

KOMPOZİT KİRİŞ BİLEŞENLERİNİN GERİLME ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Lokman IŞIK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şenol ATAÖĞLU

HAZİRAN 2018

KOMPOZİT KİRİŞ BİLEŞENLERİNİN GERİLME ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Lokman IŞIK
(501051074)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şenol ATAÖĞLU

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501051074 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Lokman IŞIK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KOMPOZİT KİRİŞ BİLEŞENLERİNİN GERİLME ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şenol ATAÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ünal ALDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Çağrı MOLLAMAHMUTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **25 Nisan 2018**
Savunma Tarihi : **08 Haziran 2018**





Eşime ve çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında kompozit bileşenlerin gerilme analizinin deneysel araştırılması İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilerek kompozit elemanlarda boyut etkisi ve sayısal analiz sonuçları da irdelenmiştir. Tez boyunca benden desteğini esirgemeyen, her türlü sorunu aşmamda yardımcı olan, derin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Şenol ATAÖĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezin başlangıcından itibaren sabırlı bir şekilde bana yardımcı olan, bilgisiyle beni aydınlatan, ABAQUS programlamasında sonlu eleman yönteminin uygulanışında yol gösteren ve tezin her aşamasında kıymetli zamanını ayırarak engin bilgilerini benimle paylaşan değerli Dr. İnş.Yük. Mühendisi Ahmet Abdullah DÖNMEZ'e teşekkürü ve minneti borç bilirim.

Tezin deneysel kısmının hazırlanması aşamasında yardımda bulunan İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına, Cengiz ŞENGÜL'e, değerli katkı ve tavsiyeleri için Dr.Öğr.Üyesi Ö.Tuğrul TURAN'a ve Deneysel Mekanik Laboratuvarı teknisyeni Can Kurtulan'a teşekkür ederim.

Bütün bu süreç boyunca ve zorlu zamanlarda iyimser bakışları, maddi ve manevi destekleri ile hep yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2018

Lokman IŞIK
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozit Genel Esaslar	2
1.2 Kompozit Bileşenleri.....	2
1.2.1 Beton.....	3
1.2.2 Çelik kiriş	5
1.2.3 Trapez çelik saç	6
1.2.4 Beton donatısı.....	7
1.2.5 Kayma bağlayıcıları.....	7
1.2.5.1 Rijit tip	8
1.2.5.2 Esnek tip	8
1.2.5.3 Bağlı-ankrajlı tip.....	10
1.3 Kompozit Hesap Esasları.....	11
1.3.1 Kompozit kiriş hesabı	12
1.3.1.1 Bağlantı olmama durumu	12
1.3.1.2 Tam bağlantı olma durumu.....	15
1.3.2 Kayma bağlayıcılarının hesabı	19
1.3.3 Boyut etkisi.....	22
1.4 Literatür	24
1.4.1 Kayma bağlayıcıları.....	24
1.5 Hipotez	37
2. SAYISAL YAKLAŞIMLAR	39
2.1 Yöntem	39
2.1.1 Sonlu eleman seçimi.....	39
2.1.2 Malzemelerin modellenmesi	39
2.1.3 Temas yüzeylerinin modellenmesi	40
2.1.4 Sınır koşulları ve yük ataması	43
2.2 Kalibrasyon.....	44
2.2.1 Lam ve diğ. (2005)	45
2.2.2 Lee ve diğ. (2004)	47

2.2.3 Han ve diğ. (2015).....	50
2.2.4 Liu ve Alkhatib (2013)	52
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	55
3.1 Numune Özellikleri	55
3.2 Malzeme Seçimi ve Numunelerin Hazırlanışı.....	57
3.2.1 Beton.....	57
3.2.2 Çelik profil.....	61
3.2.3 Stud çivisi	62
3.2.4 Donatı	66
3.3 Deneyin Uygulanışı	68
4. DENEY SONUÇLARININ SAYISAL DOĞRULAMASI	81
4.1 Yöntem	81
4.1.1 Sonlu eleman seçimi.....	81
4.1.2 Malzeme özelliklerinin atanması.....	82
4.1.3 Bileşenlerin bağlanma şekilleri ve temas yüzeylerinin modellenmesi...	83
4.1.4 Sınır koşulları ve yük ataması	86
4.1.5 Modellemelerde mesh atanması	88
4.2 Analiz sonuçları.....	90
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	: American Concrete Institute
AISC	: American Institute of Steel Construction
AS	: Australian Standards
EC	: Euro Code
EN10025-2	: Sıcak haddelenmiş yapısal çelik mamulleri - Bölüm 2
FEM	: Finite Element Model
GB	: National Standart of the People's Republic of China
GPa	: Giga Pascal
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
JSCE	: Japan Society of Civil Engineers
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanîği
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
LVDT	: Linear Variable Differential Transformers
MPa	: Mega Pascal
NBR	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
NSZ	: New Zerland Standards
PL	: Push-Out Large
PM	: Push-Out Medium
PS	: Push-Out Small
TS500	: Türk Standartı Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
TS802	: Türk Standartı Beton Karışımı Hesap Esasları



SEMBOLLER

A	: Döşeme alanı
A_s	: Stud çivisi kesit alanı
B	: Yapı biçimine bağlı ampirik katsayı
b	: Genişlik değeri
b_s	: Çelik profil başlık boyu
C	: Çimento miktarı
D	: Yapının karakteristik boyu
D_0	: Gevrek ve gevrek olmayan davranış arasında geçişi gösteren ampirik katsayı
d	: Stud gövde çapı
d_s	: Çelik profil gövde boyu
E	: Elastisite modülü
E_c	: Beton elastisite modülü
E_s	: Çelik elastisite modülü
f_{ck}	: Beton karakteristik silindir dayanımı
f_{ctk}	: Beton karakteristik çekme dayanımı
f_{cu}	: Beton karakteristik küp dayanımı
f_{su}	: Donatı kopma dayanımı
f_t	: Betonun çekme dayanımı
f_u	: Çelik çekme dayanımı
f_w	: Stud çekme dayanımı
f_y	: Çelik akma dayanımı
f_{yk}	: Donatı akma dayanımı
h	: Yükseklik değeri
h_d	: Stud yüksekliği
h_r	: Saç trapez boşluk yüksekliği
h_s	: Çelik profil yüksekliği
I	: Atalet momenti
I_b	: Alan statik momenti
I_e	: Kompozit elemanın tüm atalet momenti
K	: Abaqus programı parametresi
L	: Kiriş açıklığı
M_x, M_y	: Moment bileşenleri
N_1, N_2	: Normal kuvvet bileşenleri
P_{max}	: Deney sonucu elde edilen ortalama maksimum yük
P_u	: Stud çivisi taşıma kapasitesi
Q	: Yayılı yük
r	: Çelik profil başlığı ile gövdenin birleşim yeri yarı çapı
S	: Kayma miktarı
t_f	: Çelik profil başlık kalınlığı
t_w	: Çelik profil gövde kalınlığı
V	: Kesme kuvveti
V_x	: x açıklıklı kesitte kayma kuvveti değeri

W	: Su miktarı
w_c	: Beton birim hacim ağırlığı
w_r	: Saç trapez hadve genişliği
x	: Kiriş orta açıklığından birim uzaklık
$\bar{y}$	: Döşeme merkezinden kompozit elemanın tarafsız eksenine olan uzaklık
β	: Dilatasyon açısı
δ	: Sehim
ε_{su}	: Donatı kopma uzaması
ε_x	: Birim şekil değiştirme
ϕ	: Donatı çapı
σ	: Gerilme
σ_0	: Küçük boyutlar için elde edilen referans dayanımı
σ_b	: Basınç gerilmesi
σ_N	: Göçmedeki nominal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Beton dayanımı.	3
Çizelge 1.2: TS500 Beton dayanımı.....	4
Çizelge 1.3: Çelik yapılar yönetmeliğine göre çelik özellikleri.	5
Çizelge 1.4: Donatı çeliklerinin mekanik özellikleri (TS708).	7
Çizelge 1.5: Stud çivisi kayma kapasitesi hesabına ilişkin standartlar.	22
Çizelge 3.1: Granülometri tablosu.....	58
Çizelge 3.2: Granülometri yüzdelik oranları.	58
Çizelge 3.3: Beton karışımında kullanılan malzemeler.	59
Çizelge 3.4: Beton basınç dayanım testi sonucu elde edilen değerler.	61
Çizelge 3.5: Donatı miktarı.	66
Çizelge 3.6: Deney sonucunda elde edilen maksimum yük ve kayma değerleri.....	79



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Kompozit döşeme bileşenleri.	3
Şekil 1.2 : Tipik bir I profil kesidi.	5
Şekil 1.3 : Çelik yapılar yönetmeliğine göre çelik saç için konstrüktif kurallar.	6
Şekil 1.4 : Rijit tip kayma bağlantıları.	8
Şekil 1.5 : Esnek tip kayma bağlantıları.	9
Şekil 1.6 : Stud çivisi montajı.	9
Şekil 1.7 : Ayarlanabilir stud çivisi.	10
Şekil 1.8 : a) Sarmal tipli kayma bağlayıcısı b) Çengel çubuk tipli kayma bağlayıcısı.	11
Şekil 1.9 : Kayma bağlantısının eğilme ve kayma gerilmesindeki etkisi. ...	12
Şekil 1.10 : Tipik şekil değiştirme, kayma ve kayma birim şekil değiştirme.	14
Şekil 1.11 : Genel kuvvet dengesi yönteminde kayma hesabı.	17
Şekil 1.12 : Basitleştirilmiş elastik kiriş davranışı yönteminde kayma hesabı.	18
Şekil 1.13 : Yük taşıma mekanizması.	20
Şekil 1.14 : Stud çivisi gövdesinde oluşan gerilmeler.	20
Şekil 1.15 : Tipik stud çivisi	21
Şekil 1.16 : Boyut etkisi kanununa göre boyut etkisi grafiği.	24
Şekil 2.1 : Sonlu eleman modellemesi.	40
Şekil 2.2 : Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.	41
Şekil 2.3 : a) Beton döşeme yüzeyi b) Çelik profil yüzeyi.	41
Şekil 2.4 : Çelik profil ve stud çivisi görünüşü.	42
Şekil 2.5 : a) Stud çivisi yüzeyi b) Stud çivisini sarmalayan beton yüzeyi. .	42
Şekil 2.6 : Beton döşeme ve demir donatı görünüşü.	43
Şekil 2.7 : a) X simetri yüzeyi b) Y simetri yüzeyi.	44
Şekil 2.8 : a) Yükleme yüzeyi b) Destek yüzeyi.	44
Şekil 2.9 : İtme testi numune ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir).	45
Şekil 2.10 : Modellemenin mesh yapılmış hali.	46
Şekil 2.11 : Kayma "stud"ı için itme testi ve karşılık gelen sonlu eleman analizi: a) 50 MPa beton b) 35 MPa beton için.	47
Şekil 2.12 : İtme testi numune ölçüleri (ölçüler mm cinsinden verilmiştir). .	48
Şekil 2.13 : Modellemenin mesh yapılmış hali.	49
Şekil 2.14 : Stud çivisi itme testi ve karşılık gelen sonlu eleman analizi.	49
Şekil 2.15 : İtme testi numune detayları (ölçüler mm cinsinden verilmiştir).	50
Şekil 2.16 : Çeyrek modelleme ve mesh yapılmış hali.	51

Şekil 2.17	: Stud çivisi için yapılan test ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	51
Şekil 2.18	: İtme testi numune ölçüleri (ölçüler mm cinsindendir).....	52
Şekil 2.19	: Çeyrek modelleme ve mesh yapılmış hali.	53
Şekil 2.20	: Stud çivisi için yapılan test ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	53
Şekil 3.1	: a) Deney numuneleri PL1-PL3 boyut ve ölçüleri b) Deney numuneleri PM1-PM3 boyut ve ölçüleri c) Deney numuneleri PS1-PS3 boyut ve ölçüleri (Tüm ölçüler mm cinsinden verilmiştir).	56
Şekil 3.2	: Kalıpları hazırlanmış numuneler.....	57
Şekil 3.3	: Granülometri grafiği.	59
Şekil 3.4	: Numunelere beton dökülmesi.	60
Şekil 3.5	: Silindirik beton basınç testi.....	60
Şekil 3.6	: Numunelerde kullanılan beton basınç dayanım grafikleri.....	61
Şekil 3.7	: Deneyde kullanılan IPN 300, IPN 160, IPN 80 çelik profiller ve ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir).	62
Şekil 3.8	: Deneyde kullanılacak stud çivileri.	63
Şekil 3.9	: a) Büyük boy stud çivisinin kaynatılma işlemi b)Orta boy stud çivisinin kaynatılma işlemi c)Küçük boy stud çivisinin kaynatılma işlemi.....	63
Şekil 3.10	: a)Seramik yüzük b)Çelik profillere kaynatılmış stud çivileri c)Stud çivileri kaynatılmış tüm numuneler.	64
Şekil 3.11	: Stud çivisinin torna için girilen ölçüleri (ölçüler mm cinsindendir).....	64
Şekil 3.12	: Stud çivisinin torna işlemi.	65
Şekil 3.13	: Stud çivisi gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.	65
Şekil 3.14	: Deneyde kullanılan donatılar.....	66
Şekil 3.15	: Donatı gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme grafiği.	67
Şekil 3.16	: Deney için hazırlanan beton donatıları.....	67
Şekil 3.17	: Beton donatılarının kalıpta yerleştirilmesi.	67
Şekil 3.18	: Deney için hazırlanan numuneler.....	68
Şekil 3.19	: Deney düzeneği.	69
Şekil 3.20	: PL1 numunesi itme testi.	70
Şekil 3.21	: PL1 numunesi kuvvet-kayma grafiği.	70
Şekil 3.22	: PL2 numunesi itme testi.	71
Şekil 3.23	: PL2 numunesi kuvvet-kayma grafiği.	71
Şekil 3.24	: PL3 numunesi itme testi.	72
Şekil 3.25	: PL3 numunesi kuvvet-kayma grafiği.	72
Şekil 3.26	: PM1 numunesi itme testi.	73
Şekil 3.27	: PM1 numunesi kuvvet-kayma grafiği.....	73
Şekil 3.28	: PM2 numunesi itme testi.	74
Şekil 3.29	: PM2 numunesi kuvvet-kayma grafiği.	74
Şekil 3.30	: PM3 numunesi itme testi.	75
Şekil 3.31	: PM3 numunesi kuvvet-kayma grafiği.	75
Şekil 3.32	: PS1 numunesi itme testi.....	76

Şekil 3.33	: PS1 numunesi kuvvet-kayma grafiği.....	76
Şekil 3.34	: PS2 numunesi itme testi.....	77
Şekil 3.35	: PS2 numunesi kuvvet-kayma grafiği.....	77
Şekil 3.36	: PS3 numunesi itme testi.....	78
Şekil 3.37	: PS3 numunesi kuvvet-kayma grafiği.....	78
Şekil 3.38	: Deney sonuçları ve boyut etkisi.	80
Şekil 4.1	: Numune modellemesi.	81
Şekil 4.2	: Beton numune modellemesi.....	82
Şekil 4.3	: a) Çelik profil ve stud çivisi modellemesi b) Donatı modellemesi.	83
Şekil 4.4	: Çelik profil başlığına merge edilmiş stud çivisi.....	84
Şekil 4.5	: a) Çelik profil temas yüzeyi b) Beton döşeme temas yüzeyi....	84
Şekil 4.6	: Beton döşeme içerisine gömülü donatılar.....	85
Şekil 4.7	: a) Beton döşeme ile temas eden stud çivisi yüzeyi b) Betonun stud çivisi ile temas eden yüzeyi.	85
Şekil 4.8	: Yükleme yüzeyi.	86
Şekil 4.9	: Amplitude değeri tanımlanması.	87
Şekil 4.10	: Destek yüzeyi tanımlanması.	87
Şekil 4.11	: a) X simetri yüzeyi b) Y simetri yüzeyi.....	88
Şekil 4.12	: Modellemenin mesh yapılabilmesi için yapılandırılması.....	89
Şekil 4.13	: a) Büyük boy numune mesh b) Orta boy numune mesh c) Küçük boy numune mesh.	89
Şekil 4.14	: Subroutine dosyasının tanımlanması.	90
Şekil 4.15	: Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması; a) PL numunesi b) PM numunesi c) PS numunesi.....	91
Şekil 4.16	: Sonlu elemanlar yönteminde boyut etkisi grafiği.	92



KOMPOZİT KİRİŞ BİLEŞENLERİNİN GERİLME ANALİZİ

ÖZET

Farklı türde malzemelerin bir arada kullanılması ile kompozit yapılar oluşmaktadır. Bu farklı türdeki malzemeler çelik, ahşap ve beton gibi malzemeler olabilmektedir. Kompozit yapılarda sıkça kullanılan çelik-beton birlikteliği çeşitli avantajlarından dolayı günümüzde oldukça yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bu tezde kompozit yapılar hakkında genel bilgiler verilerek, kompozit kiriş bileşenleri tanıtılmış ve kompozit kiriş bileşenlerinin hesap yöntemleri ele alınarak, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında hazırlanan dokuz adet deney numunelerinin itme (push-out) testleri yapılarak kompozit kiriş bileşenlerinin gerilme analizi ve boyut etkisi testleri yapılmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen analiz sonuçlarının Abaqus sonlu eleman yöntemi programında modellemeleri yapılarak karşılaştırmalı analizleri yapılmış ve deney sonucunda kompozit bileşenlerin gerilme davranışları irdelenmiştir.

Tezin birinci bölümde çelik beton kompozit yapıları ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Kompozit kirişi oluşturan kompozit bileşenleri olan beton, çelik profil, trapez çelik saç, beton donatısı ve kayma bağlayıcılarından söz edilmiştir.

Kompozit kirişin en önemli bileşeni olarak görülen kayma bağlayıcıları türlerinin neler olduğu ifade edildikten sonra kompozit kirişlerin ara yüzünde bağlantı elemanının bulunması veya bulunmaması durumundaki hesap esasları ile ilgili bilgiler yer almıştır. Kayma bağlayıcılarından günümüzde de en çok tercih edilen ve bu tezde deneysel çalışmada kullanılmış olan stud (kesme) çivisinin genel özellikleri, standart ölçüleri ve hesap yöntemi anlatıldıktan sonra stud çivisinin taşıma kapasitesi hesabında kullanılan ulusal ve uluslararası standartlara ilişkin formülizasyonlar açıklanmıştır.

Ayrıca birinci bölümde kayma bağlayıcılarının davranışlarını farklı koşullar altında incelemiş olan deneysel çalışmalara ilişkin literatür çalışmaları ve sonuçlarına ilişkin bilgiler de yer almaktadır.

Bu literatür çalışmalarında itme (push-out) testi yöntemi ile deneysel çalışmalar yapılmış ve bu deneysel çalışmaların Abaqus programı kullanılarak yapılan sayısal doğrulamaları anlatılmıştır.

İkinci bölümde ise tezde yapılan deneysel çalışmaların sayısal doğrulamasını yapabilmek için kullanılan Abaqus programında kullanılacak olan yöntemle esas olacak sonlu eleman seçimi, malzemelerin modellenmesi, temas yüzeylerinin modellenmesi, sınır koşulları ve yük ataması ve kalibrasyon analizleri yapılmıştır. Malzeme seçiminde beton dökme için "Damage Plasticity Model" ve "Microplane Model (M7)" parametreleri kullanılmıştır.

Seçilen yöntemlerin doğruluğunun teyit edilebilmesi için daha önce yapılmış olan deneysel literatür çalışmalarından seçilen örneklerin sonuçları ile seçtiğimiz yöntem esaslarına bağlı parametreler kullanılarak sonlu eleman yöntemi kullanılarak bu örneklerin Abaqus programında modellemeleri yapılmıştır. Yapılmış olan modellerin

analiz sonucunda çıkan değerler örnek alınmış olan literatür çalışmalarının sonuçları kuvvet-kayma grafiği oluşturularak karşılaştırılması yapılmıştır.

Üçüncü bölümde deneysel çalışmada kullanılacak olan deney numunelerinin özelliklerinden ve numunelerin hazırlanarak deneyin uygulanmasından söz edilmiştir. İtme testinde çelik profillere stud çivileri her başlıkta kaynatılmış ve her başlığa beton dökülerek çelik profil iki beton döşeme arasında kalacak şekilde numuneler hazırlanmıştır.

Çelik profilin her başlığına birer adet stud çivisi özel bir kaynak tabancası ile saplama kaynak yapılmıştır. Ayrıca beton basınç dayanımının 45-55 MPa aralığında olması için laboratuvarda doğal kum, kırma kum, kırma taş, su ve çimento oranları hesaplanarak malzemeler oluşturularak beton hazırlanmıştır.

Her bir beton döşemede altta ve üstte olmak üzere nervürsüz hasır donatılar hazırlanmıştır. Deneyde boyut etkisinin araştırılabilmesi için her numuneden üç adet olmak üzere büyük boyda (PL1, PL2, PL3), tüm kompozit bileşenlerinin boyutları büyük boyun ölçülerinin yarısı olacak şekilde (PM1, PM2, PM3) ve küçük boyda tüm ölçüler orta boyun yarısı olacak şekilde de (PS1, PS2, PS3) numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi laboratuvarında bulunan yük uygulama makinesinde kuvvet çelik profillerin gövdesine uygulanacak şekilde itme testi gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde deney uygulaması ile elde edilen kuvvet-kayma değerleri sonuçları incelenmiştir. Deney sonucunda elde edilen değerlerin sayısal doğrulaması için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak Abaqus programında numunelerin modellemeleri yapılmıştır. Modellemede sonlu eleman yönteminde kullanılacak parametreler ikinci bölümde anlatıldığı şekilde tanımlanarak analiz sonuçları elde edilmiştir. Abaqus programı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-kayma grafikseliliği ile deney sonuçlarının grafikseliliğinin birbiri ile uyumlu olduğu sonucu elde edilmiştir.

Sonuç kısmında deneysel sonuçlar bize göstermiştir ki en küçük boyuttaki numune büyük boy numuneye göre daha fazla gerilme taşıyabilmektedir. Böylelikle kompozit kırışlerde boyut etkisinin etken olduğu sonucuna varılabilmektedir.

STRESS ANALYSIS OF COMPOSITE BEAM COMPONENTS

SUMMARY

Composite structures are formed by using a combination of different types of material. These different types of materials can be materials such as steel, wood and concrete. In this thesis, general information about composite structures is given, composite beam components are introduced and the calculation methods of composite beam components are taken into consideration and push-out tests of nine test specimens prepared in ITU Civil Engineering Building Materials Laboratories are carried out and stress analysis and size effect tests of composite beam components are performed.

Analytical results obtained from the experimental work were analyzed in the Abaqus finite element method program and their tensile behaviors of the composite components were investigated.

In the first part of the thesis, general information about steel concrete composite structures is given. Composite beam forming composite components that are concrete, steel profiles, trapezoidal sheet steel, concrete reinforcement and shear connectors are mentioned.

Information on the basis of calculations in the presence or absence of a connecting element at the interface of composite beams after expressing what kind of shear connectors are considered as the most important component of the composite beam.

The shear connector is used to tie the concrete slab and steel beam in order to transfer the horizontal shear between the slab and the steel beam without slip and at the same time to prevent vertical separation of the slab from the steel profile at the inner face.

Also at this part includes types of shear connectors which called rigid type, flexible type and bond or anchorage type. Rigid type, resist shear forces through the front side by shearing and sustain a small deformation. Type of failure is generally concrete failure. Bar connector, tee connector, horseshoes connector and channel connectors are common examples of rigid type connector.

Flexible connectors derive the stress resistance by bending, tension or shearing in the root and exposed to large deformation. When they reached the ultimate strength, they sustain plastic deformation.

The most commonly used type is headed (stud) connector. These connectors are welded to flange of the steel beam by welded machine. During welding operation using a ceramic ferrule to ensure good welding.

After describing the general properties, standard measurements and calculation method of the stud shear connector, which is the most preferred today and in this thesis used in the experimental work, the formulations for the national and international standards used in the calculation of ultimate strength capacity of the stud shear connectors are explained.

In addition, in the first part, there are also literature studies and results of experimental studies which investigated the behavior of shear connectors under different conditions.

Experimental studies have been carried out with push-out test method in these literature studies and numerical verification of these experimental works using Abaqus program has been explained.

In the second part, finite element selection, modeling of contact surfaces, modeling of materials, boundary conditions and load assignment and calibration analysis were performed in the Abaqus program which is used for numerical verification of experimental works performed in thesis.

In order to confirm the validity of the selected methods, the results of selected samples from previous experimental literature studies and the parameters related to selected method principles were used to model these samples in the Abaqus program using the finite element method.

In the Abaqus program, because of the symmetry of the specimens, only one quarter of the push out test arrangement is modelled. For the concrete slabs, steel beam and stud connector a 3D eight node element C3D8R (Continuum, 3D, 8-node, reduced integration) solid element type is chosen. And for the rebar component 3D beam element B31 (Beam, 3D, 1-st order interpolation) is adopted.

For material selection for concrete slab is chosen "Damage Plasticity Model" when analyse method is "static/implicit" and "Microplane Model (M7)" parameters are used when analyse method is "explicit/dynamic". Steel beam, stud connector and rebars material selection, bilinear stress-strain curve is used to define material model.

"Explicit/Dynamic" analysis method is about time control. And this method generally used to solve progressing damage, failure of metal, the problem of impact and metal forming. This method also shows to be a powerful solution scheme for discontinuous medium, contact interaction and large deformation. Even though being a dynamic method, explicit method is also used for a quasi-static analyses. In the Abaqus program as explained, the results of analysis made by this method were more realistic.

Before analyse the model the most important option is mesh the model. During analyse the model, mesh option should be more frequent intervals around the stud connector and interaction zone where stud connector embedded the concrete slab.

The results of the analysis of the models that have been made are compared with the results of the literature studies which are taken as an example by creating a force-slip chart.

In the third section, the properties of the test specimens to be used in the experimental work are mentioned. This part is also mentioned that the specimens are prepared in the lab and applied the test. In the push-out test, the steel profiles were welded in studs. And then concrete is poured into each head of the steel profile. So steel profiles are prepared in such a way that they remain between two concrete slabs.

For each head of the steel profile, one stud connector is welded stud welding with a special welding machine. During welding stud connector used ceramic ferrule for controlling welding area. And also for understanding size effect the stud connectors size scaled by using lathe machine.

Furthermore, in order to have concrete compressive strength 45-55 MPa, natural sand, crushed sand, crushed stone¹, water and cement ratios are calculated in the laboratory and concrete is prepared by forming materials.

The aggregates were subjected to sieve analysis in order to be able to hold the concrete class. The granulometry of the aggregates was established as a result of sieve analysis. We have a granulometry curve after all this has been achieved. After pour concrete to coupon, the specimens are kept in the concrete pool so that it can receive the curing time. After concrete casting, cylindrical concrete pressure test was done to find ultimate compressive strength of concrete.

For understanding stud connector and rebars behaviour, they were subjected to tensile strength test by using tensile testing machine in ITU Civil Engineering Building Materials laboratory. After calculated ultimate tensile strength of stud connector and rebars, the values found were entered as material properties in the model made in the Abaqus program.

The reinforcement mesh without ribs arranged to be the bottom and top of each concrete slab. In order to investigate the size effect in the experiment, nine samples were prepared in total, three from each sample. Specimens classified as PL1-PL2-PL3 are the largest size, the specimens are classified as PM1-PM2-PM3 prepared so that the dimensions of all composite components are half of the dimensions of the largest size and last specimens which will be the smallest specimens, the dimensions of all components are half of the dimensions of the previous one are classified as PS1-PS2-PS3. After the specimens were prepared, push-out tests were carried out in the load applicator located in ITU Civil Engineering Building Materials Laboratory to be applied to the web of steel beam.

In the fourth section, the results of the force-slip values obtained by the experiment are examined. As a result of the experiment, specimens were modeled in the Abaqus program in the direction of the values obtained by using finite element model (FEM). These models were analyzed and compared with the experimental study, numerical verification of the experiment was made.

The result of the force-slip graph obtained from the analysis results using the Abaqus program and the graphs of the test results are in agreement with each other. Thus, it can be concluded that size effect is the effect of composite beams.

Consequently, findings obtained from numerical and experimental studies show that the study is compatible with the hypothesis part. The shear connections of composite beam components exhibit a brittle fracture mechanism during fracture. This brittle fracture mechanism is accompanied by size effect. As a result of experimental and numerical analyzes, this brittle fracture type can be caused by crushing of the concrete part.

And size effect is observed when it occurs in the form of the progress of micro and macro cracks formed in fracture of concrete. The size effect of the concrete was not clearly seen in the push-out test, which is a composite beam component, because there was no previous size effect analysis. However, in the present study, this situation has been uncovered and it has been revealed that improvements have to be made to the required standards.



1. GİRİŞ

Kompozit yapılar, beton döşemenin çelik kirişlerce desteklenerek bu iki elemanın birlikte çalışması sağlanan yapılardır. Kompozit kirişlerde iki eleman arasında bağlayıcı elemanlar yok ise bu iki eleman bağımsız davranır ve kesişim yüzeyinde göreceli kayma ortaya çıkar. Önceden tasarlanmış ve uygun olan bir bağlayıcı yardımı ile beton döşeme ve çelik kiriş bağlantısı sağlanırsa aralarındaki kayma ortadan kaldırılabilir. Bu durumda çelik kiriş ve betonarme döşeme “kompozit kiriş” olarak davranır ve tek parçalı T kiriş olarak hareket eder. Kompozit kirişler her ne kadar yaygın olarak çelik ve beton malzemelerden oluşsa da ön gerilmeli beton ve kalas gibi malzemelerden de oluşabilir. Beton, çekmeye göre basınç karşılamada daha güçlüdür, çelik ise basınç altında burulmaya daha hassastır. İki eleman arasındaki kompozit hareket aracılığıyla, kompozit kirişi oluşturan elemanların ayrı ayrı özellikleri nedeniyle sahip oldukları avantajlarından kirişin bütününde de faydalanılabilir. Genellikle çelik-beton kompozit kirişlerde, çelik kirişler, ön üretilmiş yada yerinde dökme donatılı betonarme döşemeye bütünsel olarak bağlanırlar. Çelik-beton kompozit yapıların birçok ortak avantajları vardır.

Öncelikle çelik ve beton etkili bir şekilde birlikte çalışabilen malzemelerdir. Bu sebeple bu iki malzemenin kompozit tasarımları oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Sabit açıklık ve değişmeyen yükleme altında; kompozit yapılar, kompozit olmayan yapılar ile karşılaştırıldığında daha az çelik kullanıldığından ekonomik olarak daha uygun maliyet ile karşılaşılmaktadır. Kiriş yüksekliği azaltılabildiğinden daha konforlu tavan yükseklikleri tercih edilebiliyor. Çelik-beton kompozit yapılarında eleman rijitliği arttığından çelik kirişe göre daha az sehimler ortaya çıkar. Ayrıca kompozit yapılar uzun açıklıklarda daha verimli dizilim yapılmasını sağlar ve prefabrik beton kullanılabildiğinden inşaat yapım süresi de oldukça azalmaktadır.

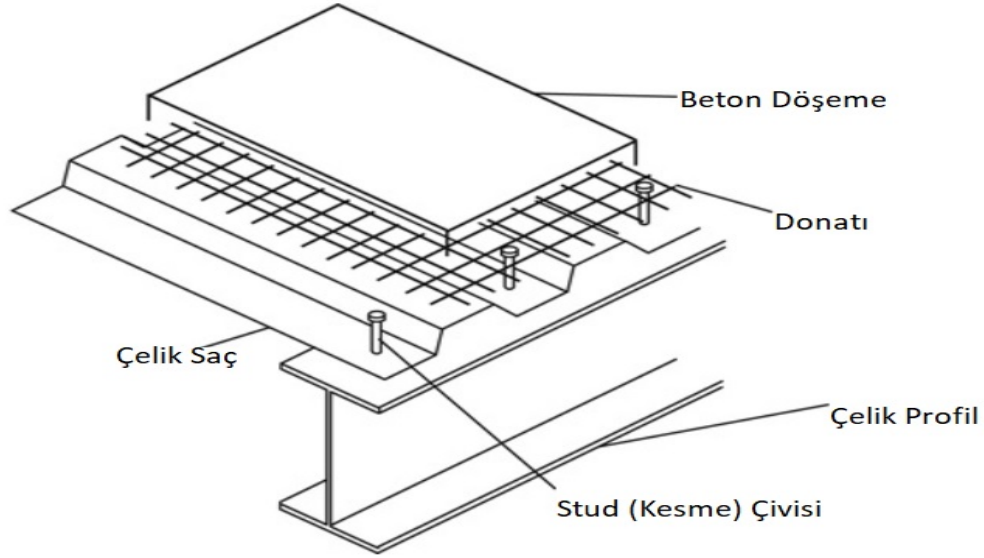
1.1 Kompozit Genel Esaslar

En az iki elemanın bir araya gelmesi ile her bir elemanın üstün özelliğinin kullanılarak birbirlerini tamamlamasının amaçlandığı durumlara kompozit eleman yada kompozit malzemeler denir. Kompozit döşeme sisteminin bir elemanı olan çelik kirişin, mekanik kayma bağlantıları vasıtasıyla betona bağlanmasıyla bu iki malzeme beraber çalışmaktadır. Esas olarak eğilme etkisi altında olan kompozit kirişlerde bugün en sık kullanılan mekanik kayma bağlantıları pratikliği nedeniyle standartların da kabul ettiği başlıklı saplamalardır. Çelik kirişin üst başlığına yerleştirilen yeterli sayıdaki kayma bağlantısıyla betonla beraber çalışmasının sağlandığı düşey yük etkisi altındaki basit kirişlerde pozitif eğilme momenti çelik kesitin çekme kuvveti ve betonun basınç kuvveti etkisi altında kalmasına sebep olur. Bu durumda her iki malzemeden optimum olarak yararlanılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan kompozit kirişler, boyut olarak daha küçük enkesitli çelik kirişe göre daha büyük rijitliğe sahiptirler ve daha büyük yükleri taşıyabilirler. Kompozit kesitin rijitliği çelik profil kesitinin rijitliğine göre daha fazla olduğundan kompozit kullanımında kiriş sehimleri de azalmaktadır. Kompozit kirişlerde ise çelik kirişin üst başlığına yerleştirilen kayma bağlantıları ile beton ve çelik arasındaki boyuna kayma önlenerek kompozit elde edilir.

Çelik kiriş ve beton döşeme ara yüzünde toplam kayma kuvvetinin kiriş tarafından taşınan yükten çok daha fazla olduğundan çelik-beton ara yüzeyinde ayrılma olmasını engellemek ve kaymanın ara yüz boyunca iletilmesini sağlamak üzere çeşitli türlerde mekanik kayma bağlantıları tasarlanmıştır.

1.2 Kompozit Bileşenleri

Bir kompozit kirişi oluşturan temel parçalar beş ana başlık altında incelenebilir. En temelde beton tabliye, çelik profil, kayma bağlayıcıları (stud çivisi), trapez saç ve beton donatı çeliği esas bileşenleri oluşturmaktadır. Kompozit kirişi oluşturan ana bileşenlerin detayları gösterilmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Kompozit döşeme bileşenleri.

1.2.1 Beton

Kompozit kirişlerin tasarımlarında beton tabliyenin önemi büyüktür. Beton tabliye tasarımlarda genellikle tarafsız eksenin üzerinde kalıp tamamı basınç gerilmelerine maruz kalacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu durum kirişin basınç bölgesinde kalan kayma bağlantılarının performansını etkilemektedir. Bu yüzden kompozit kirişlerde kullanılacak beton sınıfının seçimi tasarım sürecindeki en önemli hususlardan birisidir. Kullanılan beton sınıfları Eurocode için Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Beton dayanımı.

Beton Karakteristik Özelliği	Beton Sınıfı						
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
$f_{ck}(MPa)$	20	25	30	35	40	45	50
$f_{cu}(MPa)$	25	30	37	45	50	55	60
$f_{ctk}(MPa)$	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
$E_c(kN/mm^2)$	29	30.5	32	33.5	35	36	37

Eurocode’da beton sınıfı silindir mukavemeti f_{ck} cinsinden verildiğinden C35 verildiğinde bunun basınç dayanımının 35 MPa olduğu anlaşılır. Silindir yerine küp beton kullanılırsa test sonucunda ortaya çıkan dayanım (f_{cu}) daha farklı bir sonuç verecektir. Silindir dayanımı ve küp dayanımı arasında Denklem 1.1 geçerlidir.

$$f_{ck} = 0.8f_{cu} \quad (1.1)$$

f_{ck} ve f_{cu} basınç dayanımlarını, f_{ctk} çekme gerilmesini, E_c ise Elastisite Modülünü ifade etmekte olup beton sınıfları için aşağıdaki tablo da değerleri gösterilmiştir. Eurocode standartlarına göre kompozit döşemelerde beton sınıfının minimum C30 olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca betonun aşınma yüzeyi olduğu durumlarda ise C35 hatta C40 olması tavsiye edilmektedir. Beton dayanımları TS500 de ise f_{ctm} deneylerden elde edilen ortalama çekme dayanımı, f_{ctk} karakteristik çekme dayanımı olarak ifade edilmiş olup bu değer Denklem 1.2'ye göre hesaplanmaktadır.

$$f_{ctk} = 0.35 \sqrt{f_{ck}} (MPa) \quad (1.2)$$

Elastisite Modülü ise normal ağırlıktaki betonlar için “j” betonun kaç günlük olduğunun belirten ifade olup Denklem 1.3 ile hesaplanabilmektedir [1].

