

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**DERİN BETONARME KİRİŞLERİN ELASTİK ÖTESİ DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gökhan KARAMAN

İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Erkan POLAT

TUNCELİ – 2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DERİN BETONARME KİRİŞLERİN ELASTİK ÖTESİ DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ**

Gökhan KARAMAN
(200150022)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Erkan POLAT

TUNCELİ – 2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DERİN BETONARME KİRİŞLERİN ELASTİK ÖTESİ DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ**

Gökhan KARAMAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 21/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza	İmza	İmza
Doç. Dr. Erkan POLAT (Munzur Üniversitesi)	Doç. Dr. Burak YÖN (Munzur Üniversitesi)	Dr. Öğr. Üyesi Ercan Şerif KAYA (Alaaddin Keykubat Üniversitesi)
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

TEŐEKKÖR

Çalışmam boyunca tecrübeleri, bilgi aktarımı ve rehberliğiyle şahsıma yardımcı olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Erkan POLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatımın her aşamasında beni destekleyen, hayatımın en değerli parçaları annem Ayře KARAMAN'a ve babam Fahri KARAMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Gökhan KARAMAN

Tunceli-2023



ÖZET

Betonarme derin kirişler, yapı mühendisliği uygulamalarında önemli ölçüde ilgi gören bir konudur. Literatürde, Kong ve ark. (1970)'nin deneysel çalışmaları ve son yıllarda çok sayıda deneysel çalışma ile ifade edilen kesme dayanımının baskın olduğu betonarme derin kirişlerin davranışını incelemeye güçlü bir ilgi vardır. Derin kirişler transfer kirişleri, temel kazık başlıkları ve temel duvarları gibi yük dağıtım elemanları olarak birçok yapıda kullanılmaktadır. Derin kirişlerde kompleks gerilme dağılımı olması nedeniyle geleneksel kirişlerden farklı tasarım kriterleri gerektirmektedir. Literatürde derin kiriş tasarımı ve analizi için basınç ve çekme çubuk yöntemi (STM) ya da sonlu elemanlar analizi kullanılmaktadır. Ancak incelen yönetmeliklerde net bir çözüm yönteminin bulunmadığı ve ortak bir çözüm yönteminin kullanılmadığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada; Rogowski ve ark., (1983) tarafından test edilmiş tek ve çift açıklıklı derin kirişlerin kompleks sonlu elemanlar yöntemiyle birebir modellenmesinin yapılarak kompleks ve doğrusal olmayan elastik ötesi davranışının simüle edilmesi amaçlanmış, test verileriyle doğrulanmış sayısal modellerin elde edilmesi neticesinde deneysel olarak ölçülmesi maliyetli, zor veya mümkün olmayan verilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, dört farklı beton malzeme modeli kullanılarak derin kirişlerin davranışı incelenmiş ve uygun malzeme modelinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel olarak doğrulanmış sayısal modeller, farklı geometri ve malzeme parametrelerine sahip kirişlerin modellenmesinde referans alınabileceği gibi teknik altyapı, yüksek maliyet ve zaman gerektiren deneysel çalışmalar için uygun bir alternatif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Derin kiriş, sonlu elemanlar, modelleme, doğrusal olmayan analiz,

ABSTRACT

Modeling Of Inelastic Behavior of Deep Reinforced Concrete Beams

Reinforced concrete deep beams are a subject of considerable interest in structural engineering applications. In the literature, there is a strong interest in examining the behavior of reinforced concrete deep beams in which shear strength predominates, as expressed by the experimental work of Kong et.al. (1970) and by numerous experimental studies in recent years. Deep beams are used in many structures as load distribution elements such as transfer beams, foundation pile caps and foundation walls. Due to the complex stress distribution in deep beams, it requires different design criteria than conventional beams. Strut and Tie Methods (STM) or finite element analysis are used in the literature for deep beam design and analysis. However, it is observed that there is no clear solution method in the examined regulations and a common solution method is not used. In this study, it was aimed to simulate the complex and nonlinear inelastic behavior of single and double span deep beams tested by Rogowski et al., (1983) by performing one-to-one modeling with the complex finite element method, as a result of the study data that are costly, difficult or impossible to obtain experimentally could be measured. Within the scope of the study, the behavior of deep beams was investigated by using four different concrete material models and it was aimed to determine the appropriate material model. Experimentally validated numerical models can be used as a reference for modeling beams with different geometry and material parameters, as well as providing a suitable alternative for experimental studies that require technical infrastructure, high cost and time.

Keywords: Deep beam, finite element, modelling, nonlinear analysis,

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLOLAR LİSTESİ.....	IV
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VI
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Kapsamı.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	1
1.3. Yöntem ve Kaynaklar.....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Derin Kiriş.....	3
2.2. Yönetmenliğe Göre Derin Kiriş Tasarımları.....	6
2.2.1. ACI 318-14 yönetmenliğinde derin kirişler (ACI 318-14, 2014).....	7
2.2.2. EN 1992-1:2004 yönetmenliğinde derin kirişler; (EN 1992-1-1, 2004).....	8
2.2.3. CSA A23.3-04 yönetmenliğinde derin kirişler; (CSA Standard A23.3-04, 2004).....	8
2.2.4. BS 8110 yönetmenliğinde derin kirişler; (BS 8110-1:1997, 1997).....	8
2.2.5. TS500 yönetmenliğine göre derin kirişler (TS 500, 2000).....	8
2.3. Derin Kiriş Davranışları.....	10
2.4. Derin Kiriş ile Alakalı Yapılan Bazı Çalışmalar.....	11
2.5. Derin Kiriş Çözüm Yöntemleri.....	15
2.5.1. Strut and tie modeli (Basınç ve çekme metodu).....	15
2.5.1.1. ACI 318-14 Yönetmenliğinde STM yönetmenliği:.....	19
2.5.2. Sonlu elemanlar modeli (Finite element metot (FEM)).....	22
3. REFERANS KİRİŞ MODELİ.....	24
3.1. Betonarme Derin Kirişlerin Testi (Rogowski ve ark., 1983).....	24
3.2. Kiriş Detayları.....	26
3.3. Test Kurulumu ve Prosedürü.....	27
3.4. DeneySEL Sonuçlar.....	28
4. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ.....	30
4.1. Eleman modelleri ve Yakınsama Çalışması.....	30
4.2. Malzeme Modelleri.....	31
4.2.1. Çelik malzeme modelleri.....	32
4.2.1.1. Mat003 plastic kinematic.....	32
4.2.2. Beton malzeme modelleri.....	32
4.2.2.1. Mat084/085 winfrith concrete.....	33
4.2.2.2. Mat 159 CSCM concrete.....	33
4.2.2.3. Mat 072R3 concrete damage rel3.....	34
4.2.2.4. Mat 16 pseudo tensor.....	35
4.3. Derin Kiriş Modelleri Donatı Detayları.....	36
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	38
6. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI.....	40
6.1. BM1/1.0 Modeli.....	40
6.1.1. Minimum asal gerilme dağılımları.....	43
6.1.2. Kesme donatıları, eksenel kuvvet talepleri.....	50

6.1.3. Boyuna donatılar, eksenel kuvvet talepleri	53
6.2. BM3/1.0 Modeli	56
6.2.1. Minimum asal gerilme dağılımları	58
6.2.2. Kesme donatıları, eksenel kuvvet talepleri.....	65
6.2.3. Boyuna donatılar, eksenel kuvvet talepleri	70
6.3. Açıklık/Derinlik Oranı 1,0 Olan Diğer Kirişler.....	72
7. TARTIŞMA.....	77
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	78
9. KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ	84



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tek açıklıklı derin kirişin kolondan gelen yükü mesnetlere aktarması (URL-1, 2022)	4
Şekil 2.2. Birden çok açıklıklı derin kirişin kolondan gelen yükü mesnetlere aktarması (URL-1, 2022).....	4
Şekil 2.3. Yüksek katlı bir binada derin kiriş uygulaması (Al-Baijat ve Alhawamdeh, 2019).	5
Şekil 2.4. Derin kiriş uygulaması ile yüklerin kolonlara aktarılması (Yılmaz, 2016'dan akt. I.M Boyan ve ark., 2013).....	5
Şekil 2.5. Köprülerde tek açıklıklı derin kiriş uygulaması (Orijinal).....	6
Şekil 2.6. Köprülerde birden çok açıklıklı derin kiriş uygulaması (Al-Baijat ve Alhawamdeh, 2019).	6
Şekil 2.7. Derin kiriş boyutlarının şekil üzerinde gösterimi	7
Şekil 2.8. Derin kirişte oluşan basınç ve gergi çubukları (Abuwarda, 2019).....	11
Şekil 2.9. Derin kirişte oluşan kırılma türleri (Abuwarda, 2019)	11
Şekil 2.10. Derin kiriş gösterimleri (Owatsiriwong, 2013).....	16
Şekil 2.11. Düğüm bölgesi adlandırılması (Min., 2021)	17
Şekil 2.12. Gerilme düzensizlikleri gösterimi (Nilson ve ark., 2010).....	18
Şekil 2.13. Yükleme düzensizlikleri gösterimi (Nilson ve ark., 2010)	18
Şekil 2.14. D ve B bölgelerindeki gerilme akışları (Benmokrane ve ark., 2015)	19
Şekil 2.15. Şişe şekilli basınç çubuğu	21
Şekil 2.16. Basınç çubuğu (strut) üzerindeki enine ve boyuna donatılar	21
Şekil 2.17. Yaklaşım metodu ile sonsuz noktadan sınırlı nokta oluşumu	23
Şekil 3.1. Test edilen derin kirişler ve donatı detayları: a) BM1/1,0; b) BM2/1,0; c) BM3/1,0; d) BM4/1,0; e) BM5/1,0; f) BM6/1,0; g) BM7/1,0	25
Şekil 3.2. Tipik tek açıklıklı deneysel kiriş ölçülendirmeleri	26
Şekil 3.3. Tipik iki açıklıklı deneysel kiriş ölçülendirmeleri	26
Şekil 4.1. BM1 kirişi için a) 50 mm ve b) 25 mm mesh boyutlarına sahip sonlu eleman modelleri.	30
Şekil 4.2. BM1/1,0 kirişi 25 mm 50 mm DYNA analizi sonuçlarının referans veri sonucuna göre karşılaştırılması	31
Şekil 4.3. Plastic kinematic malzeme modeli birim şekil değiştirme-gerilme eğrisi	32
Şekil 4.4. Modellenen kirişlerde donatılar: a) BM1/1,0; b) BM2/1,0; c) BM3/1,0; d) BM4/1,0; e) BM5/1,0; f) BM6/1,0; ve g) BM7/1,0.....	37
Şekil 5.1. Model üzerine yapılan deplasman uygulaması ve kesme kuvvetleri tespit lokasyonları	39
Şekil 5.2. Model analizinde kullanılan zaman-deplasman eğrisi	39
Şekil 6.1. BM1/1,0 kirişi için sonlu eleman modeli: a) Beton eleman ve b) Donatı elemanları	41
Şekil 6.2. Sehime bağlı kuvvet eğrisi	42
Şekil 6.3. Göçme durumundaki alt donatılarda oluşan kuvvetler	43
Şekil 6.4. Sehime=2,5 mm'de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	45
Şekil 6.5. Sehime=7,5 mm'de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	46
Şekil 6.6. Sehime=2,5mm'de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	46

Şekil 6.7. Sehim=7,5 mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	47
Şekil 6.8. Sehim=2,5 mm’de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	48
Şekil 6.9. Sehim=7,5 mm’de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	49
Şekil 6.10. BM1/1 Mat084/085 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm;	51
Şekil 6.11. BM1/1 Mat159 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm	51
Şekil 6.12. BM1/1 Mat072R3 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; a-2) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm	52
Şekil 6.13. BM1/1 Mat016 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; a-2) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm	52
Şekil 6.14. Mat084/085 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) 1.sıra; a-2) 2.sıra	54
Şekil 6.15. Mat159 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) 1.sıra; a-2) 2.sıra	54
Şekil 6.16. Mat072R3 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı	55
Şekil 6.17. Mat016 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) 1.sıra; a-2) 2.sıra	55
Şekil 6.18. BM1/1,0 kirişi için sonlu eleman modeli: a) Beton eleman ve b) Donatı elemanları	57
Şekil 6.19. Sehime bağlı kuvvet eğrisi	57
Şekil 6.20. Göçme durumundaki alt donatılarda oluşan kuvvetler	58
Şekil 6.21. Sehim=2,5mm’de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	61
Şekil 6.22. Sehim=7,5mm’de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	61
Şekil 6.23. Sehim=2,5mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	62
Şekil 6.24. Sehim=7.5mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	62
Şekil 6.25. Sehim=2,5mm’de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	63
Şekil 6.26. Sehim=7,5mm’de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016	64
Şekil 6.27. BM1/1,0 Mat084/085 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;	66
Şekil 6.28. BM1/1,0 Mat159 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;	67
Şekil 6.29. BM1/1,0 Mat072R3 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;	68
Şekil 6.30. BM1/1,0 Mat016 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;	69
Şekil 6.31. Alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) Mat084/85; a-2) Mat159; a-3) Mat072R3; a-4) Mat016	71

Şekil 6.32. $A/D=1,0$ olan kirişlerin Sehim-Kuvvet eğrileri: a) BM1/1,0; b) BM2/1,0; c) BM3/1,0; d) BM4/1,0; e) BM5/1,0; f) BM1/1,0; ve g) BM1/1,0..... 76



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Test kirişleri (Rogowski ve ark., 1983) beton ve donatı özellikleri	27
Tablo 3.2. Test kirişlerinde (Rogowski ve ark., 1983) kullanılan donatılar ve özellikleri .	27
Tablo 3.3. Kiriş numuneleri beton özellikleri	27
Tablo 3.4. Çatlama durumlarındaki kiriş kesme kuvvetleri.....	28
Tablo 3.5. Göçme durumunda kiriş kesme kuvvetleri	29



SEMBOLLER LİSTESİ

a	: Net kesme açıklığı, mm.
As	: Donatının alanı, mm ² .
Ac	: Betonun en kesit alanı
Ash	: Yatay donatıların toplam kesit alanı
As_{min}	: Minimum donatı alanı
Avh	: Kiriş eksenine paralel olarak yerleştirilen donatı
Bw	: Kiriş genişliği
β	: Betonun sertleşme parametresi
βs	: Sertleşme parametresi
h	: Kiriş yüksekliği, mm.
d	: Kiriş derinliği, mm.
Ec	: Betonun elastide modülü, N/mm ² .
Et	: Betonun teğet modülü.
Fc	: Betonun tek eksenli basınç dayanımı
f'c	: Betonun basınç dayanımı
fctd	: Betonun çekmeye olan katkısı
fywd	: Kesme donatısı akama dayanımı
Lb	: Mesnet genişliği, mm
P1	: Kiriş kapasite yükü, kN
ρ	: Kirişte çekme donatısı oranı
ρ'	: Kirişte basınç donatısı oranı
p_{min}	: Minimum donatı oranı

1. GİRİŞ

Betonarme yapıların tasarımı birçok kriterin sağlanması koşuluyla oluşturulabilmektedir. Zaman içindeki gelişen teknoloji ile betonarme yapıların hesabı hem daha kısa sürede hem de daha hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Derin kirişler derin ve kısa olması ile karakterize edilirler. Klasik kirişlerden farklı bir davranış gösterirler. Bu da normal kirişlerden farklı kriterlerin göz önüne alınarak betonarme yapıların tasarlanacağını bizlere göstermektedir.

1.1. Çalışmanın Kapsamı

Betonarme derin kirişler, yapı mühendisliği uygulamalarında önemli ölçüde ilgi gören bir konudur. Derin kirişler; transfer kirişleri, temel kazık başlıkları ve temel duvarları gibi yük dağıtım elemanları olarak yapılarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte derin kirişler; yüksek binalarda, açık deniz yapı ve temellerinde faydalı uygulamalara sahiptir. Derin kirişler açıklık/derinlik oranı bakımından normal kirişlerden ayrılmaktadır. Normal kirişlerin dayanımını kontrol eden eğilme dayanımının aksine derin kirişlerde kesme dayanımı eleman dayanımını kontrol etmektedir. Bu da normal kirişlerden farklı bir tasarım gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Bu elemanların tasarımında sayısal analiz veya basınç ve çekme çubukları (STM) metodu kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, sayısal yöntemler kullanılarak tek-çift açıklıklı ve farklı donatı oranlarına sahip derin kirişlerin modellenmesi ve elastik ötesi analizinin yapılması amaçlanmıştır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, üç boyutlu kompleks sonlu elemanlar yöntemi ile derin kirişlerin elastik ötesi analizi yapılarak davranışlarının modellenenbilmesi amaçlanmakta, deneysel olarak test edilmesi pahalı ve uzun süren derin kirişler için test verileriyle doğrulanmış daha ekonomik ve pratik sayısal modellerin oluşturulması ve irdelenmesi amaçlanmaktadır. Sayısal modellerin geliştirilip deneysel verilerle doğrulanması neticesinde, farklı modellere ve parametrelere sahip derin kiriş elemanlarının maliyetli deneysel çalışmalara gerek kalmaksızın incelenmesi sağlanabilecektir.

Deneysel verilerle elde edilmiş geniş kapsamlı birçok derin kiriş örneklerinin literatürde çözüm yöntemi olarak belirtilen basınç ve çekme yöntemi ya da sonlu elemanlar analizi yöntemlerinden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak derin betonarme kirişler üzerinde tutarlılığı amaçlanmaktadır ve buna bağlı olarak tutarlılığın elde edilmesi sonucunda eleman elastik davranışı, betonda oluşan çatlaklar, gerilme düzensizlikleri, elastik ötesi davranış vb. gibi davranış özelliklerinin sayısal modelleme ile elde edilmesi amaçlanmaktadır. Sayısal modelleme için kompleks sonlu elemanlar programı kullanılması ve farklı beton ve çelik malzeme modellerinin kullanılması amaçlanmaktadır.

1.3. Yöntem ve Kaynaklar

İzlenecek yöntem üç ana başlık altında toplanabilir: Literatür araştırması, sayısal modelleme ve analiz. Literatür araştırmasında, derin betonarme kirişler ile ilgili mevcut deneysel çalışmalar elde edilip deneysel veriler toplanacaktır. Sayısal modellemede, deneysel çalışması yapılan derin kirişler Ls-DYNA sonlu eleman programı ile modellenecektir. Analiz aşamasında, deneysel veriler kullanarak sayısal modellerin kalibrasyonu ve doğrulaması sağlanacaktır. Farklı malzeme modellerinin eleman davranışı üzerine etkisi irdelenecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

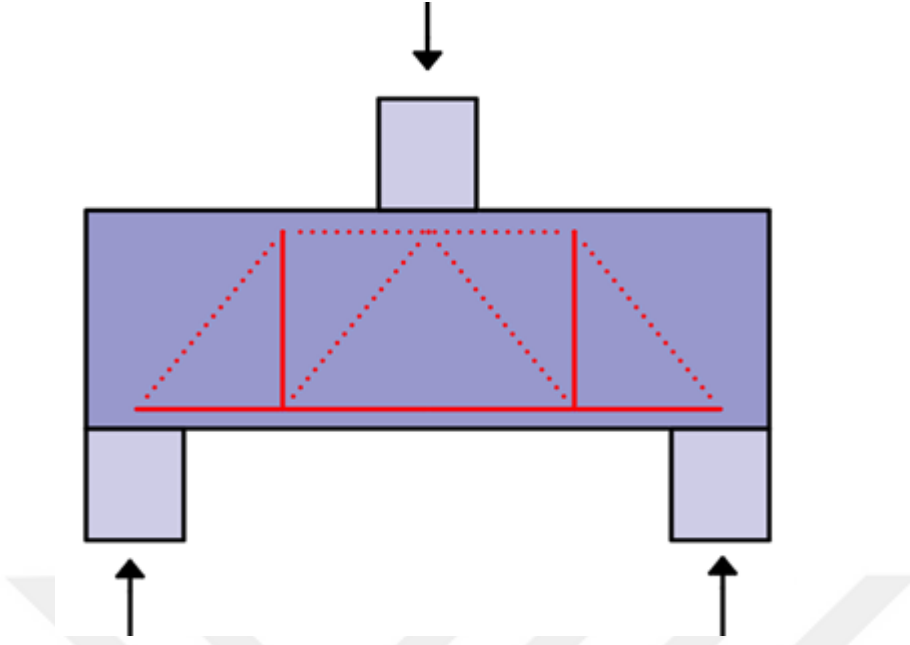
2.1. Derin Kiriş

Bir insan vücudunun ayakta durabilmesi için nasıl ki kemik ve kas sistemine ihtiyacı varsa bir yapının da güvenli bir şekilde ayakta durabilmesi için kolon ve kiriş gibi yapısal elemanlara ihtiyacı vardır. Bu yapı elemanları ne kadar sağlam ve düzgün şekilde imal edilir ve uygulanırsa yapı da o kadar sağlam ve güvenilir olur. Kirişler kolonlarla birlikte depremlerde en fazla zarar gören yapı elemanlarının başında gelmektedir. Bu yüzden kirişlerin doğru ve güvenli tasarlanması büyük önem arz etmektedir. İyi bir tasarım için ise iyi bir analiz gerekmektedir. Kirişler esas olarak maksimum eğilme momentine karşı direnç göstermek üzere tasarlanırlar. Ancak kiriş açıklık/derinlik oranının küçük olması durumunda gerilme düzensizlik durumu oluşmakta ve eğilme baskın bir durumdan kesme baskın bir kiriş davranışı oluşmaktadır.

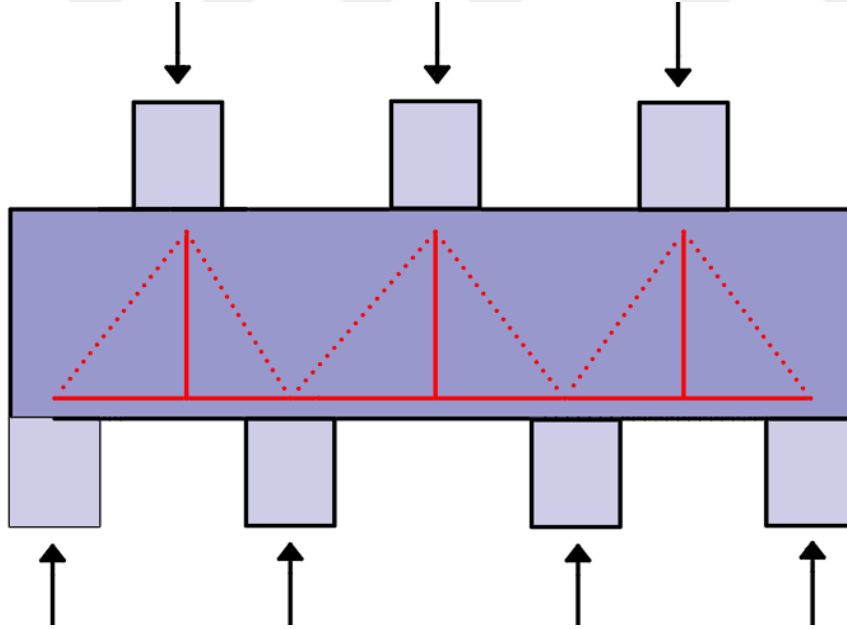
Betonarme derin kirişler, yapı mühendisliği uygulamalarında önemli ölçüde ilgi gören bir konudur. Derin kirişler, transfer kirişleri, temel kazık başlıkları ve temel duvarları gibi yük dağıtım elemanları olarak yapılarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte derin kirişler yüksek binalarda, köprülerde, açık deniz yapı ve temellerinde önemli bir yere sahiptir.

Derin kirişler genellikle betonarme yapılarda kolonlar arasına yerleştirilen çerçeveleme elemanları olarak bulunur. Aşağıda Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de yer verilen tipik bir bina çerçevesinde derin kiriş kesiti genellikle belirli bir yükseklikte kesintiye uğramış bir veya daha fazla kolondan ağır tekil yükleri aktarmak için transfer kirişleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca kazık destekli derin temellerde (kazık kapakları), ağır kolon yüklerini ana kayaya veya sabit zemin katmanlarına aktarmak için derin hasır döşemeler yakın aralıklı kazıklar üzerinde desteklenir (Portland Cement Association (PCA), 1976).

Derin kirişler, yükün önemli bir miktarının yük ve tepkiyi birleştiren bir basınç kuvveti tarafından desteklere taşındığı basit kirişler olarak yüklenen yapısal elemanlardır. Sonuç olarak gerinim dağılımı artık doğrusal olarak kabul edilmez ve kayma deformasyonları, saf eğilme ile karşılaştırıldığında önemli hale gelir.



Şekil 2.1. Tek açıklıklı derin kirişin kolondan gelen yükü mesnetlere aktarması (URL-1, 2022)



Şekil 2.2. Birden çok açıklıklı derin kirişin kolondan gelen yükü mesnetlere aktarması (URL-1, 2022)

Aşağıda gösterilen Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da derin kirişlerin daha iyi anlaşılabilir olması açısından kullanım örneklerine yer verilmiştir.



Şekil 2.3. Yüksek katlı bir binada derin kiriş uygulaması (Al-Baijat ve Alhawamdeh, 2019).



Şekil 2.4. Derin kiriş uygulaması ile yüklerin kolonlara aktarılması (Yılmaz, 2016'dan akt. I.M Boyan ve ark., 2013)



Şekil 2.5. Köprülerde tek açıklıklı derin kiriş uygulaması (Orijinal).

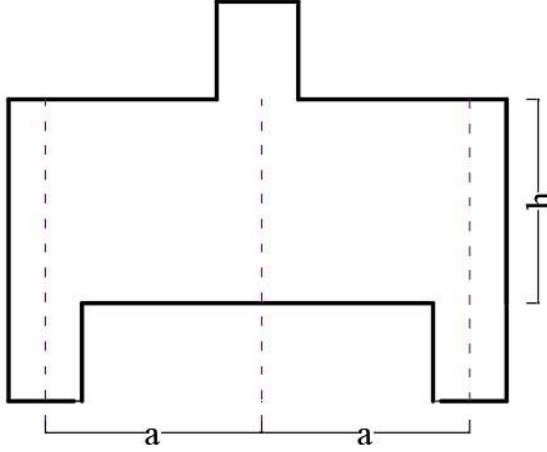


Şekil 2.6. Köprülerde birden çok açıklıklı derin kiriş uygulaması (Al-Baijat ve Alhawamdeh, 2019).

2.2. Yönetmenliğe Göre Derin Kiriş Tasarımları

Betonarme derin kirişler geleneksel kirişlerden farklı olarak kısa ve derin kiriş olarak tanımlanır. Uygulanan yükler sonucunda derin kirişler geleneksel kirişlerden farklı bir tepki

verir bu da yönetmenliklerde geleneksel kiriş için tasarlanan koşullardan farklı bir tasarım koşulları gerektirir. Aşağıdaki Şekil 2.7’de derin kiriş için kullanılan açıklık (a) ve derinlik (h) oranı şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Derin kiriş boyutlarının şekil üzerinde gösterimi

2.2.1. ACI 318-14 yönetmenliğinde derin kirişler (ACI 318-14, 2014)

Derin kirişler ACI 318 (2014)’e göre yükler ve destekler arasında basınç ve benzeri basınç elemanlarının gelişebileceği bir yüze yüklenen ve karşı yüze desteklenen elemanlar olarak tanımlanmaktadır. Derin kirişler, boyuna ve enine gerilimlerin doğrusal olmayan dağılımı dikkate alınarak tasarlanmalıdır ve buna uygun hesaplama yönteminin STM (Basınç ve çekme modeli) olduğu belirtilmektedir.

Derin kirişlerin net açıklığının ($2 \cdot a$) derinliğe oranı (h) 4 katı geçmemeli ya da uygulanan yükün tekil olması durumunda yükün mesnede olan uzaklığının (a) derinliğe oranı (h) 2’den küçük veya eşit olmalıdır.

Derin kirişlerde gerilme koşulu;

Derin kiriş kesme $V_u \leq \Phi 10 \sqrt{f'_c} b_w d$ koşulunu sağlamalıdır.

Derin kirişlerde yerleştirilecek enine ve boyuna donatı oranı:

- i) Kiriş eksenine dik olarak yerleştirilecek donatı oranı A_v , $0,0025 b_w s_1$ ’den büyük ya da eşit olmalıdır.
- ii) Kiriş eksenine paralel olarak yerleştirilecek donatı oranı A_{vh} , $0,0025 b_w s_2$ ’den büyük ya da eşit olmalıdır.

2.2.2. EN 1992-1:2004 yönetmenliğinde derin kirişler; (EN 1992-1-1, 2004)

EN 1992-1 (2004) yönetmenliğine göre açıklığın derinliğe oranı 3 ten az olan kirişler derin kiriş olarak tanımlanmaktadır. Derin kiriş için yerleştirilecek donatı kirişin her yüzü için minimum $A_{s,dbmin}$ donatı koşulu sağlanmalıdır. ($A_{s,dbmin}$ için önerilen değer $0,001A_c$ alınır ve $A_{s,dbmin}$ değeri her koşulda ve her yüzde $150mm/m^2$ den az olmamalıdır.). Yerleştirilecek donatılar için minimum donatı aralığı kiriş genişliğinin 2 katından az olmalı ve 300 mm'yi geçmemelidir. Yerleştirilecek donatıların birleştiği düğüm noktaları için bağlantının yeterince iyi yapılmasına ve düğüm noktalarında donatıların U şeklinde yeterli mesafe bırakarak dikkatli şekilde tasarlanması gerektiği belirtilmiştir.

2.2.3. CSA A23.3-04 yönetmenliğinde derin kirişler; (CSA Standard A23.3-04, 2004)

CSA A23.3 (2004) yönetmenliğine göre net açıklığın derinliğe oranı 2'den küçük olan kirişler derin kiriş olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal olmayan gerilme dağılımları, yanal burkulma ve donatıların birleşim noktalarındaki artan gerilmeler dikkate alınarak derin kirişler tasarlanır. Tasarım için STM yönteminin kullanımının gerektiği belirtilmektedir.

2.2.4. BS 8110 yönetmenliğinde derin kirişler; (BS 8110-1:1997, 1997)

BS 8110 (1997) yönetmenliğe göre net açıklığın derinliğe oranı 2'den küçük olan kirişler derin kiriş olarak tanımlanmaktadır. Derin kiriş tasarımı için ilgili yönetmenlikte uygun bir tasarım yöntemi belirtilmemiştir. Uygun tasarım modeli için konu ile alakalı kayda değer literatürlerin incelenmesi belirtilmiştir.

2.2.5. TS500 yönetmenliğine göre derin kirişler (TS 500, 2000)

Bu yönetmenliğe göre sürekli kirişler için net açıklığın derinliğe oranı 2,5'den küçük olan kirişler derin kiriş, basit kirişler için ise açıklığın derinliğe oranı 1,5'den küçük olan kirişler derin kiriş olarak tanımlanmaktadır. Bu kirişlerin tasarım yapılırken doğrusal olmayan birim şekil değiştirme ve yanal burkulma göz önüne alınarak yapılmalıdır.

