen enine donatının hem diyagonal çatlakları sınırlamak hem de kesme dayanımını artırmak açısından etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle %0.5 ila %1.0 arasındaki enine donatı oranlarının optimum sismik performans sağladığı tespit edilmiştir (Habibi vd. 2018).

3.3. TBDY 2018'e Göre Perde Sınır Şartları

2018 yılında yürürlüğe giren TBDY 2018'de daha önce yürürlükte olan TDY 2007'ye göre oldukça kapsamlı sınırlamalar getirilmiştir. TBDY 2018 Madde 7.6.1.2'ye göre "Perdeler, planda uzun kenarının kalınlığına oranı en az altı olan düşey taşıyıcı sistem elemanlarıdır (Denk. 3.1)".

$$l_w \geq 6b_w \tag{3.1}$$

Madde 7.6.1.2(a)'ya göre "Dikdörtgen ve U, L ve T gibi perdelerin gövde bölgesindeki perde kalınlığı kat yüksekliğinin **1/16**'sından ve 250 mm'den küçük olmayacaktır (Denk. 3.2, 3.3)".

$$b_w \geq 250\ mm \tag{3.2}$$

$$b_w \geq \frac{H_{kat}}{16} \tag{3.3}$$

Madde 7.6.1.2(b)'ye göre "Dikdörtgen perde veya perde kolu kalınlığı perdenin veya perde kolunun plandaki yanal doğrultuda tutulmamış boyunun **1/30**'undan küçük olmayacaktır (Denk. 3.4)".

$$b_w \geq \frac{l_{tutulmamış}}{30} \tag{3.4}$$

Madde 7.6.1.2(c)'ye göre "Perde kolu her iki ucundan yanal doğrultuda bir perde ile tutulu ise, perde kolu kalınlığı kat yüksekliğinin **1/20**'sinden ve 250 mm'den küçük olmayacaktır (Denk. 3.5, 3.6)".

$$b_w \geq 250\ mm \tag{3.5}$$

$$b_w \geq \frac{H_{kat}}{20} \tag{3.6}$$

Genellikle tünel kalıpla yapılan ve taşıyıcı sistemin tamamının perdeler tarafından oluştuğu yapılar için 7.6.1.3 maddesi öne çıkmaktadır. Verilen koşulların her ikisinin de sağlanması durumunda "Perde kalınlığı, binadaki en yüksek katın yüksekliğinin 1/20'sinden ve 200 mm'den az olmayacaktır (Denk. 3.7, 3.8)".

$$\frac{\sum A_g}{\sum A_p} \geq 0.002 \tag{3.7}$$

$$\frac{V_t}{\sum A_g} \leq 0.5 f_{ctd} \tag{3.8}$$

TBDY 2018 7.6.1.1. maddesine göre "Perdenin boşluklar çıkarıldıktan sonra kalan net enkesit alanı, N_{dm} TS 498'de hareketli yükler için tanımlanmış olan hareketli yük azaltma katsayıları da dikkate alınarak, G ve Q düşey yükler ve E deprem etkisinin ortak etkisi G+Q+E altında hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü olmak üzere, Denk. 3.9 koşulunu sağlayacaktır".

$$A_c \geq \frac{N_{dm}}{0.35 f_{ck}} \tag{3.9}$$

TBDY 2018 7.6.2.1'e göre " $H_w/l_w > 2$ olan perdelerin planda her iki ucunda perde uç bölgeleri oluşturulacaktır. Uç bölgeleri, perde uç bölgesinin kendi kalınlığı içinde oluşturulabileceği gibi, perdeye birleşen diğer bir perdenin içinde de düzenlenebilir".

TBDY 2018 7.6.2.2'ye göre "Temel üstünden veya perdenin plandaki uzunluğunun %20'den daha fazla küçüldüğü seviyeden itibaren kritik perde yüksekliği, $2l_w$ değerini aşmamak üzere, Denk. 3.10'da verilen koşulların elverişsiz olanını sağlayacak biçimde belirlenecektir".

$$2l_w \geq H_{cr} \geq \max[l_w; H_w/6] \tag{3.10}$$

TBDY 2018 7.6.2.3'e göre "Dikdörtgen kesitli perdelerde, 7.6.2.2'de tanımlanan kritik perde yüksekliği boyunca uç bölgelerinin her birinin plandaki uzunluğu, perdenin plandaki toplam uzunluğunun %20'sinden ve perde kalınlığının iki katından daha az olmayacaktır (Denk. 3.11). Kritik perde yüksekliğinin üstünde kalan perde kesimi boyunca ise, perde uç bölgelerinin her birinin plandaki uzunluğu, perdenin plandaki

toplam uzunluğunun %10'undan ve perde kalınlığından daha az alınmayacaktır (Denk. 3.12)".

$$l_u \geq 2b_w \geq 0.2l_w \tag{3.11}$$

$$l_u \geq b_w \geq 0.1l_w \tag{3.12}$$

3.4. TBDY 2018'e Göre Donatı Düzeni ve Sınır Şartları

TBDY 2018 7.6.3.1'e göre "Perdenin her iki yüzündeki gövde donatılarının toplam enkesit alanı, boyuna ve enine donatıların her biri için, perde uç bölgelerinin arasında kalan perde gövdesi brüt enkesit alanının 0.0025'inden az olmayacaktır (Denk. 3.13)".

$$\rho_{gövde} \geq 0.0025 \tag{3.13}$$

"$H_w/l_w \leq 2$ olması durumunda perde gövde bölgesi, perdenin tüm kesiti olarak gözönüne alınacaktır. Perde gövdesinde boyuna ve enine donatı aralığı 250 mm'den fazla olmayacaktır (Denk. 3.14)".

$$s \leq 250\ mm \tag{3.14}$$

TBDY 2018 7.6.3.3'e göre "Uç bölgeleri dışında, perde gövdelerinin her iki yüzündeki donatı ağları, her bir metrekare perde yüzünde en az dört adet özel deprem çirozu ile karşılıklı olarak bağlanacaktır. Ancak kritik perde yüksekliği boyunca, uç bölgeleri dışındaki beher metrekare perde yüzünde en az on adet özel deprem çirozu kullanılacaktır. Çirozların çapı, en az yatay donatının çapı kadar olacaktır. Ancak, çirozların birim alandaki sayısı $\phi_{gövde}/\phi_{çiroz}$ oranında arttırılarak çapı küçültülebilir".

TBDY 2018 7.6.2.4'e göre "Perde uç bölgelerinin, perdeye birleşen diğer bir perdenin içinde düzenlendiği durumda; her bir perde uç bölgesi perde gövdesinin içine doğru 300 mm'den daha az olmamak üzere en az perde kalınlığı kadar uzatılacaktır (Denk. 3.15)".

$$l \geq b_w \geq 300\ mm \tag{3.15}$$

TBDY 2018 7.6.3 maddesinde "Kritik perde yüksekliği boyunca perde uç bölgelerinin her birinde toplam düşey donatı alanının perde brüt enkesit alanına oranı (Denk. 3.17) en az 0.002 olacaktır. Bu yüksekliğin dışında (Denk. 3.18) bu oran 0.001'den daha az olmayacaktır. Perde uç bölgesinin geometrisinde ve donatısındaki geçiş, üç kat boyunca kademeli olarak yapılacaktır. Ayrıca, perde uç bölgelerinin her birinde boyuna donatı miktarı $4\phi14$'ten az olmayacaktır (Denk. 3.16). Perde uç bölgelerinde boyuna donatı oranı 0.03'ü (bindirme bölgesinde 0.06) geçmeyecektir (Denk. 3.19)".

$$A_{s\,uç} \geq 4\phi14 \tag{3.16}$$

$$A_{s\,uç} \geq 0.002b_w l_w \tag{3.17}$$

$$A_{s\,dış} \geq 0.001 b_w l_w \tag{3.18}$$

$$\rho_{uç} \geq 0.03 \tag{3.19}$$

TBDY 2018 7.6.5.2 (a) maddesinde "Uç bölgelerinde kullanılacak enine donatının çapı 8 mm'den küçük alınmayacaktır. Etriye kollarının ve/veya çirozların arasındaki yatay mesafe (a), etriye ve çiroz çapının 25 katından daha fazla olmayacaktır (Denk. 3.20, 3.21)".

$$\phi_{etriye} \geq 8 \text{ mm} \tag{3.20}$$

$$a \leq 25\phi_{etriye} \tag{3.21}$$

TBDY 2018 7.6.5.2 (b) maddesinde "Kritik perde yüksekliği boyunca perde uç bölgelerine, kolonların sarılma bölgeleri için belirlenen enine donatının en az 2/3'ü konulacaktır (Denk 3.22)".

$$A_{sh} \geq \frac{2}{3} 0.0075 s b_k \frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \tag{3.22}$$

TBDY 2018 7.6.5.2 (b) maddesinde "Düşey doğrultuda etriye ve/veya çiroz aralığı 150 mm'den daha büyük, 50 mm'den daha küçük alınmayacaktır (Denk 3.23)".

$$150 \geq s \geq 50mm \tag{3.23}$$

TBDY 2018 7.6.5.2 (b) maddesinde bu aralık "Boyuna donatı çapının 6 katı ve perde kalınlığının 1/3'ünden fazla olmayacaktır. Perde uç bölgesindeki enine donatılar temelin içinde, 300 mm'den ve perde kalınlığından küçük olmayan bir yükseklik boyunca devam ettirilecektir (Denk 3.24, 3.25)".

$$s \leq 6\phi_{boyuna} \tag{3.24}$$

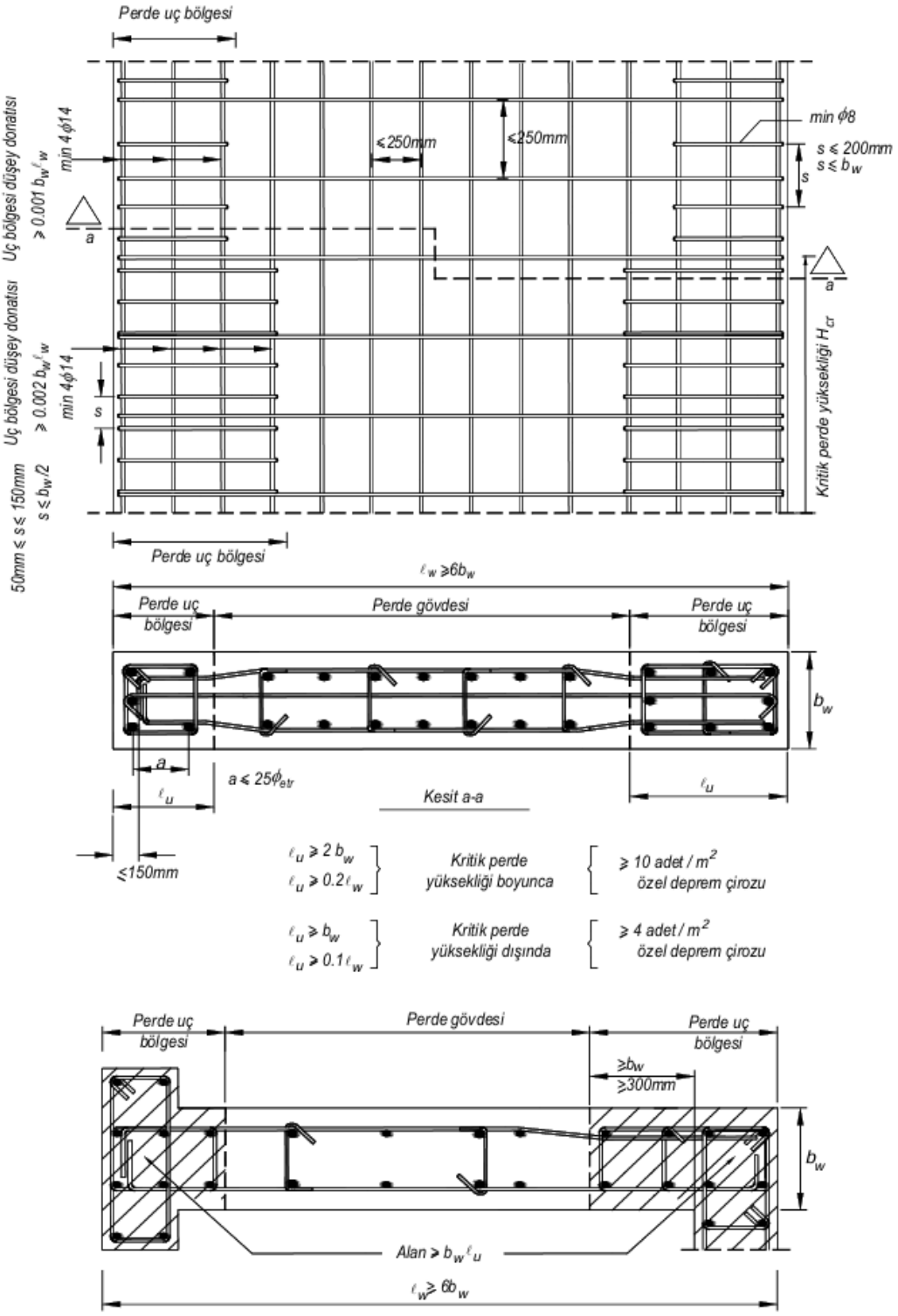
$$s \leq \frac{b_w}{3} \tag{3.25}$$

TBDY 2018 7.6.5.2 (c) maddesinde "Kritik perde yüksekliğinin dışında kalan perde uç bölgelerinde düşey doğrultudaki etriye ve/veya çiroz aralığı, perde kalınlığından ve 200 mm'den daha büyük alınmayacaktır (Denk 3.26, 3.27)".

$$200 \geq s \tag{3.26}$$

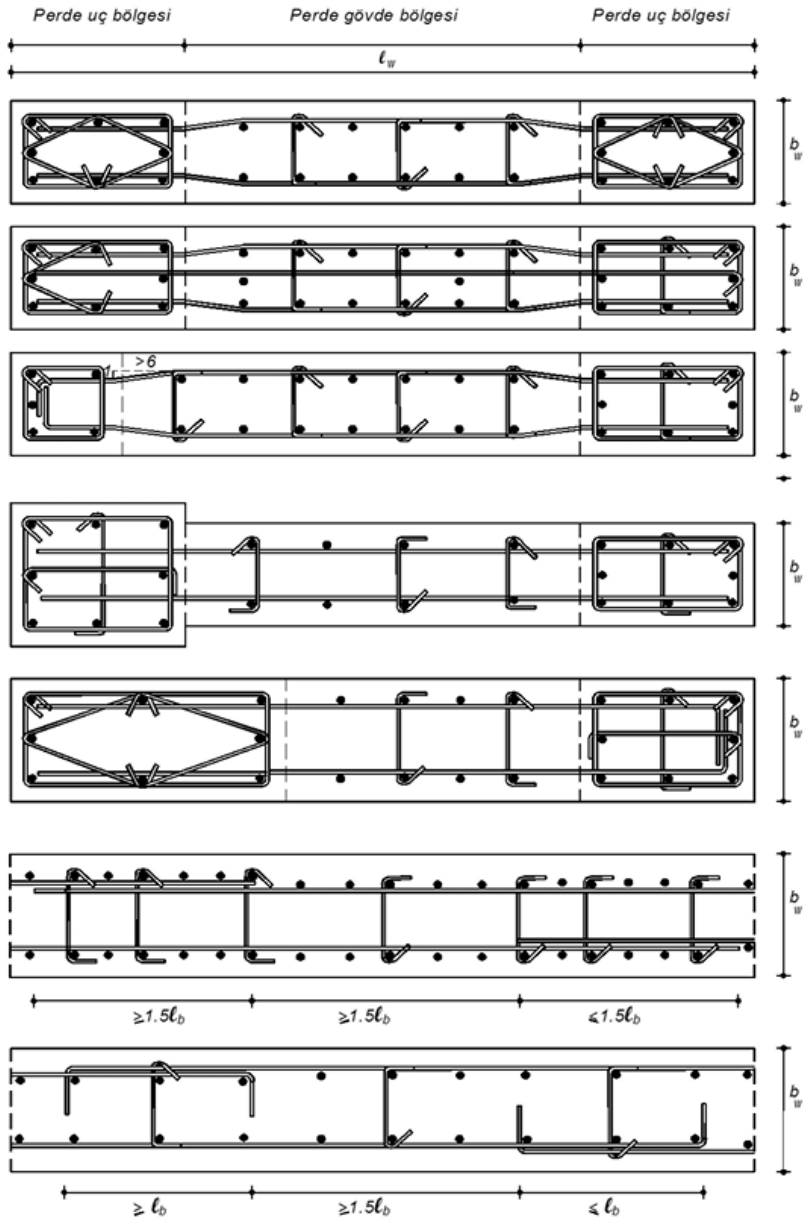
$$s \leq b_w \tag{3.27}$$

TBDY 2018'e göre örnek yatay ve düşey donatı düzeni şeması Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. TBDY 2018'e göre perde donatı düzeni

TBDY 2018 perde geometri ve donatı sınır koşullarına uyulduğu sürece farklı donatı detaylandırmalarına izin verilebilmektedir.



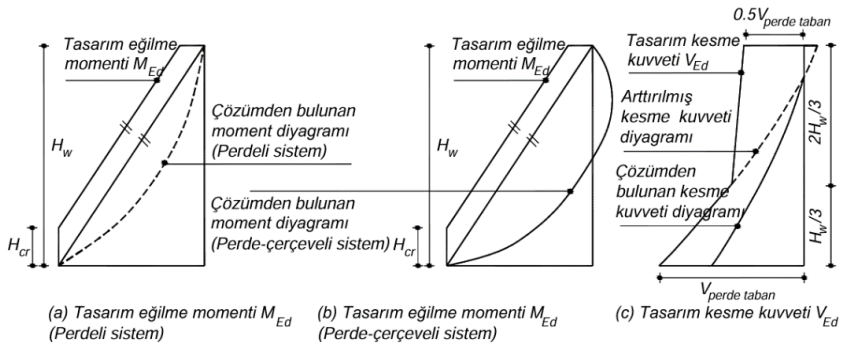
Şekil 3.9. TBDY 2018'e göre uygulanabilecek örnek perde donatı düzenleri

TBDY 2018 Bölüm 7.6.5'te, perde gövdesindeki yatay donatıların düzenlenmesine ilişkin bazı donatı düzenleri örnek olarak sunulmuştur. Şekil 3.9'da bu düzenlemeleri temsil eden yedi farklı yerleşim tipi gösterilmektedir. Birinci düzenlemede, uç bölgedeki kenar donatısı içe bağlanmakta ve gövde donatısı uç bölgelere eksen değiştirerek yönlendirilmektedir. İkinci düzenlemede, gövde yatay donatısının bir kısmı perde ortasında yer almaktadır. Üçüncü düzenlemede, gövde donatısı doğrudan uç bölgeye kenetlenmektedir. Dördüncü düzenlemede, gövde donatısı içe çekilerek uç bölgeye kenetlenmektedir. Beşinci düzenlemede, gövde donatısının uç bölgeye gönyeli olarak kenetlendiği bir yerleşim sunulmaktadır. Altıncı düzenlemede, bindirme ekleri perde iç bölgesinde yapılmaktadır. Yedinci düzenlemede ise bindirme ekleri perde dış bölgesinde yer almaktadır (Celep, 2022).

3.5. TBDY 2018'e Göre Kesme ve Eğilme Sınır Şartları

TBDY 2018 7.6.6.1 maddesinde "$H_w/l_w > 2$ koşulunu sağlayan perdelerde tasarıma esas eğilme momentleri, kritik perde yüksekliği boyunca sabit bir değer olarak, perde tabanında hesaplanan eğilme momentine eşit alınacaktır. Kritik perde yüksekliğinin sona erdiği kesitin üstünde ise, perdenin tabanında ve tepesinde hesaplanan momentleri birleştiren doğruya paralel olan doğrusal moment diyagramı uygulanacaktır".

Şekil 3.10'da verilen koşulları sağlayan bodrumlu binalarda sabit perde momenti, kritik perde yüksekliği boyunca göz önüne alınacaktır. $H_w/l_w \leq 2$ olan perdelerin bütün kesitlerinde tasarım eğilme momentleri, hesaplanan eğilme momentlerine eşit alınacaktır.



Şekil 3.10. Tasarım eğilme momenti ve tasarım kesme kuvveti diyagramları (TBDY)

TBDY 2018 7.6.6.3 maddesinde " $\frac{H_w}{l_w} > 2$ koşulunu sağlayan perdelerde, göz önüne alınan herhangi bir kesitte enine donatı hesabında esas alınacak tasarım kesme kuvveti, V_e, Denk. 3.28 ile hesaplanacaktır".

$$V_e = \beta_v \frac{(\mathrm{M_p})_\mathrm{t}}{(\mathrm{M_d})_\mathrm{t}} V_d = \beta_v \frac{1.25(M_r)_t}{(M_d)_t} V_d \tag{3.28}$$

TBDY 2018 7.6.6.3 maddesinde " $M_p = 1.25M_r$ perde kesiti güç tükenmesi momenti ve M_r ise malzeme tasarım dayanımları ile hesaplanan kesit kapasitesidir. Bu denklemde yer alan kesme kuvveti dinamik büyütme katsayısı $\beta_v = 1.5$ alınacaktır. Ancak, deprem yükünün tamamının betonarme perdelerle taşındığı binalarda $\beta_v = 1.0$ alınabilir. Daha kesin hesap yapılmadığı durumlarda burada $(M_p)_t \leq 1.25(M_r)_t$ kabul edilebilir. Düşey yükler ile depremden hesaplanan kesme kuvvetinin 1.2D (boşluksuz perdeler) veya 1.4D (bağ kirişli perdeler) katı ile büyütülmesi ile elde edilen değerin, Denk. 3.28 ile hesaplanan V_e 'den küçük olması durumunda, V_e yerine bu kesme kuvveti kullanılacaktır".

Perde kesitlerinin kesme dayanımı, V_r , Denk. 3.29 ile hesaplanacaktır.

$$V_r = A_{ch}\left(0.65 f_{ctd} + \rho_{sh} f_{ywd}\right) \tag{3.29}$$

V_e tasarım kesme kuvveti Denk. 3.30'da verilen koşulları sağlayacaktır:

$$V_e \leq 0.85 A_{ch} \sqrt{f_{ck}} \; (Boşluksuz\ perdeler) \tag{3.30}$$

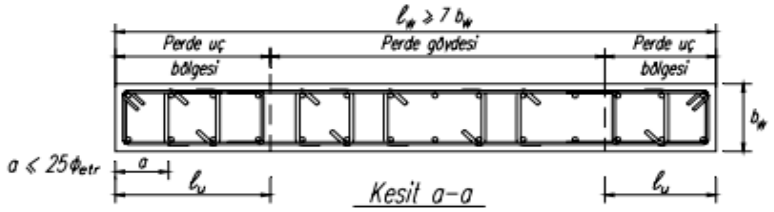
TBDY 2018 7.6.7.2 bölümünde "Temele bağlantı düzeyinde ve üst katlarda yapılacak yatay inşaat derzlerindeki düşey donatı, o kesitte aktarılan kesme kuvveti gözönüne alınarak, TS 500'de tanımlanan kesme sürtünmesi yöntemi ile kontrol edilecektir. Kesme sürtünmesi hesabında perde gövde ve uç bölgesi düşey donatısının tamamı A_s ve pürüzlendirilmiş yüzey için betonun katkısı f_{ctd} ile gözönüne alınacaktır. V_e sürtünme kesme kuvveti Denk. 3.31'de verilen koşulları sağlayacaktır".

$$V_e \leq f_{ctd} A_c + \mu A_s f_{yd}$$
$$V_e \leq min[0.2 f_{ck} A_c; (3.3 + 0.08 f_{ck}) A_c] \tag{3.31}$$

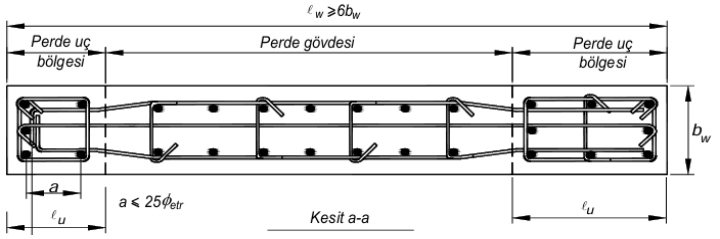
3.6. TDY 2007 ve TBDY 2018 Arasındaki Perde Tasarım Farklılıkları

TDY 2007'den TBDY 2018'e geçişte performansa dayalı tasarım ilkesi daha da benimsenerek daha spesifik analiz yöntemleri önerilmiş taşıyıcı sistem elemanlarının detaylandırmaları daha net anlatılmış ve daha güvenli yapıların inşa edilmesi hedeflenmiştir. TBDY 2018'de perdeler bölümünde TDY 2007'de bulunan benzer maddeler belirlenmiş fakat bazı sınır şartları değiştirilmiştir.

Perdelerin planda uzun kenarının kalınlığına oranı 7'den 6'ya düşürülmüştür. Minimum perde kalınlığı 200 mm'den 250 mm'ye çıkarılmıştır. Gövde bölgesindeki perde kalınlığı kat yüksekliğinin 1/20'sinden 1/16 oranına düşürülmüştür. Sadece perdelerden oluşan binalarda minimum perde kalınlığı 150 mm'den 200 mm ye çıkarılmıştır. İki yönetmelikte de kritik perde yüksekliği için perde uç bölgeleri oluşturulması zorunludur. Yine uç bölgesinde minimum $4\phi14$ kullanılmalıdır. Etriye ve çirozların miktarları, aralıkları, sınır koşulları aynıdır. Perde donatı düzeni hakkında yapılan en önemli değişiklik perde yatay donatılarının perde uç bölgesinde perde boyuna donatıların içinde olması ve gönyelenmesi şartıdır. Bu iki donatı düzeni farkı Şekil 3.11, 3.12'de görülebilmektedir.



Şekil 3.11. TDY 2007 donatı düzeni



Şekil 3.12. TBDY 2018 donatı düzeni

TDY 2007'de kullanılan tasarım kesme kuvveti V_e'nin boşluksuz perdeler için hesabı Denk. (3.32) yerine Denk. (3.30) şeklinde değiştirilmiştir.

$$V_e \leq 0.22 A_{ch} f_{cd} \tag{3.32}$$

3.7. Eurocode 2 ve Eurocode 8'e Göre Perdeler

Eurocode 8 Bölüm 5.4.3.2.1'e göre perde duvarların planda kalınlığının genişliğine oranı 4'den büyük olmalıdır. Bir perde duvar için minimum 150 mm kalınlık mümkün olsa da 180-250 mm arası kalınlığa sahip olması ve donatı detaylarının verilmesi önerilmektedir. Eurocode'a göre perde duvarların kalınlığı maruz kaldığı kuvvetlere, istenilen yangın direncine, dayanıma ve inşaat uygulama kolaylığına göre değişebilmektedir.

Eurocode 8'de kolonlarda olduğu gibi perde duvarlarda da narinlik büyük öneme sahiptir. Perdelerde narinlik, perde yüksekliğinin planda uzunluğuna oranıdır. Bir perde duvar narin olduğunda eğilme momentlerine ve eksenel kuvvetlere karşı direnci azalır ve ikinci mertebe etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Eurocode 2 Bölüm 9.6'da Perdelerde düşey donatı olarak minimum donatı oranı 0.002 maksimum donatı oranı 0.04 olarak verilmiştir. İki düşey donatı arası mesafe perde kalınlığının 3 katını ve 400 mm'yi geçmeyecektir. Yatay donatı olarak düşey donatının %25'i veya 0.001 donatı oranı kullanılması önerilmiştir ve aralığı 400 mm'yi geçmeyecektir. Etriyelerde 0.02 donatı oranı aşılırsa, kolonlarda verilen şartlarda donatılandırılacaktır.

TBDY 2018'de olduğu gibi Eurocode standardında da süneklik düzeyi yüksek perdeler için H_{cr} kritik perde yüksekliği uzunluğunda perde uç bölgesinden bahsedilmektedir. Eurocode Bölüm 5.4.3.4.2'de TBDY 2018'de olduğu gibi uç bölgesi uzunluğu, perdenin genişliğinin 2 katından az olacaktır ve kat yüksekliğinin 6'da 1'i ve perde genişliği değerlerinden maksimum olanı kabul edilecektir.

Eurocode 2 Bölüm 9.6'da perde donatı tasarımı TBDY 2018'e kıyasla daha serbest bırakılmıştır. TBDY 2018'deki perde tasarımında yatay donatıların perde uç bölgesinde düşey donatıların içerisinde gönyelenmesi şartı Eurocode'da bahsedilmemiştir.

3.8. ACI 318-19'a Göre Perdeler

ACI 318-19 Bölüm 11.3.1'de taşıyıcı olarak görev yapan minimum perde boyutları 4 inç yani yaklaşık olarak 10 cm ve kat yüksekliğinin ve perde genişliğinin 25'te 1'inin maksimum değeri olarak alınmaktadır. ACI 318-19 Bölüm 2.3'e göre perdeler planda uzunluğunun kalınlığına oranı 3'den büyük yapı elemanlarıdır.

Narinlik ACI 318-19 Bölüm 11.5.4.3'de bahsedildiği üzere perde tasarımında büyük bir öneme sahiptir. Perde yüksekliğinin perde uzunluğuna oranı h_w/l_w azaldıkça perdeye uygulanan kesme katsayısı α_c ve buna oranla perdeye etkiyen kesme kuvveti V_n artmaktadır (Denk 3.34, 3.35).

$$h_w/l_w \leq 1.5 \rightarrow \alpha_c = 3$$

$$1.5 < h_w/l_w < 2.0 \rightarrow \alpha_c = 3 - 2\left(\frac{h_w}{l_w} - 1.5\right) \quad (3.34)$$

$$h_w/l_w \geq 2.0 \rightarrow \alpha_c = 2$$

$$V_n = \left(\alpha_c \lambda \sqrt{f_c'} + \rho_t f_{yt}\right) A_{cv} \quad (3.35)$$

ACI 318-19 Bölüm 18.10.6.2'e göre süneklik yüzeyi yüksek perdelerin farklı şartları sağlamasıyla perde uç bölgeleri yapılabilmektedir. Plastik mafsal oluşabilecek perde bölgelerinde perde uç bölgesi oluşturulması önerilmiştir. Perde uç bölgesi uzunluğu oluşan deplasmanlara, perdedeki eksenel kuvvete, tarafsız eksen derinliğine ve momente göre değişiklik gösterebilmektedir.

ACI 318-19 Bölüm 11.6.1'e göre etriye aralığı perde uç bölgesinde $s \leq 6\,\phi$ veya 200 mm'den ve donatı oranı 0.0025'den az olmamalıdır. Donatı oranları donatı çapına, donatıların kaynaklı olup olmadığına, perdenin prekast veya normal dökümlü olmasına ve kullanılan çeliğin akma dayanımına göre değişiklik gösterebilmektedir. Perdelerde genellikle minimum boyuna donatı oranı 0.0015'dir. Kesme kuvvetinin belli bir değerden fazla olduğu durumda minimum donatı oranı 0.0025'e çıkarılmaktadır.

3.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın kabul gören bir nümerik metottur. Bu yöntemde, incelenen yapısal bileşen veya sistem, ayrık ve sonlu sayıda basit geometrili elemanlara (sonlu elemanlar) ayrılmaktadır. Bu elemanların davranışını yöneten matematiksel ilişkiler formüle edilerek, tüm sistemin davranışını temsil eden büyük bir cebirsel denklem sistemi oluşturulur. Uygulanan sınır koşulları ve dış yüklemeler dikkate alınarak bu denklem sisteminin çözümlenmesi, nesnenin farklı fiziksel etkilere (mekanik kuvvetler, elektrostatik alanlar, vb.) karşı gösterdiği tepkinin tahmini mümkün kılmaktadır (Kaya 2023).

ABAQUS, ANSYS ve LS DYNA gibi çeşitli ticari yazılım platformları, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak karmaşık mühendislik analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu programlar, kolay arayüzleri ve kapsamlı eleman kütüphaneleri vasıtasıyla, gerçek problemlere yüksek doğrulukla yaklaşan modellerin oluşturulmasına ve bu modellerin detaylı çözümlemelerine imkân sağlamaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları, kompleks geometriler ve çeşitli sınır koşulları bu yazılımlar aracılığıyla etkin bir şekilde modellenebilmektedir.