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14000 (MPa) \quad (1.3)$$

Çizelge 1.2'de TS500'e göre beton sınıfları ve beton dayanımları gösterilmiştir.

Çizelge 1.2 : TS500 Beton dayanımı.

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı f_{ck} (MPa)	Eşdeğer Küp (200 mm) Basınç Dayanımı (MPa)	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı f_{ctk} (MPa)	28 Günlük Elastisite Modülü E_c (MPa)
C16	16	20	1.4	27 000
C18	18	22	1.5	27 500
C20	20	25	1.6	28 000
C25	25	30	1.8	30 000
C30	30	37	1.9	32 000
C35	35	45	2.1	33 000
C40	40	50	2.2	34 000
C45	45	55	2.3	36 000
C50	50	60	2.5	37 000

Ayrıca kompozit elemanlarda beton elastisite modülü, E_c , Denklem 1.4'te gösterildiği şekilde hesaplanmalıdır.

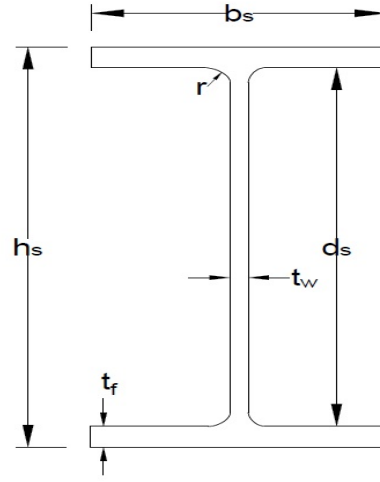
$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad (1.4)$$

Burada f_{ck} beton karakteristik basınç dayanımı olup birimi MPa, w_c ise beton birim hacmini ifade etmekte ve birimi kg/m^3 'tür. Ayrıca kompozit elemanların

kapasitelerinin hesabında kullanılan karakteristik beton basınç dayanımı, f_{ck} , 20 MPa ile 70 MPa arasında olmalıdır [2].

1.2.2 Çelik kiriş

Kompozit kirişlerde daha çok hasır kesitli profiller kullanılmaktadır. Bu profiller daha çok I ve T profil şeklinde karşımıza çıkar. Profillerde kullanılan çelik malzemesinin akma dayanımları yaklaşık olarak 200 ile 500 MPa arasında değişmektedir. I profil olarak en çok IPE, HEA, IPN gibi standart profiller tercih edilmektedir. Tipik bir I profil detayı Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



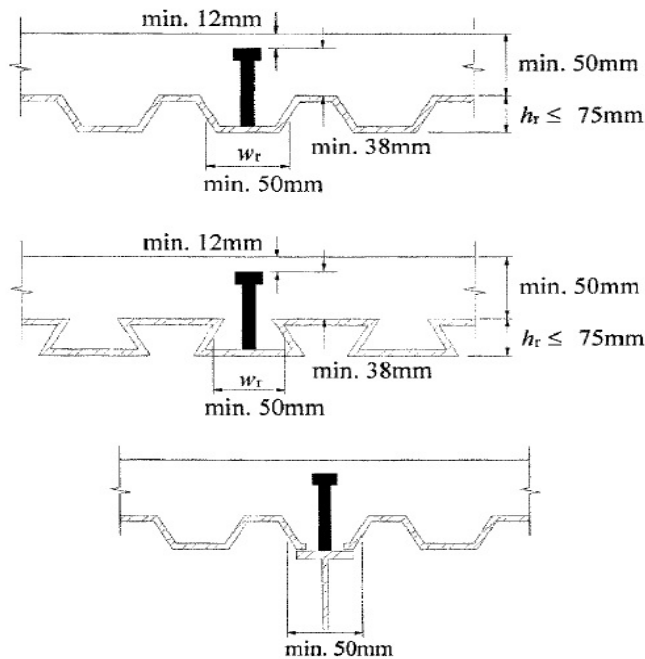
Şekil 1.2 : Tipik bir I profil kesidi.

Çelik yapılar yönetmeliğine göre f_y akma gerilmesi ve f_u çekme dayanımı değerleri Çizelge 1.3’te verilmiştir. Ayrıca kompozit elemanlarda kullanılacak yapısal çelik elemanlarının karakteristik akma gerilmesi, f_y , 460 MPa ile sınırlıdır [2].

Çizelge 1.3 : Çelik yapılar yönetmeliğine göre çelik özellikleri.

Standart ve Çelik Sınıfı	Karakteristik Kalınlık, t(mm)			
	t ≤ 40mm		40mm < t ≤ 80mm	
	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

Çelik trapez saç modeli ilk kullanımına başlandığında betonun çekme donatısı gibi düşünülmüş daha sonraları ise çelik saçların yüzeyinde girinti ve çıkıntılar oluşturularak kompozit döşeme modeli oluşturulmuştur. Böylelikle beton ve çelik saç arasında aderans oluşması amaçlanmıştır. Kompozit elemanlarda trapez çelik saçlar beton için hem kalıp görevi görmüş, böylelikle yapım aşamasında hem ekonomik olunmuş hem de yapım işini kolaylaştırılmıştır. Çelik trapez saçlar ilk kullanıma başlandığı zamanlardan günümüze akma dayanımı arttırılarak daha cazip hale getirilmiştir. Kompozit döşeme sayesinde kullanılan beton hacmi azaldığından yapı ağırlığı da önemli oranda azalmaktadır. Kompozit yapılarda sıkça kullanılan saç trapez kullanımı için çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik uyarınca Şekil 1.3'te gösterildiği gibi standartlar getirilmiştir.



Şekil 1.3 : Çelik yapılar yönetmeliğine göre çelik saç için konstrüktif kurallar.

Burada çelik sac hadve yüksekliği, h_r , en fazla 75 mm, hadve genişliği w_r ise en az 50 mm olmalıdır. Başlıklı çelik ankraj kaynaklama yapılması sonrasında çelik sacın hadve üst kotu üstünde kalan kısmı en az 38 mm, beton döşeme üst kotu ile de arasında en az 12 mm bulunmalıdır. Çelik sac, kiriş başlığına boyuna eksenini doğrultusunda bağlantı aralığı 450 mm'yi aşmayacak şekilde bağlanacaktır. Çelik sac hadvelerinin, çelik kiriş eksenine dik bir şekilde bağlanması halinde çelik sacın üst kotunun altında

kalan betonlar hesapta ihmal edilecektir. Çelik saç, profilin eksenine paralel olacak şekilde yapımı durumunda, her hadve içinde bir adet çelik ankraj bulunması halinde hadve genişliği w_r 50 mm den büyük olmalıdır. Birden fazla çelik ankraj bulunması durumunda bu genişlik her ilave çelik ankraj için ankrajın gövde çapının dört katı kadar arttırılmalıdır [2].

1.2.4 Beton donatısı

Beton tabliye için kullanılan donatılar betonun tamamen basma bölgesinde kalmasından dolayı tipik bir kiriş eğilme donatısına oranla daha küçük kesitli olmaktadır. Basınç donatıları olarak çalışan beton donatı çelikleri aynı zamanda betonun lokal çatlaklara karşı direncini ve kayma bağlayıcılarından kaynaklanabilecek muhtemel bir en kesit çatlağını önleyici işlevi görmektedir. Betonda oluşabilecek makro çatlakların önlenmesi hem kiriş genel kesit dayanımının sürekliliği hem de kayma bağlayıcıların işlevlerinin devam edebilmesi açılarından önemlidir. Beton donatısının mekanik özellikleri TS708'e göre Çizelge 1.4'te verilmekte olup elastisite modülü 2×10^5 MPa'dır. Beton çeliğinin karakteristik akma gerilmesi, f_{yk} , 500 MPa ile sınırlıdır [1,2]. ϕ donatı çapını belirtmektedir.

Çizelge 1.4 : Donatı çeliklerinin mekanik özellikleri (TS708).

Mekanik Özellikler	Donatı Çubukları			Hasır Donatı		
	Doğal Sertlikte			Soğukta İşlem Görmüş		
	S220a	S220a	S500a	S420b	S500bs	S500bk
Minimum akma dayanımı f_{yk} (MPa)	220	420	500	420	500	500
Minimum kopma dayanımı f_{su} (MPa)	340	500	550	550	550	550
$\phi \leq 32$						
Minimum kopma uzaması ϵ_{su} (%)	18	12	12	10	8	5
$32 \leq \phi \leq 50$						
Minimum kopma uzaması ϵ_{su} (%)	18	10	10	10	8	5

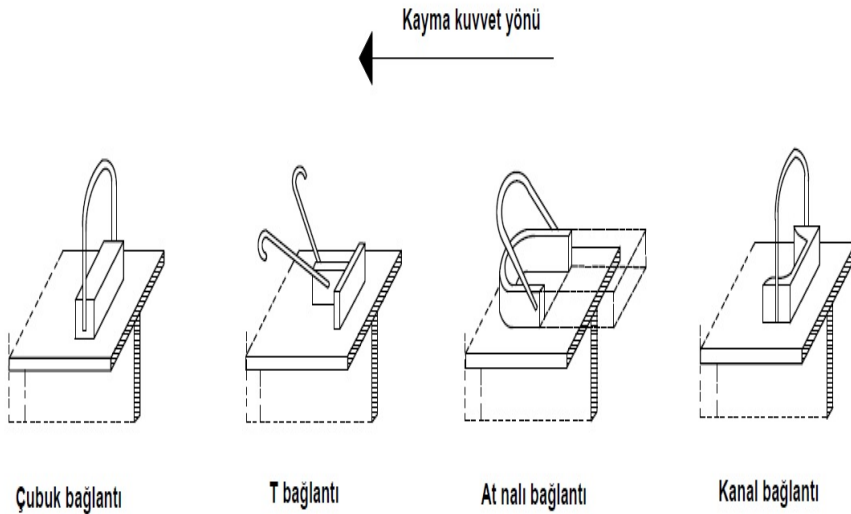
1.2.5 Kayma bağlayıcıları

Kayma bağlayıcılarının davranış biçimleri kompozit sistemin çalışma şeklini tümünden etkilemektedir. Bu nedenle kompozit sistemlerin birlikte çalışmasını sağlayan kayma bağlayıcılarının tasarımı oldukça önem arz etmektedir. Geçmişten günümüze farklı tiplerde kayma bağlayıcıları kompozit sistemlerde kullanılmış olup bir çok farklı türde

kayma bağlayıcısı mevcuttur. Farklı tiplerdeki kayma bağlayıcıları ile ilgili genel bilgiler bu bölümde anlatılmıştır.

1.2.5.1 Rijit tip

Bu kayma bağlayıcı türleri konu başlığına adını verdiği gibi oldukça rijit elemanlardır. Bununla birlikte bağlayıcılar kayma kuvvetine direnç gösterdiğinde bu bağlayıcılarda çok küçük deformasyonlar meydana gelmektedir. Rijit bağlayıcılar kiriş üzerine uygulanan basınç kuvvetine karşı direnç gösterirler ve beton kırılmasından dolayı göçme yaşanmasına neden olurlar. Bu bağlayıcıların yaygın örnekleri, T profiller, çubuk bağlantı, At nalı bağlantı ve kanal bağlantı tipli olanlardır (Şekil 1.4). Ayrıca Şekil 1.4'te görüldüğü gibi bağlama araçları, genellikle çember şeklinde çubuk elemanlar olup, düşey ayrılmayı engellemek için rijit bağlayıcı türlerine bağlı olarak tasarlanırlar.

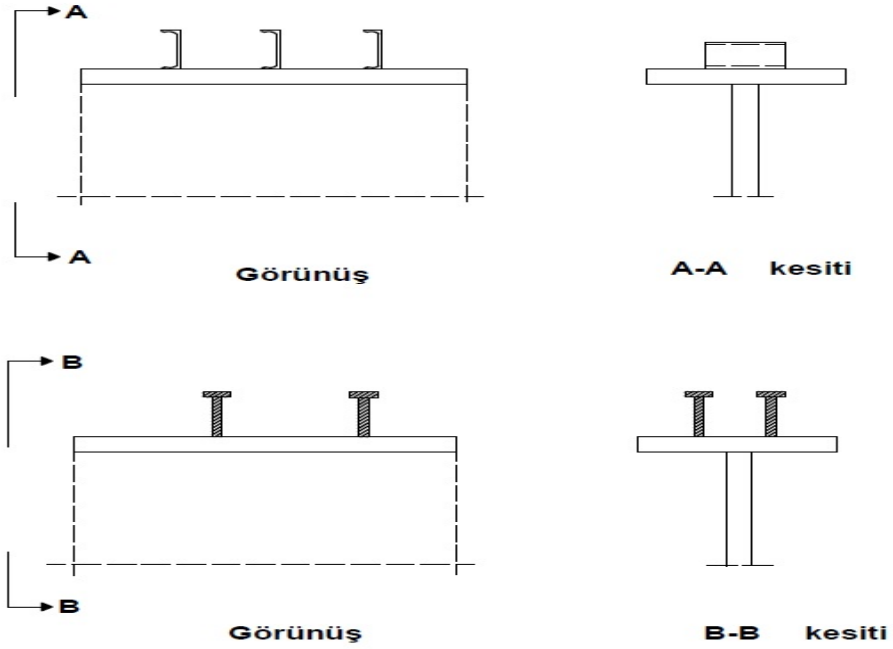


Şekil 1.4 : Rijit tip kayma bağlantıları.

1.2.5.2 Esnek tip

Bu bağlayıcı türleri çelik kiriş başlığına kaynaklıdır. Esnek tip bağlayıcılarında eğilme yükünden dolayı gerilme direnci ortaya çıkar ve bu bağlayıcılar göçmeden önce büyük deformasyona uğrarlar. Başlı çivi (stud çivisi) ve kanal tip bağlayıcılar bu kategori içinde yer alırlar. Gövde ve çelik kirişe ardışık olan kaynaklı başlar baş

taraf havaya kalkmaya direnirken kayma yüklerine direnç gösterirler. Tipik esnek bağlayıcıları Şekil 1.5’te gösterilmiştir.



Şekil 1.5 : Esnek tip kayma bağlantıları.

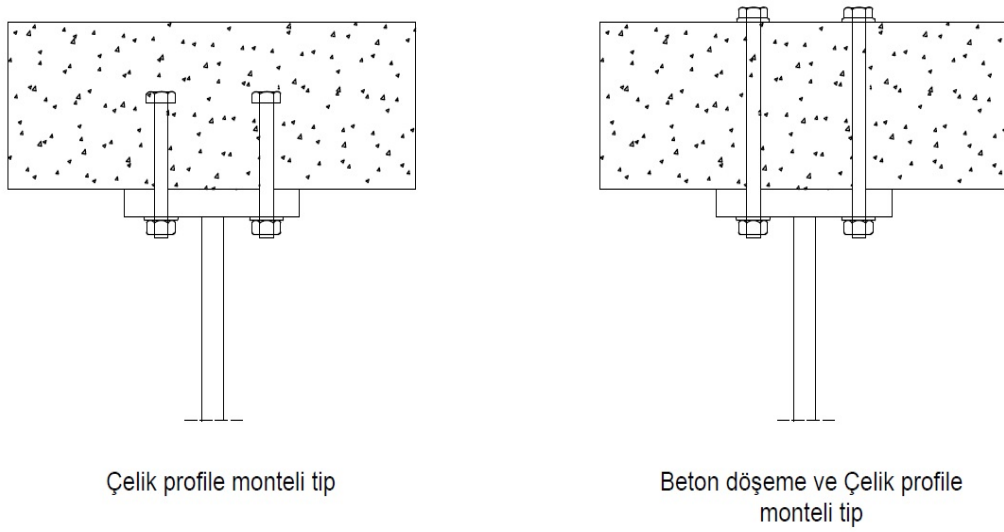
Esnek tip bağlayıcılarından başlı kesme çivileri (stud çivisi) en çok tercih edilen mekanik kayma bağlayıcı türüdür. Kesme çivileri özel bir alet (kaynak tabancası) yardımı ile çelik profile ark saplama kaynak metodu ile Şekil 1.6’da gösterildiği gibi çok kısa sürede monte edilebilmektedir.



Şekil 1.6 : Stud çivisi montajı.

Bu yöntem sayesinde hem çelik profilin hem kesme çivisinin mukavemeti olumsuz yönde etkilenmemektedir. Bu sayede kısa zaman zarfında çok sayıda kesme çivisi

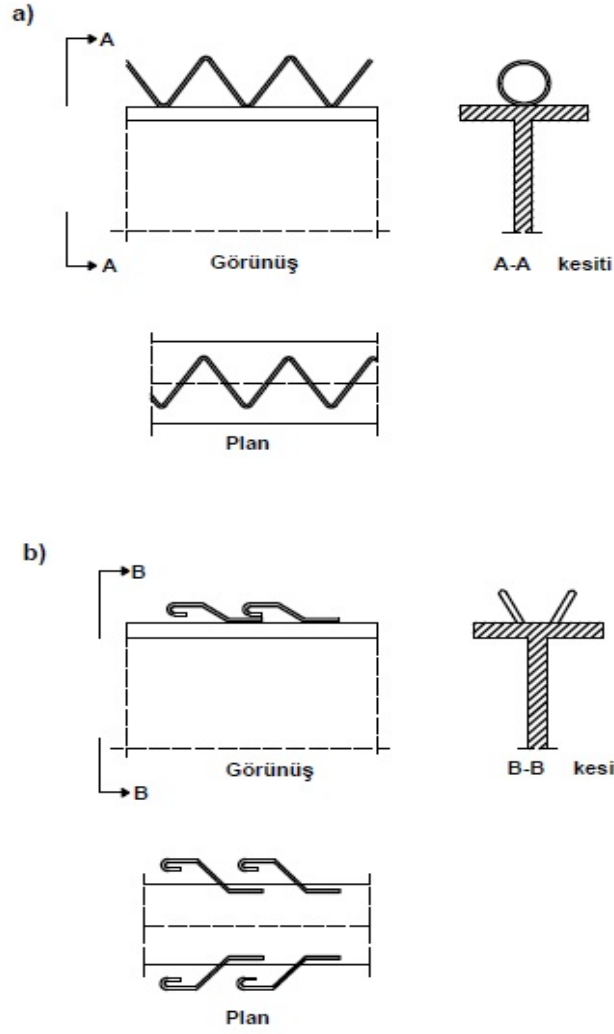
montajı yapılabilir. Ayrıca zaman içerisinde sıkça kullanılan stud çivilerinin farklı türleri ortaya çıkmıştır. Bunlar ayarlanabilir (vidalı, demontable) türler olarak geliştirilmiştir. Ayarlanabilir stud çivisi türlerinden sadece çelik profil yüzeyinde boşluk bırakılarak stud çivi gövdesi bu boşluğa yerleştirilerek baş kısmı beton içerisinde gömülü olan tip ve hem beton döşemede hem çelik profilde boşluk bırakılarak hem başlık hem gövde tarafından monte edilebilen tipte türler mevcuttur (Şekil 1.7). Bu tür stud çivileri hem montaj kolaylığı sağlamak hem de kompozit sistemde göçme yaşanması durumunda kolayca sökülebilmesi gibi avantajlara sahiptir.



Şekil 1.7 : Ayarlanabilir stud çivisi.

1.2.5.3 Bağlı-ankrajlı tip

Bu bağlayıcılar dirençlerini bağlı olma durumu ve ankraj hareketinden elde ederler. Bu tür kayma bağlayıcıları beton döşeme içerisinde donatılar ile ankraje olarak kayma hareketine engel olma prensibi ile çalışmaktadırlar. Ayrıca bu bağlayıcılar şekillerinden dolayı beton içerisinde aderans sağlayarak betona bağlı kalarak kayma hareketini karşılamaktadırlar. Farklı tipteki ankraj ve bağlı tipli kayma bağlayıcıları çizimsel olarak gösterilmiştir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 : a) Sarmal tipli kayma bağlayıcısı b) Çengel çubuk tipli kayma bağlayıcısı.

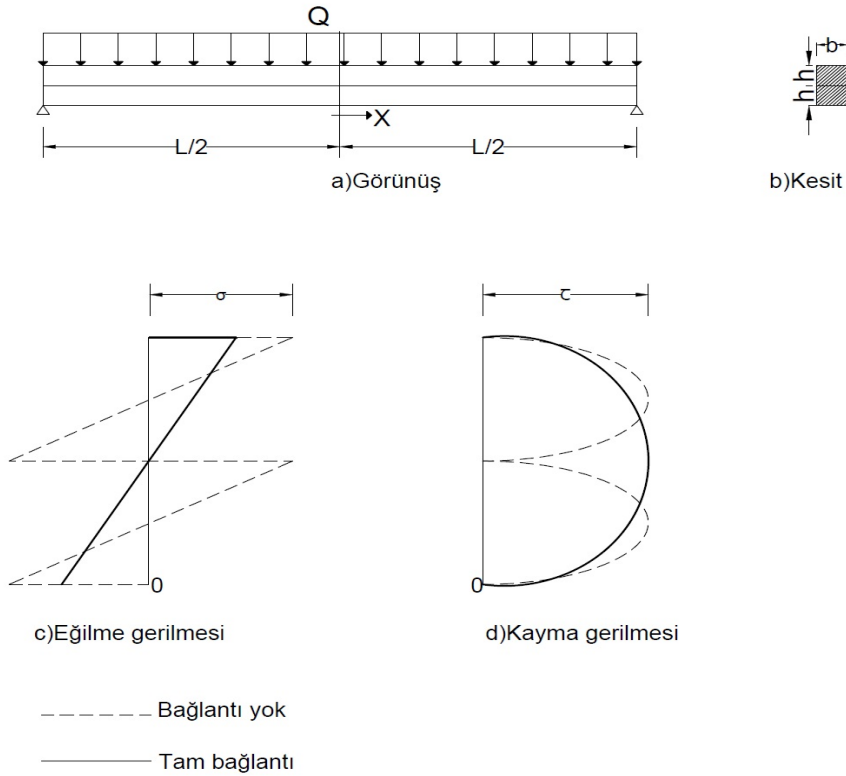
1.3 Kompozit Hesap Esasları

Kompozit birleşimlerde kompoziti oluşturan elemanların tek bir elemanmış gibi davranmasının hesap esasları araştırılmıştır. Kompozit kirişi oluşturan elemanlardan beton döşeme, çelik kiriş ve bu iki elemanın tek bir elemanmış gibi davranmasını sağlayan kayma bağlantılarından başlı stud çivisinin hesap yöntemleri ve kompozit kirişin yük altında davranış biçimine göre hesap esasları belirtilmiştir. Ayrıca kayma

bağlayıcısı (stud çivisi) taşıma kapasitesi hesaplamalarında kullanılan uluslararası standartlara ilişkin formüller çizelge halinde sunulmuştur.

1.3.1 Kompozit kiriş hesabı

Kompozit kiriş hesabı bir kaç farklı yaklaşım olsa da temelde her biri elastisite teorisine dayanmaktadır. Temel mukavemet bilgileri ile yapılan hesap bu çalışmada esas alınmıştır. Aşağıdaki şekilde uzunluğu L , kesit ölçüleri $b \times h$ olan boyuna yüke maruz olan özdeş materyallerden yapılmış biri diğerinin üzerinde yer alan elemanların davranışı gösterilmiştir. Düzgün yayılı yük (Q) altında olan iki elemanın kayma bağlantısı olmadığında ve tam (%100) bağlantı olduğundaki davranışları ortaya konmuştur (Şekil 1.9) [3].



Şekil 1.9 : Kayma bağlantısının eğilme ve kayma gerilmesindeki etkisi.

1.3.1.1 Bağlantı olmama durumu

Kompozit elemanlar arasında herhangi bir kayma bağlayıcısının olmadığı sadece üst üste yerleştirilmiş bağımsız iki eleman olduğu durumdur. Bu durumda atalet momenti (I) her bir eleman için $bh^3/12$ ve her bir kirişin taşıdığı yük ise $Q/2$ olacaktır.

Orta açıklıktaki eğilme momenti her eleman için $QL^2/16$ ve arayüzde oluşan dikine basınç gerilmesi ise $Q/2b$ olacaktır. Şekil 1.9 (c) de kiriş ortasında oluşan gerilme dağılımı kesik çizgiler ile gösterilmiş olup basit kiriş teoreminden her bir eleman için maksimum gerilme σ Denklem 1.5'e göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{My_{max}}{I} = \frac{QL^2}{16} \frac{12}{bh^3} \frac{h}{2} = \frac{3QL^2}{8bh^2} \quad (1.5)$$

Bu eşitlikte M maksimum eğilme momenti, y_{max} ise tarafsız eksene olan uzaklık olup bu durumda $h/2$ ye eşittir. Maksimum kayma gerilmesi τ ise Şekil 1.9 (d) de gösterildiği gibi her bir elemanın ekseninde ve mesnetlere yakın yerde oluşur ve Denklem 1.6'ya göre hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{QL}{4} \frac{1}{bh} = \frac{3QL}{8bh} \quad (1.6)$$

Maksimum sehim δ ise Denklem 1.7'den hesaplanır.

$$\delta = \frac{5(Q/2)L^4}{384EI} = \frac{5}{384} \frac{Q}{2} \frac{12L^4}{Ebh^3} = \frac{5QL^4}{64Ebh^3} \quad (1.7)$$

Her bir eleman için eğilme momenti kiriş ortasından x kadar uzaklıkta,

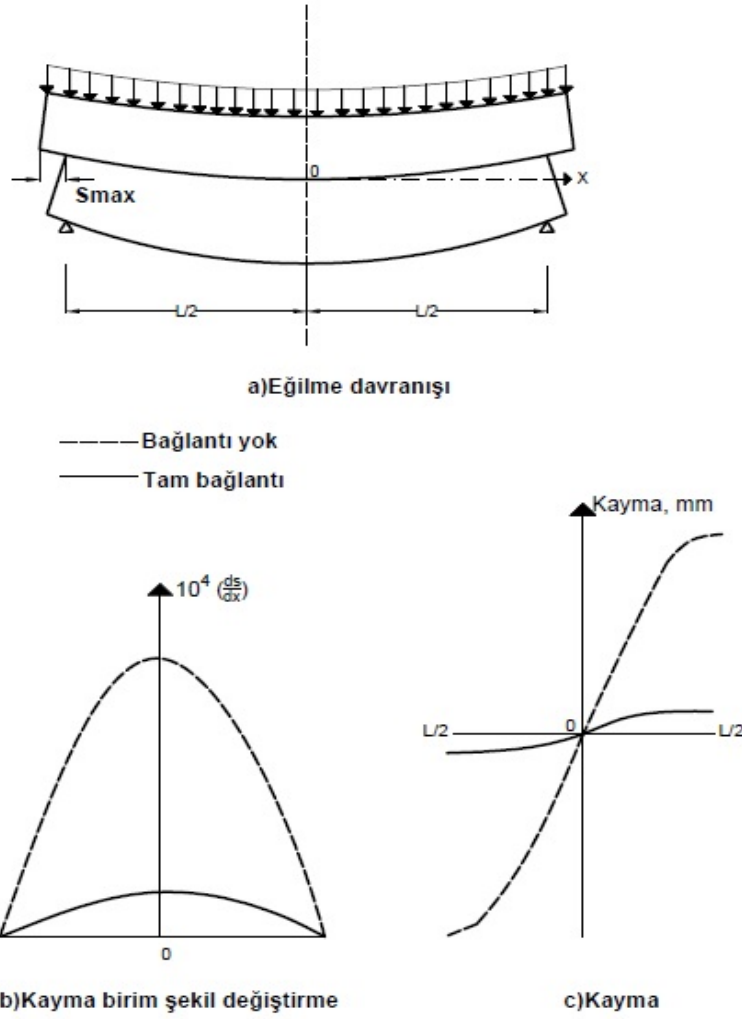
$$M_x = \frac{Q(L^2 - 4x^2)}{16} \quad (1.8)$$

olarak Denklem 1.8 ile hesaplanır. Üstte bulunan elemanın alt yüzeyinde oluşacak eksenel birim şekil değiştirme ϵ_x ise Denklem 1.9'a göre hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_x = \frac{My_{max}}{EI} = \frac{3Q(L^2 - 4x^2)}{8Ebh^2} \quad (1.9)$$

Altındaki kirişin üst yüzeyinde karşılıklı ve eşit olan bir şekil değiştirme oluştuğundan bitişik yüzeylerde oluşan şekil değiştirmeler kayma şekil değiştirmesi olarak adlandırılırlar ve bu kayma birim şekil değiştirmesi ise $2\epsilon_x$ dir. Kayma S ile gösterilmiş olup Denklem 1.10'a göre hesaplanır.

$$\frac{dS}{dx} = 2\epsilon_x = \frac{3Q(L^2 - 4x^2)}{4Ebh^2} \quad (1.10)$$



Şekil 1.10 : Tipik şekil değiştirme, kayma ve kayma birim şekil değiştirme.

Denklem 1.10'un integrasyonu ile Denklem 1.11 elde edilir.

$$S = \frac{Q(3L^2x - 4x^3)}{4Eb^2} \quad (1.11)$$

Burada integral sabiti sıfırdır çünkü $x=0$ olduğunda $S=0$ olur böylelikle kiriş boyunca oluşan kayma dağılımının eşitliğini elde ederiz. Bu eşitliklerden yola çıkarak orta açıklıkta kayma birim şekil değiştirme (ϵ_x) maksimum iken kayma (S) sıfırdır (Şekil 1.10). $x=L/2$ olduğu kiriş sonlarında ise kayma (S) maksimum değere ulaşırken kayma birim şekil değiştirme (ϵ_x) sıfırdır. Eşitlik (1.10)'dan maksimum kayma $x=L/2$ için $QL^3/4Eb^2$ 'dir.

Kayma (S) büyüklüğünün iki kiriş arasındaki maksimum eğilme oranı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Denklem (1.6)'dan kayma (S) nın eğilmeye oranının $3.2 h/L$ olduğu ortaya çıkar. $L/2h$ oranı olması durumunda genel olarak bu oran 20 olur, bu durumda kayma değeri maksimum eğilmenin yaklaşık 0.08 katı kadar olur. Bu yüzden iki kiriş ara yüzeyinde kaymayı engellemek ve uygun eğilme birim şekil değiştirmeyi sağlayabilmek için kayma bağlantıları kullanılır. Ayrıca bu oranlardan anlaşılacağı üzere kayma bağlantılarının efektif olabilmesi için oldukça rijit olmaları gerekmektedir.

1.3.1.2 Tam bağlantı olma durumu

Şekil 1.9 de gösterilen iki elemanın rijit kayma bağlantıları ile arayüzden birbirlerine bağlandıklarını kabul edelim. Bu durumda kayma ve kayma birim şekil değiştirme her yerde sıfır olur bu durum tam bağlı olma durumudur. İki farklı eleman tek bir elemanmış gibi davranır. Artık kirişin genişliği b yüksekliği ise $2h$ olarak kabul edilir. Bu kabülden yola çıkarak atalet momenti $(I) \frac{2bh^3}{3}$, kiriş ortasındaki eğilme momenti ise $QL^2/8$ dir. Maksimum eğilme gerilmesi ise Denklem 1.12'ye göre hesaplanır.

$$\sigma = \frac{My_{max}}{I} = \frac{QL^2}{8} \frac{3}{2bh^3} h = \frac{3QL^2}{16bh^2} \quad (1.12)$$

Kesme kuvvetinin değeri x kesitinde Denklem 1.13'den bulunur.

$$V_x = Qx \quad (1.13)$$

Bu durumda tarafsız eksendeki kayma gerilmesi Denklem 1.14'e göre hesaplanacaktır.

$$\tau_x = \frac{3}{2} Qx \frac{1}{2bh} = \frac{3Qx}{4bh} \quad (1.14)$$

Maksimum kayma gerilmesi ise Denklem 1.15 bağıntısından elde edilecektir.

$$\tau = \frac{3QL}{8bh} \quad (1.15)$$

Yukarıda formüllerden ve Şekil 1.9 (c) ve (d)'den anlaşılacağı üzere tam bağlantı olma durumu ve bağlantı olmama durumlarında maksimum kayma gerilmesi değerinin değişmediği ama maksimum eğilme gerilmesinin ise yarıya düştüğü görülmüştür.

Kiriş orta açıklığında oluşan sehim Denklem 1.16'dan hesaplanır.

$$\delta = \frac{5QL^4}{384EI} = \frac{5QL^4}{256Ebh^3} \quad (1.16)$$

Hesaplanan bu değer denklem 1.6'daki değer 4'te 1'i kadardır. Bu da gösteriyor ki kompoziti oluşturan elemanlar aynı malzeme özelliğinde olsalar bile kayma bağlayıcıları ile tam bağlantı sağlanırsa dayanım ve rijitlik aynı koşullar altında önemli bir oranda artmaktadır. Tarafsız eksen kompozit kirişin arayüzeyi ile çakışır ve kiriş ortasında oluşan denklem 1.14'te verilen arayüzdeki boyuna maksimum kayma gerilmesi, maksimum kesme kuvvetine eşit olur. Kayma bağlayıcıları kayma akımı olarak adlandırılan birim uzunluktaki boyuna kayma değeri V_L 'ye göre tasarlanmalıdırlar. V_L değeri,

$$V_{L,x} = \tau_x b = \frac{3Qx}{4h} \quad (1.17)$$

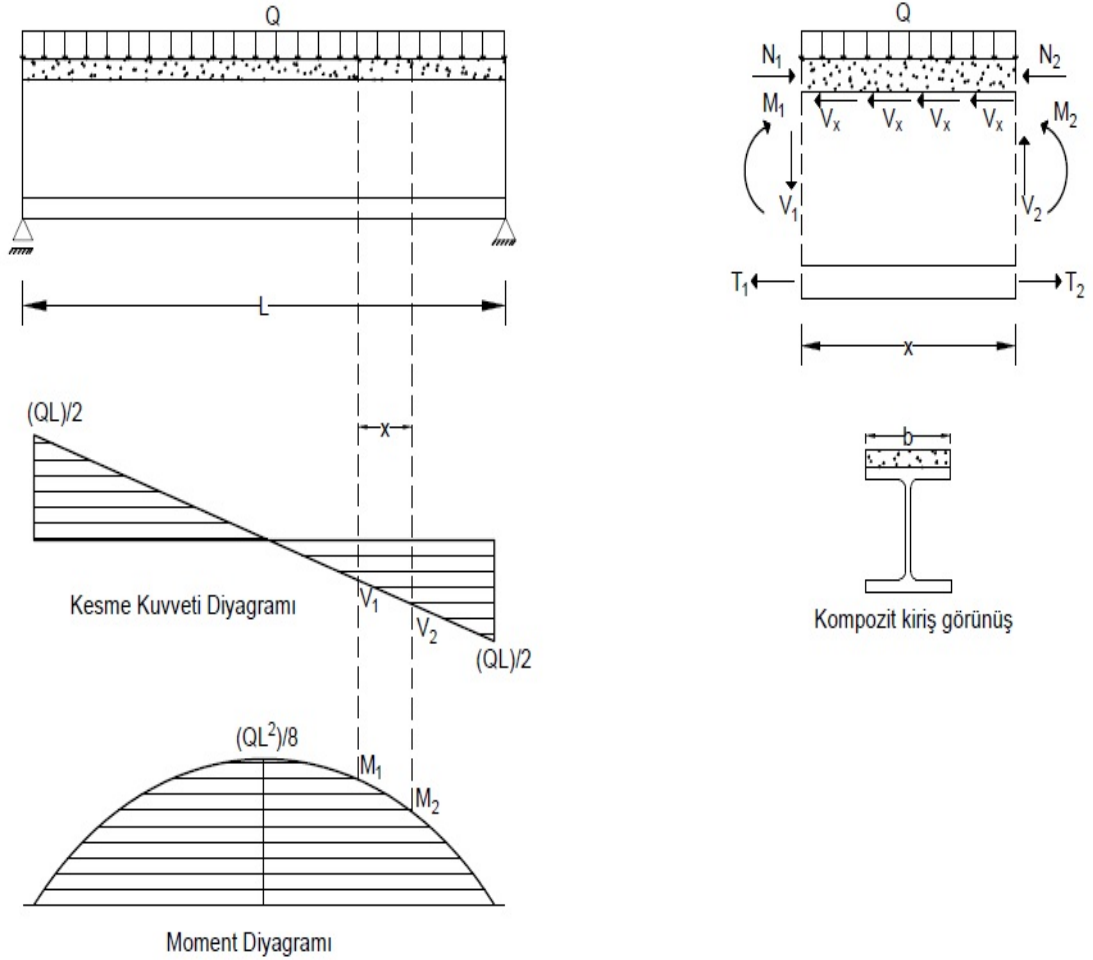
olarak Denklem 1.17'den elde edilir. Kiriş açıklığı ortasındaki toplam kayma akımı Denklem (1.17)'nin integrasyonundan $3QL^2/32h$ olarak bulunur. Genellikle $L/2h$ oranı yaklaşık olarak 20 olduğundan tüm kiriş açıklığındaki kayma bağlantısı toplam kayma kuvvetine karşı koymak zorundadır [3],

$$2x \frac{3}{32} \frac{L}{h} QL \approx 8QL \quad (1.18)$$

Böylelikle Denklem 1.18'den bu toplam kayma kuvveti kiriş tarafından taşınan yükün yaklaşık 8 katına tekabül eder. Kirişteki kayma bağlayıcılarının tasarımı yapılırken kayma bağlayıcısının dayanımı kiriş tarafından taşınan yükün değerinden daha büyük olmalıdır.