TS500’de yer almayan çekme ve basınç yöntemi (STM) yerine derin kirişlerin de içinde yer aldığı bir yüzünden mesnetlenip diğer yüzünden yüklenen ve net açıklığı faydalı yüksekliğinin 5 katından küçük olan kirişler için aşağıdaki özel koşullar belirtilmiştir:

- i) Tasarım kesme kuvveti, düzgün yayılı yük taşıyan kirişler için mesnet yüzünden $0,15l_n$ kadar, tekil yüklü kirişlerde ise $0,15a$ kadar mesafede hesaplanır ancak bu mesafe kiriş faydalı yüksekliğini geçemez. Hesaplanan tasarım kuvveti için aşağıdaki sınır koşulları sağlanmalıdır aksi takdirde kesit büyütülmelidir.

$$(l_n/d) < 2 \text{ ise, } V_d \leq 0,20f_{cd}b_wd \quad (2.2.5.1)$$

$$(2 \leq l_n/d \leq 5) \text{ ise, } V_d \leq 0,017f_{cd}b_wd(10+l_nd) \quad (2.2.5.2)$$

- ii) Tasarım kesme kuvveti Denklem 2.2.5.2’de verilen çatlama dayanımından büyük olması durumunda, kiriş eksenine dik ve paralel olarak yerleştirilecek kesme donatısı aşağıdaki bağıntıyı sağlamalıdır.

$$V_w = \frac{d}{12} \left[\left(1 + \frac{l_n}{d} \right) \frac{A_v f_{ywd}}{s} + \frac{A_{vh} f_{yd}}{s_h} \left(11 - \frac{l_n}{d} \right) \right] \quad (2.2.5.3)$$

- iii) Betonun kesme dayanıma olan katkısı V_c ;

$$V_c = 0,8V_{cr} \quad (V_{cr} = 0,65f_{ctd}b_wd(1 + \gamma \frac{N_d}{A_c})) \quad (2.2.5.4)$$

- iv) Hesaplanan kesme donatısı aşağıda verilenlerden az olamaz

$$\frac{A_v}{s} \geq 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} b_w$$

$$\frac{A_{sh}}{s_h} \geq 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} b_w$$

- v) Kiriş eksenine dik ve paralel kesme donatısı aralığı, $d/5$ ’ten ve 400 mm’den fazla olamaz.

Kiriş eksenine dik ve yatay olarak yerleştirilecek kesme donatılarının aralığı, $d/5$ ’ten ve 400 mm’den fazla olamaz.

Tasarım kesme kuvveti hesabı; düzgün yayılı yükler için mesnet yüzünden $0,15l_n$, tekil yüklü kirişlerde ise $0,5a$ kadar uzakta hesaplanır. Ancak bu uzaklık hiçbir zaman kiriş faydalı yüksekliğini geçemez.

Derin kirişlerde donatı hesabı yapılırken faydalı yükseklik değeri kullanılarak hesaplanan çekme donatısı oranı ρ , aşağıdaki, koşulu sağlamalıdır.

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} \geq \rho_{min} = 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}}$$

Betonun kesme dayanıma katkısı $V_c = 0,8V_{cr}$ formülünden hesaplanır.

Sonuç olarak bu 5 yönetmenlik değerlendirildiğinde bu 5 yönetmenlik için ortak bir derin kiriş tanımı yapılamamaktadır ve çözüm modeli olarak ortak bir çözüm yöntemi ortaya koyulamamıştır. Derin kiriş çözüm yöntemlerinden biri olan basınç ve çekme yöntemi (STM) ACI 318-14, CSA23.3-04 ve EN 1992-1:2004 yönetmenliklerinde yer alırken diğer yönetmenliklerde bu çözüm yöntemine yer verilmemiştir.

2.3. Derin Kiriş Davranışları

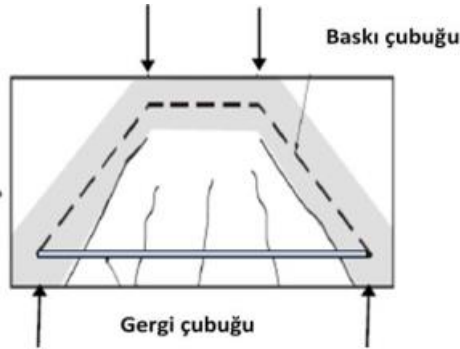
Kesme açıklığının derinliğe oranı (a/h) diğer kirişlere kıyasla düşük olduğundan derin kirişlerde davranışa hâkim dayanım, eğilme dayanımından ziyade kesme dayanımıdır. Kesme kırılması önceden herhangi bir belirti verilmeksizin meydana gelme ihtimalinden dolayı eğilme kırılmasından daha tehlikelidir. Bu nedenle derin kirişlerdeki kesme kırılması daha fazla dikkat gerektirmektedir (Smith ve Vantsiotis, 1982).

Betonarme derin kirişlerin davranışı, geleneksel kirişlerin davranışından farklıdır. Kirişin kesit alanının azalması nedeniyle kirişin davranışının basit bir davranıştan daha karmaşık bir davranışa değişeceği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla betonarme kirişlerde açıklık sağlanması, kiriş rijitliği ve mukavemetinde azalmaya yol açacak ve aşırı çatlama ve sehime neden olacaktır (Mansur ve ark., 1992).

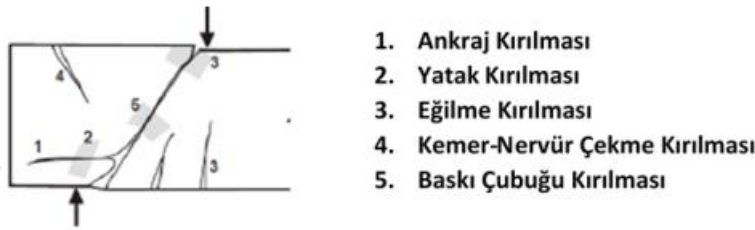
Betonarme derin kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla derin kirişlerin boyutu, şekli ve konumu etkisi ile ilgili yapılan çalışmalar sonucu, geleneksel kiriş davranışından farklı bir şekilde derin kirişlerin kesme davranışının büyük ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir (Alsaeq, 2013; Chin ve Ing, 2013)

Yoğun yük altında derin kirişlerde, kemer tesir mekanizması denilen bir mekanizma aracılığıyla yük doğrudan mesnetlere aktarılır. Eğimli bir çatlak oluştuğu zaman kiriş, bu mekanizma aracılığıyla basınçlı bağlı bir kemer gibi davranır ve bu kemerin büyük depolama kapasitesinden dolayı beton büyük bir kesme kapasitesine maruz kalır. Normal kirişlere kıyasla derin kirişlerdeki betonda daha fazla kesme kapasitesi olmasının sebebi budur (Aoyoma, 1993; J.A. Ramiraz ve C.W. French, 1999; Abuwarda, 2019). Yük altındaki basit mesnetli bir derin kirişin kemer tesir mekanizması Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekil 2.9’de gösterilen ankraj kırılması, taşıyıcı kırılması, eğilme kırılması, kemer-nervür çekme

kırılması ve basınç çubuğu kırılması, yoğun yük altındaki derin kirişlerde görülen esas kırılma modlarıdır (Abuwarda, 2019).



Şekil 2.8. Derin kirişte oluşan basınç ve gergi çubukları (Abuwarda, 2019)



Şekil 2.9. Derin kirişte oluşan kırılma türleri (Abuwarda, 2019)

2.4. Derin Kiriş ile Alakalı Yapılan Bazı Çalışmalar

Demir (2018)'in tez çalışmasında betonarme derin kirişlerin kesme etkisi altındaki betonarme derin kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi amaçlanmıştır. 3 adet kesme donatısı içeren ve 9 adet kesme donatısı içermeyen toplam 12 adet betonarme derin kiriş test edilmiştir. Kesme donatısı içermeyen deney örneklerinin sonuçları incelendiğinde, elemanların sadece basınç çubuk bölgesinde eğik kesme çatlakları olduğu ve yüklemenin devam etmesiyle birlikte kirişin maksimum yüke ulaştığı anda ani ve gevrek kesme etkisinden göçtüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca örneklerin kemer etkisi nedeniyle eğik çatlak oluşumundan sonra bile önemli bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Kesme donatısı içeren numuneler incelendiğinde ise kesme donatılarının beklenen sünekliği göstermediği ancak yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir ve yine kesme donatısı içeren kirişlerde de sadece eğik kesme çatlakları olduğu

gözlemlenmiştir. Demir (2018) STM metodu kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel verilerle kıyaslandığında STM metodunun önemli ölçüde güvenli tarafta kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca a/d oranının derin kiriş üzerindeki etkisi incelendiğinde a/d artışı ile betonarme derin kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı gözlemlenmiş ve maksimum çatlak genişliğinde ise küçük artışlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde a/d oranının azalması ile yük taşıma kapasitesinde artış gözlemlenmiştir ve daha bir gevrek davranış elde edilmiştir. Betonarme derin kirişlerde karakteristik beton basınç dayanımındaki (f_{ck}) değişiminin, f_{ck} artışının betonarme derin kirişlerin yük taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediği ancak maksimum çatlak genişliklerinde ise azalmalara yol açtığı görülmüştür (Demir, 2018).

Zhang ve Tan (2007) çalışmasında derin kirişlerde boyut etkisinin olası nedenlerini araştırmak için 11 örnek üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İncelenen bu örneklerde donatı oranı ve a/d oranı 1,1'de sabit tutularak a, d, kiriş genişliği, yükleme ve destek plakaları gibi boyutlar üzerinde değişiklik yapılarak sonuçlar incelenmiş ve incelenen sonuçlar neticesinde kiriş genişliğinin kesme dayanımı üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca derin kirişlerin eğilme çatlama mukavemetleri büyük boyutlu kirişlerde daha fazla yayılma hızı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte eğilmeden ziyade tüm kirişler için kemer hareketi davranışı hakimdir kanısına varılmıştır. Farklı boyutlardaki kirişler arasındaki diyagonal çatlakların yayılma hızında önemli bir fark görülmediği bu da önemsiz boyut etkisini göstermiştir. Yükleme ve destek plakalarının boyutlarının uygun şekilde yapılandırılarak daha yüksek h/b (b=kiriş genişliği) oranlarına sahip kirişler için bile nihai kesme dayanımındaki boyut etkisi önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca eşit dağıtılmış donatı takviyesinin derin kirişlerde boyut etkisinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Zhang ve Tan, 2007).

Guo ve ark. (2023) betonarme yapıların artışı ile artan agrega ihtiyacı, alışagelen maliyetli nehir agregası yerine doğada yeterince bulunan kumul kumunun belirli oranda eklenmesi ile derin kirişlerin kesme gerilmesine etkisi üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada 9 tane belirli oranlarda kumul kumunun eklenmesi ile derin kiriş tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Normal derin kirişlere kıyasla az miktarda kumul kumu kullanılan betonarme derin kirişlerinin yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırdığı ancak çok fazla kumul kumu bunun tersi bir etkiye neden olduğu gözlemlenmiştir. Kumul kumu oranı %30 olduğunda kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği sırasıyla normal derin kirişlerinkinden %5,3 ve %27,4 daha yüksektir. Kumul kumu değiştirme oranı %50'ye

yükseldiğinde kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği sırasıyla normal derin kirişlerinkinden %5,9 ve %3,5 daha düşüktür. Kesme açıklık-derinlik oranının kumul kumlu derin kirişlerinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi, normal derin kirişlerinkine benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Açıklık/derinlik oranı arttıkça kesme yükü kapasitesi azalır ve kumul kumu kirişinin göçme durumu bükülme kesmesinden sıkıştırma kesmesine değişir. Benzer şekilde etriye oranının kumul kumu derin kirişlerinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi, normal derin kirişlerinkine benzer etki göstermiştir ve etriye oranındaki artışla birlikte kesme dayanımı artmıştır. Normal derin kirişlere göre kumul kumu derin kirişlerin kesme dayanımı, beton dayanımının artmasıyla daha az artmıştır (Guo ve ark., 2023).

Makki ve ark. (2023) çalışmasında dağlık bölgelerde düşen kayalar, endüstriyel kazalar, patlamalar vb. ani yüklerden kaynaklanan yapıların maruz kalabileceği darbe yükleri altında geleneksel ve derin kiriş davranışları ölçmek amacıyla derin kiriş ve geleneksel kirişler deneysel olarak test edilmiştir. Çok yüksek bir gerilme oranına maruz kalan darbe yükü atındaki kirişler enerjilerinin desteğe geçmesi için belli bir zamana ihtiyaç duyabilir. Bu durumlarda, kirişlerin bu tür etkilere göre tasarlanması gerekir. Ele alınan çalışmada, ağırlıkların düşmesine maruz kalan geleneksel ve derin kirişler için yapılan çalışmalar incelemekte ve betonarme kirişlerin tepkisinin aşağıdakiler gibi birçok faktöre bağlı olduğu çıkarılmaktadır. Derin kirişlerin dinamik artış faktörü (a/d) oranına, boyuna ve enine donatı miktarına ve sapmanın statik büyüklüğüne bağlıdır. Çalışmada toplam etki süresi 10 m/s yük uygulanmış ve çarpma hızına göre, kiriş (veya kirişin bir kısmı) çarpma darbesine tepki verdiği gözlemlenmiştir. Darbe enerjisinin çoğu kiriş ataletine dayandığı ve çok az bir enerji destekle dayandığı görülmüştür. Bu, stres dalgasının hızından kaynaklanmaktadır. Kesme donatısı olmayan betonarme kirişin darbe kesme kapasitesi, statik yük altındaki kirişin kesme kapasitesinin 1,5'ine eşittir. Kayma çatlağı, statik ve darbe yüklerinde derin kiriş mekanizmasına hakimdir. Beton basınç dayanımını iyileştirmeye yönelik tüm yöntemler, yapısal elemanların darbelere karşı direncini arttırırken, doğal kauçuk izolatörlerinin eklenmesi basınç dayanımını zayıflatır ancak yapı elemanlarına daha yüksek bir enerji emilimi sağlar. Darbe yükü altındaki beton yapıların tepkisi, iki nedenden dolayı statikten farklıdır. Birincisi dalga yayılma etkisi negatif eğilme momentinde ve reaksiyon kuvvetinde bir farklılığa neden olur. İkincisi yüzeydeki birim şekil değiştirmelerdir. Darbe yükü altındaki elemanlar çok yüksek bir gerilme oranına maruz kalan yüke maruz kalırlar. Bu durumda yapı, uygulanan sıfırdan tepe noktasındaki yüke yani

dış gerilime hızla tepki verir. İçsel kuvvetler, dışsal kuvvetleri dengelemek için hızla gelişir (Makki ve ark., 2023).

Almasabha ark. (2023) çalışmalarında SFRC (çelik lifli betonarme derin kiriş) derin kirişlerinin kesme dayanımı tahmin etmek için etkili bir veri odaklı, doğrusal olmayan regresyon tabanlı model sağlanmaya çalışılmıştır. Mevcut deneysel veri tabanı değerlendirilen 172 çelik lifli betonarme derin kirişten oluşan bir veri tabanı toplamak ve çelik lifin kesme mukavemetini tahmin etmek için doğrusal olmayan, regresyona dayalı bir denklem oluşturmak hedeflenmiştir. Toplanan veri setinin 70 MPa'dan az beton basınç dayanımı, %1 ile %3 arasında boyuna donatı oranı, % 0,25 ile %1 arasında çelik elyaf hacim oranı içerdiği ele alınan derin kirişlerin a/d oranı 1,25 ile 2,5 arasında ve çelik liflerin uzunluk ile çap oranı 30 ile 100 arasındadır. Betonarme derin kirişler; çelik lifler eklendiğinde yapısal olarak daha iyi performans gösterdiği, kesme dayanımını artırdığı ve çatlakların kapatılmasına yardımcı olduğu gözlemlenmiştir. (Almasabha ve ark., 2023)

Al-khreisat ve ark. (2023) çalışmalarında betonarme yapılar yangın, sıcak su basıncı gibi farklı nedenlerle yüksek sıcaklıklara maruz kalabilir ve bu da betonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde istenmeyen değişikliklere yol açabileceği ve bunun betonarme derin kirişler üzerinde nasıl bir etki yaratacağını gözlemlemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Betonun basınç dayanımı 300 ile 800 °C arasında önemli ölçüde düşmeye başlar ve 800 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda beton dayanımını kaybeder (Demirel ve Keleştemur, 2010). İncelenen bu çalışmada, yüzeye yakın karbon fiber takviyeli polimer halatlar kullanılarak ısıdan zarar görmüş betonarme derin kirişlerin kesmeyle güçlendirilmesini ve onarımını deneysel olarak araştırılmıştır. Açıklık/derinlik oranı 1,44 olan aynı özellikteki 10 betonarme derin kiriş dökülüp test edilmiş ve sıcaklığın etkisini belirlemek için 5 kiriş üzerinde 650 °C ye kadar 3 saat boyunca ısıtılmıştır. Kirişler üzerinde uygulanan fiber takviyeli polimerlerin halat yönelimi 45° ve 90°, halat aralığı 150 mm ve 200 mm'dir. 3 Saat boyunca 650 °C 'lik yüksek bir sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra RC derin kirişlerin kesme dayanımında %20 azalma gözlemlenmiştir. 200 mm aralıkla ve 45° eğimli örneklerin bu deneysel çalışmada en iyi güçlendirme sonuçlarını göstermiştir. Buna karşılık en az güçlendirme sonuçları 200 mm 90° örneklerinde meydana gelmiştir. Sonuç olarak 45° yönlendirme 90° yönlendirmeden daha iyi bir sonuca sahip olduğu ve fiber takviyeli polimer halatları kesme kapasitesinde önemli bir iyileşme gözlemlendiği görülmüştür (Al-khreisat ve ark., 2023)

2.5. Derin Kiriş Çözüm Yöntemleri

2.5.1. Strut and tie modeli (Basınç ve çekme metodu)

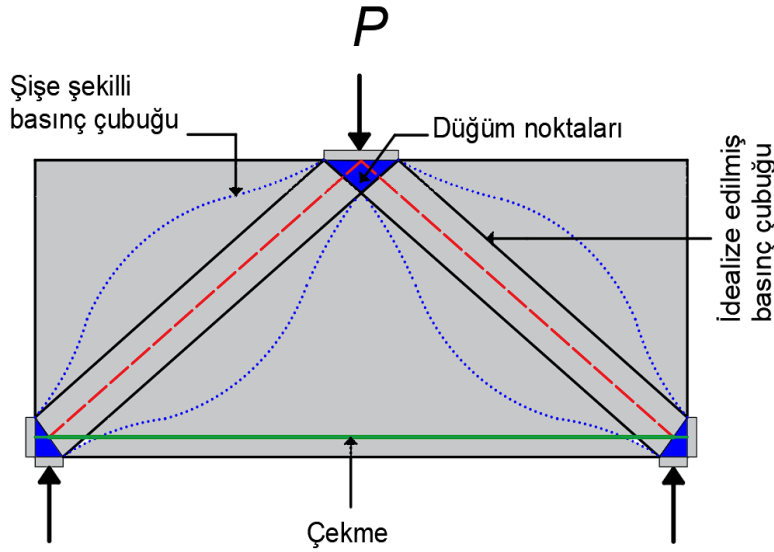
St. Venant prensibine göre ve elastik analizlerde gösterildiğinin aksine derin kirişlerde karmaşık bir gerilme durumu vardır. Bu nedenle düzlem kesit teorisine dayanan ve kiriş kafes modeli kullanan geleneksel kiriş tasarım yaklaşımları derin kirişlerin tasarımı için geçerli değildir. STM modeli ACI 318 dahil olmak üzere çeşitli yönetmenlik ve standartlarda yaygın olarak dahil edilmiştir. Bir kirişe birden fazla STM modeli uygulanabilir bu nedenle tipik olarak geleneksel kiriş tasarım modelinde olduğu gibi tek bir tasarım modeli yoktur (Wang ve Kuchma, 2007).

Basınç ve çekme modeli (STM) geometrik düzensizliklerin doğrusal olmayan dağılıma neden olduğu yapısal beton elamanların veya bölgelerin tasarımı için geçerlidir. Gerilme dağılımındaki bir süreksizlik, yapısal bir elemanın geometrisindeki bir değişiklikte, tekil bir yükte veya reaksiyonda meydana gelir. Bu nedenle süreksizlik bölgelerinin, yükün veya geometri değişikliğinin meydana geldiği kesitten belli bir mesafe aralığı içinde olduğu varsayılır (Schlaich ve ark., 1987).

2002 yılından bu yana ACI yapı kodu STM olarak kabul edilmiş ve derin kirişlerin tasarımı ve analizi için daha önce oldukça basit bir denklemle değiştirilmiştir. STM, uygulanan bir yüke direnmek için kullanılan gerilmelerin dağılımının, denge yapısal elemanlar aracılığıyla sağlandığı ve yapının tüm parçalarının daha az gerilime sahip olduğu sürece güvenli olduğunu belirten alt sınır teoremine dayanmaktadır (Panjehpour ve ark., 2015).

STM modeli; yapısal bir elemandaki düzensiz gerilme akışının, bir kafes kiriş sisteminin eksenel elemanları gibi idealize edilmesini kapsamaktadır. Basınç bölgelerindeki gerilmeler “beton basınç çubukları (strut)”, çekme bölgelerindeki gerilmeler ise “çekme çubukları (tie)” tarafından taşınmaktadır. Basınç gerilmeleri basınç çubuğu ile temsil edilirken çekme gerilmeleri çekme elemanları ile karşılanır. Basınç beton çubukları ile donatı çekme çubuklarının birleştiği noktalar düğüm noktaları (node) olarak adlandırılır. Strut, tie ve node’lar birleşerek strut-and-tie modelini oluşturmaktadır. Çekme elemanları beton çekme mukavemetinin aşılmadığı yerlerde beton çekme gerilme alanlarından ve aşılacak yerlerde çekme donatılarından oluşmaktadır. Tekil bir kuvvet etkisi altında basit mesnetli

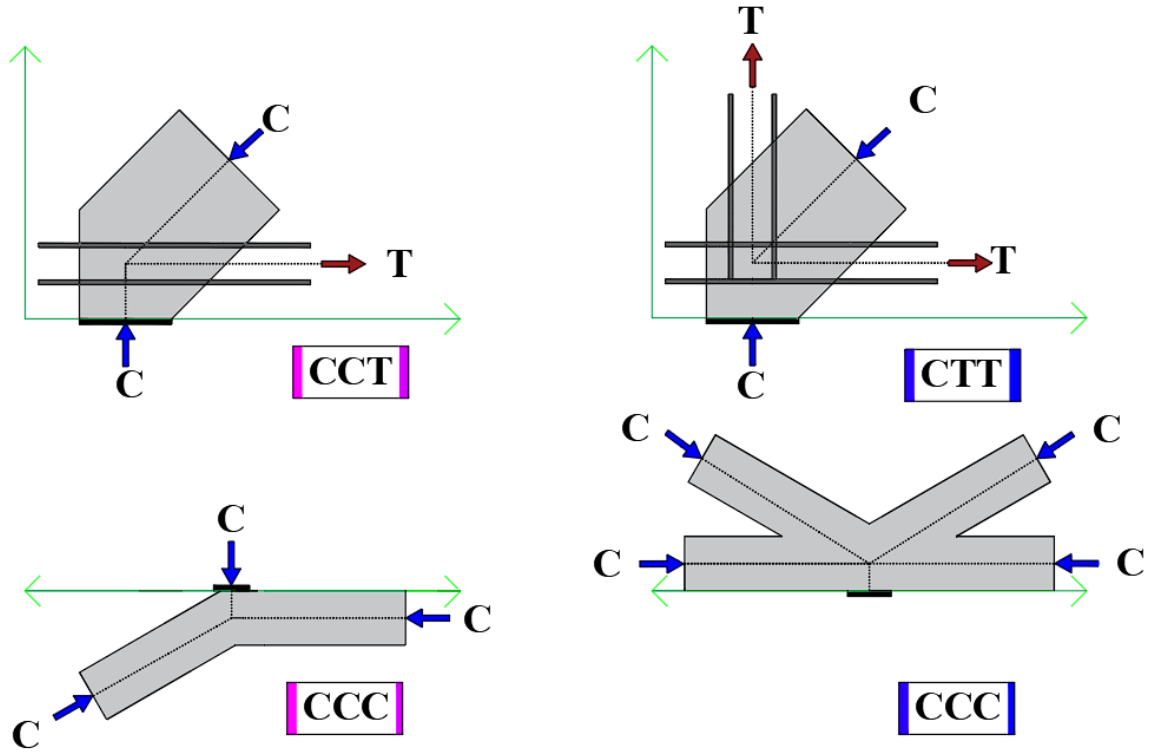
bir derin kirişte örnek bir STM kafes modeli aşağıdaki Şekil 2.10’da gösterilmiştir. (URL-6, 2021)



Şekil 2.10. Derin kiriş gösterimleri (Owatsiriwong, 2013).

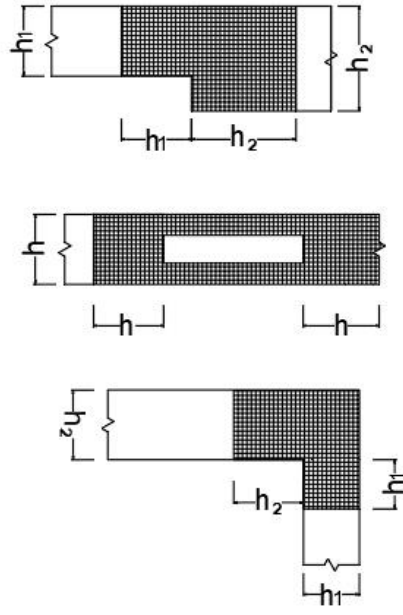
STM yöntemi kısaca yapı üzerindeki karmaşık düzensiz gerilmeleri bir kafes sistemi gibi düşünerek yapının güvenli bir şekilde kalacak şekilde tasarımının yapılmasıdır. STM modelinde düğüm noktaları çekme ve basınç çubukları ile adlandırılan gerilmelerin birleştiği bölge olarak adlandırılır ve bu birleşim yerlerinde çok yönlü bir gerilme akışı söz konusudur. Düğüm bölgeleri üzerine basınç veya çekmeden gelen kuvvetin kaynağına göre adlandırılır ve bu duruma göre yönetmenlikteki uygun değerler kullanılarak çözüm aranır. Aşağıda düğüm bölgelerinin sınıflandırılması Şekil 2.11 üzerinde gösterilmiştir (Owatsiriwong, 2013).

- i) CCC Düğümü: Üç basınç çubuğunun birleştiği düğümde bölgesi
- ii) CCT Düğümü: İki basınç çubuğu ve bir çekme çubuğunun birleştiği düğüm bölgesi
- iii) CTT Düğümü: Bir basınç ve iki çekme çubuğunun birleştiği düğüm bölgesi
- iv) TTT Düğümü: Üç çekme çubuğunun birleştiği düğüm bölgesi

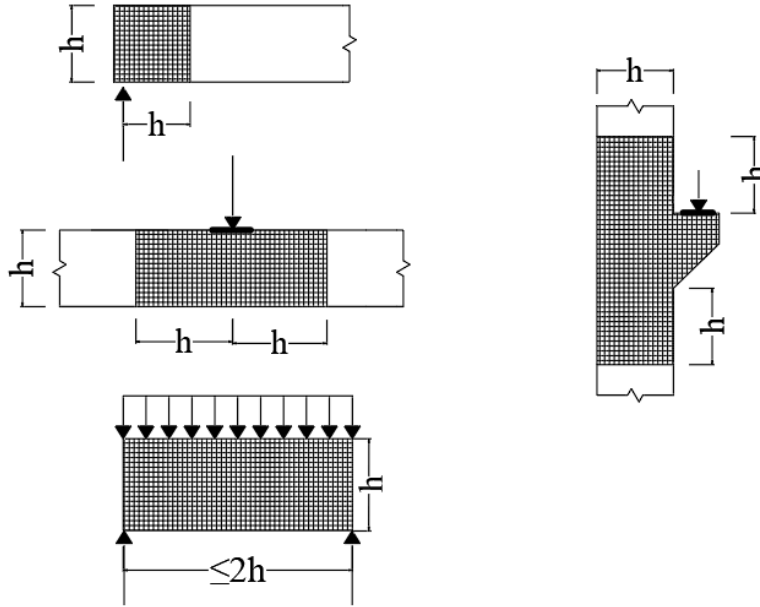


Şekil 2.11. Düğüm bölgesi adlandırılması (Min., 2021)

Geleneksel betonarme kiriş teorisi dengeye, uyumluluğa, malzemelerin çelik ve betonun yapısal davranışına dayanır. Gerilmenin bir elemanın derinliği boyunca doğrusal olarak değiştiği ve sonuç olarak düzlem kesitlerinin düzlem olarak kaldığı varsayımı öncelikle önemlidir. St. Venant ilkesi geleneksel kiriş teorisinin temelini oluşturur (Ionel-Dumitrel Ghiba, 2014). Bununla birlikte St. Venant ilkesi uygulanan yük veya geometrideki süreksizliklere h mesafesinden daha yakın noktalarda geçerli değildir (Şekil 2.12, Şekil 2.13). Bu tekil yüklerin yakınında betonarme eleman içindeki süreksizlik bölgelerinin tanımlanmasına yol açar. Açıklıklar veya enine kesitteki değişiklikler geometri nedeniyle derin kirişlerin ve kolon konsollarının tam hacmi süreksizlik bölgesi olarak nitelendirilir. Bu nedenle, betonarme yapılar geleneksel kiriş teorisinin geçerli olduğu genellikle B bölgesi olarak anılan bölgelere ayrılabilir. Bir dizi D bölgesi Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te taralı olarak gösterilmektedir (Nilson ve ark., 2010).



Şekil 2.12. Gerilme düzensizlikleri gösterimi (Nilson ve ark., 2010)



Şekil 2.13. Yükleme düzensizlikleri gösterimi (Nilson ve ark., 2010)

Düşük gerilmelerde, beton elastik ve çatlaksız olduğunda D bölgelerindeki gerilmeler sonlu elemanlar analizi veya elastisite teorisi kullanılarak hesaplanabilir. Beton çatladığında gerinim alanı bozulur ve iç kuvvetlerin yeniden dağılımına neden olur. Bu gerçekleştiğinde STM modeli olarak adlandırılan statik olarak belirlenmiş bir kafes giriş

Diagram illustrating the stress distribution in a beam under a central point load P . The beam has a total length $2a$ and depth d . The diagram shows the 'Asal Çekme Gerilmeleri' (Principal Tension Stresses) as dashed blue lines and 'Asal Basınç Gerilmeleri' (Principal Compression Stresses) as solid red lines. The beam is divided into regions: 'D Bölgesi' (Disturbance Region) of width d at each end, and 'B Bölgesi' (Bulge Region) of width $3d$ in the center. The load P is applied at the center. The reaction forces at the supports are $2/7 P$ and $5/7 P$. The diagram also shows the 'Geleneksel Kiriş Davranışı' (Traditional Beam Behavior) and 'Derin Kiriş Davranışı' (Deep Beam Behavior) regions.

