

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞLERDE ÇELİK HALAT KULLANIMININ YAPISAL
DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muzaffer YAZAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞLERDE ÇELİK HALAT KULLANIMININ YAPISAL
DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muzaffer YAZAR
(501161028)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Beyza TAŞKIN

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161028 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Muzaffer YAZAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BETONARME KİRİŞLERDE ÇELİK HALAT KULLANIMININ YAPISAL DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN İRDELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. Beyza TAŞKIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Ercan YÜKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Muzaffer BÖREKÇİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **14 Haziran 2019**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışmaya başlamamı sağlayan Prof.Dr. Metin Aydoğan'a, çalışma süresince desteğini ve anlayışını esirgemeyen danışmanım Doç.Dr. Beyza Taşkın'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak analitik modellemede bilgisini ve tecrübesini benden esirgemeyen Dr. Yıldır Akkaya'ya teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2019

Muzaffer Yazar
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.2.1 Arsava, T. tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışması	2
1.2.2 Marnie B. Giduquio, Min-Yuan Cheng and Leonardus S. B. Wibowo tarafından yapılan çalışma	3
1.2.3 Felicia and Susanto Teng tarafından yapılan çalışma	4
1.2.4 Jeffrey M. Rautenberga, Santiago Pujola, Hooman Tavallalib, Andres Lepageb tarafından yapılan çalışma.....	4
1.2.5 D. J. Kelly, A. Lepage, D. Mar, J. I. Restrepo, J. C. Sanders, and A.W. Taylor tarafından yapılan çalışma.....	5
1.2.6 M. Dawood, H Seliem, Dr. T. Hassan, Dr. S. Rizkalla tarafından yapılan çalışma	5
1.3 Yöntem	6
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ	7
2.1 Betonarme Çeliği.....	7
2.2 Beton	10
2.3 Çelik Halat.....	12
2.3.1 Öngerme telleri	12
2.3.2 Öngerme toronu	12
2.3.3 Öngerme çubuğu	13
2.3.4 Öngerme kablosu	13
2.3.5 Çelik halat çekme deneyi sonuçları	13
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	17
3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması	17
3.2 Deney Numunelerinin Özellikleri	18
3.3 Deney Düzenekleri	20
3.4 Deney Sonuçları	22
3.4.1 Numune 1	22
3.4.2 Numune 2a ve 2b	25
3.4.3 Numune 3	28
3.4.4 Deney sonuçlarının yorumlanması.....	32

4. ANALİTİK ÇALIŞMA.....	33
4.1 Vector5 Programı	33
4.2 Betonarme Çeliği Malzeme Modeli	40
4.3 Beton Malzeme Modeli	41
4.4 Çelik Halat Malzeme Modeli	41
4.5 Deneyssel ve Analitik Sonuçların Karşılaştırılması.....	42
4.5.1 Numune 1	42
4.5.2 Numune 2a ve 2b.....	43
4.5.3 Numune 3	44
4.5.4 Deney sonuçlarının analitik bir yaklaşımla kestirilmesi	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	55



KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS	: Türk Standartları
EUROCODE	: European Standard
ASTM	: American Society for Testing and Materials