Kompozit kirişlerde elemanların ara yüzeyinde oluşan yatay kayma kuvvetinin hesaplanmasında üç farklı yöntem uygulanarak hesap yapılması mümkündür. Bunlar genel kuvvet dengesi, basitleştirilmiş elastik kiriş davranışı ve geleneksel elastik yöntemidir. Yöntemlere ilişkin bilgiler aşağıda verilmiştir.

Genel kuvvet dengesi, Genel kuvvet dengesi yönteminde kompozit kirişin üst noktasında iki nokta alınarak bu noktalarda basınç kuvvetinden dolayı meydana gelen değişimlerin neden olduğu kayma kuvvetinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Şekil 1.11’de gösterildiği gibi kompozit kirişte x kadar bir açıklıkta kesit alınarak basınç kuvvetleri bu kesite uygulanarak hesap yöntemi açıklanmıştır.



Şekil 1.11 : Genel kuvvet dengesi yönteminde kayma hesabı.

Kompozit kirişte alınan x kadar açıklıklı kesitte kayma kuvveti,

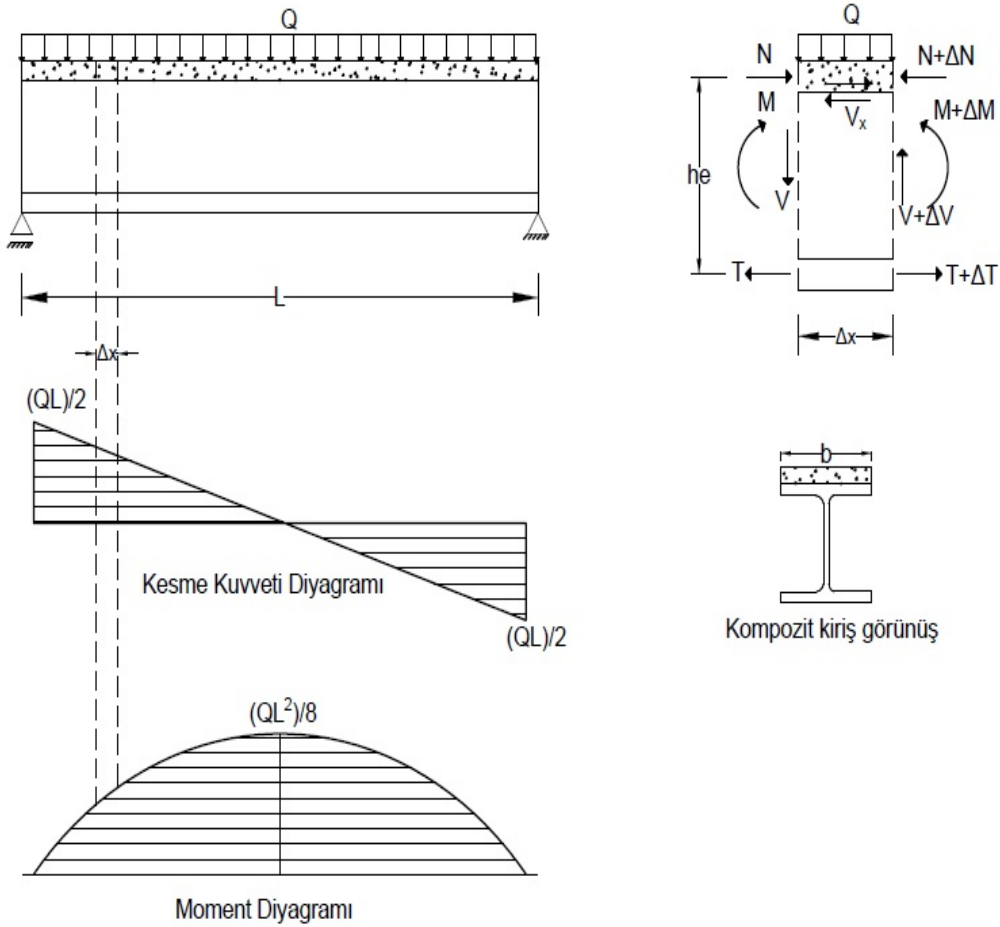
$$V_x = (N_1 - N_2) \quad (1.19)$$

Denklem 1.19 eşitliğinden hesaplanır. Bundan dolayı oluşacak olan kayma gerilmesi ise,

$$\tau = \frac{(N_1 - N_2)}{b \cdot x} \quad (1.20)$$

olarak Denklem 1.20'den elde edilir.

Basitleştirilmiş elastik kiriş davranışı yöntemi, Bu yöntemde ise yatay kayma kuvvetini kesit üzerinde hareket eden dikey kesmeye eşitlemek için eğilme kiriş teoremi kullanılır. Kuvvet dengesi denklemi kullanılarak, kesit üzerindeki kesme kuvveti ile kayma gerilmeleri arasındaki ilişki kiriş üzerinde alınan Δx küçüklikte bir kesit baz alınarak belirlenebilir. Yöntemin uygulanışı şekil 1.12'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12 : Basitleştirilmiş elastik kiriş davranışı yönteminde kayma hesabı.

Statik denklemler kullanılarak, $\Delta M = V \cdot \Delta x$ ve $\Delta M = h_e \cdot \Delta N$ olduğu bulunur. Kuvvet dengesinden $\Delta N = V_x$ elde edilir. Bu denklemler kullanılarak kayma kuvveti $V_x = V \cdot \Delta x / h_e$ olur.

Kayma gerilmesi ise, $\tau = V_x / (b \cdot \Delta x)$ olur.

Kayma kuvveti değeri yerine konulursa $\tau = (V \cdot \Delta x / h_e) / (b \cdot \Delta x)$ ve burdan sadeleştirme yapıldıktan sonra $\tau = V / (b \cdot h_e)$ elde edilir.

Geleneksel elastik yöntem, yapılan araştırmaların bir çoğunda bu yöntem tercih edilerek yatay kayma gerilmesi hesabı yapılmıştır. Ayrıca servis ve göçme yükleri altında yatay kayma gerilmesi hesabının yapılmasında da bu yöntem tercih edilmektedir. Bu çalışmada tercih edilen yöntem olan geleneksel elastik yöntemde kayma gerilmesi,

$$\tau = \frac{VI_b}{I_e b} \quad (1.21)$$

Denklem 1.21'e göre hesaplanmaktadır. Burada b gövde ve döşeme ara yüzünün genişliği, I_e kompozit elemanın atalet momenti, döşemenin tarafsız eksenine göre başlangıç atalet momentini ifade etmektedir. Alan statik momenti I_b ise $I_b = A \cdot \bar{y}$ 'den hesaplanmaktadır. A döşemenin alanını, $\bar{y}$ ise döşemenin merkezinden kompozit elemanın tarafsız eksenine olan uzaklığını belirtmektedir.

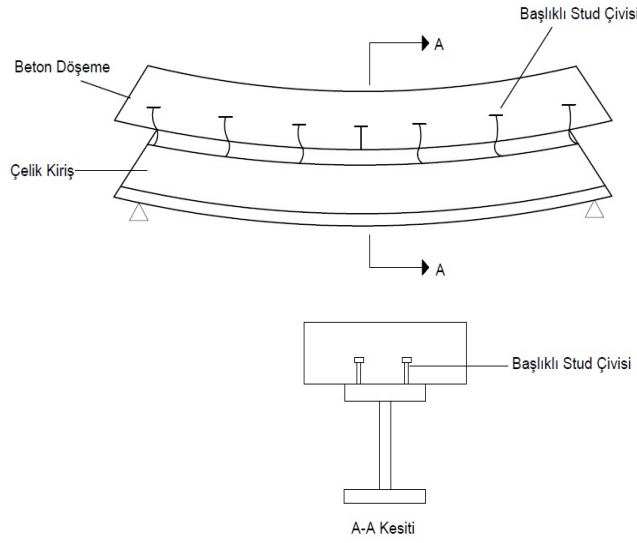
Bu yöntemde belirtilmelidir ki bu yöntem kompozit kirişin elastik tepkisine göre düşünülmüştür. Kesitin çatlaması durumunda geçerli olmayacaktır.

1.3.2 Kayma bağlayıcılarının hesabı

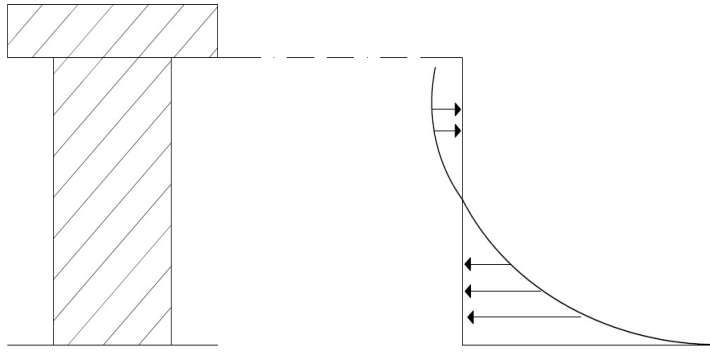
Her ne kadar tam bağlanma durumunda her yerde kaymanın sıfır olduğu kabul edilse de yapılan testlerin sonuçları küçük yüklemeler altında bile kaymanın ortaya çıktığını göstermiştir. Kayma bağlayıcılarının bu yük-kayma ilişkisi özelliği tasarımı önemli ölçüde etkilemektedir. Kayma yüküne karşı direnç gösterme esnasında bu kayma bağlayıcıları deformasyona uğrar ve yükü taşıma yoluyla beton malzemeye aktarırlar.

Şekil 1.13 'de bu durum gösterilmiştir. Aynı zamanda bu yük dağılımı betonda kayma, bölme ve koparma hareketiyle çekme çatlaklarına neden olabilir. Yine de çelik bağlayıcı, betondan önce göçmeye maruz kalabilir. Bununla birlikte eksenel kaymaların mekanik kayma bağlayıcıları ile aktarılması çok karmaşık bir olaydır. Yapılan araştırmalar sonucunda stud çivisi (başlıklı çelik ankraj) gövdesindeki taşıma gerilmesinin (basınç) tabana yakın yerde yoğunlaştığı fark edilmiştir (Şekil1.14).

Kuvvetin 2d uzunluğunun üzerinde, d gövde çapı, yayılmış olduğunu varsayarsak bu bize betonun küp dayanımının beş katı kadar taşıma gerilmesine direnmesi gerektiğini gösterir. Kayma bağlayıcısı üzerindeki beton dayanımı, donatı, çelik eleman ve çevreleyen beton tarafından yanal olarak sınırlandırıldığından bu yüksek dayanım



Şekil 1.13 : Yük taşıma mekanizması.

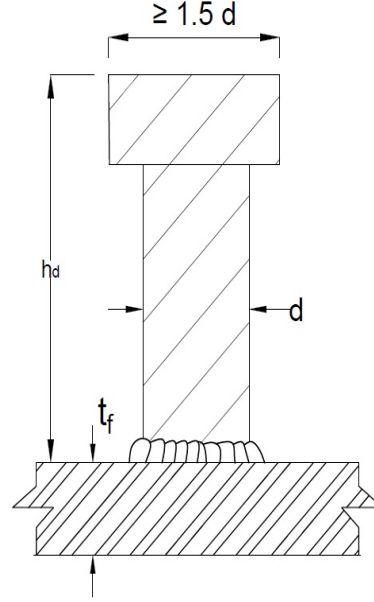


Şekil 1.14 : Stud çivisi gövdesinde oluşan gerilmeler.

mümkün olabilmektedir. Denge durumu için bağlayıcının tabanında yatay kayma kuvvetinin yanı sıra bir de moment başlangıcının oluşmasından dolayı stud çivisi çelik göçme bölgesinde yüksek çekme gerilmesine neden olan eğilme kuvveti ile birlikte kaymaya da direnç göstermek zorundadır.

Kayma bağlayıcılarından yaygın olarak kullanılan ve pratikliği sebebi ile tercih edilmekte olan kayma bağlayıcısı, başlıklı stud çivileridir. Stud çivilerinin çapları 13 ile 25 mm arasında, boyları ise 65 ve 150 mm arasında değişmektedir. Bazı durumlarda standart ölçülerin dışına çıkılabilmektedir. Stud çivileri en az 450 MPa çekme dayanımına ve yüzde 15 uzama oranına sahip olmalıdırlar. Stud çivileri yapım aşamasında kaynaklanma işlemleri oldukça hızlı yapılabilen ve stud ekseninin tüm yönlerinde kaymaya karşı eşit derecede rijit ve güçlü davranış şekli göstermektedir.

Stud çivisinin çapını etkileyen faktörlerden biri kaynak yapım işidir ki çapın 20 mm üzerinde olduğu durumda bu işlem oldukça zor ve pahalıdır, diğer etken ise stud çivisinin kaynaklandığı çelik trapez sac veya çelik başlığının kalınlığı (t_f)'dir (Şekil 1.15).



Şekil 1.15 : Tipik stud çivisi

Stud çivilerinin dayanımı, stud çivisinin kesit alanına (A_s), stud çivisinin çekme dayanımına (f_w), betonun karakteristik silindirik basınç dayanımına (f_{ck}), ve E_c/E_s parametrelerine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Kayma bağlayıcılarının analitik olarak doğrudan bir hesabı bulunmamaktadır. Bu durum kayma bağlayıcılarının çalışması sırasında oluşan oldukça kompleks gerilme durumlarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden ulusal ve uluslararası standartlarda kayma bağlayıcılarının (stud) dayanımları ampirik formüllere dayandırılmaktadır. Ampirik formüller için deneysel testler bir dizi beton dayanımı için yapılmıştır çünkü beton dayanımı göçme modu ve göçme yükünü doğrudan etkilemektedir. Stud çivisi çevresindeki beton göçmeye başladığında stud çivisinin maksimum yüküne ulaşmış olması istenir ama yüksek basınç dayanımlı beton olması durumunda stud çivilerinde kopma meydana gelir. Bu nedenle uluslararası standartlarda stud çivilerinin tasarım taşıma kapasitelerini hesaplayan ampirik formüllerden elde edilen değerlerden küçük olanı tasarım değeri olarak dikkate alınması istenmiştir. Bazı uluslararası standartlarda tasarım taşıma kapasite formülleri ve açıklamaları detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Çizelge 1.5).

Çizelge 1.5 : Stud çivisi kayma kapasitesi hesabına ilişkin standartlar.

Standartlar	Stud çivisi kayma taşıma kapasite formülleri	Semboller
Eurocode 4 [4] (EC4)	$\min \left(\frac{0.8f_w(\pi d^2/4)}{\gamma}, \frac{0.29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck}E_c}}{\gamma} \right)$	d: Stud çivisi çapı E_c : Beton elastisite modülü f_{ck} : Beton basınç dayanımı f_w : Stud çivisi çekme dayanımı taşıma kapasitesi $\alpha: h_d/d > 4$ ise 1, $3 \leq h_d/d \leq 4$ ise $\alpha = 0.2[(h_d/d) + 1]$
AISC 360-10 [5] (1999)	$0.5A_s \sqrt{f_{ck}E_c} \leq A_s f_w$	A_s : Stud çivisi kesit alanı E_c : Beton elastisite modülü f_{ck} : Beton basınç dayanımı f_w : Stud çivisi çekme dayanımı taşıma kapasitesi
AASHTO-LRFD [6]		
AS/NZS 5100.6 [7] (Avustralya-Yeni Zelanda Standartı)	$\min (\phi 0.70d^2 f_w, \phi 0.29d^2 \sqrt{f_{ck}E_c})$	d: Stud çivisi çapı f_{ck} : Beton karakteristik dayanımı E_c : Beton elastisite modülü f_w : Stud akma dayanımı ϕ : Kapasite azaltma faktörü 0.8 alınır.
NBR 8800 [8] (Brezilya Standartı)	$\min \left(\frac{A_s \sqrt{f_{ck}E_c}}{2}, A_s f_w \right)$	E: Beton elastisite modülü f_{ck} : Beton basınç dayanımı f_w : Stud çivisi çekme dayanımı taşıma kapasitesi A_s : Stud çivisi kesit alanı
GB 2003 [9] (Çin Standartı)	$0.43A_s \sqrt{E_c f_{ck}} \leq 0.7A_s \gamma f_w$	A_s : Stud çivisi kesit alanı E_c : Beton elastisite modülü f_{ck} : Beton basınç dayanımı γ : Stud çivisinin minimum çekme dayanımının akma dayanımına oranı f_w : Stud çivisi çekme dayanımı taşıma kapasitesi
JSCE [10] (Japon Standartı)	$6x(9.4d^2 \sqrt{f_{ck}})(h_d/d \geq 5.5)$ $6x(1.72dh \sqrt{f_{ck}})(h_d/d < 5.5)$	f_{ck} : Beton tasarım dayanımı h_d : Stud çivisi yüksekliği d: Stud çivisi çapı
Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik [2] (Çelik Yapılar Yönetmeliği)	$\min(0.85f_{ck}A, A_s f_w)$	A_s : Stud çivisi kesit alanı A: Beton döşeme kesit alanı f_{ck} : Beton basınç dayanımı f_w : Stud çivisi çekme dayanımı taşıma kapasitesi

1.3.3 Boyut etkisi

Boyut etkisi teorisi kırılma mekaniğinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Bir çok önem arz eden betonarme yapıda (reaktörler, savunma amaçlı yapılar v.b.) göçmenin nasıl ve nereden başlayacağı, çatlağın hangi durumlarda kararlı veya kararsız ilerleyeceğini anlayabilmek için kırılma mekaniğini anlayabilmek oldukça önem arz etmektedir. Bu amaçla Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) esasları çerçevesinde betonun incelenmesi ilk olarak 1960'lı yıllarda yapılmasına rağmen betonun yarı gevrek ve heterojen bir malzeme olması nedeni ile betonun kırılma parametrelerinin LEKM ile elde edilemeyeceği anlaşılmış ve LEKM güncellenerek doğrusal olmayan kırılma mekaniği modelleri geliştirilmiştir [11].

Cam lifler üzerine mikron mertebesinde yaptığı araştırmalar sonucunda cam liflerin dayanımının elemanter düzeydeki dayanımından çok daha fazla olduğunu tespit eden Griffith LEKM'nin temellerini oluşturmuştur. Bu çalışmalar esnasında bu dayanım farkının cam numune yüzeyindeki kusurlardan kaynaklandığını 1920'li yıllarda gözlemlemiştir. 1939'lu yıllarda hiçbir malzemenin kusursuz olmadığı fikri ile yola çıkan Weibull istatistiksel tabanlı ilk boyut etkisi teorisini ortaya koymuştur. Bu geliştirilen teori malzemelerin emniyet faktörlerinin belirlenmesinde uzun yıllar kullanıldıysa da beton gibi heterojen malzemelerde bu teorinin yetersiz kaldığı 1984 yılında Bazant tarafından yapılan gözlemler sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Heterojen malzemelerde kullanılabilecek yeni mekanik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bu mekanik yaklaşımlardan olan ve Bazant tarafından geliştirilen boyut etkisi teorisine göre en büyük yükte çatlağın ilerlemesi sonucu serbest kalan enerji ile beton tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit dengeyi boyut analizi yardımıyla kurarak boyut etkisi teorisini geliştirmiş ve doğrusal olmayan kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Bu teori, malzemenin kırılma özelliklerini belirleyen, çatlak boyu ve çatlak alanı gibi iki parametreye bağlı olarak geliştirilmiştir [12]. Bazant tarafından ortaya çıkarılan boyut etkisi ifadesi Denklem 1.22'de verilmektedir [13].

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (1.22)$$

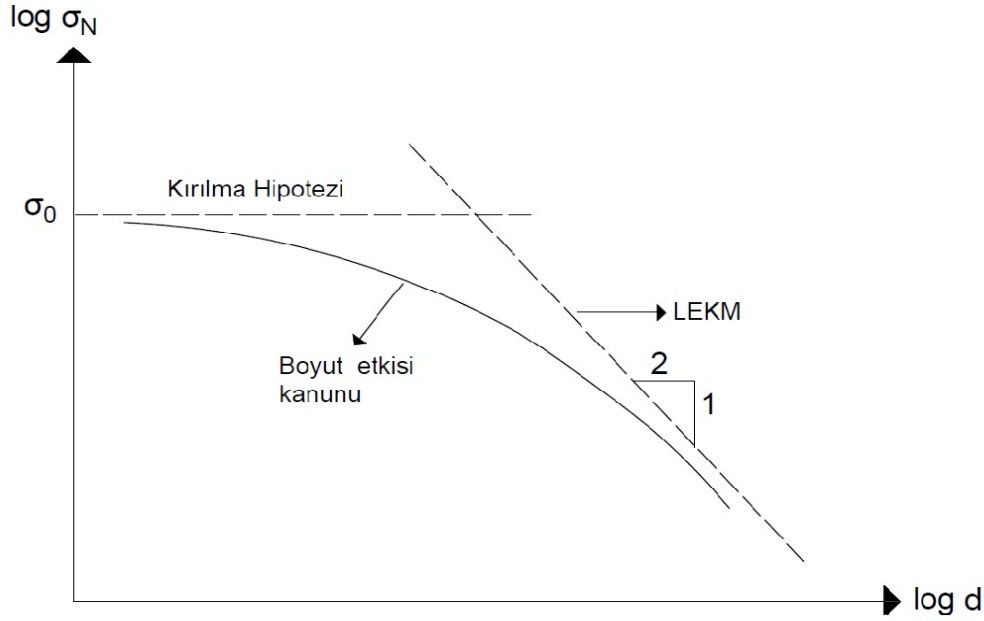
Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) hesabı ise Denklem 1.23'de ifade edilmektedir.

$$\sigma_N = \sigma_0 \sqrt{\frac{D_0}{D}} \quad (1.23)$$

Burada σ_N : Göçmedeki nominal gerilme (MPa), σ_0 : Küçük boyutlar için elde edilen referans dayanımı (MPa) B: Yapı biçimine bağlı katsayı, D: Yapının karakteristik boyu (Numune boyu) (mm), D_0 : Gevrek ve gevrek olmayan davranış arasında geçişi ifade eden katsayı (mm) ve f_t ise betonun çekme dayanımını (MPa) ifade etmektedir. Denklem 1.22'de belirtilen B ve D_0 malzemenin geometrisine ve kırılma özelliğine bağlı olup bu iki sabit malzeme boyutundan bağımsızdır. D karakterisitik boyu için ise

hesaplamalar yapılırken numuneye ait herhangi bir boyut karakteristik boyut olarak seçilebilir.

Bazant tarafından geliştirilen bu formülizasyon ile boyut etkisinin Şekil 1.16'da gösterildiği gibi Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) ile dayanım kriteri arasında bir geçiş eğrisini ifade ettiği belirtilmektedir.



Şekil 1.16 : Boyut etkisi kanununa göre boyut etkisi grafiği.

1.4 Literatür

Bu bölümde kompozit kirişler ve stud çivileri için daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalar ve araştırmalar incelenmiş bunlar ile ilgili genel bilgiler derlenerek bir araya getirilmiştir. Beton sınıfı, stud çivisinin boyut, tür ve çelik profile bağlanma şekillerinin (kaynaklı, sökülebilir v.b.) etkileri araştırmalara konu olmuştur. Ayrıca yapılan deneysel çalışmaların Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi) kullanılarak modellemeleri ve numerik analiz yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.4.1 Kayma bağlayıcıları

Bu bölümde stud çivileri için yapılmış olan itme testi ve sonlu eleman yöntemi modelleme çalışmaları ile ilgili araştırmalar konu edilmiştir.

Ollgaard ve diğ. (1971), Bu çalışmada hafif ve normal ağırlıklı betonlardaki stud çivilerinin kayma dayanımı araştırılarak tasarım önerileri için veriler elde edilmiştir [14]. İtme testlerinde çeliğin her iki başlığında 2 adet olmak üzere betona gömülü 4 adet stud çivisi kullanılmış ve 48 adet itme deneyi yapılmıştır. Tüm numunelerden elde edilen taşıma yüklerini karşılaştırabilmek için farklı boyutlardaki stud çivileri de dahil olmak üzere ortalama kayma dayanımı kullanılmıştır. Testlerde özellikle hafif ağırlıklı betonlar için stud çivilerinin davranışı gözlemlenmiş bu doğrultuda iki farklı tipteki normal ağırlıklı beton ve 3 farklı tipteki hafif betonlar baz alınmıştır. Hafif ağırlıklı betonlar, iri taneli hafif agregalar ve ince daneli hafif doğal kum kullanılarak hazırlanmıştır. Test sonuçları, hafif ve normal ağırlıklı betona gömülü stud çivilerinin kayma dayanımlarını betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünün öncelikli etkilediği görülmüştür. Ayrıca betonun çekme dayanımı ve yoğunluğunun önemli bir etkisi olmadığı düşünülmüştür. İtme testlerinde stud çivilerinin çelik başlığa iki sıralı veya tek sıralı olarak monte edilmesi stud başına düşen ortalama dayanımı değiştirmedeği görülmüş ve kayma dayanımının stud çivilerinin kesit alanlarına bağlı olduğu anlaşılmıştır.

Oehlers (1990), Tekdüze ve yorulma yükleri altındaki stud çivilerinin davranışını anlayabilmek için 14 tane itme testi yapılmıştır [15]. Testlerde 13 mm çapında, 75 mm yüksekliğinde stud çivileri kullanılmıştır. Stud çivileri çelik profile her başlıkta iki sıralı olarak dört adet, toplamda sekiz adet olarak kaynak vasıtasıyla bağlanmıştır. Test sonuçları göstermiştir ki stud çivisinin dayanımı yorulma yüklemesinin tüm aşamalarında azalmıştır ve bu nedenle mevcut tasarım standartlarının yetersiz kaldığı görülmüştür. Aynı zamanda stud çivisine uygulanan maksimum kayma kuvvetinin yorulma göçmesine etkisi olmadığı anlaşılmış ve bununla birlikte maksimum kayma kuvvetinin artırılması yorulma ömrünü azalttığı anlaşılmıştır. Çıkan sonuçlar derlenerek bir tasarım yöntemi tavsiyesi yapılmıştır.

An ve Cederwall (1994), Normal ve yüksek dayanımlı beton numunelerin stud çivilerinin dayanımına etkisi araştırılmıştır [16]. Dördü normal basınç dayanımlı, dördü de yüksek basınç dayanımlı olmak üzere sekiz farklı itme testi yapılmıştır. HEB 300 çelik kirişinin her başlığında iki sıralı olmak üzere 4 adet, 19 mm çapında 75 mm uzunluğunda toplamda sekiz adet stud çivisi kaynatılarak ve beton içerisinde kullanılan hasır donatı tabakasının tek katmanlı, çift katmanlı ve bunların beton döşemede farklı

konumlarda olma durumu da dikkate alınarak numuneler hazırlanmıştır. Yapılan itme testleri sonucunda beton basınç dayanımının stud çivisi dayanımını doğrudan etkilediği görülmüştür. Testlerde kullanılan hasır donatı oranının arttırılması, yüksek dayanımlı betonlarda etkisi olmasa da normal dayanımlı betonlarda bir miktar etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca mevcut standartların yüksek basınç dayanımlı betona gömülü stud çivilerinin dayanımını tahmin etmek için yeterli olmadığı bunun için beton dayanımını da hesaba katan bir formülizasyon geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Lee ve diğ. (2004), Bu çalışmada standartların sınır boyutlarının dışında geniş çaplı başlıklı stud çivileri için çalışma yapılarak çıkan sonuçlar standartların verdiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır [17]. Stud çivisi olarak 25, 27 ve 30 mm'lik stud çivileri için numuneler hazırlanarak testler yapılmıştır. 200 ve 220 mm kalınlığındaki beton döşemeler kullanılmıştır. A serisi numuneler için 35.3 ve B serisi için 49.4 MPa dayanımlı beton kullanılmış, C serisi için 64.5 MPa basınç dayanımlı ise beton göçmesini engellemek için 220 mm döşeme kullanılmıştır. Stud çivileri çelik kirişe 2 sıra halinde kaynatılarak her başlıkta 2 adet toplamda 4 stud çivisi kullanılmıştır. Stud çivisi malzeme özelliği olarak 3 doğrusallı (trilinear) davrandığı kabul edilmiştir. Stud çivisi 25 mm çaplı stud çivisi için A serisinde 3 adet, B serisinde 3 adet, 27 mm çaplı stud çivisi için A serisi 3 adet, C serisi 3 adet, 30 mm çaplı stud çivisi için A serisi 3 adet, C serisi için 3 adet olmak üzere toplamda 18 tane itme testi yapılmıştır. 25 mm çaplı A ve B serisi testlerde göçme stud çivisinde; 27 mm çaplı A serisinde beton ve studda, C serisinde ise stud çivisinde; 30 mm çaplı A1 serisinde beton, A2-A3 testlerinde beton ve studda, C serisinde ise studda göçme yaşanmıştır. Deney sonuçlarından stud çivileri için, özellikle 30 mm'lik studlar, kaynatma işleminin ve kaynatma makinelerinin kaliteli olması gerektiği, 27 mm ve 30 mm çaplı studlar için de beton göçmesini engelleyecek şekilde beton döşeme tasarımı yapılması gerektiği düşünülmüştür. Büyük stud çivilerinin kayma rijitliğinin, normal ölçülerdeki stud çivileri için ampirik formüllerden elde edilen kayma rijitliğinden daha büyük olduğu test sonuçlarından anlaşılmıştır. Ayrıca taşıma kayma kapasitesi normal studlar için verilen ampirik formüller ile uygun bulunmuştur. Taşıma limit sınırında sünek davranış gösteren geniş çaplı stud çivilerinden 30 mm'ye kadar olanlar için süneklilik ile ilgili tasarım gereksinimleri elde edilebilir.

Topkaya ve diğ. (2004), Olgunlaşmış beton içerisinde gömülü stud çivilerinin davranışlarına ilişkin bir çok deneysel çalışma olmasına rağmen yeni dökülmüş ve henüz olgunlaşmamış betonun çelik kiriş ile arayüzündeki davranışı yeterince araştırılmamış olduğundan deneysel çalışmada betonun farklı zamanlardaki bekleme süresinde stud çivilerinin davranışı araştırılmıştır [18]. Araştırma için 24 farklı deney numunesi geliştirilmiştir. Beton numuneler 4, 8, 13 ve 22 saatlik; 3, 7, 14 ve 28 günlük olarak hazırlanmıştır. Stud çivisi tüm numuneler için 19 mm çapında 127 mm uzunluğunda standart olarak kullanılmıştır. Deney numunesinde kompozit kiriş elemanı beton döşemenin zemin üzerinde paralel olacak şekilde yatırılarak beton döşemeye yanal kuvvet uygulanması ile deney düzeneği oluşturulmuştur. Araştırma sonucunda yapılan deneysel çalışma yönteminin erken yaştaki beton numuneler için uygun olmadığı, deneysel çalışmada belirtilen koşullar altında betonun 4. saatinden itibaren kayma aktarımında uygun olduğu, bununla birlikte stud çivilerinin erken saat betonlarında bile rijitlik sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kalıcı kayma değeri arttıkça maksimum kapasitenin düştüğü ve erken yaş betonunda aşırı deformasyonların olması stud çivilerinin başlangıç rijitliğini azaltabileceği kanısına varılmıştır.

Lam ve diğ. (2005), Bu çalışmada itme testi için 254x254 UC 73 (W10x49) I profil iki beton döşeme arasına tutturulmuştur. Beton döşeme 619 mm uzunluğunda, 469 mm genişliğinde ve 150 mm kalınlığında ölçülere sahiptir. Her başlık için 19 mm çapında, 100 mm boyunda bir stud çivisi kullanılmıştır. Stud çivisinin yükleme yönünde beton kenara olan uzaklığı 200 mm olarak alınmış ayrıca çelik kirişe yük uygulayabilmek için 50 mm beton dışında kalacak şekilde çelik profil betona monte edilmiştir. Stud çivisi yükleme doğrultusuna dik yönde 300 mm mesafe de çelik kirişe bağlanmıştır [19]. Bu çalışmada dört farklı numune için deney yapılmıştır. Birinci testte basınç dayanımı 50 MPa, ikinci testte basınç dayanımı 20 MPa, üçüncü testte basınç dayanımı 30 MPa, dördüncü testte basınç dayanımı ise 35 MPa olan beton numuneler ve dört test içinde 19 mm çapındaki stud çivileri kullanılmıştır. Böylelikle kayma göçmesinde beton sınıfının etkisi test edilmiştir. Akma gerilmesine kadar beton liner-elastik gibi davranır ve akma gerilmesine ulaştığında ise plastisite elde edilir. Çelik gövdesine tekil statik yük uygulanmıştır. Çeliğin materyal özellikleri iki doğrusallı (bilinear) olarak tanımlanmış ve akma gerilmesi 275 MPa olarak girilmiştir. Stud çivisi materyal özellikleri ise liner elastik olarak alınmış ve elastisite modülü

$E_s = 200GPa$ ve akma gerilmesi $470.8MPa$ alınmıştır. Birinci test sonucunda yapılan gözlemlerde stud çivisinde kopma olurken beton döşeme yüzeyinde herhangi bir çatlak meydana gelmediği sadece yükün uygulandığı yöne dik doğrultudaki yüzeyinde çok küçük çatlaklar gözlemlenmiştir. İki numaralı testte ise düşük beton dayanımında beton döşeme çelik kirişten sıyrıldığında test durdurulmuştur. Test sonucunda ise stud çivisinin sağlam kaldığı, stud çivisi çevresindeki betonun ise konik şekilde göçtüğü gözlemlenmiştir. Üç numaralı testte ise beton göçmesi ve stud akmasının kombin bir şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Stud çivisinin akma durumu stud çivisi çevresindeki betonun maksimum basınç kuvvetine ulaşmasından dolayı stud çivisinin çelik profile kaynaklandığı yere yakın bir noktada meydana gelmiştir. Dört numaralı testte de beton göçmesi ve stud çivisinin akmasının kombin bir şekilde olduğu yani her iki elemanında göçme yaşadığını göstermiş ancak stud çivisinin akmasının betona göre daha fazla olduğu, göçme modunun stud göçmesine daha meyilli olduğu tespit edilmiştir. Test sonuçları EuroCode 4 ile uyumlu iken BS5950 ve AISC de ise stud çivisi kayma kapasitesinin aşırı tahmin edildiği görülmüştür.

Xue ve diğ. (2012), Deneysel çalışmada çoklu stud çivisi olma durumu ile tekli stud çivisi olma durumu karşılaştırılmıştır [20]. İtme testinde beş farklı numune hazırlanarak her numune için iki adet itme testi olmak üzere on adet itme testi yapılmıştır. Numuneler çoklu stud çivileri için çelik başlığın bir tarafında iki sıralı, boyuna doğrultuda her sırada üç adet olmak üzere altı adet, çeliğin iki başlığı için toplamda oniki adet olacak şekilde kaynaklanmıştır. Dört numune çoklu stud çivileri için boyuna doğrultuda stud çivisi aralıkları farklı olacak şekilde hazırlanmış, bir numunede her çelik başlıkta tekli toplamda iki adet stud çivisi olacak şekilde hazırlanmıştır. Beton sınıfı C50, stud çivileri de 22 mm çapında 200 mm boyunda alınmıştır. Stud çivisinin malzeme özellikleri akma dayanımı 380 MPa, çekme dayanımı 475 MPa olarak verilmiştir. Çelik donatı $\phi 16$ olan akma dayanımı 362 MPa, çekme dayanımı 542 MPa özellikli malzeme seçilmiştir. Sekiz adet çoklu stud çivili, iki adet tekli stud çivili numune için yapılan itme testi sonuçları göstermiştir ki, çoklu stud çivileri ile tekli stud çivilerinin rijitlikleri benzer bulunmuş ve stud çivi mesafelerinin az da olsa rijitliği etkilediği görülmüştür. Tekli stud çivilerinin kayma taşıma kapasitesi çoklu stud çivilerine göre %10 daha fazla çıkmıştır. Ayrıca

çoklu stud çivili numune sonuçları Eurocode ile uyumlu çıkarken, AASHTO ve Çin standartlarının tasarım önerileri ise tekli stud çivisi sonuçları ile uyumlu çıkmıştır.