2.5.1.1. ACI 318-14 Yönetmenliğinde STM yönetmenliği:

ACI 318-14'e göre STM modeli tasarım süreci aşağıdaki 4 adıma göre yapılır:

- i) $\phi F_n \geq F_u$

Yukarıdaki bağıntıda ϕ dayanım azaltma faktörü (0,75 olarak alınmaktadır), F_n karakteristik dayanım ve F_u basınç çubuğu, çekme çubuğu ya da düğüm bölgelerinin bir yüzüne etki eden bileşke kuvveti temsil eder.

$$ii) \quad F_{ns} = f_{ce}A_{cs}, \quad F_{ns} = f_{ce}A_{cs} + A_s'f_s'$$

Yukarıda donatı bulunduran ve donatı bulundurmeyan basınç çubukları için karakteristik basınç dayanımı sırayla verilmiştir. Burada F_{ns} karakteristik basınç dayanımı, f_{ce} basınç çubuğu ve düğüm bölgelerinin etkili basınç dayanımı, A_{cs} basınç çubuğunun enkesit alanıdır, A_s' basınç çubuğu boyunca donatı alanı, f_s' basınç çubuğundaki donatı akma dayanımı (basınç ve çekme çubuğu arasındaki açı 40 ile 60 arasında ise $f_s = f_y$ alınabilir)

$$iii) \quad f_{ce} = 0,85\beta_S f_{ck}$$

İkinci adımdaki bağıntıda kullanılan f_{ce} bu bağıntıdan bulunur. β_S Katsayısı kiriş eksenine dik olarak yerleştirilen donatı ve çatlakların etkili basınç dayanımı üzerine etkisini göstermekte, f_{ck} karakteristik basınç dayanımıdır.

$$iv) \quad A_{cs} = b_w w_s$$

İkinci adımdaki bağıntıda kullanılan A_{cs} bu bağıntıdan bulunur. Burada b_w kiriş genişliği, w_s basınç çubuğu genişliğidir.

v) Üçüncü adımdaki bağıntıda kullanılan β_S katsayısı Tablo 2. 1' de kısaca özetlenecek olursa:

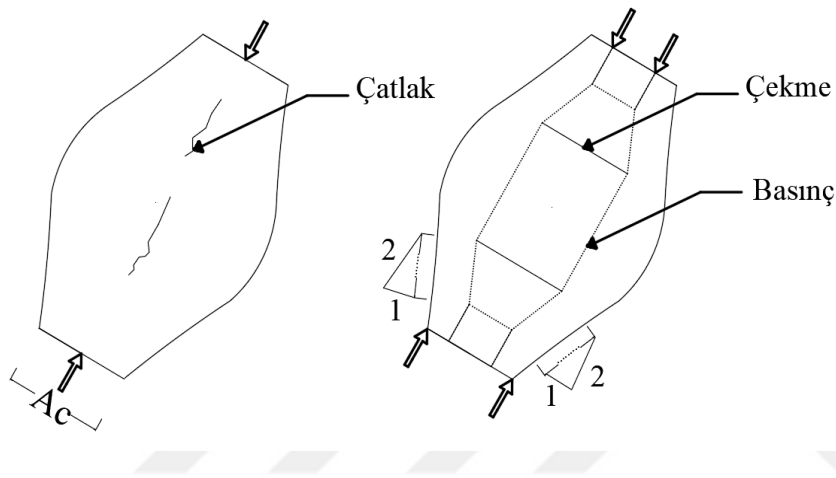
Tablo 2. 1. STM metodundaki β_S katsayı değerleri

β_S	Koşullar
1,0	Prizmatik basınç çubuğu için geçerlidir
0,75	Şişe şekilli basınç çubuğu için geçerlidir
0,60 λ	Şişe şekilli basınç çubuğu için geçerlidir (Normal ağırlıklı beton için $\lambda=1.0$) (İri agregalı hafif beton için $\lambda=1.0$) (İri agregasız hafif beton için $\lambda=1.0$)
0,40	Çekme gerilmesine maruz kalan basınç çubukları veya çekme başlıkları için
0,60 λ	Diğer tüm durumlar için

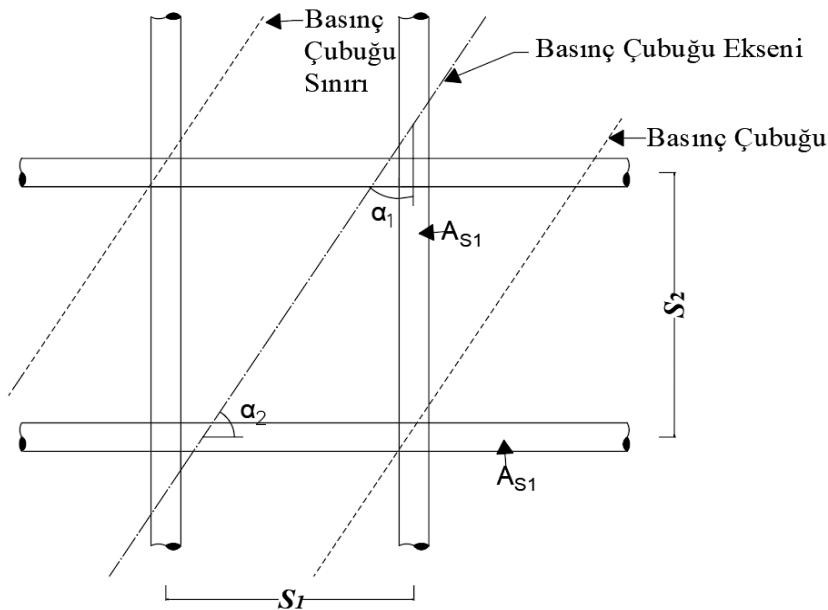
Şişe şekilli basınç çubuklarında basınç etkisiyle oluşan enine çekme gerilmeleri ve boyuna çatlaklara karşı basınç çubuğu eksenine dik olacak şekilde donatı kullanılması gerekmektedir (Şekil 2.15).

$$vi) \quad \sum \frac{A_{si}}{b_w s_i} \sin \alpha_i \geq 0,003$$

Yukarıdaki bağıntıyı beton basınç dayanımı $f_{ck} \leq 40MPa$ olması durumunda basınç çubuk eksenini ile çakışan donatı miktarı için hesaplanmalıdır. Burada A_{si} basınç bölgesindeki toplam donatı alanıdır (Şekil 2.16).



Şekil 2.15. Şişe şekilli basınç çubuğu



Şekil 2.16. Basınç çubuğu (strut) üzerindeki enine ve boyuna donatılar

$$\text{vii)} \quad F_{nn} = f_{ce} A_{nz}$$

Bu bağıntı ile düğüm bölgesinin karakteristik basınç dayanımı hesaplanmaktadır. Burada f_{ce} düğüm bölgesinin basınç dayanımı, A_{nz} düğüm bölgelerinin yüzey alanıdır.

$$\text{viii)} \quad f_{ce} = 0,85\beta_n f_{ck}$$

Bu bağıntıdaki f_{ce} yukarıdaki bağıntı ile hesaplanır ve β_n katsayısı ile ilgili değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2. 2 Düğüm bölgesi kuvvet çeşitleri

Düğüm Bölgesi Kuvvet Çeşidi	β_n Katsayısı
CCC düğüm bölgeleri için	1,0
CCT düğüm bölgeleri için	0,8
CTT, TTT Düğüm bölgeleri	0,6

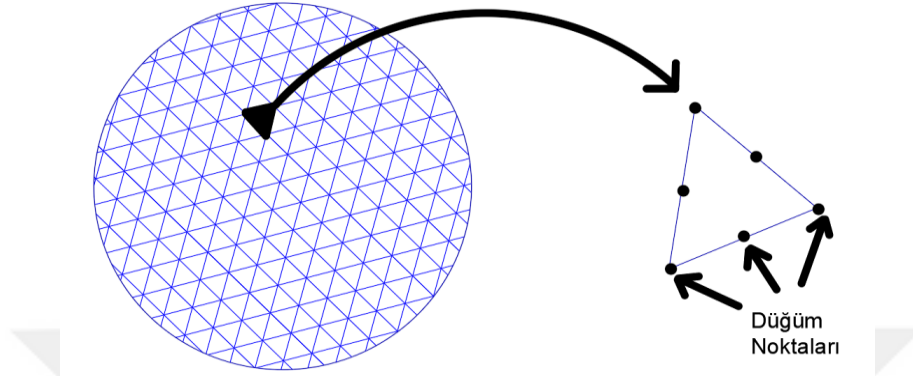
Ayrıca ACI 318-14 (2014) yönetmeliğine göre örnek bir STM kafes modellemesi ile örnek kiriş dayanım hesabına Ek 1’de yer verilmiştir. Şekil Ek 1’ de örnek kirişe ait boyut detayları, 10 adet 29 mm’lik donatı 25 MPa beton karakteristik basınç dayanımı ve S420 çelik dayanım sınıfına yer verilmiştir. Verilen bu bilgiler ışığında STM modeli ile kiriş dayanım hesabı adım adım gösterilmiştir.

2.5.2. Sonlu elemanlar modeli (Finite element metot (FEM))

Sonlu elemanlar ile ilgili matematiksel ifadeler ilk olarak Euler ’in 1735’li yıllarda sonsuz kesirler, sürekli kesirler, Euler yöntemi olarak bilinen mekanikte kullanılan yaklaşımlar serisi gibi matematiksel analizler ile sonlu elemanlar modelinin bilim dünyasına kapısı açılmıştır (Potts ve Zdravković, 1999). Sonlu elemanlar modeli 20. yüzyıldan itibaren inşaat mühendisliği, makine mühendisliği, havacılık gibi birçok mühendislik dalı için bir dönüm noktası olmuştur.

Sonlu elemanlar metodunun amacı sınırlı bir şekilde ifade edemeyeceğimiz sonsuz boyuttaki fonksiyonları, uzayda sonlu boyutlu fonksiyonlara ve ardından sayısal yöntemlerle vektör uzayında sınırlı bir şekilde izlenebilen vektörlere dönüştürme işlemidir. Analiz edilecek bir problemin belirli ağlara bölerek her bir ağ içerisinde belirli bir sayıda noktaya indirgenip analiz için sayısal bir alan oluşturulur (Şekil 2.17). İndirgenen sınırlı alan

probleminin çözümü olarak sonlu eleman yöntemi ile cebirsel bir denklem sistemi olarak adlandıracağımız yaklaşım metotları ile çözüm hedeflenir (Kaplanlıoğlu ve Gemalınayan, 2015).



Şekil 2.17. Yaklaşım metodu ile sonsuz noktadan sınırlı nokta oluşumu

Genel olarak bir ağdaki eleman sayısı ne kadar yüksekse ayrıklaştırılmış problemin çözümü o kadar doğru olur. Ancak sonuçların yakınsadığı ve daha fazla mesh iyileştirmenin doğruluğu artırmadığı bir değer vardır (URL-2, 2021)

İnşaat mühendisliğinde sonlu eleman uygulamaları ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde ticari ve kompleks sonlu eleman programlarından ABAQUS (Hibbitt ve ark., 1978) ANSYS (John O., 1976), Ls-DYNA (John O., 1976) vb. programlarının kullanıldığı görülmektedir. ABAQUS programının, ülkemizdeki yapılan çalışmalarda inşaat mühendisliği uygulamalarının sonlu eleman ile modelleme ve analiz yöntemlerinde daha etkin bir şekilde kullanımı mevcuttur. Bunlara istinaden ANSYS ve Ls-DYNA programlarının inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı görece daha azdır. Ls_DYNA ile bu tezde yer alan örneklerin tasarımında sık sık kullanılan komut adımlarına Ek 2’de yer verilmiştir.

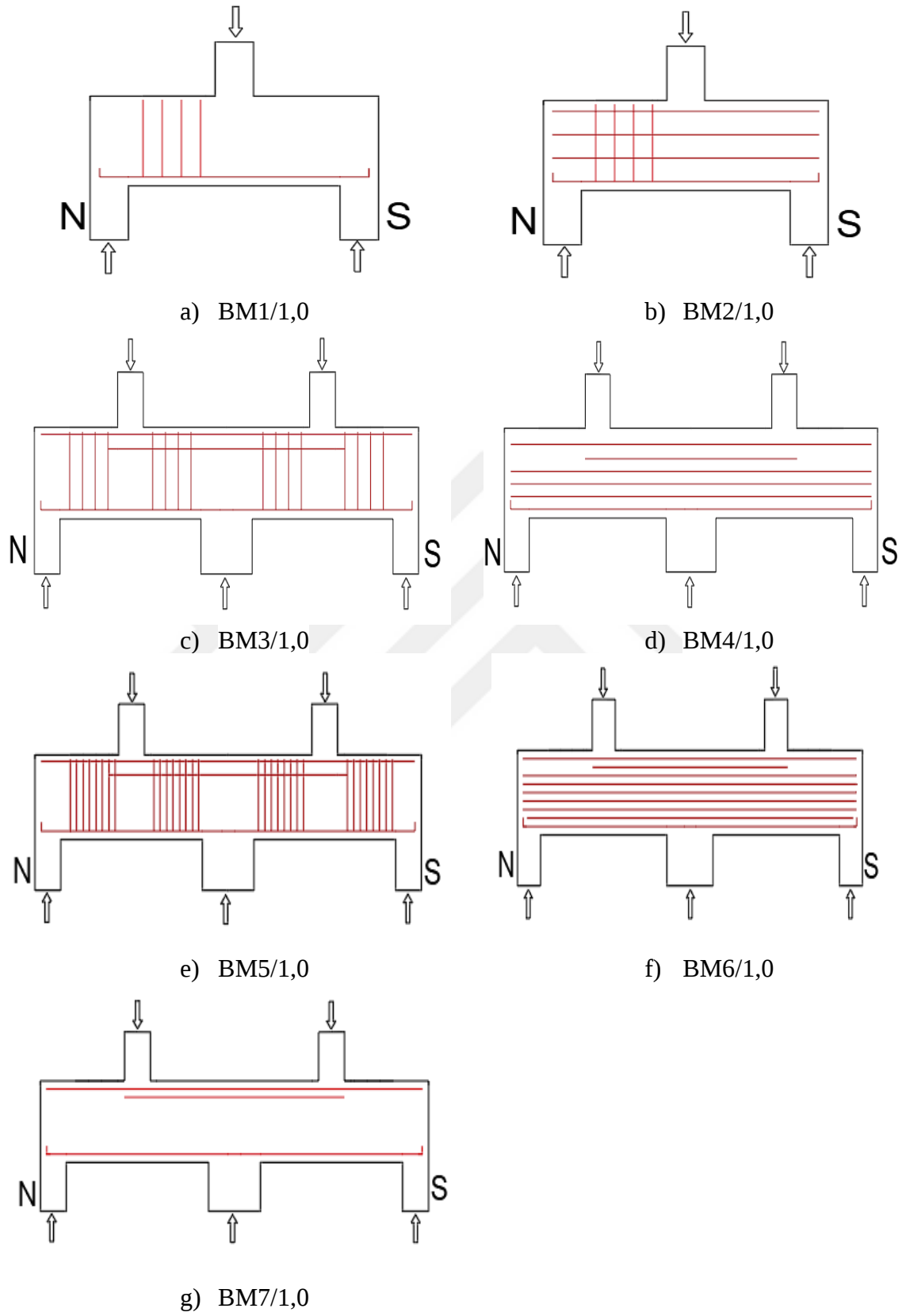
3. REFERANS KİRİŞ MODELİ

3.1. Betonarme Derin Kirişlerin Testi (Rogowski ve ark., 1983)

Rogowski ve ark., (1983) tarafından derin kirişler ile yapılan deneysel çalışmaların kısa bir özeti burada anlatılmıştır. Açıklık/derinlik oranı 1,0 ve değişken dikey ve yatay donatı kombinasyonlarına sahip 2 adet tek açıklıklı ve 5 adet çift açıklıklı betonarme derin kirişin deneysel çalışmalarını yapılmış ve kiriş davranışlarını göçme durumlarıyla birlikte rapor etmişlerdir. Bununla birlikte farklı donatı konfigürasyonları ve miktarları kullanılarak derin kiriş davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıda verilen parametrelere ile sınırlandırılmıştır:

- 1) Kesme açıklık-derinlik oranı
- 2) Dikey donatı miktarı
- 3) Yatay donatı miktarı
- 4) Statik koşullar, yani basit kesme aralığı ve sürekli kesme aralığı

Kirişlerde kullanılan donatılar Amerikan Betonarme Yönetmeliğinin (ACI 318-1, 1983) gerektirdiği minimum ve maksimum donatı miktarı kullanılarak tasarlanmıştır. Test edilen derin kirişlerin beton basınç dayanımları 26,1 MPa ile 36,9 MPa arasında değişmiştir. Esas eğilme donatı ve detayları kesme dışındaki göçme modlarını önlemek için seçilmiştir. Rogowski ve ark. (1983) tarafından test edilen derin kiriş modelleri ve donatı düzeni Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Deneysel kirişlerin isimlendirme yöntemleri burada değiştirilmeden kullanılmıştır. Şekil 3.1’de N ve S kirişin kuzey ve güney yönlerini tarif etmek, kirişlerin hangi tarafta göçme gösterdiğini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 3.1’de BM 1/1,0 isimlendirmesinde, ilk rakam gösterilen kiriş konfigürasyonunu, ikinci rakam ise kirişin sahip olduğu açıklık/derinlik oranını göstermektedir. Her takım için kimlik numarası Şekil 3.1’de gösterildiği gibi test serisindeki yerine karşılık gelen bir tamsayıdan ardından kuzey ve güney kesimini gösteren “N” veya “S” den oluşan açıklık ile simgelenmiştir.

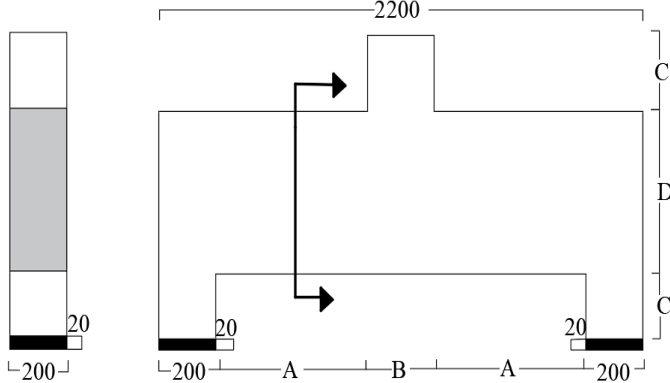


Şekil 3.1. Test edilen derin kirişler ve donatı detayları: a) BM1/1,0; b) BM2/1,0; c) BM3/1,0; d) BM4/1,0; e) BM5/1,0; f) BM6/1,0; g) BM7/1,0

3.2. Kiriş Detayları

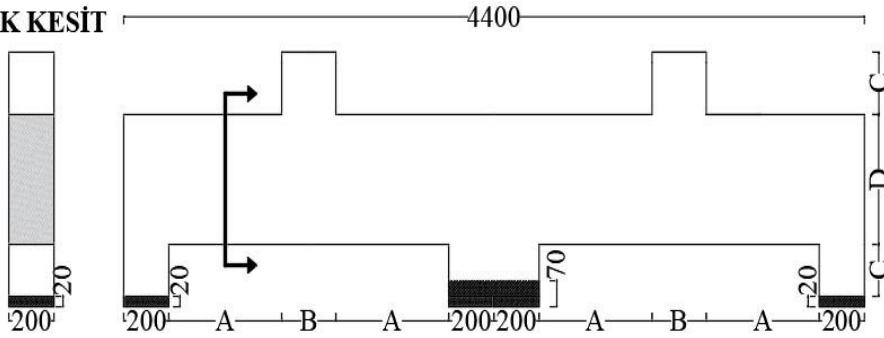
Test edilen kirişlerin tek açıklıklı ve çift açıklıklı örneklerinin tipik ölçülendirmeleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'teki tek ve çift açıklıklı kiriş boyutlandırmaları; $A=750\text{mm}$, $B=300\text{mm}$, $C=450\text{mm}$ ve $D=1000\text{mm}$ 'dir. Tablo 3.2'de test kirişleri beton ve donatı özellikleri gösterilmektedir. Kiriş numunelerinde iki çeşit donatı kullanılmıştır: No=6mm ve 20M (19,5mm)'dir. Donatı özelliklerine aşağıdaki Tablo 3.2'de yer verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan beton karışımı, yaklaşık 30 MPa'lık 28 günlük bir silindir mukavemeti sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Agrega için maksimum agregada boyutu 10 mm alınmıştır. Tablo 3.4'te beton özellikleri özetlenmiştir. Bu tabloda f_c betonun tek eksenli basınç dayanımı, f_{sp} betonun çekme dayanımı ($=0,461*f'_c$), E_c betonun elastisite modülüdür ($E_c = 3694\sqrt{f'_c}$ (MPa)).

TIPIK KESİT



Şekil 3.2. Tipik tek açıklıklı deneysel kiriş ölçülendirmeleri

TIPIK KESİT



Şekil 3.3. Tipik iki açıklıklı deneysel kiriş ölçülendirmeleri

Tablo 3.1. Test kirişleri (Rogowski ve ark., 1983) beton ve donatı özellikleri

Kiriş İsimleri	$f'c$ MPa	Üst Donatılar			Alt Donatılar			Gövde Donatıları	
		Adet ve çap	$Asfy$ kN	d, mm	Adet ve çap	$Asfy$ kN	d, mm	Etriye Sayısı	Gövde Donatı Sayısı
1/1,0N	26,1	-	-	-	6-20M	114	950	4	-
1/1,0S	26,1	-	-	-	6-20M	114	950	-	-
2/1,0N	26,8	2-6 mm	16.2	980	6-20M	114	950	4	4
2/1,0S	26,8	2-6 mm	16.2	980	6-20M	114	950	-	4
3/1,0	28,9	4.20M	114	950	3-20M	114	975	4	-
4/1,0	28,5	4.20M	114	950	3-20M	114	975	-	4
5/1,0	36,9	4.20M	121	950	3-20M	121	975	16	-
6/1,0	35,8	4.20M	121	950	3-20M	121	975	-	12
7/1,0	34,5	4.20M	121	950	3-20M	121	975	-	-

Tablo 3.2. Test kirişlerinde (Rogowski ve ark., 1983) kullanılan donatılar ve özellikleri

Donatı çapı (mm)	$Asfy$ (kN)	Akma gerinimi	As (mm)	E (MPa)	fy (MPa)
20	114	0,00185	302	205,400	377-380
6	16.2	0,00210	37.8	273,000	428-573

Tablo 3.3. Kiriş numuneleri beton özellikleri

Kiriş	$f'c$ (MPa)	E_c (GPa)	$E_c\sqrt{f'c}$
1/1,0	26,1	20,0	3915
2/1,0	26,8	23,4	4520
3/1,0	28,9	20,8	3869
4/1,0	28,5	-	4017
5/1,0	36,9	24,4	4017
6/1,0	35,8	21,2	3543
7/1,0	34,5	21,6	3677

3.3. Test Kurulumu ve Prosedürü

Test numuneleri yüklemelerinde hidrolik silindirler kullanılmıştır. Yükler belirli artışlarla uygulanıp her yük artışı kirişe uygulandıktan sonra oluşan yer değiştirme ve çatlakların dengelenmesi için kiriş örnekleri bir iki dakika bekletilmiştir ve bu şekilde ilk

olarak yükleme adımındaki yer değiştirme verileri alınıp daha sonra beton ve çelik gerilmeleri sırasıyla ölçülmüştür. Yükleme artışı ile betonda oluşan çatlaklar da fotoğraflanmıştır. Çatlakların başladığı andan itibaren uygulanan sabit yük artırılmadan yaklaşık olarak bir saat bekletilip veriler bu şekilde alınmıştır. Örneklere uygulanan yük kiriş göçme durumuna kadar yaklaşık olarak 7 kez artırıldığı ve bu şekilde örnek test sürelerinin 7 ile 9 saatlik bir test süreci ile sonuçlandığı belirtilmiştir.

3.4. DeneySEL Sonuçlar

Kiriş numuneleri yük altında test edilmiş ve kesme kuvvetleri her bir açıklıkta oluşan kesme çatlakları için ve göçme durumlarının gözlemlendiği durumlar için rapor edilmiştir. Çatlama durumlarındaki kirişlerde ölçülen kesme kuvvetlerine Tablo 3.4'te, göçme durumundaki kesme kuvvetlerine ise Tablo 3.5'te yer verilmiştir. Yapılan deneylerde yatay yerleştirilen donatılarının kiriş kesme dayanımına önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Tüm kirişler gevrek bir şekilde kesme kuvveti etkisiyle göçmüştür. Dikey yerleştirilen kesme donatılarının süneklığe etkisi olmuştur. Ayrıca çalışmada derin kirişlerin yükün büyük bir kısmını basınç çubuğu tarafından mesnede iletilen sistemler olarak tarif etmişlerdir.

Tablo 3.4. Çatlama durumlarındaki kiriş kesme kuvvetleri

Kiriş	$f'c$ MPa	N, dış kesme açıklığı, kN	N iç kesme açıklığı, kN	S iç kesme açıklığı, kN	S, dış kesme açıklığı, kN
BM1/1,0	26,1	350	-	-	350
BM2/1,0	26,8	500	-	-	400
BM3/1,0	28,9	(2)	400	405	(3)
BM4/1,0	28,5	(2)	370	360	(2)
BM5/1,0	36,9	(2)	460	410	(1)
BM6/1,0	35,8	(2)	350	410	(2)
BM7/1,0	34,5	(2)	(1)	265	(3)

(1) Eğimli çatlama kesmesi iyi tanımlanmamış

(2) Göçmede kısmen gelişen eğimli çatlama

(3) Göçmede eğimli çatlak yok

Tablo 3.5. Göçme durumunda kiriş kesme kuvvetleri

Kiriş	N, dış kesme açıklığı, kN	N iç kesme açıklığı, kN	S iç kesme açıklığı, kN	S, dış kesme açıklığı, kN
BM1/1,0	602	-	-	602
BM2/1,0	750	-	-	750
BM3/1,0	400	685	689	393
BM4/1,0	420	667	663	415
BM5/1,0	413	875	866	405
BM6/1,0	461	646	635	448
BM7/1,0	287	424	418	280

Tablo 3.6. Göçme durumunda mesnetlere gelen kuvvetler

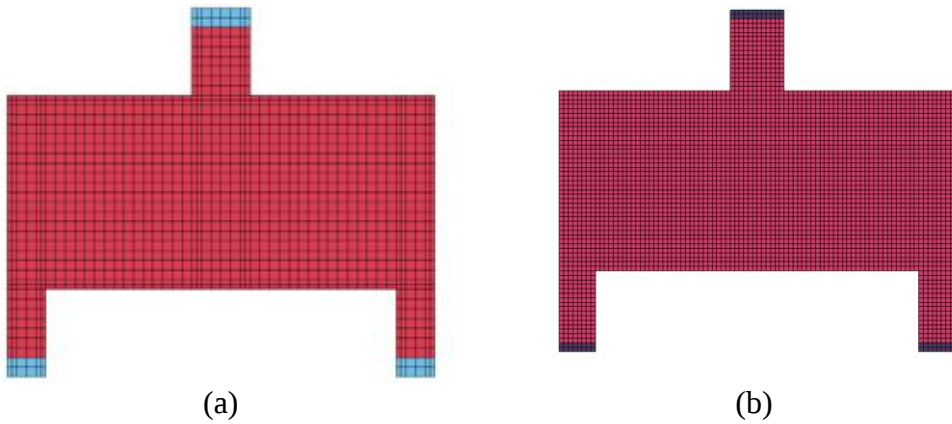
Kiriş	R1, (kN)	R2, (kN)	R3, (kN)
BM1/1,0	602	-	602
BM2/1,0	750	-	750
BM3/1,0	395	1380	396
BM4/1,0	410	1326	418
BM5/1,0	408	1734	404
BM6/1,0	454	1277	450
BM7/1,0	282	840	282

4. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ

4.1. Eleman modelleri ve Yakınsama Çalışması

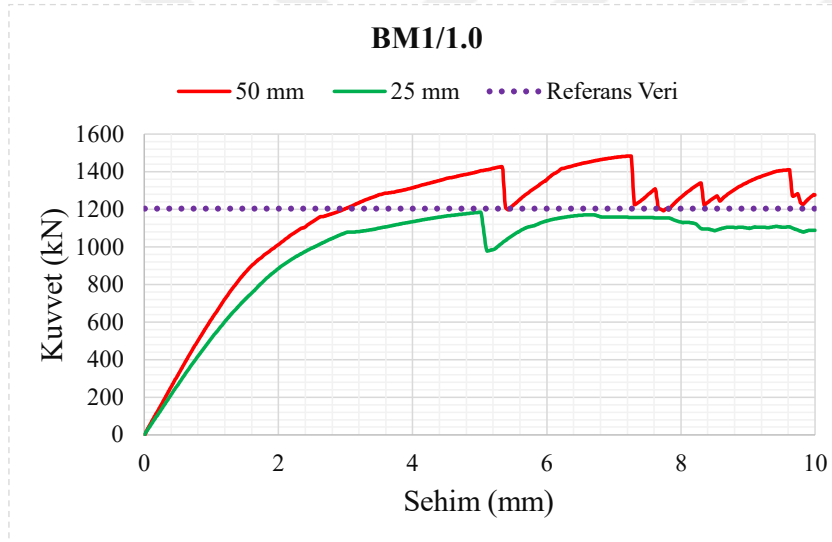
Kiriş betonunun modellenmesinde sekiz düğüm noktasına sahip sabit gerilmeli solid eleman (Solid 1) kullanılmıştır. Bu eleman sayısal çözümlemede diğer solid elemanlara kıyasla daha az süre gerektirmesi ve gösterdiği iyi yakınsama davranışı açısından varsayılan solid eleman modeli olarak programda kullanılmaktadır. Kiriş içerisinde mevcut boyuna ve enine donatılar, aksenal yük, kesme kuvveti ve moment etkisi altında olacağından, kiriş elemanlar ile modellenmesi uygun görülmüştür. Bu nedenle, enine ve boyuna donatılarının modellenmesinde iki düğüm noktasına sahip kiriş eleman (Beam 1) kullanılmıştır. Bu kiriş eleman modeli, programda varsayılan kiriş eleman modelidir.

Sayısal kiriş modeli için uygun eleman boyutlarının tespiti için yakınsama çalışması yapılmıştır. Şekil 4.1 farklı mesh boyutlarına sahip kiriş modellerini göstermektedir. Enine ve boyuna donatıların kiriş içerisinde dağılımları göz önüne alınarak, her bir solid eleman 50 mm ve 25 mm boyutlarına sahip olacak şekilde modellenmiştir. Donatılar için kullanılan kiriş elemanların düğüm noktaları, donatının beton ile hareket edebilmesini sağlamak amacıyla, solid elemanların düğüm noktaları ile çakıştırılmış ve ortak olan düğüm noktaları birleştirilmiştir. Böylece donatı elemanlarının, beton elemanlara bağımlı bir şekilde hareket etmesi sağlanmıştır. Bunun yapılabilmesi için, donatı kiriş eleman boyutları solid eleman boyutları kadar, yani 50 mm ve 25 mm uzunluğunda olacak şekilde boyutlandırılmıştır.



Şekil 4.1. BM1 kirişi için a) 50 mm ve b) 25 mm mesh boyutlarına sahip sonlu eleman modelleri.

Şekil 4.1, BM1/1,0 kirişi için, 50 mm ve 25 mm solid eleman boyutlarına sahip sonlu eleman modellerini göstermektedir. Şekil 4.2’de bu iki mesh boyutu için, BM1/1,0 kirişi modellenip analiz edilerek elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Her iki mesh boyutuna sahip modeller benzer sonuçlar vermekle birlikte 25 mm’lik mesh modelinin referans kiriş test verilerine daha yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle sonuçlar benzer olsa da daha yakın sonuçlar veren yani 25 mm solid eleman kullanılan modelin, referans model olarak alınması ve bu çalışmada kullanılması uygun bulunmuştur. Yukarıda Şekil 4.1’de tek açıklıklı BM1/1,0 kirişi için Mat084/085 malzeme modeli kullanılarak analizi yapılan 4 CPU işlemcili bir bilgisayar ile analiz süresi 50 mm’lik solid eleman için yaklaşık olarak 8 dk iken 25 mm’lik solid eleman için bu süre 40 dk sürmüştür. Farklı malzeme modellerinde ve farklı kiriş örneklerinde bu süre 4 saate çıkabilmektedir.



Şekil 4.2. BM1/1,0 kirişi 25 mm 50 mm DYNA analizi sonuçlarının referans veri sonucuna göre karşılaştırılması

4.2. Malzeme Modelleri

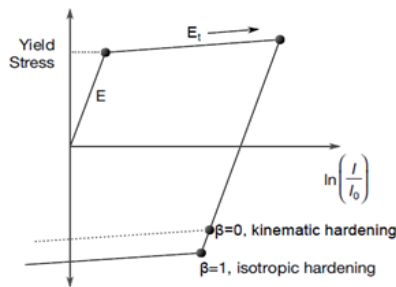
Burada derin kirişlerde kullanılan betonun enine ve boyuna donatılarının davranışlarının modellenmesinde kullanılacak olan beton ve çelik malzeme modelleri açıklanmaktadır. Ls-DYNA malzeme kütüphanesinde, beton ve çelik malzeme davranışı simülasyonu için birçok malzeme modeli bulunmaktadır. Bazı malzeme modelleri basit tanımlama gerektirirken bazılarının tanımlanmasında kompleks parametreler veya detaylı test verileri gerekebilmektedir. Örneğin bazı modellerin tanımlanması için akma dayanımı,

elastisite modülü gibi basit birkaç malzeme parametresi yeterli olurken bazı diğer modeller için birebir malzeme davranışının tanımlanması gerekebilmektedir. Deneysel veriler ışığında sayısal analizden elde edilmesi gereken çıktılar düşünülerek çeşitli malzeme modelleri seçilerek uygun olanının tespiti için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Her bir malzeme modelinin farklı formülasyonlara sahip olduğu düşünülerek yapılacak olan elastik ötesi derin kiriş analizlerinde seçilen malzeme ile ortaya çıkacak sayısal hatalar, yakınsama problemleri ve analiz süreleri uygun ve ideal malzeme modeli seçiminde etkili olacaktır.