SEMBOLLER

R_m	: Çeliğin çekme dayanımı
R_e	: Çeliğin akma dayanımı
f_{sy}	: Çelikte minimum akma dayanım
f_{su}	: Çelikte minimum çekme dayanım
Φ	: Donatı çapı
MPa	: Megapascal
ε_{sy}	: Çeliğin akma şekildeğiştirmesi
ε_{su}	: Çeliğin çekme şekildeğiştirmesi
ε_{sh}	: Çeliğin pekleşme şekildeğiştirmesi
P, F	: Deneyde uygulanan itme kuvveti
N	: Deneyde uygulanan çekme kuvveti
Δ, δ	: Açıklık ortası görelı yerdeğiştirme
f'c	: Vector5 beton basınç dayanımı
f't	: Vector5 beton çekme dayanımı
E_c	: Vector5 beton elastisite modülü
e0	: Vector5 sargısız beton için maksimum dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme
me	: Vector5 binde
N_c	: Vector5 beton katman sayısı
N_s	: Vector5 donatı katman sayısı
F_{yz}	: Vector5 donatı akma dayanımı
St	: Vector5 enine donatı aralığı
Dbt	: Vector5 enine donatı çapı
F_{yt}	: Vector5 enine donatı akma dayanımı
F_{ut}	: Vector5 enine donatı çekme dayanımı
E_{st}	: Vector5 enine donatı elastisite modülü
esht	: Vector5 enine donatı pekleşme şekildeğiştirmesi
MT	: Vector5 malzeme tipi
D_c	: Vector5 beton için tanımlanan fiber kalınlığı
W_c	: Vector5 fiber genişliğı

Rho-t	: Vector5 fiber için enine donatı oranı
Rho-z	: Vector5 fiber için sargı etkisinin hesaplandığı oran
Nx	: Vector5 sargılı ve sargısız beton özelliklerinin tanımlandığı katman sayısı
Ys	: Vector5 donatı merkezinden kesitin en dış lifine olan mesafe
As	: Vector5 toplam donatı alanı
BLDR	: Vector5 donatı için tanımlanan burkulma katsayısı
MEM	: Vector5 eleman