Spremic ve diğ. (2012), Deneysel çalışmada, prekast beton döşemelerin çelik kirişlere bağlanmasını sağlayan başlıklı stud çivilerinin gruplar halinde düzenlenmesinin sonuçları araştırılmıştır [21]. Beş farklı şekilde çelik kirişe bağlanan, 16 mm çapında 100 mm yüksekliğinde dört stud çivisinin dayanım ve rijitliliğinin olası düşüşü ile ilgili analiz araştırması yapılmıştır. İtme deneyinde iki adet prefabrike beton döşeme ve HEB260 çelik profil ve çapı 10 mm olan hasır donatı kullanılmıştır. Stud çivileri beton döşemenin ortasına denk gelecek şekilde monte edilmiş ve stud çivilerinin betona denk geldiği yerlerde beton döşeme boş bırakılmıştır. Birinci düzenlemede Eurocode 4'e göre stud araları düzenlenmiş, ikinci grupta enine tek sıra halinde, üçüncü grupta boyuna tek sıra halinde, dördüncü grupta eşkenar dörtgen gibi düzenlenmiş ve diğer grupta ise studlu kısmın donatılı ve donatısız düzenlenmiş ve bu düzenleme çelik profilin iki tarafı içinde yapılarak itme testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre grup halinde düzenlenen stud çivileri standartların ön gördüğü minimum mesafenin altında olsalar bile etkili olabileceklerini göstermiştir. Stud çivilerinin deformasyonu ve rijitliği beton sınıfına bağlı olduğu, beton dayanımı 40 MPa olan betondaki stud çivisi grubunun beton dayanımı 30 MPa olan beton grubundakine göre %10 daha fazla rijit olduğu gözlemlenmiştir. Geniş çaplı tekli stud çivisi yerine, stud çivisi arası mesafe standartlarda belirtilen mesafenin (5d) altında olsa bile bir sırada iki veya dört stud çivisi olma durumu tercih edilebilir. Boyuna doğrultuda tek sıralı dört adet stud çivili grubun kayma dayanımı, tek tek stud çivilerinin kayma dayanımının toplamının %92'sine eşit olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca Stud çivilerinin gruplar halinde düzenlenmesi yüksek katlı binalarda, yapım hızını arttırabileceği ve inşaat sektöründe sanayileşmeyi hızlandırabileceği düşünülmüştür.

Liu ve Alkhatib (2013), Köprü yapımında kullanılan stud çivilerinin taşıma kapasitesi ve davranışları incelenmiş ayrıca ayarlanabilir bir stud çivisi numunesi testi de yapılarak geleneksel stud çivileri ile mukayesesi yapılmıştır [22]. Numuneler de başlıklı stud çivisi, başlıksız stud çivisi ve ayarlanabilir stud çivileri kullanılmıştır. İtme testi için W250x28 çelik kiriş, 22.2 mm stud çivisinin 100, 150, 200 mm boyları kullanılmıştır. Beton numunenin ölçüleri 230 mm derinliğinde, 343 mm genişliğinde ve 508 mm yüksekliğindedir. Deneysel çalışmada 100 mm yüksekliğinde

başlıklı stud çivisi için 14 tane farklı durum için test yapılmış, bu testlerde çelik hasır olmama durumu ve çelik hasırın olduğu ve numunede yerleştirildiği konuma göre çeşitli kombinasyonlar türetilerek testler yapılmıştır. Ayrıca, 3 adet 150 mm boyunda başlıklı stud çivisi, 3 adette 150 mm boyunda başlıksız stud çivisi için ve 200 mm boyunda başlıklı 3 adet numune ile birlikte aynı boylarda 3 adet başlıksız stud çivili numune için test yapılmıştır. Ayarlanabilir stud çivisinde ise iki tür stud çivisi kullanılmıştır. Birinci türde ayarlanabilir stud çivisi civatasının stud gövdesi sonunda olduğu durum, ikinci tür ayarlanabilir stud çivisi ise civatanın stud çivisi gövdesinde bulunma (50 mm kadar) durumu söz konusudur. Her iki tür içinde 100 mm boyunda ve donatısız olma durumu ve 150 mm boyunda donatılı olma durumu gözönüne alınarak toplamda yirmibeş farklı itme testi uygulanmıştır. Tüm testlerde beton dayanımı 45.3 MPa, çelik akma dayanımı 300.1 MPa, çekme dayanımı 393.3 MPa, donatının akma dayanımı 598.4 MPa, çekme dayanımı 647.6 MPa, geleneksel stud çivisinin akma dayanımı 372.9 MPa, çekme dayanımı 483.7 MPa, ayarlanabilir stud çivisinin akma dayanımı 467.1 MPa, çekme dayanımı 594.5 MPa olarak verilmiştir. Parametrik çalışmada ise AASHTO LRFD'nin kullandığı formül baz alınarak hesaplama yapılmıştır. Deneysel çalışma sonunda, numunenin taşıma yükü üzerinde çelik hasırın konumunun önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır. Çelik hasır kayma stud çivisini kestiğinde, numune, taşıma yüküne ulaşmış ve göçme şekli stud çivisinde kopma olarak görülmüştür. Çelik hasır stud çivisinin çok üstüne yerleştirildiği durumda, hasırın çevresel beton üzerindeki etkisi hesaba katılmaz ve taşıma yükü betona bağlı olur. Hasırın stud çivisi ile aynı hizada olduğu durumlarda ise maksimum kapasite düşük bir oranda azalma göstermiş ve göçme şekli hem beton hem de stud çivisinde göçme (betonda çatlaklar, stud çivisinde bükülme, eğilmeler) olacak şekilde ortaya çıkmıştır. Başlı stud çivileri, hasırın stud başlığı ile kesişmesi veya aynı hizada olması koşulu ile, başlıksız stud çivilerine göre biraz daha fazla taşıma yükü almışlardır. Çelik hasır başlığın çok üzerinde olduğu durumlarda ise başlıklı stud çivileri ile başlıksız stud çivilerinin kullanıldığı numuneler arasındaki kapasite farklarının neredeyse önemsiz olduğu görülmüştür. Stud çivisinin yüksekliğinin etkisi çelik hasırın konumu ile düşünülmelidir. Hasır stud çivisi ile aynı yükseklikte tutulduğunda stud çivisinin yüksekliğindeki artış taşıma yükünde bir azalmaya sebep olmaktadır. Bu numunelerin göçme şekilleri, stud çivisinin yüksekliğinin artması ile stud çivisinin kopmasından beton ve stud çivisinin birlikte göçmesine dönüşmüştür.

Geleneksel stud ile ayarlanabilir stud çivisi karşılaştırıldığında ise geleneksel stud çivileri daha iyi performans göstermiş ve incelenen stud yükseklikleri için ayarlanabilir stud çivilerine göre %28.6 daha fazla yük taşımaktadır

Dai ve diğ. (2015), Stud çivilerinin akma dayanımında beton dayanımının ve sökülebilir stud çivisinin yaka (collar) boyutunun etkisi araştırılmıştır [23]. Stud çivileri çelik başlıklarda delik bırakılarak her yüze iki adet olmak üzere toplamda dört tane stud çivisi sökülebilir şekilde monte edilmiştir. Beton içerisinde çapı 10 mm olan donatılar kullanılmıştır. Numunelerde stud çivisi çapı 19 mm olan ancak yaka (collar) boyu sırasıyla 16 mm, 17 mm ve 18 mm olan üç farklı stud çivisi kullanılarak farklı beton dayanımları ile kombine edilmiş yedi tane ve bir tane de 19 mm çaplı geleneksel şekilde kaynaklanmış stud çivisi kullanılarak toplamda sekiz adet itme testi gerçekleştirilmiştir. İtme testi sonucunda küçük yaka çapına sahip çivilerin kayma dayanımı, beton sınıfı C20'den C60'a çıkarken arttığı, beton sınıfının C30'dan küçük olduğu durumlarda ise kayma kapasitesine beton döşemenin ezilme-ayrılma durumu egemen olur, diğer durumlarda ise stud çivisinin yaka (collar) boyu kayma kapasitesine egemen olur. Ayrıca sökülebilir stud çivilerinin geleneksel kaynak yapılmış stud çivilerine yakın davranış gösterdiği gözlemlenmiş ve yapılan sayısal çözümlemelerde de standartlara uygunluğu teyit edilmiştir.

Han ve diğ. (2015), Bu çalışmada çelik başlıklarda tek stud çivisi kullanılarak farklı oranlarda ki kauçuk katkı maddeli beton kompozit elemanlarda stud çivisinin davranışları incelenmiştir [24]. İtme testinde betonun %0, %5, %10, %15 kauçuk kırıntısı katkı maddeli olma durumu için 18 farklı itme testi yapılmıştır. İtme testi numunesi için 200x200x8x12 mm ölçülerinde, maksimum dayanımı 400 MPa, akma dayanımı ise 235 MPa H-çelik profil kullanılmıştır. Beton döşeme ölçüleri 460x400x160 mm ve %0, %5, %10, %15 kauçuk kırıntısı katkı maddeli (C30) betonu için 4 grup olacak şekilde ve %5S yüksek beton dayanımlı (C40) kauçuk kırıntısı katkı maddeli numuneler hazırlanmıştır. Stud çivileri ise boyu 90 mm çapı 16mm ve boyu 110 mm çapı 19 mm ölçülerinde alınmış ve akma dayanımı 240 MPa, çekme dayanımı 400 MPa alınmıştır. Donatılar ise akma dayanımı 335 MPa olan ϕ 10 tipi seçilmiştir. Deney sonuçları gözönüne alındığında katkı maddesi oranı arttıkça stud çivisinin sünekliliği de artmıştır. Eurocode 4'te stud çivilerinin ideal plastik davranışı 6 mm olarak verilmiş ve itme testlerinin hiçbirinde özellikle C40 betonu için bu değer

aşılmamıştır. Stud çivisini çevreleyen betonun basınç dayanımı ne kadar düşükse stud çivisinin sünekliği o derece artmış ve elastik betonda stud çivisinin rijitliği ve sünekliğinde stud çivisi çapının etkisinin az olduğu görülmüştür. Aynı zamanda elastik betonun sıradan betona göre yerel çatlama direnci daha yüksektir. Standartlar ile test sonuçlarının uyumlu sonuçlar verdiği ancak AASHTO LRFD en yakın sonucu verdiği görülmüştür.

Rehman ve diğ. (2016), Kompozit kirişlerde sökülebilir stud çivilerinin metal saç trapez kullanılarak kayma dayanımları araştırılmıştır [25]. Bunun için oniki adet itme testi yapılmıştır. Testlerde farklı boyutlarda stud çivileri ve farklı basınç dayanımına sahip beton döşemeler kullanılmıştır. Beton döşemede kullanılan çelik hasır donatının farklı durumları da gözönünde bulundurulmuş ve betonun erken göçmesini engellediğinden itme testlerinde kullanılması tavsiye edilir. Yapılan deneylerin sonucunda sökülebilir stud çivileri ile kaynaklı stud çivilerinin benzer davrandığı görülmüştür. Çelik başlıklarda iki stud çivisi bulunması durumu bir stud çivisine göre daha sünek davranış göstermiştir. Beton dayanımı arttıkça sökülebilir stud çivilerinin kayma taşıma kapasitesi artmış ancak süneklikleri azalmıştır. Sökülebilir stud çivilerinin kayma kapasitelerini öngörmek için Eurocode 3 ve 4 standartlarının uygun öngöründe bulunduğu, AISC ve ACI ise sökülebilir stud çivilerinin kayma dayanımını kayma göçmesini öngörmek için kullanılabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca sökülebilir stud çivileri göçme sonrası çelik profilin tekrar kullanılabilmesi için kaynaklanmış stud çivilerine iyi bir alternatif olabilir.

Souza ve diğ. (2017), Boşluklu ince beton döşemelerde stud çivilerinin davranışı araştırılmıştır [26]. Boşluklu ince döşeme kullanılarak belirli yükseklikte daha fazla kat elde etme olanağı mümkündür. İnce döşemeli İtme testi için W200x46.1 çelik profil, 19 mm çapında 110 mm yüksekliğinde stud çivisi kullanılmıştır. Stud çivileri her başlığa tek sıra halinde üç tane olmak üzere toplamda altı adet stud çivisi kullanılmıştır. Beton dayanımı 45 MPa olarak alınmıştır. Üç tane itme testi yapılmış ve çıkan sonuçlar standartlar ile mukayese edilmiştir. Çıkan sonuçlarda test sonuçlarının standartlar ile uyumlu sonuç verdiği görülmüştür. Beton basınç dayanımı azaldığında betonda daha büyük hasarlara ve daha küçük kapsamda stud çivisi göçmesine neden olmaktadır. Beton dayanımı arttıkça gerilme yoğunluğu stud çivisinin tabanında meydana gelmektedir. Ayrıca beton basınç dayanımının, boşluklu beton döşemeye

gömülü stud çivisinin sadece taşıma kayma kapasitesini değil stud çivisi kuvvetlerini de etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Shen ve Chung (2017), Standart numuneler hazırlanarak kayma kuvveti etkisi altında ve numuneler modifiye edilerek zeminle 15° açılı oluşturacak şekilde oluşturularak kayma ve çekme kuvveti altında stud çivilerinin araştırması yapılmıştır [27]. Deneysel çalışmada kompozit elemanlarda beton döşemenin çelik trapez saç olmadan beton döşeme olma durumunun standart ve modifiye hali için 11 adet, çelik trapez saç kullanılarak oluşturulmuş ve stud çivisinin çelik trapez saç hadvesindeki konumu baz alınarak oluşturulan standart ve modifiye durumu için 11 adet olmak üzere toplamda 22 adet itme testi deneyi yapılmıştır. Deneylerde 19 mm çapında 100 mm boyunda standart stud çivisi ve beton basınç dayanımı 35 MPa olan beton döşeme numunesi kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda çelik saç trapez kullanılmadan oluşturulan beton döşemeli tiplerde göçme stud çivisinde oluşuyor. Stud çivisinin hadvede uygun tarafta monte edilerek oluşturulan trapez saç kullanılarak oluşturulan beton döşemeli testlerde ise küçük kaymalarda beton göçmesi olurken stud çivisinin hadvede uygun olmayan tarafta monte edilmesi oluşturulmuş trapez saçlı beton döşemelerde ise büyük kayma oluşturarak beton göçmesi gözlemlenmiştir.

Ellobody ve Young (2006), İtme testi numunelerinin üç boyutlu modellemeleri Abaqus programı kullanılarak modelleme yapılmıştır [28]. Modellemede her çelik başlıkta tek sıra halinde iki adet toplamda dört adet stud çivisi kullanılan itme testi numunesinin simetri kullanılarak üç boyutlu çeyrek modellemesi yapılmıştır. Analiz elemanları C3D8R ve C3D6 olacak şekilde kombinlenmiştir. Beton malzeme özelliği analizde "drucker prager" ve "drucker prager hardening" olarak ve parametreleri $\beta = 20^0$, $K=0.8$ olarak tanımlanmıştır. Çelik kiriş, stud çivisi ve çelik trapez iki doğrusallı (bilinear) olarak tanımlanmıştır. Sınır koşullarında ise simetri olan yüzeyler simetri doğrultusunda tutulmuş ayrıca betonun zemin ile temas ettiği yüzey yükün geldiği doğrultuda sabit tutulmuştur. Sonuç olarak, 44 farklı numune testi modellenmiş ve elde edilen stud çivisi taşıma kayma kapasiteleri deneysel sonuçlarla elde edilen bulgularla örtüşmüştür. Ayrıca analiz sonuçlarından elde edilen başlıklı stud çivilerinin kayma dayanımı kapasiteleri standartlar ile karşılaştırılmıştır. Standartlardan Amerikan ve İngiliz standartları bulunan değerlerden fazlaca hesaplama yaparken, Eurocode analiz sonuçları ile uyumlu çıkmıştır.

Nguyen ve Kim (2009), Kompozit kiriş ve köprülerde çokça kullanılan başlıklı stud çivilerinin kapasitelerini ve yük-kayma davranışlarını anlamak için yapılan itme testi numuneleri, sonlu elemanlar (FEM) yöntemi kullanılarak Abaqus programında modellenerek analiz sonucu hem test sonuçları hem de standartlarla mukayese edilmiştir [29]. Analizde 22 mm çapından büyük stud çivilerinin doğrusal ve doğrusal olmayan 3 boyutlu modellemesi yapılarak davranışları analiz edilmiştir. Beton döşeme, çelik kiriş ve stud çivisi C3D8R olarak modellenmiştir. Kohezif tabaka için COH3D8 modeli tanımlanmış. Donatılar ise çubuk eleman olarak tanımlanıp T3D2 olarak modellenmiştir. Rijit taban ise R3D4 olarak tanımlanmıştır. İtme testlerinde çelik kiriş başlığı ile beton döşeme yüzeyinin temas ettiği yerlerde sürtünmeyi azaltmak için yüzeylere yağ sürüldüğünden modellemede bu iki yüzey sürtünmesiz olarak tanımlanmıştır. Stud çivisinin beton içerisinde kalan kısımları betona bağlı (tie) olarak tanımlanmış olup böylelikle bu ikisi arasındaki kayma olmaması sağlanmıştır. 0.05 mm kalınlığındaki kohezif tabaka beton yüzey ve çelik yüzeye (tie) seçeneği ile bağlı olduğu tanımlanmıştır. Beton döşeme ile çelik profil ara yüzeyinde "contact interaction" ve kohezif tabaka kullanılmışken, stud çivisi ile beton yüzey arasında "tie" bağlı olma opsiyonu kullanılmıştır. Donatılar betonun içinde olduğundan "embedded" gömülü olma durumu tanımlanmıştır. Beton döşeme ile rijit taban arasında "Contact Interaction" seçeneği kullanılarak önceki araştırmalardan yola çıkılarak "friction coefficient" sürtünme katsayısı 0.25 alınmıştır. Simetriden dolayı x ve z yönlerinde simetri yüzeyleri tanımlanmıştır. Rijit taban tüm yönlerde tutulmuştur. Yükleme çelik kirişin üst yüzeyine aşağı yönlü yer değiştirme olarak verilmiştir. Yük olarak uygulanan yer değiştirme doğrusal artan "amplitude" salınım fonksiyonu kullanılarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada Abaqus opsiyonlarından "Explicit, dynamic" metodu kullanılmıştır. Bu yöntem zaman kontrol yöntemi olarak kullanılır. İtme testinde kullanılan yükleme hızının aynısını simüle etmek için bu yöntem kullanılır. Beton numune özellikleri için "Damage Plasticity" malzeme modeli seçeneği kullanılmış ve dilatasyon açısı 20° , eksantirite 0.1, f_{b0}/f_{c0} oranı 1.16 alınmıştır. Çelik profil ve donatı için modelleme iki doğrusallı (bilinear) olarak modellenmiştir. Başlıklı stud çivisi ise üç doğrusallı (trilinear) olarak modellenmiştir. Analiz sonuçları ve test sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kohezif tabaka olması durumu, kohezif tabaka olmaması durumuna göre deney sonuçları ile daha uyumlu çıkmış olsa da kohezifsiz olma durumu ile çok küçük bir fark

oluşmuştur. Kohezif olma durumunun sadece başlangıç rijitliğine etkisi olmuştur. Elde edilen değerler sonucunda, AASHTO LRFD standartı başlıklı stud çivilerinin kapasitelerinin %27'sine kadarının üstüne çıktığını göstermiştir. Eurocode 4'te verilen tasarım kuralların da ise 22 ve 25 mm çaplı stud çivileri için uygun olduğu ancak 27 mm çaplı stud çivilerinde ise 22 ve 25 mm'liğe göre daha az uygunluk sağlamışken, 30 mm çaplı stud çivileri için, beton dayanımının 50-60 MPa olması durumu hariç, taşıma kapasitelerinin %8.7'sine kadar tasarım dayanım değerlerini fazla öngörmüştür.

Qureshi ve Lam (2012), Başlıklı stud çivileri ve çelik trapez saç kullanılan kompozit elemanların Abaqus programında üç boyutlu modellemesi yapılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır [30]. İtme testinde her başlıkta tek sıra halinde üç adet, 19 mm çapında 100 mm boyunda, toplamda altı adet stud çivisi kullanılmışken modellemede tek stud çivisinin bulunduğu saç trapez baz alınarak simetri kullanılarak çeyrek olarak modellenmiştir. Analizler hem static hem de dinamik/explicit olarak yapılmıştır. Üç boyutlu C3D8R ve C3D6 eleman modeli, stud çivisi, beton döşeme, çelik profil ve "wire" olarak tanımlı demir donatı için kullanılmıştır. Çelik trapez ise "shell" eleman S4R olarak tanımlanmıştır. Yüzey etkileşimlerinde "surface to surface" kullanılmıştır. Çelik saç ve çelik kiriş arasında "normal behaviour" için frictionless, "tangential behaviour" içinse "hard contact" tanımlanmıştır. Çelik trapez ve beton yüzey arasında "normal behaviour" ve "tangential behaviour" tanımlanarak "hard contact" ve "friction penalty" 0.45 alınmıştır. Beton malzeme özelliği static analizde "drucker prager" olarak ve parametreleri $\beta = 20^0$, $K=0.8$; dinamik/explicit analizde ise "damaged plasticity" olarak tanımlanmış ve dilatsayon açısı 40^0 alınmıştır. Ayrıca explicit analizde tüm malzemelerin yoğunluğu static analizden farklı hesaplanır ancak diğer parametreler aynı alınmıştır. Sınır koşulları tanımlanırken tüm simetri yüzeyleri simetrisi oldukları yönlerde sabit tutulmuştur. Betonun zeminle temas ettiği yüzey z doğrultusunda hareketsiz tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarından anlaşılmıştır ki, hem static hem explicit analiz sonuçları deney sonuçları ile elde edilen stud çivisi taşıma kapasitesi değerlerine oldukça yakın çıkmıştır. Bununla birlikte göçme sonrası davranış analizinde dinamik/explicit daha iyi sonuç vermiştir.

Liu ve diğ. (2014), İtme testi numuneleri Abaqus programı kullanılarak üç boyutlu modelleme yapılmıştır. İtme testi numunelerinde çeliğin her başlığında tek sıra yan yana iki stud çivisi olmak üzere toplamda dört stud çivisi kullanılmıştır [31]. Bu stud

çivileri geleneksel kaynak çivileri yerine beton ve çelikte delikler bırakılmak suretiyle cıvata usulü bağlantı sağlayan numuneler kullanılmıştır. Modelleme yapılırken simetriden dolayı numunenin çeyrek kadarı modellenmiştir. Beton döşeme ve çelik kiriş üç boyutlu katı eleman C3D8R olarak, cıvata özellikli stud çivisi ise C3D20R olarak ve donatılar T3D2 çubuk eleman olarak modellenmiştir. Etkileşim yüzeyleri "surface to surface" olarak ve "normal behaviour" durumu için "hard contact", "tangential behaviour" durumu için de "penalty" olarak tanımlanmıştır. "Penalty" olma durumunda sürtünme katsayısı "friction coefficient" beton ve çelik yüzeyler arasında 0.45, diğer yüzeyler için 0.25 alınmıştır. Çelik donatılar beton döşemeye gömülü "embedded" yapılmıştır. Sınır koşullarında ise bölünmüş yüzeyler simetri yüzeyi olarak tanımlanmış ve simetri yüzeyleri doğrultusunda sabit tutulmuştur. Ayrıca betonun yükleme yönüne karşı koyan yüzeyi yükleme doğrultusunda hareketsiz olarak tanımlanmıştır. Beton malzeme özelliği doğrusal olmayan alınmış ve Abaqus'te tanımlanan "Plastic" seçeneği tanımlanmıştır. Çelik kiriş, stud çivisi ve demir donatılar iki doğrusallı (bilinear) olarak tanımlanmıştır. Analiz sonuçları ve itme testi sonuçları kıyaslandığında sonuçlar göstermiştir ki geliştirilen analiz modelin stud çivisi için hem kayma taşıma kapasitesini hem de yük-kayma eğrisini doğru sonuçlar ile verdiği anlaşılmıştır.

Han ve diğ. (2017), Bu çalışmada daha önce yapılmış olan itme testinin numuneleri olan kauçuk katkı maddeli beton numuneler [24] için Abaqus programında Finite Element (FE), Sonlu Eleman, yöntemi kullanılmıştır. Analiz programı kullanılarak hem zamandan hem de pahalı masraflardan tasarruf edilmiş olur. Analizde çeliğin her başlığında bir tane toplamda iki tane stud çivisi kullanılmıştır. Analizin daha hızlı olabilmesi için simetriden yararlanarak numunenin yarısı modellenmiştir. Abaqus programında beton döşeme, çelik profil ve stud çivisi katı eleman C3D8R olarak, donatılar ise truss (çubuk) eleman olarak tanımlanmıştır [32]. Programda stud çivi gövdesi beton döşemeye gömülü ve stud gövde yüzeyi beton iç yüzeyi ile temas halinde olduğundan sürtünme katsayısı 0.2 alınmış ve bu sürtünme katsayısı çelik profilin beton döşeme ile temas ettiği yüzeyler için de kullanılmıştır. Stud çivisinin çelik profile kaynaklandığı yerde stud çivisi ve çelik profil için tie (bağlanma) komutu tanımlanmıştır. İtme testi sonunda beton döşemeden ayrılarak çıkarılan stud çivisinin baş kısmında herhangi bir deformasyon olmadığı görüldüğünden beton

içerisinde gömülü kalan baş kısmı Merge (birleştir) komutu kullanılmış ve gerçeğe daha yakın olabilmesi için stud gövdesi ile beton içerisindeki stud başlığı birbirlerine tie (bağlanma) seçeneği kullanılarak tanımlama yapılmıştır. Yük, itme testinde çelik profilin yük alan yüzeyine tanımlanmıştır. Simetriden dolayı çelik profilin gövde kısmından bölünerek yarım modelleme olduğundan bölünen çeliğin gövde yüzeyine sınırlama koşulları tanımlanmış ve Z yönünde deplasmanı sıfır alınmıştır. Beton döşemenin zemin ile temasta olan ayağı X ve Y yönünde sabit alınmıştır. Beton döşemenin malzeme özelliği tanımlanırken Damage Plasticity model kullanılmış ve bu seçeneğe bağlı olan parametreler olan dilation angle (dilatasyon açısı) 45° , eccentricity (eksantrite) 0.1, f_{bo}/f_{co} 1.16, K 0.667 ve viscosity (viskozite) ise 0 alınmıştır. Analiz sonucunda, sayısal analiz sonuçlarının test sonuçları ile uyumlu çıktığı görülmüştür. Sonuçlar göstermiştir ki AASHTO LRFD'deki tasarım kayma dayanımının EUROCODE 4'e göre test sonuçlarına daha yakın çıkmıştır. Kauçuk kırıntısı katkı maddeli betonun eğilme uzaması normal betonun yaklaşık iki katı olduğu ve kaynatma kusuru stud çivilerinin taşıma kapasitesini azaltıp maksimum kaymayı tehlikeli dereceye götürdüğü görülmüştür. Stud çivisinin çelik profil ile birleştiği yerde kusur olması diğer lokasyonlara göre, özellikle tekli stud çivisinin süneklik ve maksimum kayma değerleri bakımından, çok daha tehlike arz etmektedir.

1.5 Hipotez

Bilinen avantajlarından dolayı günümüzde kompozit yapılar çokca tercih edilmektedir. Bu çalışmada kompozit yapılarda kesme kuvvetinden dolayı ortaya çıkan kayma kuvvetlerini karşılayan kayma bağlayıcılarının boyut etkisi araştırılmıştır. Burada boyut etkisi kompozit kirişin belli bir kesiti düşünüldüğünde sadece betonun gevrek olarak ezilmesinden kaynaklanmaktadır. Kompozit kiriş bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise kırılma sırasında kayma bağlayıcılarında toplanan elastik enerjinin ani boşalması stud çivilerinin de boyut etkisine katkı sağlamasına neden olur. Böylece birleşik bir boyut etkisinden söz edilebilir. Bu durumun araştırılması ise kompozit kirişin en önemli bileşenlerinden olan beton ve stud (kayma) çivilerinin kırılma mekanizmalarının çok iyi bilinmesine bağlıdır. Bu tezde kompozit kiriş bileşenlerinin boyut etkisine olan katkısının araştırılması betonun ezilme durumu göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Kompozit kirişlerde kayma

bağlayıcıları göçme esnasında gevrek kırılma davranışı gösterdiğinden bu davranış neticesinde boyut etkisinin ortaya çıktığı ve betonun göçmesinden dolayı gevrek kırılmanın ortaya çıktığı düşünülmektedir.



2. SAYISAL YAKLAŞIMLAR

2.1 Yöntem

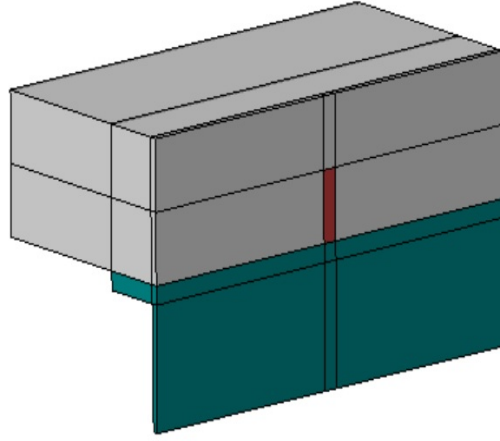
Deneysel çalışmanın sayısal doğrulaması sonlu eleman yöntemini baz alan Abaqus/CAE programı kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışması yapılan üç farklı boyuttaki numunelerin Abaqus/CAE’de yapılan modellemesinde, daha önce yapılmış olan araştırmalar incelenerek modelleme yöntemi belirlenmiştir.

2.1.1 Sonlu eleman seçimi

Önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda Abaqus/CAE’de simetri özelliği sayesinde analiz zamanını azaltabilmek için çeyrek modelleme yapılmıştır (Şekil 2.1). Modellemede iki dikdörtgen şekilli beton döşeme arasına her başlığına bir adet stud çivisi kaynatılmış I çelik profil kullanılmıştır. Modellemede beton döşeme, çelik profil ve stud çivisi üç boyutlu C3D8R (Continuum, 3D, 8-node, reduced integration) özellikli "solid" eleman, donatılar ise üç boyutlu B31 (Beam, 3D, 1-st order interpolation) özellikli "wire" eleman olarak tanımlanmıştır. Analizlerde "wire" eleman olarak tanımlanan donatının "Property" seçeneğinden öncelikle "Create Section" menüsünden Category ve Type olarak "Beam" eleman seçilmeli ve sonrasında "Assign Beam Orientation" opsiyonundan elemanın tanımlanması işlemi yapılmalıdır. Ayrıca stud çivisi başlıksız olma durumu, başlıklı olma durumu ile benzer davranış gösterdiğinden [29] analizlerde yüzey tanımlamasını kolaylaştırmak ve analiz süresini hızlandırmak için etkili yükseklik alınarak tasarlanmıştır.

2.1.2 Malzemelerin modellenmesi

Abaqus’te kullanılacak malzeme tanımları deneyde kullanılan numunelerin madde özelliklerini en uygun şekilde yansıtabilecek şekilde tanımlanmalıdır. Analiz için Finite Element Model (sonlu eleman yöntemi) kullanılarak malzeme modellemesi yapılmıştır. Önceki araştırmalar ile ilgili çalışmalar ile ilgili modellemelerde "static/implicit" yöntemi kullanılmıştır. "Static" analizde beton malzeme özellikleri için "Damage Plasticity Model" kullanılmış ve buna bağlı parametreler olan dilation



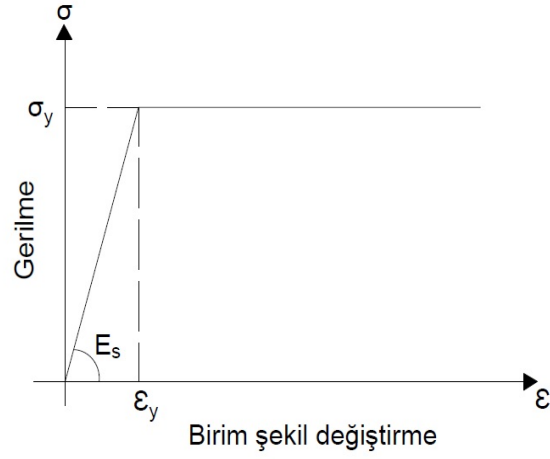
Şekil 2.1 : Sonlu eleman modellemesi.

angle (dilatasyon açısı) 55° , eccentricity (eksantirite) 0.1, f_{bo}/f_{co} 1.16, K değeri 0.667 ve viscosity (viskozite) ise 0 alınmıştır. "Explicit" yöntemi ise zaman kontrol yöntemi olarak kullanılır. Daha çok çarpma, ilerleyen zarar görme, malzeme göçmesi, metal şekillendirme v.b. durumlarda kullanılır. Süreksiz ortam, geniş deformasyon ve temas yüzeyi için güçlü bir çözüm şeması sunmaktadır. "Dinamik/explicit" yöntemi dinamik bir yöntem olsa da yarı dinamik analizler için de kullanılmaktadır. Analiz süresi, kütle ölçeklendirilmesi kullanılarak veya yükleme hızı artırılarak azaltılabilir. Süreksizlik ve temas problemlerinin çözümü için bu yöntem çok etkilidir [29]. Bu yüzden deneyi yapılan itme testinin simülasyonu için en uygun yöntem olarak düşünüldüğünden modelleme davranışının gerçeğe yakın olması için analiz modellemesi "dynamic/explicit" olarak tanımlanmıştır. "Explicit" yöntemde beton modellemesi Northwestern Üniversitesinden Bazant tarafından geliştirilen "Microplane Model 7" [33,34] "subroutine" olarak tanımlanmıştır.

Çelik kiriş, stud çivisi ve donatılar hem "static/implicit" hem de "Dynamic/Explicit" yöntemlerinde şekil 2.2'de gösterildiği gibi iki doğrusallı (bilinear) olarak tanımlanmıştır.

2.1.3 Temas yüzeylerinin modellenmesi

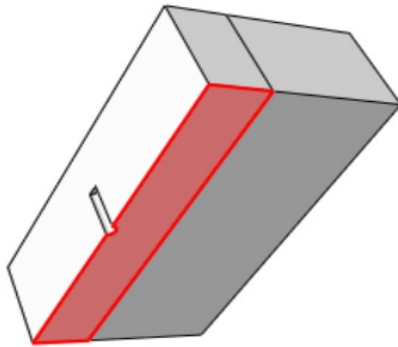
Abaqus analizlerinde yüzeyler arasında etkileşim ve bağlanma şekillerinin olabildiğince gerçeğe yakın olarak tanımlanması oldukça önemlidir. Abaqus programı kullanılarak yapılan modellemede kullanılan beton döşeme, çelik profil, stud çivisi ve hasır donatı elemanlarının temas yüzeyleri ve bunların birbiri ile bağlantı



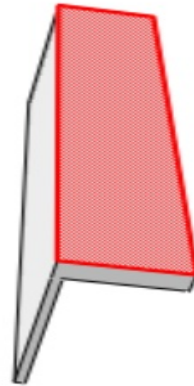
Şekil 2.2 : Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

şekilleri tanımlanmıştır. Modellemede temas halindeki yüzeylerin etkileşim şekillerini tanımlamak için temas halindeki yüzeylerin Abaqus programında öncelikle tanımlanması gerekmektedir. Etkileşim yüzeylerinden beton döşeme, çelik kiriş temas yüzeyi Şekil(2.3)'de gösterildiği gibi seçilmiştir. Beton döşeme ve çelik profilin birbiri ile temas eden yüzeyleri itme hareketinden dolayı belli miktarda sürtünmeye maruz kalacaktır. Bu yüzden beton döşeme, çelik kiriş temas yüzeyi "interaction" menüsünden "surface to surface" seçeneği ile "contact" işaretlenip "Normal behaviour" opsiyonu "hard contact", "Tangential behaviour" opsiyonu ise "penalty" tanımlanarak "friction coefficient" 0.25 olacak şekilde tanımlanmıştır.

a)

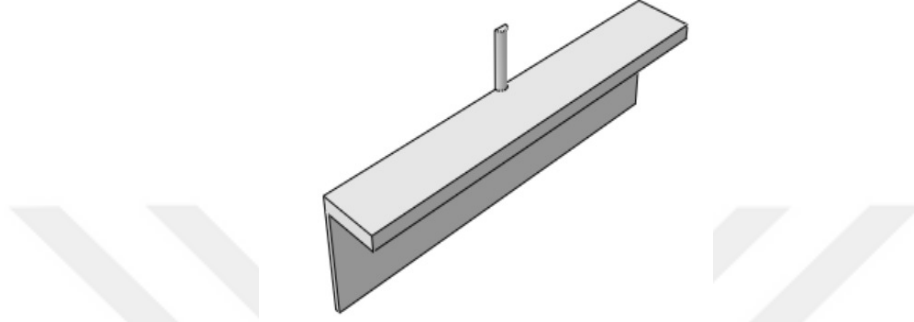


b)



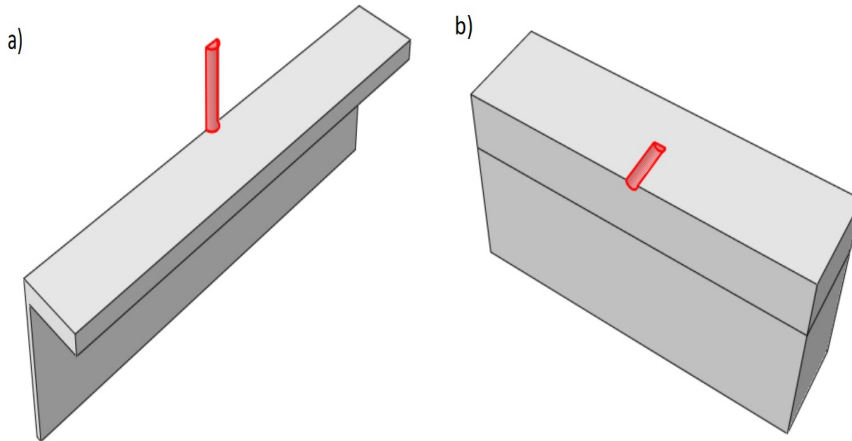
Şekil 2.3 : a) Beton döşeme yüzeyi b) Çelik profil yüzeyi.