4.2.1. Çelik malzeme modelleri

4.2.1.1. Mat003 plastic kinematic

Kiriş donatılarının malzeme modeli için plastic kinematic malzeme modeli kullanılmıştır. Şekil 4.3'te plastic kinematik malzeme modeli için birim şekil değiştirme-gerilme eğrisine yer verilmiştir. Model çift-doğrusal bir davranış göstermektedir ve aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi birim şekil değiştirme-gerilme eğrisine sahiptir. Bu malzeme modelinin programda tanımlanması için girdisi gereken parametreler şunlardır: Akma dayanımı, Elastisite modülü (E), Teğet modülü (E_t) ve Sertleşme parametresidir (β).



Şekil 4.3. Plastic kinematic malzeme modeli birim şekil değiştirme-gerilme eğrisi

4.2.2. Beton malzeme modelleri

Kiriş betonunun modellenmesi için programda çok sayıda beton malzeme modeli mevcuttur. Bazı beton modelleri sadece birkaç parametreden oluşan basit kullanıcı girdisi gerektirirken bazıları kompleks beton davranış verisi ve bilgisi gerektirmektedir. Bu çalışma

kapsamında, kompleks beton davranış model girdisi gerektirmeyen malzeme modelleri kullanılmıştır.

4.2.2.1. Mat084/085 winfrith concrete

Bu beton malzeme iki ayrı malzeme modeli olarak bulunmaktadır. LSTC Malzeme kılavuzuna göre (LSTC, 2013) Mat 84 Winfrith Concrete Reinforcement olarak tanımlanan malzeme modeli, formülasyonunda inşaat donatısı takviyesini içermektedir. Donatı takviyesi belirli eleman gruplarında belirli bir katmanda iki boyutlu bir malzeme olarak tanımlanabilmektedir. Donatı takviye miktarı, elemandaki (veya tabakadaki) çeliğin enine kesit alanının betonun enine kesit alanına oranı olarak tanımlanabilmektedir. Mat 084/085 Winfrith Concrete malzeme modelinde ise donatı takviyesi bulunmamaktadır. Bu nedenle donatı miktarı birebir modelleme ile farklı elemanlarla analiz modelinde tanımlanmalıdır. Bu iki modelden sadece Mat 84 dinamik analizler için gereken gerinim hızına sahiptir. Polat (2020) tarafından açıklandığı gibi bu malzeme modeli, Broadhouse ve Neilson (Broadhouse ve Neilson, 1987) ve Broadhouse'un (Broadhouse, 1995) çalışmalarına dayanmaktadır. Bu malzeme modeli tanımında, mühendislikte sıklıkla kullanılan betonun özellikleri gibi çok az girdi gerektirmesi ve çeşitli yükleme koşulları için betonun yapısal modellemesi açısından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzeme modelinin en önemli özelliği, eleman başına üç yönde çatlak düzlemlerine izin vermesi ve çatlak oluşumunun analiz sonuçlarında görsel olarak da simüle edilebilmesidir (Polat, 2020). Tanımlanması gereken malzeme parametreleri şunlardır: Teğet modülü, Poisson oranı, Tek eksenli basınç dayanımı, Tek eksenli çekme dayanımı, Çatlak genişliği (gerinim oranı=0 ise aksi halde kırılma enerjisi kullanılmalıdır) ve; Agrega boyutu. Winfrith Beton Modelinde kullanılan çatlak formülasyonu Wittmann ve diğerlerine dayanmaktadır. Mat084/085 malzeme modeli; betonda çekme veya basınç gerilmeleri altında oluşabilecek çatlamları içermektedir ve agrega boyutu, beton basınç dayanımları, yükleme oranları, çimento-su oranları ve test numunesi boyutu gibi çeşitli beton parametrelerini içeren çatlak genişliği formülasyonuna sahiptir. (Schwer, 2011)

4.2.2.2. Mat 159 CSCM concrete

Sürekli Yüzey Kapağı Modeli (CSCM), Ls-DNYA'da en yaygın kullanılan beton modellerden biridir. LSTC Malzeme kılavuzuna göre (LSTC, 2013) bu malzeme modeli Ls-

DYNA'daki katı elemanlar için kullanılabilir. Kullanıcı, normal dayanımlı beton için kendi malzeme özelliklerini girme veya varsayılan malzeme özelliklerini isteme seçeneğine sahiptir. Bu malzeme modeli kesme akma yüzeyi ile sertleştirme kapağı arasında düzgün bir kesişme noktasına sahip bir kapak modelidir. İlk hasar yüzeyi, akma yüzeyi ile çakışır. Model; malzemenin sertleşme, hasar ve hız bağımlılığını dikkate alır. Şu anda, yapılarının düşük hızlı etki alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (LSTC, 2013)

Ls-DYNA'daki CSCM model uygulaması, beton malzeme mekaniğini yüksek düzeyde doğrulukla simüle eden çok sayıda temel özelliğe sahiptir. Model, izotropik kurucu denklemler ve tepe noktası öncesi sertleştirme için ötelemeli üç gerilimle değişmeyen mukavemet yüzeyi, genişleyen ve daralan bir sertleştirme kapağı kullanır. Bağımsız çekme (kırılgan) ve sıkıştırma (sünek) hasarına dayalı yumuşatma takibi, sıkıştırma gerilimi veya gerinim durumlarında sanal çatlak kapanmalarının simüle edilmesini sağlar. Yüksek gerinim oranlı uygulamalar için hız etkileri, malzeme mukavemetini ve kırılma enerjisi salımı tahminini etkiler. Model, ağ hassasiyetini azaltan yerleşik bir enerji düzenleme mekanizmasına sahiptir. Delme ve kabuklanmanın FE simülasyonu için malzeme erozyonu desteklenir, model ağsız parçacık ayrıklaştırma yöntemlerini destekler. Ayrıca model, dahili bir otomatik model kalibrasyon prosedürünü etkinleştiren kolay bir giriş rejimine sahiptir. Model, kolay giriş rejimi nedeniyle sınırsız basınç dayanımına ve ortalama agrega boyutuna dayalı olarak tüm malzeme giriş parametrelerini otomatik olarak üretebilir. Bu yetenek, malzeme özelliklerine ilişkin hiçbir deneysel veri bulunmadığında tasarım aşamasında somut nesneleri simüle edebildiği için önemlidir (Novozhilov ve ark., 2022). Tanımlanması gereken malzeme parametreleri olarak verileri girilen malzeme parametreleri şunlardır: Beton kütlesi, beton basınç dayanımı ve agrega boyutu.

4.2.2.3. Mat 072R3 concrete damage rel3

LSTC Malzeme kılavuzuna göre (LSTC, 2013) bu malzeme modeli Karagozian & Case (K&C) Beton Modeli olarak da bilinmekte ve üç kesme kırılma yüzeyi kullanmaktadır. Bu beton malzeme modelinin Pseudo-TENSOR Modeline (Malzeme Türü 16) dayanan temelleri vardır. Rel3 yani Sürüm III olarak nitelendirilen ve burada kullanılan son sürümünde gereken beton malzeme parametreleri basit beton özellikleri ile üretilmektedir. Bu beton modeli malzeme tamimi için iki farklı alternatif sunmaktadır. Birinci alternatifte karmaşık beton malzeme parametreleri kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. İkinci

alternatifte ise karmaşık malzeme parametreleri sadece betonun basınç dayanımı gibi pratik mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan beton özellikleri tanımlanmasıyla kendiliğinden oluşturulmaktadır (Polat, 2022). Bu çalışmada ikinci alternatif, genel olarak betonun basınç dayanımı inşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla tasarımcılar tarafından kullanıldığından tercih edilen malzeme tanım yöntemi olmuştur. Benzer şekilde, modellemesi yapılacak olan derin kiriş beton numuneleri için detaylı malzeme parametreleri rapor edilmediğinden kompleks malzeme parametreleri tanımlanması yani birinci alternatif malzeme tanımı yapılması söz konusu değildir. Tanımlanması gereken malzeme özellikleri: Beton yoğunluğu, Beton basınç dayanımı.

4.2.2.4. Mat 16 pseudo tensor

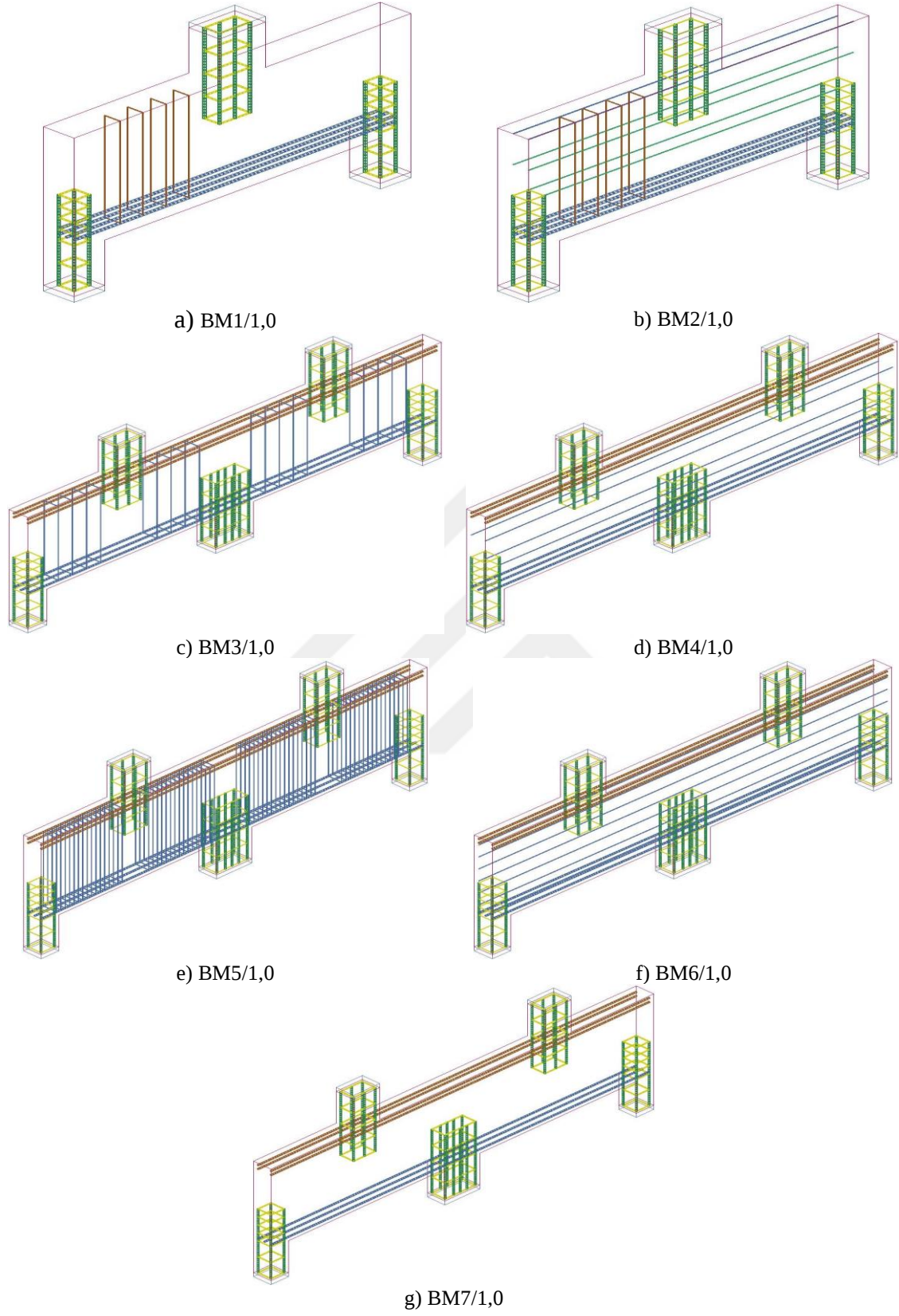
LSTC Malzeme kılavuzuna göre bu model, darbesel yüklere maruz kalan gömülü çelik betonarme yapıları analiz etmek için kullanılmıştır. Bu model Tresca sınırına sahip Mohr-Coulomb akma yüzeyi gibi standart jeolojik modellerin uygulanması için çok uygundur (LSTC, 2013)

Bu somut model, başlangıçta Ls-DYNA 'da (orijinal olarak DYNA3D) malzeme modeli tip 16 olarak uygulanan ve şimdi Ls- DYNA 'da Malzeme modeli tip 72 olarak mevcut olan Sözde tensör modeline dayanmaktadır. Orijinal modelde yapılan değişiklikler, malzeme yanıtının hem gerilim hem de sıkıştırma tipi yükleme için standart tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli testler için deneysel gözlemleri takip etmesini sağladı. Şimdilik Ls-DYNA 'da sunulan K & C beton malzeme modelinin son versiyonu model tip 72 sürümüdür. Normal kullanıcı için bu malzeme modelinin daha önce uygulanmasının bir dezavantajı, gerekli olan ezici girdi miktarıydı. Sürüm III tarafından sağlanan en önemli kullanıcı iyileştirmesi, yalnızca betonun sınırlandırılmamış sıkıştırma mukavemetine dayanan bir model parametre oluşturma yeteneğidir. Bu modelin öncelikle model parametrelerini otomatik olarak oluşturma seçeneğiyle kullanılması beklenir. Ancak parametreleri manuel olarak değiştirme seçeneği kalır. Bu çalışmadaki amaç modeli araştırmak olduğundan parametreleri deneysel üç eksenli somut sonuçlara göre ayarlamak için manuel modifikasyon seçeneği kullanılmaktadır. Ayrıca simülasyon sonuçlarında otomatik olarak parametre oluşturulan modeli göstermek için K & C gösterimini kullanıyoruz. Beton Hasar modeli, basınca bağlı olarak şekil değiştiren üç bağımsız arıza yüzeyine sahip plastisite bazlı bir formülasyondur. Beton için plastisite modeli temel gerilme uzayında temsil edilir. Arıza

yüzeylerinin genel özellikleri, sapma düzlemindeki kesit şekli ve meridyen düzlemlerindeki izi ile tanımlanır. Kurucu model, stres değişmezleri açısından tanımlar. Tanımlanması gereken malzeme özellikleri: Beton kütlesi, poisson oranı, beton basınç dayanımı.

4.3. Derin Kiriş Modelleri Donatı Detayları

Sayısal Modellenen referans kiriş modellerin LS-DYNA ile izometrik görünimleri aşağıda Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Donatı detayları referans kirişi modeli bölümünde Tablo 3.2’de yer almaktadır. Örnek olarak açıklık/derinlik oranı 1,0 olan kirişlerin donatı boyutu ve düzenini belirtilecek olursak: Şekil 4.4’te tek açıklıklı BM1/1,0 kirişinde; 6 adet 20M’lik alt donatı, sol açıklıkta 4 adet 6mm’lik etriye, alt mesnetlerde 4 adet 20M’lik boyuna donatı ve 6 adet 6 mm’lik etriye, üst mesnette 6 adet 20M’lik boyuna donatı ve 5 adet 6 mm’lik etriye kullanılmıştır. Şekil 4.4’te tek açıklıklı BM2/1,0 kirişinde; BM1/1,0 kirişine ek olarak 4 adet 6 mm’lik gövde donatısı ve 2 adet 6mm’lik üst donatı kullanılmıştır. Şekil 4.4’te çift açıklıklı BM3/1,0 kirişinde; 4 adet 20M’lik üst donatı, 3 adet 20M’lik alt donatı, her açıklıkta 4 adet 6mm’lik etriye, sol ve sağ alt mesnette 4 adet 20M’lik boyuna donatı ve 6 adet 6 mm’lik etriye, alt orta mesnette 10 adet 20M’lik boyuna donatı ve 5 adet 6mm etriye, üst mesnette 6 adet 20M’lik boyuna donatı ve 5 adet 6 mm’lik etriye kullanılmıştır (mesnetlerde kullanılan donatı boyutu ve düzeni tüm çift açıklı kiriş örnekleri için aynıdır.). Şekil 4.4’te BM4/1,0 kirişinde; 4 adet 20M’lik üst donatı, 3 adet 20M’lik alt donatı ve 4 adet 6 mm’lik gövde donatısı kullanılmıştır. Şekil 4.4’te BM5/1,0 kirişinde: 4 adet 20M’lik üst donatı, 3 adet 20M’lik alt donatı ve her açıklıkta 16 adet 6 mm’lik etriye kullanılmıştır. Şekil 4.4’te BM6/1,0 kirişinde: 4 adet 20M’lik üst donatı, 3 adet 20M’lik alt donatı ve 12 adet 6 mm’lik gövde donatısı kullanılmıştır. Şekil 4.4’te BM7/1,0 kirişinde: 4 adet 20M’lik üst donatı, 3 adet 20M’lik alt donatı kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Modellenen kirişlerde donatılar: a) BM1/1,0; b) BM2/1,0; c) BM3/1,0; d) BM4/1,0; e) BM5/1,0; f) BM6/1,0; ve g) BM7/1,0

5. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

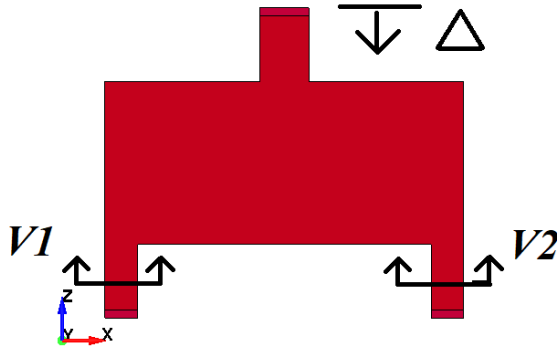
Bu bölümde, kiriş sonlu eleman modellerinin analizinde uygulanan adımlar açıklanmaktadır. Burada açıklanan adımlar gösterim açısından tek açıklıklı bir kiriş üzerinden örneklenmiştir ancak açıklanan tüm hususlar analiz edilen bütün modeller için geçerlidir.

Kiriş modellerinin analizi deplasman yüklemesi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu eleman modellerine aşağı yönde (-Z Yönü) statik monotonik deplasman uygulanmıştır. Şekil 5.1 tek açıklıklı bir kiriş modeli üzerine yapılan deplasman uygulamasını ve kesme kuvvetlerinin model üzerinde tespit lokasyonlarını göstermektedir. Kiriş modelinin sol açıklık kesme kuvveti talebi, sol mesnet üzerinde alınan bir enkesitteki Z yönündeki eksenel kuvvet talebinin elde edilmesiyle sağ açıklıktaki kesme kuvveti talebi, sağ mesnet üzerinde alınan bir enkesitteki Z yönündeki eksenel kuvvet talebinin elde edilmesiyle elde edilmiştir. Toplam model dayanımı veya taşıma gücü bu iki mesnet reaksiyonlarının toplamı şeklinde elde edilmiştir (yani $V1+V2$).

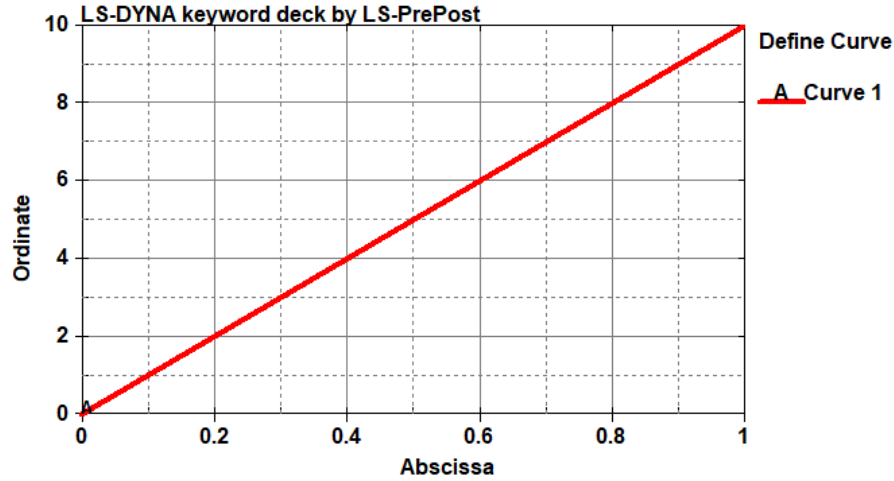
Şekil 5.2 programda tanımlanan deplasman yüklemesi eğriliğini göstermektedir. Bu grafikte apsis zamanı, ordinat ise yer değiştirmeyi (mm) göstermektedir. 10 mm'lik bir yer değiştirme 1 saniyelik bir zaman diliminde doğrusal bir artış şeklinde tanımlanmıştır. Bu deplasman eğriliği, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi orta kolon üzerinde bulunan bütün düğüm noktalarına uygulanmıştır. Doğrusal olmayan analiz, programda implicit solution çözüm algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz çözümünde, tanımlanan deplasman eğriliği $dt=0.001$ saniyelik yükleme adımları (dt) ile uygulanmıştır. Modelde oluşan deformasyonlar, gerilmeler ve kuvvetler her adımda kaydedilmiştir. Sonuçlar serbest cisim diyagramları kullanılarak ve denge ile gerinim uyumluluğu koşulları doğrulanarak değerlendirilmiştir.

Sayısal analizde, önceki bölümde açıklanan çelik ve beton malzeme modelleri kullanılmıştır. Her bir malzeme modeli ile doğrusal olmayan elastik ötesi analizler yapılmış, kiriş orta sehiminin fonksiyonu olarak dayanım eğrileri, donatılar üzerindeki gerinim ve kuvvet talepleri ve bazı modellerde beton çatlama verileri elde edilmiştir. Her bir kiriş modeli için, farklı malzeme modellerinden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Uygun malzeme modelinin tespiti için yukarıda bahsedilen analiz sonuçlarının deneysel kiriş dayanımlarıyla ve davranışlarıyla uyumluluğu esas alınmıştır. Ayrıca mesnet sınır koşulu olarak referans verideki gibi tek açıklıklı kirişler için her iki

mesnedinde ankastre, çift açıklı mesnetler için ise ortadaki mesnet ankastre, sol ve sağ açıklıktaki mesnetler için ise kayıcı mesnet kullanılmıştır. Ayrıca Ek 3'te mesnet sınır koşullarının derin kirişler üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla çift açıklıklı kirişler için mesnet sınır koşulu olarak her bir mesnet ankastre olarak tanımlanmış ve bu analiz sonuçlarına Şekil Ek 1'de yer verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre mesnetlerin ankastre olması durumunda kesme dayanım hesaplarında ciddi bir artışın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. Model üzerine yapılan deplasman uygulaması ve kesme kuvvetleri tespit lokasyonları



Şekil 5.2. Model analizinde kullanılan zaman-deplasman eğrisi

6. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ SONUCLARI

6.1. BM1/1.0 Modeli

Referans kirişte yer alan kirişler için Ls-DYNA ile modelleme yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Örnek olması açısından BM1/1,0 üzerinden yapılan Ls-DYNA sonuç verileri benzer şekilde tek açıklıklı BM2/1,0 kirişi için de yapılabilir. Şekil 6.1’de BM1/1,0 kirişinin sonlu eleman modelini göstermektedir. Bu kiriş modelinde 6 adet 20M (19,5 mm) alt donatı ve referans kirişte N olarak adlandırılan kirişin sol tarafına 4 adet 6 mm’lik etriye kullanılmıştır. Yükleme ve mesnet bölgelerinde 6 adet 20M’lik donatı ve 5 adet 10M (11,3mm) etriye kullanılmıştır. Donatı detayları hem BM1/1,0 alınan kiriş hem de diğer kirişler için Bölüm 3’te Tablo 3.1’de yer almaktadır.

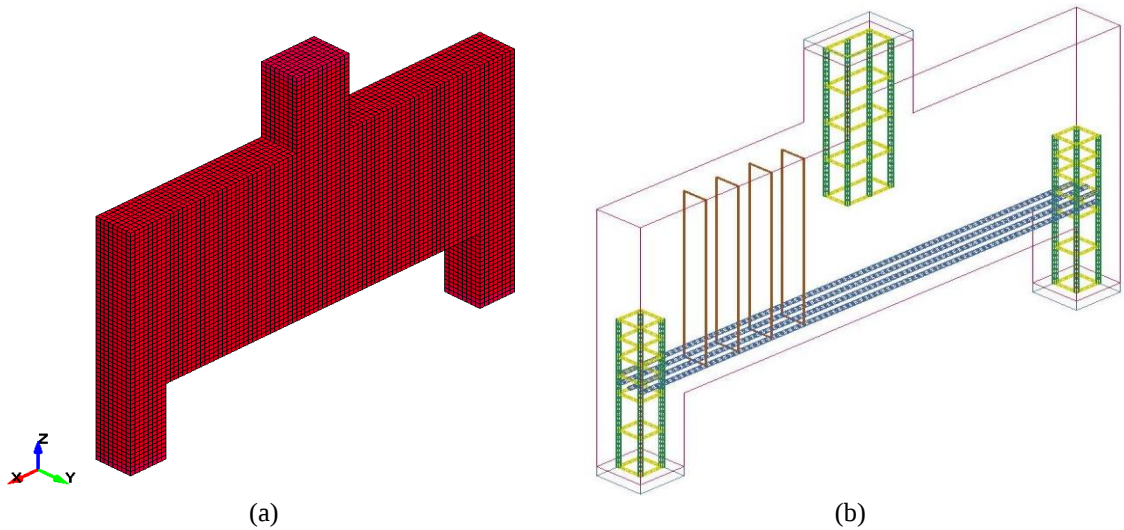
Şekil 6.2’de BM1/1,0 kirişi için sehim-kuvvet değerlerinin Ls-DYNA verileri ve referans kiriş verilerin deneysel grafiği gösterilmiştir (diğer örnekler için grafikler Bölüm 6 da Şekil 6.32’ de yer almaktadır). Tüm kirişler için 4 farklı beton malzeme modeli ve tek bir çelik malzeme modeli (Mat003 Plastik Kinematik) kullanılmıştır. Şekil 6.2’de referans veri yaklaşık 5,5 mm yer değiştirmede 1204 kN maksimum kuvvet dayanımına ulaştığı gözlemlenmiştir. Her bir malzeme modelindeki sonuçlar referans veri sonucuna karşı irdelenirse:

- I. Mat084/085 malzeme modeli için; Mat084/085 malzeme modeli yaklaşık 5 mm yer değiştirmede 1190 kN değerine ulaşmıştır. Elde edilen veriler göre %1,16 gibi maksimum kuvvette bir değişim gözlemlenmiştir. Yer değiştirmelere bakıldığında ise yaklaşık 0,5 mm fark ile Mat084/085 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiği gözlemlenmiştir. Bu küçük farklılık Mat084/085 malzeme modeli için referans verideki deneysel sonuçlar ile arasında belli bir korelasyonun olduğunu bizlere göstermektedir. (Dikkat edilirse Mat084/085 malzeme modeli için Şekil 6.2’de dayanımının 5mm düşüp tekrar eski dayanıma ulaştığı gözlemleniyor bunun nedeni çökme değerinin tanımlanmadığı içindir.)
- II. Mat159 malzeme modeli için; Mat159 malzeme modeli yaklaşık 4,7 mm yer değiştirmede 1282 kN değerine ulaşmıştır. Maksimum kuvvet referans kirişe göre %6,47’lik bir kuvvette değişim gözlemlenmiştir. Yer değiştirmelere bakıldığında ise yaklaşık 0,8 mm fark ile Mat159 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiği

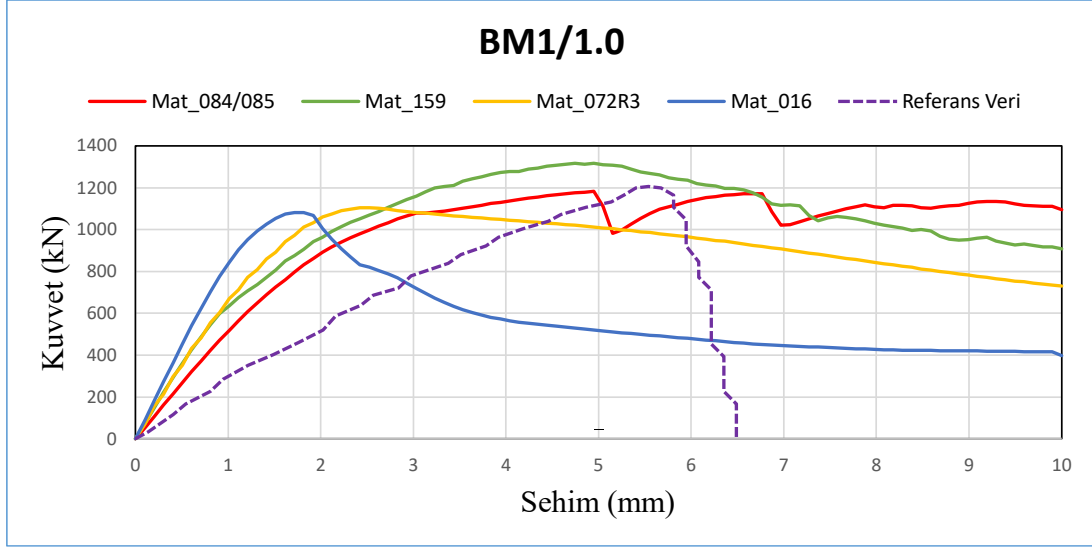
gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli içinde deneysel sonuçlar ile arasında belli bir korelasyonun olduğu bizlere gösterir.

- III. Mat072R3 malzeme modeli için; Mat072R3 malzeme modeli yaklaşık 2,5 mm yer değiştirmede 1079 kN değerine ulaşmıştır. Maksimum kuvvet referans kirişe göre %10,3'lük bir kuvvette değişim gözlemlenmiştir. Yer değiştirmelere bakıldığında ise 2,8 mm fark ile Mat072R3 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiği gözlemlenmiştir
- IV. Mat016 malzeme modeli için; Mat016 malzeme modeli yaklaşık 1,8 mm yer değiştirmede 1085 kN değerine ulaşmıştır. Maksimum kuvvet referans kirişe göre %9,8'lik bir kuvvette değişim gözlemlenmiştir. Yer değiştirmelere bakıldığında ise 3,8 mm fark ile Mat016 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak BM1/1,0 kirişi için Ls-DYNA verilerinin maksimum dayanımlarının referans kirişe göre tutarlılık gösterdiği gözlemlenirken sehim verilerinin Mat084/085 ve Mat159 malzeme modelleri için belli bir korelasyonda olduğu ancak Mat072R3 ve Mat016 malzeme modelleri için referans verilere göre daha erken sehim değerlerinde maksimum kuvvete ulaştığı gözlemlenmektedir.