Bu çalışmada tercih edilen ABAQUS, sonlu elemanlar prensiplerine dayanan bütünleşik bir yazılım paketidir. Bu yazılımın tercih edilme nedeni, betonun çatlaması, ezilmesi ve donatının akması gibi doğrusal olmayan karmaşık davranışları yüksek doğrulukla temsil edebilmesi ve bu alandaki modelleme başarısının literatürde yaygın biçimde kabul görmesidir. ABAQUS yazılımında beş temel analiz modülü mevcut olup, bu tez kapsamında dinamik sistemlerin modellenmesi amacıyla "explicit" analiz tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde çözüm yaklaşımı olarak genellikle iki farklı

zaman entegrasyon tekniği kullanılmaktadır: “implicit” (örtük) ve “explicit” (açık) yöntemler. “Implicit” yöntem, her zaman adımında tüm sistem denklem takımının çözülmesini gerektiren, kararlı fakat özellikle temas, ayrılma ve yüksek derecede doğrusal olmayan durumlarda sayısal olarak zorlayıcı hale gelebilen bir yöntemdir. “Explicit” yöntem ise sistemin sonraki durumunu önceki adımın verilerine dayanarak doğrudan hesaplayan, küçük zaman adımlarıyla çalışan, ancak temas, ayrılma ve yüksek hasar içeren karmaşık analizlerde sayısal olarak daha kararlı ve güvenilir sonuçlar sağlayan bir yaklaşımdır.

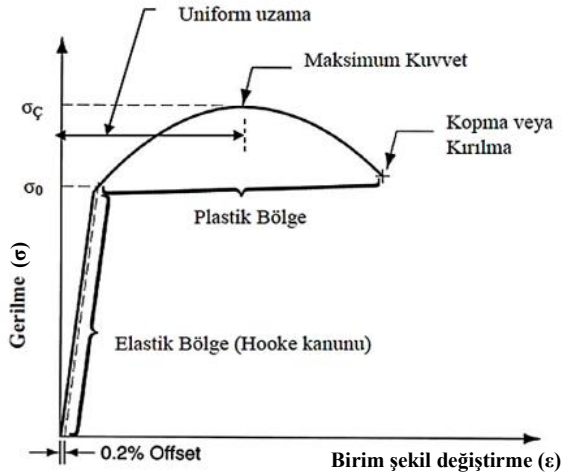
Sonlu elemanlar yöntemi, doğası gereği yaklaşık sayısal çözümler üretmektedir. Bu nedenle, ABAQUS veya benzeri yazılımlar aracılığıyla elde edilen sonuçların, analitik çözümler ve deneysel verilerle karşılaştırılarak yorumlanması büyük önem arz etmektedir. Bu doğrulama süreci, analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırmakta ve mühendislik kararlarının bilimsel bir zemine oturtulmasına katkı sağlamaktadır.

3.10. Beton Hasar Plastisite (Concrete Damage Plasticity-CDP) Malzeme Modeli

ABAQUS'deki Beton Hasar Plastisitesi (CDP) modeli, beton gibi kırılgan malzemelerin yapısal davranışını anlamak için bir araçtır. İzotropik hasar ve plastiklik kavramlarını birleştirerek, betonun yük altındaki kalıcı değişimlerini ve içindeki zedelenmeleri hesaba katmaktadır.

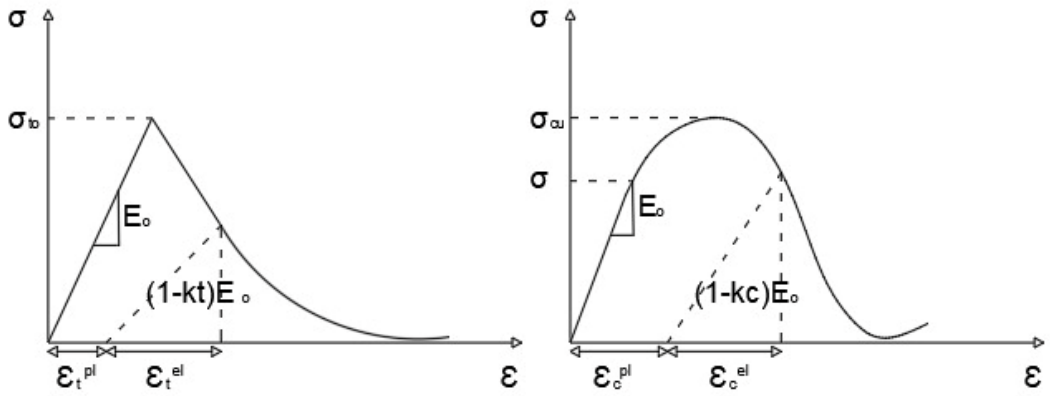
Özellikle betonarme analizlerinde kullanılan bu model, farklı yükleme türlerindeki (statik, tekrarlı, dinamik) beton tepkisini simüle edebilmektedir. Betonun kısmi iyileşmesini ve yükleme hızının etkilerini bile dikkate alabilmektedir. Betonun hem çekme hem de basınç altındaki hasar davranışını ve kalıcı deformasyonlarını bir arada modelleyebilmesi sebebiyle, bu çalışma için en uygun malzeme modeli olan CDP seçilmiştir.

Lubliner ve diğerleri tarafından geliştirilen CDP modeli, beton ve benzeri malzemelerdeki hasarı modellemek için temel olarak basınç ezilmesi ve çekme kırılması olmak üzere iki ana değişkeni kullanmaktadır (Lubliner vd. 1989). CDP modelinde betonun hem çekme hem de basınç hasarı ABAQUS programında ayrı olarak görüntülenebilmektedir. Şekil 3.13’de CDP modelinde kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini şematik olarak gösterilmektedir. Yatay eksen birim şekil değiştirmeyi (ε), düşey eksen ise gerilmeyi (σ) temsil etmektedir. Eğrinin elastik doğrusal kısmından sonra gelen iniş eğimi, betonun çekme ve basınç altında yumuşama (softening) davranışını temsil eder. CDP modelinde bu eğriler, malzemenin plastik davranışı ve hasar parametrelerinin tanımlanması açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.13. Gerilme birim şekil değiştirme diyagramı (Kaya 2023)

Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına oranla oldukça düşük olması, çatlaklara neden olmaktadır. Bu betonun nispeten düşük çekme gerilmeleri altında dahi çatlak oluşumuna ve yayılımına çatlakların ilerlemesi, malzemenin rijitliğinde bir azalmaya yol açmaktadır. Buna karşın, basınç gerilmeleri altında betonda kalıcı şekil değiştirmeler gözlemlenmektedir (Lale 2011). Şekil 3.14'de betonun tek eksenli yük etkisi altında basınç ve çekme davranışı gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Tek eksenli yük altındaki betonun davranışı **a)** çekme; **b)** basınç (Kaya 2023)

Beton Hasar Plastisitesi modelinde, malzemenin tek eksenli gerilme altındaki yumuşama ve pekleşme davranışları deneylerle belirlenebilmektedir. Ancak bu deneylerin maliyetli olması nedeniyle, araştırmacılar genellikle matematiksel denklemleri kullanmayı tercih etmektedirler. Bu tez çalışmasında, Carreira ve Chu (1985) tarafından önerilen matematiksel bağıntılardan yararlanılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Deneyin İncelenmesi

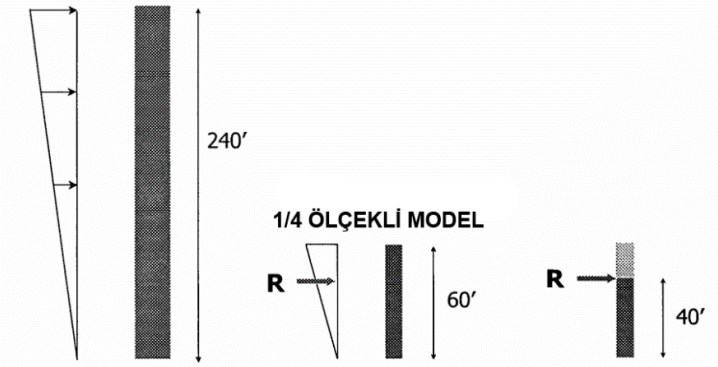
4.1.1. Giriş

Bu tez çalışmasında referans alınan ve incelenen doktora tezinde perdelerin etkin kesit rijitliğini anlamak amacıyla bir deneysel çalışma yürütülmüştür (Ibrahim 2000). Yüksek katlı bir yapının çekirdek perde kısmının tasarımı örnek alınarak üretilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Üretilen perde modeli (Ibrahim 2000)

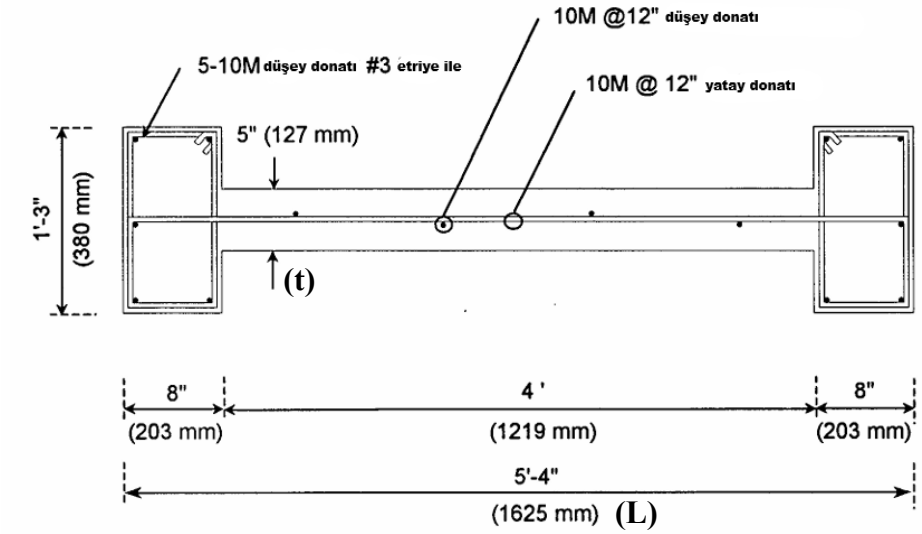
Normalde 240 feet yani yaklaşık 73 metre uzunluğa sahip bu perdeyi üretmek güç olacağından dolayı, 1/4 ölçeğinde 60 feet yani yaklaşık 18 metre olarak test edilmek üzere üretilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Üretilen perde modeli ölçeği

4.1.2. Deney numunesinin tanıtılması

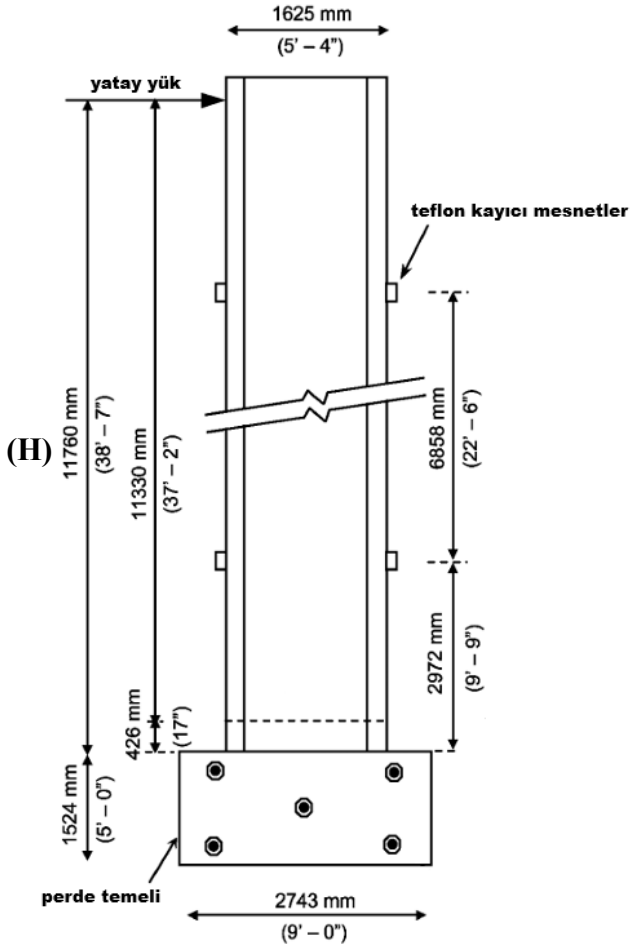
Numune, tabandan 12,2 m (40 feet) yüksekliğinde ve 1625 mm (5 feet 4 inç) uzunluğunda olup flanşlı bir enkesite sahiptir. Duvarın gövdesi 1219 mm (4 feet) uzunluğunda ve 127 mm (5 inç) kalınlığındayken, flanşlar 203 mm (8 inç) uzunluğunda ve 380 mm (15 inç) kalınlığındadır. Her iki flanştaki düşey donatı, 10M boyutlarında betonarme donatılardan oluşmakta ve bu donatılar, duvarın alt 3 m'sinde (10 feet) 64 mm (2.5 inç), kalan yükseklikte ise 152 mm (6 inç) aralıklarla yerleştirilmiş 3 numaralı (#3) etriyelerle sarılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Perde yatay kesiti

Etriyelere olan pas payı 6 mm (0.25 inç) olarak belirlenmiştir. Gövde kısmı ise 10M boyutunda, düşey ve yatayda 305 mm (12 inç) aralıklarla (ρ = %0.27) yerleştirilmiş çubuklarla donatılmıştır. Yatay donatılar, flanşlardaki düşey donatıların etrafına kancalı olarak bağlanmıştır (Adebar vd. 2007). 10M boyutundaki donatılar toplam donatı alanı olarak 100 mm^2 donatı çapı olarak 11.3 mm'ye ve #3 donatılar ise 9.525 mm donatı çapına tekabül etmektedir.

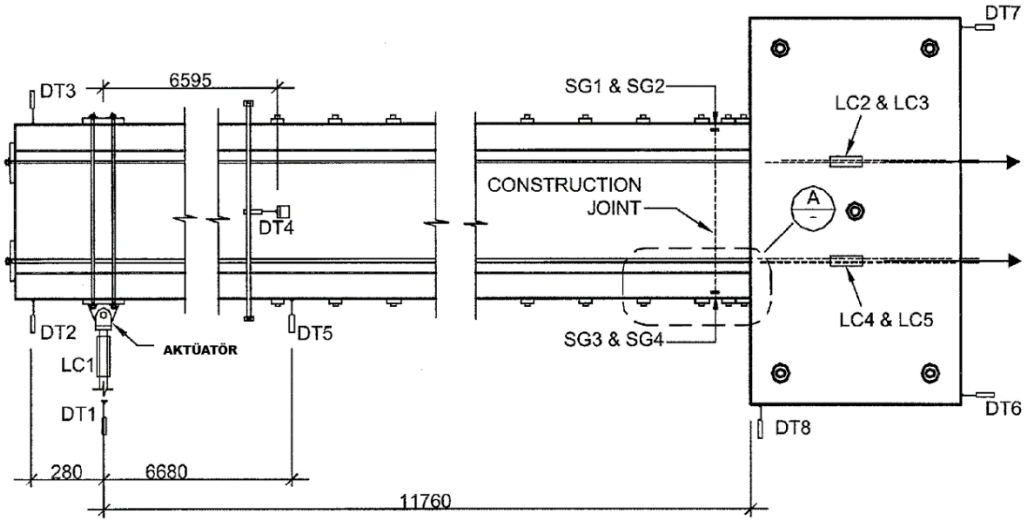
Laboratuvarın yüksekliğinin sınırlı olması nedeniyle, perde duvar yatay konumda inşa edilmiş ve test edilmiştir. Duvarın ağırlığından oluşan yataydaki sürtünmeyi minimuma indirgemek için yatay teflon kayıcı mesnetler perdenin belli bölgelerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.4). Perde kalınlığı (t), perde genişliği (L) ve perde üzerinde temel seviyesinden itibaren yükleme yüksekliği (H) olarak Şekil 4.3 ve 4.4 gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Perde düşey kesiti (Adebar vd. 2007)

4.1.3. Deney ölçüm düzeneği

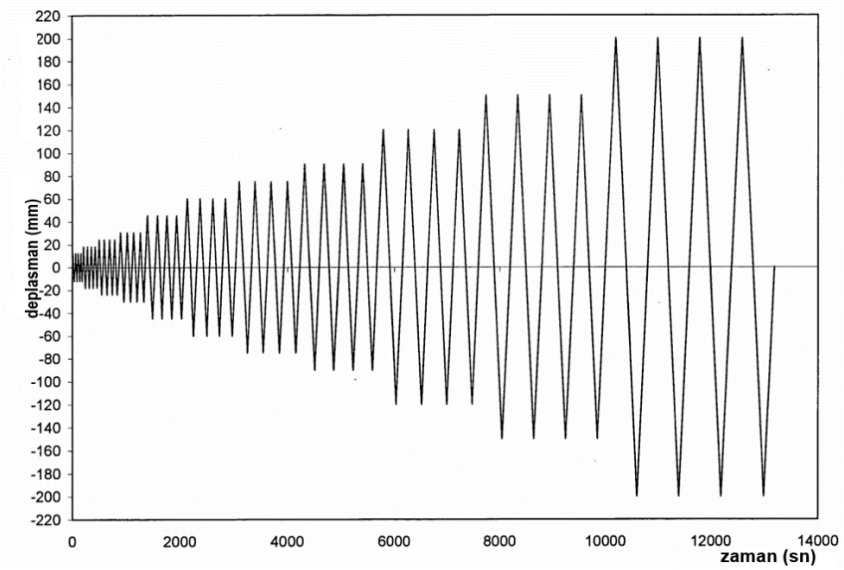
Şekil 4.5'te deneyde ölçüm için kullanılan elemanlar gösterilmiştir. Hidrolik aktuatör tarafından uygulanan yanal kuvvet, LC1 yük hücresi ile ölçülmüştür. Duvara uygulanan eksenel basınç, gerilme çubukları üzerine yerleştirilen LC2, LC3, LC4 ve LC5 yük hücreleri ile kaydedilmiş ve basıncın düzgün dağılımı doğrulanmıştır. Üst duvar deplasmanı aktüatör ile aynı yerde bulunan DT1 ile ölçülmüş DT2 ve DT3 tarafından doğrulanmıştır. Duvarın ara seviye deplasmanı, DT5 ile ölçülmüştür. Duvarın eksenel deformasyonu, tabandan 5.08 m yukarıda DT4 ve duvara yapıştırılan 11 adet metal levhanın dijital kumpasla ölçülmesiyle belirlenmiştir. Duvar tabanının olası kayması, DT6, DT7 ve DT8 deplasman transdüserleri ile takip edilmiştir. SG1, SG2, SG3, SG4 perdenin dört köşesindeki 10M düşey donatı çubuklarına yerleştirilip donatılardaki maksimum deformasyonu ölçmek için kullanılmıştır (Adebar vd. 2007).



Şekil 4.5. Deneyde ölçüm için kullanılan elemanlar (Adebar vd. 2007)

4.1.4. Deney yükleme düzeneği

Deney boyunca beton basınç dayanımının %10 una karşılık gelen 1500 kN sabit eksenel yük uygulanmıştır. Bu yük, duvar tabanına yerleştirilen iki hidrolik aktüatör vasıtasıyla, duvarın üst kısmına bağlanan dört adet donatı çekilerek oluşturulmuştur. Yatay yükleme için kullanılan hidrolik aktüatör, sabit 1 mm/saniye deplasman hızıyla çalıştırılmış olup yük, duvar tabanından 11.76 m mesafeye yerleştirilmiştir. Yükleme programı kapsamında, 15-300 mm aralığında belirlenen 13 farklı deplasman seviyesinin her birinde 4 tam yükleme döngüsü gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Her döngü, sıfır yükten başlayarak maksimum pozitif deplasmana, oradan maksimum negatif deplasmana ve tekrar sıfır noktasına dönüş şeklinde uygulanmıştır (Adebar vd. 2007).



Şekil 4.6. Deneyde kullanılan yatay yükleme döngüleri (Ibrahim, 2000)

4.1.5. Deneyde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme özelliklerinin tutarlılığını sağlamak amacıyla beton dökümü tek partide sağlanmış ve deney, beton dökümünden 140 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Betonun ortalama silindir basınç dayanımı 49 MPa olarak ölçülmüştür. Üç silindir numuneden ölçülen gerilme şekil değiştirme verileri betonun basınç dayanımının %40'ı ($\%40f_c$) seviyesindeki sekant elastisite modülünün 30000 MPa olduğunu göstermiştir. Maksimum basınç gerilmesinde 0.0022 birim şekil değiştirme ölçülmüştür (Adebar vd. 2007).

Deneyde kullanılan tüm 10M donatılar aynı çelikten üretilmiştir ve rastgele numunelere çekme testi uygulanmıştır. Ortalama akma dayanımı 455 MPa, ortalama kopma dayanımı 655 MPa ölçülmüştür. Pekleşme bölgesi başlangıcında birim deformasyon 0.008 olarak ölçülürken o noktadaki eğim 6000 MPa olarak ölçülmüştür. Çeliğin kopma noktasındaki birim deformasyonu ise 0.08 olarak ölçülmüştür (Adebar vd. 2007).

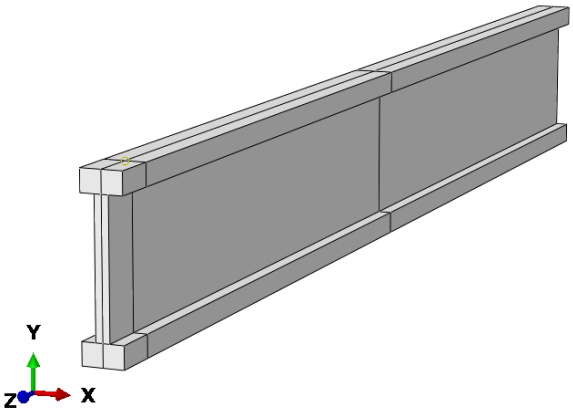
4.2. Analitik Modelin Oluşturulması

Deney modeline en uygun analitik modeli oluşturmak için ilk önce deneyde kullanılan perdenin donatı enkesiti AutoCAD programında çizilmiştir. Modelleme yapılırken ABAQUS (2021) sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Programda kullanılan birim sistemi Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. ABAQUS programında kullanılan birim sistemi

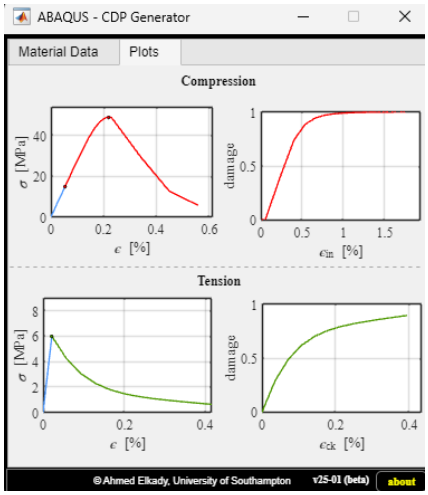
Büyüklük	SI	SI (mm)
Uzunluk	m	mm
Kuvvet	N	N
Kütle	kg	ton
Zaman	s	s
Gerilme	Pa	MPa
Enerji	J	mJ
Yoğunluk	kg/m^3	ton/mm^3

İlk olarak flanşlı perdenin kesiti ABAQUS un "part" kısmında çizilmiş, daha sonra "solid" eleman olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.7). Yine aynı kısımdan perdede kullanılan düşey, yatay donatılar ve etriyeler "wire" eleman olarak uzunluklarına göre farklı modellenmiştir.



Şekil 4.7. Perdenin flanşlı kesitinin oluşturulması

CDP Generator programında farklı beton özelliklerine göre beton hasar plastisite modeli oluştururken kullanılabilecek basınç ve çekme hasar parametreleri elde edilebilmektedir (Elkady 2023). Deneyde kullanılan beton özellikleri CDP Generator programına girilmiş ve hasar parametreleri elde edilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. ABAQUS CDP Generator (Elkady 2023)

Programın "property" kısmında "material" bölümü seçilip beton elastisite modülü 30000 MPa, poisson oranı 0.2, yoğunluğu 2.2×10^{-9} ton/mm^3, CDP öğeleri olarak dilatasyon açısı 36, eksantirisite değeri 0.1, f_{b0}/f_{c0} değeri 1.16, K invaryant katsayısı 0.6667, viskozite parametresi 0.001 olarak ve CDP Generator programından alınan hasar parametreleri değerleri girilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Beton malzeme özellikleri

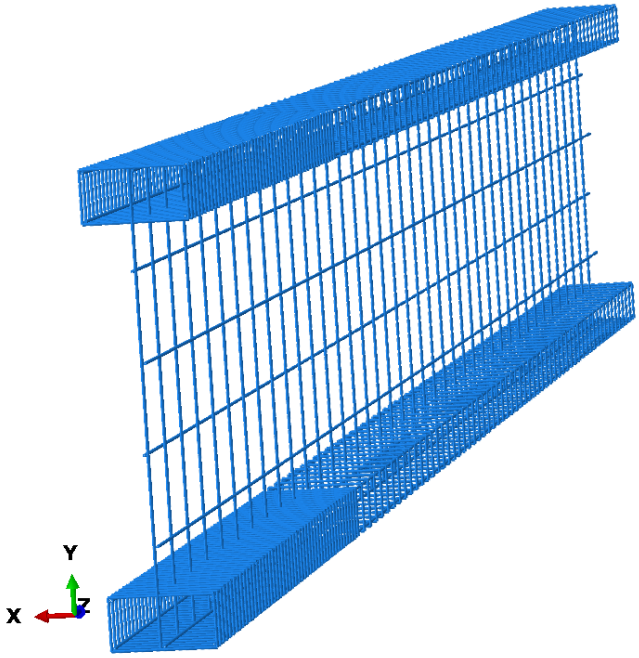
Dilatasyon açısı	Eksantirite değeri	f_{b0}/f_{c0}	İnvaryant katsayısı (K)	Viskozite parametresi	Elastisite Modülü	Poisson Oranı
36	0.1	1.16	0.6667	0.001	30000	0.2

Donatı çeliği için elastisite modülü 2×10^5 MPa, poisson oranı 0.3 yoğunluk 7.85×10^{-9} ton/mm^3 ve Çizelge 4.2'de gösterilen çelik plastik deformasyon değerleri de programın "property" bölümünde bulunan "material" kısmına girilmiştir.

Çizelge 4.3. Çelik plastik deformasyon değerleri

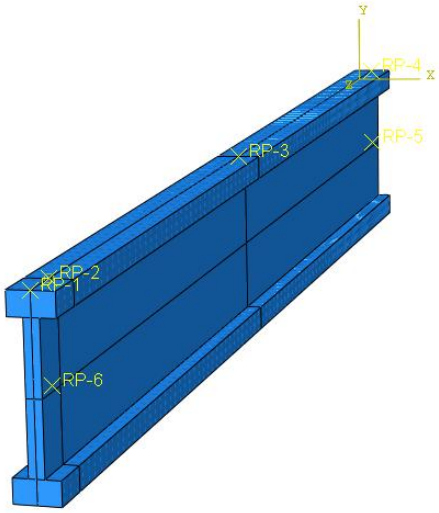
Akma Gerilmesi (MPa)	Plastik deformasyon
455	0
455	0.006725
520	0.014300
585	0.037675
650	0.076750
330	0.094350

Programın "property" kısmında bulunan "section" bölümünde, beton "solid" eleman olarak oluşturulmuş, "part" kısmında oluşturulan flanşlı perde, beton malzemesine atanmıştır. "Wire" olarak modellenen donatılar sahip oldukları donatı çapları seçilerek farklı elemanlar olarak "beam" tipinde atanmıştır. "Assign beam orientation" seçeneğiyle donatıların lokal eksenleri atanmıştır. Assembly kısmında tüm etriye, yatay ve düşey donatıların 3 boyutlu ortamda konumları belirlenmiş perde kesitinin içinde birleştirilmiştir (Şekil 4.9).



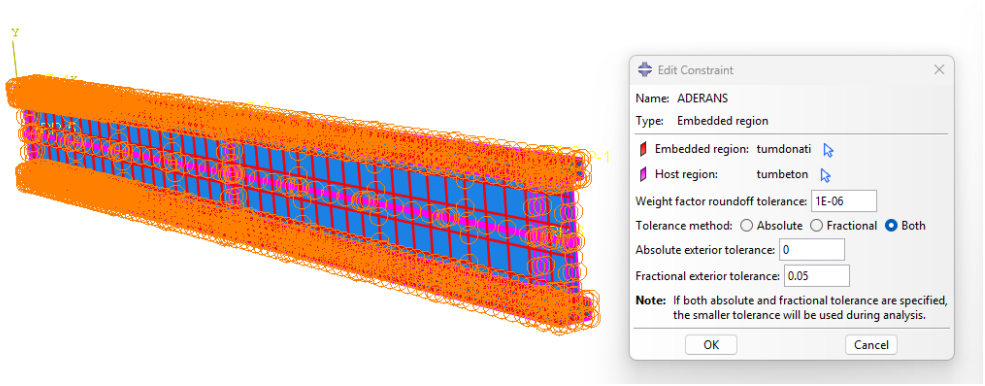
Şekil 4.9. Assembly modülünde tüm donatıların oluşturulması

Step kısmında analiz tipi doğrusal ötesi "Dynamic/Explicit" olarak belirlenmiş analiz süresi 30 saniye seçilmiştir. "Field output" seçeneğiyle 0.2 saniyede bir gerilme, şekil değiştirme, hasar vb. verilerin çıktısının analiz sonrasında alınması ayarlanmıştır. "History output" seçeneğinde modelin belli noktalarındaki belli değerler kaydedilebilmektedir. Deneyde ölçülen kuvvet deplasman eğrisinin modelde de ölçümünün yapılabilmesi için "history output" özelliği kullanılmıştır. Modeldeki verilerin okunması için model farklı bölgelere bölünmüş, kritik noktalarda referans noktaları oluşturulmuş bu referans noktalarından okuma yapılması sağlanmıştır (Şekil 4.10).



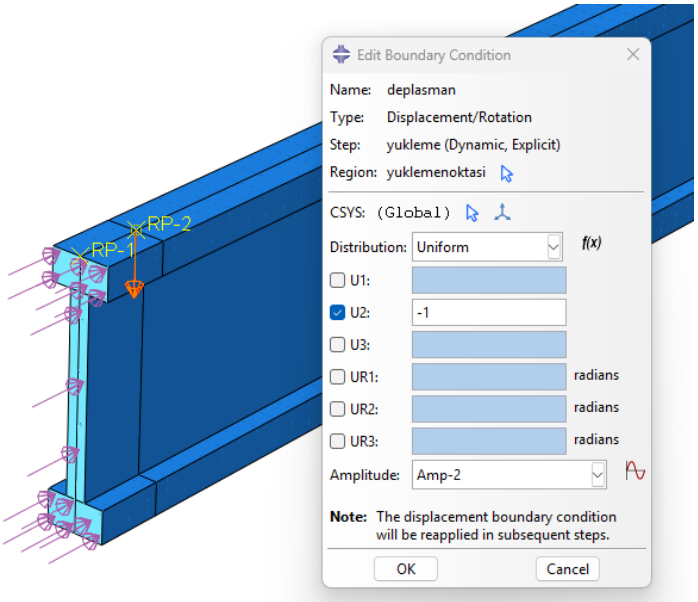
Şekil 4.10. Referans noktalarının oluşturulması

Programın “interaction” kısmında farklı davranışlar programa tanıtılabilmektedir. “Interaction manager” kısmından genel malzeme davranışı için “general contact” oluşturulmuştur. Betonun ve donatının birlikte çalışmasını sağlamak için tüm donatılar bir malzeme setinde toplanıp “constraint” seçeneğinin “embedded regions” kısmından donatının betonun içinde aderanslı olduğu tanımlanmıştır (Şekil 4.11).



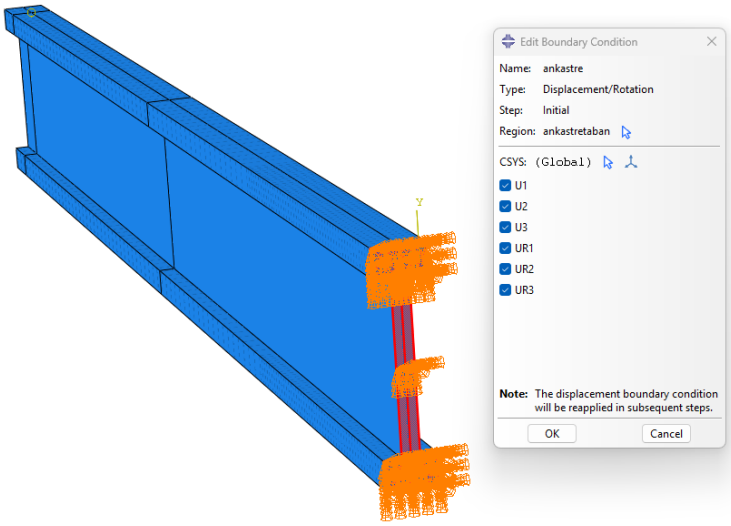
Şekil 4.11. Aderansın tanımlanması

Yüklemeleri tanımlamak için “load” kısmından perdenin serbest uç yüzeyi seçilmiş 1500 kN toplam yük yüzeye dağıtılmıştır. Perdenin tutulu ucundan 11760 mm mesafede tek noktadan deplasman verilmiştir (Şekil 4.12).