İtme testinde stud çivisi yüksek voltajlı özel bir makine yardımı ile saplama yöntemi kullanılarak çelik profil yüzeyine kaynatıldığından bu iki bileşen tek bir elemanmış gibi davrandığı düşünülmüştür. Böylelikle Abaqus programında "Assembly" seçeneğinden "merge" opsiyonu kullanılarak çelik kiriş ve stud çivisinin bir bütün olarak davranılması sağlanmıştır (Şekil 2.4).



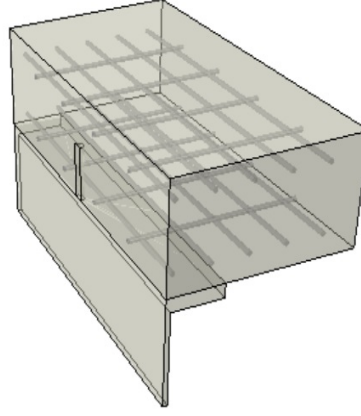
Şekil 2.4 : Çelik profil ve stud çivisi görünüşü.

Stud çivisinin beton döşeme içerisinde kalan kısmı ve beton döşemenin stud çivisini sarmalayan yüzeyleri birbirlerine aderanstan dolayı bağlıymış gibi hareket ederler. Abaqus'te bu bağlı olma hareketini tanımlayabilmek için stud çivisi ve beton döşemenin temas halindeki yüzeylerini belirlemek gerekmektedir (Şekil 2.5). Bu tanımlama yapıldıktan sonra "interaction" menüsünden "Create Constraint" seçeneğinden "Tie" modellemesi seçilerek "mastersurface" olarak stud çivisinin temas yüzeyleri, "slavesurface" olarakta beton döşemenin stud çivisi ile temas eden yüzeyleri tanımlanarak bağlantı şekli tamamlanmış olur.



Şekil 2.5 : a)Stud çivisi yüzeyi b)Stud çivisini sarmalayan beton yüzeyi.

Çelik donatılar, beton döşeme içerisinde gömülü olduğundan, uygulanan yüklemeye rağmen yer değiştirme hareketine maruz kalmadığı, hareketsiz oldukları kabul edilmiştir. Bu davranışı Abaqus programında tanımlayabilmek için "interaction" menüsünden "Create Constraint" seçeneğinden "Embedded region" opsiyonu seçilerek hasır donatının beton döşeme içerisinde gömülü olma durumu tanımlanmış olur (Şekil 2.6).

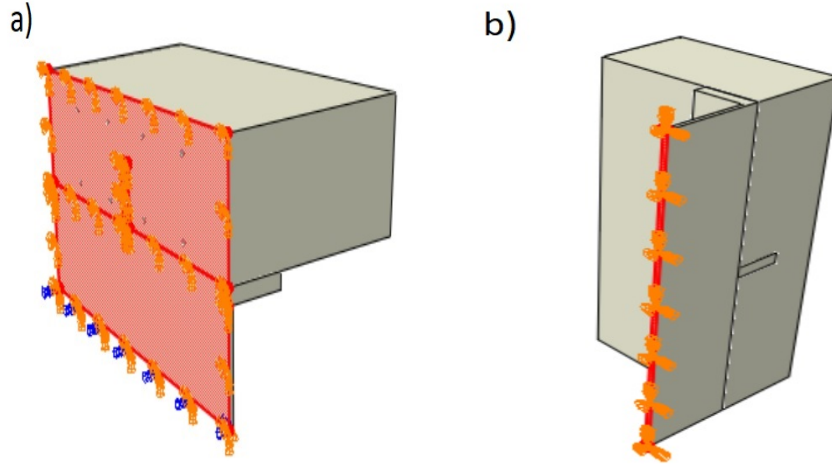


Şekil 2.6 : Beton döşeme ve demir donatı görünüşü.

2.1.4 Sınır koşulları ve yük ataması

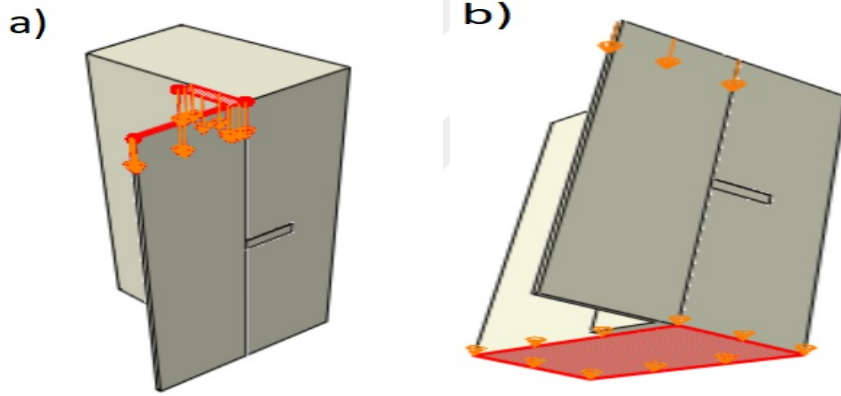
Analiz aşamasında doğru sonuçlar alabilmek için sınır koşulları ve yükleme tanımlamasını gerçek duruma en yakın şekilde yapılması oldukça önemlidir. Abaqus programında analiz süresini azaltabilmek için simetri özelliği kullanılarak gerçek numunenin çeyrek modellemesi yapılmıştır. Analiz boyunca modellemenin bölünmemiş tam bir modellemeymiş gibi tanımlanabilmesi doğru analiz yapılabilmesini sağlayacaktır. Bunun için simetri yüzeylerini tanımlamak gereklidir. Simetri yüzeyleri kesilen yüzeyin bulunduğu doğrultuda tanımlanması analizi gerçekçi boyuta taşıyacaktır. Analizde modelleme x ve y yönlerinde bölünmüş olduğundan simetri yüzeyleri bu doğrultuda seçilmiştir (Şekil 4.11). Simetri özelliği "Load" menüsünden "Boundary Condition" seçeneğinden bulunduğu doğrultuda "XSYMM, YSYMM, ZSYMM" olarak seçildiği yönde atama yapılarak tanımlanmalıdır.

İtme testinde yükün uygulandığı çelik profilin gövde ve alın kısmı yükleme yüzeyi olarak alındığından Abaqus programında bu yüzey yükleme yüzeyi olarak, yükün uygulandığı doğrultudaki ve zemine temas eden beton döşeme yüzeyide "Boundary



Şekil 2.7 : a) X simetri yüzeyi b) Y simetri yüzeyi.

Condition" seçeneğinden yükün uygulandığı doğrultu yönü sabit olacak şekilde destek yüzeyi olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.8).



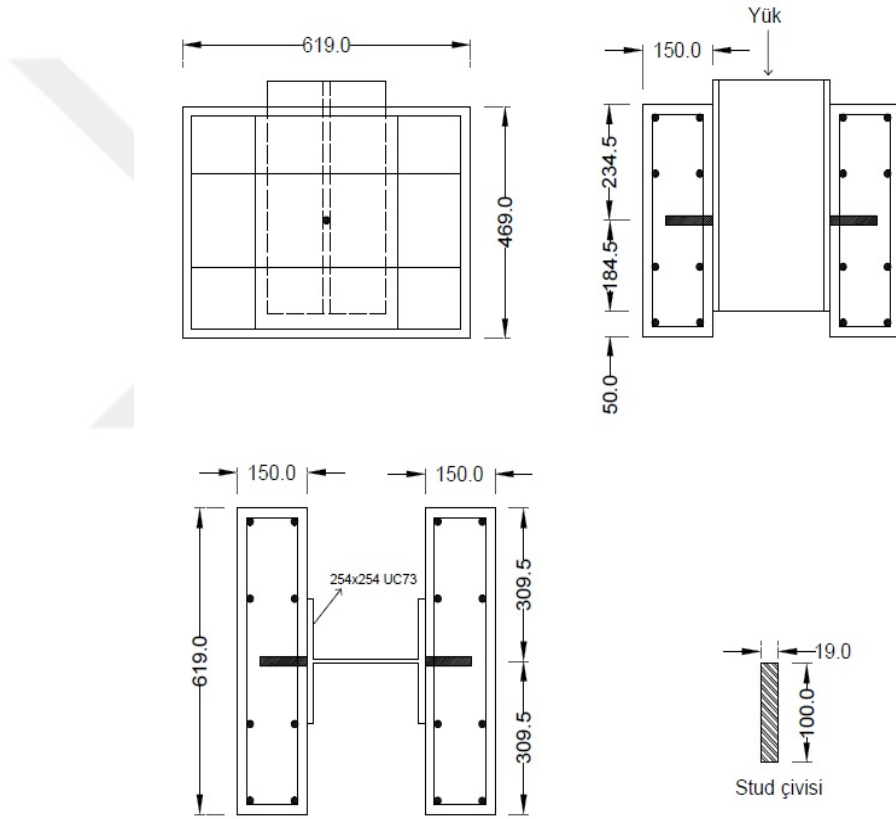
Şekil 2.8 : a) Yükleme yüzeyi b) Destek yüzeyi.

2.2 Kalibrasyon

Bu bölümde Abaqus programına ilişkin anlatılan modelleme esasları kullanılarak modellemelerde hem "static/implicit" hem de "dynamic/explicit" yöntemi ile analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları, mevcut çalışmalar ile kıyaslanarak en uygun kalibrasyonlar elde edilmeye çalışılmış ve bu doğrultuda deneysel çalışmadaki itme testinde kullanılan modellemeyi sonlu eleman analizi ile karşılaştırabilmek için parametreler elde edilmiştir. Literatür araştırması sonucunda seçilen farklı modelleme tipleri ile ilgili yapılan analizler aşağıda anlatılmıştır.

2.2.1 Lam ve diğ. (2005)

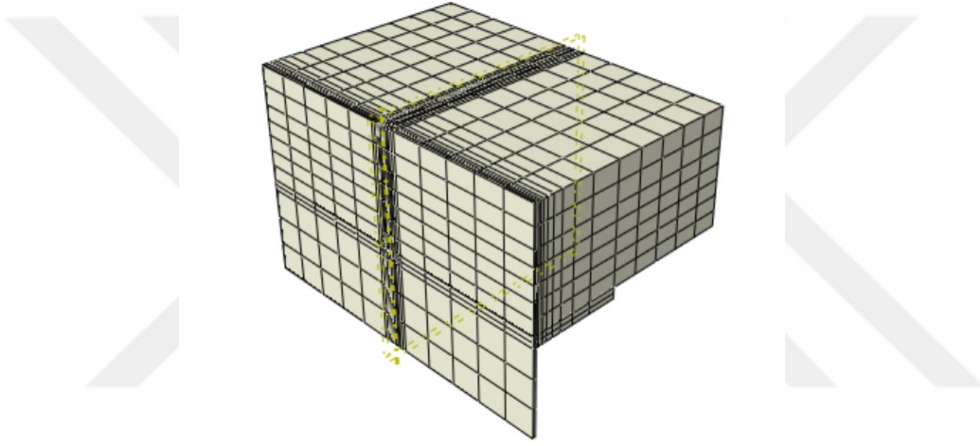
Çelik profilin her başlığında tek stud olması durumu incelenen bu çalışmada 19 mm'lik stud çivisi için dört farklı deney yapılmıştır. Deney modellemesi şekil 2.9'da verilen ölçüler referans alınarak dörtte bir olarak modellenmiştir. Modellemede etkili yükseklik alınarak stud çivisi başlıksız olarak modellenmiştir [29]. Abaqus modellemede ise beton basınç dayanımının 35 MPa ve 50 MPa olması durumu simüle edilerek çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.9 : İtme testi numune ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir).

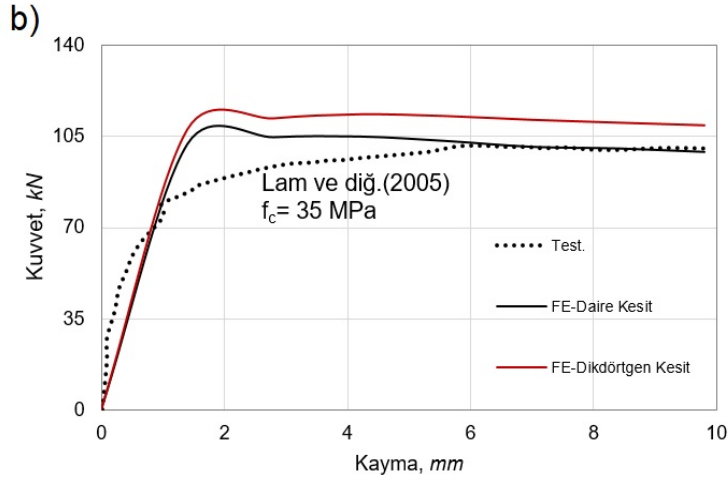
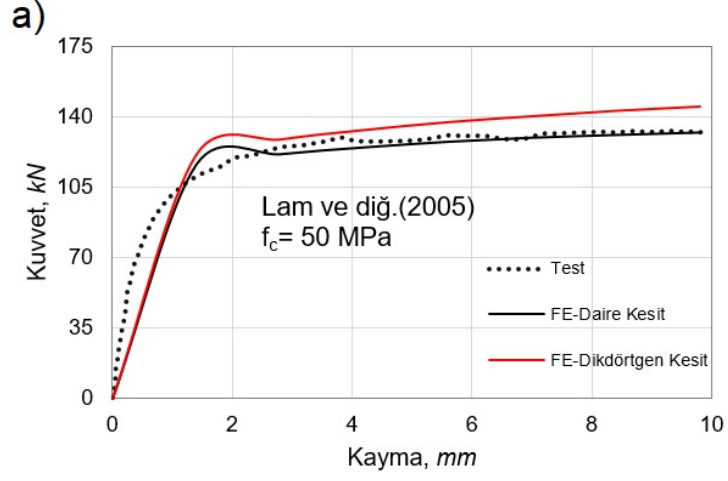
Analiz "static/implicit" olarak yapıldığından beton "Damage Plasticity" modellenmiş ve buna bağlı parametreler olan dilation angle (dilatasyon açısı) , eccentricity (eksantrite) , f_{bo}/f_{co} oranı , K değeri ve viscosity (viskozite) parametreleri değişkenlik gösterecek şekilde farklı değerler alınarak en uygun parametreler bulunmaya çalışılmıştır. Betonun elastisite modülü deneyde kullanılan beton numune baz alınarak hesaplanmış ve Poisson oranı 0.2 alınmıştır. Stud çivisi, çelik profil ve donatı ise

iki doğrusallı (bilinear) olarak tanımlanmış ve bunların malzeme özellikleri (Akma dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü v.b.) deney numuneleri için verilen değerler kullanılarak modelleme yapılmıştır. Modellemede yükleme değeri, yükleme yönünde elde edilen yer değiştirme değeri olarak tanımlanmıştır. Ayrıca analiz sonucunu önemli derecede etkileyen "Mesh" seçeneğinin uygun şekilde girilmesi önemli bir adım olarak görülmüştür. Stud çivisinin taşıma kapasitesini gerçek değerlere yakın bulabilmek için "Mesh" yapılırken stud çivisinin kesit alanını etkilediği çevre (stud çivisinin çapı kadar) her iki doğrultuda malzeme boyunca daha küçük parçalara bölünmüştür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Modellemenin mesh yapılmış hali.

Abaqus programında yapılan "Static/implicit" analiz sonucunda elde edilen stud çivisi için bulunan yük-kayma grafiği referans alınan deneysel itme testi sonuçları ile grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca stud çivisinin dairesel kesitte olması, Abaqus programının sonlu elemanlar yöntemi kullanmasından dolayı, dairesel stud çivisinin beton döşeme ve çelik profille temas ettiği yüzeyleri çok küçük parçalara bölmesine neden olmaktadır. Bu da analiz edilecek olan parçaların geometrik olarak karmaşık şekiller haline gelmesini sağladığından analiz süresinin uzamasına sebebiyet vermektedir. Analiz süresini kısaltabilmek için modellemede dairesel stud çivisinin kesit alanını verecek şekilde kare stud çivisi de modellenmiştir. Kare stud çivisinin kaymayı karşılayan kenarı dairesel stud çivisinin çap uzunluğu olacak şekilde hesaplama yapılmış ve elde edilen analiz sonuçları grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 2.11) .



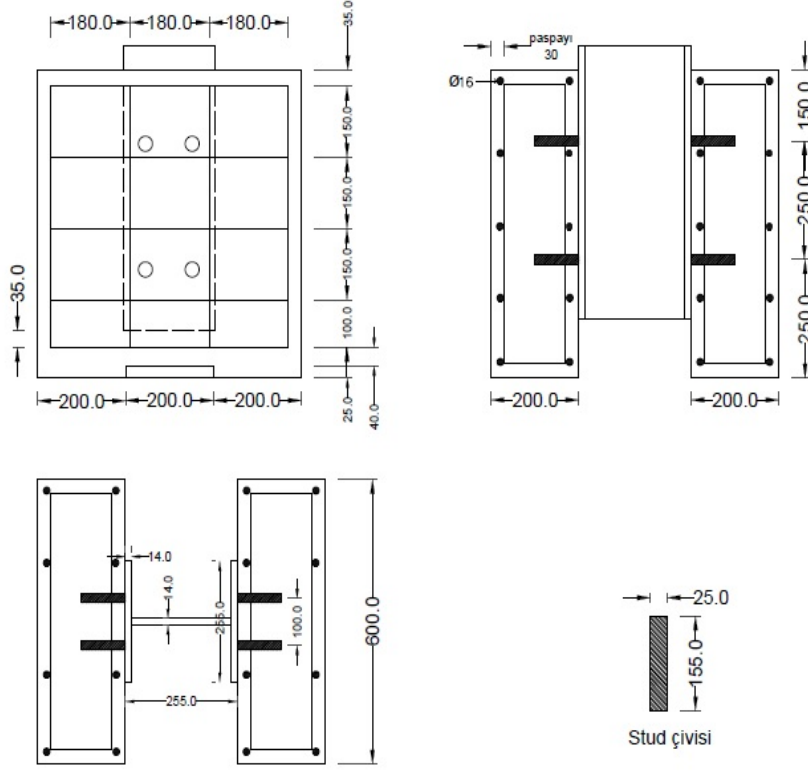
Şekil 2.11 : Kayma "stud"ı için itme testi ve karşılık gelen sonlu eleman analizi:
a)50 MPa beton b)35 MPa beton için.

Grafik verilerinden de anlaşılacağı üzere modellemede dairesel kesitli stud çivisi ile dikdörtgen kesitli stud çivisinin benzer davranışlar gösterdiği anlaşılmıştır.

2.2.2 Lee ve diğ. (2004)

Genel olarak 19 mm'ye kadar stud çivileri için deneyler yapılmışsa da bu çalışmada köprülerde kullanılabilecek geniş çaplı stud çivileri için araştırma yapılmıştır. Testte çelik profilin her başlığında enine ve boyuna yönde ikişer adet toplamda dört adet, tüm numunede ise toplamda sekiz adet stud çivisi olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Modelleme için şekil 2.12'de verilen ölçüler referans alınmıştır. Analizde kullanılan stud çivisi 25 mm çapında, 155 mm yükseklikte ve başlıksız olarak modellenmiştir. Abaqus programında simetri özelliği kullanılarak mevcut

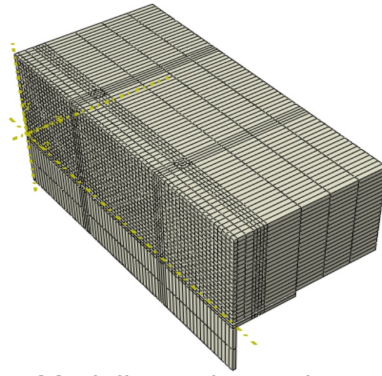
numunenin çeyreği modellenmiştir. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak modellenmesi yapılan örneğin Abaqus programı kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen veriler itme testi yapılmış olan numunenin sonuçları ile karşılaştırılarak kullanılan kalibrasyonun uygunluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 2.12 : İtme testi numune ölçüleri (ölçüler mm cinsinden verilmiştir).

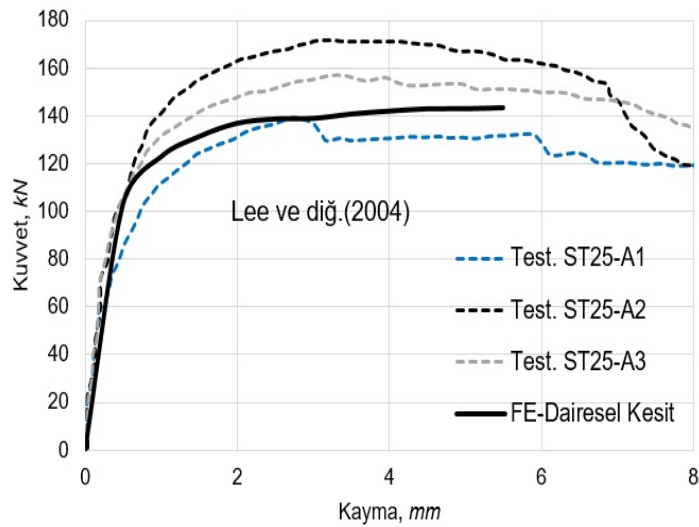
Bu modellemede analiz yöntemi "Dynamic/Explicit olarak tanımlanmıştır. "Explicit" yöntemi zaman kontrol yöntemi olarak kullanılır. Daha çok çarpma, ilerleyen zarar görme, malzeme göçmesi, metal şekillendirme v.b. durumlarda kullanılır. Süreksiz ortam, geniş deformasyon ve temas yüzeyi için güçlü bir çözüm şeması sunmaktadır. "Dinamik/explicit" yöntemi dinamik bir yöntem olsa da yarı dinamik analizler için de kullanılmaktadır. Analiz süresi, kütle ölçeklendirilmesi kullanılarak veya yükleme hızı artırılarak azaltılabilir. Süreksizlik ve temas problemlerinin çözümü için bu yöntem çok etkilidir [29]. Bu yüzden deneyi yapılan itme testinin simülasyonu için en uygun yöntem olarak düşünüldüğünden modelleme davranışının gerçeğe yakın olması için analiz modellemesi "dynamic/explicit" olarak tanımlanmıştır. "Explicit" yöntemde

beton modellemesi Northwestern Üniversitesinden Bazant tarafından geliştirilen Microplane (M7) model [33,34] "subroutine" olarak tanımlanmıştır. Microplane (M7) modelde beton basınç dayanımı 35.3 MPa olan betonun değeri "Fortran" programı kullanılarak "f_cp" tanımlaması olarak girilmiştir. Ayrıca itme testi sonucunda elde edilen stud çivisinin taşıma kapasitesi grafiğinde akma sonrası davranışına en yakın davranış şeklini elde edebilmek için Microplane (M7) modelde k_1, k_2, k_3 ve k_4 değerleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Ayrıca analiz sonucunu önemli derecede etkileyen Abaqus "Mesh" menüsünde modellemeye stud çivisinin etki alanları daha küçük parçalara ayrılacak şekilde uygulama yapılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 : Modellemenin mesh yapılmış hali.

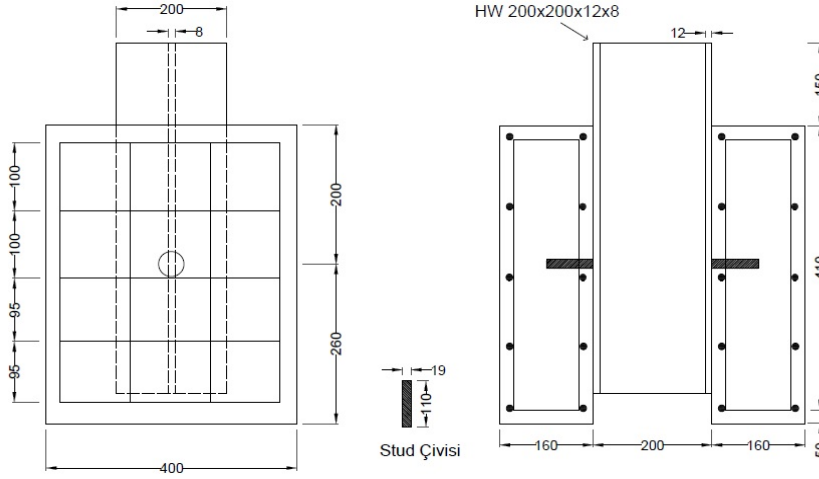
Modelleme analizi sonucunda elde edilen değerler sonuçlar 25 mm çaplı stud çivisi için yapılan üç adet itme testinin sonuçları ile grafiksel olarak karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 : Stud çivisi itme testi ve karşılık gelen sonlu eleman analizi.

2.2.3 Han ve diğ. (2015)

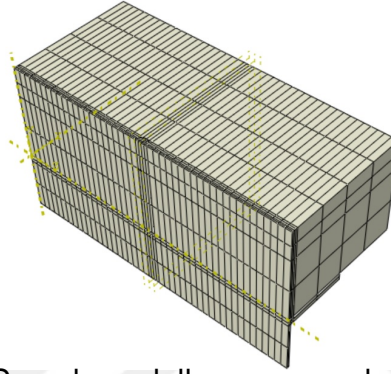
Her başlıkta birer adet olmak üzere toplamda iki adet stud çivisi olma durumu için itme testi numunesi hazırlanmıştır. Stud çivilerinden çapı 16mm, yüksekliği 90 mm ve çapı 19 mm, yüksekliği 110 mm olan iki farklı stud çivisi numunelerde kullanılmıştır. Abaqus sonlu eleman yönteminde deneysel çalışmamızda kullanılacak stud çivisi çaplarından biri 19 mm olduğundan bu stud çivisi baz alınarak modelleme yapılmıştır. İtme testi numune ölçüleri aşağıdaki çizimde gösterilmiştir (Şekil 2.15). Abaqus sonlu elemanlar modellemesinde simetri özelliği ile numune ölçülerinin dörtte biri kadar modelleme yapılmıştır.



Şekil 2.15 : İtme testi numune detayları (ölçüler mm cinsinden verilmiştir).

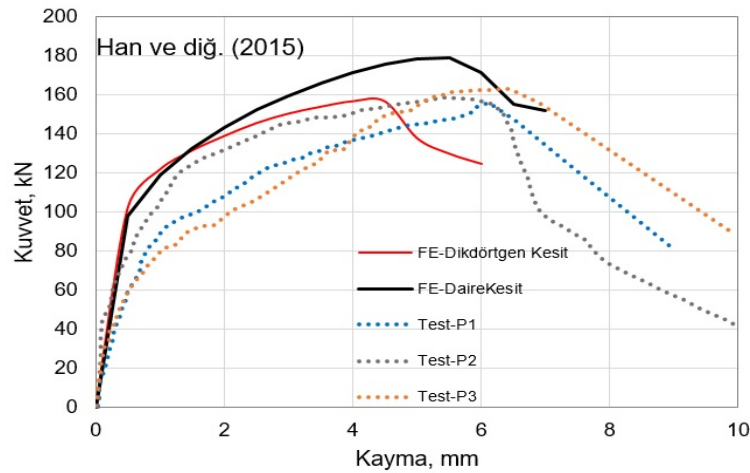
Modellemesi yapılan numune için Abaqus sonlu elemanlar yöntemi için "Dynamic/Explicit" statik analiz yöntemi kullanılmıştır. Explicit yöntemde kompozit numuneyi oluşturan elemanlardan beton döşeme modellemesi için "Property" seçeneğinden Microplane (M7) model "subroutine" olarak tanımlanmıştır. M7 modellemede Fortran datasından f_{cp} değeri itme testi numunesinin değeri olarak girildikten sonra betonun diğer değerleri otomatik olarak program tarafından tanımlanmaktadır. Abaqus programında çelik profil, stud çivisi ve donatı materyallerinin malzeme özellikleri testte kullanılan malzeme özellikleri "Property" seçeneği kullanılarak tanımlanmıştır. Ayrıca analiz için gerekli sınır koşulları

ve simetri özellikleri tanımlanmalıdır. Explicit yöntem zamana bağlı bir yöntem olduğundan uygulanacak yükün tanımlanması zamana bağlı olacaktır. Explicit yöntemde Abaqus programında "Step" menüsünden "Time period" seçeneğinde zaman değeri girildikten sonra bu zaman değerine bağlı kalarak "Amplitude" seçeneği için aynı zaman değerleri girilmelidir. Amplitude tanımlaması yapıldıktan sonra "Boundary Condition Manager" seçeneğinden deplasman olarak tanımlanacak yük değeri amplitude değeri olarak girilmiştir. Analizde stud çivisi ve etki alanı sık bölünecek şekilde "Mesh" yapılmıştır (Şekil 2.16). Analiz boyunca Microplane (M7) modelleme parameterlerinden k_1 , k_2 , k_3 , k_4 değerleri değiştirilerek doğru sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.16 : Çeyrek modelleme ve mesh yapılmış hali.

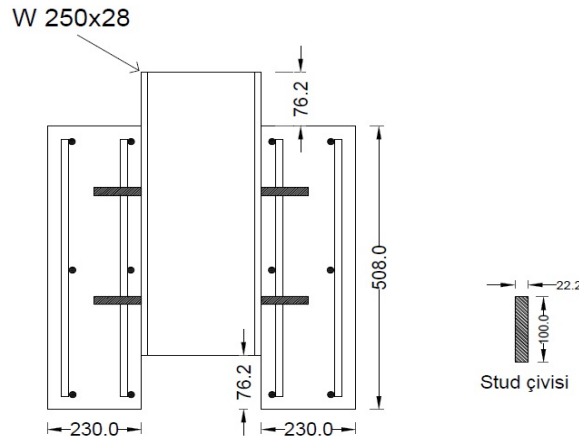
Abaqus programında itme testinde kullanılan 19 mm çaplı stud çivisinin, başlıksız ve kesit alanı ile bir kenarı çap uzunluğuna eşit olacak şekilde dikdörtgen kesitli modelleri de yapılmıştır. Her iki modellemede elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Stud çivisi için yapılan test ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

2.2.4 Liu ve Alkhatib (2013)

Deneysel itme testinde çelik profilde her başlıkta iki toplamda dört adet stud çivisi kullanılmıştır. Stud çivisinin çapı 22.2 mm olarak sabit tutulmuştur. Stud çivisi numuneleri 100 mm, 150 mm, 200 mm boylarında, başlıklı, başlıksız ve ayarlanabilir olarak deneysel çalışmada kullanılmıştır. Çelik sınıfı W 250x28 seçilerek tüm numunelerde beton sınıfı C45 olarak kullanılmıştır. Numunelerde donatı olmama durumu ve donatının farklı aralıklarda olma durumları da deneysel çalışmada araştırılmıştır. İtme testinde kullanılan numune ölçüleri aşağıdaki çizimde gösterilmiştir (Şekil 2.18). Verilen ölçülerdeki numunenin çeyrek modellemesi yapılmıştır.

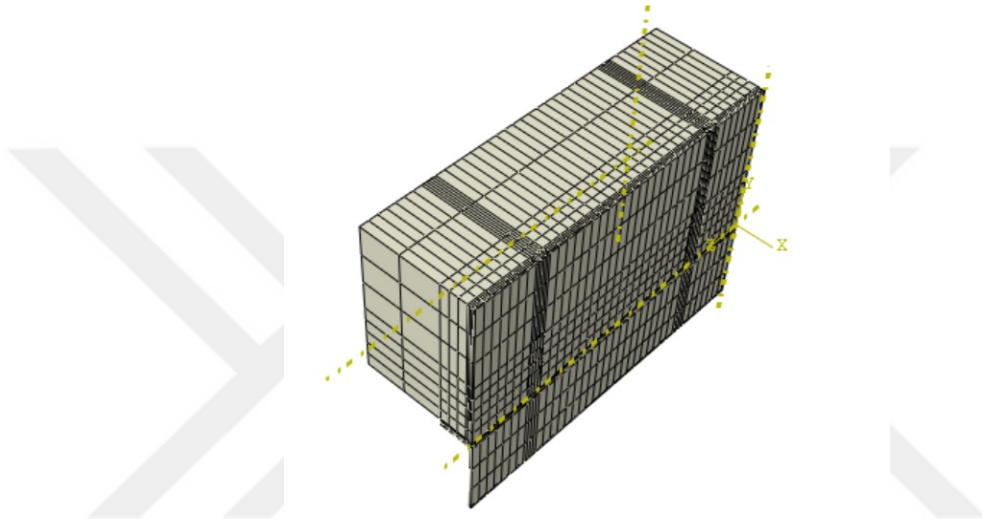


Şekil 2.18 : İtme testi numune ölçüleri (ölçüler mm cinsindendir).

Abaqus sonlu elemanlar yönteminde bu numunelerden 22.2 mm çapında, 100 mm boyunda başlıksız stud çivisi ve donatı olmama durumu için modelleme yapılmıştır. Ayrıca dairesel stud çivisinin kesit alanına eşit olacak şekilde dikdörtgen kesitli stud çivisi de modellenerek davranışları mukayese edilmiştir.

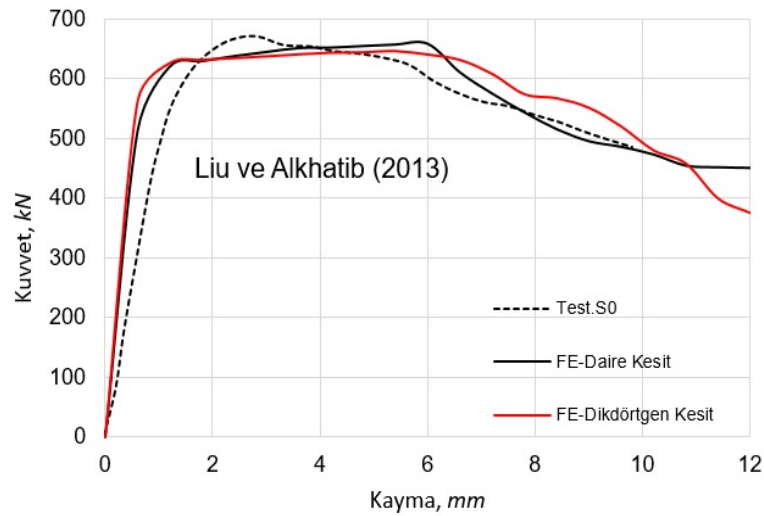
Abaqus sonlu eleman modellemesinde beton döşeme, çelik profil ve stud çivisi modellemeleri yapıldıktan sonra bu elemanlar için verilen malzeme özellikleri (akma değerleri, dayanım değerleri, elastisite modülü) değerleri "Property" seçeneğinde tanımlanarak malzeme ataması yapılmıştır. Analizde "Dynamic/Explicit" yöntemi kullanılacağından beton döşemede malzeme özelliği Microplane (M7) olarak

tanımlanmıştır. Microplane (M7) modellemeye beton basınç dayanımı değeri girilerek k_1 , k_2 , k_3 , k_4 değerleri doğru sonuç elde edilinceye kadar değiştirilmiştir. Tek tek eleman modellemesi yapıldıktan sonra "Assembly" seçeneğinden elemanlar verilen ölçülere uyulacak şekilde birleştirildikten sonra analiz yöntemi "Dynamic/Explicit" olarak tanımlanmıştır. Numuneyi oluşturan elemanların yüzey temas biçimleri "Interaction" seçeneğinden tanımlandıktan sonra "Load" seçeneği ile simetri yüzeyleri, yük ve mesnet tanımları yapılmıştır. İki stud çivisinin çapı kadar mesafede etkileşim alanı olarak düşünülmüş ve bu alanlarda daha sık "Mesh"leme yapılmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : Çeyrek modelleme ve mesh yapılmış hali.