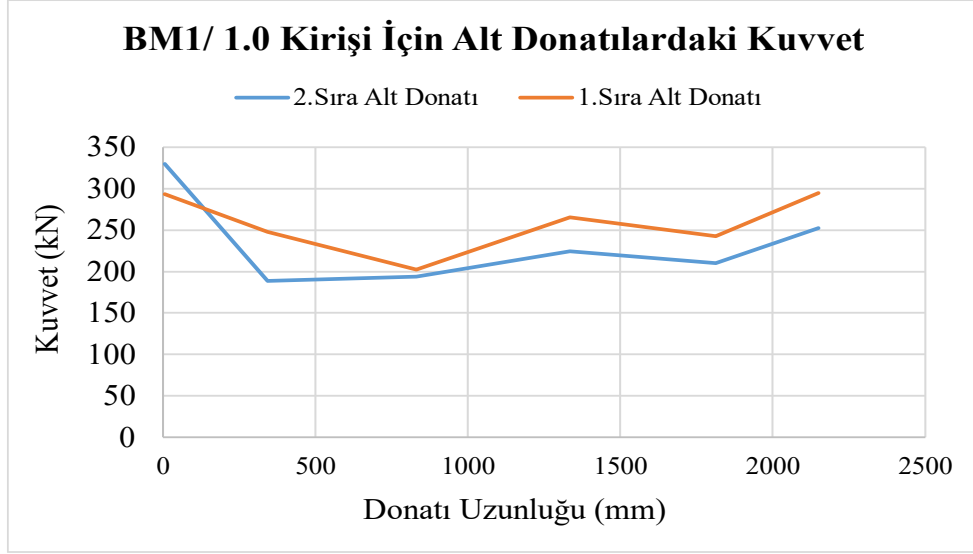


Şekil 6.1. BM1/1,0 kirişi için sonlu eleman modeli: a) Beton eleman ve b) Donatı elemanları



Şekil 6.2. Sehime bağlı kuvvet eğrisi

BM1/1,0 kirişi için göçme durumundaki donatıların maruz kaldığı yükün belirli noktalardaki kuvvet değerleri referans veride alınıp Şekil 6.3' te gösterilmiştir. Ø20 'lik bir donatının çekme kuvveti 120 kN'dur. Bizler burada 3 donatının toplamını aldığımız için donatının çekme kuvveti 360 kN olacaktır. Yani bizler burada donatıların 360 kN' da akmasını bekleriz. Şekil 6.3'e bakıldığında donatıların yaklaşık 342 kN'luk bir çekmeye maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda donatıların akmadığı ancak akmaya yakın bir kuvvete maruz kaldığını söyleyebiliriz. Şekil 2.1Şekil 6.3'de ki veri bizler için Bölüm 6.1.3'teki alt donatılardaki eksenel kuvvetlerin sayısal analiz sonuçları için dayanak oluşturacaktır.



Şekil 6.3. Göçme durumundaki alt donatılarda oluşan kuvvetler

6.1.1. Minimum asal gerilme dağılımları

Şekil 6.4'te Mat 084/085, Mat 159, Mat 072R3 ve Mat 016 malzeme modelleri için kiriş orta açıklık sehimi, $\Delta=2,5$ mm'deki minimum asal gerilme konturları görülmektedir. Basınç gerilmelerinin negatif değerler ile (şekilde alt negatif sınır gerilmesi mavi renk ile gösterilmiştir), çekme gerilmelerinin ise pozitif değerler (şekilde üst pozitif sınır gerilmesi kırmızı renk ile gösterilmiştir) ile tanımlandığı not edilmelidir. Şekilde sadece negatif gerilme değerlerini gösteren değişim konturları gösterilmiştir (kırmızıdan maviye doğru gerilme değerleri negatif olarak artış göstermektedir ve buna bağlı olarak örnek kirişte basınç gerilmelerin nerede daha çok yoğunlaştığı gözlemlenmektedir).

- I. Şekil 6.3'te $\Delta=2,5$ mm'de Mat084/085 modeli için kiriş yaklaşık 994 kN 'lük bir yüke maruz kalmaktadır. Görüldüğü üzere kiriş destek bölümünde kısmi bölgelerinde gerilmelerin akışının maksimuma ulaştığı, basınç çubuğundaki bölgelerin ise gerilmeleri rahat bir şekilde destek bölgelerine aktardığı ve bu basınç bölgeleri olarak adlandırdığımız kısımda henüz nihai gerilmelere ulaşmadığı gözlemlenmektedir.
- II. Şekil 6.3'te Mat159 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=2,5$ mm'deki kuvvetin yaklaşık 1034 kN 'luk kuvvet olduğu gözlemlenmekte ve gerilmelerin destek bölgelerinde yoğun gerilme artışı, basınç bölgelerinde ise gerilmelerin az olduğu gözlemlenmektedir.

III. Şekil 6.3'te Mat072R3 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=2,5$ mm'deki kuvvetin yaklaşık 1079 kN luk kuvvet olduğu gözlemlenmekte ve bu kuvvet bu malzeme modeli için maksimum kuvvete denk gelen sehîm değeri'dir. Minimum asal gerilme konturların davranışlarında diğêr malzeme modellerinden farklı bir gerilme akışına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Basınç bölgelerindeki gerilme akışının diğêr malzeme modellerine benzer bir yaklaşım gösterirken yükleme noktasından orta açıklığa kadar oluşın iki ayrı kol şeklindeki gerilme akışı beton davranışından farklı bir gerilme davranışını ortaya koyduğunu düşündürmektedir.

IV. Şekil 6.3'te Mat016 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=2,5$ mm'deki kuvvetin yaklaşık 1085 kN luk kuvvet olduğu gözlemlenmekte ve gerilmelerin destek bölgelerinde yoğun gerilme artışı, basınç bölgelerinde ise gerilmelerin az olduğu gözlemlenmektedir.

Sonuç olarak $\Delta=2,5$ mm'deki minimum asal gerilme konturlarında 4 malzeme modelinde de benzer gerilme dağılımları oluşmuş, maksimum kuvvete denk gelen sehîm değeri Mat072R3 ve Mat016 malzeme modellerinde gerilme yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

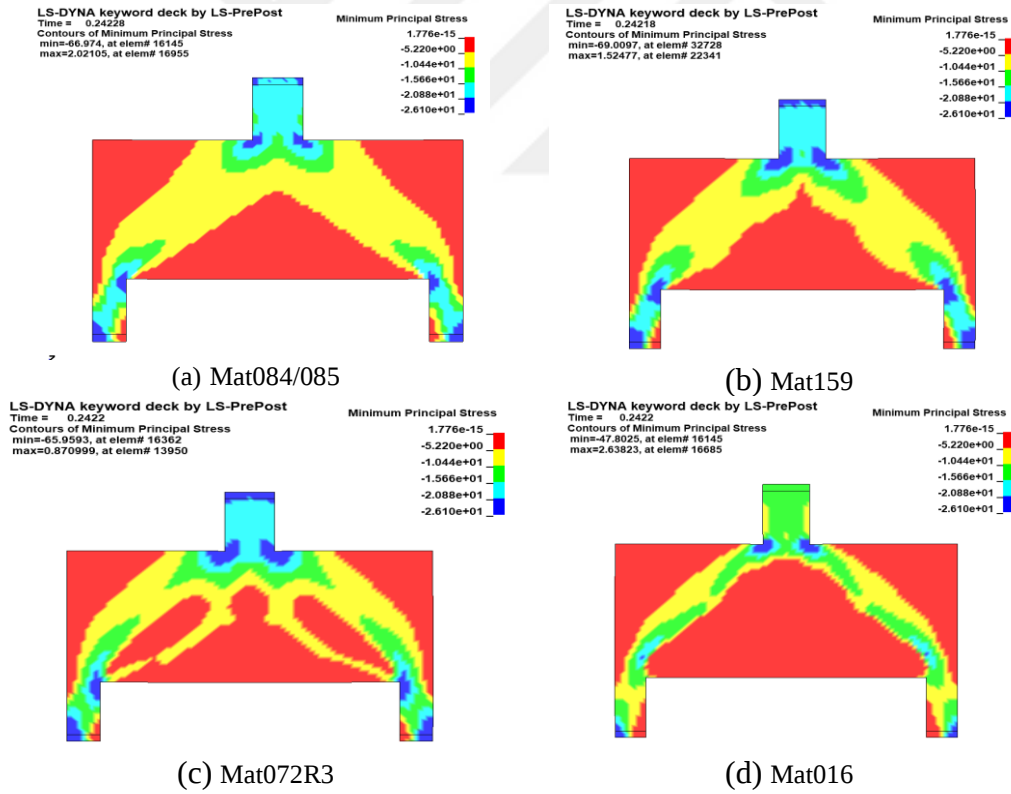
Şekil 6.5'te Mat084/085, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modeli için $\Delta=7,5$ mm'deki minimum asal gerilme konturları görölmektedir.

- I. Şekil 6.5'de 7,5 mm'de Mat084/085 modeli için kiriş yaklaşık 1094 kN 'luk bir yüke maruz kalmaktadır. 2,5 mm'deki dayanımla kıyaslandığında dayanımın arttığı ve buna bağılı olarak Şekil 6.5.(a)'daki minimum asal gerilme konturu incelendiğinde gerilme yoğunluğunun arttığı gözlemlenmektedir.
- II. Şekil 6.5'de Mat159 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak 7,5 mm'deki kuvvetin yaklaşık 1132 kN luk kuvvet ve 2,5 mm'deki karşılık gelen dayanımın 7,5'teki dayanımdan düşük olduğu ve gerilmelerin basınç bölgelerinde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca gerilmelerin simetrik olmadığı sağ açıklıktaki gerilmelerin daha yoğun ve karmaşık olduğu, sol açıklıkta ise gerilmelerin daha düzenli ve daha az olduğu gözlemlenmekte bunun nedeninin sol açıklığa atılan etriyelerin olduğu düşünölmektedir.
- III. Şekil 6.5'de Mat072R3 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak 7,5 mm'deki kuvvetin yaklaşık 873 kN luk kuvvet ve 2,5 mm'deki karşılık gelen dayanımın 7,5'teki dayanımdan büyük olduğu gözlemlenmekte ve buna

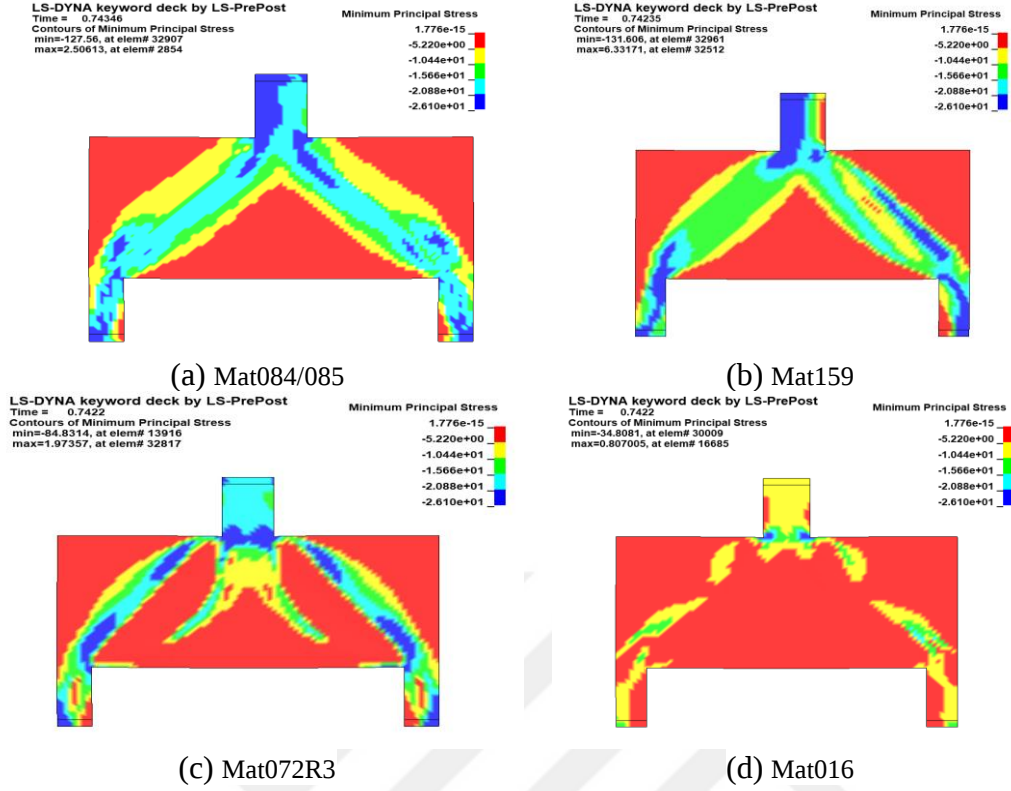
rağmen gerilmeler incelendiğinde gerilmelerin basınç bölgelerinde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir.

- IV. Şekil 6.5’de Mat016 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak 7.5 mm’deki kuvvetin yaklaşık 438 kN luk kuvvet ve 2,5 mm’deki karşılık gelen dayanımın 7,5’teki dayanımdan büyük olduğu gözlemlenmekte ve buna bağlı olarak gerilme akışının azaldığı ve kısmen kaybolduğu gözlemlenmektedir.

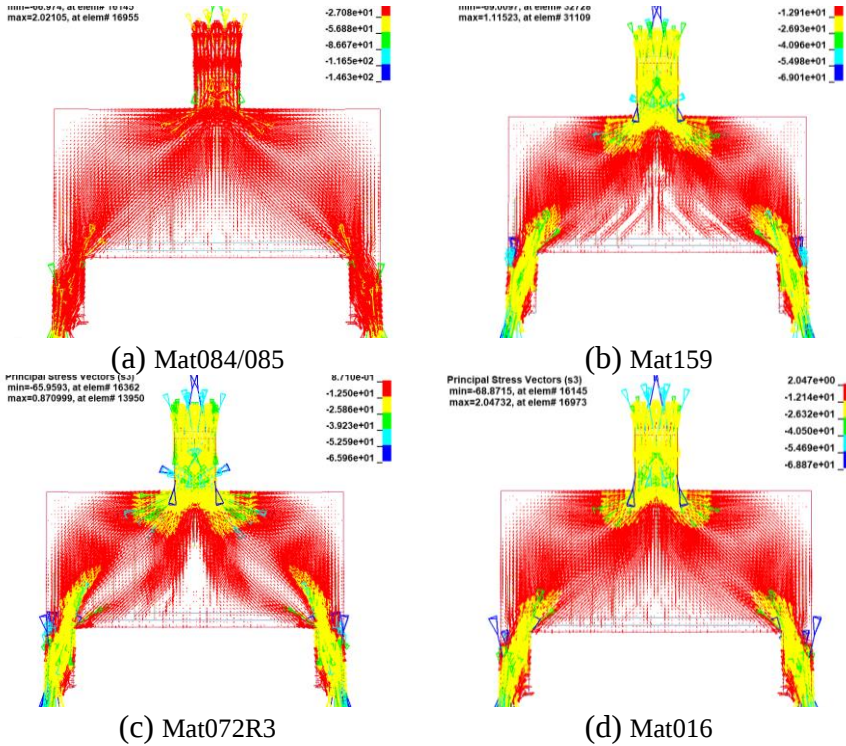
Şekil 6.6’da $\Delta=2,5$ mm’lik sehim için ve Şekil 6.7’de $\Delta=7,5$ mm’lik sehim için minimum asal gerilmelerin vektör şeklinde gösterimi yer almaktadır. Bu vektör gösterimleri bizlere gerilmenin akış yönünü göstermektedir. Aşağıda Şekil 6.6’da 2,5 mm’lik sehim için sırasıyla Mat084/085, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modelleri için minimum asal gerilme vektörleri gözlemlenmektedir. Yukarıda Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’te gerilme konturlarının benzer gösterimi aşağıda Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de vektörler üzerinde gösterilmiştir.



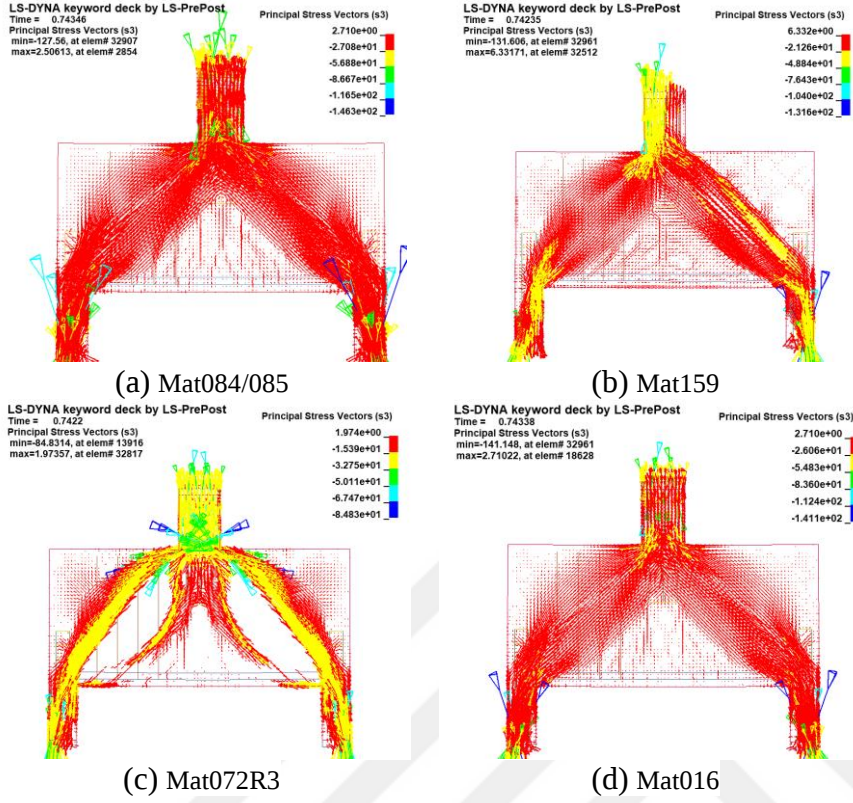
Şekil 6.4. Sehim=2,5 mm’de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016



Şekil 6.5. Sehîm=7,5 mm’de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016



Şekil 6.6. Sehîm=2,5mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

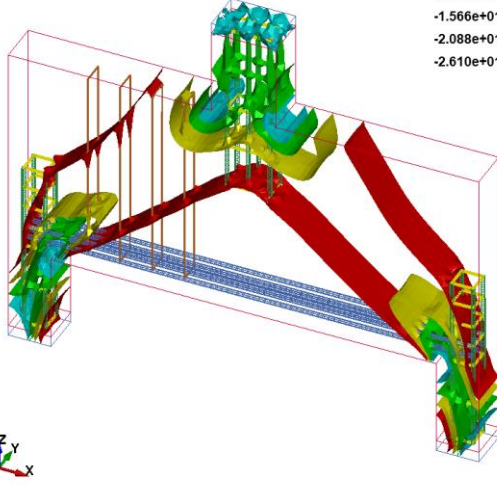


Şekil 6.7. Sehim=7,5 mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

Aşağıda Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da minimum asal gerilme eş yüzeyleri oluşumu yer almaktadır. Eş yüzey gösterimlerinde gerilmelerin yoğunlaştığı ve sınırladığı bölgeler çok rahat gözlemlenebilmektedir. Bu şekiller ayrıca oluşan STM bölgelerinin (özellikle basınç çubuklarının) kiriş kesme donatıları üzerindeki konumunu göstermesi açısından da önemlidir. Örneğin, Şekil 6.8’de oluşan diyagonal basınç çubuğunun üst ve alt yüzyelerinin sol açıklık kesme donatılarının üzerlerindeki konumu açıkça görülmektedir.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.2422
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-68.8715, at elem# 16145
max=2.04732, at elem# 16973

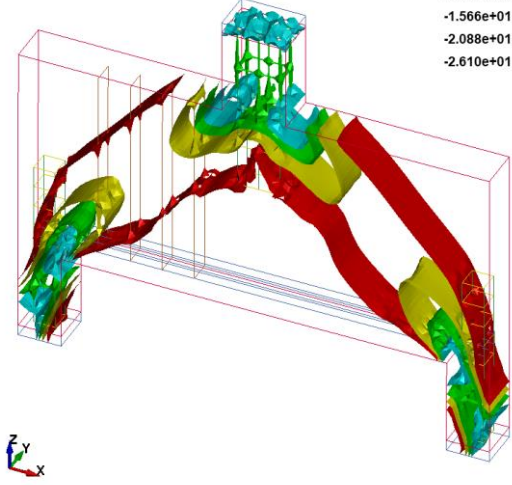
Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



(a) Mat084/085

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.24218
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-69.0097, at elem# 32728
max=1.52477, at elem# 22341

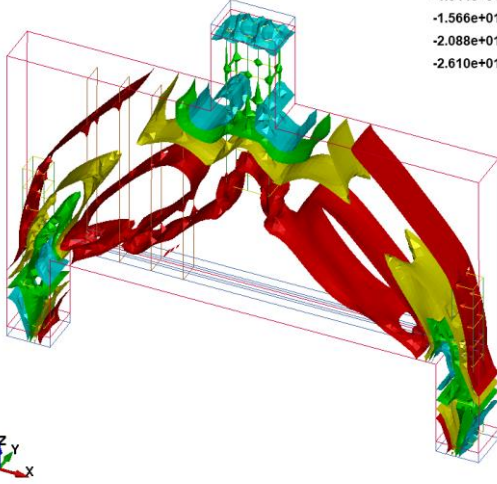
Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



(b) Mat159

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.2422
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-65.9593, at elem# 16362
max=0.870999, at elem# 13950

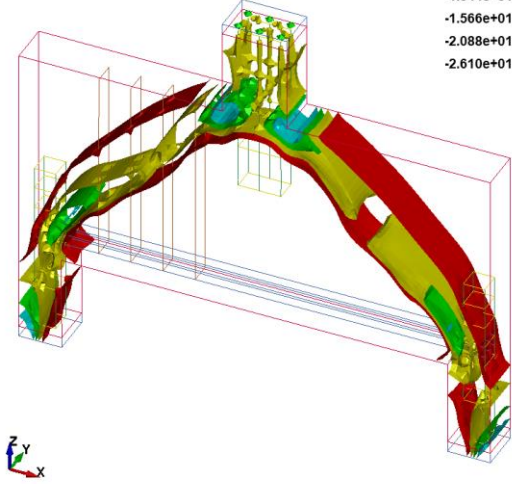
Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



(c) Mat072R3

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.2422
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-47.8025, at elem# 16145
max=2.63823, at elem# 16685

Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01

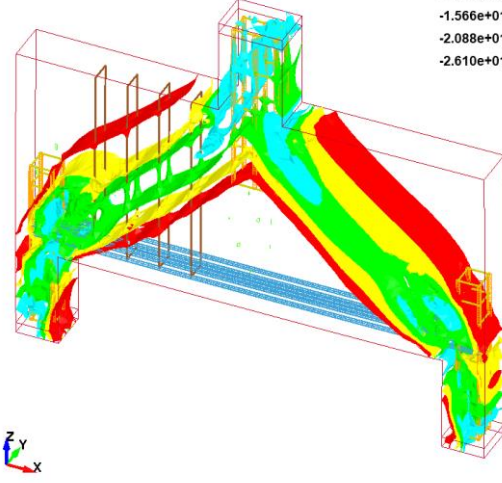


(d) Mat016

Şekil 6.8 Sehim=2,5 mm'de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.74346
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-127.56, at elem# 32907
max=2.50613, at elem# 2854

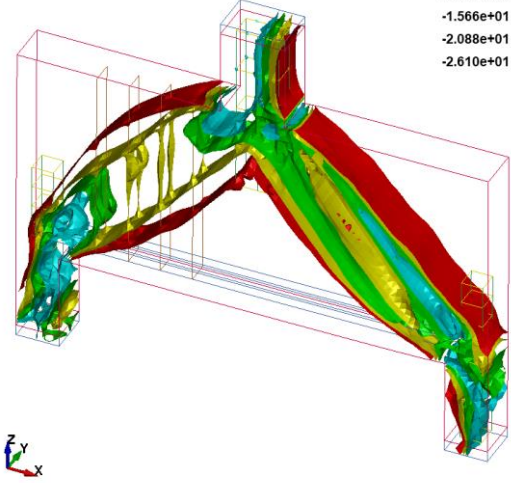
Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



(a) Mat084/085

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.74235
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-131.606, at elem# 32961
max=6.33171, at elem# 32512

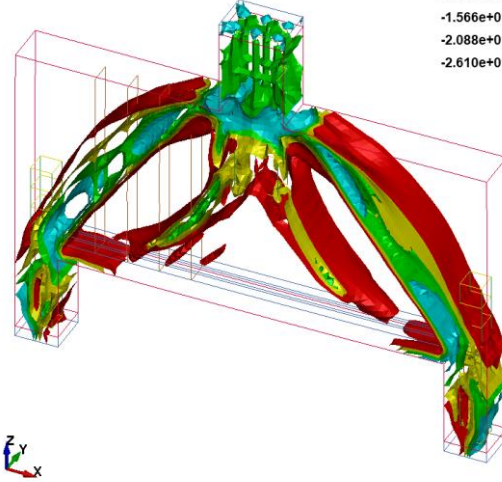
Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



(b) Mat159

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.7422
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-84.8314, at elem# 13916
max=1.97357, at elem# 32817

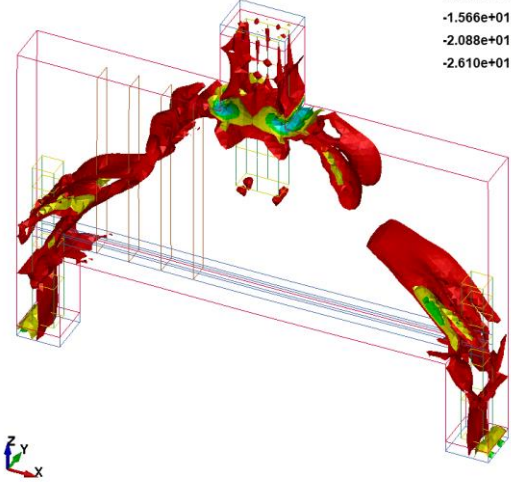
Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



(c) Mat072R3

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.7422
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-34.8081, at elem# 30009
max=0.807005, at elem# 16685

Minimum Principal Stress
1.776e-15
-5.220e+00
-1.044e+01
-1.566e+01
-2.088e+01
-2.610e+01



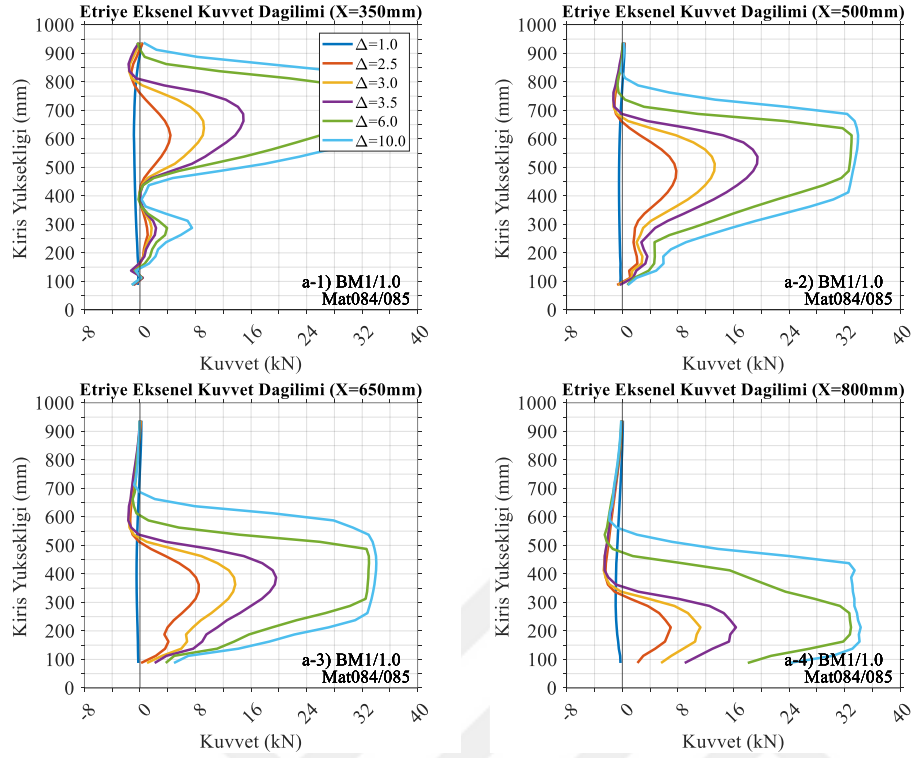
(d) Mat016

Şekil 6.9. Sehim=7,5 mm'de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

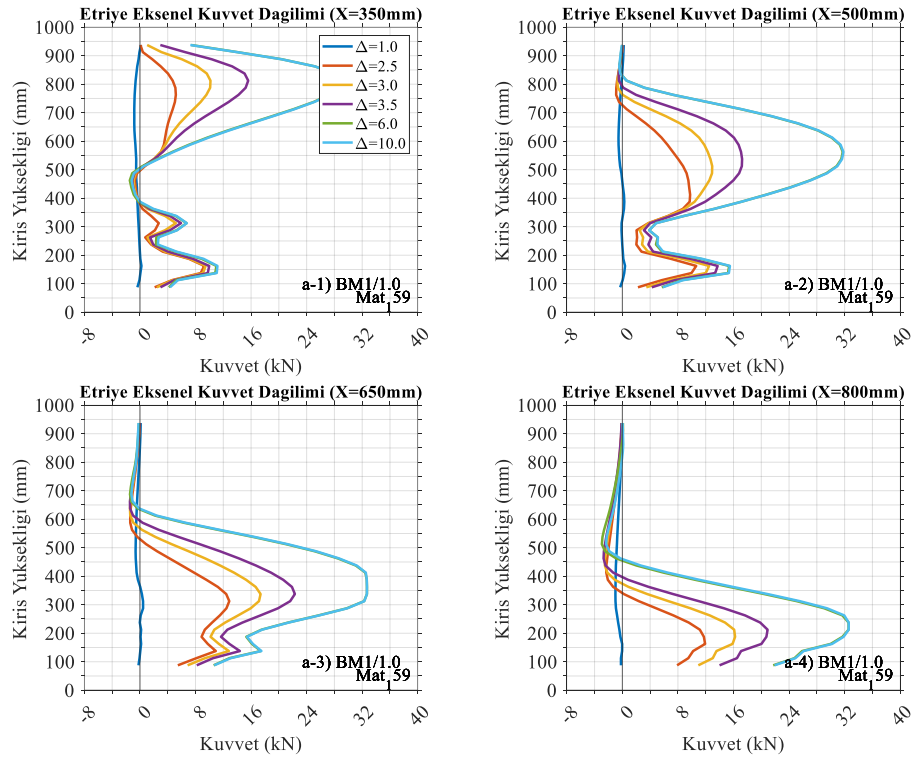
6.1.2. Kesme donatıları, eksenel kuvvet talepleri

Mat084/085, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modelleri için her bir etriyede oluşan eksenel kuvvet dağılımı sırasıyla Şekil 6.10-13'te yer almaktadır. Şekil 6.10'da görüldüğü üzere $X=350$ mm mesafesinde etriyenin üst kısımlarında gerilme artışının yoğunlaştığı alt kısımlara doğru gerilmelerin azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 6.10'da $X=500$ mm'ye bakıldığında gerilme akısının kiriş yüksekliğinin ortalarına doğru arttığı, Şekil 6.10'da $X=650$ mm için gerilmelerin kiriş alt kısmına doğru yöneldiği ve Şekil 6.10'da $X=800$ mm için gerilmelerin kiriş yüksekliğinin alt kısmında yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Yukarıda Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'e bakıldığında etriyelerin ve kirişte basınç çubuğunda oluşan gerilmelerin sınırladığı alanlar açık bir şekilde gözlemlenmektedir ve dikkat edilirse basınç çubuğunda oluşan gerilmelerin içinde kaldığı etriyeler için, etriyelerde bu bölgelerde eksenel kuvvet yoğunluğu yaşanmazken basınç alanının dışında kalan etriyelerde eksenel kuvvet dağılımlarının arttığı söylenebilir. Bu yorum Mat016 malzeme modeli dışındaki üç malzeme modeli içinde geçerli olacaktır.