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Türkiye’de kullanılan donatı çeliklerinin mekanik özellikleri.....	7
Çizelge 2.2 : Betonarme çeliği çekme deneyi sonuçları	9
Çizelge 2.3 : Beton basınç deneyi sonuçları.....	10
Çizelge 2.4 : Kübik beton basınç dayanımının silindirik numune dayanımına çevrilmesi.....	11
Çizelge 2.5 : Öngerme teli mekanik özellikleri.....	12
Çizelge 2.6 : Öngerme toronu mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 2.7 : Öngerme çubuğu mekanik özellikleri	13
Çizelge 2.8 : Çelik halat çekme deneyi sonuçları.....	15
Çizelge 3.1 : Kullanılan donatıların çapları ve enkesit alanları.....	18
Çizelge 3.2 : Numune 1 için çatlak ölçümleri	24
Çizelge 3.3 : Numune 2a için çatlak ölçümleri.....	26
Çizelge 3.4 : Numune 2b için çatlak ölçümleri	27
Çizelge 3.5 : Numune 3 itme ve çekme kuvvetleri.....	28
Çizelge 3.6 : Numune 3 için itme çatlak ölçümleri	30
Çizelge 3.7 : Numune 3 için çekme çatlak ölçümleri.....	30
Çizelge 4.1 : Numune 1, 2a ve 2b Vector5 düğüm noktaları	34
Çizelge 4.2 : Numune 3 Vector5 düğüm noktaları.....	35
Çizelge 4.3 : Numune 1, 2a ve 2b eleman indisleri.....	36
Çizelge 4.4 : Numune 1, 2a ve 2b mesnetlenme koşulları.....	36
Çizelge 4.5 : Vector5 sargısız beton özellikleri.....	37
Çizelge 4.6 : Vector 5 enine donatı özellikleri	37
Çizelge 4.7 : Numune 1 enkesit özellikleri.....	38
Çizelge 4.8 : Numune 1 donatı özellikleri.....	38
Çizelge 4.9 : Numune 2 donatı özellikleri.....	39
Çizelge 4.10 : Numune 3 donatı özellikleri.....	39
Çizelge 4.11 : TBDY-2018 donatı özellikleri.....	40
Çizelge 4.12 : Vector5 numune 2 donatılar için girilen yeni değerler.....	47
Çizelge 4.13 : Vector5 numune 3 donatılar için girilen yeni değerler.....	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çelik halat ve S420 çeliği için gerilme şekildeğiştirme değerleri.....	2
Şekil 1.2 : Vector5 veri girişinin yapıldığı not defterinin girişi	6
Şekil 2.1 : Betonarme çeliği malzeme çekme deneyi	8
Şekil 2.2 : Betonarme çeliği deneysel gerilme-şekildeğiştirme grafiği	8
Şekil 2.3 : (a) Küp numune (b) Beton basınç deneyi.....	10
Şekil 2.4 : TS500'de yer alan beton basınç dayanımları	11
Şekil 2.5 : (a) Çelik halat çekme deneyi (b) Halatın kopması	14
Şekil 2.6 : Çelik halat deneysel gerilme şekildeğiştirme grafiği	14
Şekil 2.7 : Çelik halat	15
Şekil 3.1 : Numunelerin deney alanına getirilmesi.....	17
Şekil 3.2 : Numunelerin deney için hazırlanması.....	18
Şekil 3.3 : Sırasıyla 1, 2a, 2b ve 3 numuneleri enkesitleri.....	19
Şekil 3.4 : Kiriş numuneleri boykesit çizimi	19
Şekil 3.5 : Numune 1	19
Şekil 3.6 : Numune 2a	19
Şekil 3.7 : Numune 3	20
Şekil 3.8 : Numune 1, 2a ve 2b için test düzeneği şematik çizimi	20
Şekil 3.9 : Numune 1, 2a ve 2b numuneleri için test düzeneği	21
Şekil 3.10 : Numune 3 için test düzeneği şematik çizimi.....	21
Şekil 3.11 : Numune 3 için test düzeneği	21
Şekil 3.12 : Numune 1 moment ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.....	22
Şekil 3.13 : Numune 1 ilk eğilme çatlağı (A).....	23
Şekil 3.14 : Numune 1 ilk kayma çatlağı (V)	23
Şekil 3.15 : Numune 1 basınç ezilmesi.....	23
Şekil 3.16 : Numune 1 deney sonucunda oluşan	24
Şekil 3.17 : Numune 2a ve 2b moment ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği	25
Şekil 3.18 : Numune 2a ilk eğilme çatlağı (A)	25
Şekil 3.19 : Numune 2a eğilme çatlakları.....	26
Şekil 3.20 : Numune 2a deney sonucu oluşan çatlaklar	27
Şekil 3.21 : Numune 2b deney sonucu oluşan çatlaklar	27
Şekil 3.22 : Numune 3 yükleme protokolü.....	28
Şekil 3.23 : Numune 3 kuvvet ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği	29
Şekil 3.24 : Numune 3 moment ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.....	29
Şekil 3.25 : Numune 3 deney sonucu oluşan itme ve çekme çatlakları.....	31
Şekil 3.26 : Numune 3 alt donatıların kopması	31
Şekil 3.27 : Numune 3 üst donatıların burkulması	31
Şekil 3.28 : Numune 1, 2a ve 2b moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme deney sonuçları	32
Şekil 4.1 : Numune 1, 2a ve 2b için analitik sistem	34
Şekil 4.2 : Numune 3 için analitik sistem	35
Şekil 4.3 : Numune 1 Vector5 için tanımlanan fiber katmanları.....	38

Şekil 4.4 : Numune 3 Vector5 için tanımlanan fiber katmanlarının şematik çizimi .	39
Şekil 4.5 : Vector5 yükleme verisi.....	40
Şekil 4.6 : Analitik modelde kullanılan betonarme çeliği için malzeme modeli	40
Şekil 4.7 : Analitik modelde kullanılan halat için malzeme modeli	41
Şekil 4.8 : Numune 1 analitik ve deney sonuçları karşılaştırılması	42
Şekil 4.9 : Numune 2a ve 2b analitik ve deney sonuçları karşılaştırılması	43
Şekil 4.10 : Numune 3 analitik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.11 : Çelik halat ve geleneksel betonarme çeliği için kuvvetler	45
Şekil 4.12 : Çelik halat ve geleneksel betonarme çeliği gerilme şekildeğiştirme grafikleri	46
Şekil 4.13 : Numune 2 ortalama gerilme değeri için moment açıklık ortası yerdeğiştirme	47
Şekil 4.14 : Numune 3 ortalama gerilme ile hesaplanan moment açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği	49
Şekil 4.15 : Numune 3 ortalama gerilme ile hesaplanan kuvvet açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği	49