Analiz sonucunda dairesel başlıksız stud çivisi, dikdörtgen kesitli stud çivisi olarak elde edilen yük-kayma grafiği olarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 : Stud çivisi için yapılan test ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

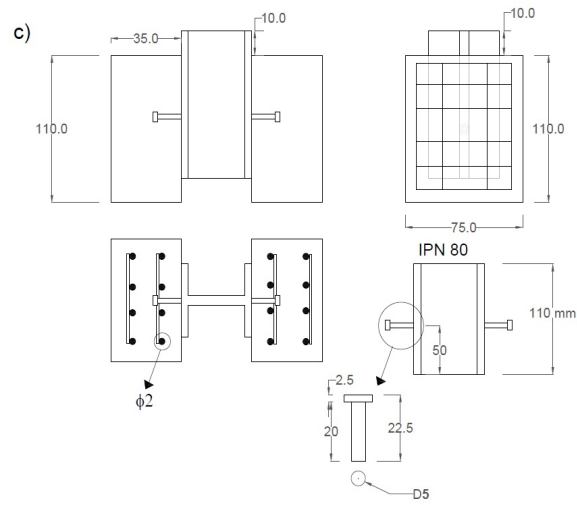
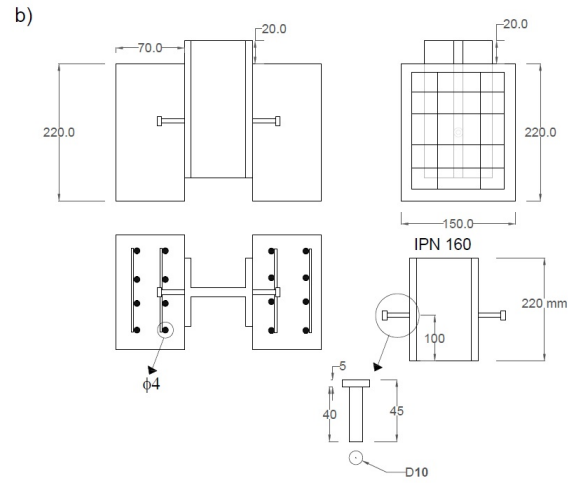
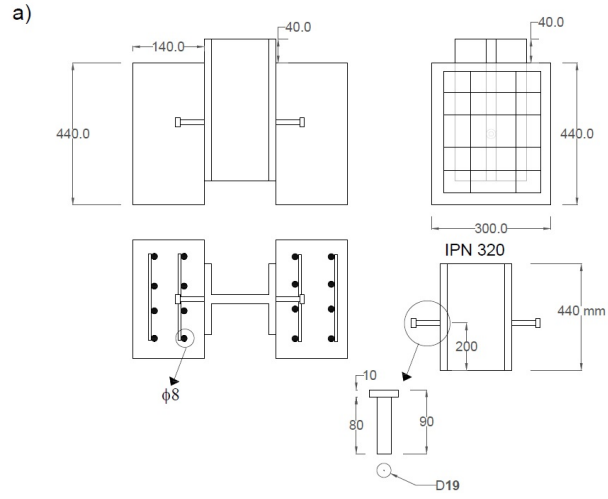


3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı ve Malzeme laboratuvarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önceki araştırmalarda ve genel deneysel kabullerde her bir testten üç adet uygulama yapılmış olduğundan laboratuvarında her bir boy numuneden üçer adet olmak üzere dokuz adet deney numunesi hazırlanmıştır. Deney numunelerine düşey yönde kuvvet uygulanarak itme testi yapılmış olup numunenin bağlı olduğu makinelerin yardımıyla bilgisayardan sonuçlar elde edilmiştir [35]. Deney sonucunda kayma bağlayıcısının maruz kaldığı kuvvet değerleri ve buna bağlı olarak göçme anına kadar olan sürede ortaya çıkan kayma miktarı elde edilmiştir. Ayrıca deney uygulaması sonucunda kompozit yapıda beton döşeme ve kayma (stud) çivisinin davranış şekilleri gözlemlenerek kompozit bileşenlerde boyut etkisi tahkiki yapılmıştır.

3.1 Numune Özellikleri

Deneysel çalışmada kompozit yapılarda kullanılan başlıklı stud çivisinin boyut etkisinde davranış biçimi ve kompozit bileşenlerin gerilme analizi araştırılmıştır. Deneysel çalışma için kayma bağlayıcısı (stud çivisi), ölçekli olacak şekilde üç farklı boyutta seçilmiştir. Boyut etkisinin araştırılmasında deneysel numuneler hazırlanarak numuneyi oluşturan malzemelerin tamamı aynı ölçekte küçültülerek çalışma yapılmıştır. Bu deney numunelerinde büyük boy üç adet deney numunesi PL1, PL2 ve PL3 olarak, büyük boy numunenin 1/2 ölçeklisi olacak şekilde orta boyda üç adet deney numunesi PM1, PM2 ve PM3 olarak ve orta boy numunenin 1/2 ölçeklisi olacak şekilde üç adet PS1, PS2 ve PS3 deney numunesi hazırlanmıştır. Numunelerde çelik profil iki beton döşeme arasında kalacak şekilde çelik profilin her iki başlık tarafına beton döşeme dökülmüştür. Beton döşeme ile çelik profili bir arada tutan ve teze konu olan stud çivileri çelik başlıklara birer adet olacak şekilde kaynaklanmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin ölçüleri detaylı bir şekilde çizilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : a) Deney numuneleri PL1-PL3 boyut ve ölçüleri b) Deney numuneleri PM1-PM3 boyut ve ölçüleri c) Deney numuneleri PS1-PS3 boyut ve ölçüleri (Tüm ölçüler mm cinsinden verilmiştir).

3.2 Malzeme Seçimi ve Numunelerin Hazırlanışı

Bu bölümde beton-çelik kompozit kirişi oluşturan elemanlardan beton döşeme, çelik profil, stud çivisi ve beton donatısının malzeme özellikleri irdelenmiştir. İtme (push-out) testi numunelerini oluşturan elemanlardan beton döşemede kullanılan malzemelerin (DK (doğal kum), KK (kıрма kum), KT1 (kıрма taş) v.b.) agrega granülometrisi ve bunların karışım hale getirilerek hazırlanış süreci, hazırlanma sürecinde dikkat edilen hususlardan söz edilerek numunelerin İTÜ Yapı Laboratuvarında hazırlanarak itme testine hazır hale getirilmesi detayları bu bölümde anlatılmıştır.

3.2.1 Beton

Deneysel çalışmada boyut etkisi ve bileşenlerin gerilme analizi araştırıldığından beton sınıfı tüm numunelerde eşit olacak şekilde beton hazırlanması gerekmektedir. Beton karışımı yapılmadan önce kayma (stud) çivisi başlıklara kaynatılmış olan numunelere beton dökümü yapılabilmesi için gerekli kalıplar hazırlanarak numuneler beton dökümüne hazır hale getirilmişlerdir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Kalıpları hazırlanmış numuneler.

Beton numunesi TS 500'de belirtilen kriterler göz önünde tutularak hazırlanmıştır. Beton hazırlanması sürecinde agreganın en büyük dane boyutu, kalıp genişliğinin 1/5'inden, döşeme kalınlığının 1/3'ünden, iki donatı arasındaki mesafenin 3/4'ünden ve beton örtüsünden büyük olamayacağından yapılan hesaplamalar sonucunda dane boyu maksimum 7 mm olacak şekilde KT1(Kıрма Taş) agregaları elekten geçirilerek malzemeler hazırlanmıştır. Agreganın en büyük dane boyutu seçildikten sonra deneyde kullanılacak betonun basınç dayanımı 45-55 MPa arası dayanım olması istenmiş olup

bu doğrultuda betonu oluşturan agregaların, su/çimento oranının, su miktarının ve hava miktarının değerleri TS 802 'ye uygun olacak şekilde seçilerek malzemelerin karışım oranları düzenlenmiştir.

Karışım oranları hesaplanan malzemelerin granülometrisinin çıkarılması için deney çalışmalarında istenilen beton dayanımlarının elde edilebilmesi için gerekli agrega hesabı yapılmış ve granülometri eğrisinin çizilmesi için 2000 gr numune elek analizine tabi tutulmuştur (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Granülometri tablosu.

Elek Çapı (mm)	Doğal Kum (DK)		Kırma Kum (KK)		Kırma Taş1 (KT1)	
	Toplam Kalan (gr)	Elekte Kalan (gr)	Toplam Kalan (gr)	Elekte Kalan (gr)	Toplam Kalan (gr)	Elekte Kalan (gr)
Numune Ağırlığı (gr)	2000		2000		2000	
8	0	0	0	0	0	0
4	5.6	5.6	131.7	131.7	1551.6	1551.6
2	62.7	57.1	934.1	802.4	1789.4	237.8
1	777.0	714.3	1373.6	439.5	1838.8	49.4
0.5	1365.4	588.4	1636.5	262.9	1866.7	27.9
0.25	1940.6	575.2	1829.6	193.1	1937.1	70.4
Arta Kalan	59.4	59.4	170.4	170.4	62.9	62.9
Kümülatif Ağırlık	2000.0		2000.0		2000.0	

Elek analizi sonucunda elde edilen değerler doğrultusunda yüzdelik hesabı yapılarak karışım için gerekli olan oranlar yüzdelik olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 : Granülometri yüzdelik oranları.

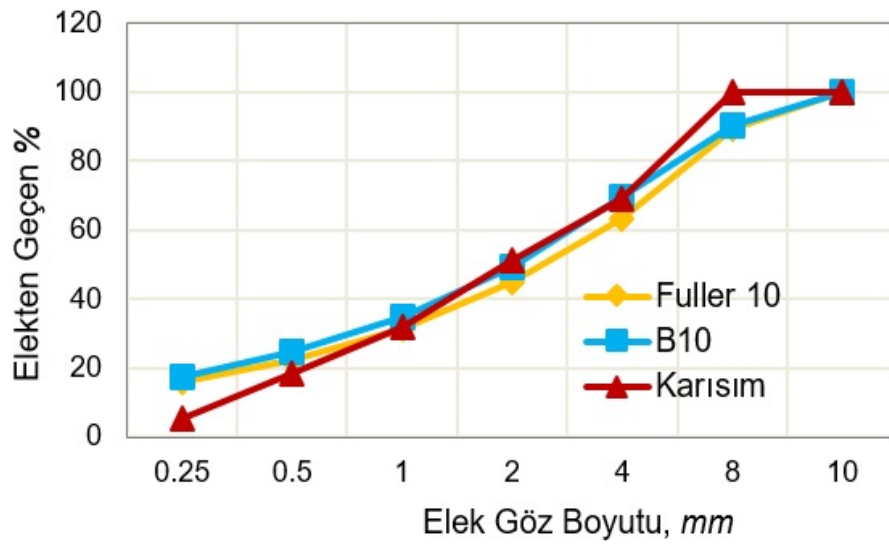
Elek Çapı (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)					
	Fuller 10	B10	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırma Taş1	Karışım
8	89.4	90	100	100	100	100
4	63.2	69.6	100	93	22	69
2	44.7	49.2	98	53	11	51
1	31.6	34.8	62	31	8	32
0.5	22.4	24.6	33	18	7	18
0.25	15.8	17.4	4	9	3	5
Agrega Karışım Oranları (%)			0.3	0.33	0.37	

Bu doğrultuda granülometri analizi yapıldıktan sonra yapılan hesaplamalar sonucu beton hazırlanmasında kullanılması gereken malzeme miktarları çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda Su/Çimento oranı (W/C)=0.53 olarak uygulanmıştır.

Çizelge 3.3 : Beton karışımında kullanılan malzemeler.

Malzeme	kg/m ³	dm ³	Miktarı (kg)
Doğal Kum (DK)	542	206	146
Kırma Kum (KK)	624	227	168
Kırma Taş (KT1)	692	254	187
Akışkanlaştırıcı	5.1	5	1.54
Çimento	340	108	91.8
Su		49	

Elek analizi sonucunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda yüzdelik oranlar hesaplandıktan sonra granülometri eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.3).



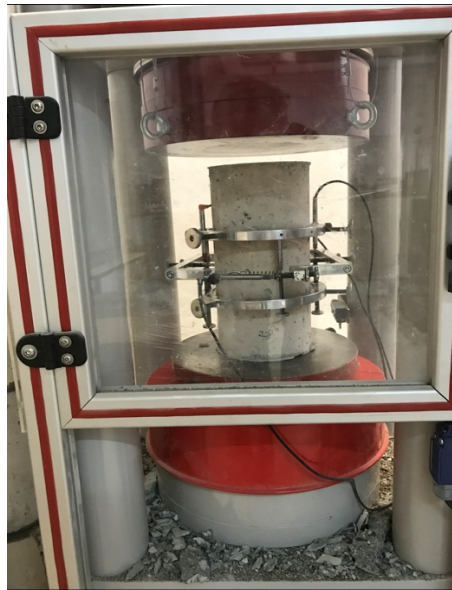
Şekil 3.3 : Granülometri grafiği.

Agrega granülometri hesaplamaları yapılarak ortaya çıkan betonu oluşturan kum, çimento, agreg a ve akışkanlaştırıcı madde hesaplanan miktarları doğrultusunda hazırlanarak İTÜ Yapı Laboratuvarında karışım oluşturularak yerinde döküm yapılarak beton hazır hale getirilmiştir. Beton dökümü yapılmadan önce çelik profillerin stud çivisi kaynatılmış başlıklarının beton ile temas edeceği yüzeyler sürtünmeyi en aza indirmek için gres yağı ile yağlama işlemi yapıldıktan sonra beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).



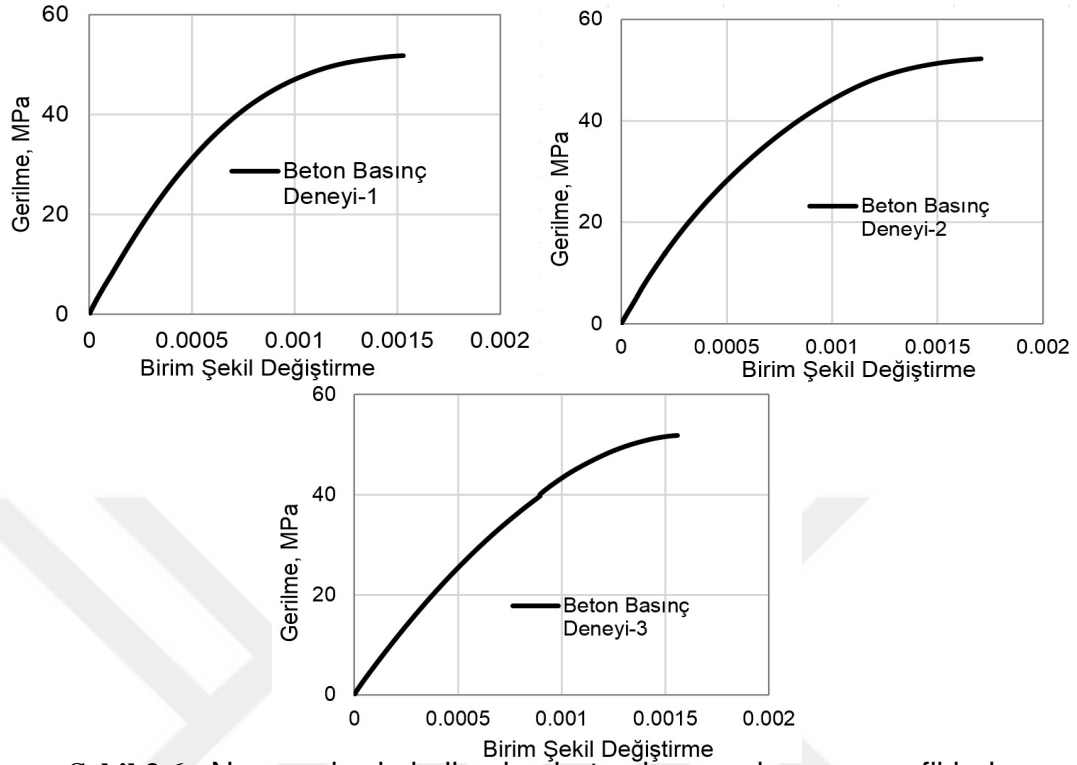
Şekil 3.4 : Numunelere beton dökülmesi.

Beton hazırlandıktan sonra dokuz adet numune için hazırlanmış olan kalıplara beton dökülmüş ve numuneler ilk prizlerini aldıktan sonra kalıplarından çıkartılmıştır. Kalıplarından çıkarılmış olan numuneler priz süresini tamamlaması için kür havuzunda 28 gün boyunca bekletilmiştir. Priz süresini tamamlayan numuneler ile birlikte üç adet silindirik beton numune gerilme-birim şekil değiştirme analizi için basınç deneyine tabi tutulmuşlardır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Silindirik beton basınç testi.

Basınç deneyi tamamlanan üç adet beton silindirik numunenin dayanım değerleri sonucunda gerilme (MPa)- birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Numunelerde kullanılan beton basınç dayanım grafikleri.

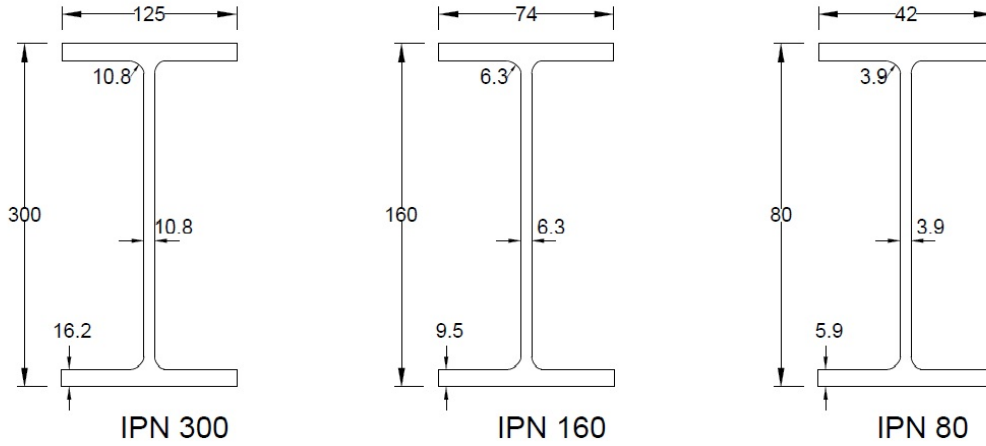
Beton basınç dayanım testi yapıldıktan sonra üç numuneye ait değerler Çizelge 3.4’te gösterilmiştir. Bu değerlerden basınç dayanımı ve elastisite modülünün ortalama değerleri alınarak sayısal modellemeye kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 : Beton basınç dayanım testi sonucu elde edilen değerler.

Numune Kodu	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)
A1	37.60	0.189	915.33	51.80
A2	37.69	0.215	918.98	52.20
A3	37.72	0.203	915.50	51.80
Ort.	37.67	0.202	916.60	51.93

3.2.2 Çelik profil

Kompozit yapıların ana elemanlarından olan çelik profiller kuvvet-kayma analizinde önemli bir yer tutmaktadır. Deneysel çalışmada uygulanacak itme testinde yükleme yüzeyi olarak kullanılacaktır. Çelik profil stud çivisinin kaynatılacağı yüzeye sahip olduğundan oldukça öneme sahiptir. Deney amacına uygun olarak çelik profiller ölçülendirmeye uygun olacak şekilde IPN 300, IPN 160 ve IPN 80 seçilmiştir.



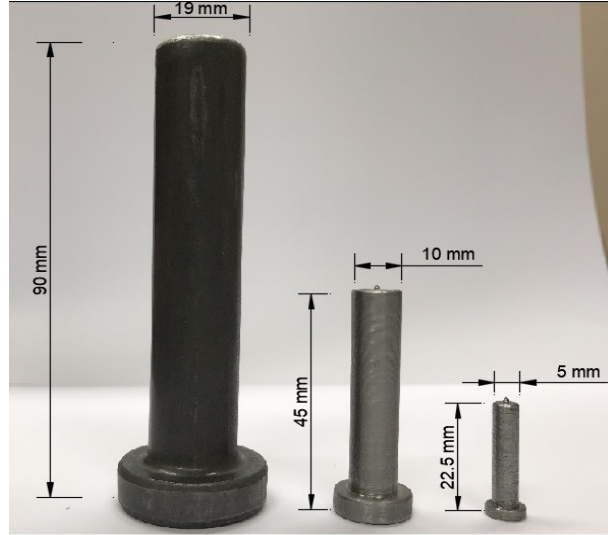
Şekil 3.7 : Deneyde kullanılan IPN 300, IPN 160, IPN 80 çelik profiller ve ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir).

Her bir çelik profil numunesinden üçer adet kullanılmıştır. Çelik profillerin f_y akma dayanımı 250 MPa, çekme dayanımı ise f_u ise 400-550 MPa'dır. Bütün çelik profillerin elastisite modülü $E_s=200$ GPa'dır. Deneyisel çalışmada kullanılan çelik profiller ile profillerin kesit görünüşleri ve ölçülendirilmesi detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.7).

3.2.3 Stud çivisi

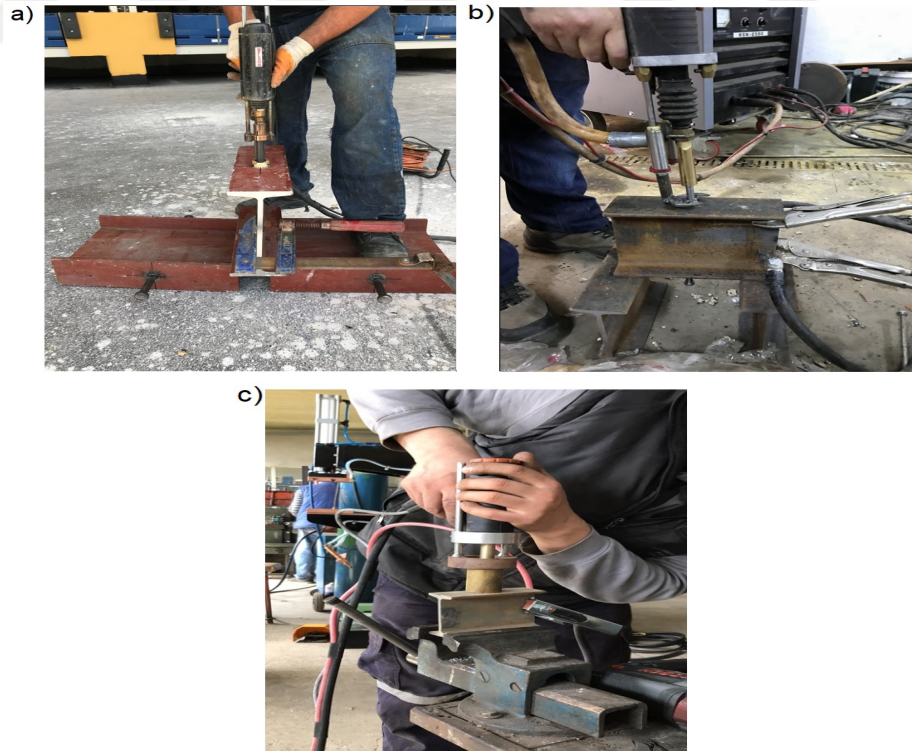
Tezin esas konusunu oluşturan kayma bağlayıcısı olan başlıklı stud çivisinin boyut etkisindeki davranışını araştırmak için uygulamalarda en çok kullanılan standart ölçülerdeki $d=19$ mm çapında ve $h_d=90$ mm yüksekliğindeki stud çivisi seçilmiştir. Boyut etkisinin araştırılması için $d=10$ mm çapında ve $h_d=45$ mm yüksekliğinde, $d=5$ mm çapında ve $h_d=22.5$ mm yüksekliğinde stud çivileri hazırlanmıştır (Şekil 3.8).

Stud çivileri hazırlandıktan sonra kompozit numunenin hazırlanabilmesi için stud çivilerinin Şekil 3.1'de gösterildiği ölçülerde çelik profil başlıklarına kaynatılması



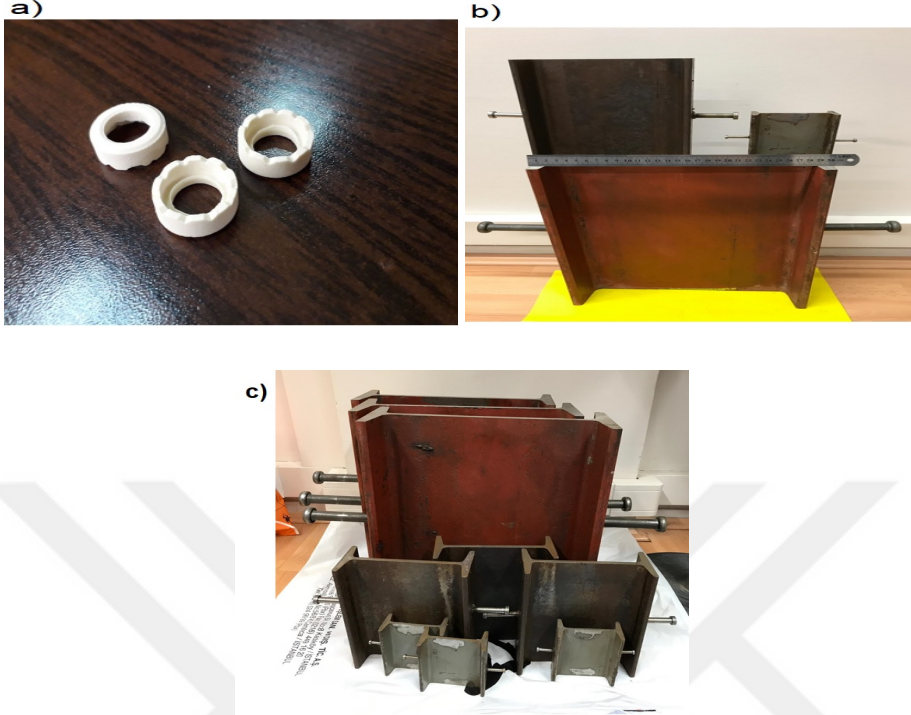
Şekil 3.8 : Deneyde kullanılacak stud çivileri.

gerekmektedir. Stud çivilerinin kaynatılabilmesi için özel bir kaynak tabancası kullanılmaktadır. Bu tabanca elektrik arkını stud üzerinden aktararak stud çivisinin profile temas ettiği noktada erimeye maruz kalarak kaynama işleminin yapılmasını sağlamaktadır. Büyük boy, orta boy ve küçük boy stud çivilerinin ark tabancası ile çelik profillere kaynatılma işlemleri Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



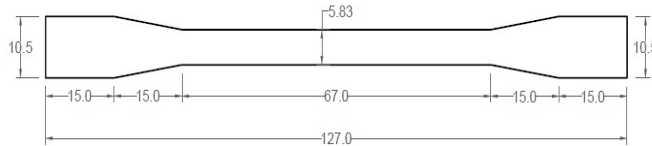
Şekil 3.9 : a) Büyük boy stud çivisinin kaynatılma işlemi b)Orta boy stud çivisinin kaynatılma işlemi c)Küçük boy stud çivisinin kaynatılma işlemi.

Bu işlem esnasında kaynağın düzgün yapılabilmesi ve birleşim alanı dışına taşmaması için seramik yüzük kullanılması önem teşkil etmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : a)Seramik yüzük b)Çelik profillere kaynatılmış stud çivileri c)Stud çivileri kaynatılmış tüm numuneler.

Ayrıca çalışması yapılacak olan sonlu eleman modellemesi (FEM) ve sayısal doğrulamasında kullanılabilmesi için stud çivisinin akma dayanım ve çekme dayanım kapasitesi ve kuvvet-birim şekil değiştirme davranışını gösteren grafiğin ortaya çıkarılması gerekmektedir. Bunun için öncelikle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çekme testinin yapılabilmesi için mevcut 19 mm çapında, 127 mm boyundaki stud çivisi torna işlemine tabi tutularak Şekil 3.11’de gösterildiği gibi ölçülendirilmiştir.



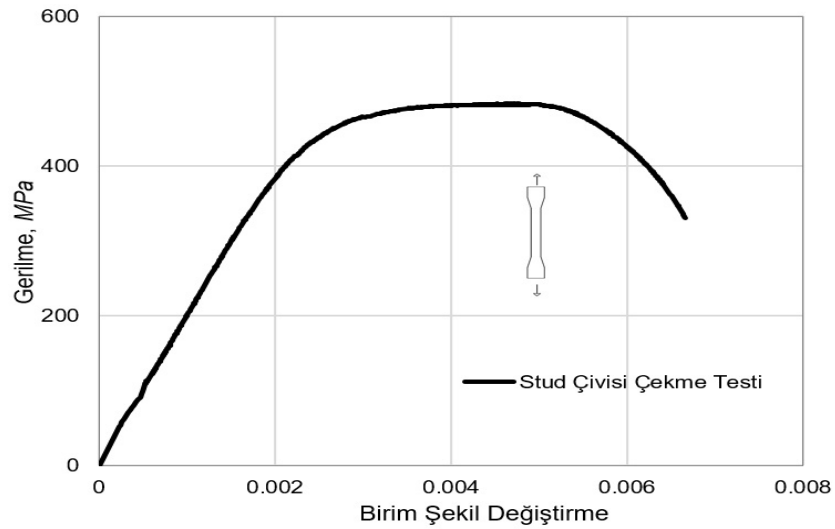
Şekil 3.11 : Stud çivisinin torna için girilen ölçüleri (ölçüler mm cinsindendir).

Stud çivisinin orta açıklığı çekme testinde yüksek kuvvete gereksinim duyulmaması için 5.83 mm olacak şekilde torna işlemine tabi tutularak çekme testi için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : Stud çivisinin torna işlemi.

Torna işlemi tamamlandıktan sonra çekme testi makinesi ile stud çivisi çekme testleri yapılarak, stud çivisinin gerilme (MPa)-Birim şekil değiştirme grafiği elde edilmiş ve elde edilen sonuçlarla stud çivisi akma dayanım kapasitesi bulunmuştur. Yapılan çekme testi sonucunda çekme gerilmesi 484 MPa, elastisite modülü ise $E_s=186$ GPa olarak hesaplanmıştır (Şekil3.13).



Şekil 3.13 : Stud çivisi gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

3.2.4 Donatı

Beton döşemede çatlak oluşmasını engelleyen donatılar deneysel numunede boyut etkisinin araştırılabilmesi için diğer elemanlarda olduğu gibi orantısal olarak küçültülerek kullanılmıştır. PL1-PL3 numunelerinde $\phi 8$, PM1-PM3 numunelerinde $\phi 4$, PS1-PS3 numunelerinde ise $\phi 2$ nervürlü paslanmaz çelik donatı kullanılmıştır. PM1-PM3 ve PS1-PS3 numuneleri için kullanılacak olan $\phi 4$ ve $\phi 2$ donatıları için nervürlü numune bulunamayacağından dolayı nervürlü donatılar tercih edilmiştir. Deneyde kullanılan donatılar Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Deneyde kullanılan donatılar.

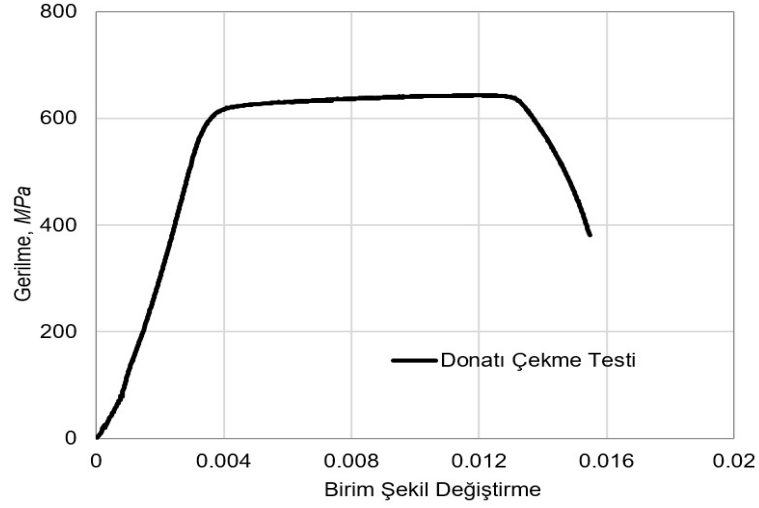
Ayrıca Çizelge 3.5'te her bir numune için kullanılan donatı miktarı ve donatı boyları ayrı ayrı belirtilmiştir.

Çizelge 3.5 : Donatı miktarı.

Numuneler	Çap (mm)	Boy (mm)	Adet	Toplam Boy (m)
PL1-PL3	8	400	48	19.2
	8	260	60	15.6
PM1-PM3	4	200	48	9.6
	4	130	60	7.8
PS1-PS3	2	100	48	4.8
	2	65	60	3.9

Nervürlü donatıların çekme dayanımını bulabilmek için laboratuvarında bulunan çelik çekme makinesi ile çelik çekme dayanımı testi yapılmıştır. Yapılan çekme deneyi sonucunda gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme grafiği elde edilerek çekme dayanımı hesaplanmıştır (Şekil 3.15).

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinden donatı çekme dayanımı 644 MPa, elastisite modülü ise $E_s=200$ GPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15 : Donatı gerilme (MPa)-birim şekil değişirme grafiği.

Beton içerisine yerleştirilecek olan donatılar boyuna doğrultuda dört adet, enine doğrultuda beş adet olacak şekilde beton donatıları hazırlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Deney için hazırlanan beton donatıları.

Hazırlanan beton donatıları her döşemede altta ve üstte birer adet olacak şekilde ikişer adet olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Beton donatılarının kalıpta yerleştirilmesi.

3.3 Deneyin Uygulanışı

Deneyisel çalışma için hazırlanacak kompozit yapının malzeme seçimi tamamlandıktan sonra büyük, orta ve küçük boy olmak üzere her boyut için üç adet toplamda dokuz adet deney numunesi hazırlanması gerektiği belirtilmişti. Bu numuneler bölüm 3.1’de anlatıldığı şekilde stud çivisi kaynatılmış çelik profiller ve hasır donatılar kalıplara yerleştirildikten sonra beton döküm işlemi gerçekleştirilmiş ve beton priz süresini alması için 28 gün süre ile kür havuzunda bekletilmiştir. Priz alma süresi tamamlandıktan sonra hazır hale getirilmiş numuneler kür havuzundan çıkarılmıştır (Şekil 3.18).

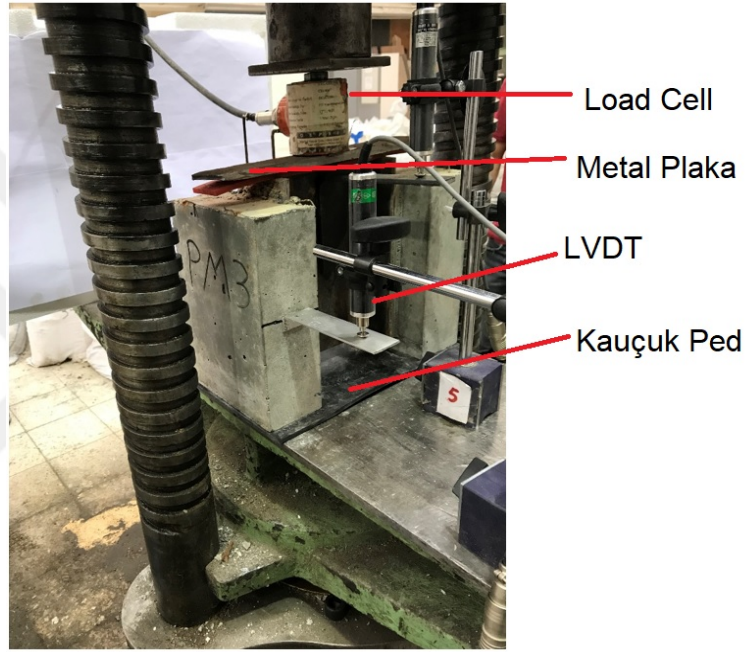


Şekil 3.18 : Deney için hazırlanan numuneler.

Hazır hale getirilmiş numuneler itme (push-out) testi için testi uygulayacak makineye yerleştirilmiştir. İtme testi iki beton döşeme arasındaki çelik profilin gövde kısmına hidrolik itici ile düşey yönlü kuvvet uygulanması şeklinde olmuştur. İtme testinde elde edilecek sonuçları data şeklinde alınabilmesi için dizüstü bilgisayara bağlanmış Data Logger kullanılmıştır.

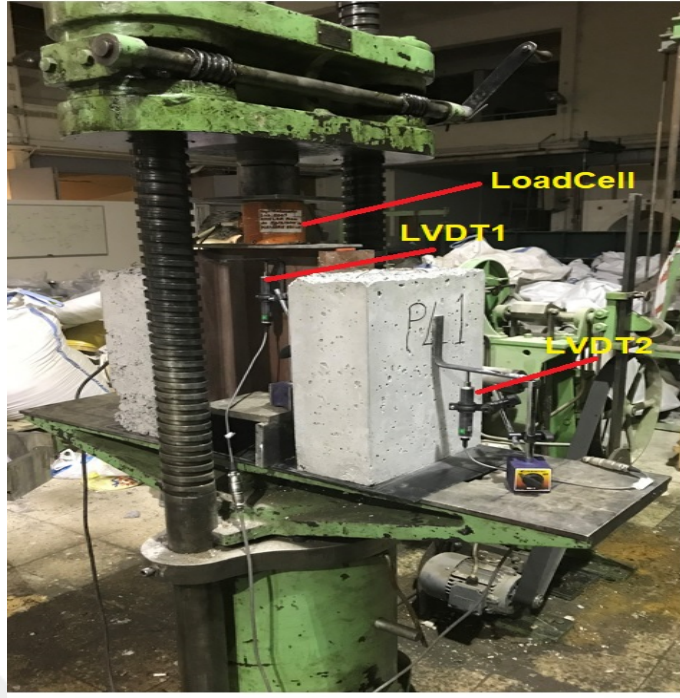
Numunelere uygulanan kuvvetin değerini elde edebilmemiz için Data Logger’a bağlı LoadCell kullanılmıştır. Numunelerde meydana kayma değerlerini de ölçebilmek için Data Logger’a iki adet LVDT bağlanmıştır. Data Logger’a bağlı LoadCell ve LVDT’ler sayesinde göçme oluşuncaya kadar geçen sürede meydana gelen kuvvet (kN)-kayma (mm) değerleri ölçülmüştür.

Deney numuneleri yükleme için hazırlanırken numunenin mesnet kısmını oluşturan beton numunenin alt kısmının yüzey ile temas ettiği alana yükleme anında numunenin hareket etmesini engellemek ve düz bir zemine oturtulması için kauçuk ped yerleştirilerek numune bu düzeneğin üstüne oturtulmuştur. Ayrıca yüklemenin uygulanacağı çelik profilin gövde kısmına yükün düzgün yayılı yük olarak aktarılabilmesi için dikdörtgen kesitli metal plaka yerleştirilmiş ve bu plakanın üzerine 50 tonluk load cell yerleştirilmiştir. Yükleme yapılırken yükleme hızı dakikada yaklaşık 0.35 mm olacak şekilde ayarlanarak itme testi uygulanmıştır (Şekil 3.19).