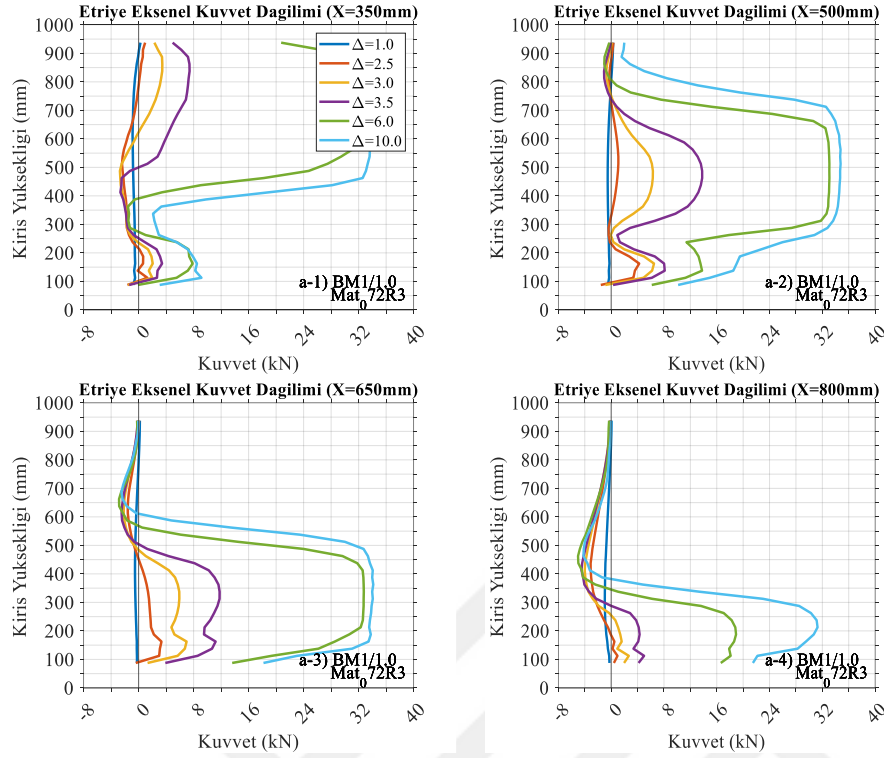
Sonuç olarak buradan betonun gerilmeleri karşıladığı bölgelerde etriyelerin gerilmeleri karşılamadığı, betonun gerilmeleri karşılayamadığı bölgelerde ise etriyelerin yoğun gerilmelere maruz kaldığı yorumu yapılabilir.



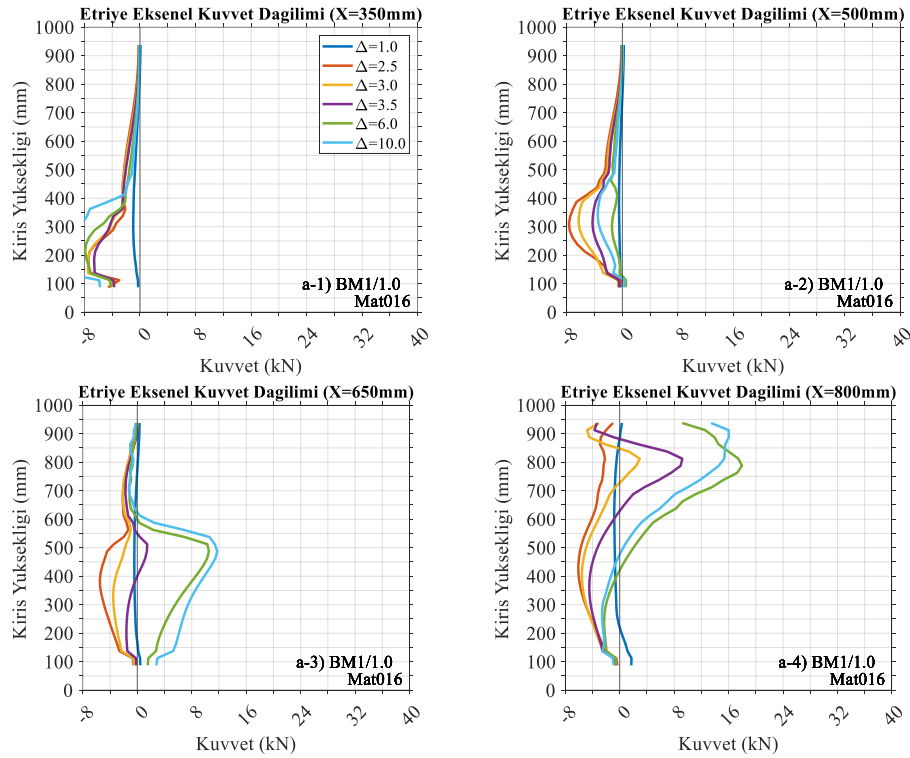
Şekil 6.10. BM1/1 Mat084/085 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm;



Şekil 6.11. BM1/1 Mat159 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm



Şekil 6.12. BM1/1 Mat072R3 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; a-2) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm



Şekil 6.13. BM1/1 Mat016 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; a-2) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm

6.1.3. Boyuna donatılar, eksenel kuvvet talepleri

Aşağıda Mat08485, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modellerine ait sırasıyla Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de alt donatılardaki her bir sehimde ki ($\Delta = 1.0, 2.0, 3.0, 3.5, 6.0$ ve 10) toplam ($3\phi 20$ donatı üzerine gelen toplam kuvvet) eksenel kuvvet dağılımlarına yer verilmiştir. Alt donatı 1. sıra olarak belirtilen donatı beton dış yüzeyinden 25 mm yukarıda olan donatı, 2. Sıra olarak belirtilen donatısı ise beton dış yüzeyinden 50 mm yukarı olan donatıdır. BM1/1,0 kirişinde 1.sıra olarak belirttiğimiz bölgede $3\phi 20$ ’lik , 2. sırada ise yine $3\phi 20$ ’lik donatı mevcuttur. Alt donatılar için referans veriden alınan deneysel veriler Şekil 6.3’te yer verilmiştir. Ayrıca $3\phi 20$ ’lik donatının çekme dayanımı 360 kN olduğu bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında:

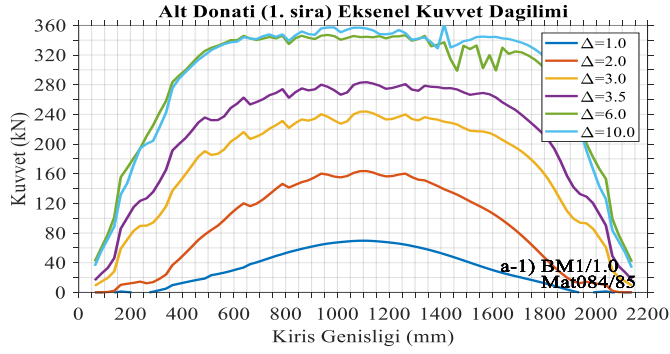
Şekil 6.2 grafiği incelendiğinde Mat084/85 modeli için BM1/1,0 kirişinde maksimum kuvvetin 5,5 mm’lik sehimde olduğu görülmektedir. Şekil 6.14’e bakıldığında 5,5 sehime en yakın 6 mm’lik sehimde donatıların akma dayanımına ulaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca 1.sıra ve 2. sıra olarak belirtilen alt donatıların (Şekil 6.14) benzer kuvvetlere maruz kaldığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6.15’te Mat159 malzeme modeli için grafik incelendiğinde donatıların akma sınırına ulaştığı gözlemlenmiştir.

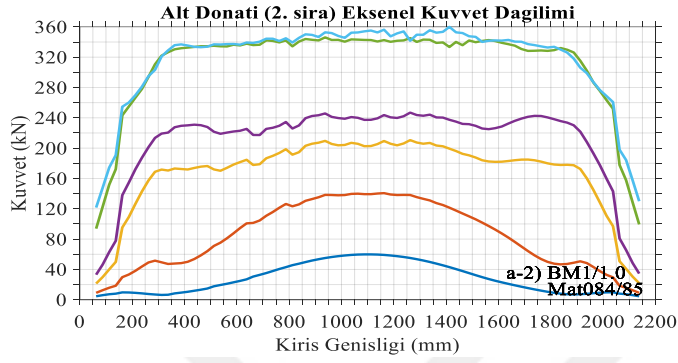
Mat072R3 malzeme modeli incelendiğinde donatının 81 kN kadar bir çekmenin var olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.16). Bu malzeme modeli için donatıların yeterince çekme kuvvetine ulaşamadığı görülmüştür.

Mat016 malzeme modeli içinde, Şekil 6.17 incelendiğinde donatının 52 kN’a kadar bir çekmenin var olduğu gözlemlenmiştir ve yine bu malzeme modeli içinde donatıların yeterli akma dayanımına sahip olmadığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak alt donatılara gelen eksenel kuvvet dağılımlarına baktığımızda, kiriş tasarımında donatıların akması beklenerek tasarlandığından ve Şekil 6.3’deki deneysel sonuçlara dayanarak Mat084/085 ve Mat159 malzeme modellerinin istenen durumu verdiği Mat072R3 ve Mat016 malzeme modellerinin istenen akma dayanımını karşılayamadığı gözlemlenmiştir.

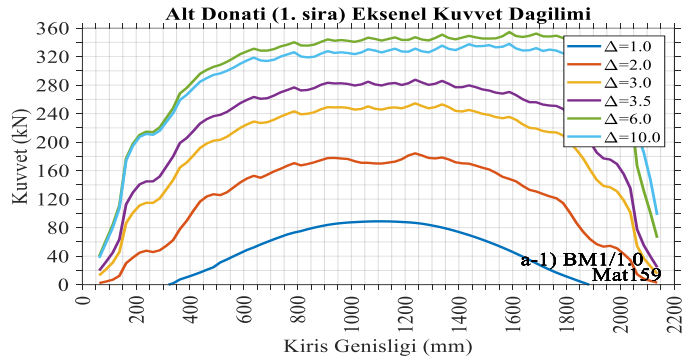


a-1) 1. sıra

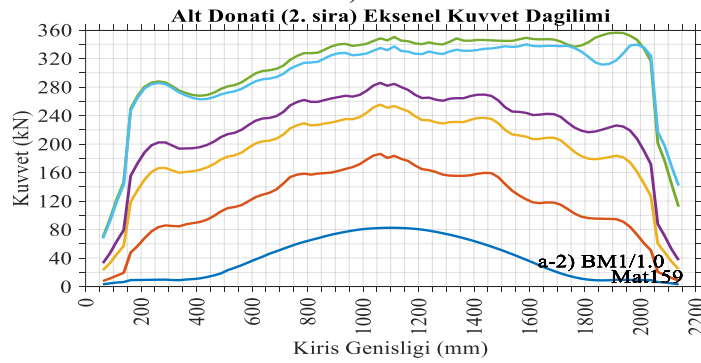


a-2) 2. sıra

Şekil 6.14. Mat084/085 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) 1.sıra; a-2) 2.sıra

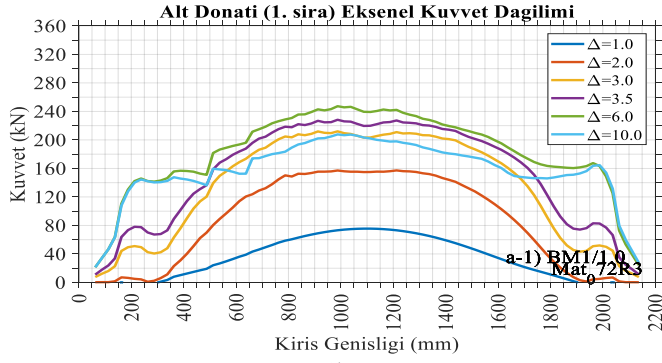


a-1) 1. sıra

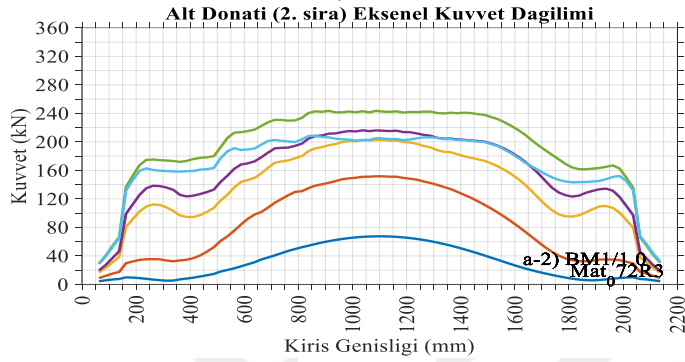


a-1) 2. sıra

Şekil 6.15. Mat159 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) 1.sıra; a-2) 2.sıra

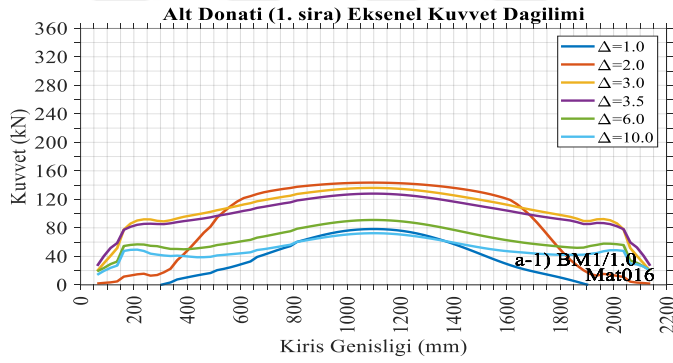


a-1) 1. sıra

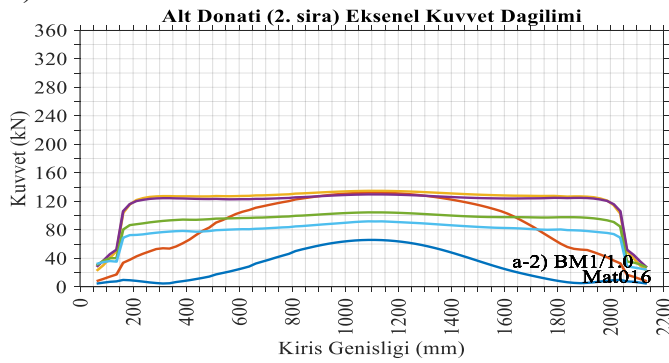


a-2) 2. sıra

Şekil 6.16 Mat072R3 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı



a-1) 1. sıra



a-2) 2. sıra

Şekil 6.17. Mat016 modeli için alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) 1.sıra; a-2) 2.sıra

6.2. BM3/1.0 Modeli

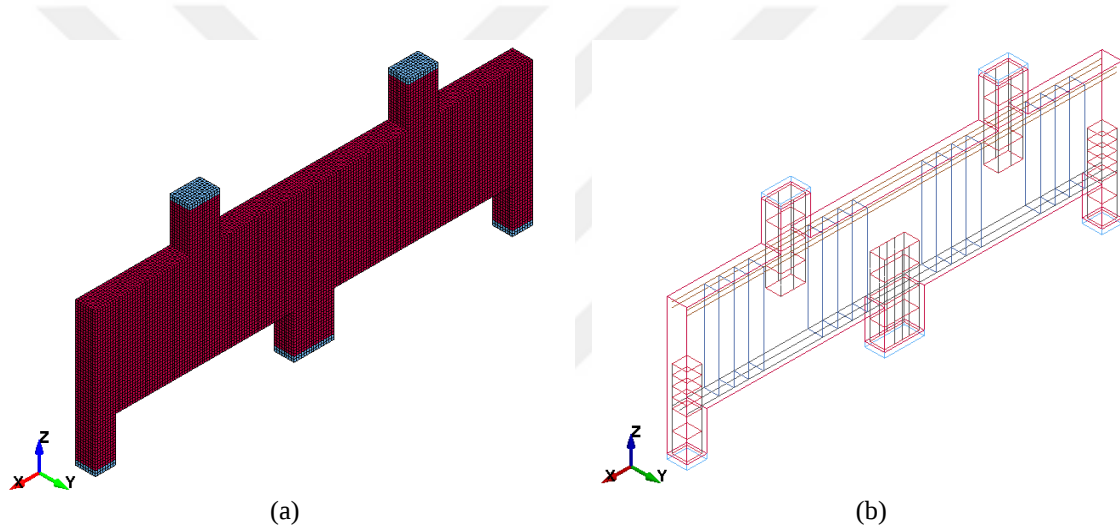
Bölüm 6.1’de örnek olması açısından tek açıklıklı kirişler için BM1/1,0 kirişi üzerinden sayısal analizlere değinilmiştir. Benzer şekilde çift açıklı kirişlere örnek olması açısından bu bölümde BM3/1,0 kirişi üzerinden sayısal analiz sonuçları irdelenecektir. Şekil 6.18’de BM3/1,0 kirişinin sonlu eleman modelini göstermektedir. Bu kiriş modelinde 4 adet 20M (19,5 mm) üst donatı, 3 adet 20M (19,5 mm)’lik alt donatı ve her açıklıkta 4 adet 6 mm’lik etriye kullanılmıştır.

Şekil 6.19’da BM3/1,0 kirişi için sehîm-kuvvet değêrlerinin Ls-DYNA verileri ve referans kiriş verisinin maksimum kuvvet değeri ve bu maksimum kuvvet değeri ne ulaştığı andaki sehîm değeri gösterilmiştir. Şekil 6.19’da referans veri yaklaşık 6,1 mm yer değıştirmede 2170 kN maksimum kuvvet dayanımına ulaştığı gözlemlenmiştir. Her bir malzeme modelindeki sonuçlar referans veri sonucuna karşı irdelenirse:

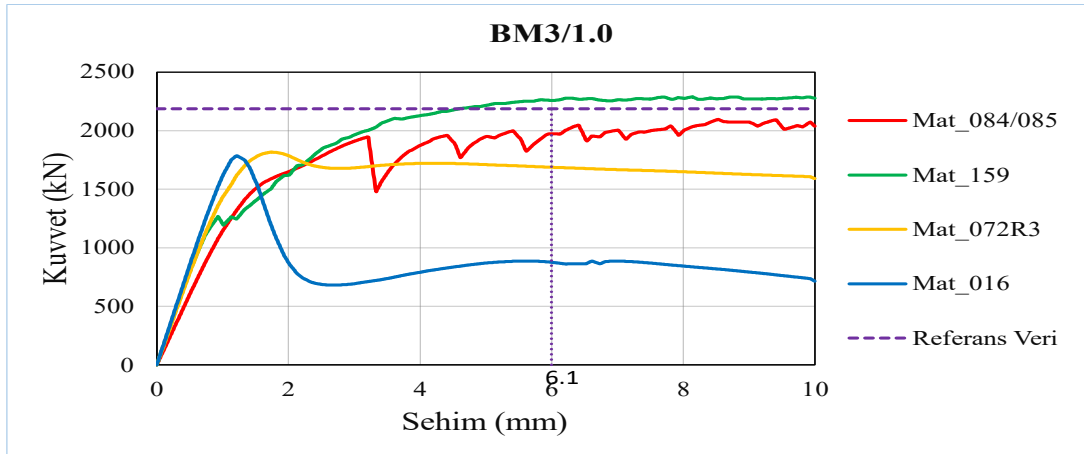
- V. Mat084/085 malzeme modeli için; Mat084/085 malzeme modeli yaklaşık 3,3 mm yer değıştirmede 1950 kN değeri ne ulaşmıştır. Elde edilen veriler göre %10,13 gibi maksimum kuvvette bir değışim gözlemlenmiştir. Yer değıştirmelere bakıldığında ise 2,27 mm fark ile Mat084/085 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiğı gözlemlenmiştir.
- VI. Mat159 malzeme modeli için; Mat159 malzeme modeli yaklaşık 6,3 mm yer değıştirmede 2263 kN değeri ne ulaşmıştır. Maksimum kuvvet referans kirişe göre %3,83’lik bir kuvvette değışim gözlemlenmiştir. Yer değıştirmelere bakıldığında ise 0,2 mm fark ile Mat159 malzeme modeli verisinin daha geç dayanım kaybettiğı gözlemlenmiştir.
- VII. Mat072R3 malzeme modeli için; Mat072R3 malzeme modeli yaklaşık 1,7 mm yer değıştirmede 1830 kN değeri ne ulaşmıştır. Maksimum kuvvet referans kirişe göre %15,66’lık bir kuvvette değışim gözlemlenmiştir. Yer değıştirmelere bakıldığında ise 4,4 mm fark ile Mat072R3 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiğı gözlemlenmiştir.
- VIII. Mat016 malzeme modeli için; Mat072R3 malzeme modeli için; Mat072R3 malzeme modeli yaklaşık 1,2 mm yer değıştirmede 1740 kN değeri ne ulaşmıştır. Maksimum kuvvet referans kirişe göre %19,81’lik bir kuvvette değışim gözlemlenmiştir. Yer değıştirmelere bakıldığında ise 5,7 mm fark ile Mat016 malzeme modeli verisinin daha önce dayanım kaybettiğı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak BM3/1,0 kirişi için Ls-DYNA verilerinin maksimum dayanımlarının referans kirişe göre tutarlılık gösterdiği gözlemlenirken sehim verilerinin Mat084/085 ve Mat159 malzeme modelleri için belli bir korelasyonda olduğu ancak Mat072R3 ve Mat016 malzeme modelleri için referans verilere göre daha erken sehim değerlerinde maksimum kuvvete ulaştığı gözlemlenmektedir.

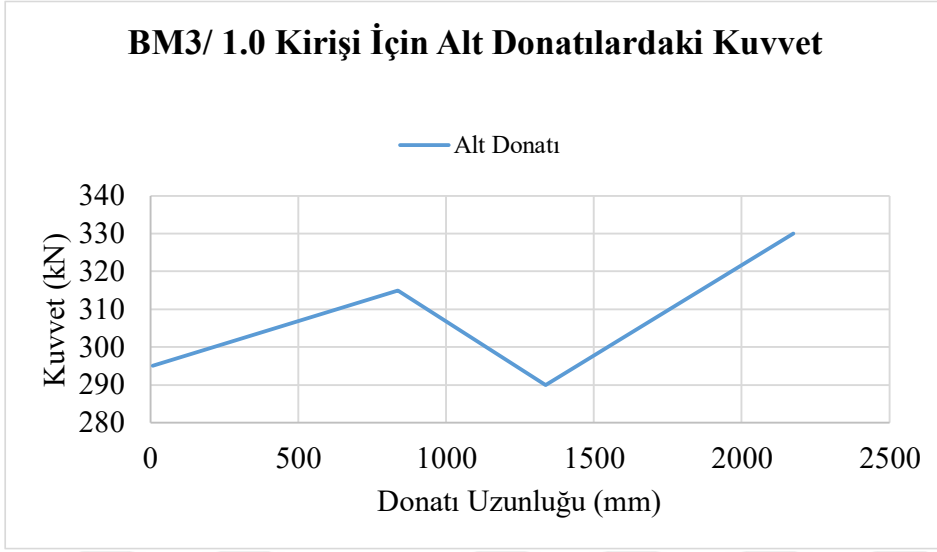
BM3/1,0 kirişi için sol açıklıktaki (kirişimiz simetrik olduğu için sol açıklık ve sağ açıklık benzer sonuçlar vermiştir) maksimum kuvvetteki alt donatıların maruz kaldığı belirli noktadaki kuvvet sonuçları referans veriden alınıp Şekil 6.19’da yer verilmiştir. BM1/1,0 kirişinde olduğu gibi bu veri bizler için alt donatılardaki oluşan sayısal analiz verilerini desteklemek için kullanılacaktır.



Şekil 6.18. BM1/1,0 kirişi için sonlu eleman modeli: a) Beton eleman ve b) Donatı elemanları



Şekil 6.19. Sehime bağlı kuvvet eğrisi



Şekil 6.20. Göçme durumundaki alt donatılarda oluşan kuvvetler

6.2.1. Minimum asal gerilme dağılımları

Şekil 6.21’de Mat 084/085, Mat 159, Mat 072R3 ve Mat 016 malzeme modelleri için, kiriş orta açıklık sehim, $\Delta=2,5$ mm’deki BM3/1,0 kirişi için minimum asal gerilme konturları görülmektedir.

- I. Şekil 6.21’de $\Delta=2,5$ mm’de Mat084/085 modeli için kiriş yaklaşık 1790 kN ‘lük bir yüke maruz kalmaktadır. Şekil 6.21’de 1790 kN’luk yüke maruz kalan BM3/1,0 kirişin gerilme dağılımlarına bakıldığında iç kesme basınç bölgelerinde gerilmelerin daha yoğun bir şekilde yayıldığı ancak dış kesme bölgelerinde bu yoğunluğun görülmediği gözlemlenmektedir. Bunun nedeninin Tablo 3.5’e baktığımızda sol ve sağdaki mesneden ortadaki mesnete kıyasla çok az yük almasından kaynaklandığı gözlemlenmektedir. Ayrıca tek açıklıklı kirişte olduğu gibi kiriş destek bölümünde kısmi bölgelerinde gerilmelerin akışının maksimuma ulaştığı, basınç çubuğundaki bölgelerin ise gerilmeleri rahat bir şekilde destek bölgelerine aktardığı ve bu basınç bölgeleri olarak adlandırdığımız kısımda henüz nihai gerilmelere ulaşmadığı gözlemlenmektedir.
- II. Şekil 6.21’de Mat159 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=2,5$ mm’deki kuvvetin yaklaşık 1860 kN ‘luk bir kuvvet olduğu

gözlemlenmekte ve gerilme dağılımlarının iç kesme basınç bölgelerinde yoğunlaştığı gözlemlenirken dış kesme bölgelerinde bu gerilme yoğunluğunun oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni Tablo 3.5’ te görüldüğü üzere sağ ve sol mesnetlere gelen yük yoğunluğunun ortadaki mesnede gelen yük yoğunluğundan az olmasıdır. Ayrıca gerilmelerin mesnet bölgelerinde maksimuma yer yer ulaştığı ancak basınç bölgelerindeki gerilmelerin nihai dayanıma ulaşmadığı gözlemlenmiştir.

- III. Şekil 6.21’de Mat072R3 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=2,5$ mm’deki kuvvetin yaklaşık 1870 kN luk kuvvet olduğu gözlemlenmektedir. Gerilme dağılımının diğer malzeme modellerine benzer bir yaklaşım gösterirken tek açıklıktaki kiriş örneğinde olduğu gibi yükleme noktasından orta açıklığa kadar oluşan iki ayırık kol şeklindeki gerilme akışının beton davranışından farklı bir gerilme davranışını ortaya koyduğunu düşündürmektedir.
- IV. Şekil 6.21’de Mat016 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=2,5$ mm’deki kuvvetin yaklaşık 639 kN luk kuvvet olduğu gözlemlenmekte ve bu yükün Mat016 malzeme modeli için maksimum kuvvetten oldukça düşük bir yüke karşılık geldiği ve dolayısıyla gerilme dağılımının çok az belirgin olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca gerime yoğunluğu az olsa da diğer malzeme modellerinden farklı olarak gerilme yoğunluğunun iç kesme basınç bölgelerinden ziyade dış kesme bölgelerinde olduğu gözlemlenmektedir. Ancak Tablo 3.5’e baktığımızda sol ve sağ mesnetlerin ortadaki mesnede kıyasla daha az yük taşıdığı dolayısıyla bu malzeme modelindeki yük dağılımının gerçekçi olmadığı düşünülmektedir.

Şekil 6.22’de Mat084/085, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modeli için $\Delta=7,5$ mm’deki minimum asal gerilme konturları görülmektedir:

- I. Şekil 6.22’de $\Delta=7,5$ mm’de Mat084/085 modeli için kiriş yaklaşık 1094 kN ‘luk bir yüke maruz kalmaktadır. $\Delta=2,5$ mm’deki dayanımla kıyaslandığında dayanımın arttığı ve buna bağlı olarak Şekil 6.5’teki minimum asal gerilme konturu incelendiğinde basınç ve mesnet bölgelerinde gerilme yoğunluğunun arttığı ve basınç bölgelerinde de yer yer nihai dayanıma ulaştığı gözlemlenmektedir.
- II. Şekil 6.22’de Mat159 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=7,5$ mm’deki kuvvetin yaklaşık 1945 kN’luk kuvvet ve $\Delta=2,5$ mm’deki

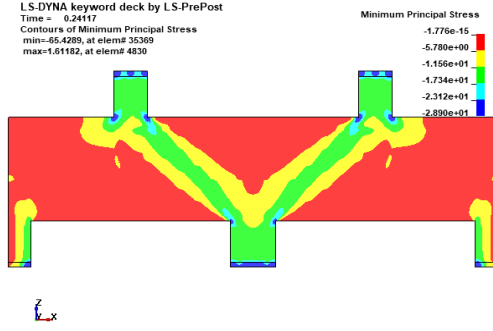
karşılık gelen dayanımın $\Delta=7,5$ 'teki dayanımdan düşük olduğu ve gerilimlerin yoğunlaştığı ve basınç bölgelerindeki gerilmelerde yer yer nihai dayanıma ulaştığı gözlemlenmektedir.

- III. Şekil 6.22'de Mat072R3 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=7,5$ mm'deki kuvvetin yaklaşık 1660 kN'luk kuvvet ve $\Delta=2,5$ mm'deki karşılık gelen dayanımın $\Delta=7,5$ 'teki dayanımdan büyük olduğu gözlemlenmekte ve buna rağmen gerilmelerin kısmi olarak yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca $\Delta=2,5$ mm sehimde olduğu gibi çift kol oluşumu burada da rastlanmıştır.
- IV. Şekil 6.22'de Mat016 malzeme modelinin minimum gerilme konturlarına bakacak olursak $\Delta=7,5$ mm'deki kuvvetin yaklaşık 806 kN'luk kuvvet ve $\Delta=2,5$ mm'deki karşılık gelen dayanımın $\Delta=7,5$ mm'deki dayanımdan küçük olduğu gözlemlenmekte ve buna rağmen gerilme yoğunluğunun arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca $\Delta=2,5$ mm sehimin de olduğu gibi dış kesme açıklığında gerilmelerin daha fazla olduğu görülmektedir.

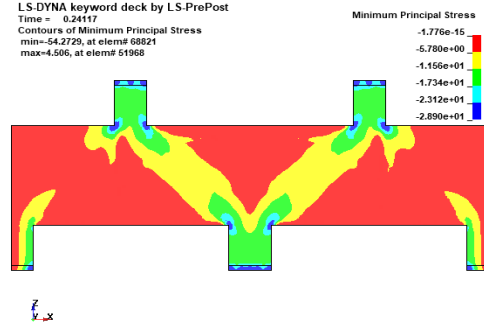
Sonuç olarak $\Delta=2,5$ mm ve $\Delta=7,5$ mm minimum asal gerilme konturlarında 4 malzeme modelinde de benzer gerilme dağılımları oluşmuş ancak Mat072/R3 malzeme modelindeki açıklanamayan çift kol gerilme dağılımı ve Mat016 malzeme modelindeki gerilme yoğunluğunun dış kesme basınç bölgesinde yoğunlaşması bu iki malzeme modelleri için deneysel veriler ışığında beklenmeyen durum olarak nitelendirilmiştir.

Şekil 6.23'te $\Delta=2,5$ mm'lik sehim için ve Şekil 6.24'te $\Delta=7,5$ mm'lik sehim için minimum asal gerilmelerin vektör şeklinde gösterimi yer almaktadır. Bu vektör gösterimleri bizlere gerilmenin akış yönünü göstermektedir.

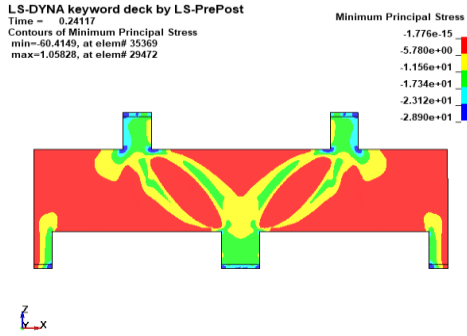
Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da minimum asal gerilme eş yüzeyleri oluşumu yer almaktadır. Eş yüzey gösterimlerinde gerilmelerin yoğunlaştığı ve sınırladığı bölgeler çok rahat gözlemlenebilmektedir. Bu şekiller ayrıca oluşan STM bölgelerinin (özellikle basınç çubuklarının) giriş kesme donatıları üzerindeki konumunu göstermesi açısından da önemlidir.