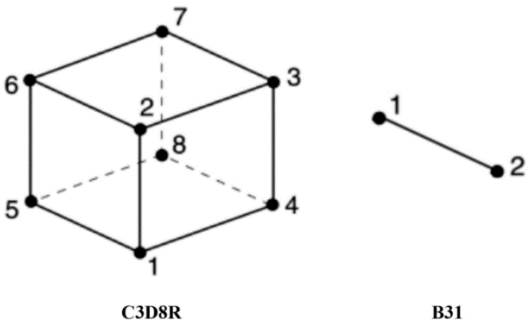
Şekil 4.12. Yüklemenin tanımlanması

Yükleme hızları eksenel kuvvet için 10 saniyede 1500 kN, deplasman için 30 saniyede 300 mm olarak tanımlanmıştır. Perdenin tabanının ankastre olarak tanımlanması için “boundary conditions” kısmından perdenin U1, U2, U3, UR1, UR2 ve UR3 serbestlik dereceleri tutulmuştur (Şekil 4.13).



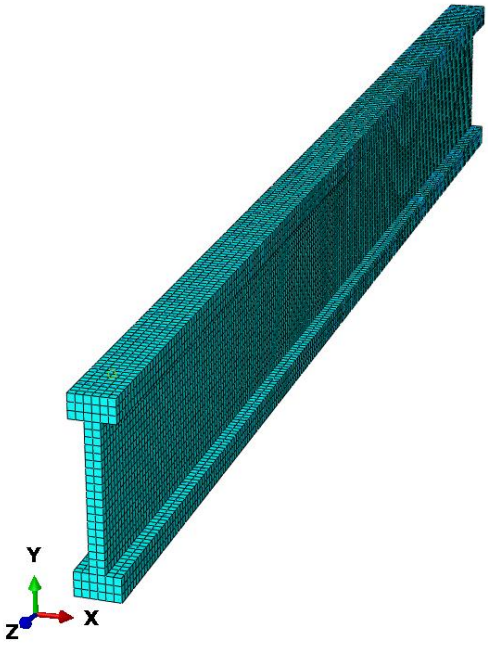
Şekil 4.13. Ankastreliğin tanımlanması

Modelin sonlu elemanlar ağının tanımlanması için "mesh" kısmından tüm elemanların belirli uzunlukta daha küçük parçalara bölünmesi gerekmektedir. 3 boyutlu katı olarak tanımlanan perdenin mesh tipi C3D8R (8-node brick elements with reduced integration) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Sonlu eleman tipleri

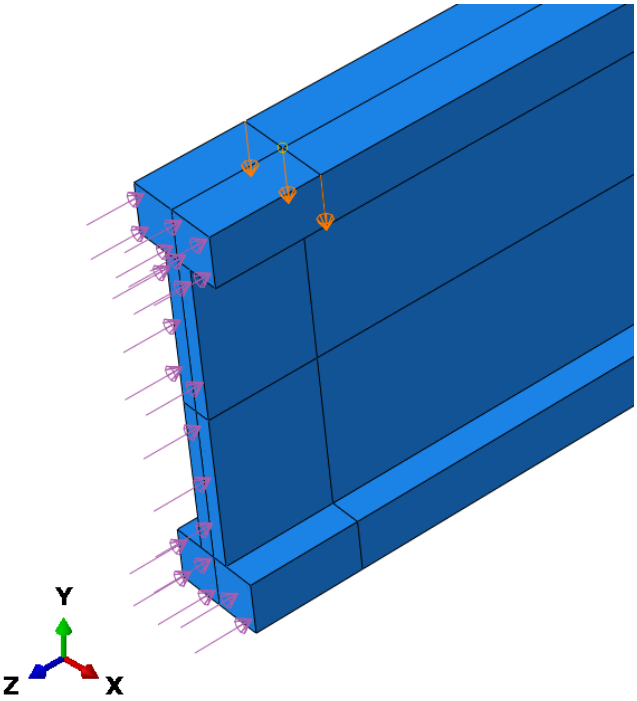
Bu eleman tipi 3 boyutlu 8 noktalı azaltılmış entegrasyonlu bir eleman tipidir. Her noktada yer değiştirme olarak 3 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Genellikle katı, hacimsel elemanlarda kullanılmaktadır. "Mesh" boyutu 60 mm olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Mesh ağının tanımlanması

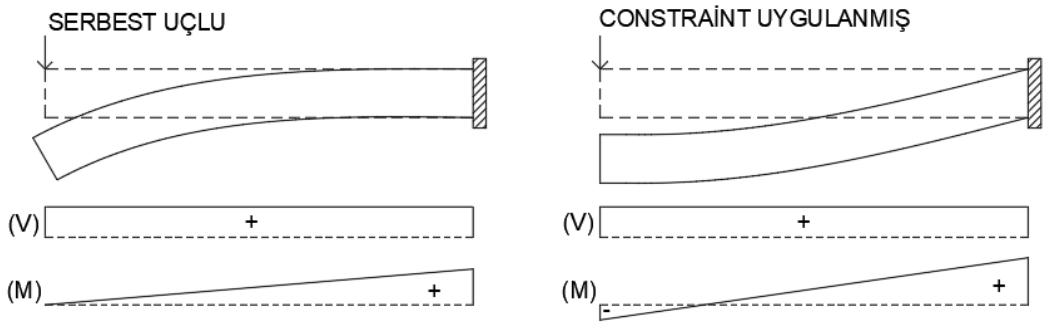
Donatıların "mesh" tipi B31 olarak belirlenmiştir. B31 eleman tipi, tek boyutlu, iki noktalı (baş ve son), yer değiştirme ve dönme olarak 6 serbestlik derecesine sahip bir eleman tipidir. Genellikle çubuk tipi elemanlarda kullanılmaktadır. "Mesh" boyutu 60 mm olarak tanımlanmıştır. Elemanlarda "mesh" boyutunun çok yüksek olması oluşturulan modelin çok basit, analiz sonuçlarının gerçekçi olmamasına, çok düşük olması ise fazla işlem gücü gerektirdiğinden dolayı analiz süresinin çok fazla olmasına yol açabilmektedir. Analizin başlaması için "job" kısmından analiz oluşturulmuş, kullanılan sistemin özelliklerine göre işlem yapılması için ayarlar yapılmıştır.

Analitik modeli kalibre etmek amacıyla kısaltma ve genişletme modellerinde birtakım değişiklikler yapılmıştır. Deplasmanın daha eşit dağılması amacıyla yükleme noktasında tek noktadan değil, 3 noktadan aynı şiddetle uygulanmıştır (Şekil 4.16).



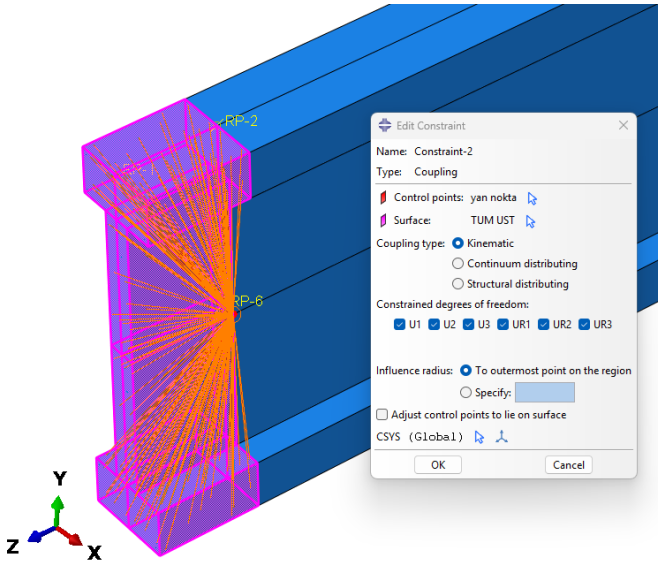
Şekil 4.16. Yatay ve düşey yükleme durumları

Bu tezde sayısal olarak modellenen deneysel betonarme perdenin üst ucu dönme açısından serbesttir. Esasen kat döşemeleri ve bağlantılı çerçeve taşıyıcı sistem nedeniyle bu perde elemanların uç dönmeleri kısıtlanır ve deneysel duruma göre perdeler daha çok kesme etkisine maruz kalırlar. Bu durumun dikkate alınabilmesi amacıyla serbest olan perde ucundaki düğümlerin dönmesi kısıtlama "constraint" tanımıyla birbirine bağlanmıştır (Şekil 4.17). Bu sayede perdenin kesme etkisi alındaki gevrek olabilecek davranışı incelenmiştir.

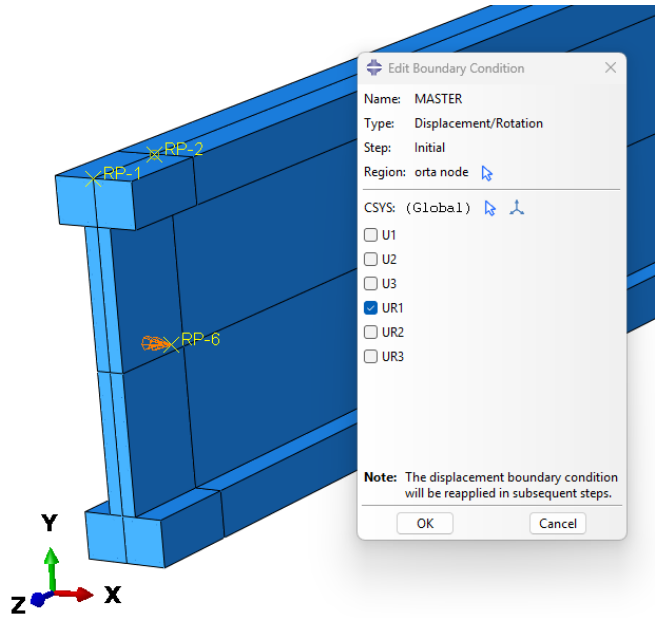


Şekil 4.17. "Constraint" tanımıyla kısıtlanan perde uç dönmesi

Modelin yükleme noktasından geride kalan serbest ucu seçilmiş, tek bir düğümle aynı hareket etmesi sağlanmıştır. Programın "interaction" kısmından "coupling" tipinde "constraint" oluşturulmuştur. "Constraint" ile tek noktaya bağlanan düğümlerin UR1 dönmesi mesnet tanımıyla sabitlenmiştir (Şekil 4.18 ve 4.19).



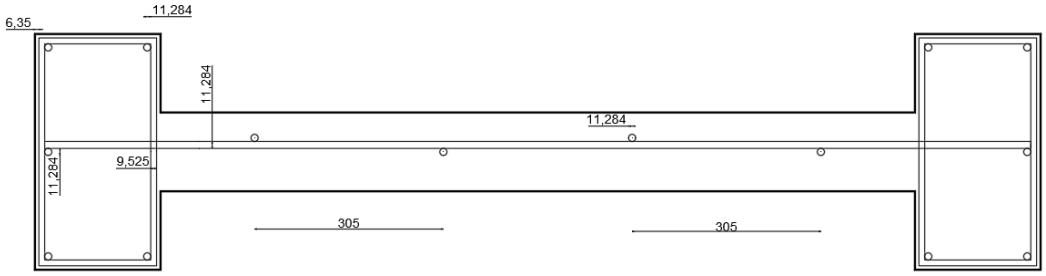
Şekil 4.18. Kısıtlama "Constraint" uygulanması



Şekil 4.19. X yönünde dönmenin sabitlenmesi

4.2.1. Farklı donatı düzenine sahip modellerin oluşturulması

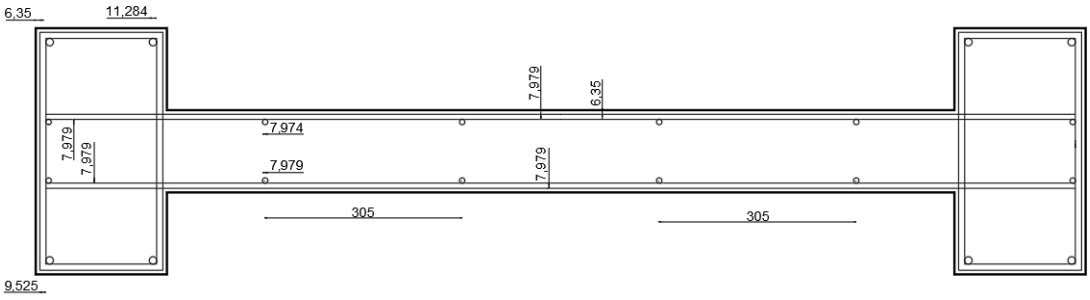
Deneyde kullanılan ana perde modeli (Şekil 4.20) ABAQUS programında modellendikten sonra aynı perde boyutlarında farklı donatı düzenine sahip modeller oluşturulmuştur.



Şekil 4.20. Deneyde kullanılan perde modelinin donatı şeması (Donatı düzeni-1)

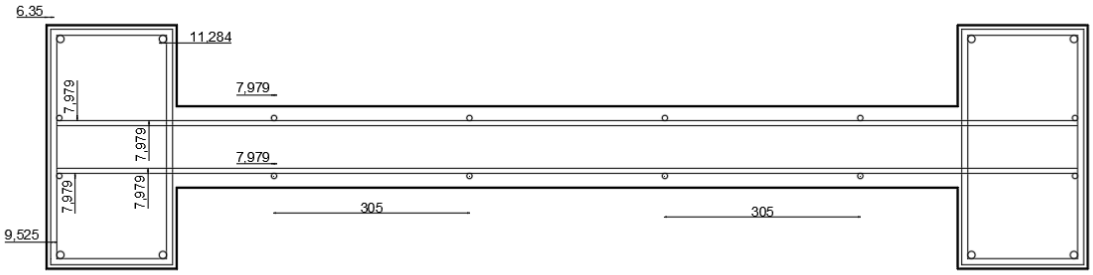
Ana deney modelinde kullanılan donatı düzeninde yatay donatı olarak tek sıra donatı kullanılmıştır. Düşey donatılar, perdenin orta kısmında 305 mm arayla şaşırtmalı olarak yatay donatının etrafında konumlandırılmıştır. Etriye sıklaştırması perdenin en alt bölgesinden 3 m'ye kadar 64 mm uzunluğunda daha sonra perdenin sonuna kadar 152 mm olarak teşkil edilmiştir. Yatay donatıların aralığı perde başlangıcından sonuna kadar 305 mm'dir.

Ana modele alternatif olarak oluşturulan ilk modelde yatay donatılar çift sıra, perdenin ortasında ve flanşların altında bulunan tek donatılar çift olarak değiştirilmiştir. Yatay ve düşey donatıların donatı alanı ana deney modelinde, 100 mm^2 donatı çapı 11.284 mm'dir. Çift sıralı modelde her sıradaki donatılar 50 mm^2 alana ve 7.979 mm donatı çapına sahip donatılarla değiştirilmiştir. Alternatif olarak oluşturulan bu ilk modelde yatay donatılar düşey donatıların dışından geçirilmiştir (Şekil 4.21). Pas payı 6.35 mm (0.25 inç) olarak ana model ile aynı alınmıştır.



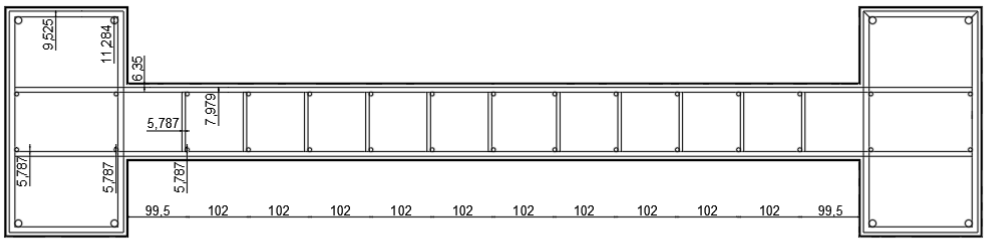
Şekil 4.21. Çift sıralı dışarıdan donatılı model (Donatı düzeni-2)

İkinci model olarak yatay donatılar düşey donatıların içerisine tanımlanmıştır. Tüm donatı boyutları çift sıralı dışarıdan donatılı model ile aynı teşkil edilmiştir (Şekil 4.22).



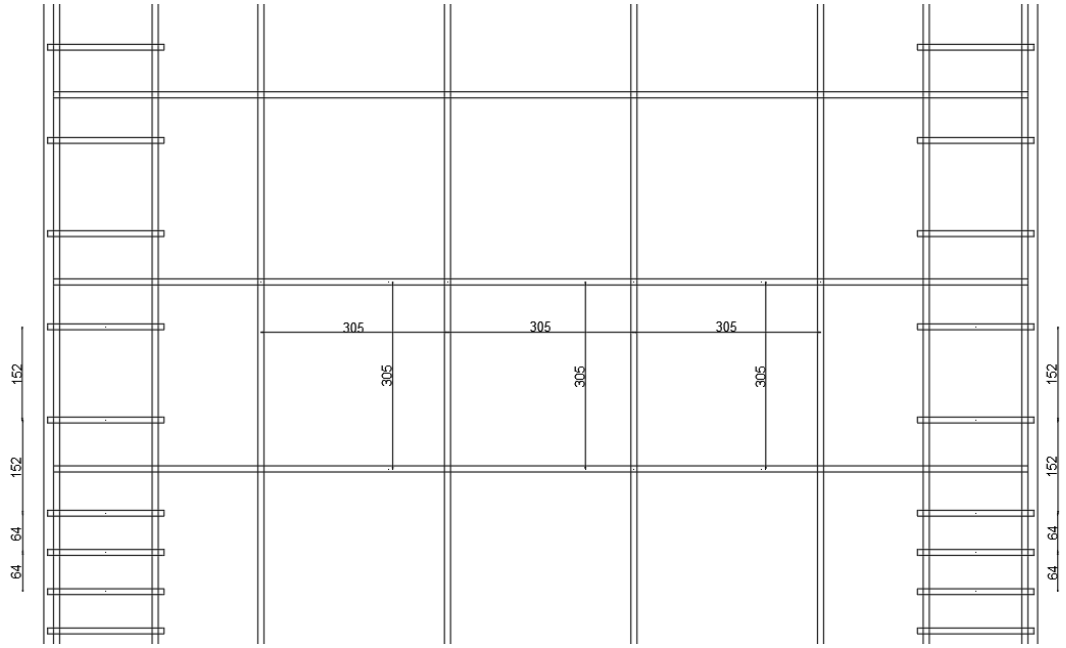
Şekil 4.22. Çift sıralı içeriden donatılı model (Donatı düzeni-3)

Diğer donatı düzenlerinden farklı olarak aynı perde kesitinde TBDY 2018'e uygun bir donatı düzeni oluşturulmaya çalışılmıştır. Diğer donatı düzenlerinde her bir flanşdaki perde ucunda orta kısımda iki adet donatı bulunurken bu yeni modelde 4 adet donatı bulunmaktadır. Yeni oluşturulan donatı modelinde flanş başlangıcından 99.5 mm boşlukta 102 mm arayla düşey donatılar konumlandırılmıştır. Diğer modellerle aynı donatı oranı korunmuştur. Modele gövde kısmında tüm boyuna donatıların yanına çirozlar eklenmiştir. Orta uç bölgesindeki düşey donatıların, gövdedeki düşey donatıların ve çirozların çapı 5.787 mm olarak belirlenmiştir. Yatay donatıların çapı yine 7.979 mm olarak ve köşelerdeki düşey donatıların çapı 11.284 mm olarak aynı kalmıştır (Şekil 4.23).

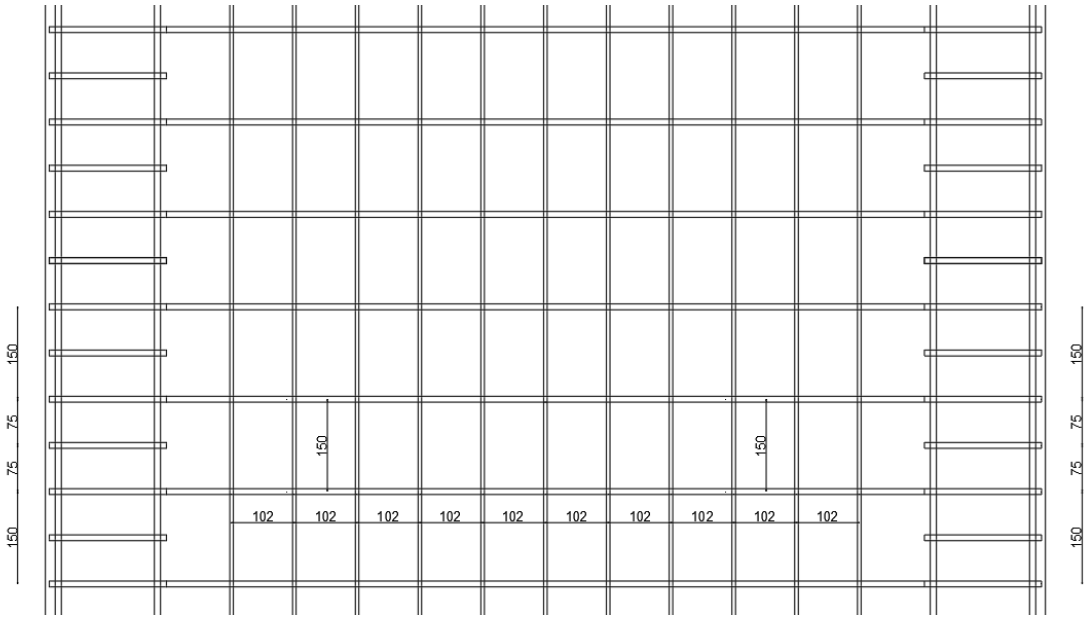


Şekil 4.23. TBDY 2018'e uygun oluşturulan model (Donatı düzeni-4)

Donatı aralığı olarak içerden, dışarıdan donatılı ve deneyde teşkil edilen modellerde etriye sıklaştırması perdenin en alt bölgesinden 3m ye kadar 64 mm uzunluğunda daha sonra perdenin sonuna kadar 152 mm olarak teşkil edilmiştir (Şekil 4.24). Her üç modelde yatay donatılar 305 mm olarak donatılandırılırken TBDY 2018'e uygun modelde bu aralıklar değiştirilmiştir. Etriye aralığı perdenin başlangıcından sonuna 75 mm, yatay donatı aralığı 150 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.25).

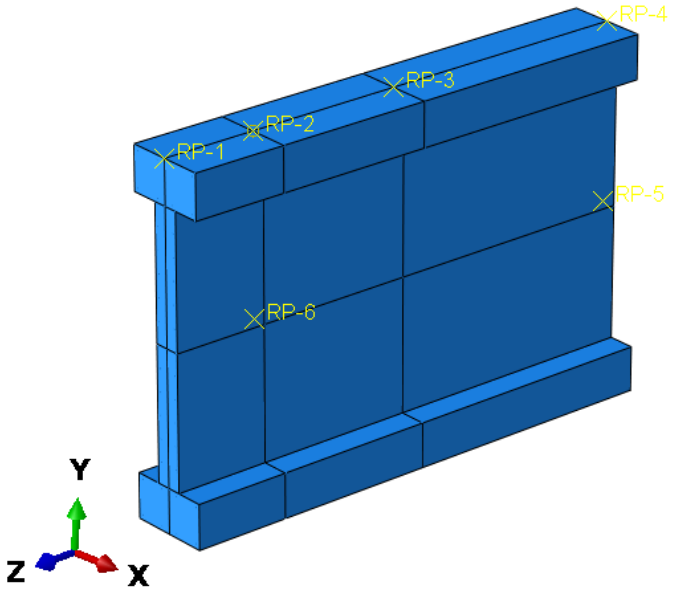


Şekil 4.24. Deney modelindeki perdenin yatay donatı şeması



Şekil 4.25. TBDY 2018'e göre oluşturulan perdenin yatay donatı şeması

Perdelerin en/boy oranlarına göre davranışlarını görmek için oluşturulan TBDY 2018 donatı düzeni temel alınarak farklı modeller oluşturulmuştur. Deneydeki perde uzunluğu 12192 mm olarak teşkil edilmiştir. TBDY 2018 donatı modeli türetilerek ilk önce perde uzunluğu 900 mm kısaltılmıştır. Kısaltma taban kısmından yapılıp yükleme noktası değiştirilmemiş, perdenin en üst kısmından 432 mm mesafede teşkil edilmiştir (Şekil 4.26). Bu kısaltma işlemi 11 defa tekrarlanarak yeni kısaltma modelleri üretilmiştir (Çizelge 4.3).

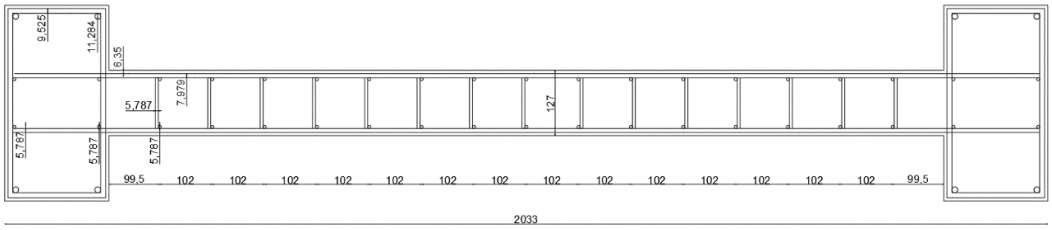


Şekil 4.26. Kısaltma 11 modeli

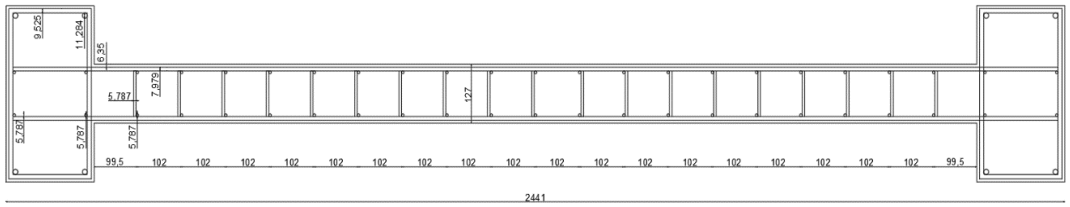
Çizelge 4.4. Yeni kısaltma modelleri

Donatı düzeni	Kalınlık (t) (mm)	Genişlik (L) (mm)	Perde yüksekliği (mm)	Yükleme yüksekliği (H) (mm)	t / H oranı	H / L oranı
TBDY 2018 modeli	127	1625	12192	11760	0.0108	7.24
Kısaltma 1	127	1625	11292	10860	0.0117	6.68
Kısaltma 2	127	1625	10392	9960	0.0128	6.13
Kısaltma 3	127	1625	9492	9060	0.0140	5.58
Kısaltma 4	127	1625	8592	8160	0.0156	5.02
Kısaltma 5	127	1625	7692	7260	0.0175	4.47
Kısaltma 6	127	1625	6792	6360	0.0200	3.91
Kısaltma 7	127	1625	5892	5460	0.0233	3.36
Kısaltma 8	127	1625	4992	4560	0.0279	2.81
Kısaltma 9	127	1625	4092	3660	0.0347	2.25
Kısaltma 10	127	1625	3192	2760	0.0460	1.70
Kısaltma 11	127	1625	2292	1860	0.0683	1.15

Perde genişliğinin davranışa etkisini daha iyi anlayabilmek için kısaltma 5 modeli alınıp donatı düzeni aynı kalacak şekilde 408 mm genişletilmiştir. Bu genişletmelerde boyuna donatı aralıkları 102 mm olduğundan dolayı her genişletmede 4 adet boyuna donatı eklenmiştir. Donatı çapları aynı teşkil edilmiştir. Yatay donatı ve etriye aralıkları TBDY 2018 modelinde olduğu gibi 150 mm ve 75 mm teşkil edilmiştir. Örnek olarak donatı şemaları Şekil 4.27 ve 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Genişletme 1 modeli donatı düzeni



Şekil 4.28. Genişletme 2 modeli donatı düzeni

Genişletme modellerinde 16 model oluşturulmuştur (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.5. Yeni genişletme modelleri

Donatı Düzeni	Kalınlık (t) (mm)	Genişlik (L) (mm)	Perde yüksekliği (mm)	Yükleme yüksekliği (H) (mm)	t / L oranı	H / L oranı
TBDY 2018 modeli	127	1625	12192	11760	0.0782	7.24
Kısaltma 5 (referans)	127	1625	7692	7260	0.0782	4.47
Genişletme 1	127	2033	7692	7260	0.0625	3.57
Genişletme 2	127	2441	7692	7260	0.0520	2.97
Genişletme 3	127	2849	7692	7260	0.0446	2.55
Genişletme 4	127	3257	7692	7260	0.0390	2.23
Genişletme 5	127	3665	7692	7260	0.0347	1.98
Genişletme 6	127	4073	7692	7260	0.0312	1.78
Genişletme 7	127	4481	7692	7260	0.0283	1.62
Genişletme 8	127	4889	7692	7260	0.0260	1.48
Genişletme 9	127	5297	7692	7260	0.0240	1.37
Genişletme 10	127	5705	7692	7260	0.0223	1.27
Genişletme 11	127	6113	7692	7260	0.0208	1.19
Genişletme 12	127	6521	7692	7260	0.0195	1.11
Genişletme 13	127	6929	7692	7260	0.0183	1.05
Genişletme 14	127	7337	7692	7260	0.0173	0.99
Genişletme 15	127	7745	7692	7260	0.0164	0.94
Genişletme 16	127	8153	7692	7260	0.0156	0.89

5. TARTIŞMA

5.1. Giriş

Analitik olarak oluşturulan modellerde ilk önce ana deney modeli, dışardan donatılı model, içerden donatılı model ve TBDY 2018 donatı düzenine sahip model karşılaştırılmıştır. Kısaltma ve genişletme modellerinin karşılaştırılması daha sonra yapılmıştır.

Deneyde yapılan yükleme yaklaşık olarak 14000 saniye yani 4 saate yakın sürmüştür. Bu yüklemeyi bilgisayarda uygulamak çok fazla işlem gücü gerektireceği için yükleme itme testi halinde gerçekleştirilmiştir. Deplasman 30 sn de 300 mm olacak şekilde teşkil edilmiştir.

Analitik modellerde gözlenen hasar şekilleri uygulanan tek yönlü itmeden ve görece hızlı yüklemeden dolayı deneydeki gözlenen hasara göre farklı elde edilmiştir. Deneyde gözlemlendiği kadarıyla perdenin başından sonuna kadar farklı çatlaklar oluşmuştur. Analitik modellerde ise genel olarak perdenin mesnetlenen alt ucunda hasar gözlemlenmiştir.

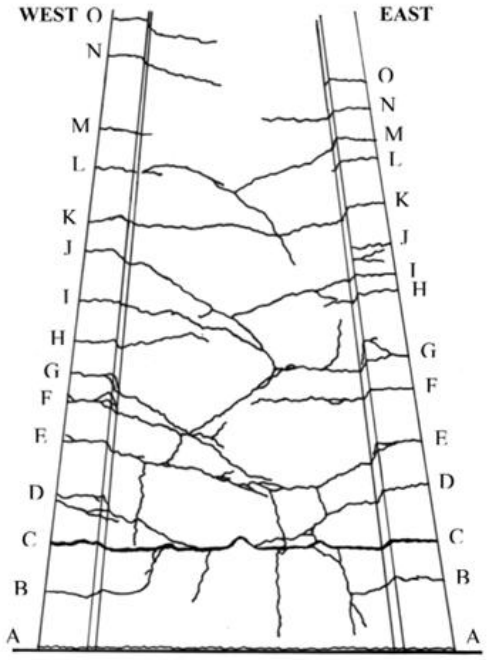
5.2. Deney Sonuçları (Ibrahim 2000; Adebar vd. 2007)

Yükleme bittikten sonra duvarda oluşan çatlaklar gösterilmiştir (Ibrahim, 2000) (Şekil 5.1).