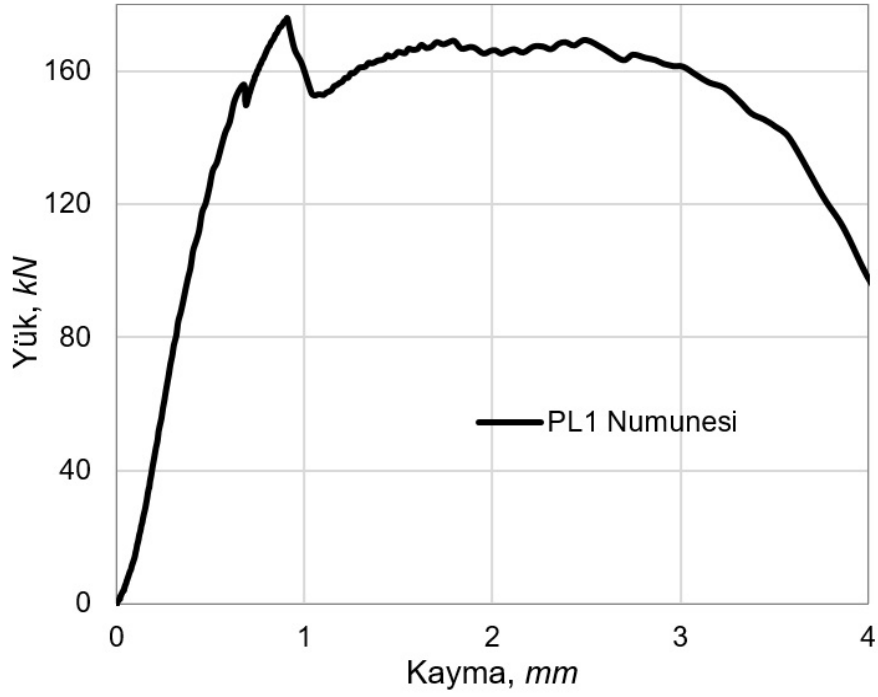


Şekil 3.19 : Deney düzeneği.

Boyut etkisi ve kompozit kiriş bileşenlerinin gerilme analizinin deneysel araştırılmasında kullanılan numunelerden en büyük boy numune olan PL1, PL2 ve PL3 numunelerine ilişkin deneyler tanımlandığı şekilde uygulanmıştır. PL1 numunesi için deney düzeneği Şekil 3.20’de gösterildiği şekilde oluşturulmuş ve deney sonucunda elde edilen kuvvet (kN), kayma (mm) grafikleri Şekil 3.21’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.20 : PL1 numunesi itme testi.

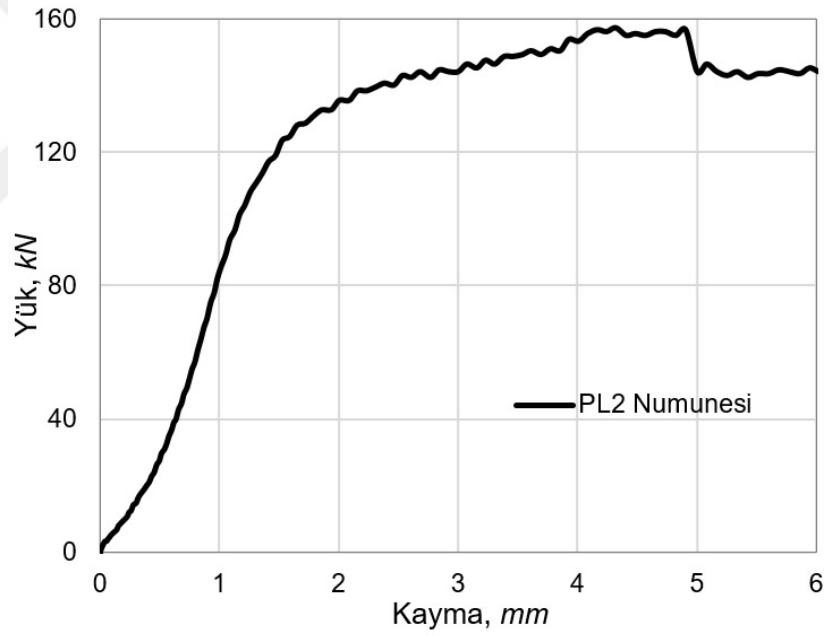


Şekil 3.21 : PL1 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

PL2 deney numunesi için de gerekli düzenek Şekil 3.22’de gösterildiği gibi kurulduktan sonra uygulama yapılmış ve kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.22 : PL2 numunesi itme testi.

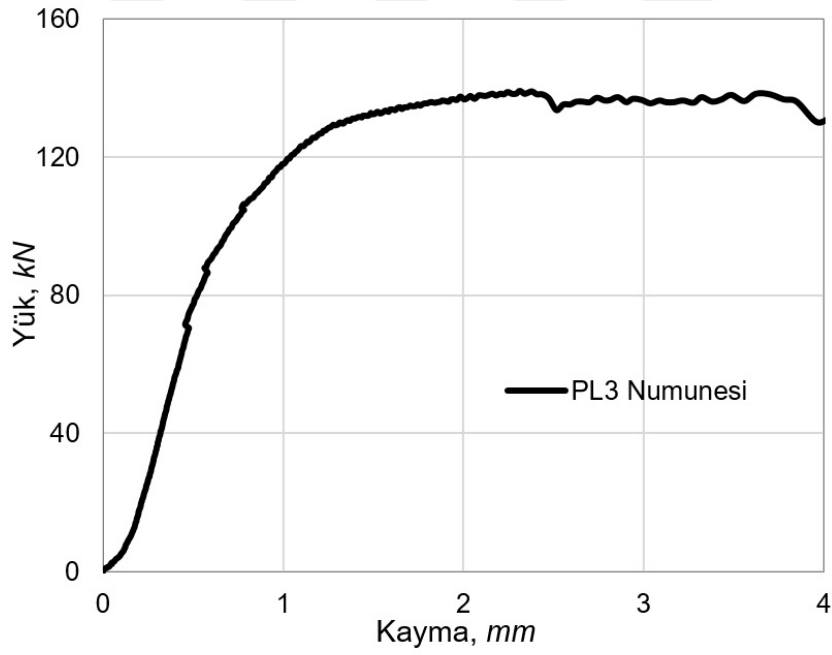


Şekil 3.23 : PL2 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

Büyük boy numunelerin sonuncusu olan PL3 numunesi içinde gerekli düzenek Şekil 3.24'te gösterildiği gibi tamamlandıktan sonra itme testi uygulanarak, kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3.25).



Şekil 3.24 : PL3 numunesi itme testi.

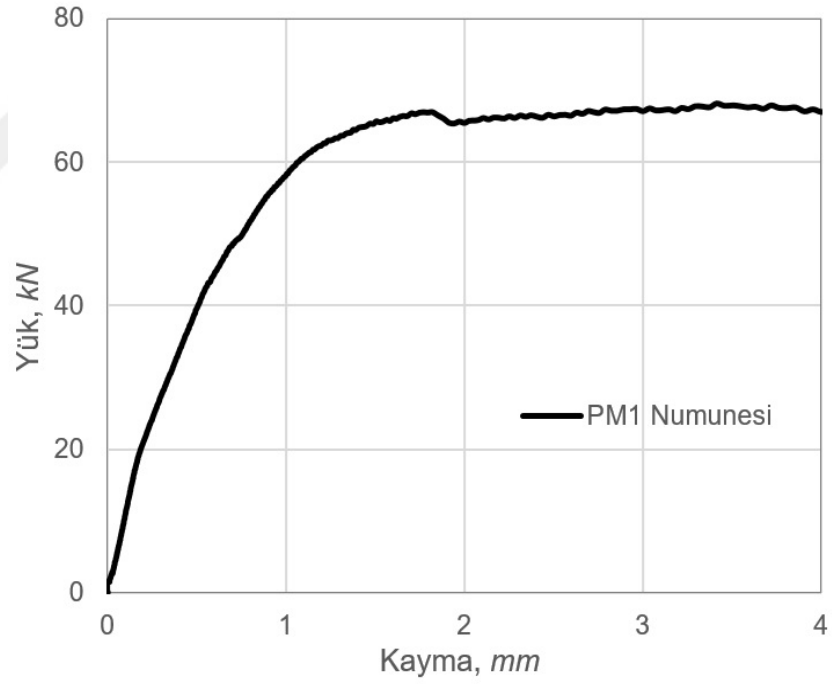


Şekil 3.25 : PL3 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

Orta boy numunelerden PM1 numunesi için yükleme düzeneği Şekil 3.26’da gösterildiği gibi oluşturulmuş ve kuvvet (kN), kayma (mm) grafiği çizilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.26 : PM1 numunesi itme testi.

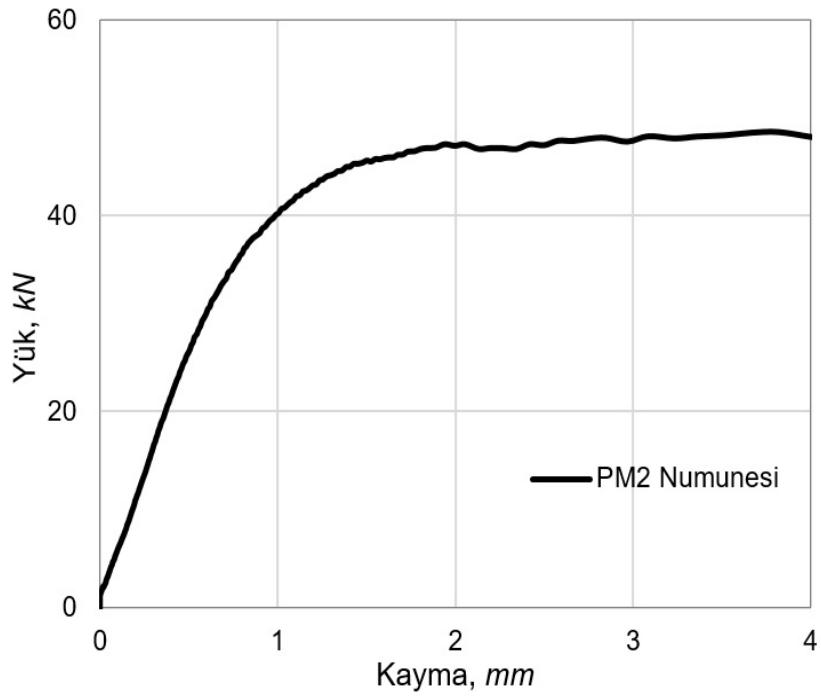


Şekil 3.27 : PM1 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

PM2 numunesi için deney düzeneği Şekil 3.28’de gösterildiği gibi oluşturulmuş ve deney sonucunda kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği hesaplanarak gösterilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.28 : PM2 numunesi itme testi.

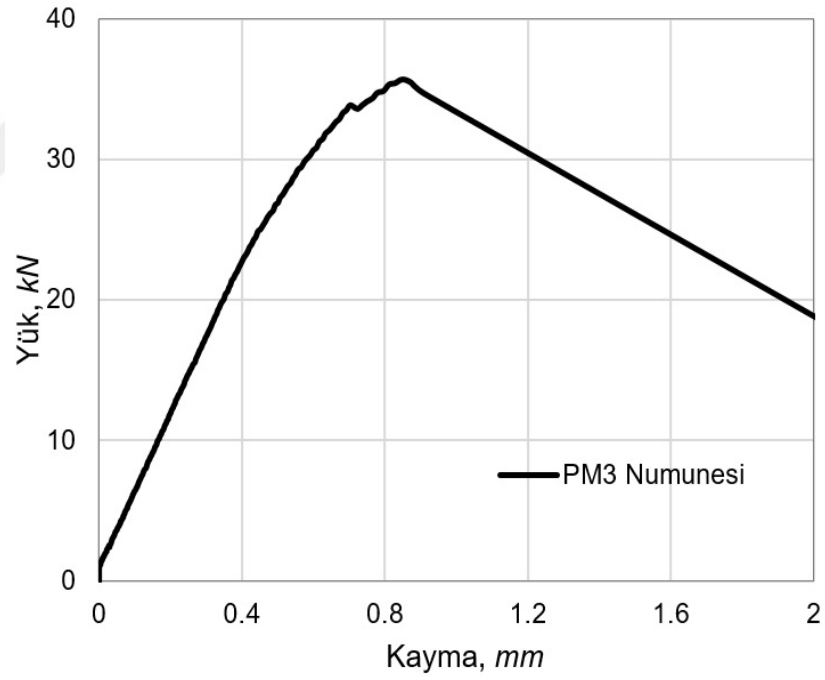


Şekil 3.29 : PM2 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

PM3 deney numunesi ait deney ortamı Şekil 3.30'da gösterildiği gibi oluşturulduktan sonra kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği çizilmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.30 : PM3 numunesi itme testi.

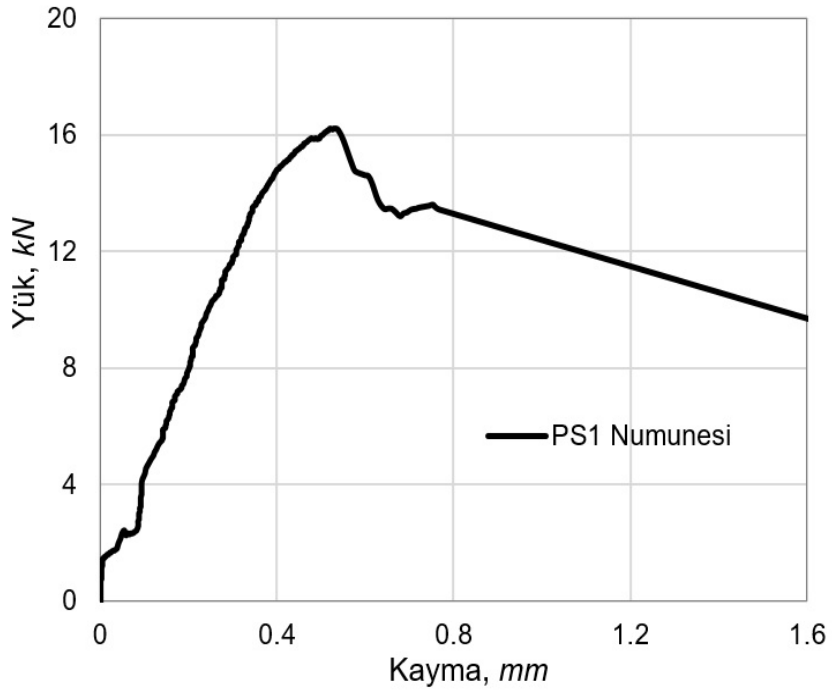


Şekil 3.31 : PM3 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

Boyut etkisi çalışmamızın en küçük boy numunelerinden PS1 numunesi yükleme için düzenek Şekil 3.32'deki gibi kurulduktan sonra uygulama yapılmış, uygulama sonrasında kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.33)



Şekil 3.32 : PS1 numunesi itme testi.

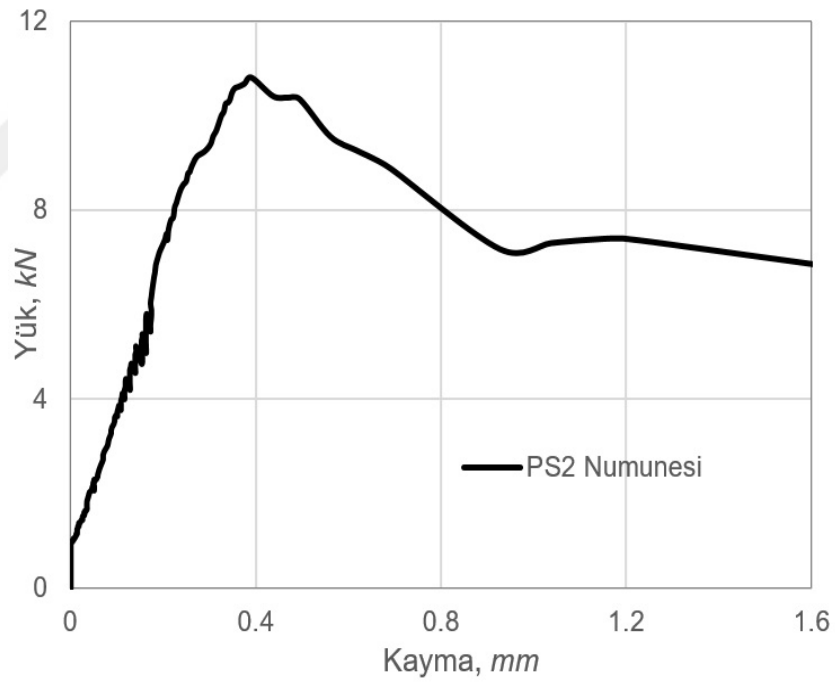


Şekil 3.33 : PS1 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

PS2 numunesinin analizi için yükleme düzeneği Şekil 3.34'te gösterildiği gibi oluşturularak kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.34 : PS2 numunesi itme testi.

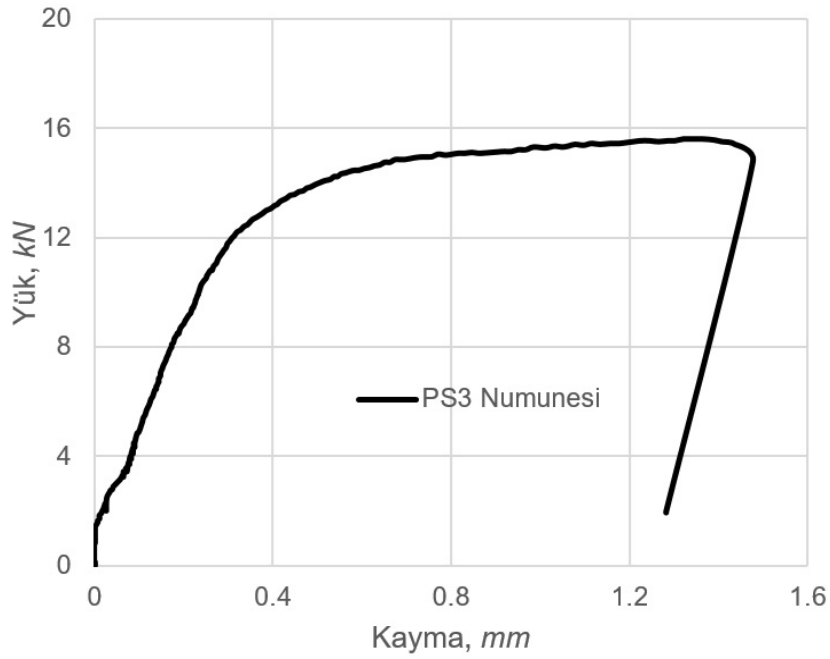


Şekil 3.35 : PS2 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

Deneysel çalışmanın son numunesi olan PS3 numunesine yükleme yapılabilmesi için yükleme düzeneği Şekil 3.36'daki gibi oluşturulmuş ve yapılan yükleme sonucunda LVDT ve Loadcell aracılığıyla DataLogger'dan elde edilen veriler aracılığıyla kuvvet (kN)-kayma (mm) grafiği elde edilmiştir. (Şekil 3.37).



Şekil 3.36 : PS3 numunesi itme testi.



Şekil 3.37 : PS3 numunesi kuvvet-kayma grafiği.

Deneyssel çalışma tamamlanarak tüm numuneler için kuvvet-kayma grafikleri elde edildikten sonra elde edilen deney verileri doğrultusunda her bir numune için maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen kayma miktarı ile ortalama maksimum yükler çizelge olarak gösterilmiştir (Çizelge 3.6).

Deney sonucunda numunelere ait ortalama maksimum yük hesaplandıktan sonra stud çivisine ilişkin boyut etkisi grafiğinde karşılaştırılmak üzere stud çivilerine ait basınç

Çizelge 3.6 : Deney sonucunda elde edilen maksimum yük ve kayma değerleri.

Numune Adı	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Kayma (mm)	Ortalama Maksimum Yük (P_{max}) (kN)
PL1	175.98	0.90	157.59
PL2	157.60	4.31	
PL3	139.21	2.31	
PM1	68.16	3.41	50.77
PM2	48.51	3.81	
PM3	35.65	0.84	
PS1	16.22	0.52	14.20
PS2	10.79	0.39	
PS3	15.60	1.36	

gerilmesi σ_b (N/mm^2) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Stud çivilerine ait basınç gerilmesi değeri;

$$\sigma_b = \frac{P_{max}}{h_d d} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'den elde edilir. Burada h_d stud çivisinin yüksekliğini (mm), d stud çivisi çapını (mm) ifade etmektedir. Deneyde kullanılan PL1, PL2, PL3 numuneleri için $h_d=90$ mm ve d= 19 mm stud çivileri kullanıldığından büyük boy numune için Denklem 3.2 uygulanır.

$$\sigma_b = \frac{157.59}{90 \times 19} \times 1000 = 92.16 \text{ N/mm}^2 \quad (3.2)$$

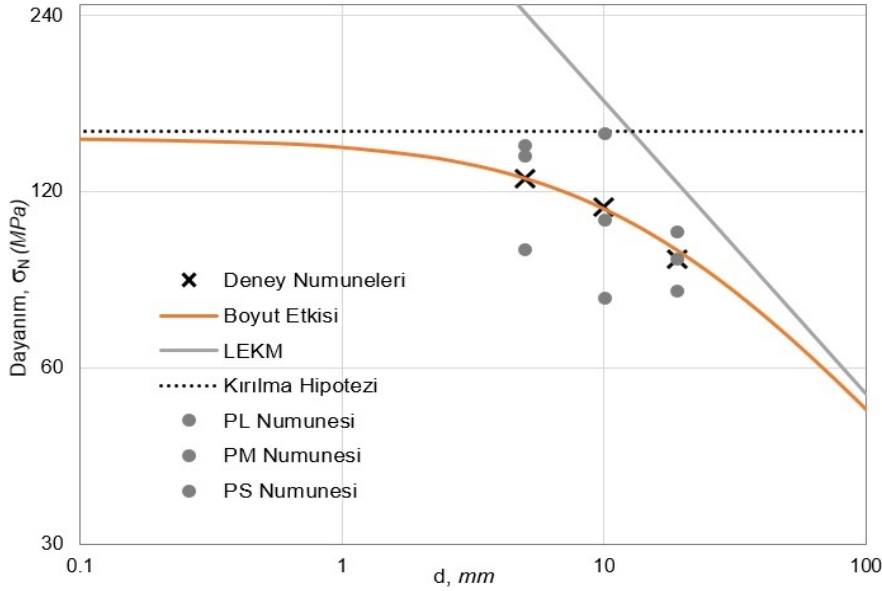
Orta boy numunelerde PM1, PM2, PM3 için $h_d=45$ mm ve d= 10 mm stud çivileri kullanıldığından orta boy numunede ortalama basınç gerilmesi Denklem 3.3'ten elde edilir.

$$\sigma_b = \frac{50.77}{45 \times 10} \times 1000 = 112.84 \text{ N/mm}^2 \quad (3.3)$$

Küçük boy numunelerde ise PS1, PS2, PS3 için $h_d=22.5$ mm ve d= 5 mm stud çivileri kullanılmış olup bu değerler doğrultusunda ortalama basınç gerilmesi Denklem 3.4'ten,

$$\sigma_b = \frac{14.20}{22.5 \times 5} \times 1000 = 126.28 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4)$$

olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen değerler ve bu tezde araştırma konularından biri olan boyut etkisi ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda yapılan regresyon analizi, boyut etkisi formülü (Denklem 1.22), Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) formülü (Denklem 1.23) ve yukarıda hesaplanan her numune türü için elde edilen basınç gerilmesi dayanımı ile elde edilen Bazant'ın boyut etkisi kanununa göre çizilmiş boyut etkisi grafiği aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 : Deney sonuçları ve boyut etkisi.

Grafikte gösterilen yuvarlak noktalar her boy için ayrı ayrı elde edilen deneysel dataları, çarpı işaretli (x) ile gösterilen deney numunelerinin her boyu için ortalama nominal dayanım değerleri, turuncu çizgi boyut etkisi kanununu, diyagonal gri çizgi lineer elastik kırılma mekaniğinden kaynaklanan boyut etkisi eğimi, düz kesikli çizgi ise kırılma hipotezinden kaynaklanan dayanım değerlerini ifade etmektedir. Elde edilen grafikten anlaşılacağı üzere deney numuneleri için boyut etkisinin geçerli olduğu ortaya çıkarılmıştır.

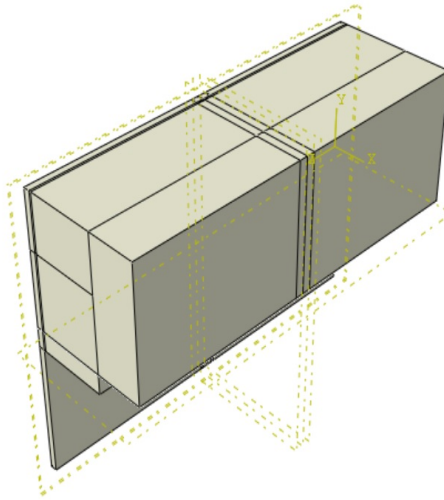
4. DENEY SONUÇLARININ SAYISAL DOĞRULAMASI

4.1 Yöntem

Deney çalışması yapılmış olan numunelerin sayısal doğrulaması sonlu eleman yöntemini kullanan Abaqus/CAE yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Analizler uygulanırken bu tezde sayısal yaklaşımlar bölümünde anlatılan uygulamalar esas alınarak modellemeler gerçekleştirilmiştir. Abaqus programında statik ve dinamik olmak üzere iki analiz yöntemi ile uygulama yapmak mümkündür. Bu çalışmada ise çarpma, ilerleyen zarar görme, malzeme göçmesi, metal şekillendirme v.b. durumlarında ve zaman yöntemi kontrolü açısından yükleme koşullarına en yakın uygulama imkanı veren "Dynamic/Explicit" yöntemi esas alınarak analiz yapılmıştır. Ayrıca bu yöntemde yükleme hızı seçenekleri de değiştirilebildiğinden analiz süresi azaltılabilmektedir.

4.1.1 Sonlu eleman seçimi

Bölüm 2’de anlatıldığı üzere simetri özelliği kullanılarak ve modelleme analizinin daha hızlı sonuçlanabilmesi için tüm numunelerde numunelerin dörtte biri baz alınarak modelleme yapılmıştır (Şekil 4.1).



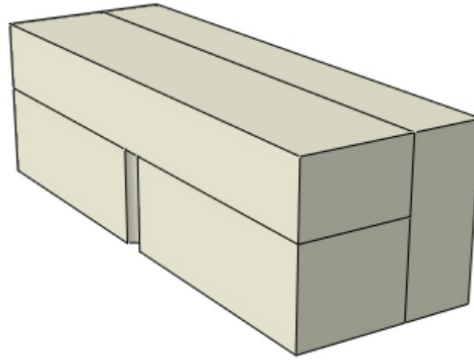
Şekil 4.1 : Numune modellemesi.

Sonlu eleman modellemesi yapılırken numuneyi oluşturan bileşenlerden beton döşeme, çelik profil ve stud çivisi üç boyutlu C3D8R (Continuum, 3D, 8-node, reduced integration) özellikli "solid" eleman, donatılar ise üç boyutlu B31 (Beam, 3D, 1-st order interpolation) özellikli "wire" eleman olarak tanımlamaları yapılmıştır. Ayrıca donatı elemanı için "wire" özelliği tanımlandıktan sonra "Property" seçeneği kullanılarak "Create Section" menüsünden category ve type seçeneğinden "Beam" eleman seçilerek "Assign Beam Orientation" opsiyonu kullanılarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Malzeme özelliklerinin atanması

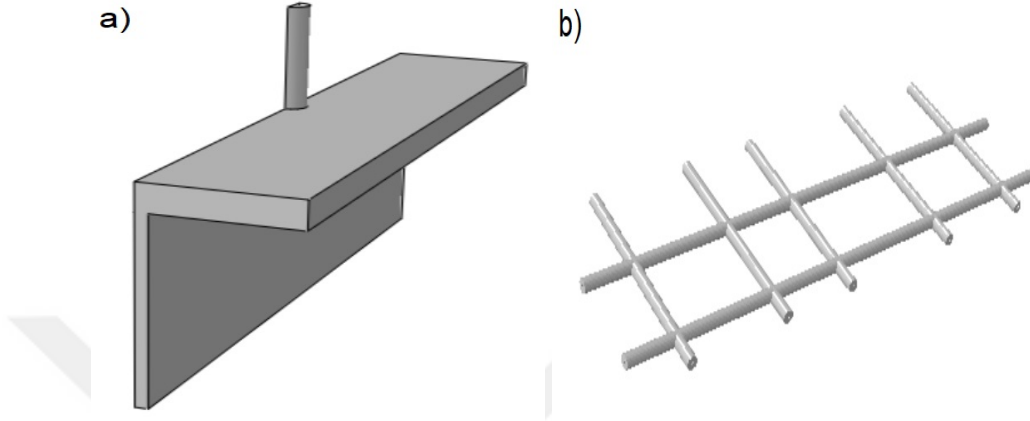
Malzeme tanımlamaları yaparken deneysel çalışmada numuneleri oluşturan bileşenlerin deney sonuçlarında elde edilen değerler kullanılarak oluşturulmuştur. Finite Element Model (sonlu eleman yöntemi) kullanarak sayısal analiz işlemi gerçekleştiren Abaqus yazılımında malzeme modellemesi yapılmıştır.

Beton döşemenin malzeme özellikleri tanımlanırken "Dynamic/Explicit" yöntem kullanılacağından Abaqus programının "Property" seçeneğinde beton modellemesi Northwestern Üniversitesinden Bazant tarafından geliştirilen "Microplane Model (M7)" [33, 34] "subroutine" olarak tanımlanmıştır. Microplane Model (M7)'de beton özelliklerini tanımlayabilmek için "Fortran" programı kullanılarak beton basınç dayanımı "f_{cp}" değeri deneysel çalışma sonucunda üç adet silindirik numunenin ortalama basınç dayanımı olan 51.93 MPa, Elastisite modülü 37.67 GPa ve Poisson oranı da 0.202 olarak girilmiştir. (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Beton numune modellemesi.

Çelik profil, stud çivisi ve donatı malzeme modellemesinde ise deneysel çalışmada kullanılan ve deney sonucunda elde edilen değerler tanımlanarak modelleme oluşturulmuştur (Şekil 4.3). Stud çivisi ve donatı çeliği için deneysel çekme testi sonucunda oluşan gerilme-şekil değiştirme grafiği baz alınarak malzeme özellikleri girilmiştir.



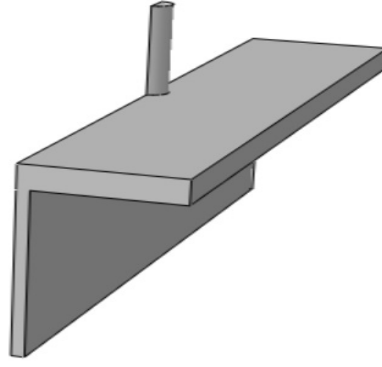
Şekil 4.3 : a) Çelik profil ve stud çivisi modellemesi b) Donatı modellemesi.

4.1.3 Bileşenlerin bağlanma şekilleri ve temas yüzeylerinin modellenmesi

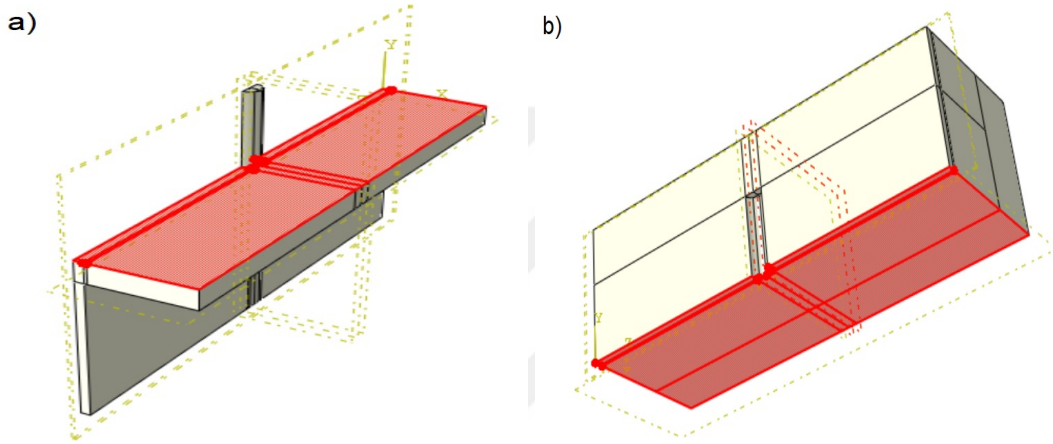
Sonlu eleman modellemeleri yapıldıktan sonra kompozit kirişi oluşturan bileşenlerin birbirlerine temas eden yüzeylerinin bağlanma şekilleri ve bu yüzeyler arasındaki davranış biçimleri oldukça önemlidir. Bu nedenle davranış biçimlerini gerçeğe en yakın olacak şekilde Abaqus programında tanımlaması yapılmıştır. Bileşenlerin birbirlerine bağlanma şekillerini tanımlamaya bilmek için temas yüzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Temas yüzeyleri tanımlanmadan önce uygulamada stud çivisi yüksek voltajlı ark tabancası ile çelik profilin başlığına kaynatılarak tek bir elemanmış gibi davranılması sağlanmış olduğundan Abaqus/CAE yazılımında bunların tek bir elemanmış gibi gösterilmesi gerekmektedir. Abaqus programında "Assembly" menüsünden "merge" seçeneği kullanılarak çelik kiriş ve stud çivisi tek bir elemanmış gibi bir bütün olarak davranılması sağlanmıştır (Şekil 4.4).

Temas yüzeylerinden beton döşeme ve çelik profil başlığı öncelikli olarak seçilmiştir (Şekil 4.5).

Seçilen yüzeylerin davranış biçimlerini tanımlayabilmek için deneysel çalışmalarda kullanılan ortamlar ve koşullarda göz önünde tutulmalıdır. Deneysel çalışmada beton döşeme yüzeyi ile çelik profil başlık yüzeyi arasındaki sürtünmeyi sıfıra yakın hale



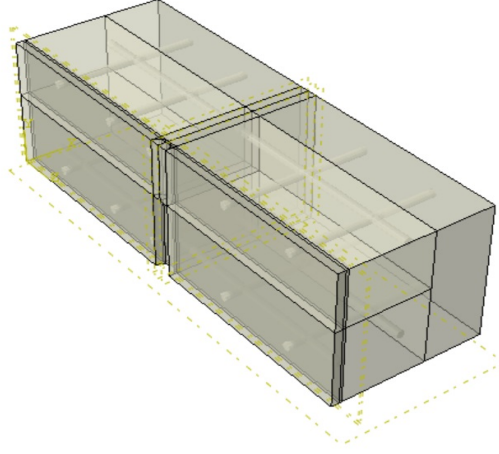
Şekil 4.4 : Çelik profil başlığına merge edilmiş stud çivisi.



Şekil 4.5 : a) Çelik profil temas yüzeyi b) Beton döşeme temas yüzeyi.

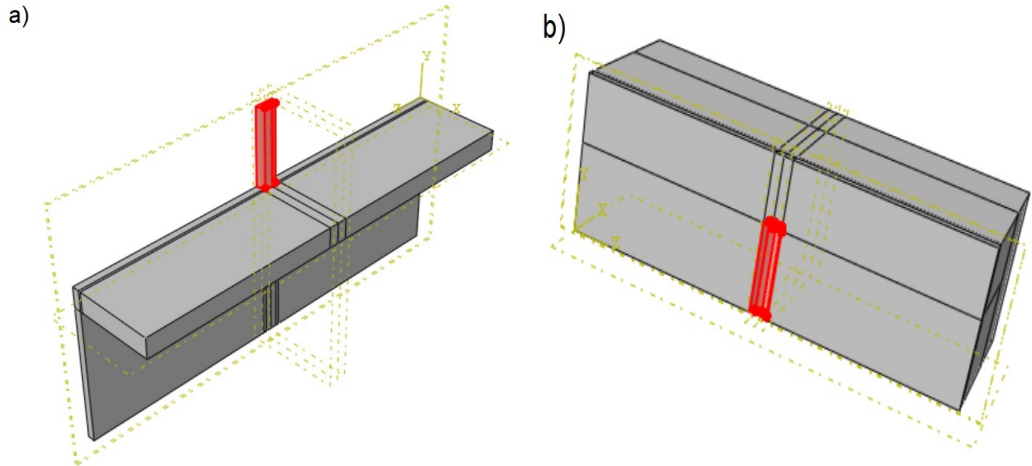
getirmek için beton dökülmeden önce çelik profil başlıkları yağlanmıştı ancak bu durumda sürtünmenin sıfır olmadığı itme hareketi ile beraber bir sürtünmeye maruz kalacağı düşünülmüştür. Bu doğrultuda bu iki bileşen arasındaki bağlanma şeklini tanımlarken Abaqus programında "interaction" menüsünden "surface to surface" seçeneği ile "contact" işaretlenip "Normal behaviour" opsiyonu "hard contact", "Tangential behaviour" opsiyonu ise "penalty" tanımlanarak "friction coefficient" 0.25 olacak şekilde tanımlanmıştır.