BETONARME KİRİŞLERDE ÇELİK HALAT KULLANIMININ YAPISAL DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN İRDELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada betonarme kirişlerde eğilme donatısı olarak çelik halat kullanılması deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir.

Çelik halatlar öngermeli veya artgermeli olarak önüretimli veya yerinde dökme betonarme yapı elemanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada çelik halatlara herhangi bir kuvvet uygulanmadan, betonarme kirişlerde eğilme donatısı olarak kullanılması araştırılmıştır. Betonarme kirişlerde aynı kesitte aynı mekanik özelliklere sahip donatılar kullanılır. Burada ise aynı kesitte hem çelik halat hem de geleneksel betonarme çeliği kullanılmıştır. Çelik halatlar ile geleneksel betonarme çelikleri gerilme şekildeğiştirme özellikleri bakımından farklılıklar gösterir. Çelik halatların akma ve çekme dayanımları, kullanılan geleneksel betonarme çeliğinin akma ve çekme dayanımlarından yaklaşık 4 kat daha yüksektir.

Çelik halatlar ve geleneksel betonarme çeliklerinin aynı kiriş kesitinde kullanılmasının davranışa olan etkisini araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma yürütülmüştür. 3 adet kirişi temsil eden, 1 adet kolonu temsil eden 4 numune hazırlanmıştır. İlk numunede sadece geleneksel betonarme çeliği kullanılmıştır. Diğer numunelerde hem çelik halat hem de betonarme çeliği kullanılmıştır. Çelik halatlı numunelerdeki çekme donatısı miktarı, geleneksel betonarme çeliği ile donatılandırılmış numunenin çekme kuvveti ile eşdeğer olacak şekilde belirlenmiştir. İlk üç numune 4 nokta eğilme testine, son numune 3 nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. İlk 3 numune monotonik, son numune çevrimsel olarak yüklenmiştir. Numunelerin hiçbirine normal kuvvet etkililmemiştir. Yapılan deneylerde kuvvet yerdeğiştirme, moment yerdeğiştirme eğrileri çıkarılmıştır. Deneyler süresince kirişlerde oluşan çatlaklar da gözlenerek, hasar oluşumları incelenmiştir. Deneyde elde edilen moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme sonuçları kullanılarak kirişlerin moment kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmanın doğrulanması için analitik bir çalışma yürütülmüştür. Kiriş numuneleri Vector5 programında modellenerek statik itme analizi yapılmıştır. İlk olarak sadece geleneksel betonarme çeliği içeren ilk numune için analitik çözümleme yapılarak, beton ve çelik malzeme modelleri doğrulanmıştır. Daha sonra aynı malzeme modellerine çelik halatın malzeme modeli eklenerek diğer numuneler için de modelleme yapılarak analitik sonuçlar elde edilmiştir. Malzeme modellerinde çelikler için çekme testi sonucu elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Beton için ise Vector5 programında yer alan malzeme modeli kullanılmıştır.

Deney sonuçları hem kendi içinde hem de analitik çözümleme sonuçları ile karşılaştırılarak, çelik halatların geleneksel betonarme çelikleriyle beraber kullanıldığında davranışa olan etkileri ortaya konmuştur.



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF STEEL STRANDS ON STRUCTURAL BEHAVIOR IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

SUMMARY

In this study, the use of steel strands as bending reinforcement in reinforced concrete beams is examined experimentally and theoretically. These strands are generally used in pre-cast or in situ cast reinforced concrete structural elements as prestressed or poststressed.