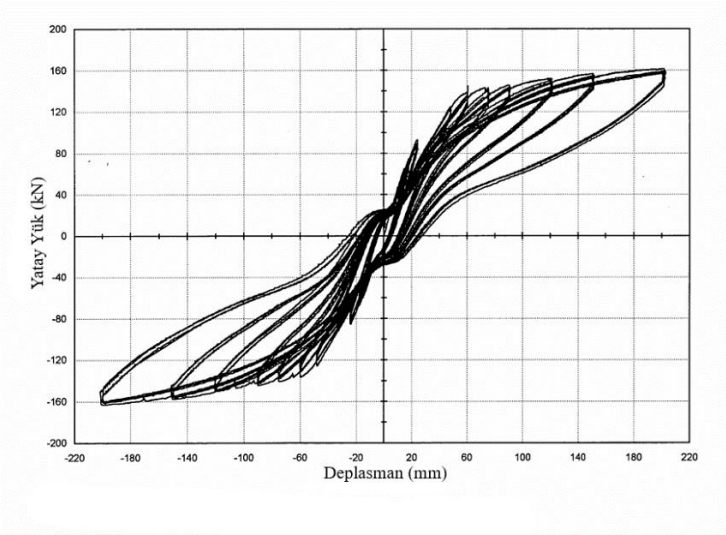
Şekil 5.1. Perdede oluşan çatlaklar (Ibrahim, 2000)

Deneyde yükleme çevrimli olarak uygulandığı için perdenin her iki tarafında da hasar oluşumu gözlenmiştir. Genel göçme modunun eğilme tarafından gerçekleştiği saptanmıştır. Perdede eğilme-kesme çatlakları genel olarak çoğunluktadır fakat perdenin en boy oranından da beklenildiği üzere kesme göçme moduna sebep olacak diyagonal kesme çatlağı oluşmamıştır (Adebar vd. 2007) (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Perdede oluşan çatlaklar (Adebar vd. 2007)

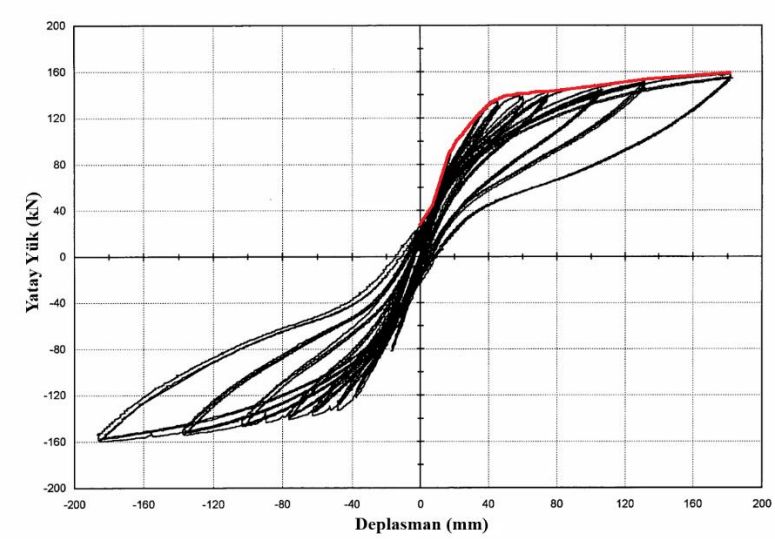
Tüm yükleme döngülerinin sonunda daha önce bahsedilen deplasman transdüserleri aracılığıyla ölçülen yük-deplasman eğrisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir (Ibrahim, 2000).



Şekil 5.3. Yük-deplasman eğrisi (Ibrahim, 2000)

5.3. Analitik Deney Modeli

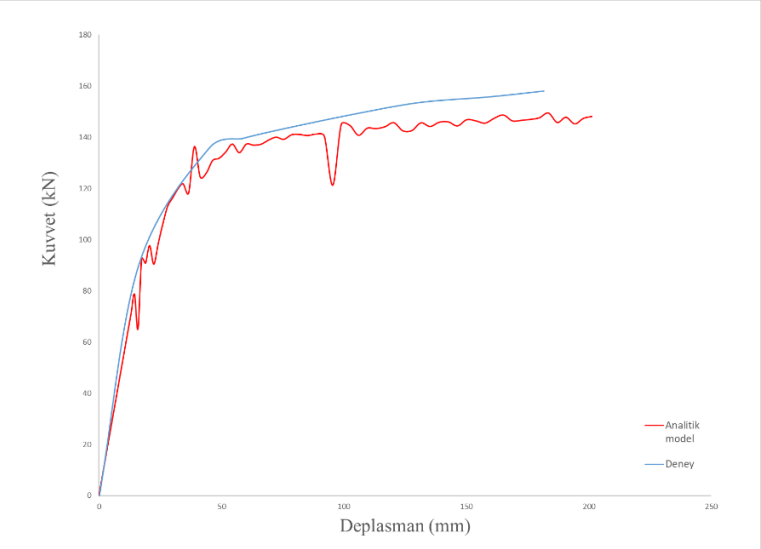
Deneyden elde edilen yük deplasman eğrisinin zarf eğrisi çıkartılmıştır (Ibrahim 2000) (Şekil 5.4).



Okuma	Yük (kN)	Deplasman (mm)
1	26.46	0.55
2	24.63	8.81
3	55.81	18.16
4	74.69	27.52
5	99.58	36.87
6	119.52	46.23
7	132.46	55.58
8	134.38	64.94
9	136.25	74.29
10	140.02	83.65
11	141.32	93.00
12	142.31	102.36
13	145.83	111.71
14	148.46	121.07
15	151.32	130.43
16	152.43	139.78
17	152.56	149.14
18	154.19	158.49
19	155.55	167.85
20	157.19	177.20
21	158.22	186.56

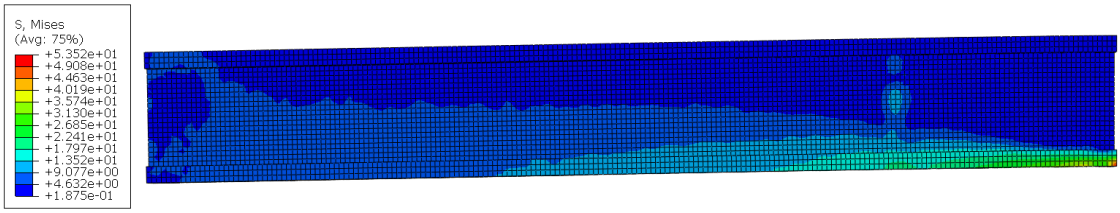
Şekil 5.4. Yük-deplasman zarf eğrisi (Ibrahim 2000)

Deneyde uygulanan donatı düzeniyle (Donatı düzeni-1) aynı teşkil edilen bu modelde deney sonuçlarında verilen yük deplasman eğrisine ve deney modelinin rijitliğine yakın sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.5).



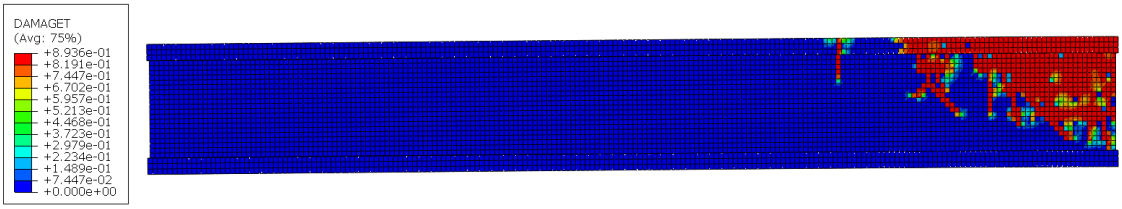
Şekil 5.5. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması

Abaqus yazılımında oluşturulan analitik model sonuçlarında perdenin beton kısmındaki Von Mises gerilmesi Şekil 5.6'da verilmiştir.



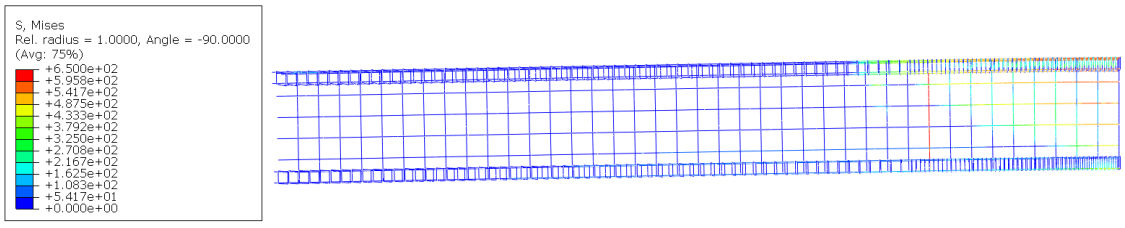
Şekil 5.6. Deneysel duruma ait model için Von Mises gerilme dağılımı

Betonun nihai dayanımı 49 MPa olarak kabul edilirken betonun üstündeki maksimum gerilmenin 53 MPa olduğu görülmektedir. Analiz toplam 17.90 sn sürmüştür maksimum 201 mm deplasmana ulaşılmıştır. Şekillerde sunulan çekme hasarları, betonun çatlama sonrası taşıma kapasitesindeki kaybı 0 (hasarsız) ile 1 (tam hasarlı) arasında ifade eden CDP modeline ait çekme hasar parametresine dayanmaktadır. Renkler, CDP modeline göre beton çekme hasarının şiddetini göstermektedir. Analizin 12'nci saniyesinde Beton hasar plastisite modeline göre oluşturulan beton çekme hasarı Şekil 5.7'de verilmiştir. Hasarların perdenin mesnetlenmiş ucunda gerçekleştiği görülmüştür. Göçme modunun ve hasar tiplerinin eğilme türünde olduğu anlaşılmıştır. Hasar oluşması esnasında betonun ezilmeden donatının daha önce aktığı tespit edilmiştir.



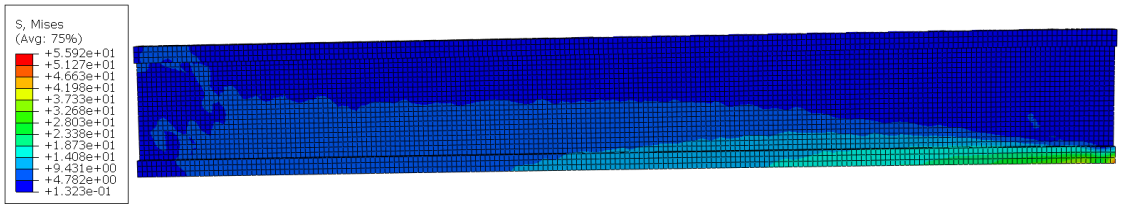
Şekil 5.7. Deneysel duruma ait model için beton çekme hasar dağılımı

Perdedeki donatı Von Mises gerilmeleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Maksimum gerilmenin 650 MPa kopma gerilmesine ulaştığı ve etriye sıklaştırma bölgesi sonuna yakın enine donatıda olduğu gözlemlenmiştir.



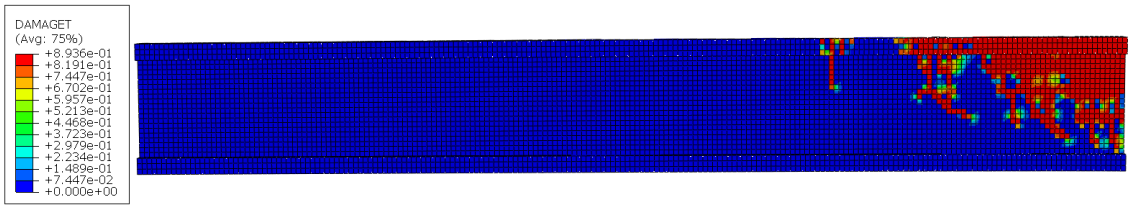
Şekil 5.8. Deneysel duruma ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı

Dışardan donatılı olarak teşkil edilen (Donatı düzeni-2) modelde beton üzerindeki Von Mises gerilmesi Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Maksimum gerilme 55.9 MPa ölçülmüştür.



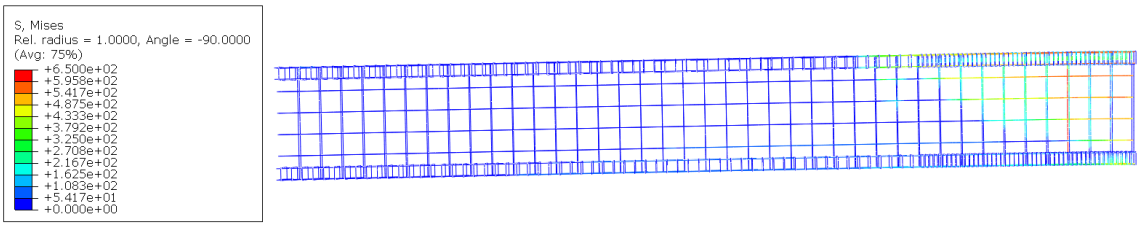
Şekil 5.9. Donatı düzeni-2'ye ait model için Von Mises gerilme dağılımı

Analiz 18.97 sn sürmüştür 12'nci saniyede beton üzerinde oluşan çekme hasarı Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



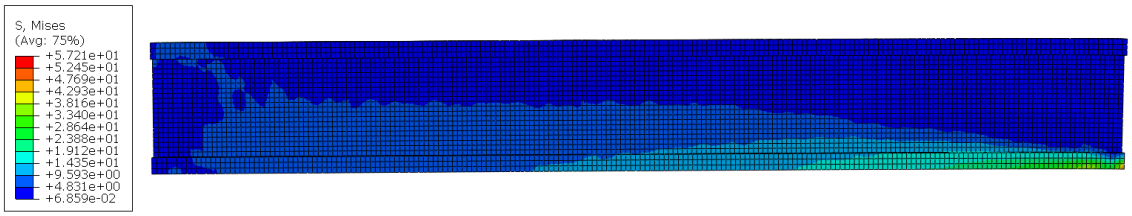
Şekil 5.10. Donatı düzeni-2'ye ait model için beton çekme hasar dağılımı

Donatıda oluşan Von Mises gerilmesi Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Maksimum gerilme mesnete yakın enine donatıda gerçekleşmiştir.



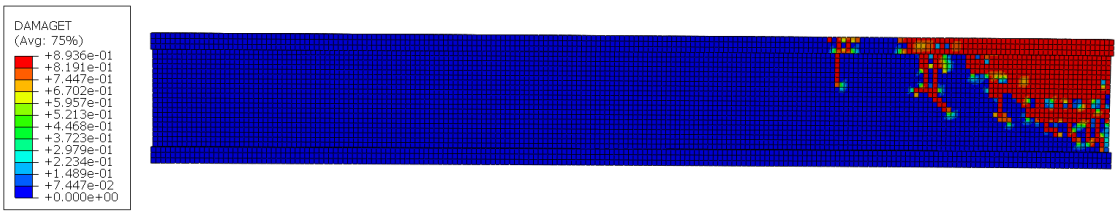
Şekil 5.11. Donatı düzeni-2'ye ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı

İçeriden donatılı olarak teşkil edilen (Donatı düzeni-3) modelde beton üzerindeki Von Mises gerilmesi Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Maksimum gerilme 57.2 MPa ölçülmüştür.



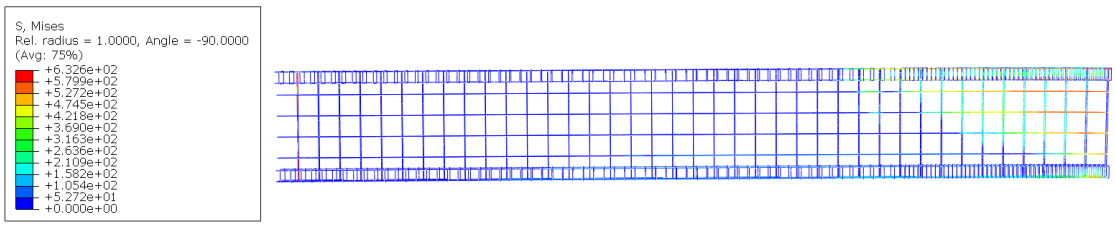
Şekil 5.12. Donatı düzeni-3'e ait model için Von Mises gerilme dağılımı

Analiz 19.23 sn sürmüştür 12'nci saniyede beton üzerinde oluşan çekme hasarı Şekil 5.13'da gösterilmiştir.



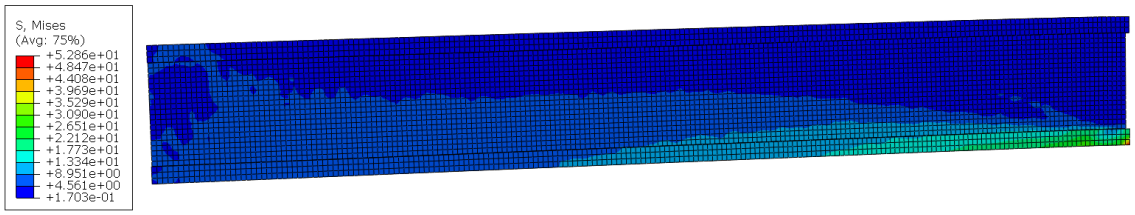
Şekil 5.13. Donatı düzeni-3'e ait model için beton çekme hasar dağılımı

Donatıda oluşan Von Mises gerilmesi Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Maksimum gerilme yükün uygulandığı noktaya yakın enine donatıda 632 MPa olarak gerçekleşmiştir.



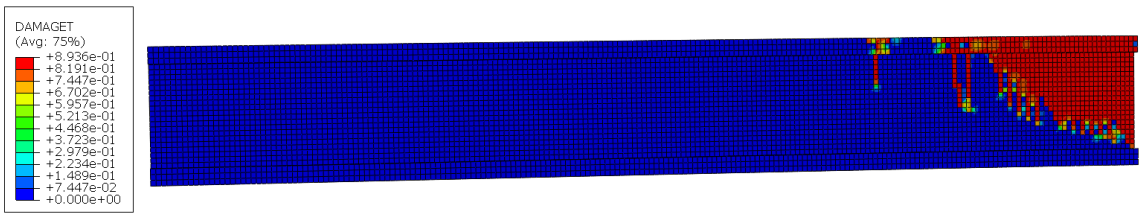
Şekil 5.14. Donatı düzeni-3'e ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı

TBDY 2018'e göre oluşturulan analitik modelde (Donatı düzeni-4) beton üzerinde oluşan Von Mises gerilmeleri Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Maksimum gerilme 52.8 MPa ölçülmüştür.



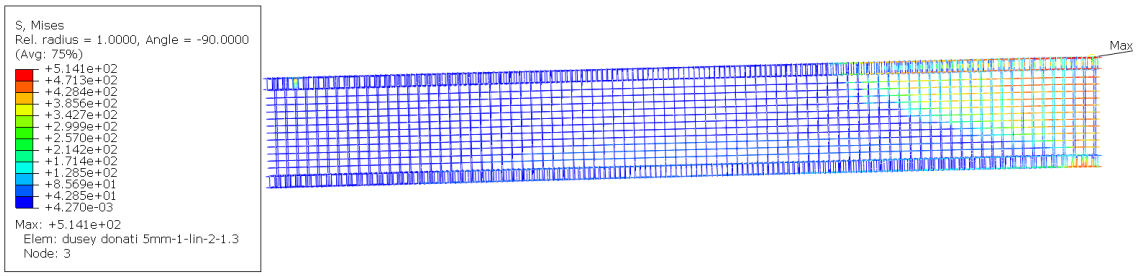
Şekil 5.15. Donatı düzeni-4'e ait model için Von Mises gerilme dağılımı

Analiz 30 sn sürmüştür ve 12'nci saniyede oluşan beton çekme hasarı Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



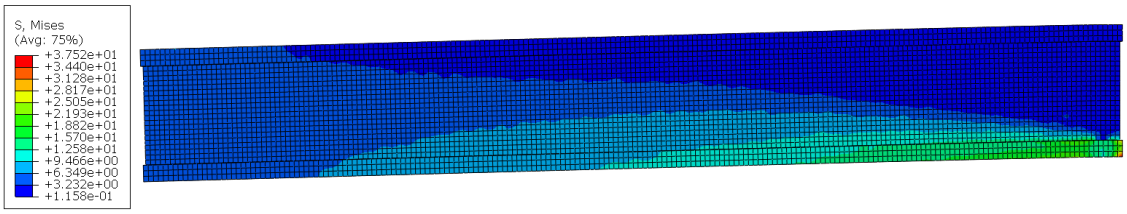
Şekil 5.16. Donatı düzeni-4'e ait model için beton çekme hasar dağılımı

Donatıda oluşan Von Mises gerilmesi Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Maksimum gerilme perdenin mesnet üst tarafındaki en uçtaki boyuna donatıda 514 MPa olarak ölçülmüştür.



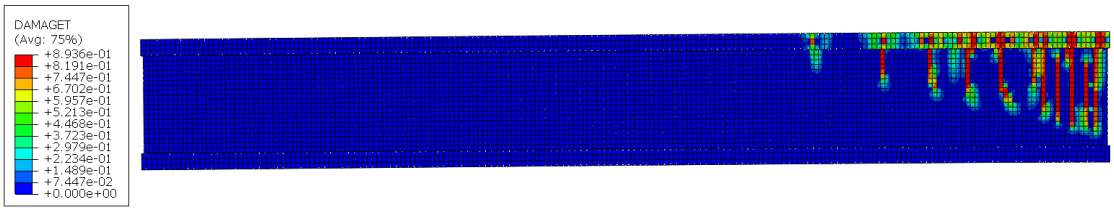
Şekil 5.17. Donatı düzeni-4'e ait modelde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı

TBDY 2018 analitik modeli (Donatı düzeni-4) oluşturulduktan sonra beton dayanımı 25 MPa olacak şekilde tekrardan CDP verileri oluşturulmuştur. Bu beton dayanımına göre beton üzerindeki Von Mises gerilmeleri Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Maksimum gerilme 37.5 MPa ölçülmüştür.



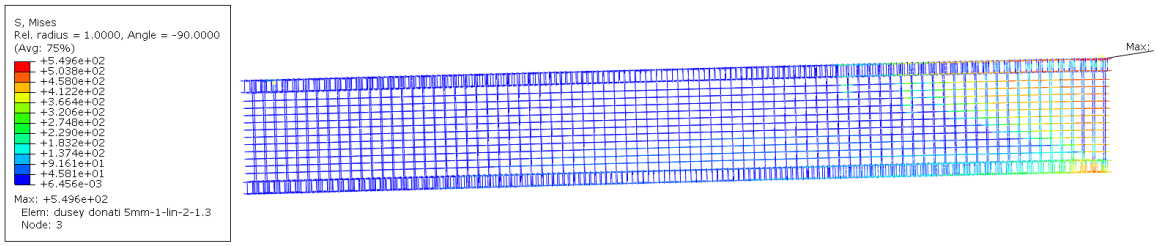
Şekil 5.18. Donatı düzeni-4 C25 modeli için Von Mises gerilme dağılımı

Analiz 30 sn sürmüştür 12'nci saniyedeki beton çekme hasarları Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



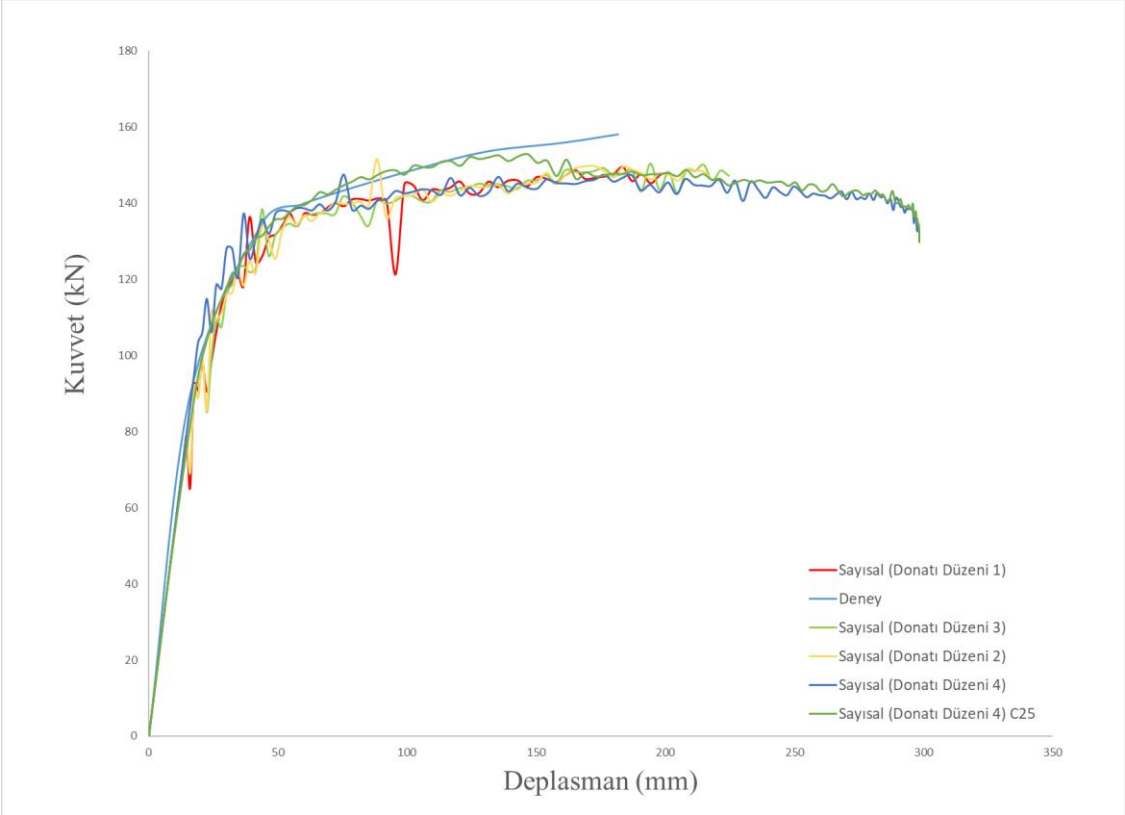
Şekil 5.19. Donatı düzeni-4 C25 modeli için beton çekme hasar dağılımı

Donatıda oluşan Von Mises gerilmesi Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Maksimum gerilme perdenin mesnet üst tarafındaki en uçtaki boyuna donatıda 549 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.20. Donatı düzeni-4 C25 modelinde donatılar için Von Mises gerilme dağılımı

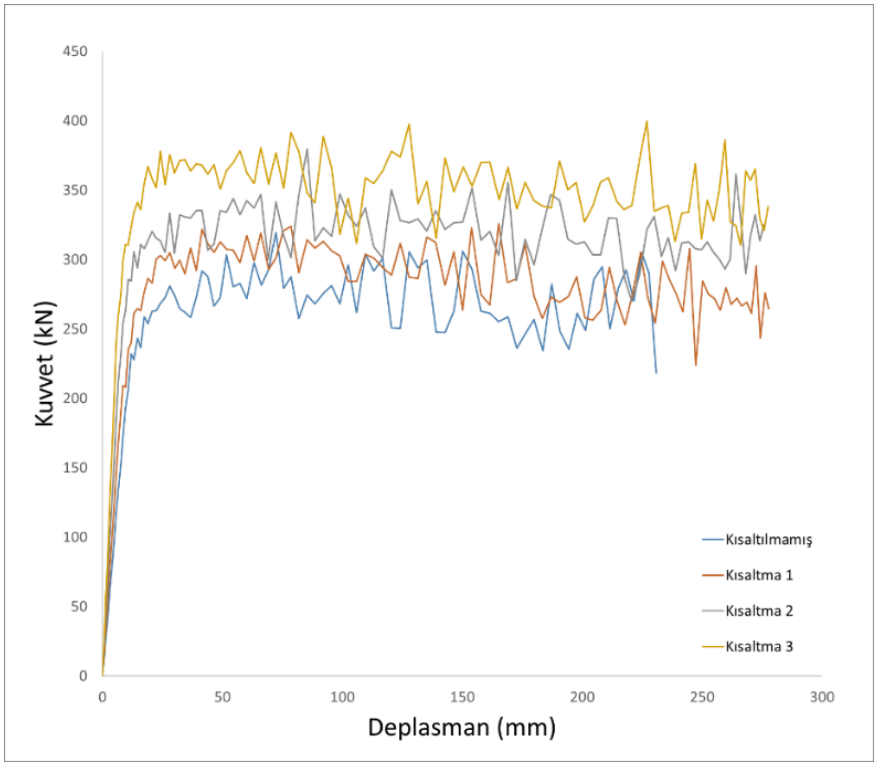
Deney zarf eğrisi, ana deney modeli (Donatı düzeni-1), dışardan donatılı model (Donatı düzeni-2), içeriden donatılı model (Donatı düzeni-3), TBDY 2018 modeli (Donatı düzeni-4) ve C25 beton dayanımlı TBDY 2018 modeli (Donatı düzeni-4 C25) sayısal modellerinin yük-deplasman eğrisi karşılaştırmaları Şekil 5.21'de gösterilmiştir.



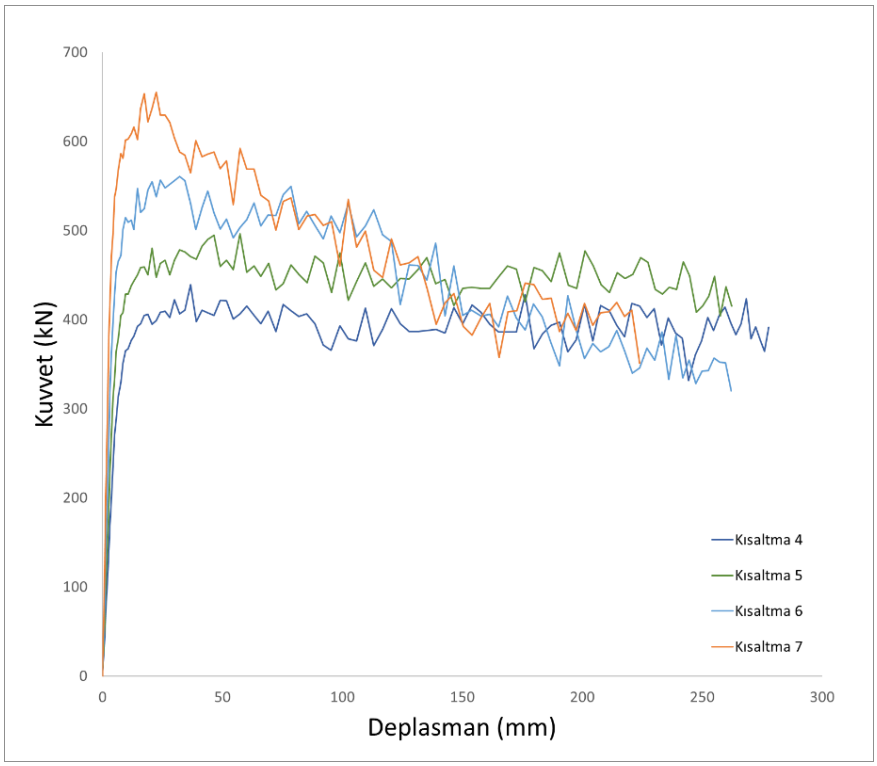
Şekil 5.21. Donatı düzeni farklı modellerin yük-deplasman eğrisi karşılaştırmaları

5.4. Kısaltma Modelleri

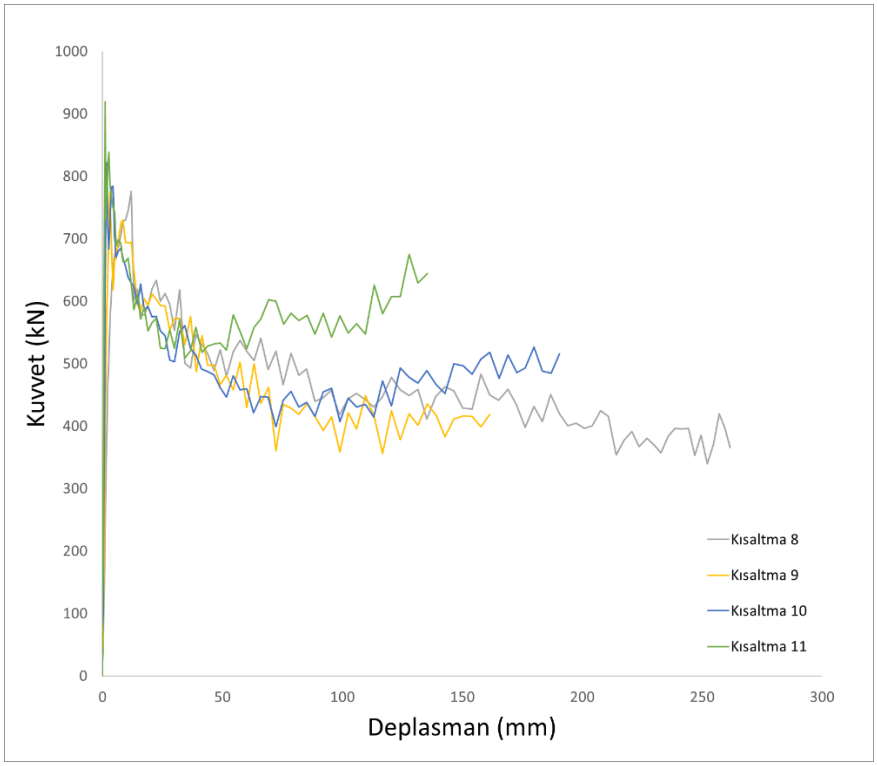
Oluşturulan sayısal modellerde perde üzerinde yük uygulanan noktadaki analiz süresince oluşan reaksiyon kuvvetleri ve perdenin o noktadaki yer değiştirmeleri ölçülmüştür. Kısaltma modellerinin yük deplasman grafikleri Şekil 5.22-5.25'te verilmiştir.