Deneysel çalışmada beton döşeme içerisinde altta ve üstte olmak üzere yerleştirilen beton donatıları döşeme içerisinde gömülü olduklarından sayısal analiz programında "interaction" menüsünden "Create Constraint" seçeneğinden beton döşeme bütün olacak şekilde ve donatı yüzeyleri seçilerek "Embedded region" opsiyonu tercih edilerek paslanmaz çelik donatılar beton içerisinde gömülü halde tanımlanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Beton döşeme içerisine gömülü donatılar.

Tez çalışmasında önemli bir yere sahip olan stud çivilerinin tanımlanması oldukça önem arz etmektedir. Stud çivisi beton içerisinde gömülü olsa dahi itme testi esnasında uygulanan kuvvet neticesinde stud çivisinin gövde kısmı beton döşemeyi zorlayarak hareket etme halinde olacağından, başlık kısmının ise gövdeye nazaran daha sabit olduğu düşünüldüğünden, stud çivisinin betona gömülü gövde kısmı ile betona gömülü başlık kısmının ayrı ayrı bağlanma tanımlanması yapılması uygun görülmüştür. Abaqus programında bu bağlı olma hareketini tanımlayabilmek için stud çivisi ve beton döşemenin temas halindeki yüzeylerini belirlemek gerekmektedir (Şekil 4.7).



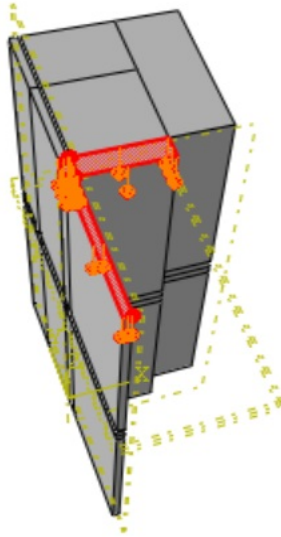
Şekil 4.7 : a) Beton döşeme ile temas eden stud çivisi yüzeyi b) Betonun stud çivisi ile temas eden yüzeyi.

Bu tanımlama yapıldıktan sonra "interaction" menüsünden "Create Constraint" seçeneğinden " Tie" modellemesi seçilerek "Master surface" olarak stud çivisinin temas yüzeyleri, "Slave surface" olarakta beton döşemenin stud çivisi ile temas eden

yüzeyleri tanımlanarak bağlantı şekli tamamlanmış olur. Ayrıca tüm modellemelerde geçerli olacak şekilde "interaction" seçeneğinde temas eden yüzeylerin bağlanma şekilleri "tie" opsiyonu ile atanırken tüm rijit yüzeyler (çelik profil başlığı, stud çivisi gövdesi ve stud çivisi başlığı) "Master surface" olarak tanımlanmış, betonun stud çivisi ve çelik profilin başlığı ile temas eden yüzeyleri ise "Slave surface" olarak tanımlanmıştır.

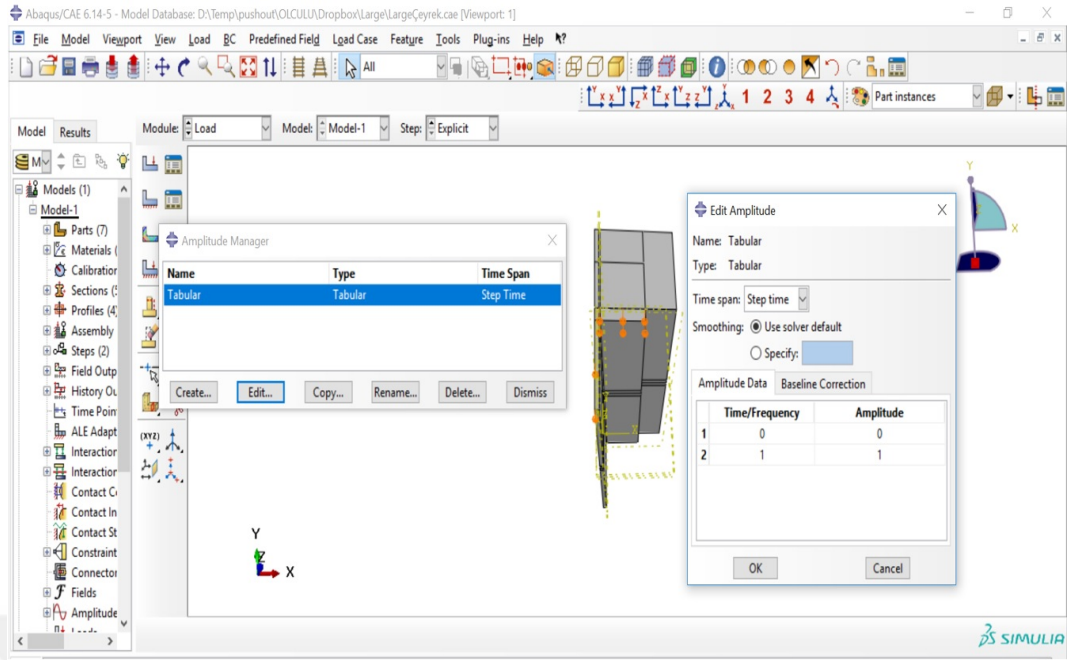
4.1.4 Sınır koşulları ve yük ataması

Kompozit bileşenlerin birbirleri ile bağlanma şekilleri tanımlandıktan sonra yük ataması ve sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Deney ortamında itme testi yükü çelik profilin gövde kısmı ve başlığın alın kısmına uygulanmış ve bu yüzeye yükün düzgün yayılı yük olarak aktarılabilmesi için çelik profil gövdesine ince plaka şeklinde metal plaka konulmuştur. Abaqus programında bu yüzey düzgün yüzey olduğundan metal plaka tanımlamasına ihtiyaç duyulmadan çelik profil gövde ve başlığın alın kısmı yükleme yüzeyi olarak seçilmiş ve z ekseninde "Boundary Condition Manager" seçeneği ile yük deplasman değeri olarak girilmiştir (Şekil 4.8).



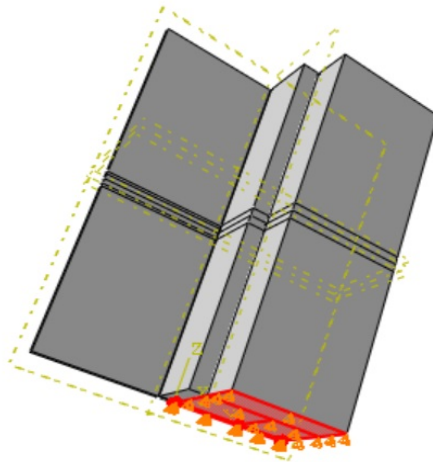
Şekil 4.8 : Yükleme yüzeyi.

Analiz programı "Dynamic/Explicit" olarak çalıştırılacağından yükleme değeri olarak girilen deplasman değeri "Amplitude Manager" seçeneği ile "Tabular" girilerek "Time/Frequency" ve "Amplitude değerleri tanımlanması gerekmektedir (Şekil 4.9).



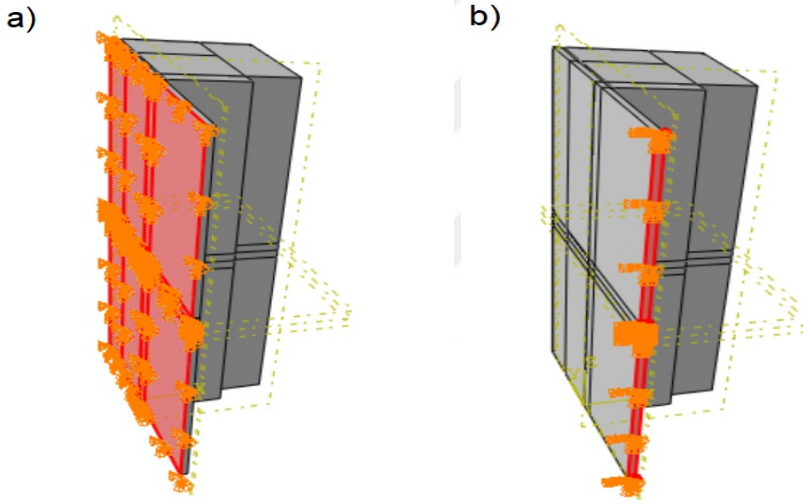
Şekil 4.9 : Amplitude değeri tanımlanması.

İtme testi uygulamasında beton döşemenin yükleme cihazının zeminine oturan kısımları sabit kalması ve yüzeyin düzgün düzlem üzerine oturabilmesi için kauçuk ped kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sayısal doğrulamasında analiz tanımlamaları da bu doğrultuda tanımlanmıştır. Bunun için zemine temas eden yükün aksi doğrultusundaki beton döşeme yüzeyi de "Boundary Condition Manager" seçeneğinden yükün uygulandığı doğrultu yönünde hareket etmemesi için z eksenı yönünde tutulacak şekilde destek yüzeyi olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : Destek yüzeyi tanımlanması.

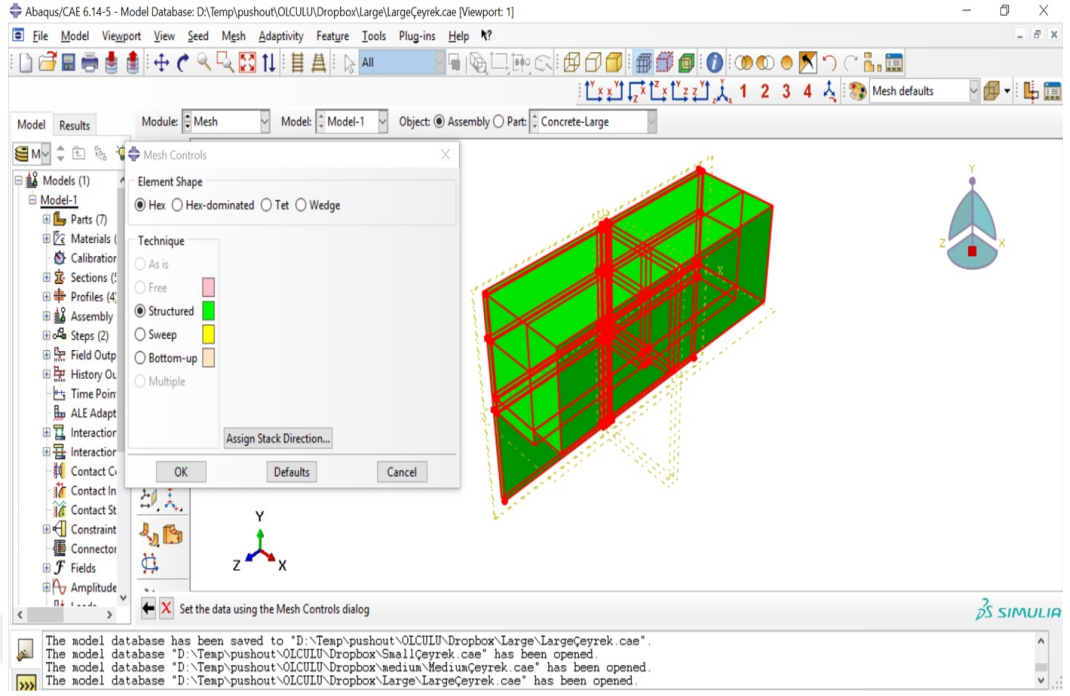
Abaqus programında yükleme ve sınır koşullarının tanımlanması aşamasında simetri özelliği kullanılarak numunelerin çeyrek modellemesi yapılmış olduğundan programlamada analiz yapılmadan önce numunenin bölünmemiş tam olarak modellenmiş gibi analiz yapılabilmesi için simetri yüzeylerini tanımlamak gereklidir. Programlamada analizin gerçeğe uygun olabilmesi için simetri yüzeyleri kesilen yüzeyin bulunduğu doğrultuda tanımlanması gerekmektedir. Modelleme yapılırken numuneler x ve y doğrultusunda bölünmüştür. Yüzeylerin simetri tanımlaması "Load" menüsünden "Boundary Condition Manager" seçeneği seçilerek "Create Boundary Condition" seçeneğinden "Symmetry/Antisymmetry/Encastre" seçilerek x doğrultusundaki yüzeyler seçildikten sonra "XSYMM" , y doğrultusundaki yüzeyler seçildikten sonra "YSYMM" atamaları yapılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : a) X simetri yüzeyi b) Y simetri yüzeyi.

4.1.5 Modellemelerde mesh atanması

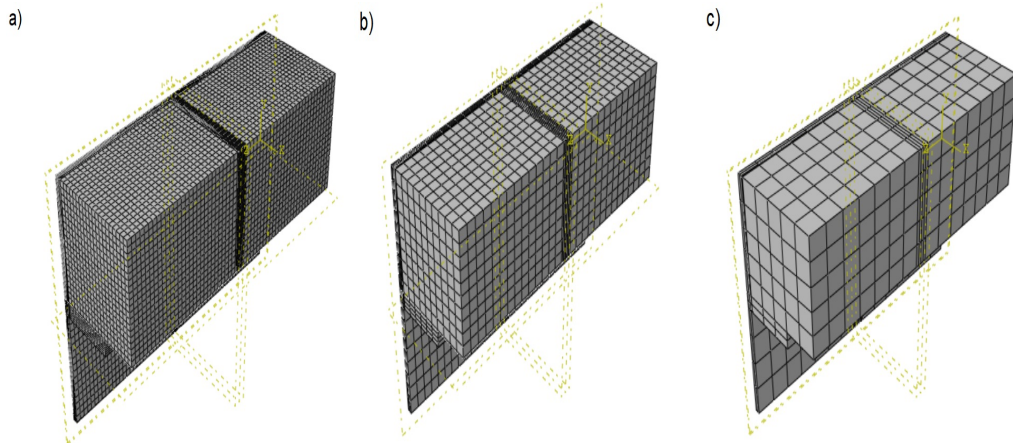
Abaqus programında modelleme tanımlamaları yapıldıktan sonra analiz yapılmadan önce sonlu eleman analizi yapılabilmesi için numunelerin "Mesh" menüsünden küçük parçalara bölünmesi gerekmektedir. "Mesh" tanımlanması için kompozit bileşenlerin bölünebilmesi için öncelikle yapılandırılmaları gerekmektedir. Numunenin düzgün yapılandırılıp yapılandırılmadığını kontrol etmek için "Mesh" menüsünden "Mesh Control" seçilerek "Element Shape" Hex, "Technique" ise Structured seçilmelidir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Modellemenin mesh yapılabilmesi için yapılandırılması.

Gerekli yapılandırma yapıldıktan sonra düzgün geometriye sahip olmayan bileşenlerin "Partition Cell" seçeneği ile düzgün yapılandırma elde edilinceye kadar numune bileşenlerinin hücrelere bölünmesi gerekmektedir.

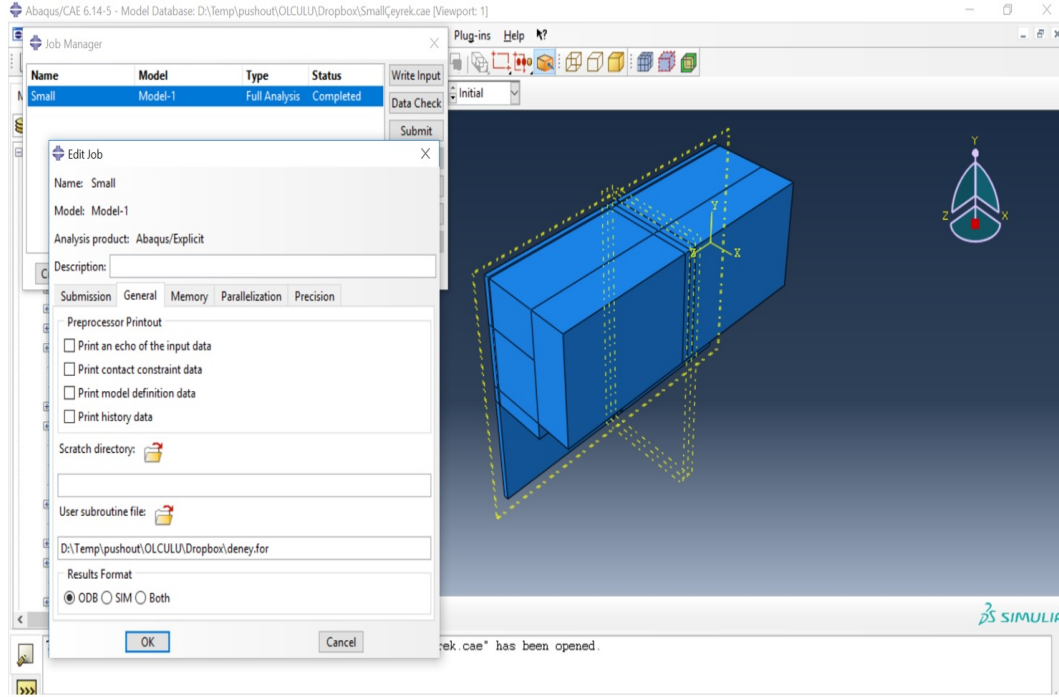
Hücrelere bölünerek yapılandırılması düzgün şekilde tamamlanan numuneler her bir eleman boyu eşit olacak şekilde "Mesh" işlemi yapılarak parçalara bölünmüş ve analiz yapılabilmesine uygun hale getirilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 : a) Büyük boy numune mesh b) Orta boy numune mesh c) Küçük boy numune mesh.

Abaqus programında analiz yapılmadan önce analiz sonucunu doğru elde edilebilmesi için en önemli aşama olan mesh tanımlanması bittikten sonra analize başlamadan önce beton döşeme malzeme özelliği "Microplane Model 7" olan fortran dosyası "Job"

menüsünden "Job Manager" seçeneği seçilerek "Edit Manager" opsiyonu ile "User subroutine file" olarak yüklenmesi gerekmektedir (Şekil 4.14).

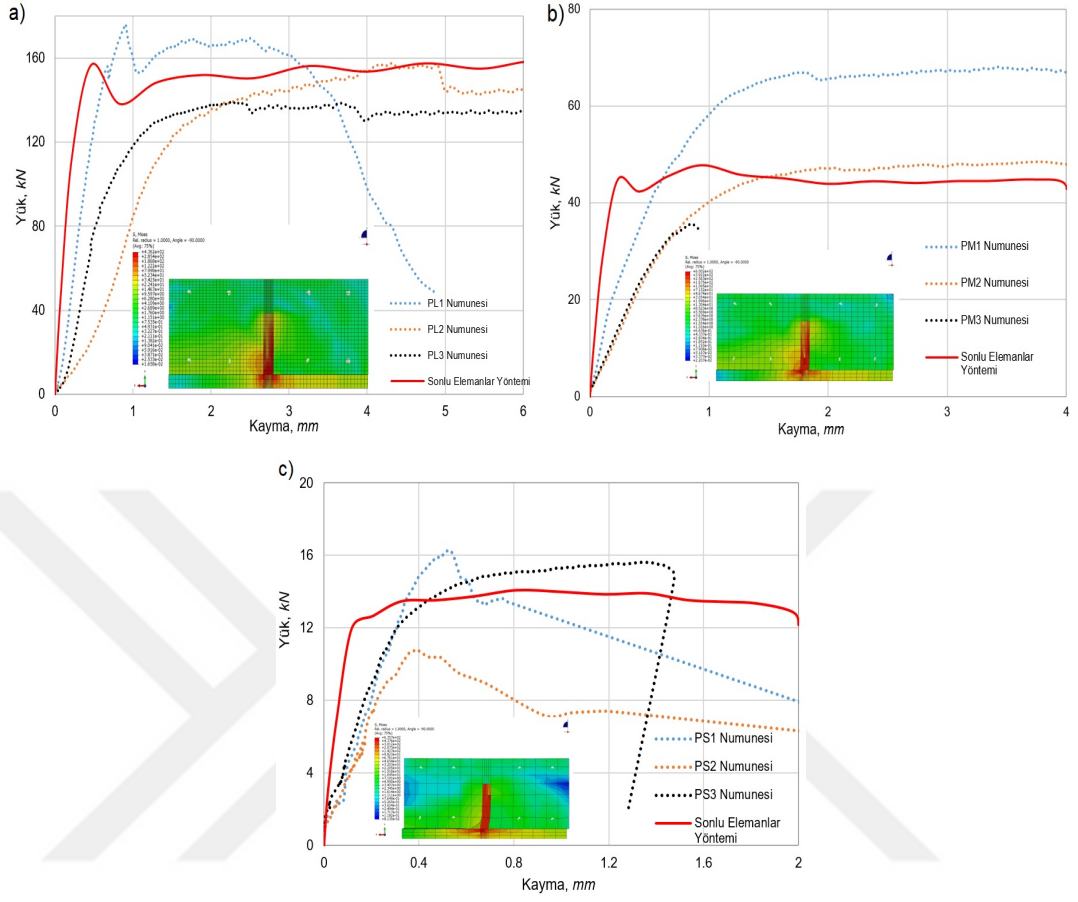


Şekil 4.14 : Subroutine dosyasının tanımlanması.

4.2 Analiz sonuçları

Abaqus programında belirtildiği şekilde tanımlamalar yapıldıktan sonra sonlu elemanlar yöntemi ile her numune boyu için analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda numuneler için yük-kayma grafikleri elde edilerek deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve numunelerin sayısal doğrulaması yapılmıştır. Analiz yapılırken PS numunesi için 2087 düğüm noktası ve 1416 doğrusal eleman kullanılmıştır. Bu elemanlardan 1314'ü C3D8R kodlu "Hexahedral" eleman, 102 adeti de çizgisel elemandır. Üç boyutlu hexahedral elemanlar beton döşeme, çelik profil ve kayma çivisinin modellemesinde kullanılmıştır. Çizgisel elemanlar ise donatının modellemesinde kullanılmıştır. PM numunesi için ise, 13328 düğüm noktası kullanılmıştır. Toplamda 10164 eleman kullanılmış olup bunlardan 10512'si doğrusal hexahedral, 252'si de "B31" kodlu doğrusal çizgisel elemanlardan oluşmaktadır. PL numunesinde de 94572 düğüm noktası kullanılmış, toplam eleman sayısı 84568 dir. Bu elemanlardan 84096'sı doğrusal hexahedral, 472'si de doğrusal çizgisel eleman tipindedir. Deney sonuçları ile Abaqus ile yapılan modellemelerin analiz sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir (Şekil 4.15). Elde edilen grafiklerden de anlaşılaacağı üzere Abaqus programı ile

yapılan modelleme ve bu modelleme analizi için seçilen yöntemlerin deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.15 : Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması; a) PL numunesi b) PM numunesi c) PS numunesi.

Ayrıca analiz sonucunda her numune için numuneye etkiyen kuvvetler hesaplanarak boyut etkisi içinde sayısal doğrulama yapılmıştır. Abaqus programı ile yapılan analiz sonucunda en büyük boy olan PL numunesi için maksimum kuvvet değeri 158.59 kN bulunmuş olup Denklem 4.1'den,

$$\sigma_b = \frac{158.59}{90 \times 19} \times 1000 = 92.74 \text{ N/mm}^2 \quad (4.1)$$

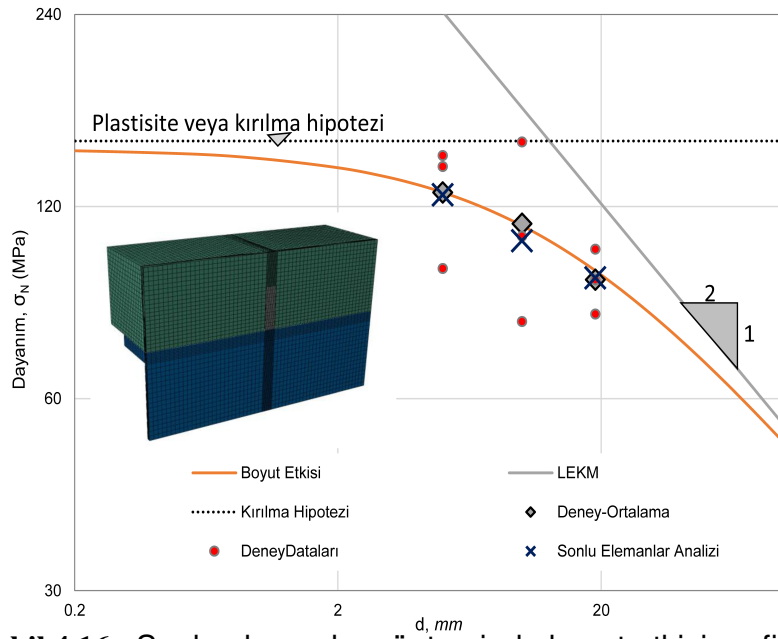
olarak bulunur. Orta boy numune PM için ise analiz sonucunda maksimum yük 47.72 kN olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda gerilme değeri Denklem 4.2'den,

$$\sigma_b = \frac{47.72}{45 \times 10} \times 1000 = 106.06 \text{ N/mm}^2 \quad (4.2)$$

Küçük boy numune olan PS numunesi için de maksimum kuvvet 14.09 kN olduğundan gerilme değeri Denklem 4.3'ten,

$$\sigma_b = \frac{14.09}{22.5 \times 5} \times 1000 = 125.24 \text{ N/mm}^2 \quad (4.3)$$

olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değerlerinde gösterildiği boyut etkisi grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 : Sonlu elemanlar yönteminde boyut etkisi grafiği.

Grafikten de anlaşıldığı üzere sayısal analiz sonuçları deneysel verilerin ortalama değerleri ile uyumludur. Ortalama değerler üzerinden yapılan regresyon sonucu boyut etkisi parametreleri bulunmuştur. Elde edilen boyut etkisi parametreleri sayısal sonuçlara çok yakın olmaktadır. Burada boyut etkisi eğrisinin (Sarı düz çizgi) deneysel sonuçlarda daha az hata ile uyumlu olduğu söylenebilir. Sayısal analizler explicit dinamik analiz yöntemleri ile gerçekleştirildiğinden stabilite problemi olmamıştır. Fakat analiz özellikle büyük boy numune için oldukça yüksek hesaplama maliyetlerine neden olmuştur. Elde edilen grafiklerde deplasman ekseninde bazı kaçıklıklara rastlanılmıştır. Burada hesaplama sonucu elde edilen sonlu elemanlar sonuçları daha güvenilir olmaktadır. Çünkü deney mekanizmalarının rijitlikleri ve ölçümde karşılaşılan bazı zorluklar yer değiştirme farklılıklarını meydana getirmiş olabilir. Sayısal analizlerde "quasi-statik" yükleme durumu ile kinetik enerjinin belli bir değerinin üzerine çıkılmamaya çalışılmıştır. Bu durumda yükleme hızları belli bir

değerde sabit tutulmuş ve analizler bu esaslara göre gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan "Microplane" malzeme modeli beton için kullanılmış olup çatlak bandı modeli kullanılan "subroutine" içerisinde entegre olarak çalışmaktadır. Bu durum analizlerde betonun mikro çatlaklarının ilerleyişini modelleyebilmektedir. Elde edilen veriler ayrıca "Microplane M7" modelinin de kompozit kiriş elemanlarını gerçekçi bir şekilde simüle edebileceğini göstermektedir.

Elde edilen Şekil 4.16 ile ikinci tip boyut etkisinin kompozit kirişlerde kullanılabileceği görülmektedir. Bu durum hem sayısal hem de deneysel veriler ile kanıtlanmıştır.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Beton ve çelikten oluşan kompozit kirişlerin en önemli parçalarından olan kayma bağlayıcıların dayanımı üzerinde oldukça fazla çalışılmış ve farklı ülkelerin standartlarında farklı yaklaşımlar ile formulüze edilmiştir. Bu konu üzerinde yapılan sayısal araştırmalar daha çok sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Konunun mahiyeti göz önüne alındığında beton ve metal alaşımından oluşan kayma bağlayıcısı arasında gerilme bakımından çok fazla tekillik olduğu söylenebilir. Bu sayısal yöntemlerin uygulanmasını daha da zorlaştırmaktadır. Fakat bu çalışmada uygulanan sayısal yöntem ile deneysel veriler karşılaştırıldığında birbirleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sonlu eleman yöntemi ile yapılan analizler sırasında temas yüzeyleri arasında sürtünme katsayısının tayin edilmesi ve beton içine gömülü vaziyette bulunan kayma bağlayıcılarının yüzeyi ile temasta olan beton yüzeyi arasında "tie" komutu ile bağlayıcı ataması yapılması analiz tekniği bakımından iyi sonuç vermektedir.

Sayısal analizler sırasında uygulanan malzeme modelleri analiz sonuçlarını oldukça fazla etkilemiştir. En doğru malzeme modeli ve parametrelerini bulmak için farklı deneylerin sonuçları ile kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Yapılan bu kalibrasyon çalışmaları neticesinde kompozit kirişteki metal malzemelerin bilineer bir plastisite modeli ile simüle edilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Beton malzemesi için ise "ABAQUS" sonlu elemanlar hazır programının içerisinde hazır olarak bulunan "damage plasticity" modeli ve Bazant tarafından geliştirilen "microplane M7" beton modelleri kompozit kiriş analizlerinde oldukça ideal sonuçlar vermiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar ile kayma bağlayıcılarının dayanımlarının bir çok faktörden etkilendiği görülmektedir. Kayma (Stud) çivilerinin akma dayanımları kaynak bileşim noktalarındaki mukavemet, betonun basma, çekme ve ezilme durumlarındaki kapasitesi, ele alınan elemanın geometrisi ve boyutu bu faktörlerden bazılarıdır. Deneyden elde edilen sonuçların boyut etkisi kanunu ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum ortaya çıkan kırılmanın gevrek veya yarı gevrek

kırılma tipi olduğunun bir kanıtıdır. Bu gevreklik betondaki mikro çatlaklardan ve/veya pekleşmiş olan kayma çivisinin mikro çatlaklarından meydana gelmiş olabilir. Boyut etkisi kanunlarından ikinci tip boyut etkisi ifadesine uygun olan itme testlerinin dayanımlarının hesaplarında boyut etkisi faktörü gerekli olmaktadır. Dünyanın farklı bölgelerindeki standartlarda belirtilen kayma çivisi dayanımı tahminleri boyut etkisi parametrisini içermediğinden küçük boylardaki kayma çivileri için aşırı tasarım tahminleri meydana gelmektedir. Bu durum büyük stud çivileri içinse riskli tasarımlara neden olabilmektedir. Uygulamada kayma çivilerinin tasarımları ampirik formüller ile elde edilen yük kapasitesi ve oldukça yüksek emniyet faktörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kayma çivileri ile ilgili optimum tasarımlara imkan verebilecek veriler ortaya koymaktadır.

Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular çalışmanın hipotez kısmı ile uyumludur. Kompozit kiriş bileşenlerinin kayma bağlantıları kırılma esnasında gevrek kırılma mekanizması göstermektedir. Bu gevrek kırılma mekanizması boyut etkisini beraberinde getirmektedir. Deneysel ve sayısal analizler neticesinde bu gevrek kırılma tipinin daha çok beton kısmın ezilmesinden kaynaklandığı sonucuna varılabilir. Bu durum diğer bileşenlerin metal malzemeden oluştuğu göz önüne alındığında beklenen bir durum olmaktadır. Betonun kırılması içerisinde oluşan mikro ve makro çatlakların ilerleyişi şeklinde olduğundan boyut etkisi gözlemlenmektedir. Betonda oluşan boyut etkisi kompozit kiriş bileşeni olan itme testlerinde daha önce boyut etkisi analizi yapılmadığından açıkça görülmemiştir. Fakat mevcut çalışmada bu durum ortaya çıkarılmış ve gerekli standartlarda düzeltmelerin yapılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **TS500**, (2000), TS500 Requirements for design and construction of reinforced concrete structures.
- [2] **Hesap, Ç.Y.T. ve Esasları, Y.**, (2016), TC Resmi Gazete.
- [3] **Johnson, R.P.** (2008). *Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns, and frames for buildings*, John Wiley & Sons.
- [4] **EN, C.**, (1994), 1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures.
- [5] **Design, A.S.** (1999). Specification for structural steel buildings, *AISC, December*, 27.
- [6] **Aashto, L.**, (1998), Bridge design specifications.
- [7] **BD-032, J.T.C.**, (2017), AS/NZS 2327:2017-Composite structures—Composite steel-concrete construction in buildings.
- [8] **ABNT, N.** (2008). 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, *Rio de Janeiro*.
- [9] **Press, C.S.I.** (2010). Code for design of concrete structures GB 50010-2010, *China Structural Science Academe Beijing*, 64–73.
- [10] **JSCE**, (2009), Standard Specifications for Steel and Composite Structures.
- [11] **Akkaya, Y., Bayramov, F. ve Taşdemir, M.A.** (2003). Betonun Kırılma Mekanîği: Tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar.
- [12] **Ince, R. ve Arslan, A.** (2000). Kesme Açıklığı Kısa Kayma Donatısız Betonarme Kırılmalarda Boyut Etkisi.
- [13] **Bazant, Z.P. ve Planas, J.** (1997). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*, cilt 16, CRC press.
- [14] **Ollgaard, J., Slutter, R. ve Fisher, J.** (1971). Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete, *AISC Eng'g Jr.*, April 1971 (71-10).
- [15] **Oehlers, D.J.** (1990). Deterioration in strength of stud connectors in composite bridge beams, *Journal of structural engineering*, 116(12), 3417–3431.
- [16] **An, L. ve Cederwall, K.** (1996). Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, 36(1), 15–29.

- [17] **Shim, C.S., Lee, P.G. ve Yoon, T.Y.** (2004). Static behavior of large stud shear connectors, *Engineering structures*, 26(12), 1853–1860.
- [18] **Topkaya, C., Yura, J.A. ve Williamson, E.B.** (2004). Composite shear stud strength at early concrete ages, *Journal of Structural Engineering*, 130(6), 952–960.
- [19] **Lam, D. ve El-Lobody, E.** (2005). Behavior of headed stud shear connectors in composite beam, *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 96–107.
- [20] **Xue, D., Liu, Y., Yu, Z. ve He, J.** (2012). Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge, *Journal of Constructional Steel Research*, 74, 1–7.
- [21] **Spremic, M., Markovic, Z., Veljkovic, M. ve Budjevac, D.** (2013). Push-out experiments of headed shear studs in group arrangements, *Advanced Steel Construction*, 9(2), 170–191.
- [22] **Liu, Y. ve Alkhatib, A.** (2013). Experimental study of static behaviour of stud shear connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(9), 909–916.
- [23] **Dai, X., Lam, D. ve Saveri, E.** (2015). Effect of concrete strength and stud collar size to shear capacity of demountable shear connectors, *Journal of Structural Engineering*, 141(11), 04015025.
- [24] **Han, Q., Wang, Y., Xu, J. ve Xing, Y.** (2015). Static behavior of stud shear connectors in elastic concrete–steel composite beams, *Journal of constructional steel research*, 113, 115–126.
- [25] **Rehman, N., Lam, D., Dai, X. ve Ashour, A.F.** (2016). Experimental study on demountable shear connectors in composite slabs with profiled decking, *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 178–189.
- [26] **de Souza, P.T., Kataoka, M.N. ve El Debs, A.L.H.** (2017). Experimental and numerical analysis of the push-out test on shear studs in hollow core slabs, *Engineering Structures*, 147, 398–409.
- [27] **Shen, M. ve Chung, K.** (2017). Experimental investigation into stud shear connections under combined shear and tension forces, *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 434–447.
- [28] **Ellobody, E. ve Young, B.** (2006). Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting, *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7), 682–694.
- [29] **Nguyen, H.T. ve Kim, S.E.** (2009). Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10), 1909–1920.
- [30] **Qureshi, J. ve Lam, D.** (2012). Behaviour of headed shear stud in composite beams with profiled metal decking, *Advances in Structural Engineering*, 15(9), 1547–1558.

- [31] **Liu, X., Bradford, M.A. ve Lee, M.S.** (2014). Behavior of high-strength friction-grip bolted shear connectors in sustainable composite beams, *Journal of Structural Engineering*, 141(6), 04014149.
- [32] **Han, Q., Wang, Y., Xu, J., Xing, Y. ve Yang, G.** (2017). Numerical analysis on shear stud in push-out test with crumb rubber concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, 130, 148–158.
- [33] **Caner, F.C. ve Bažant, Z.P.** (2012). Microplane model M7 for plain concrete. I: Formulation, *Journal of Engineering Mechanics*, 139(12), 1714–1723.
- [34] **Caner, F.C. ve Bažant, Z.P.** (2012). Microplane Model M7 for Plain Concrete. II: Calibration and Verification, *Journal of Engineering Mechanics*, 139(12), 1724–1735.
- [35] **Dönmez, A.** Influence of stud size on behavior of shear connectors, *hazırlık aşamasında*.



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad:

Lokman IŞIK

Doğum Tarihi ve Yeri:

1981-Batman

E-Posta:

lokman81@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2005, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2005-2006 yılları arasında Yalçın Proje firmasında statik proje analiz ve çizimi alanlarında çalıştı.
- 2006 yılından beri İstanbul Büyükşehir Belediyesinde kontrol mühendisi olarak çalışmaktadır.