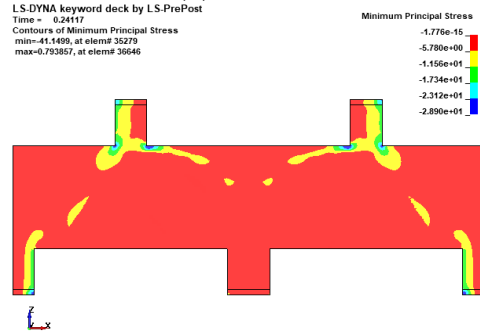
(a) Mat084/085



(b) Mat159

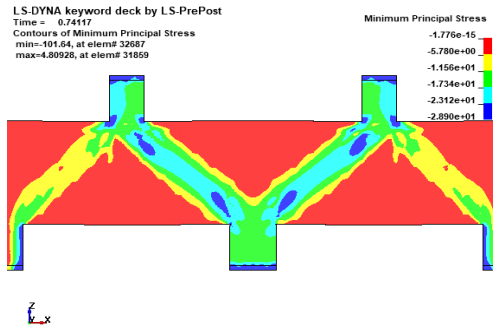


(c) Mat072R3

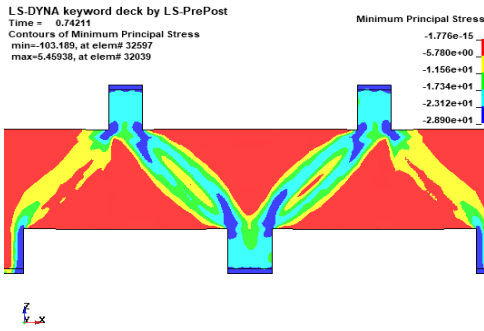


(d) Mat016

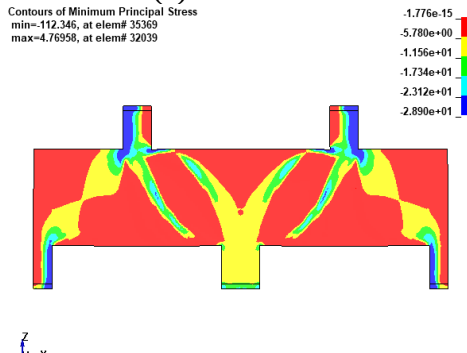
Şekil 6.21. Sehım=2,5mm’de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016



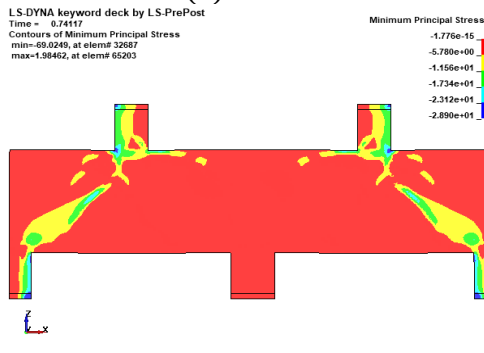
(a) Mat084/085



(b) Mat159

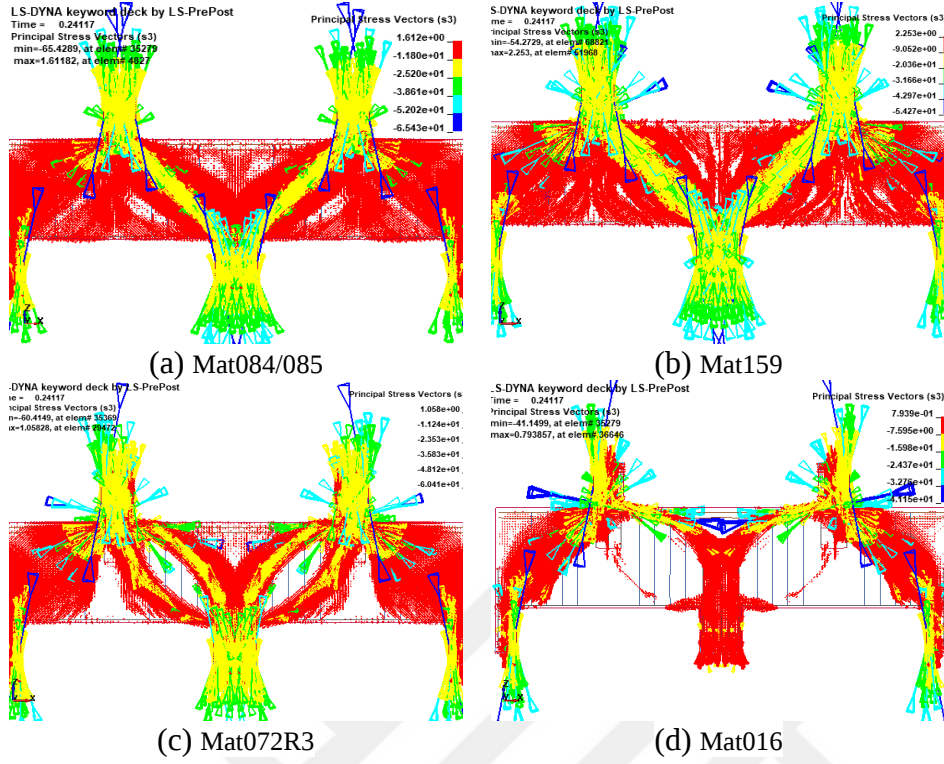


(c) Mat072R3

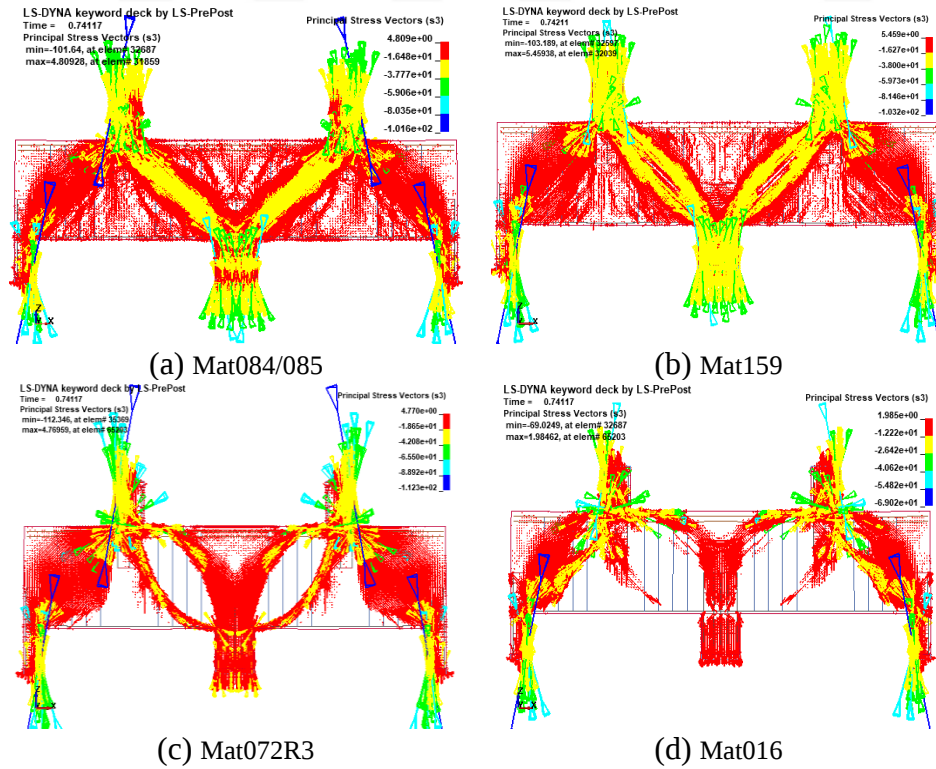


(d) Mat016

Şekil 6.22. Sehım=7,5mm’de minimum asal gerilme konturları: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

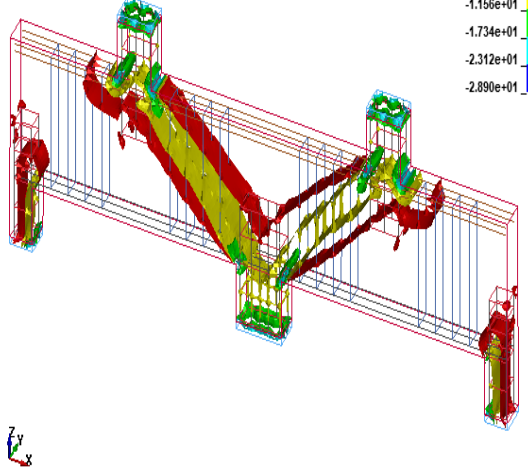


Şekil 6.23. Sehim=2,5mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016



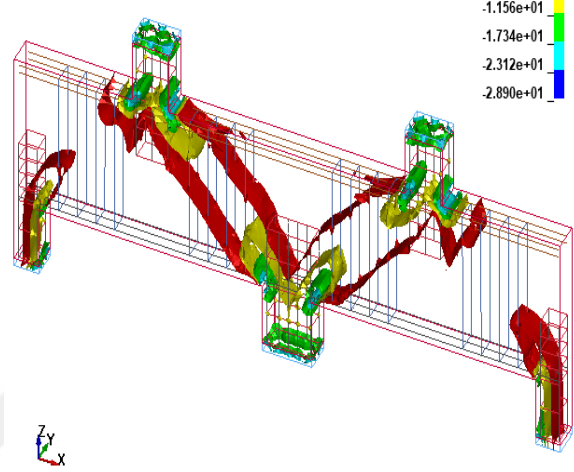
Şekil 6.24. Sehim=7.5mm’de minimum asal gerilme vektörleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.24117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-65.4289, at elem# 35369
max=1.61182, at elem# 4830



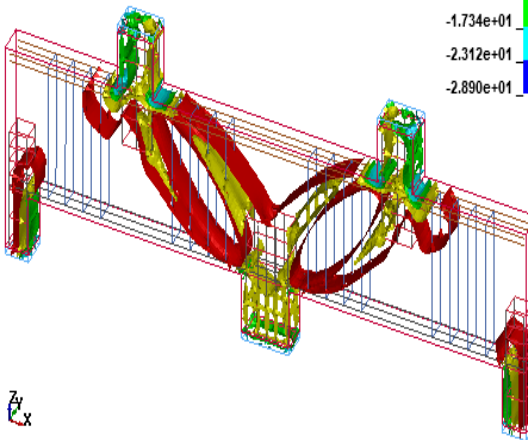
(a) Mat084/085

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.24117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-54.2729, at elem# 68821
max=4.506, at elem# 51968



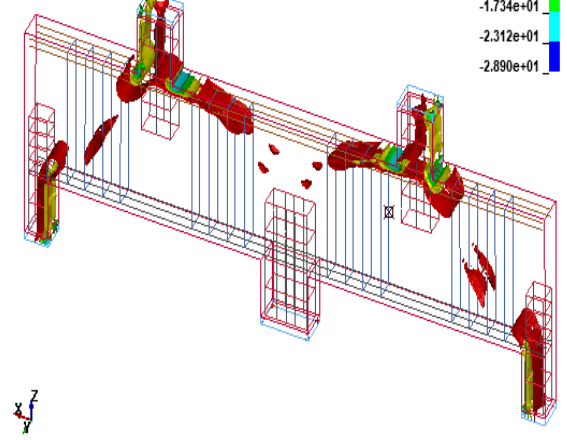
(b) Mat_159

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.24117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-60.4149, at elem# 35369
max=1.05828, at elem# 29472



(c) Mat072R3

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.24117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-41.1499, at elem# 35279
max=0.793857, at elem# 36646

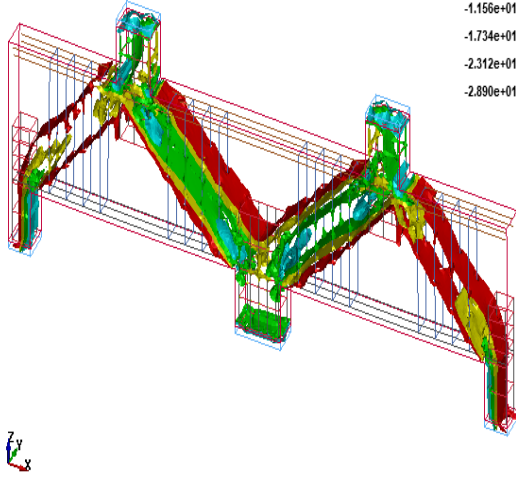


(d) Mat_016

Şekil 6.25 Sehim=2,5mm'de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.74117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-101.64, at elem# 32687
max=4.80928, at elem# 31859

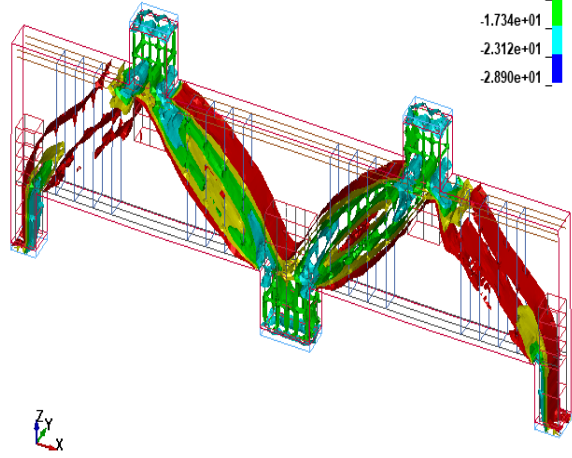
Minimum Principal Stress
-1.776e-15
-5.780e+00
-1.156e+01
-1.734e+01
-2.312e+01
-2.890e+01



(a) Mat084/085

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.74211
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-103.189, at elem# 32597
max=5.45938, at elem# 32039

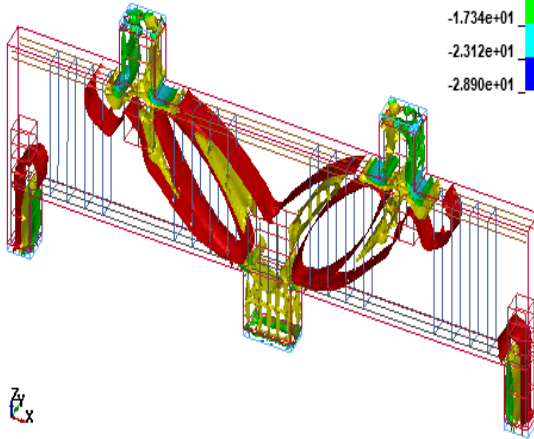
Minimum Principal Stress
-1.776e-15
-5.780e+00
-1.156e+01
-1.734e+01
-2.312e+01
-2.890e+01



(b) Mat_159

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.24117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-60.4149, at elem# 35369
max=1.05828, at elem# 29472

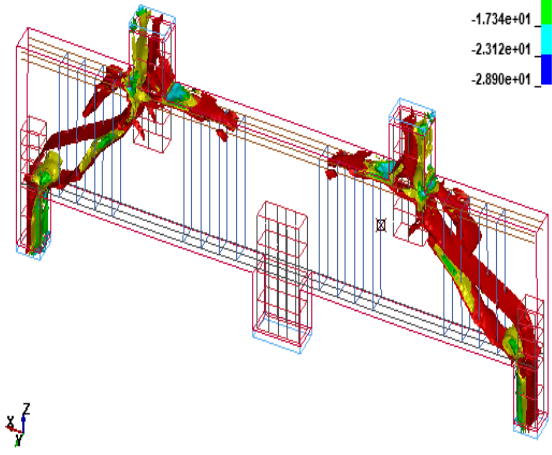
Minimum Principal Stress
-1.776e-15
-5.780e+00
-1.156e+01
-1.734e+01
-2.312e+01
-2.890e+01



(c) Mat072R3

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.74117
Isosurfaces of Minimum Principal Stress
min=-69.0249, at elem# 32687
max=1.98462, at elem# 65203

Minimum Principal Stress
-1.776e-15
-5.780e+00
-1.156e+01
-1.734e+01
-2.312e+01
-2.890e+01

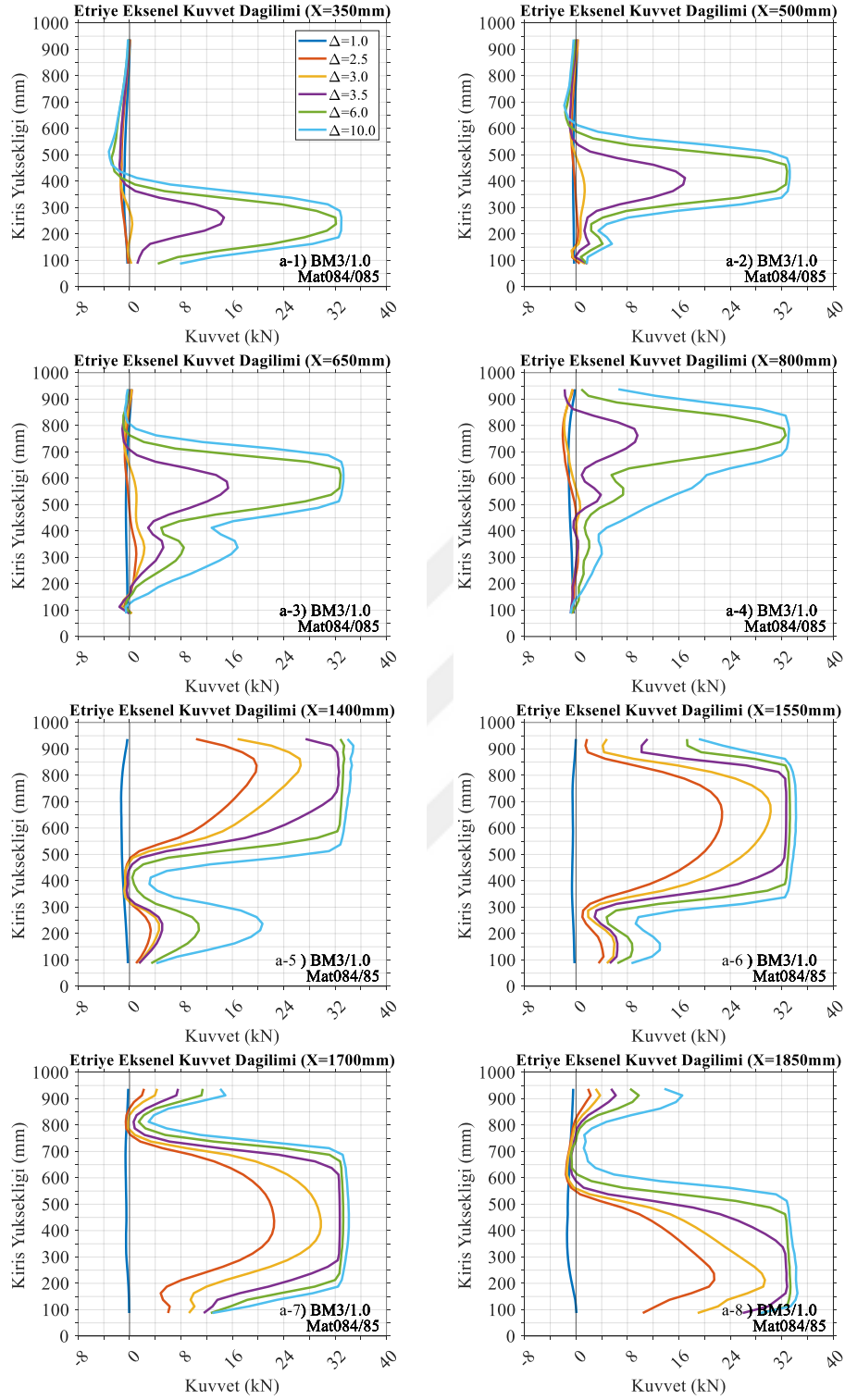


(d) Mat_016

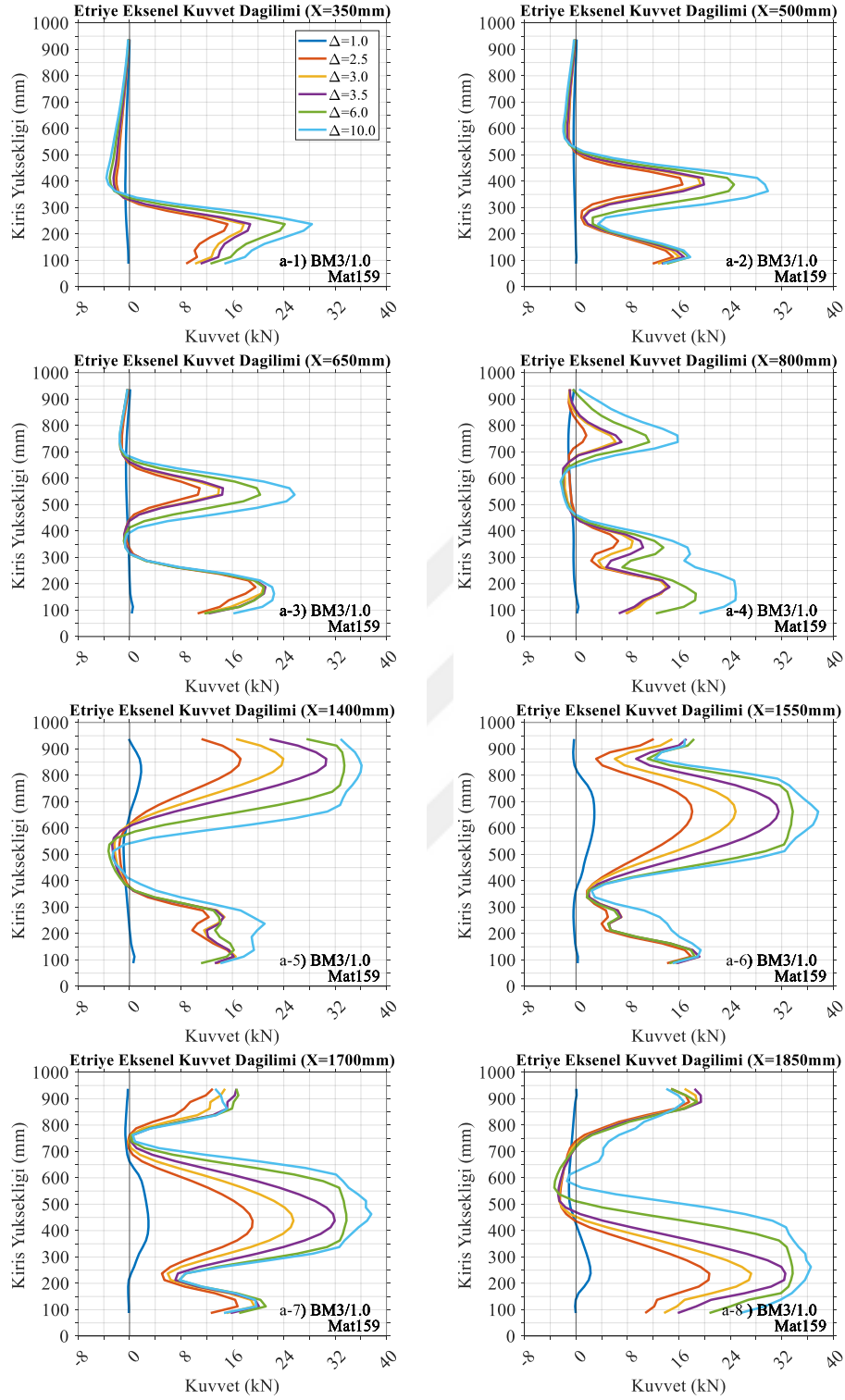
Şekil 6.26. Sehim=7,5mm'de minimum asal gerilme es yüzeyleri: a) Mat084/085; b) Mat159; c) Mat072R3 ve d) Mat016

6.2.2. Kesme donatıları, eksenel kuvvet talepleri

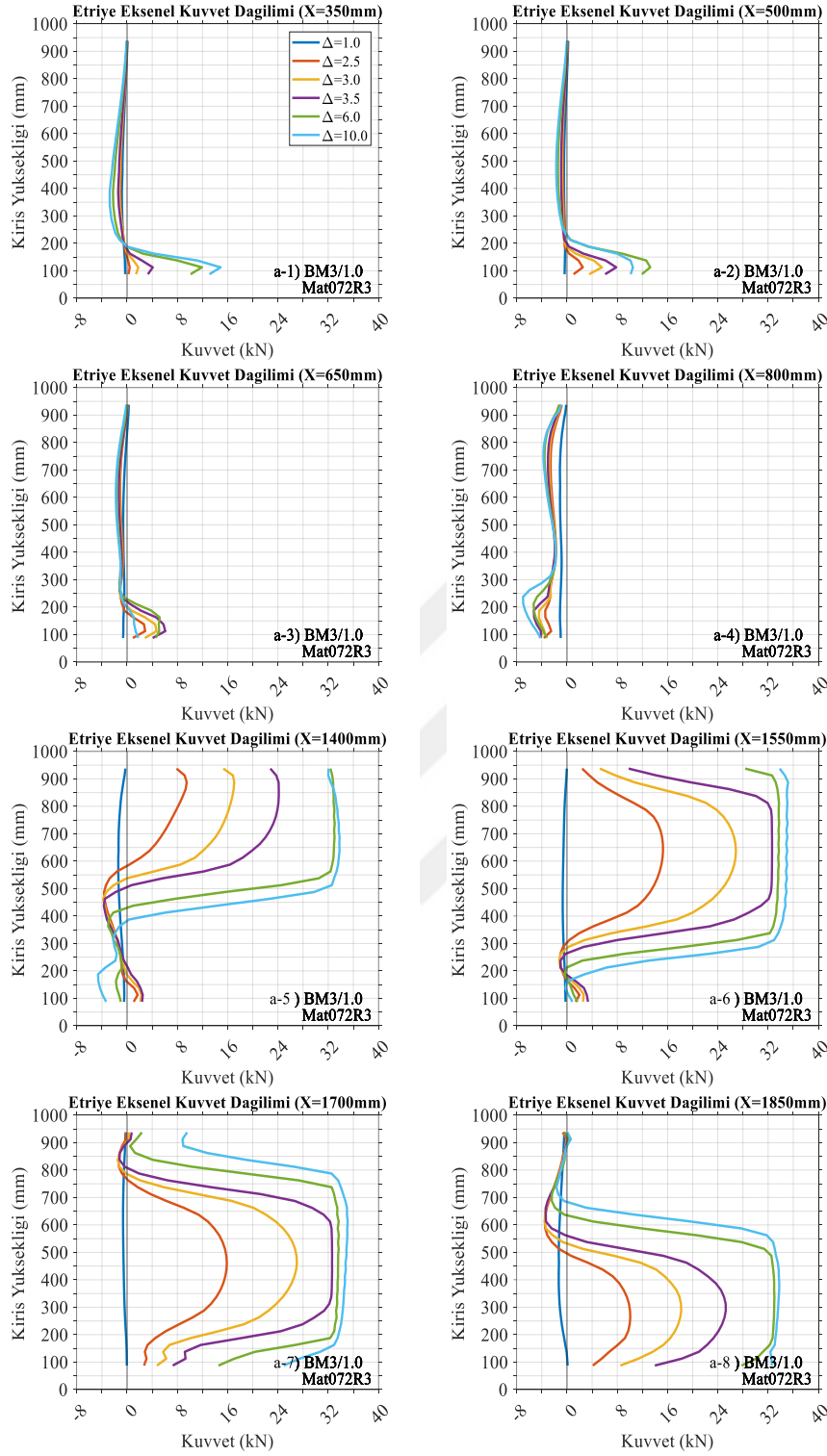
Mat084/085, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modelleri için her bir etriyede oluşan eksenel kuvvet dağılımı sırasıyla Şekil 6.27-30'da yer almaktadır. Her bir malzeme modelinde BM3/1,0 kirişi simetrik olduğu için sadece sol dış açıklık ve sol iç açıklıktaki etriyelerin eksenel kuvvet taleplerine yer verilmiştir. Bölüm 6.1.2.'deki BM1/1,0 kirişi için malzeme modelleri için yapılan yorumlar BM3/1,0 kirişi içinde geçerli olacaktır. BM3/1,0 kirişinden farklı olarak dikkat edilecek olursa sol dış açıklıktaki gerilmelerin sol iç açıklıktaki gerilmelerden az olduğu bunun nedeninin Tablo 3.5' ten de anlaşılacağı üzere sol mesnetteki yükün ortadaki mesnetten az olduğu ve dolayısıyla etriyelerde oluşan eksenel kuvvet taleplerinde de bu sonucun görüldüğü ve buna bağlı olarak Şekil 6.27'de Mat084/085 malzeme modeli grafiklerini incelersek Şekil 6.27(a1-a4) ve Şekil 6.27(a5-a8) grafikleri karşılaştırıldığında kuvvetlerin Şekil 6.27(a5-a8)'de kiriş yüksekliklerinde daha geniş bir yayılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Benzer yorumlar diğer malzeme modeli içinde geçerli olacaktır.



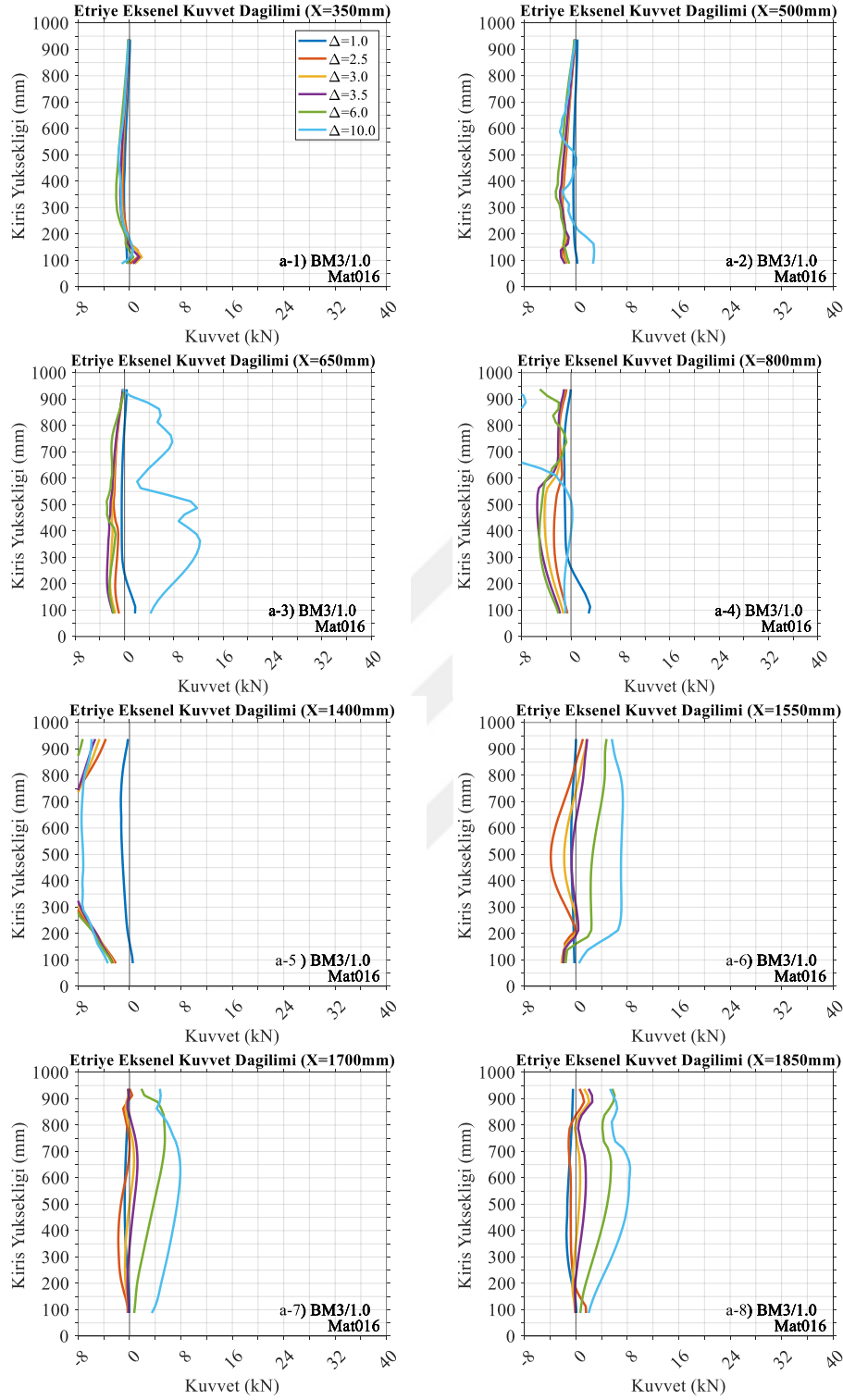
Şekil 6.27. BM1/1,0 Mat084/085 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;



Şekil 6.28. BM1/1,0 Mat159 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; a-2) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;



Şekil 6.29. BM1/1,0 Mat072R3 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; a-2) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;

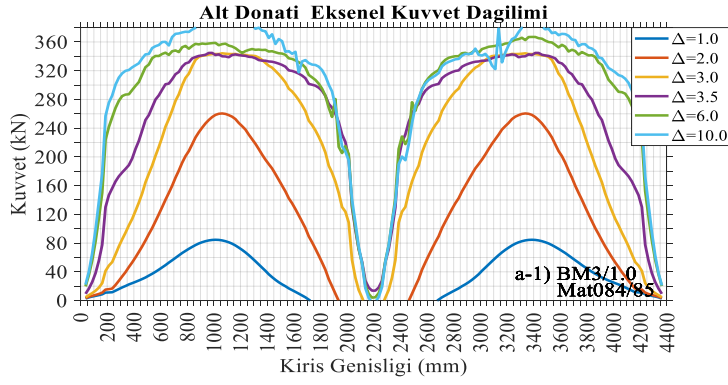


Şekil 6.30. BM1/1,0 Mat016 beton modeli için etriye eksenel kuvvet talepleri: a-1) X=350 mm; b) X=500 mm; a-3) X=650 mm; a-4) X=800 mm; a-5) X=1400 mm; a-6) X=1550 mm; a-7) X=1700 mm; a-8) X=1850 mm;

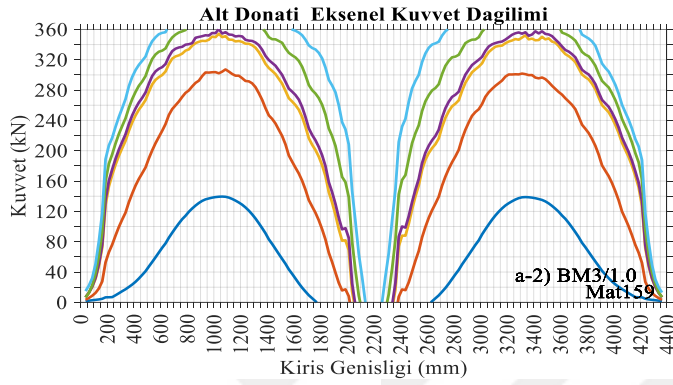
6.2.3. Boyuna donatılar, aksenal kuvvet talepleri

Şekil 6.31’de Mat08485, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modellerine ait alt donatılardaki her bir sehimdeki ($\Delta = 1.0, 2.0, 3.0, 3.5, 6.0$ ve 10) toplam ($3\phi 20$ donatı üzerine gelen toplam kuvvet) aksenal kuvvet dağılımlarına yer verilmiştir.