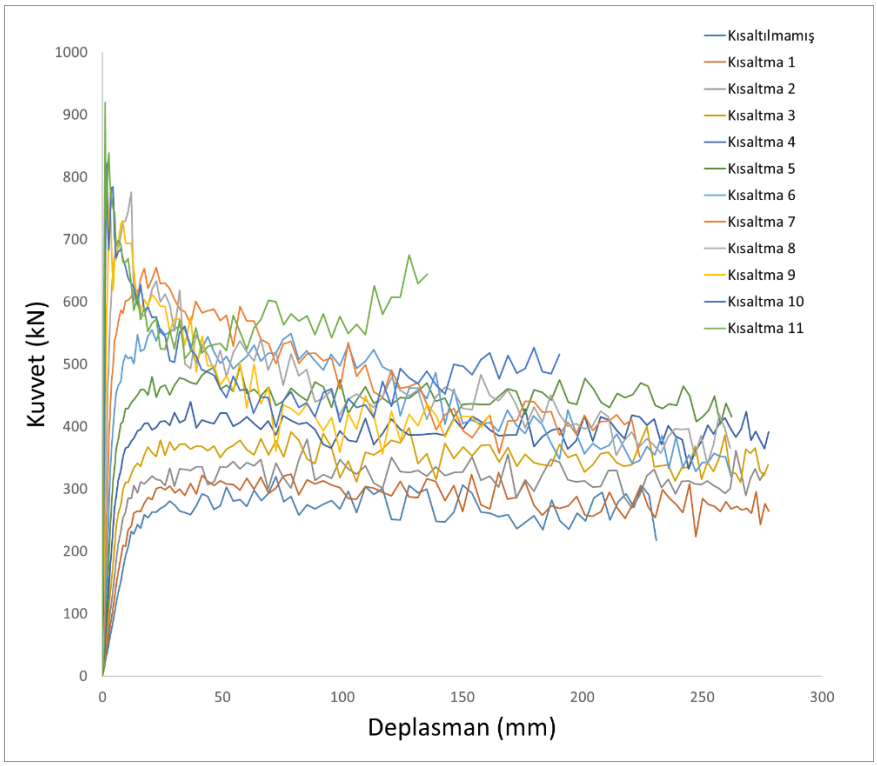
Şekil 5.22. Kısaltılmamış, Kısaltma 1-3 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri



Şekil 5.23. Kısaltma 4-7 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri



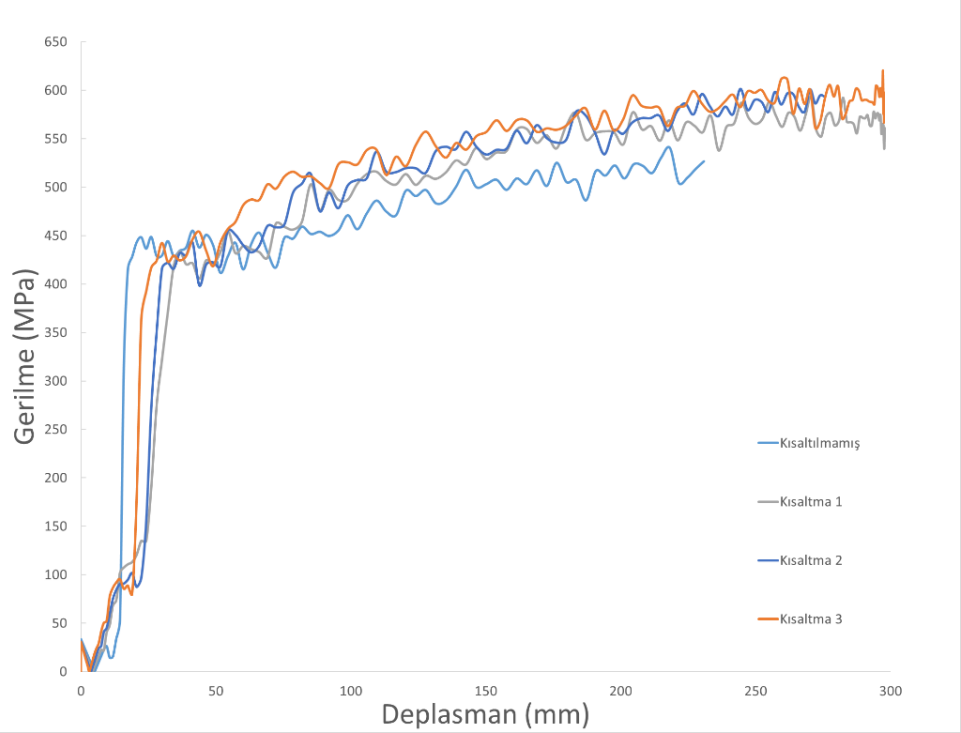
Şekil 5.24. Kısaltma 8-11 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri



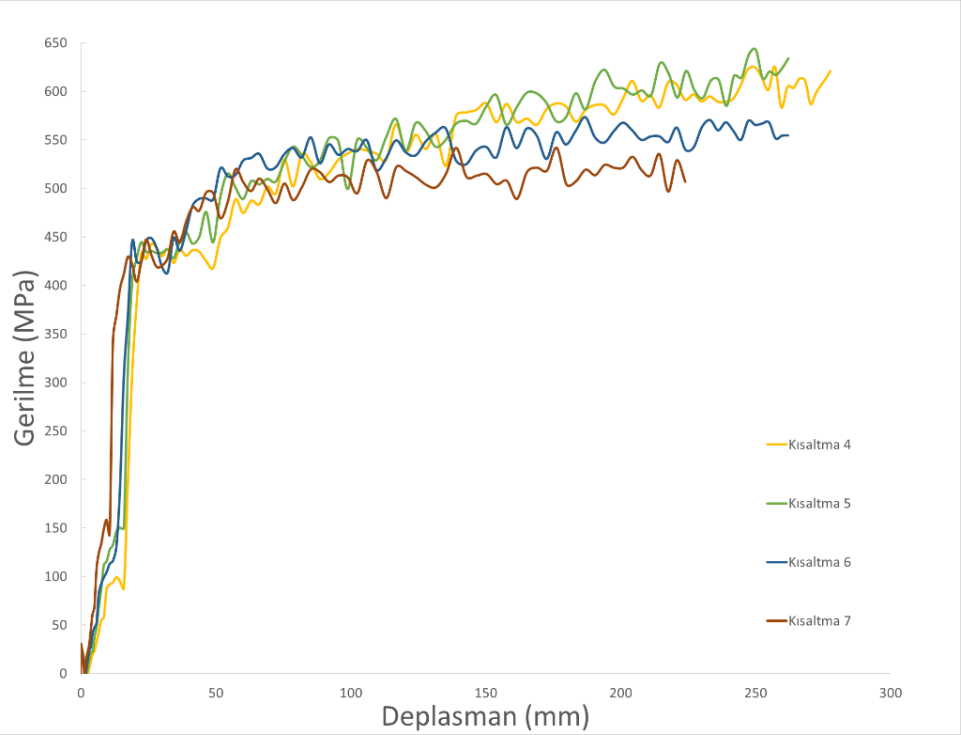
Şekil 5.25. Tüm modellerin kuvvet-deplasman grafikleri

Tüm modellerin en yüksek gerilmeye sahip kritik elemanları belirlenmiş, analiz boyunca kritik elemanların çekme ve basınç gerilmeleri belirlenmiştir. Şekil 5.26-5.29'da

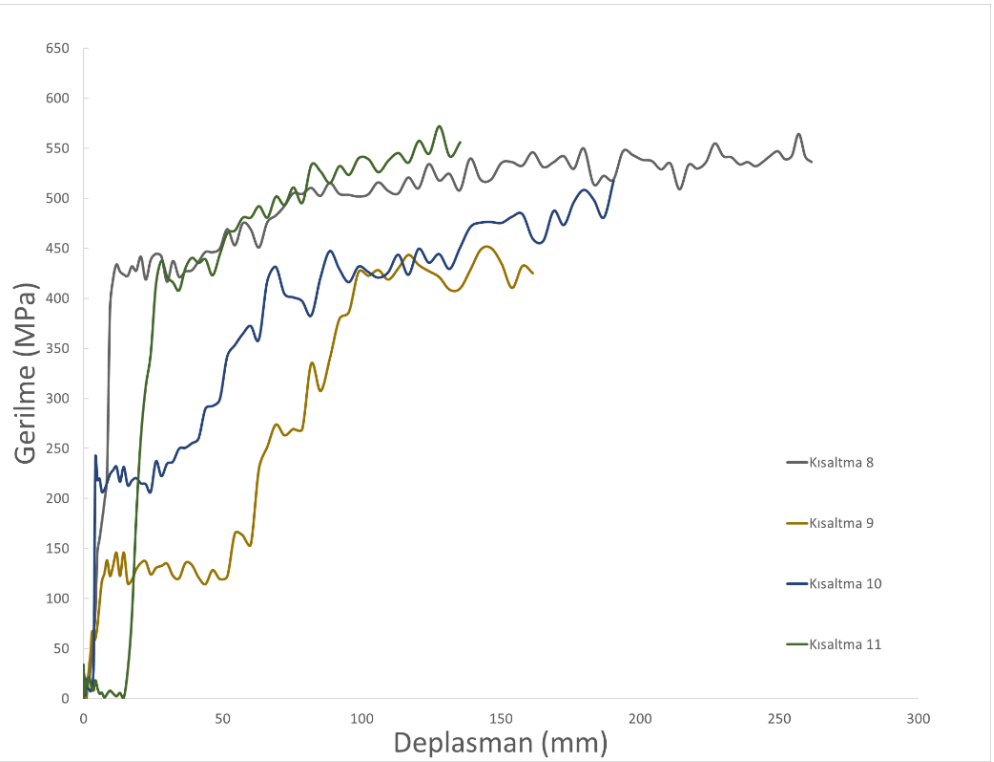
donatıda oluşan en büyük çekme gerilmeleri, Şekil 5.30-5.33'te ise betonda oluşan basınç gerilmeleri gösterilmiştir.



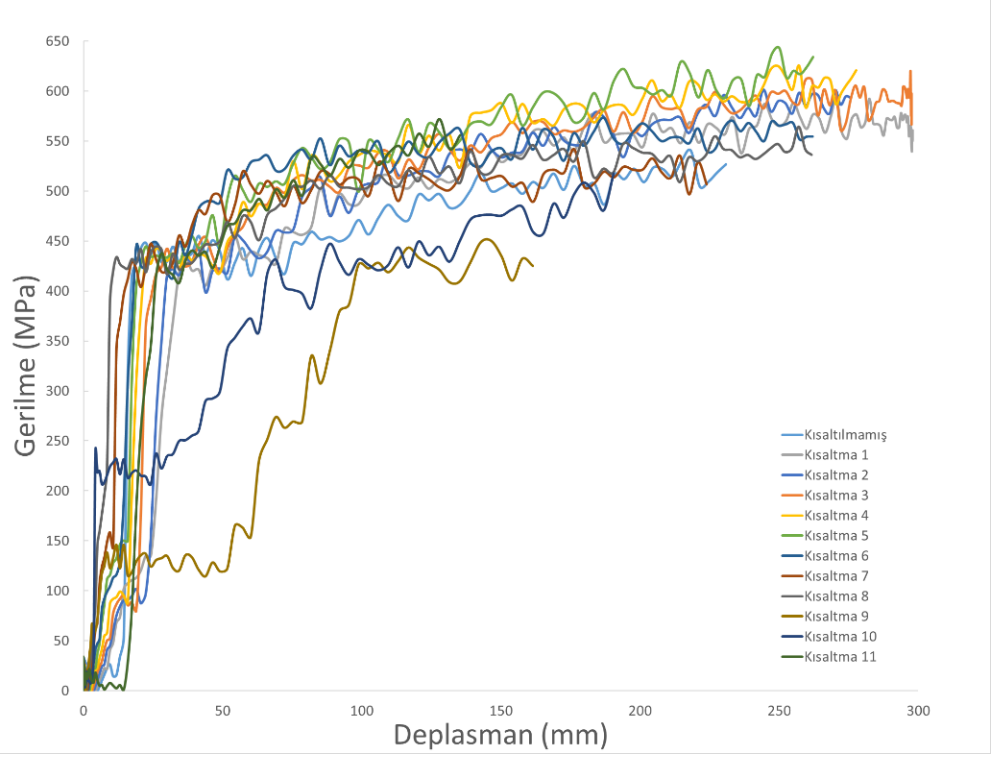
Şekil 5.26. Kısaltılmamış, Kısaltma 1-3 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



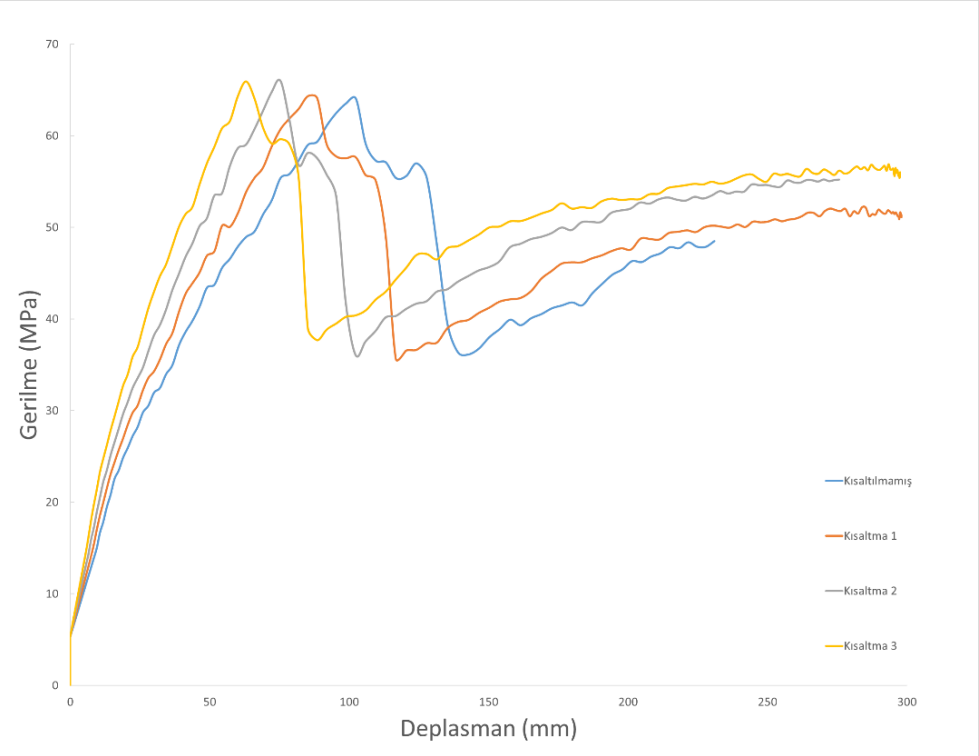
Şekil 5.27. Kısaltma 4-7 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



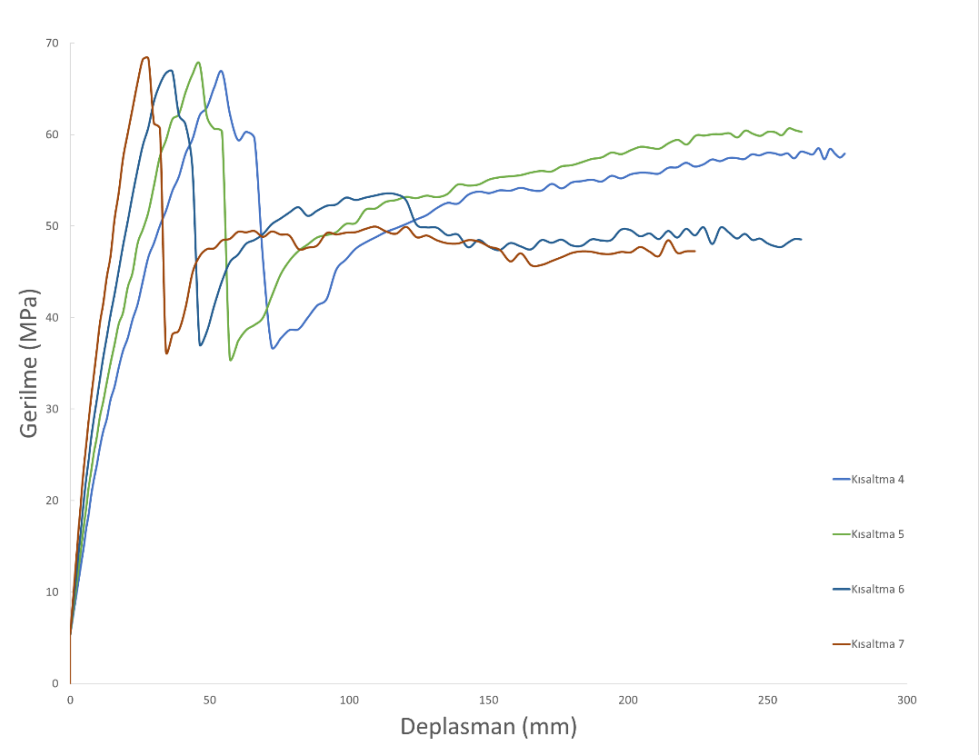
Şekil 5.28. Kısaltma 8-11 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



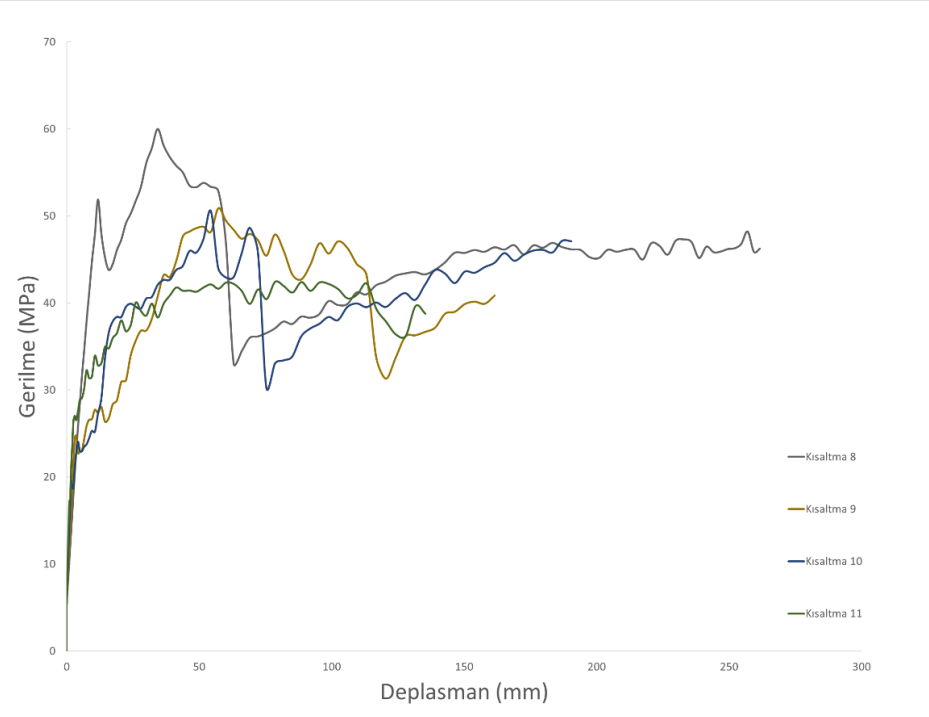
Şekil 5.29. Tüm modellerin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



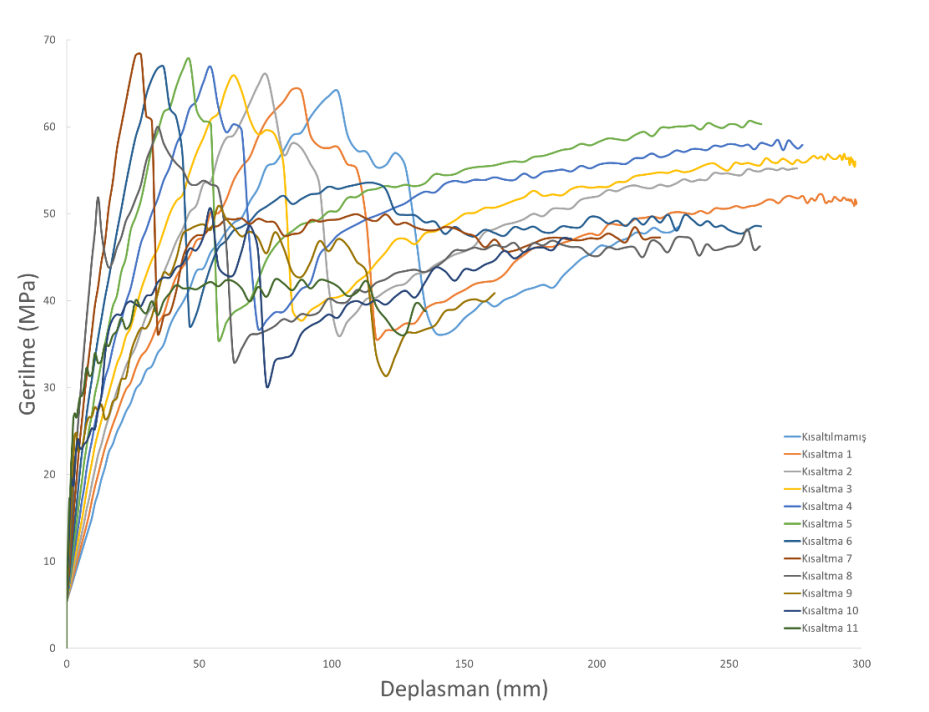
Şekil 5.30. Kısaltılmamış, Kısaltma 1-3 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri



Şekil 5.31. Kısaltma 4-7 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri

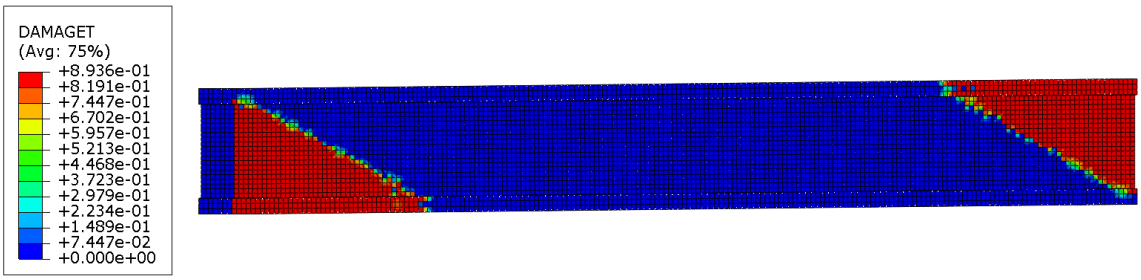


Şekil 5.32. Kısaltma 8-11 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri

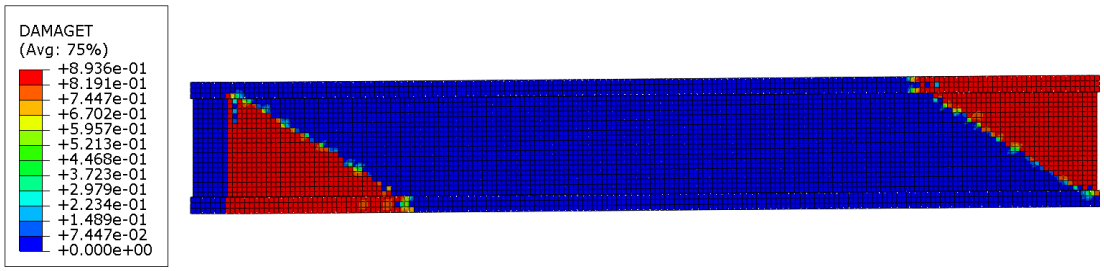


Şekil 5.33. Tüm modellerin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri

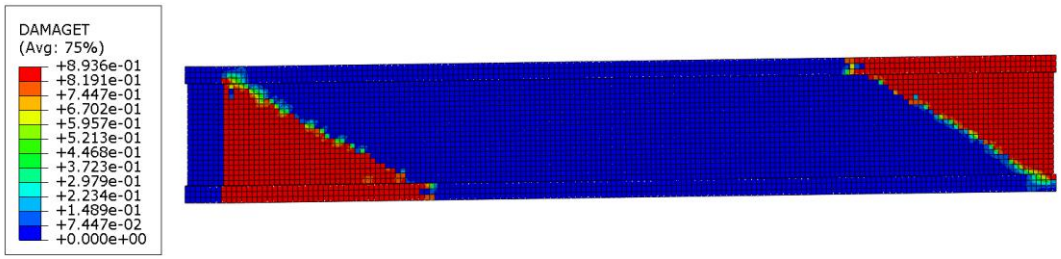
Kısaltma modellerinin analiz sonucu belirlenen beton çekme hasarları Şekil 5.34-5.45'te gösterilmiştir. Analiz süresince maksimum yanal kuvvetin oluştuğu süreler belirlenmiş, bu sürelerde oluşan hasarlar gösterilmiştir. Oluşturulan "constraint" davranışına göre yükün uygulandığı kısımda da hasar oluşmuştur.



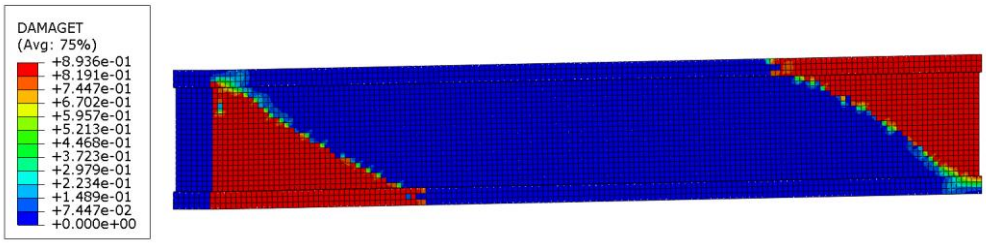
Şekil 5.34. Kısaltılmamış model beton çekme hasarı



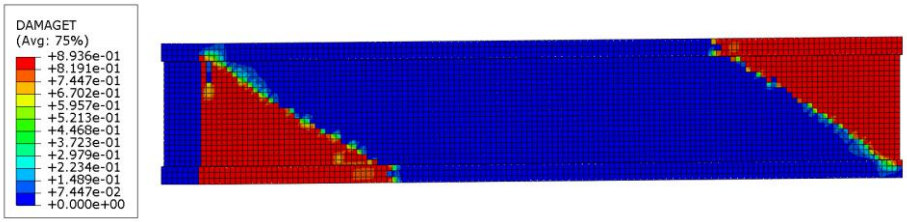
Şekil 5.35. Kısaltma 1 modeli beton çekme hasarı



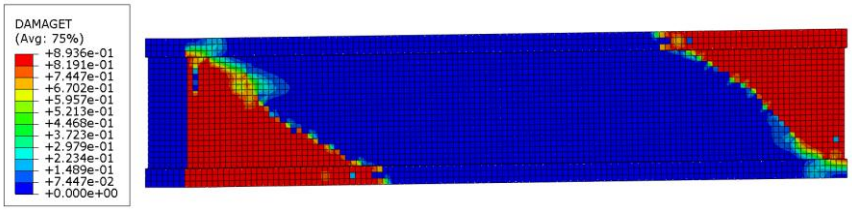
Şekil 5.36. Kısaltma 2 modeli beton çekme hasarı



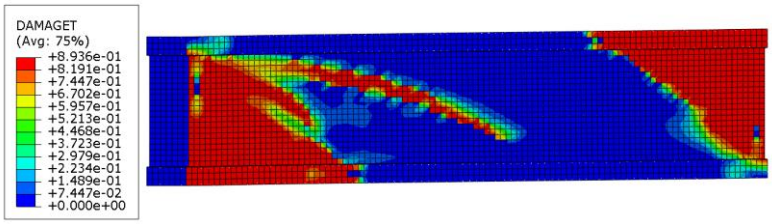
Şekil 5.37. Kısaltma 3 modeli beton çekme hasarı



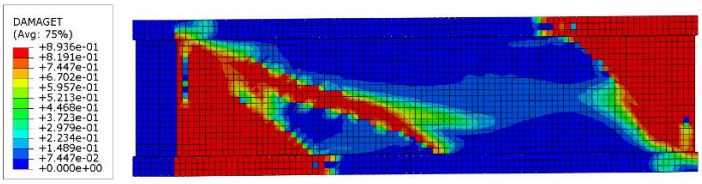
Şekil 5.38. Kısaltma 4 modeli beton çekme hasarı



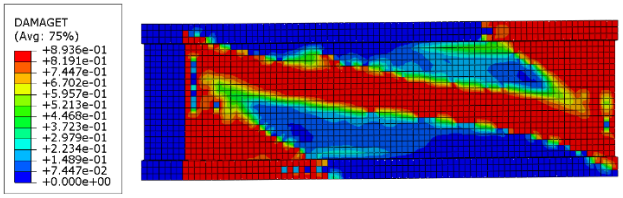
Şekil 5.39. Kısaltma 5 modeli beton çekme hasarı



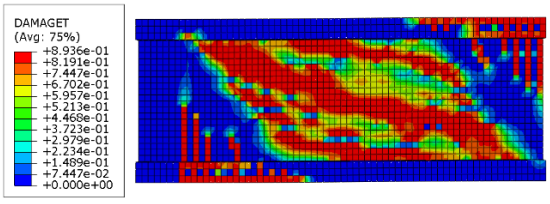
Şekil 5.40. Kısaltma 6 modeli beton çekme hasarı



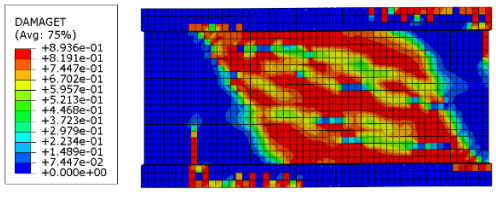
Şekil 5.41. Kısaltma 7 modeli beton çekme hasarı



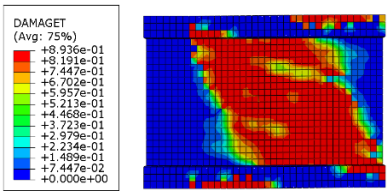
Şekil 5.42. Kısaltma 8 modeli beton çekme hasarı



Şekil 5.43. Kısaltma 9 modeli beton çekme hasarı



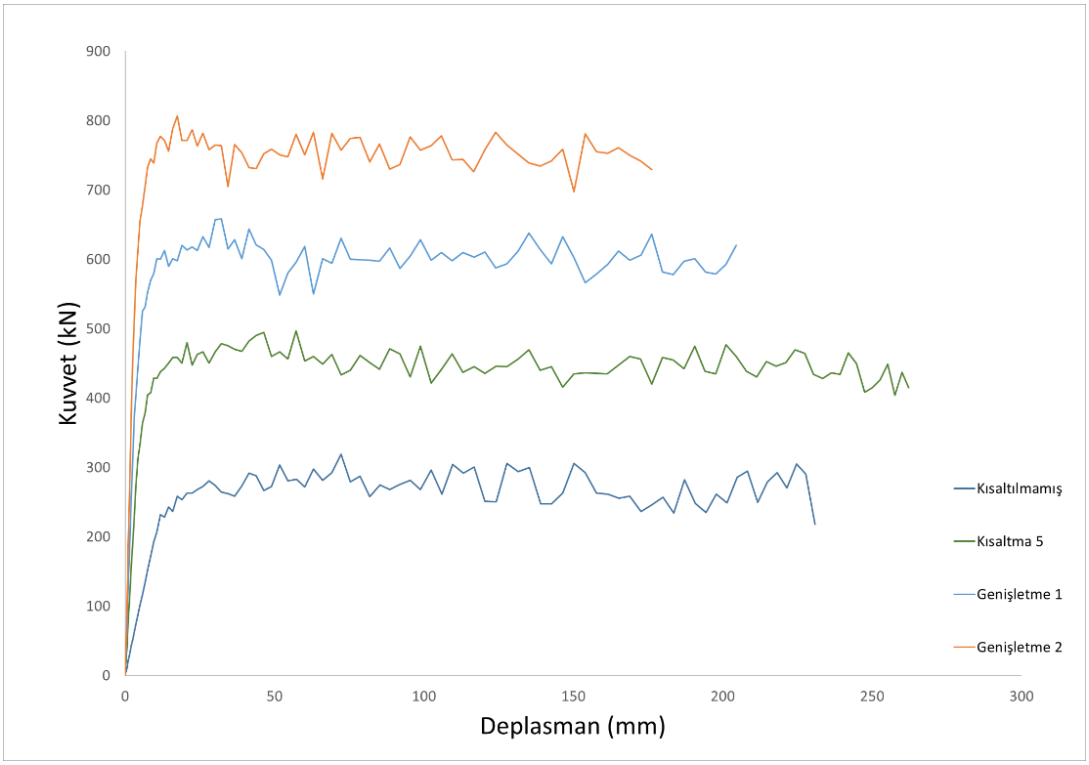
Şekil 5.44. Kısaltma 10 modeli beton çekme hasarı



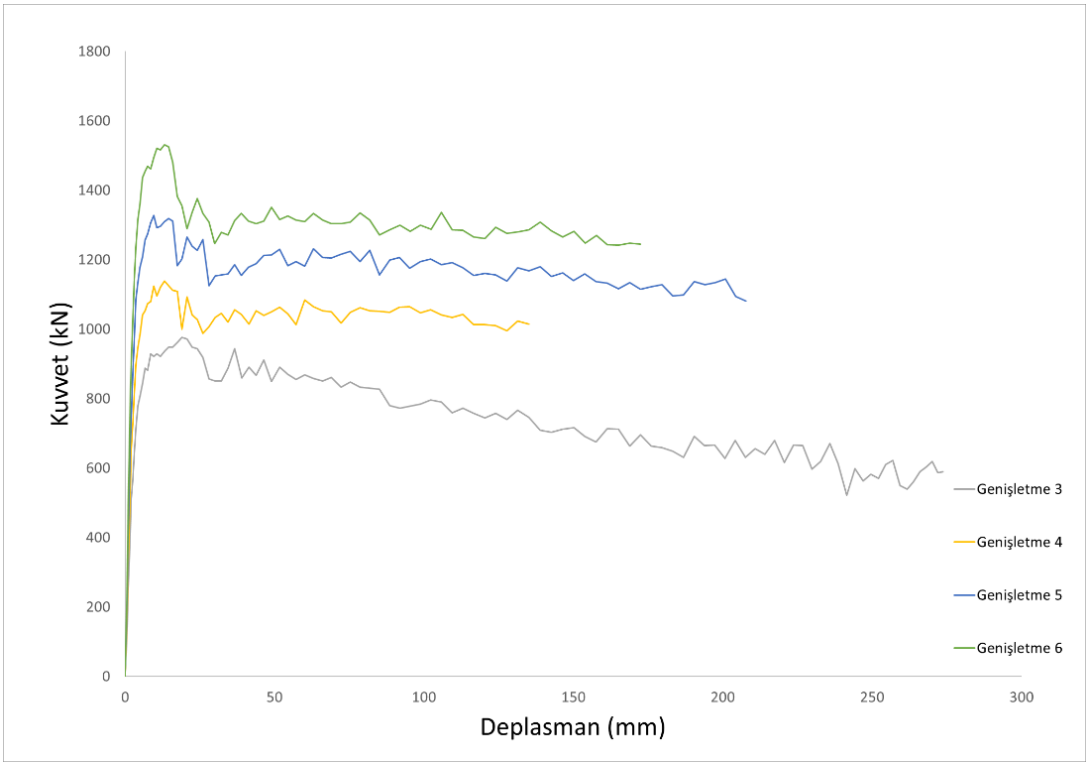
Şekil 5.45. Kısaltma 11 modeli beton çekme hasarı

5.5. Genişletme Modelleri

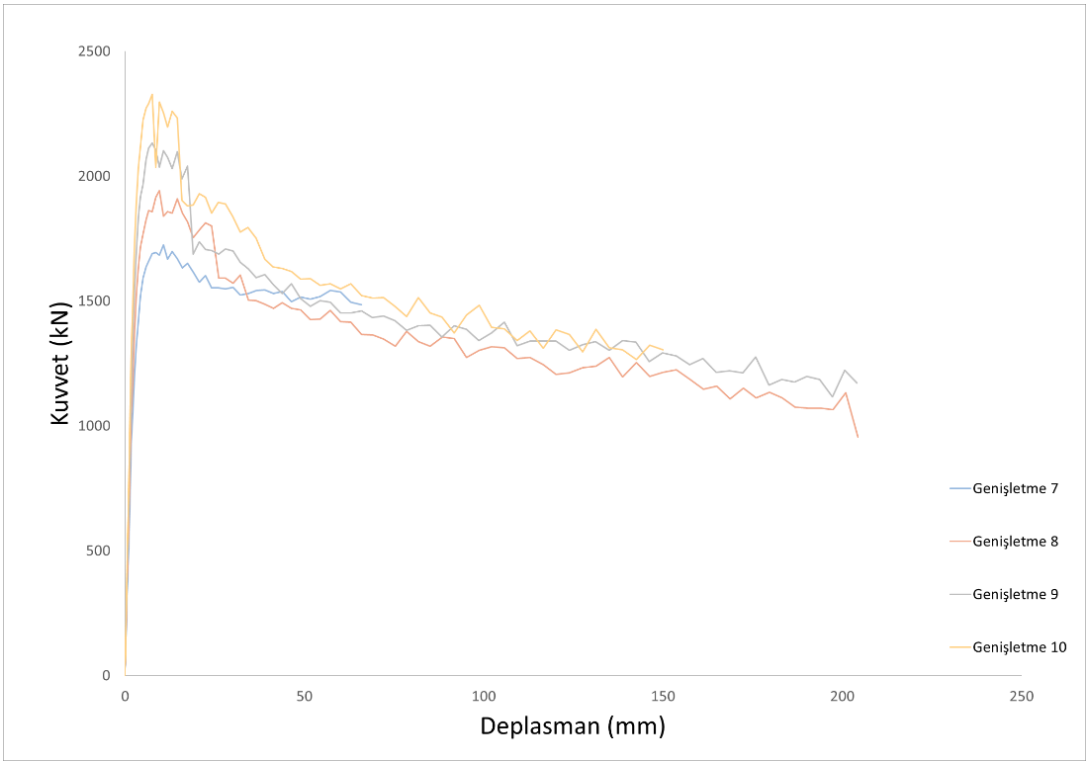
Kısaltma modellerinde yapıldığı gibi analitik modellerin perde yüzeyinde yükün uygulandığı noktada oluşan reaksiyon kuvvetleri ve deplasman verileri ABAQUS programı ile elde edilmiş, daha sonra bu veriler birleştirilmiştir. Genişletme modellerinin kuvvet deplasman grafikleri Şekil 5.46-5.50'de verilmiştir.



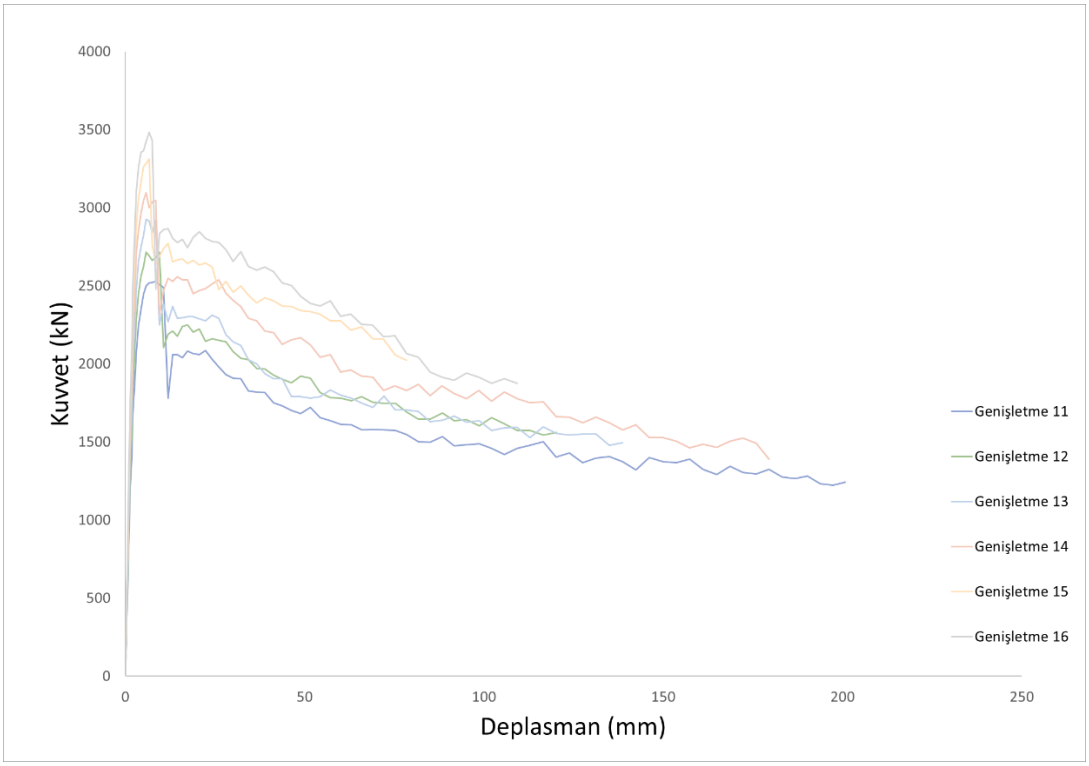
Şekil 5.46. Kısaltılmamış, Kısaltma 5, Genişletme 1 ve Genişletme 2 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri



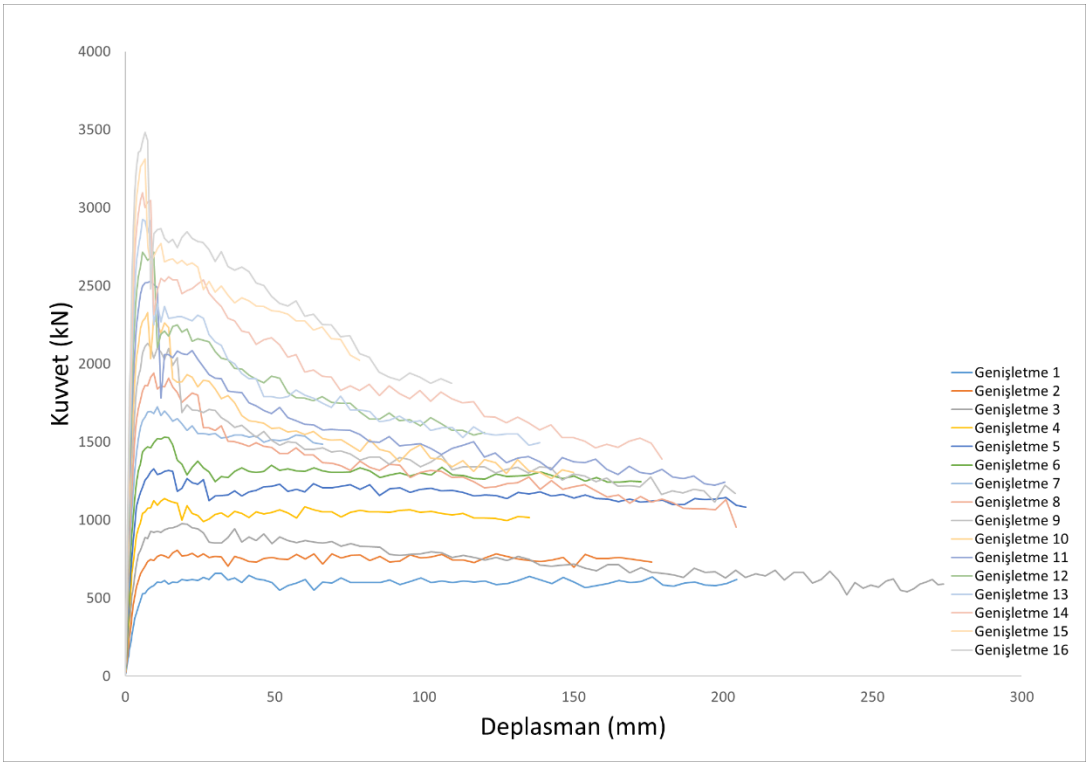
Şekil 5.47. Genişletme 3-6 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri



Şekil 5.48. Genişletme 7-10 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri

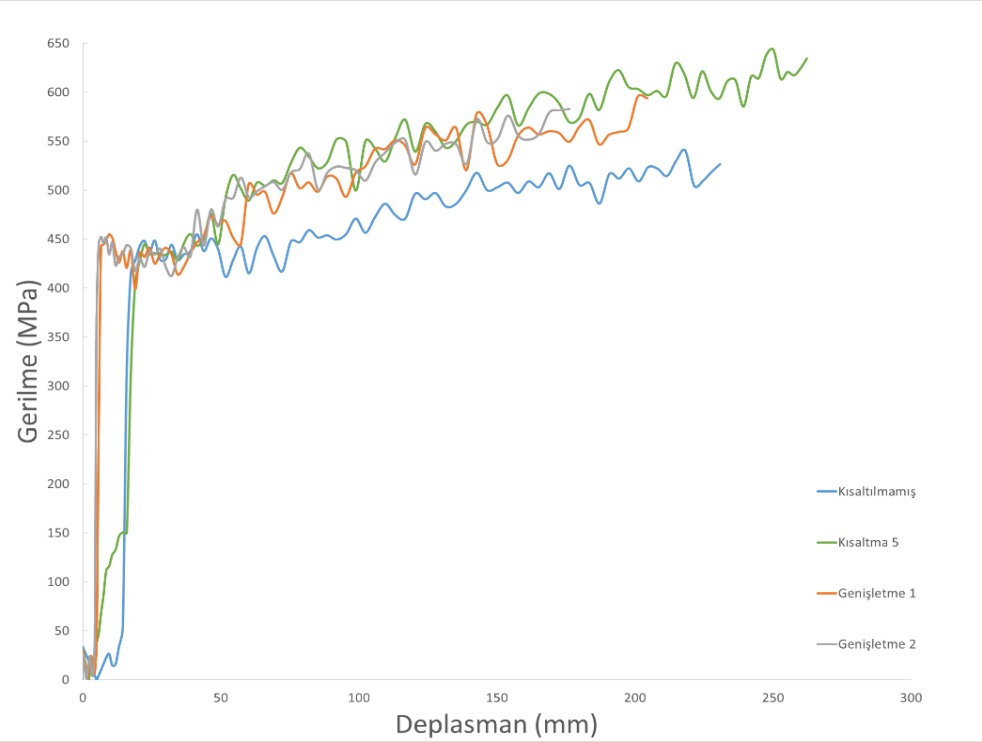


Şekil 5.49. Genişletme 11-16 modellerinin kuvvet deplasman grafikleri

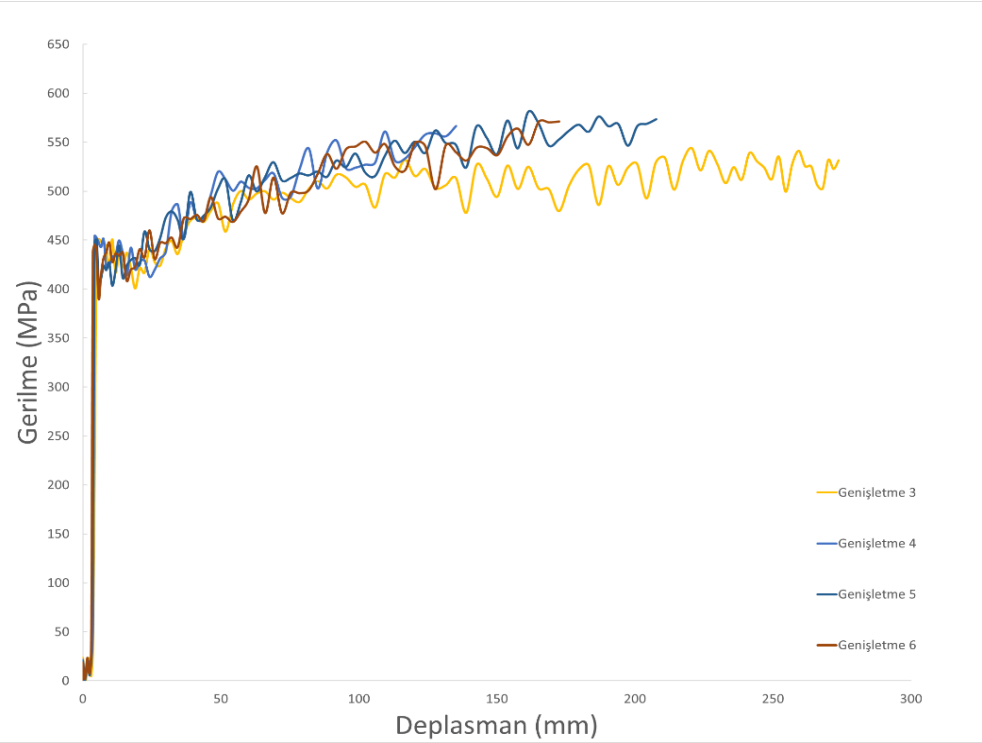


Şekil 5.50. Tüm genişletme modellerinin kuvvet deplasman grafikleri

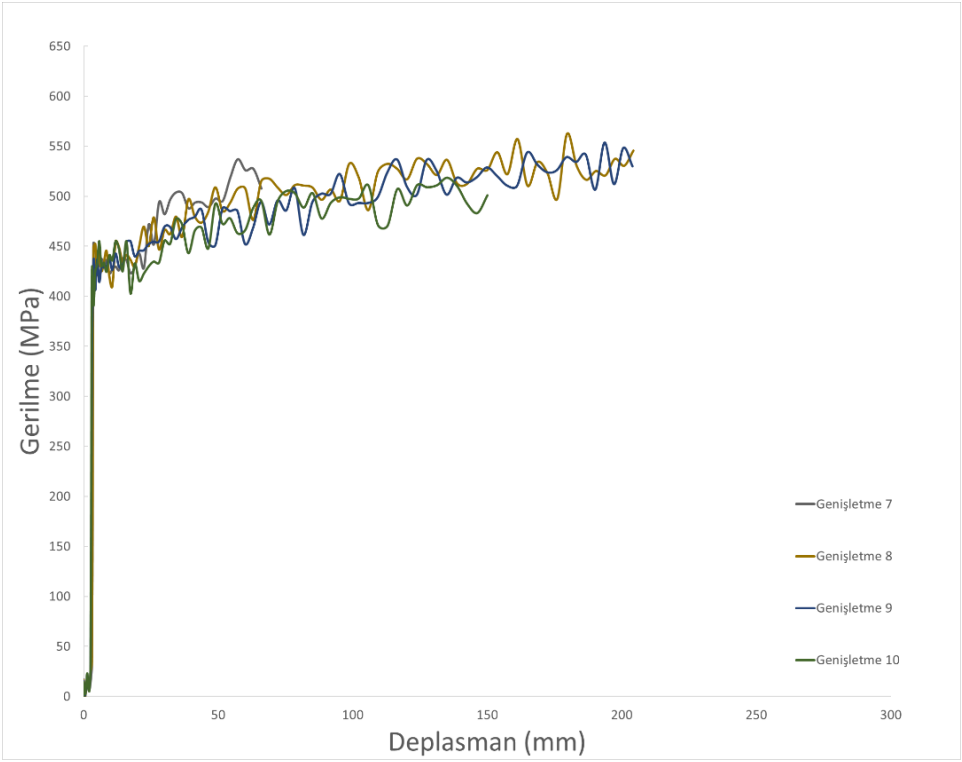
Genişletme modelleri için boyuna donatılarda oluşan en büyük çekme gerilmeleri Şekil 5.51-5.55'te ve betonda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 5.56-5.60'ta gösterilmiştir.



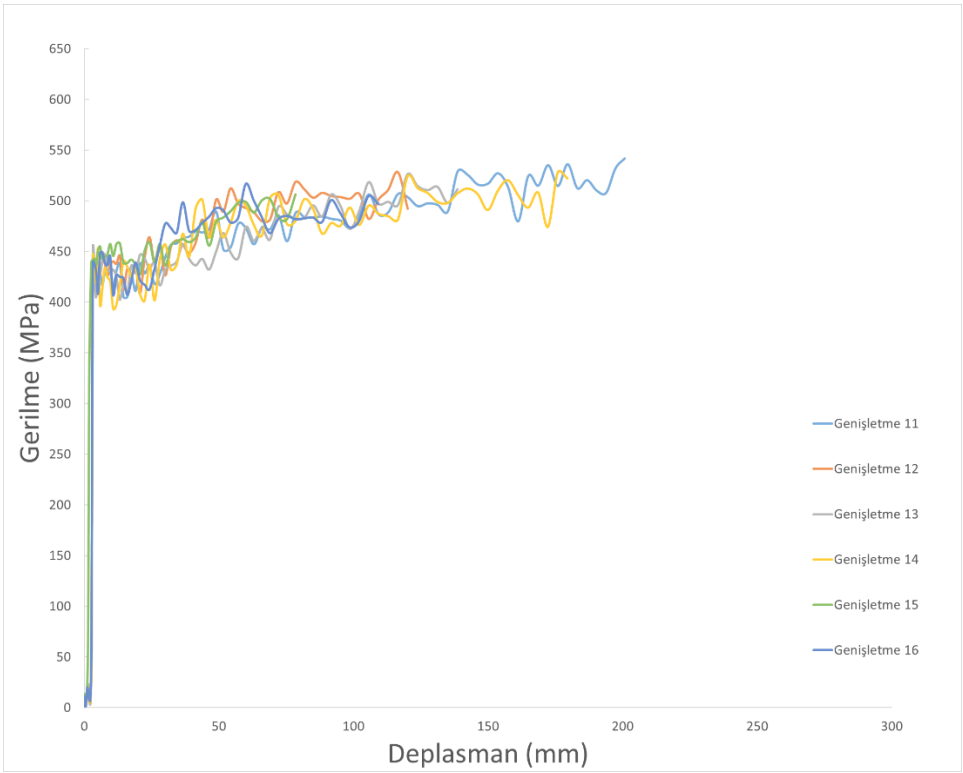
Şekil 5.51. Kısaltılmamış, Kısaltma 5, Genişletme 1 ve Genişletme 2 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



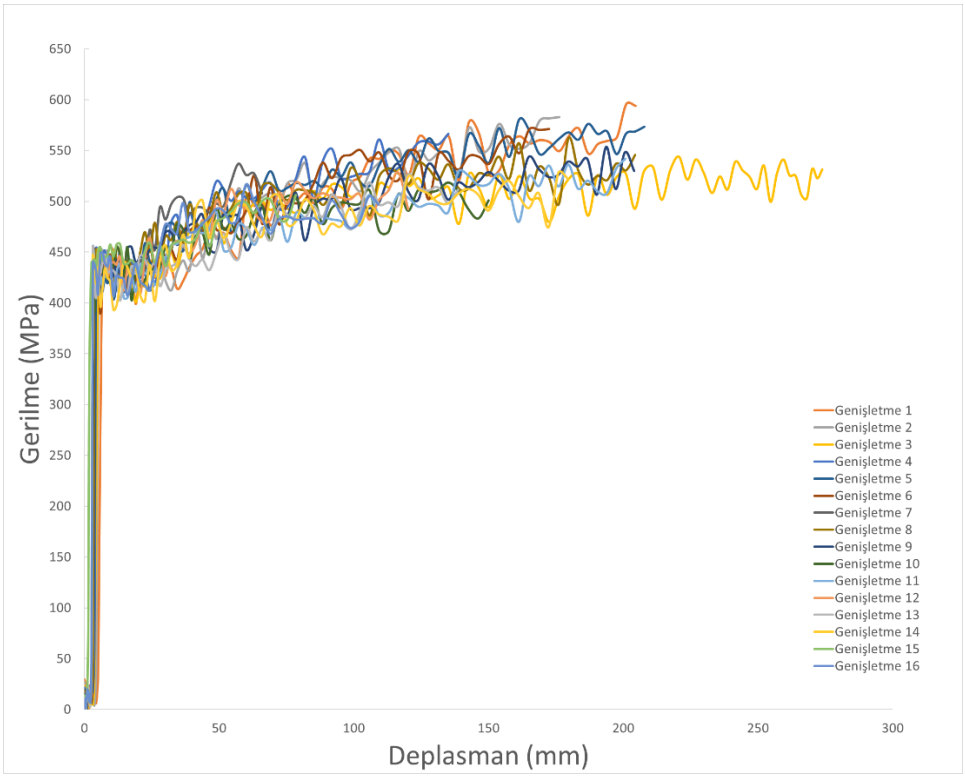
Şekil 5.52. Genişletme 3-6 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



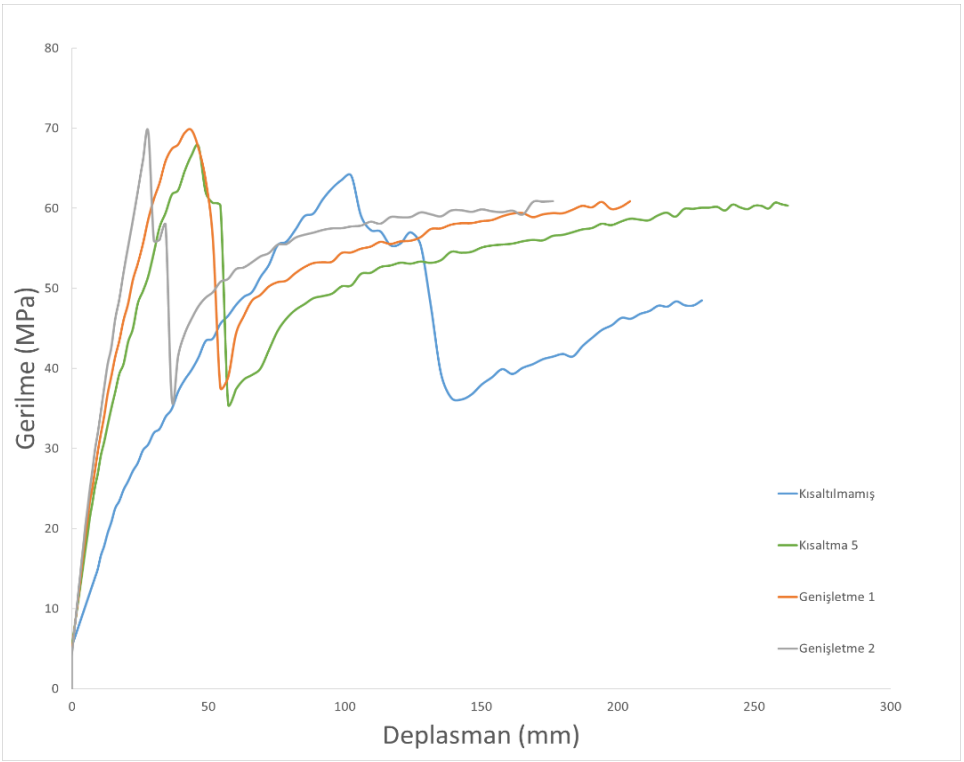
Şekil 5.53. Genişletme 7-10 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



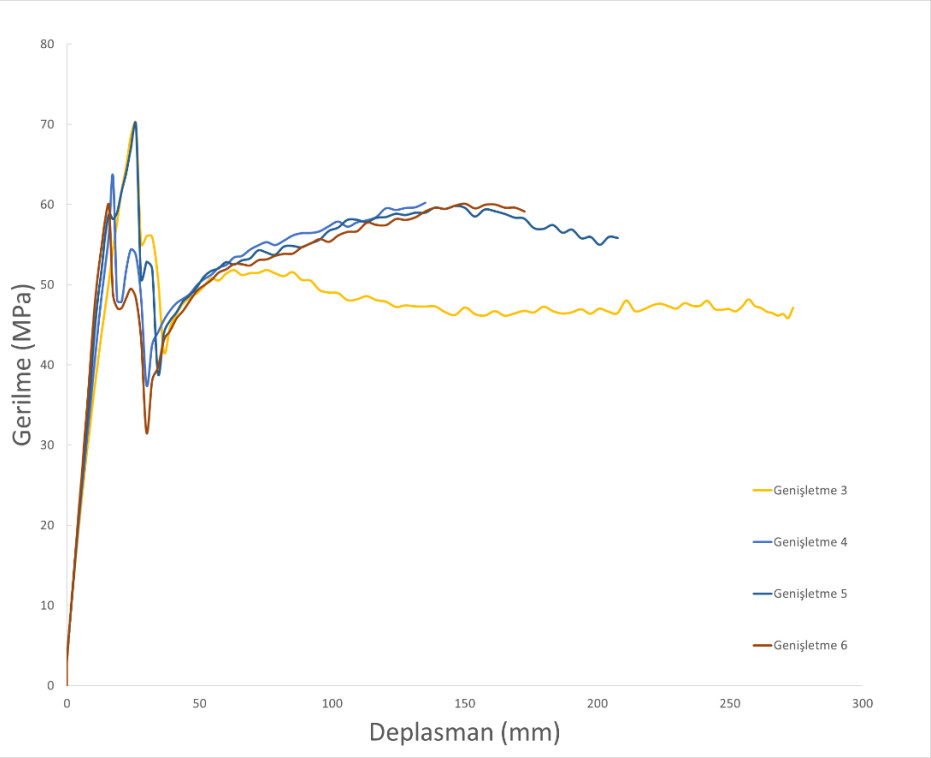
Şekil 5.54. Genişletme 11-16 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



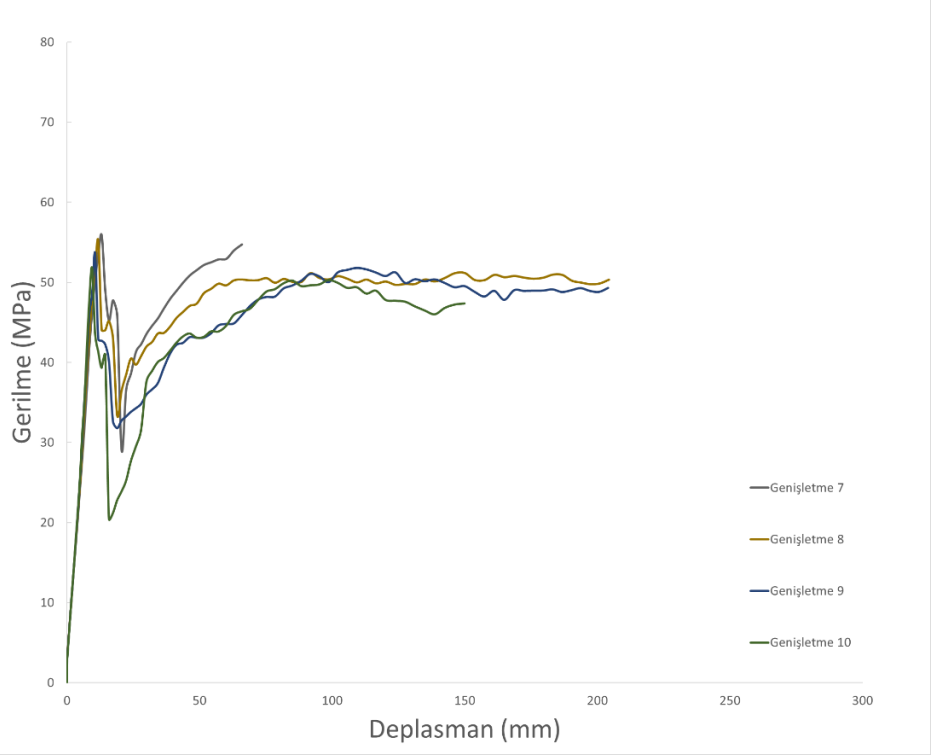
Şekil 5.55. Tüm genişletme modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri



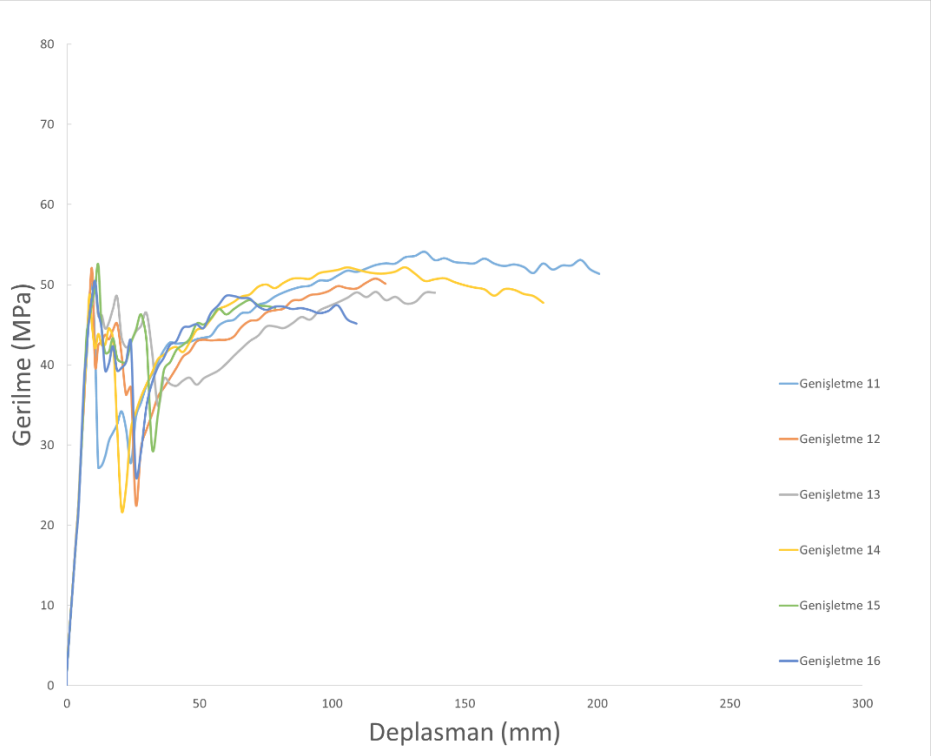
Şekil 5.56. Kısaltılmamış, Kısaltma 5, Genişletme 1 ve Genişletme 2 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri



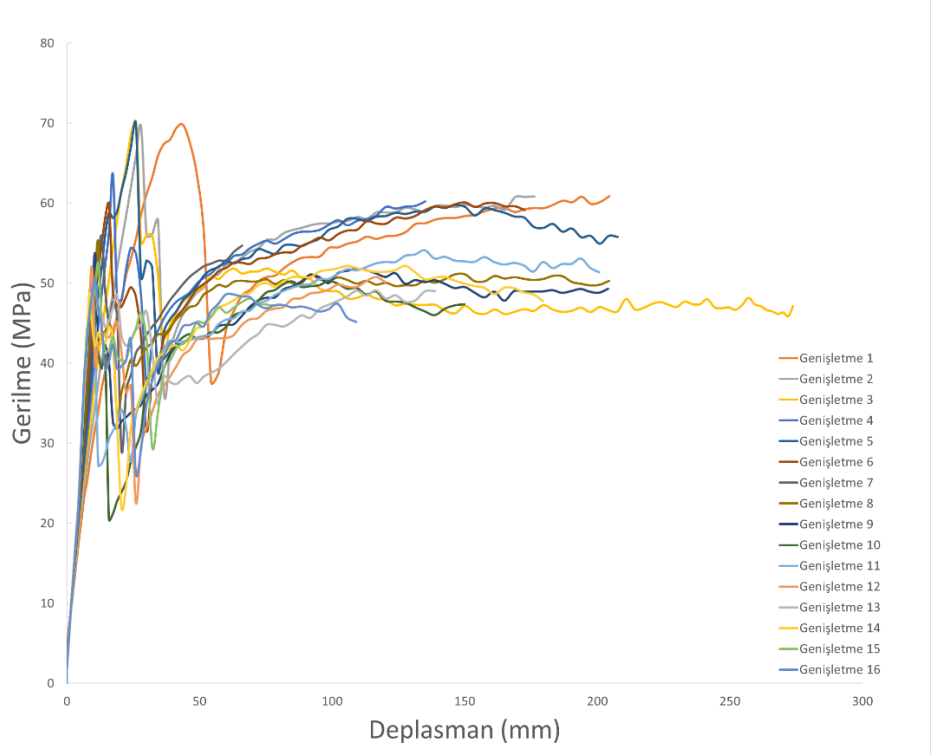
Şekil 5.57. Genişletme 3-6 modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri



Şekil 5.58. Genişletme 7-10 modellerinin çekme gerilmesi-deplasman grafikleri

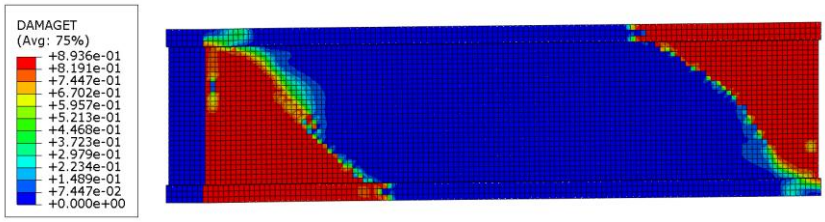


Şekil 5.59. Genişletme 11-14 ve Genişletme 16 modellerinin basınç-deplasman grafikleri

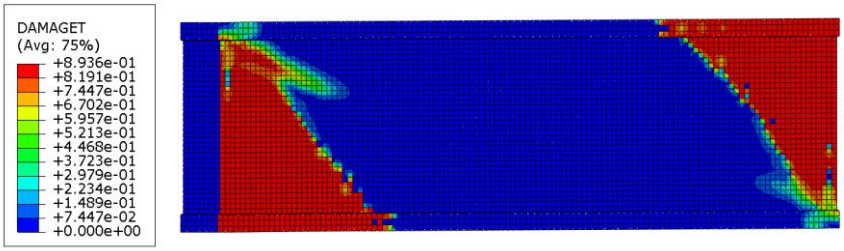


Şekil 5.60. Tüm genişletme modellerinin basınç gerilmesi-deplasman grafikleri

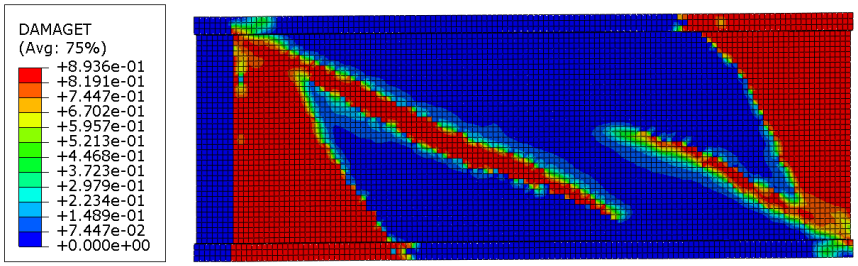
Genişletme modellerinin analiz sonucu belirlenen beton çekme hasarları Şekil 5.61-5.76'da gösterilmiştir.