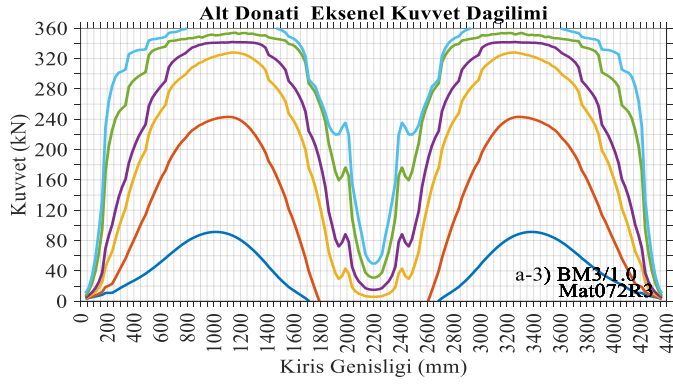
Şekil 6.20’deki deneysel veri sonucu dikkate alındığında donatıların maruz kaldığı maksimum çekme kuvveti 332 kN olduğu gözlemlenmektedir. $\phi 20$ ’lik bir donatının akma dayanımı 120 kN ’dur. Deneysel veride ve sayısal analiz sonuçlarında 3 donatı toplamı alındığından bu akma değeri 360 kN olacaktır. Şekil 6.20’deki referans veri sonucuna bakıldığında donatıların akmaya ulaşmadığı ancak yaklaştığı gözlemlenmektedir. Şekil 6.31’de 4 malzeme modeli içinde sonuçlar incelendiğinde 4 malzeme modelinde de deneysel veri sonuçlarıyla belirli bir korelasyonda olduğu gözlemlenmekle beraber Mat08485, Mat159 ve Mat072R3 malzeme modellerinde akmanın gerçekleştiği ancak Mat016 malzeme modelinde donatının akmaya yakın bir değer aldığı ancak akmadığı gözlemlenmiştir.



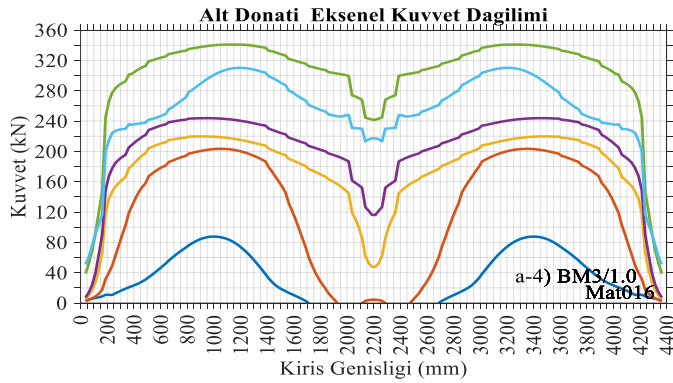
a-1



a-2



a-3



a-4

Şekil 6.31. Alt donatı eksenel kuvvet dağılımı: a-1) Mat084/85; a-2) Mat159; a-3) Mat072R3; a-4) Mat016

6.3. Açıklık/Derinlik Oranı 1,0 Olan Diğer Kirişler

Aşağıda Şekil 6.32’de açıklık/derinlik 1,0 oranına sahip her bir kirişin Dyna ve referans veri sonuçlarına yer verilmiştir. Örnek olarak Şekil 6.32 (a)’da grafik üzerinde 4 farklı malzeme modeli eğrisi, referans kirişin maksimum dayanımı ve y eksenine paralel olarak çizilen referans verinin maksimum değere ulaştığı andaki sehim değerleri verilmiştir.

Şekil 6.32 (a)’de BM1/1,0 kirişi incelendiğinde referans veri 5,5 sehimde 1204 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat08485 malzeme modeli için yaklaşık 5,0 sehimde 1190 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM1/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %1,16 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 4,7 sehimde 1282 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM1/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %6,47 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 2,5 sehimde 1079 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM1/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %10,3 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,8 sehimde 1085 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM1/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %9,88 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 4 malzeme modelinin de maksimum dayanım açısından belirli bir korelasyon olduğu gözlemlenmektedir. Sehim değerlerinde ise Mat08485 ve Mat159 malzeme modelinin daha yakın sonuç verdiği ancak Mat072R3 ve Mat016 malzeme modelinin erken sehimde göçtüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 6.32(b) incelendiğinde BM2/1,0 kirişinde referans veri yaklaşık 6,2 sehimde 1500 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat08485 malzeme modeli için yaklaşık 5,2 sehimde 1202 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM2/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %19,86 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 4,8 sehimde 1361 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM2/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %9,26 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 2,5 sehimde 1119 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM2/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %25,3 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,8 sehimde 1110 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM2/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %25,9 değerinde bir değişim

gözlemlenmiştir. Sonuç olarak BM2/1,0 kirişi için Mat159 yakın sonuç çıkarsa da genel olarak referans veri sonuçlarından daha az dayanım ölçülmüştür. Kiriş dayanımının güvenli tarafta kalması istenirken değişim yüzdesinin fazla çıkması istenmeyen durumdur. BM2/1,0 kirişinin BM1/1,0 kirişinden farkına bakacak olursak tek farkı atılan gövde donatısıdır. Referans veride gövde donatısının derin kiriş dayanımına etkisi minimize olduğu belirtilmektedir (Rogowski ve ark., 1983). Ancak BM1/1,0 ve BM2/1,0 özelinde baktığımızda atılan gövde donatısının kiriş dayanımını 1204 kN'dan 1500 kN'a çıktığı yani %24,58'lik değişim gibi ciddi bir oranda artırdığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6.32 (c)' deki çift açıklıklı kiriş incelendiğinde referans veri yaklaşık 6,0 mm sehimde 2186 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat08485 malzeme modeli için yaklaşık 3,3 mm sehimde 1950 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM3/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %10,52 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 6,1 mm sehimde 2280 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM3/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %4,30 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 1,8 mm sehimde 1820 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM3/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %16,24 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,4 mm sehimde 1790 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM3/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %18,11 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Sonuç olarak Mat159 malzeme modelinin hem sehim hem de maksimum dayanım açısından yakın sonuçlar verdiği ancak referans veriden daha yüksek kiriş dayanımı çıkardığı gözlemlenmiştir. Diğer 3 malzeme modeli için ise güvenli tarafta kaldığı için sonuçların kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.32 (d)' deki çift açıklıklı kiriş incelendiğinde referans veri yaklaşık 7,0 mm sehimde 2176 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat084/85 malzeme modeli için yaklaşık 5,0 mm sehimde 2035 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM4/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %6,47 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 6,2 mm sehimde 2240 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM4/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %2,94 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 2,2 mm sehimde 1810 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM4/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %16,81 değerinde bir

değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,7 mm sehimde 1770 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM3/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %18,65 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 4 malzeme modeli de BM3/1,0 kirişine benzer sonuçlar vermiştir. BM3/1,0 ve BM4/1,0 kirişleri incelendiğinde BM3/1,0 kirişi etriye, BM4/1,0 kirişi için gövde donatısı kullanımı mevcuttur. Hem referans verideki sonuçlar hem 4 malzeme modelindeki sonuçların ortak sonucu olarak etriyelerin gövde donatısından daha çok dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir.

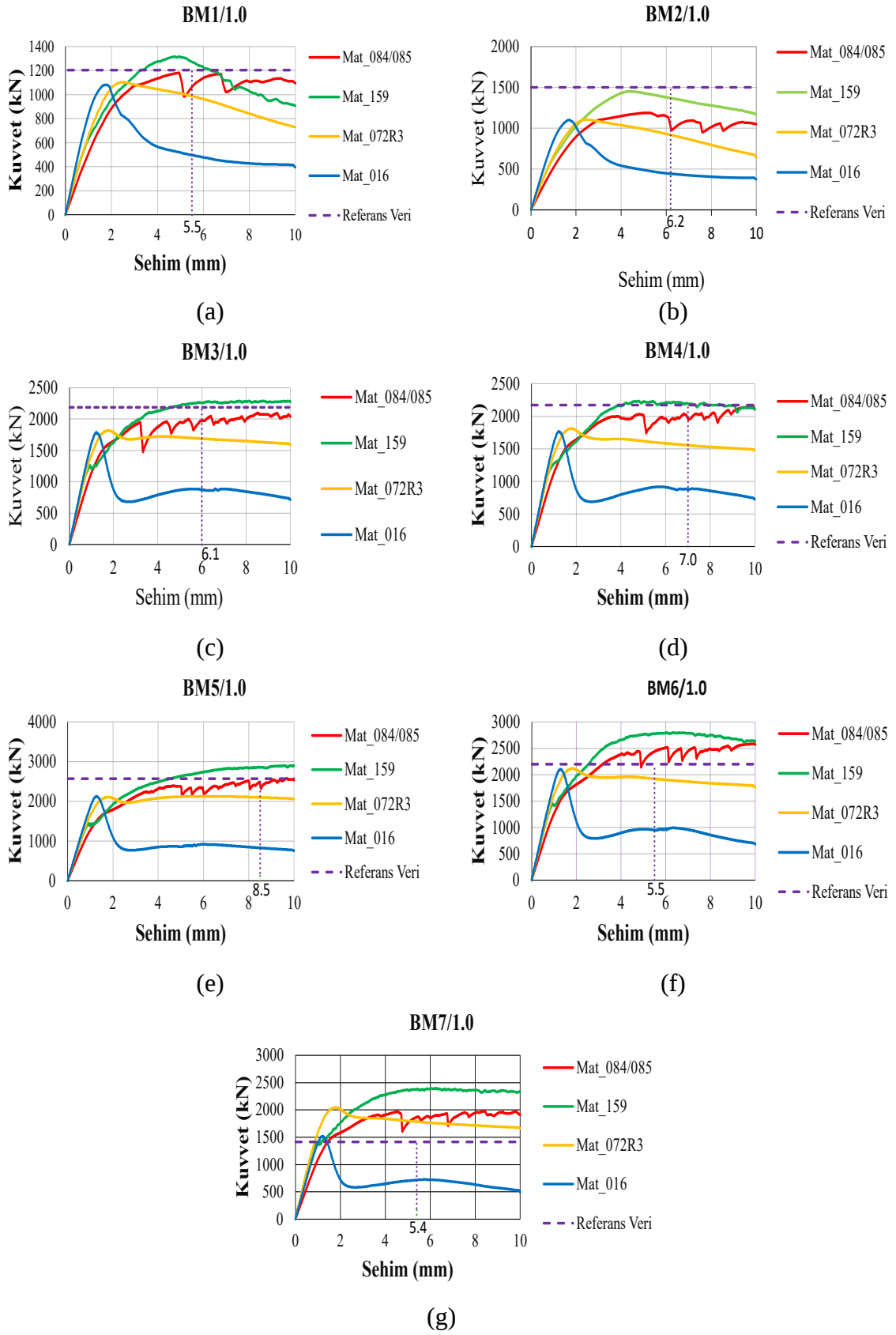
Şekil 6.32 (e)' deki çift açıklıklı kiriş incelendiğinde referans veri yaklaşık 8,5 mm sehimde 2571 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat08485 malzeme modeli için yaklaşık 5,0mm sehimde 2385 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM5/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %7,23 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 6,2 mm sehimde 2840 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM5/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %10,46 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 2,1 mm sehimde 2120 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM3/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %17,54 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,7 mm sehimde 2100 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM5/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %18,31 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Sonuç olarak BM5/1,0 kirişinde atılan yoğun miktardaki etriyelerinin kiriş dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.32 (f)' deki çift açıklıklı kiriş incelendiğinde referans veri yaklaşık 5,5 mm sehimde 2198 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat08485 malzeme modeli için yaklaşık 5,0 mm sehimde 2430 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM6/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %10,55 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 6,1 mm sehimde 2780 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM6/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %26,47 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 2,1 mm sehimde 2120 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM6/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %3,54 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,7 mm sehimde 2100 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM6/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %4,45 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Sonuç

olarak BM5/1,0 ve BM6/1,0 kirişlerine bakıldığında yine etriyelerin derin kiriş dayanımını atılan gövde donatısından daha yüksek bir dayanıma çıkardığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6.32 (g)' deki çift açıklıklı kiriş incelendiğinde referans veri yaklaşık 5,4 mm sehimde 1414 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. Mat08485 malzeme modeli için yaklaşık 4,8 mm sehimde 1940 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM7/1,0 kirişi için Mat08485 malzeme modelinin maksimum dayanım %10,55 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat159 malzeme modeli için yaklaşık 5,9 mm sehimde 2360 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM7/1,0 kirişi için Mat159 malzeme modelinin maksimum dayanımında %7,37 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat072R3 malzeme modeli için yaklaşık 2,1 mm sehimde 2040 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM7/1,0 kirişi için Mat072R3 malzeme modelinin maksimum dayanımında %7,18 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir. Mat016 malzeme modeli için yaklaşık 1,7 mm sehimde 1510 kN maksimum kuvvete ulaşmaktadır. BM7/1,0 kirişi için Mat016 malzeme modelinin maksimum dayanımında %4,45 değerinde bir değişim gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak Şekil 6.32'de 4 malzeme modeli içinde referans verideki maksimum dayanıma her bir kirişin belli bir korelasyonda olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum dayanımındaki sehim değerlerine bakacak olursak Mat084/85 ve Mat159 malzeme modellerinin referans veriye yakın sonuçlar çıkardığı gözlemlenirken Mat072R3 ve Mat016 malzeme modellerinin küçük sehim değerlerinde yüksek dayanıma ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.32. A/D=1,0 olan kirişlerin Sehim-Kuvvet eğrileri: a) BM1/1,0; b) BM2/1,0; c) BM3/1,0; d) BM4/1,0; e) BM5/1,0; f) BM1/1,0; ve g) BM1/1,0

7. TARTIŞMA

Derin kirişlerin analizindeki hatayı minimize etmek, azaltmak için birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bir yapının en önemli kriteri taşıyıcı elemanlarının gelen yüklere tepki koyabilmesidir. Bu amaçla yapı tasarlanır ve güvenli sınır değerler oluşturulur. Derin kirişler elastik ötesi davranış sergilediğinden diğer taşıyıcı elemanlardan daha çok dikkat gerektirmektedir. Betonarme derin kirişlerin kullanım yerleri itibariyle küçük bir hatanın telafi edilemeyecek bir maddi ve manevi hasara yol açacağı göz önünde bulundurularak derin kiriş tasarımı diğer taşıyıcı elemanların yük altındaki davranışı itibariyle çok dikkat gerektirmektedir.

Bu çalışmada kompleks bir şekilde Ansys Ls-DYNA programı ile çok sayıdaki kirişin modellenmesi yapılmış ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Literatürde sınırlı sayıda ve sınırlı örnekler üzerinden (boyut, donatı düzeni, açıklık/donatı oranı, tek açıklık, çift açıklık) ve genelde ABAQUS programında yapılan sınırlı çalışmalardan ziyade Ls-DYNA programı ile kompleks bir şekilde betonarme derin kirişler üzerinde etkisi irdelenmiştir. Ayrıca izin verilen mesh boyutuna göre akademik çalışmalarda ücretsiz bir program olan Ls-DYNA diğer mühendislik alanlarındaki yaygın ve elde edilen tutarlı çalışmaları itibariyle inşaat mühendisliği üzerindeki etkisi de irdelenmek istenmiştir.

Mühendisliğin temelinde hız, zaman ve maliyetin yadsınamaz dayanaklar olduğunu düşünürsek sayısal analiz yöntemi ile çok kısa zamanda sonuç alınması hem maliyet hem zaman hem de hız açısından önemli değerler katacaktır. Bu amaçla bu çalışmanın sayısal analiz yöntemi için betonarme derin kirişler için kompleks çalışması bizlere hem sayısal analiz için hem de kullanılan malzeme modeli özelinde tasarımcılara önemli bir kaynak olduğu düşünülmektedir.

Ls-DYNA kütüphanesinde yer alan 4 farklı malzeme modeli üzerinde ele alınan farklı donatı düzenine sahip modeller test edilmiş ve referans veride ki deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve tutarlılığı irdelenmiştir. Elde edilen veriler neticesinde kullanılan farklı malzeme modellerinin betonarme derin kirişler üzerinden farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen Ls-DYNA sonuçları referans verideki sonuçlar ile karşılaştırılmış ve kullanılan malzeme modelleri özelinde kirişler üzerinde tutarlı sonuçlar gözlemlenmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Rogowski ve ark., 1983 tarafından test edilen açıklık derinlik oranı 1,0 olan 7 tane derin betonarme kiriş, kompleks sonlu eleman yöntemleriyle birebir modellenmiş ve analiz edilmiştir. Uygun eleman boyutlarının ve uygun sınır koşullarının seçilmesinde tek açıklıklı bir derin kiriş referans alınarak yakınsama çalışması yapılmıştır ve sonuçlar test verileriyle doğrulanmıştır. Toplamda iki tane tek açıklıklı kiriş beş tane çift açıklıklı kiriş modellenmiş ve analiz edilmiştir. Sayısal ortamda modellenen derin kirişlerin davranışları farklı beton malzeme modelleri için incelenmiştir. Kiriş donatılarının modellenmesinde iki çizgili, plastik kinematik çelik malzeme modeli kullanılmıştır.

Ls-DYNA'da bulunan Mat 003 Plastik kinematik malzeme modeli kiriş donatılarının modellenmesinde, 4 farklı beton malzeme modeli (Mat084/085, Mat159, Mat072R3, Mat016) ile analiz edilmiş ve 4 malzeme modeli içinde maksimum kuvvet değerleri referans kirişlere göre belli bir korelasyonda olduğu gözlemlenmiştir. 4 malzeme modeli içinde ele alınan kirişlerin deneysel yollarla mümkün olamayacak gerilme simülasyonlarına bakılmış ve çalışmada bu sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca derin kirişlerdeki çift açıklıklı kirişler için mesnet sınırları etkisinin dayanım üzerindeki etkisi incelenmiş ve mesnet sınırlıklarının kayıcıdan ankastreye dönüştüğünde kirişlerdeki kesme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Referans olarak seçilen tek açıklıklı bir kiriş ve çift açıklıklı bir kiriş için minimum asal gerilme dağılımları, kesme ve boyuna donatı eksenel kuvvet talepleri incelenmiştir. Minimum asal gerilme konturları ile kiriş içerisinde oluşan STM yönteminde de kullanılan basınç çubuklarının olduğu bölgeler ve çubuk sınırları net bir şekilde görülmüştür. Farklı beton modelleri kullanılarak elastik-ötesi analizi yapılan kiriş davranışında kesme ve boyuna donatılardaki eksenel kuvvet talepleri, kirişin farklı sehimlerdeki durumları için incelenmiştir ve yapılan çalışma aşağıda özet bir şekilde sunulmuştur.

1. Sayısal olarak modellenen kirişlerin 4 malzeme modelinde de maksimum kuvvet değerlerinin referans veriye göre belirli korelasyonda olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum kuvvete denk gelen sehimlerin ise Mat084/085 ve Mat159 malzeme modeli için yaklaşık sonuçlar verirken Mat72R3 ve Mat016 malzeme modellerinde erken sehimde maksimum dayanıma ulaştığı gözlemlenmiştir.

2. Sayısal olarak modellenen tek açıklıklı kirişlerin gerilme dağılımları incelendiğinde Mat084/085, Mat159 ve Mat016 malzeme modellerinde gerilme dağılımlarının literatürdeki deneysel verilere benzer orantısal bir gerilme dağılımı

gözlemlenirken Mat072R3 malzeme modeli için beton gerilme özelliklerinden farklı açıklanamayan bir gerilme davranışı oluşumu gözlemlenmiştir. Sayısal olarak modellenen çift açıklıklı kirişlerin gerilme dağılımları incelendiğinde ise Mat084/085, Mat159 malzeme modelinin deneysel verilere benzer bir gerilme dağılımı olduğu ancak Mat016 ve Mat072R3 malzeme modeli için deneysel verilerden farklı bir gerilme dağılımının olduğu gözlemlendi.

3. Sayısal olarak modellenen etriye eksenel kuvvetlerin dağılımı incelendiğinde hem tek açıklı hem de çift açıklı kirişlerde Mat084/085, Mat159, Mat072R3 malzeme modellerinde beton ve donatıların bir bütün olarak çalıştığı ancak Mat016 malzeme modelinde bu uyumun görülmediği tespit edilmiştir.

4. Sayısal olarak modellenen kirişlerin alt donatıdaki eksenel kuvvet talepleri incelendiğinde, kirişlerin tasarımında donatının akma sınırına ulaşarak göçmenin beklendiği ve bu durumun çift açıklıklı kirişlerde Mat084/085, Mat159 ve Mat072R3 malzeme modeli için bu durumun yaşandığı ancak Mat016 ve deneysel veride akmaya yakın olsa da donatıların akmadığı gözlemlenmiştir. Tek açıklıklı kirişler için ise Mat084/085 ve Mat159 malzeme modelinin yine bu kurala uyum sağladığı ancak Mat072R3 ve Mat016 malzeme modeli için donatının çok az bir yüke uğrayarak daha erken bir kuvvet ile kirişte göçmenin yaşandığı tespit edilmiştir.

5. Sayısal olarak modellenen kirişlerde ele alınan bu 4 malzeme modelinde de atılan gövde donatısının kiriş kesme dayanımını artırdığı ancak önemli ölçüde etkisinin olmadığı, atılan etriyelerin ise kesme dayanımını artırdığı ve önemli ölçüde etki yarattığı görülmüş ve literatürdeki çalışmalara bakıldığında da bu durumun benzer etkiyi yarattığı görülmüştür.

6. Sonuç olarak Ls-DYNA kütüphanesinde yer alan Mat084/085, Mat159, Mat072R3 ve Mat016 malzeme modellerinin derin kirişler üzerindeki etkisine bakıldığında, bu 4 malzeme modelinde kirişler özelinde uyum sağladığı ancak bir bütün olarak düşünüldüğünde Mat084/085 ve Mat159 malzeme modellerinin derin kirişler üzerinde bir adım önde olduğu tespit edilmiştir.

7. Sayısal analiz yöntemleriyle birden çok ve farklı kombinasyonlara sahip donatı düzenine sahip kirişin elastik ötesi davranışı modellenmesi ve deneysel veriler ile doğrulanması neticesinde farklı geometri ve malzeme parametrelerine sahip kirişlerin modellenmesinde referans alınabilecektir. Bu nedenle yapılan çalışma yüksek maliyet, bütçe ve altyapı gerektiren deneysel çalışmalar için uygun bir alternatif olmaktadır.

9. KAYNAKLAR

- Abuwarda, A.**, 2019. Betonarme derin kirişlerin güçlendirilmesine ilişkin bazı önerilerin deneysel araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- ACI 318-1.**, 1983. Building code requirements for structural plain concrete (ACI 318.1-83) and commentary.
- ACI 318-14.**, 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI, Farmington Hills, Michigan.
- Al-Baijat, H., Alhawamdeh, M.**, 2019. Inspection and assessment of highway bridges in Jordan along the desert highway: A Case Stud, *Open Journal of Composite Materials*, 09(03), 249-259.
- Al-khreisat, A., Abdel-Jaber, M., Ashteyat, A.**, 2023. Shear strengthening and repairing of reinforced concrete deep beams damaged by heat using NSM–CFRP ropes, *Fibers*, 11(4), 35.
- Almasabha, G., Murad, Y., Alghossoon, A., Saleh, E. ve Tarawneh, A.**, 2023. sustainability of using steel fibers in reinforced concrete deep beams without stirrups, *Sustainability*, 15(6), 4721.
- Alsaeq, H. M.**, 2013. Effects of opening shape and location on the structural strength of R . C . Deep Beams with Openings. *International Science Index*. 7(6), 1365– 1370.
- Aoyoma, H.**, 1993. Design philosophy for shear in earthquake resistance in Japan. *Earthquake Resistance of Reinforced Concrete Structures-A Volume Honoring Hiroyuki Aoyama*, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Benmokrane, B., Neale, K. W., Belarbi, A., Yahia, A.**, 2015. performance and strut efficiency factor of concrete deep beams reinforced with gfrp bars.
- Broadhouse, B.**, 1995. The winfrith concrete model in Ls-DYNA3D. Report: SPD/D (95), 363.
- Broadhouse, B. ve Neilson, A.**, 1987. Modelling reinforced concrete structures in dyna3d. UKAEA Atomic Energy Establishment, Winfrith (UK). Safety and Engineering Science Div.
- BS 8110-1:1997.**, 1997 Structural use of concrete. London.
- Chin, S. C. ve Ing, D. S.**, 2013. Behaviour of reinforced concrete deeps with openings in the shear zones.

- CSA Standard A23.3-04.**, 2004. Design of concrete structures. 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada L4W 5N6.
- Çapar, Y.**, 2022. Ansys. <https://yasincapar.com/tr/calismalar/cae-2/ansys-tr/> (Erişim: 19 Mayıs 2023).
- Demir, A.**, 2018. Betonarme yüksek kirişlerde kesme çatlağının artık yük taşıma kapasitesine etkisine etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi.
- Demirel, B., Keleştemur, O.**, 2010. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume, *Fire Safety Journal*, 45(6-8), 385-391.
- EN 1992-1-1.**, 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.
- Guo, Z., Qin, Y., Zhang, Y., Li, X.**, 2023. Experimental investigation on shear behavior of dune sand reinforced concrete deep beams, *applied sciences*, 13(6), 3466.
- Hibbitt, D., Karlsson, B. ve Sorensen, P.**, 1978. Abaqus/CAE.
- Ionel-Dumitrel Ghiba.**, 2014. Saint-Venant's principle, ResearchGate.
- J.A. Ramiraz, C., C.W. French, S.**, 1999. Recent approaches to shear design of structural concrete, ACI-ASCE Committee 445.
- John O., H.**, 1976. LS-DYNA. USA.
- Kaplanlıoğlu, B. ve Gemalmayan, N.**, 2015. Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemler kullanılarak bulunan gerilmelerin karşılaştırılması.
- LSTC.**, 2013. Keyword User's Manual, Volume II, Material Models, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, CA, USA.
- Makki, O. M., Al-Mutairee, H. M. K., Mezher, M. H.**, 2023. Survey the behaviour of impacted shallow and deep beams, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 16(1), 170-176.
- Mansur, M. A., Huang, L. M., Tan, K. H., Lee, S. L.**, 1992. Deflections of reinforced concrete beams with web openings, *Structural Journal*, 89(4), 391-397.
- Min, T.**, 2021. Strut-and-Tie model: Part 1- Basics. <https://www.midasbridge.com/en/blog/bridgeinsight/strut-and-tie-model-part-1-basics> (Erişim: 22 Mayıs 2023).
- Nilson, A., Darwin, D., Dolan, C.**, 2010. Design of concrete structures.
- Novozhilov, Y. V., Dmitriev, A. N., Mikhaliuk, D. S.**, 2022. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation, *buildings*, 12(5), 636.

- Owatsiriwong, A.**, 2013. Strut-and-Tie-Modeling in reinforced concrete structures.
- Panjehpour, M., Chai, H. K., Voo, Y. L.**, 2015. Refinement of Strut-and-Tie model for reinforced concrete deep beams, *PLOS ONE*. Editör J. M. Garcia Aznar, 10(6), e0130734.
- Polat, E.**, 2020. Investigation of concrete filled composite plate shear walls using finite element methods. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(1), 139-152, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 139-152.
- Polat, E.**, 2022. Theoretical models for tie bar maximum axial force demand in composite plate shear walls–concrete filled, *International Journal of Steel Structures*, 22(4), 1108-1125.
- Portland Cement Association (PCA).**, 1976. Design of deep girders, 12.
- Potts, D. M., Zdravković, L.**, 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering: theory. London : Reston, VA.
- Rogowski, D. M., Macgregor, J. G. ve Ong, J. G.**, 1983. Test of reinforced concrete deep beams.
- Schlaich, J., Schafer, K., Jennewein, M.**, 1987. Toward a consistent design of structural concrete, *PCI Journal*, 32(3), 74-150.
- Schwer, L.**, 2011. The winfrith concrete model: beauty or beast? insights into the Winfrith concrete model. Proc., 8th European LS-DYNA Users Conference.
- Smith, K., Vantsiotis, A.**, 1982. Shear strength of deep beams, *Journal Proceedings*, 79(3), 201-203.
- TS 500.**, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. ANKARA.
- URL-1.**, 2022. Derin Işın Analizi ve Tasarımı. <https://wiki.structurepoint.org/deep-beam-analysis/> (Erişim: 16 Mayıs 2023).
- URL-2.**, 2021. Sonlu Elemanlar Metodu Nedir? Kullanım Alanları, pi404. <https://pi404.com/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-kullanim-alanlari/> (Erişim: 18 Mayıs 2023).
- URL-3.**, 2021. Ansys LS-DYNA, Ansys, Nümerik Analiz, Simülasyon, Sonlu Elemanlar Analizi. <https://numerikanaliz.com/ansys-ls-dyna/> (Erişim: 18 Mayıs 2023).
- URL-5.**, 2023. Ansys LS-DYNA | Crash Simulation Software. <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna> (Erişim: 19 Mayıs 2023).

URL-6., 2021. Çubuk analojisi Yöntemi (Strut and Tie Model), INSAPEDIA. <https://insapedia.com/cubuk-analojisi-yontemi-strut-and-tie-model/> (Erişim: 16 Mayıs 2023).

Woong, J., Kuchma, D., 2007. Strut-and-Tie model analysis for strength prediction of deep beams, *ACI Structural Journal*, 104(6).

Yılmaz, 2016'dan akt. I.M Boyan, I. Mihaylov, B., C. Bentz, E., P. Collins, M., 2013. *ACI Structural Journal*, 110(3), 447-456.

Zhang, N., Tan, K.-H., 2007. Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification, *Engineering Structures*, 29(12), 3241-3254.