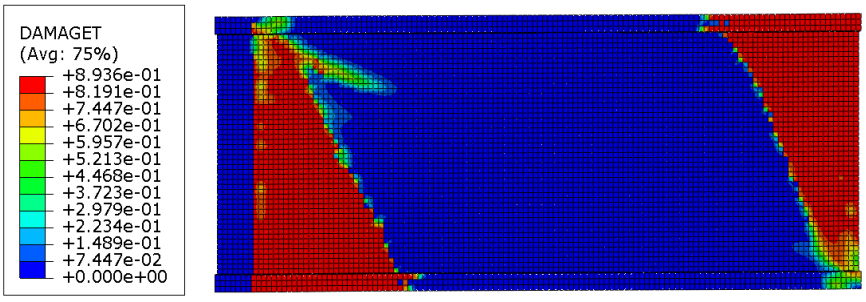
Şekil 5.61. Genişletme 1 modeli beton çekme hasarı



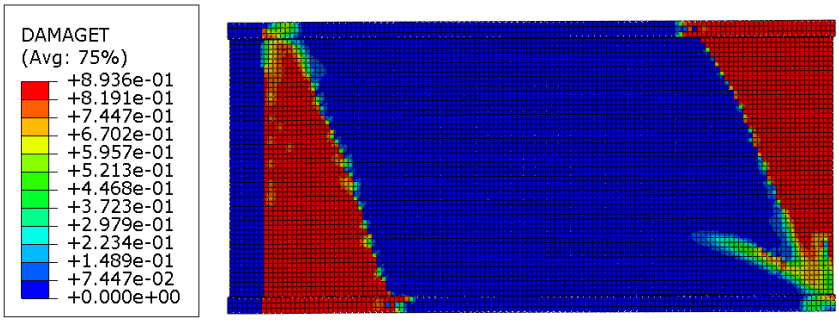
Şekil 5.62. Genişletme 2 modeli beton çekme hasarı



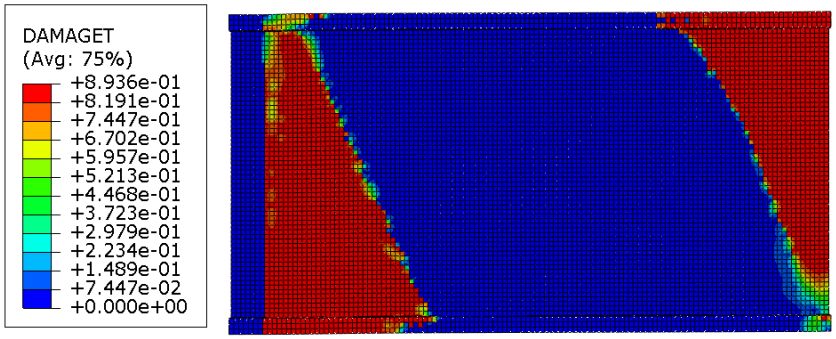
Şekil 5.63. Genişletme 3 modeli beton çekme hasarı



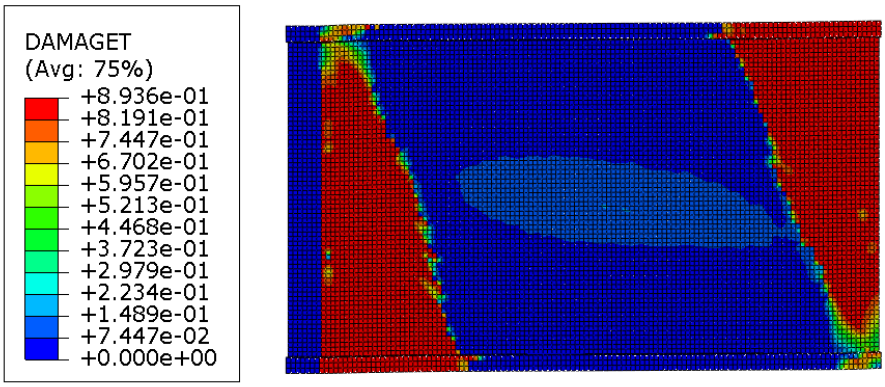
Şekil 5.64. Genişletme 4 modeli beton çekme hasarı



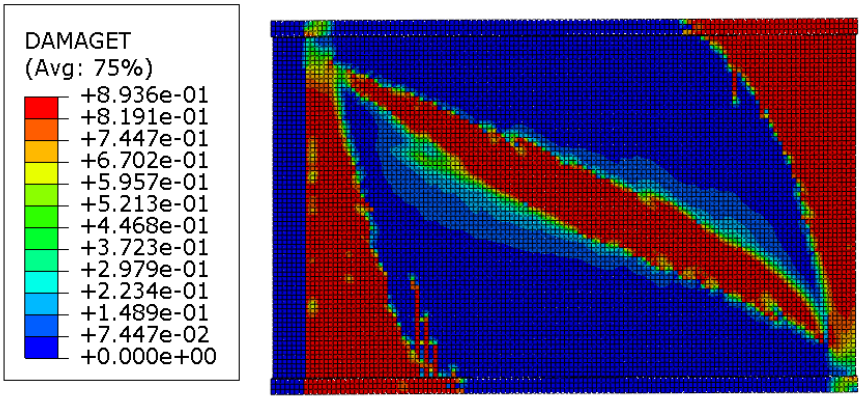
Şekil 5.65. Genişletme 5 modeli beton çekme hasarı



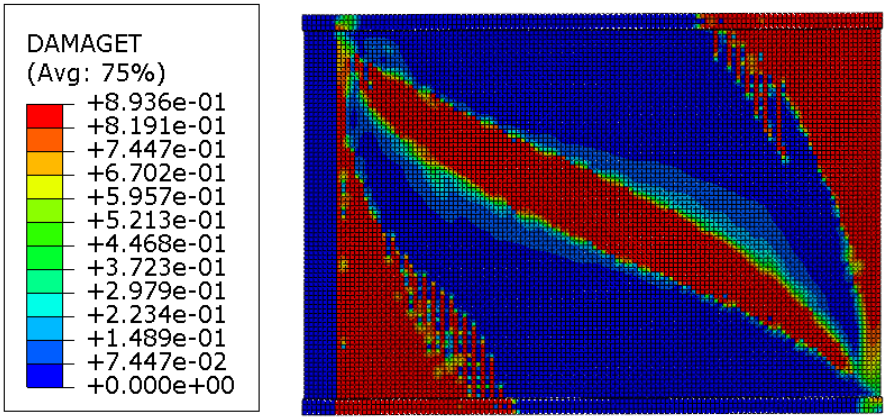
Şekil 5.66. Genişletme 6 modeli beton çekme hasarı



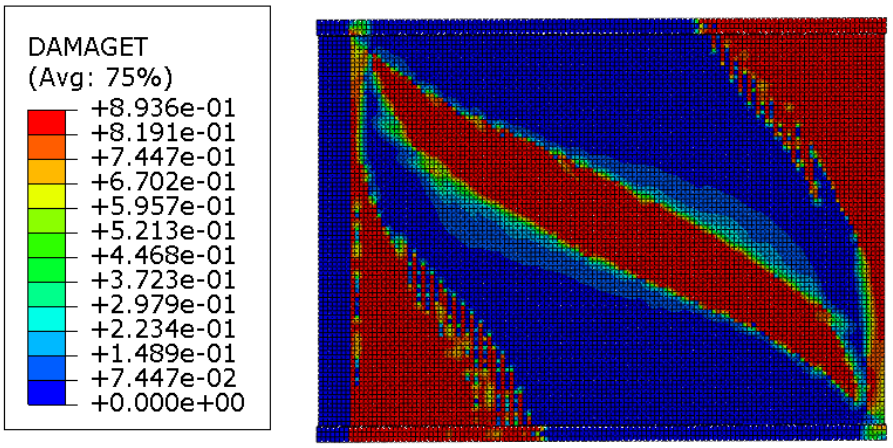
Şekil 5.67. Genişletme 7 modeli beton çekme hasarı



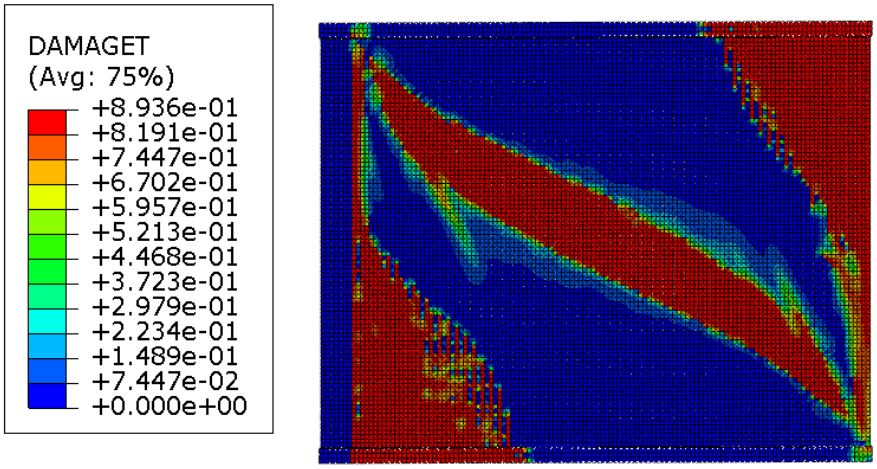
Şekil 5.68. Genişletme 8 modeli beton çekme hasarı



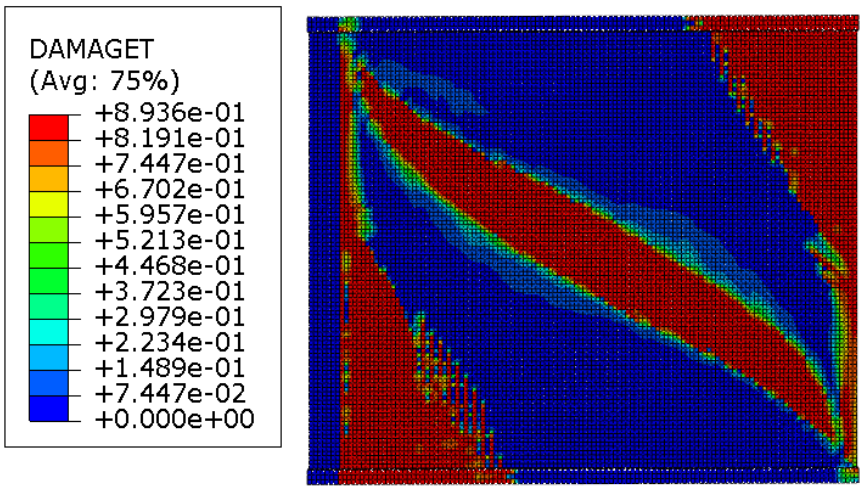
Şekil 5.69. Genişletme 9 modeli beton çekme hasarı



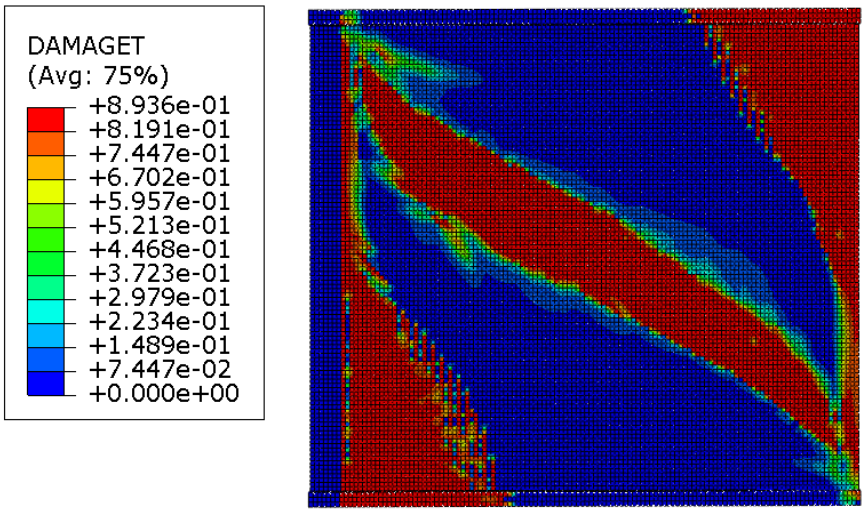
Şekil 5.70. Genişletme 10 modeli beton çekme hasarı



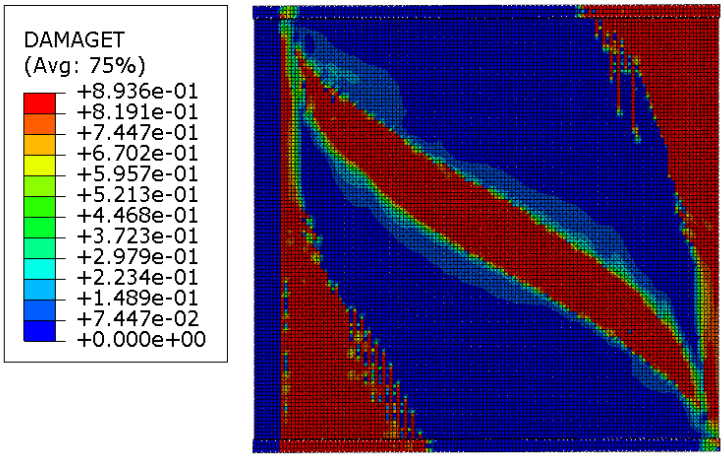
Şekil 5.71. Genişletme 11 modeli beton çekme hasarı



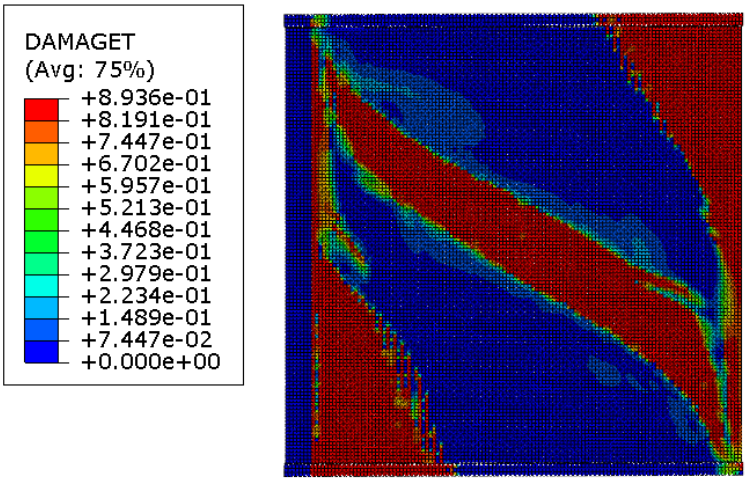
Şekil 5.72. Genişletme 12 modeli beton çekme hasarı



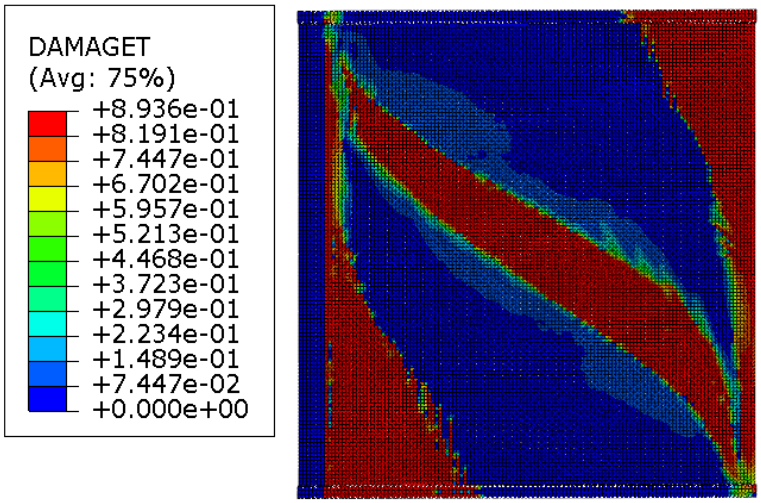
Şekil 5.73. Genişletme 13 modeli beton çekme hasarı



Şekil 5.74. Genişletme 14 modeli beton çekme hasarı



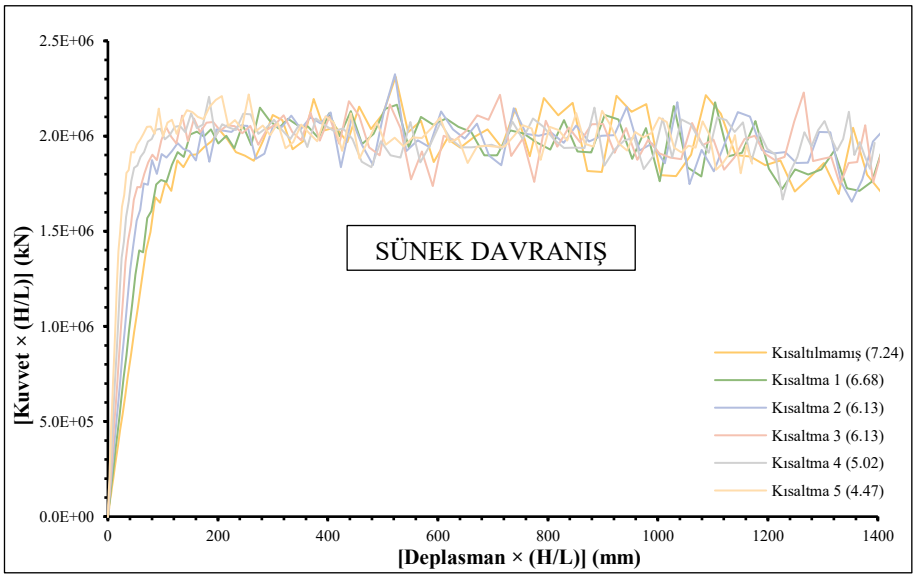
Şekil 5.75. Genişletme 15 modeli beton çekme hasarı



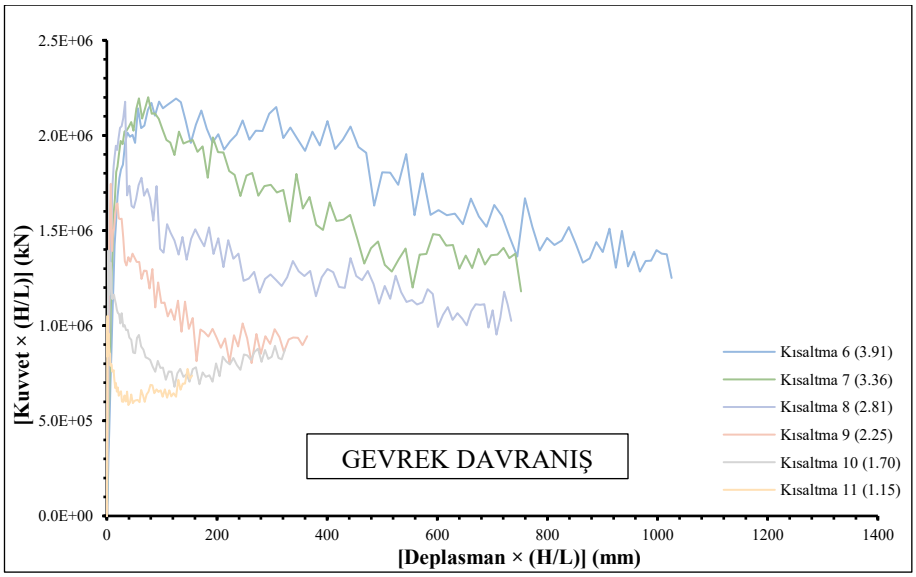
Şekil 5.76. Genişletme 16 modeli beton çekme hasarı

5.6. Kalınlık (t), Genişlik (L) ve Yükseklik (H) Oranları

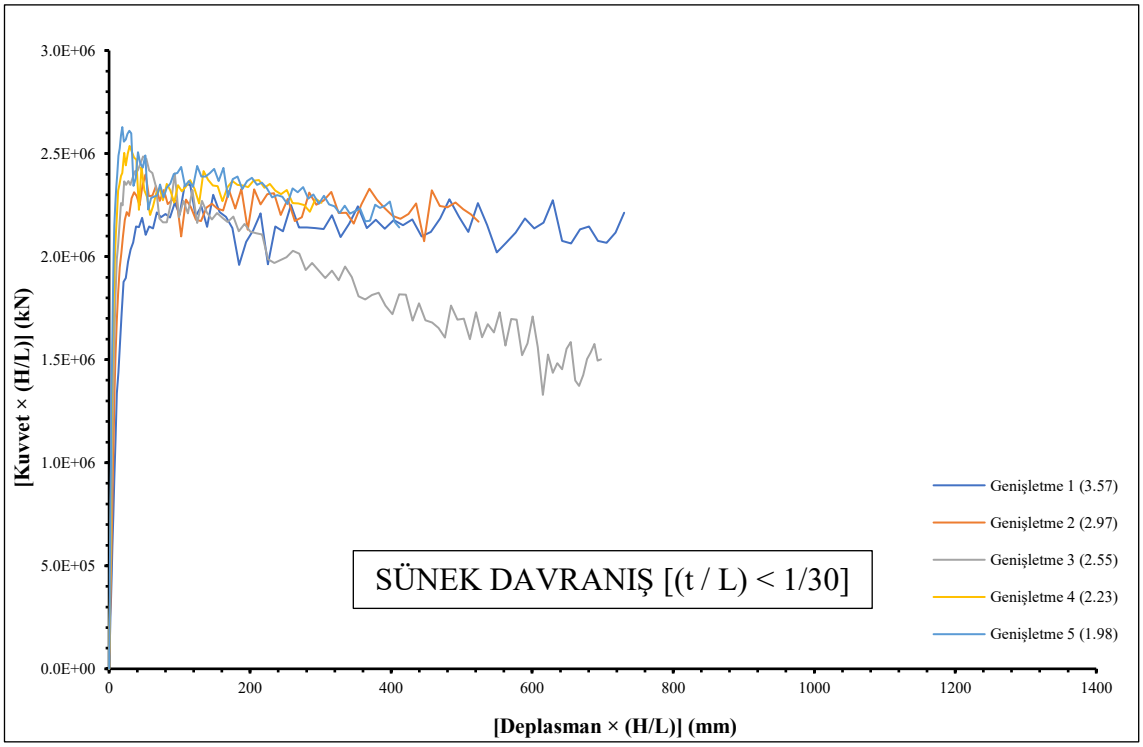
Tüm kısaltma ve genişletme modellerinin boyutları Çizelge 4.3 ve 4.4'te daha önceden verilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde uygulanan kuvvetin, perde yüksekliği (H) ile ters orantılı, perde genişliği (L) ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Perde kısaltma ve genişletme durumlarını perde yüksekliği ve genişliğinden bağımsız olarak incelemek amacıyla her bir model için elde edilen kuvvet-deplasman değerleri (L/H) oranına bölünerek, başka bir değişle (H/L) oranıyla çarpılarak, normalize edilmiştir. Perde kısaltma durumları için oluşan grafikler Şekil 5.77 ve 5.78'de, perde genişletme durumları için oluşan grafikler ise Şekil 5.79 ve 5.80'de sunulmuştur. Ayrıca tüm durumlar tek grafik üzerinde Şekil 5.81'de görüldüğü gibi verilmiştir.



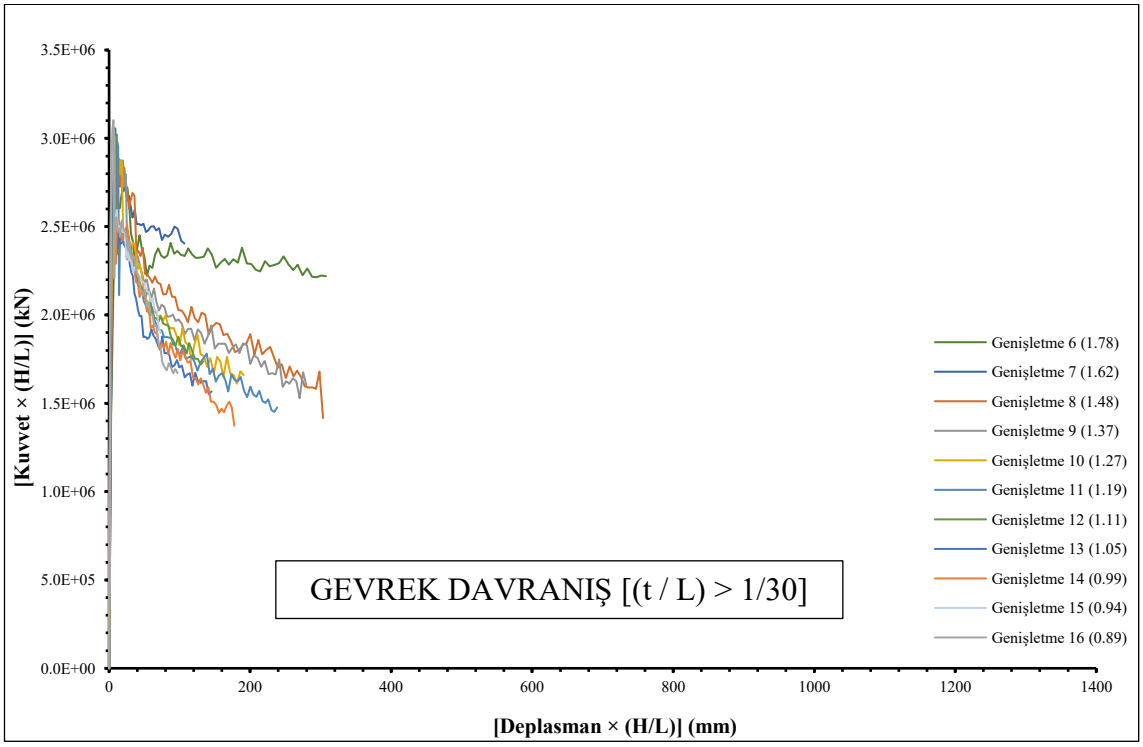
Şekil 5.77. Kısaltma 1-5 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)]



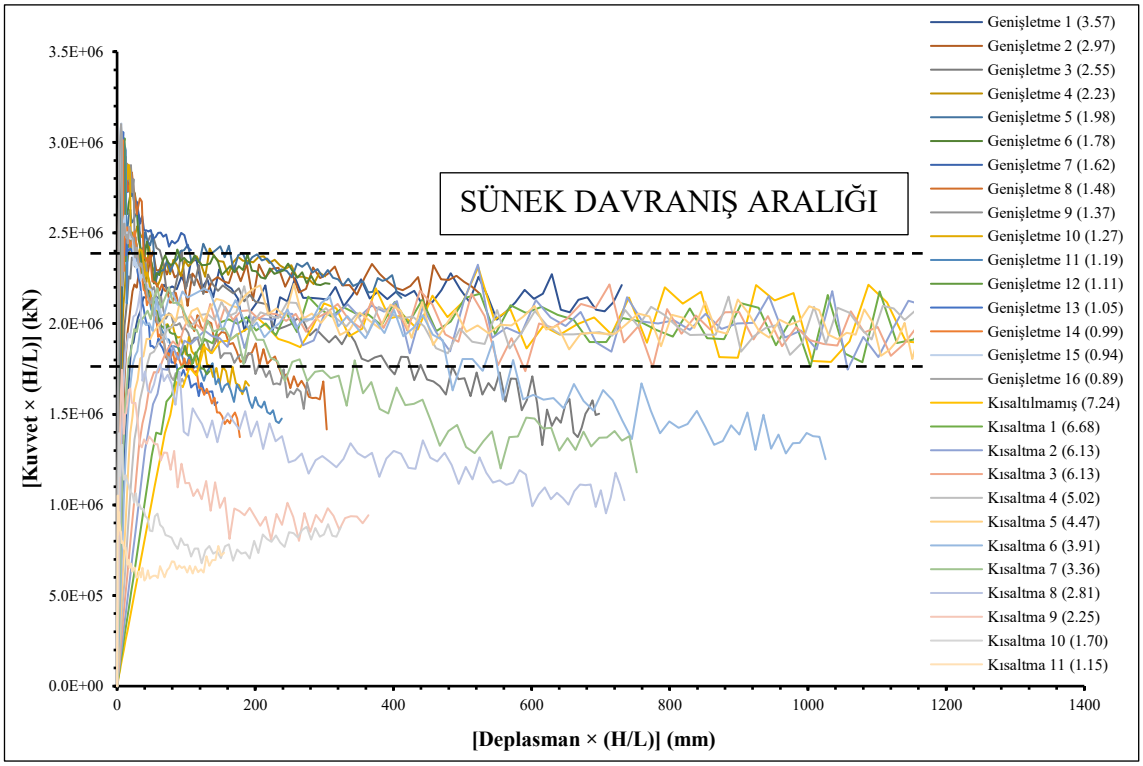
Şekil 5.78. Kısaltma 6-11 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)]



Şekil 5.79. Genişletme 1-5 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)]



Şekil 5.80. Genişletme 6-16 modelleri için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)]



Şekil 5.81. Tüm sayısal modeller için [Kuvvet×(H/L)]–[Deplasman×(H/L)]

6. SONUÇLAR

Literatürde perde kalınlığı, genişliği ve yüksekliğinin perde davranışına etkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. TBDY 2018 7.6.1.2'de bahsedilen minimum perde kalınlığının genişliğine 1/6 oranı ve 7.6.1.2 (b) maddesinde bahsedilen minimum perde kalınlığının tutulmamış perde boyunun 1/30'undan fazla olması şartları yapılan analitik çalışmalarda incelenmiştir (Susam, 2019; Yıldırım, 2021; Çınar, 2022).

Bu tez çalışmasında, Adebar vd. tarafından deneysel olarak incelenen betonarme bir perde, sayısal olarak modellenmiş ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.5'te verilen yük-deplasman eğrisinde maksimum yüke ulaşılana kadar eğri eğiminin yakın olması, model rijitliğinin deneye yakın olduğunu göstermektedir.

Bir tanesi deneysel duruma ait olmak üzere, aynı kesit ve malzeme özelliklerine sahip dört farklı donatı düzeni için analitik modeller oluşturulmuştur. Donatı düzeni-1 (deneysel durum), Donatı düzeni-2 ve Donatı düzeni-3'e sahip modellerinde oluşan davranışın birebirine benzer olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.21). Nispeten daha fazla hasarın Donatı düzeni-1'e sahip deney modelinde olduğu görülmüştür. TBDY 2018'e uygun olarak oluşturulan Donatı düzeni-4'e sahip modelde ise hasarın daha kontrollü olduğu perdenin daha sünek davrandığı yorumu yapılabilmektedir.

TBDY 2018'e uygun Donatı düzeni-4 modeli ayrıca yönetmeliğe göre kullanılabilecek en düşük beton sınıfı olan C25 ile de test edilmiştir. Böylece mevcut donatı düzeni için çekme donatısı henüz akmadan beton basınç ezilmesi şeklinde bir gevrek davranış görülme durumunun söz konusu olup olmadığı da değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında en düşük beton sınıfıyla bile sünek bir davranış elde edilmiştir. Ancak, yük kapasitesinde önemli bir değişiklik oluşmazken çekme donatısının akmasıyla başlayan sünek bölge uzunluğunun yüksek beton dayanımına sahip durumlara göre kısaldığı görülmüştür. Böylece eğri altında kalan alan küçülmekte ve perdenin enerji tüketme kapasitesi azalmaktadır.

Donatı Von Mises gerilme dağılımı incelendiğinde enine donatılarda maksimum gerilme Donatı düzeni-1 ve Donatı düzeni-2'ye sahip modellerinde 650 MPa gözlenirken Donatı düzeni-3'e sahip modelde 632 MPa olarak görüntülenmiştir. Boyuna donatılardaki maksimum gerilme Donatı düzeni-4 modelinde 514 MPa olarak görülürken, C25 beton ile teşkil edilmiş modelde 549 MPa olarak ölçülmüştür. Gerilmeler maksimum olarak Donatı düzeni 1-3 modellerinde enine donatıda gözlenirken Donatı düzeni-4 ve C25 ile teşkil edilen modelde mesnete yakın boyuna donatıda görüntülenmiştir. Tüm modellerde betonun ezilmeden önce donatının aktığı tespit edilmiştir. Donatı düzeni 1-3 modellerinde enine donatı daha önce akarken Donatı düzeni-4 ve C25 ile teşkil edilen modelde boyuna donatının daha önce aktığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.21'deki yük-deplasman eğrilerinin başlangıç eğimlerine bakıldığında, genel olarak tüm modellerin rijitliğinin deneysel durumla benzer olduğu anlaşılmaktadır. Donatı düzeni 1-3 modellerinde analiz 200 mm'ye yakın deplasmanlarda sonlanırken Donatı düzeni-4 modellerinde 300 mm'de sonlanmıştır. Donatı düzeni-2 ve Donatı düzeni-3'e sahip modeller benzer performans göstermişlerdir. 50-150 mm deplasman

arasında C25 beton dayanımına sahip Donatı düzeni-4 modeli deney eğrisine oldukça yaklaşmıştır. Tüm performans kriterleri dikkate alındığında, TBDY 2018'e uygun olan donatı düzeni 4 modelinin, taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji sönümleme bakımından en iyi davranışı sergilediği görülmüştür.

Betonarme perde boyutlarının davranışa olan etkisini anlayabilmek amacıyla TBDY 2018'e uygun Donatı düzeni-4 modeli dikkate alınarak önce perde yüksekliği kısaltma ve arkasından perde genişliği arttırma modelleri türetilmiştir. Betonarme perdelerde sünek davranışın yanı sıra gevrek göçme hali iki nedenle görülebilmektedir. Bunlardan ilki boyuna donatılar çekme altında henüz akamadan basınç bölgesindeki betonun ezilmesidir. Bu durum nedeniyle yük taşıma kapasitesinde ani düşüşler gözlemlenir. İkinci tip gevrek kırılma ise kesme etkisiyle oluşur ve bu davranış doğrudan kesit boyutları ve enine donatı düzeniyle ilişkilidir. Tez çalışmasında hazırlanan sayısal modellerde beton basınç dayanımının aşılmaması amacıyla incelenen deneysel duruma da uygun olarak 49 MPa dayanım dikkate alınmıştır. Bu sayede kısaltma ve genişletme durumlarında beton basınç ezilmesi şeklinde bir kapasite hali oluşmamıştır. Böylece betonarme perdelerde sıkça gevrek hasara neden olan kesme etkisiyle yük kapasitesine ulaşılmış ve bu durum incelenmiştir. Boyutların değiştirilmesiyle bu ani göçme halini oluşturan sınır durumlar belirlenmiş ve TBDY 2018 kurallarıyla kıyaslanmıştır.

Deneysel durumun incelenmesi aşamasından sonra, perde genişliği ve kalınlığı sabit tutularak perde yüksekliği 900 mm arayla azaltılarak 11 adet sayısal model oluşturulmuştur. Böylece kesme etkisi altında gevrek davranış oluşturan sınır boyutlar belirlenmiştir. Perde başlık kısımlarının yeterince büyük kesitlerle desteklenmiş olması nedeniyle beton basınç ezilmesi beklenmemektedir. Oluşacak gevrek hasarın ilk kesme çatlağının oluştuğu anda boyuna donatıların çekme altında henüz akmamış olması şeklinde gerçekleşeceği ön görülmüştür. Perde kısaltma durumlarını gösteren yük deplasman grafikleri incelendiğinde modellerde kısaltma arttıkça perde yük taşıma kapasitesinin de arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.23-5.25). Kısaltma 6 modeline kadar kuvvet deplasman eğrileri benzer şekilde sünek davranış göstermektedir. Kısaltma 6 modelinden sonraki modellerde eğrinin tepe noktası sivrileşmeye başlamış ve kapasite yükü korunamamıştır.

Şekil 5.25'te sunulan Kısaltma grafiklerine bakıldığında yük kapasitesindeki ani düşüş nedeniyle kesme kırılmasının Kısaltma 8-11 arası modellerde gerçekleştiği söylenebilir. Şekil 5.29'da verilen donatı çekme gerilmesi ve Şekil 5.33 beton basınç gerilmesi grafikleri incelendiğinde Kısaltma 8-11 arası modellerde nispeten gerilme azalması görülmektedir. Perde gövdesinde oluşan kesme hasarı nedeniyle boyuna donatılar akma seviyesini göremeden gerilme kaybına uğramıştır. Sünek davranan modellerde çekme donatısında akma durumu ortalama 50 mm tepe deplasmanı etkisiyle oluşmaktadır. Buna karşın özellikle Kısaltma 9-10 modellerinde donatı gerilme değerlerinin, 50 mm tepe deplasmanı seviyesinde, akamadan sabit bir değer sergilediği gözlemlenmektedir.

Şekil 5.34-5.45'te görüldüğü gibi yük kapasitesi anında beton çekme hasar parametresi incelendiğinde Kısaltma 1-5 modellerinde benzer şekilde yalnız eğilme etkisiyle perde uçlarında çekme hasarı oluşmaktadır. Kısaltma 6-7 modellerinde perde uçlarındaki eğilme çatlaklarına ilave olarak gövdede kesme çatlakları da oluşmuştur. Kısaltma 8 modelinde gövdede oluşan kesme çatlağının perdenin başından sonuna birleştiği ve Kısaltma 6-7 modellerinden daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Kısaltma 9 modelinde perde gövdesinin kesme etkisiyle hasar alması ile mesnet ve yükleme bölgesinde çekme altındaki boyuna donatıların akma başlangıcı neredeyse aynı anda gerçekleşmiştir (Şekil 5.28). Kısaltma 10 ve 11 modellerinde ise hasarın çoğunlukla kesme etkisiyle gövdede oluştuğu gözlenmiş ve bu esnada boyuna donatıların akma noktasına ulaşmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla Kısaltma 9, 10 ve 11 modellerinde kesme altında gevrek kırılma oluşmaktadır. Bu sonuçlar, düzlem içi narinlik oranı azaldıkça göçme modunun eğilme kontrollü sünek davranıştan, kesme kontrollü daha gevrek bir kırılma moduna doğru evrildiğini açıkça göstermektedir.

Ayrıca perde yüksekliği ve kalınlığı sabit tutularak perde genişliğinin 408 mm arayla arttırılmıştır. Böylece kesme etkisi altında gevrek davranış oluşturan sınır boyutlar perde genişlemesi durumu için de belirlenmiştir. Bu amaçla sünek davrandığı bilinen Kısaltma 5 durumu başlangıç model olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan ilave modeller için hazırlanan Şekil 5.46-5.50'de verilen kuvvet deplasman grafikleri incelendiğinde Genişletme 8 ve modelinden sonra grafiğin tepe noktasının kısaltma modelleri kadar ani düşüş olmasa da sivrildiği görülmektedir.

Şekil 5.55'te verilen boyuna donatılar için çekme gerilmesi değerleri incelendiğinde tüm modellerde benzer davranış gözlemlenmiştir. Şekil 5.60'ta verilen beton basınç gerilmeleri eğrileri incelendiğinde perde genişliği arttıkça maksimum gerilmenin gittikçe azaldığı görülmektedir. Perde genişletme modellerine bakılarak gövdede oluşan kesme hasarının perdenin beton basınç dağılımını etkilediği yorumu yapılmıştır. Şekil 5.61-5.67'de verilen kapasite yükü anında beton çekme hasar parametreleri incelendiğinde Genişletme 1-5 modelleri arasında hasarların benzer oluştuğu fakat bu modeller arasından Genişletme 3 modelinde gövde kısmında 2 adet çatlak oluşumu belirlenmiştir. Genişletme 6-16 modelleri arasında gövde kısmında kesme hasarının ön plana çıktığı görülmüştür (Şekil 5.68-5.76).

Elde edilen grafiksel değerler, değiştirilen perde boyutlarına (H ve L) göre normalize edilerek ayrıca kıyaslanmıştır. Kısaltma modelleri için Şekil 5.77 ve 5.78'de verilen kuvvet-deplasman değerlerinin perde yükleme yüksekliği / genişliği (H/L) oranıyla çarpımı incelendiğinde Kısaltma 6-11 modellerine ait eğrilerin, yatay seyreden Kısaltma 1-5 modellerine göre daha farklı davranış sergilediği, tepe noktasının gittikçe sivrildiği ve kapasite sonrası eğrinin giderek kısaldığı görülmektedir. Özellikle Kısaltma 9-11 modellerinde yük taşıma kapasitesinde ani düşüş görülmekte ve perde kısaldıkça gevreklik artmaktadır. Bu modellerin t/H oranları sırasıyla 0.035, 0.046 ve 0.068'dir. TBDY 2018 7.6.1.2(a) maddesinde t/H oranı için bahsedilen 1/16 kuralına göre sınır durum 0.0625 olarak hesaplanabilir. Ancak elde edilen sonuçlara bakıldığında TBDY 2018 7.6.1.2(a) kuralına uygun olan Kısaltma 6-10 durumlarında da kesme etkisi altında gevrek davranış oluşabileceği anlaşılmıştır. Dolayısıyla TBDY 2018 7.6.1.2(a) kuralının

kesme etkisinin önlenmesiyle ilgili olmadığı, daha çok perdenin düzlem dışı eğilmesiyle ilişkili olabileceği düşünülmüştür. Ancak bu durum bu tez çalışmasının konusu değildir. Bununla birlikte, söz konusu sınır koşulunun düzlem dışı eğilme ve kesme davranışı üzerindeki etkisi, gelecekte yapılacak üç boyutlu analiz çalışmaları kapsamında detaylı olarak incelenebilir.

Benzer şeklide genişletme modelleri için Şekil 5.79 ve 5.80'de verilen kuvvet-deplasman değerlerinin perde yükleme yüksekliği / genişliği (H/L) oranıyla çarpımı incelendiğinde, Genişletme 6-16 modellerinde yük kapasitesini gösteren tepe noktasının sivrildiği ve kapasite sonrası eğrinin giderek kısaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.68-5.76'da görülen gövdesinde kesme hasarı oluşan Genişletme 6-16'e ait analitik görseller bu durumu desteklemektedir. Genişletme 6-16 modellerinde t/L oranı 0.0312-0.0156 arasında değişmektedir (Çizelge 4.5). TBDY 2018 7.6.1.2(b) maddesinde t/L oranı için bahsedilen 1/30 kuralına göre sınır durum 0.033 olarak hesaplanabilir. Elde edilen değerlerin sınır durumun altında kalması nedeniyle TBDY 2018 7.6.1.2(b) kuralının uygunluğu bu tezde yürütülen sayısal çalışmayla teyit edilmiş ve kesme etkisi altında gevrek davranış önlenmesi için uygun bir sınır değer olduğu anlaşılmıştır.

Son olarak Şekil 5.81'de H ve L boyutlarına göre normalize edilen tüm kısaltma ve genişletme durumları birlikte sunulmuştur. Şekilde kesikli çizgilerle gösterilen orta bant kısmı sünek davranışı sergileyen durumları temsil etmektedir. Bununla birlikte Şekil 5.77'e bakılarak düzlem içi yükler altında ideal bir sünek davranışın H/L oranının kabaca dörtten büyük olduğu durumlarda gerçekleştiği görülmektedir. Ancak tasarım aşamasında perde boyutlarına karar verilirken düzlem dışı davranışın da dikkate alınarak gereklidir. Bu bağlamda sonraki çalışmalarda incelenmek üzere perdenin düzlemine dik yükler altında (t/H)>1/16 olması kuralının ayrıca değerlendirilmesi önerilir. Beton dayanımındaki değişim ve kısa perdelerde farklı donatı düzenleri de düzlem içi ve düzlem dışı yükler altında bakılması gereken diğer durumlar olarak söylenebilir.

7. KAYNAKLAR

ABAQUS Tutorials, 2024, Online Documentation Dassault Sytstems Simulia User Assistance. Dassault Systems.

ACI Committee 318 2019 ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute, Michigan, 623 s.

Adebar, P., Ibrahim, A. M., & Bryson, M. 2007. Test of high-rise core wall: effective stiffness for seismic analysis. ACI Structural Journal, 104(5), 549-559.

Al-Wawi, A. 2022. Comparing ACI, BS and Europe Code using lateral forces on shear walls effect. Yüksek lisans tezi, Altınbaş Üniversitesi, İstanbul, 140 s.

Bastami, M., Salehi, M., Ghorbani, M. ve Moghadam, A. S. 2023. Performance of special RC shear walls under lateral cyclic and axial loads. Engineering Structures, 295, 116813.

Bikçe, M. Emsen, E. Erdem, M. M. Bayrak O. F. 2021. An investigation on behavior of RC frames with non-interacting infill wall. Engineering Structures, 245: 1-16.

Carreira, D. J., & Chu, K. H. 1985. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. In Journal proceedings (Vol. 82, No. 6, 797-804).

Celep, Z. 2022. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. 8. Baskı, Beta Yayınları, İstanbul, 764 s.

Christidis, K. I. ve Karagiannaki, D. 2021. Evaluation of flexural and shear deformations in medium rise RC shear walls. Journal of Building Engineering, 42, 102470.

Çınar, T. 2022. Betonarme perdelerin plastik mafsal boyunu etkileyen değişkenlerin sonlu elemanlar ile incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 79 s.

Düzgünlü, O. 2019. Çelik levhalarla kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin analitik olarak modellenmesi. Yüksek Lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 47 s.

Elkady, A. 2023. ABAQUS_CDP_Generator: A tool for generating concrete damage parameters for ABAQUS. Zenodo, Version v23.04.

Epackachi, S. ve Whittaker, A. S. 2018. A validated numerical model for predicting the in-plane seismic response of lightly reinforced, low-aspect ratio reinforced concrete shear walls. Engineering Structures, 168, 589–611.

Ergünay, O. 2007. Türkiye'nin afet profili. TMMOB afet sempozyumu bildiriler kitabı, 5(7), 1-14. Ankara.

Ersoy, U., Özcebe, G. ve Canbay, E. 2019. Betonarme - Cilt 1: Davranış ve Hesap İlkeleri. 10. Baskı, Evrim Yayınevi, Ankara, 484 s.

Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN 1992-1-1). European Committee for Standardization, Brüksel, 225 s.

Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1). European Committee for Standardization, Brüksel, 229 s.

Ganesan, N., Indira, P.V. ve Santhakumar, A.R. 2015. High-performance fiber reinforced concrete shear walls under reverse cyclic loading. Indian Concrete J., 89(6): 35–44.

Gregori, J. N., Sosa, P. M., Prada, M. F. ve Filippou, F. C. 2007. A 3D numerical model for reinforced and prestressed concrete elements subjected to combined axial, bending, shear and torsion loading. Engineering Structures, 29(12), 3404–3419.

Guan, M., Zhang, J. ve Wang, Y. 2023. Cyclic behavior of self-slitting squat composite shear walls with concrete-filled steel tubes: Experiment. Structures, 53: 1142–1155.

Gulec, C.K. ve Whittaker, A.S. 2008. Performance-based assessment and design of squat reinforced concrete shear walls. ACI Struct. J., 105(4): 494–504.

Habib, A., Wang, Z. ve Xu, J. 2025. Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls: A state-of-the-art review. Smart Struct. Syst., 19(3): 417–433.

Habibi, M., Kheyroddin, A. ve Shariatmadar, H. 2018. Effects of alkali-silica reaction on seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls. ACI Struct. J., 115(5): 1401–1411.

Hung, C. C. ve Hsieh, P. L. 2020. Comparative study on shear failure behavior of squat high-strength steel reinforced concrete shear walls with various high-strength concrete materials. Structures, 23, 56–68.

Ibrahim, A. M. 2000. Linear and nonlinear flexural stiffness models for concrete walls in high-rise buildings. Doktora Tezi, University of British Columbia, Kanada, Vancouver, 153 s.

Jin, L., Zhang, B., Chen, F., Yu, W., Lei, Y., Miao, L. ve Du, X. 2022. Numerical investigations on the strain-rate-dependent mechanical behavior and size effect of RC shear walls. International Journal of Impact Engineering, 167, 104279.

Jin, M., Zhou, J. ve Liu, Y. 2023. Failure mechanisms of squat RC walls under seismic loading with high axial force ratios. Eng. Struct., 276: 115248.

Kaya, I. E. 2022. Farklı geometrik özelliklere sahip gazbeton duvar numuneleri için yapılan diyagonal kayma deneylerinin sayısal olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 62s.

Kaya, Ö. 2023. ASTM E-519 diyagonal kayma deneyinde gazbeton dizilim etkisinin sayısal olarak incelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 63 s.

Kazaz, İ., Gülkan, P. ve Yakut, A. 2012. Performance limits for structural walls: An analytical perspective. Engineering Structures, 43, 105–119.

Lale, E. 2011. Betonarme elemanların plastisite ve hasar mekaniği esasları kullanılarak doğrusal olmayan analizi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 134 s.

Le Nguyen, K., Brun, M., Limam, A., Ferrier, E. ve Michel, L. 2014. Pushover experiment and numerical analyses on CFRP-retrofit concrete shear walls with different aspect ratios. Composite Structures, 113, 403–418.

Li, B., Qian, K. ve Wu, H. 2016. Flange effects on seismic performance of reinforced concrete squat walls with irregular or regular openings. Engineering Structures, 110, 127–144.

Li, Y., Zhang, W. ve Xu, G. 2023. Seismic behavior of squat UHPC shear walls under cyclic loading. Eng. Struct., 280: 115700.

Liang, K. ve Su, R. K. L. 2023. Experimental and theoretical study on seismic behavior of non-seismically designed shear walls with moderate shear span-to-length ratios. Journal of Building Engineering, 76, 107213.

Lu, X., Xie, L., Guan, H., Huang, Y. ve Lu, X. 2015. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees. Finite Elements in Analysis and Design, 98, 14–25.

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Onate, E. 1989. A plastic-damage model for concrete. International Journal of solids and structures, 25(3), 299-326.

Massone, L. M. 2010. Strength prediction of squat structural walls via calibration of a shear–flexure interaction model. Engineering Structures, 32(4), 922–932.

Massone, L. M., López, C. N. ve Kolozvari, K. 2021. Formulation of an efficient shear-flexure interaction model for planar reinforced concrete walls. Engineering Structures, 243, 112680.

Peng, X. N. ve Wong, Y. L. 2011. Behavior of reinforced concrete walls subjected to monotonic pure torsion—An experimental study. Engineering Structures, 33(9), 2495–2508.

Pizarro Pohl, D., Kovarbasic, M., & Stojadinovic, B. 2022. Experimental investigation of the sliding failure mode in full-scale squat reinforced concrete shear wall specimen (Conference paper). ETH Research Collection.

Shen, J., Huang, Z. ve Song, X. 2024. Strength calculation method and numerical simulation of slender concrete shear walls with CFRP grid-steel reinforcement. Structures, 65, 106784.

Sivaguru, V., Palanisamy, V. ve Gopalakrishnan, N. 2021. Experimental study on squat reinforced concrete shear walls with openings under cyclic loading. ACI Struct. J., 118(5): 69–80.

Susam, N. H. 2019. TBDY 2018'e göre betonarme binalardaki deprem perdeleri boyutlarının belirlenmesi için bir yöntem. Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 97 s.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

TDY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

Tong, X., Wang, Y. ve Liu, Q. 2019. Study on shear capacity of ultra-high performance concrete squat shear walls. Eng. Struct., 197: 109375.

TS500-2000. 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Wenlong, H., Xudong, Z. ve Zhenhua, L. 2019. Experimental seismic behavior of squat shear walls with precast concrete hollow moulds. Constr. Build. Mater., 229: 116946.

Yang, K.-H., Youm, K.-S. ve Cho, J.-Y. 2016. Cyclic tests on slip resistance of squat heavyweight concrete shear walls with construction joints. Eng. Struct., 127: 414–426.

Yang, W., Zhang, L. ve Zhao, C. 2017. Seismic behaviors of squat reinforced concrete shear walls under freeze-thaw cycles: A pilot experimental study. Cold Reg. Sci. Technol., 134: 38–46.

Yıldırım, A. 2021. Betonarme perde duvarlı çerçevede tasarım donatı oranlarının belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 157 s.

8. EKLER

EK-1. Beton malzemesi için CDP basınç değerleri

Concrete Compression Curve		Compression Damage	
Stress	**Strain**	**Damage Parameter**	**Inelastic Strain**
19.6	0	0	0
19.6770328154758	2.9085511459373e-08	0.00477158917915277	0.000664373901384487
22.8985454348776	1.97902281141751e-06	0.17707721280298	0.00160755268916136
26.0699098724727	5.61093837086275e-06	0.380512420461497	0.00260189195380223
29.1684275272326	1.1686146998739e-05	0.527115677228205	0.00350282972276311
32.1664146422576	2.11331664511964e-05	0.626290826833128	0.00432582091278964
35.0315409076809	3.50363606345487e-05	0.694781759048036	0.00509838357180459
37.7276294939496	5.46091063575505e-05	0.743830187642937	0.00583899309724984
40.2159676398147	8.11498359948122e-05	0.780226755174037	0.00655880969322582
42.457121674779	0.000115981161335604	0.808090476488285	0.0072646028290433
44.413174284412	0.000160374835337514	0.829995324796408	0.00796060274744337
46.0502156987946	0.000215468197256594	0.847606464163313	0.00864954609236969
47.3408425870847	0.000282180359312938	0.862037705089951	0.00933326337579767
48.266371000385	0.000361137984223209	0.874057059648956	0.010013016801033
48.818472078555	0.00045262042332534	0.884208656805403	0.0106897006266465
49	0.000556531947006541	0.892887383746148	0.0113639638371142
48.7661921302215	0.000664373901384487	0.900385985748219	0.0120362875499468
40.323216572654	0.00160755268916136	0.906925627354629	0.0127070352420049
30.3548913973866	0.00260189195380223	0.912676232773202	0.0133764861782957
23.171331815818	0.00350282972276311	0.917770339519173	0.0140448581799913
18.3117494851768	0.00432582091278964	0.92231273329214	0.0147123234590412
14.9556938066462	0.00509838357180459	0.926387277096466	0.0153790198416142
12.5523208054961	0.00583899309724984	0.930061835849866	0.0160450588615342
10.7688889964722	0.00655880969322582	0.933391883866642	0.0167105316890647
9.40356665207405	0.0072646028290433	0.936423185728542	0.0173755135368338
8.33022908497601	0.00796060274744337	0.939193814960388	0.018040066977463
7.46728325599765	0.00864954609236969	0.941735692590752	0.0187042444721431
6.7601524505924	0.00933326337579767	0.944075772945891	0.0193680903194482
6.17120407720114	0.010013016801033	0.946236967036259	0.0200316421728921
5.67377581653525	0.0106897006266465	0.948238868510524	0.0206949322340102
5.24851819643875	0.0113639638371142	0.950098329481318	0.0213579881987115

EK-2. Beton malzemesi için CDP çekme değerleri

Concrete Tension Curve		Tension Damage	
Stress	**Strain**	**Damage Parameter**	**Inelastic Strain**
4.084655	0	0.319224166666667	0
4.4931205	1.37e-05	0.251146583333333	1.37e-05
3.49300042087012	5.3015e-05	0.417833263188313	5.3015e-05
2.37419665430431	9.233e-05	0.604300557615948	9.233e-05
1.77371692505286	0.000131645	0.704380512491191	0.000131645
1.41472847862502	0.00017096	0.764211920229164	0.00017096
1.17963761126053	0.000210275	0.803393731456578	0.000210275
1.01480180275266	0.00024959	0.830866366207891	0.00024959
0.893136402307623	0.000288905	0.851143932948729	0.000288905
0.799721548844212	0.00032822	0.866713075192631	0.00032822
0.725737607711374	0.000367535	0.879043732048104	0.000367535
0.665664651702076	0.00040685	0.889055891382987	0.00040685
0.615882705233044	0.000446165	0.897352882461159	0.000446165

EK-3. C25 dayanımlı beton malzemesi için CDP basınç değerleri

Concrete Compression Curve		Compression Damage	
Stress	**Strain**	**Damage Parameter**	**Inelastic Strain**
7.5	0	0	0
9.90581728488407	3.09360033487425e-05	0.00343890864782048	0.00145443375429397
13.6149675991851	9.21152890887174e-05	0.015879239679124	0.00166336300562288
16.6498944949196	0.000178074001436303	0.0364611232410743	0.00187977211016839
19.1008753450822	0.000285494217167769	0.0644308296657956	0.00210296859714446
21.0427588315551	0.000411625056725527	0.0991248826294991	0.00233234291382805
22.5381259062029	0.000554166510852922	0.139956942864438	0.00256735637528882
23.6397042170585	0.000711180704286873	0.186406914652598	0.00280753115624533
24.3922339065088	0.000881023322925916	0.238011847702564	0.00305244193238587
24.8339249160193	0.00106229005417254	0.294358298420748	0.00330170886247232
24.9976064644608	0.00125377434067916	0.309435018943798	0.00336556023247526
24.9116419794153	0.00145443375429397	0.388101349503751	0.00373866634221863
24.6006634800072	0.00166336300562288	0.450468043449933	0.00409679755756734
24.0861656544282	0.00187977211016839	0.50094191217083	0.00444400252921975
23.3869899402965	0.00210296859714446	0.542530465574237	0.00478304433369883
22.5197216576527	0.00233234291382805	0.577344588693199	0.0051158622952483
21.4990178847665	0.00256735637528882	0.606901988909598	0.00544385077058326
20.3378797697208	0.00280753115624533	0.632316990402148	0.00576803351791948
19.0478799617129	0.00305244193238587	0.654422938257244	0.00608917615277089
17.6393535609906	0.00330170886247232	0.673853282796501	0.00640786064220189
17.2624716345808	0.00336556023247526	0.691096575450419	0.00672453583094755
15.2960016612399	0.00373866634221863	0.706534560878641	0.00703955243762202
13.7369835894837	0.00409679755756734	0.720469061074401	0.007353187753835
12.4752576824599	0.00444400252921975	0.733141272850354	0.00766566337328725
11.4356433910553	0.00478304433369883	0.744745833402423	0.00797715811416492
10.5653736419222	0.0051158622952483	0.755441216319673	0.00828781757022059
9.82650938320011	0.00544385077058326	0.765357513913625	0.00859776126059895
9.19119517759567	0.00576803351791948	0.77460233150532	0.00890708804506951
8.63859939259008	0.00608917615277089	0.783265300075118	0.00921588026991381
8.15288728632884	0.00640786064220189	0.791421565709873	0.00952420697377003
7.72184624241468	0.00672453583094755	0.799134512877454	0.0098321263895752
7.33593355807589	0.00703955243762202	0.806457908080892	0.0101396879139953
6.98760440590334	0.007353187753835	0.813437600818397	0.0104469336701407
6.67082944289377	0.00766566337328725	0.820112883405894	0.0107538997568704
6.38074320502013	0.00797715811416492	0.826517585723423	0.0110606172545632
6.11338423186801	0.00828781757022059	0.832680962374251	0.0113671130401737
5.86550052702992	0.00859776126059895	0.838628416081511	0.0116734104518355
5.634402215037	0.00890708804506951	0.844382091000766	0.0119795298339525
5.41784873591519	0.00921588026991381	0.849961362026388	0.0122854889867374
5.213961617358	0.00952420697377003	0.855383240429349	0.0125913035388813
5.02115639938161	0.0098321263895752	0.860662711794734	0.0128969872580256
4.83808904810236	0.0101396879139953	0.865813018877147	0.013202552310629
4.66361343580735	0.0104469336701407	0.870845899405547	0.013508009480444
4.49674734864603	0.0107538997568704	0.875771786858643	0.0138133683529755
4.33664512059042	0.0110606172545632	0.880599980659703	0.014118637471842
4.18257545658079	0.0113671130401737	0.885338791002586	0.014423824471832
4.03390334934109	0.0116734104518355	0.889995662542031	0.0147289361925408
3.89007524798512	0.0119795298339525	0.894577280402587	0.0150339787757638
3.75060682652807	0.0122854889867374	0.899089661337925	0.0153389577492471
3.61507284391267	0.0125913035388813	0.903538232371928	0.0156438780989366
3.48309869638039	0.0128969872580256	0.907927898848958	0.0159487443314983
3.35435334676311	0.013202552310629	0.912263103493069	0.0162535605285766
3.22854337993153	0.013508009480444	0.916547877809041	0.0165583303940184
3.10540798389081	0.0138133683529755	0.920785886939778	0.0168630572950846
2.98471469531775	0.014118637471842	0.924980468915394	0.017167744298509
2.86625577925664	0.014423824471832	0.929134669081447	0.0174723942021289
2.74984513715805	0.0147289361925408	0.933251270371561	0.0177770095626966
2.63531565690934	0.0150339787757638	0.937332819988104	0.0180815927203925
2.52251693407002	0.0153389577492471	0.94138165296999	0.0183861458204766

EK-4. C25 dayanımlı beton malzemesi için CDP çekme değerleri

Concrete Tension Curve		Tension Damage	
Stress	**Strain**	**Damage Parameter**	**Inelastic Strain**
2.55	0	0	0
1.80584951167086	0.000526360926622505	0.291823720913388	0.000526360926622505
1.30263480988752	0.00105272185324501	0.489162819651954	0.00105272185324501
0.973458715904244	0.00157908277986752	0.61825148395912	0.00157908277986752
0.761462369927695	0.00210544370649002	0.701387305910708	0.00210544370649002
0.623732194921155	0.00263180463311253	0.755399139246606	0.00263180463311253
0.530413367028338	0.00315816555973503	0.791994758028103	0.00315816555973503
0.462118052397194	0.00368452648635754	0.818777234354042	0.00368452648635754
0.407099332270393	0.00421088741298004	0.840353203031219	0.00421088741298004
0.358802654306389	0.00473724833960255	0.859293076742592	0.00473724833960255
0.313974835785801	0.00526360926622505	0.876872613417333	0.00526360926622505
0.271312426263714	0.00578997019284756	0.893602970092661	0.00578997019284756

ÖZGEÇMİŞ

Yaşar Enes MUT

enesmut837@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2022-2025	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2016-2021	Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

İnşaat Mühendisi	Antalya/Alanya