It is not common for steel strands to be used in reinforced concrete beams without applying any force. In the literature, there is a few of experimental or analytical studies on this subject. The studies in the literature research are generally the same type of reinforcement used in the same section. In this work, both the steel strands and the conventional reinforcements are used in the same section as tensile reinforcements. In this respect, this study differs from the studies in the literature. Since the aim of this study is to investigate the effect of high strength bending reinforcement on the behavior of reinforced concrete beams, the scope of the study is expanded and the bending reinforcements with different mechanical properties having high strength to affect the capacity of the reinforced concrete sections are added to the literature research.

It has been investigated to use steel strands as bending reinforcement in reinforced concrete beams without applying any force to the steel strands. Reinforced concrete beams are equipped reinforcements which have the same mechanical properties. Steel strands and conventional reinforcements differ in their stress strain properties. The yield and tensile strength of the steel strand are approximately 4 times higher than the conventional reinforcement's yield and tensile strength .

In this study, S420 reinforced concrete steel is used as bending and shear reinforcement as conventional reinforcement. The diameters of the reinforcements are 18 and 12 for longitudinal reinforcement and 8 mm for shear reinforcement respectively. Tensile testing is performed for 9 rebar sample, 3 for each diameter. Stress strain graphs are obtained and mechanical properties of rebars are determined. Strain values are read up to 7 percent in order to avoid physical damage to the extensometer. After 7 percent strain, the extensometer is removed and the tensile test is continued until the rebars reached their tensile strength. The yield and tensile stresses are determined 480 MPa and 560 MPa respectively. Concrete beam samples used in the experiment are casted with C30 concrete. Two concrete cube samples which have 150 mm of edge size are prepared to determine the compressive strength of the concrete. The compressive strengths obtained are 22-day concrete compressive strengths and converted from cubic compressive strength to cylindric compressive strength. The cubic compressive strengths are determined for two cube samples 32.2 MPa and 30.6 MPa respectively. Cylindrical compressive strength is calculated as 24 MPa. 0.5 inch diameter steel strands are used as a tensile reinforcement. Tensile tests are performed for a total of 3 steel strand samples. Strains are read up to 1 percent in order to avoid physical damage to the

extensometer. Extensometer is removed after 1 percent. After 1 percent strain, the stress strain curve is approximately drawn. The tensile test is terminated when the steel strands lost their helix structure and reached tensile strength. Maximum strain is determined as 6.5 percent. The yield and tensile stresses are determined 1730 Mpa and 1960 MPa respectively.

An experimental study is conducted to investigate the effect of two different mechanical properties on the same reinforced concrete beam section. 4 reinforced concrete samples representing 3 beams and 1 column are prepared. Beams and column are numbered as 1, 2a, 2b and 3. Only conventional reinforcements are used in the first sample. In other samples both steel strands and conventional reinforcements are used. The amount of tensile reinforcement in the beams with steel strand is determined so that the tensile forces are the equal as the tensile force of the beam equipped with conventional reinforced concrete beam. According the equal tensile forces it is expected that beams must have close moment capacities. Moment capacity of the beams are compared by using the moment displacement results. The first three samples are subjected to the 4 point bending test and the final sample is subjected to 3 point bending test. The first 3 samples are monotonically, the final sample is cyclically loaded. None normal force is applied to any of the sample. In the experiments, force displacement and moment displacement curves are obtained.

During the experiments, cracks occurred in the beams are observed and damage occurrences are examined. The first bending cracks on 1, 2a and 2b beams occurred at loads of 18 kN, 22 kN and 17 kN respectively. It is observed that the cracks in the conventional sample are more frequent and narrow than those in the beam samples with steel strand. In the conventional sample, bending cracks are concentrated in the middle region. The cracks in the beams with steel strands have propagated faster. When the steel strands are used together with conventional reinforced concrete steels, the bond losses of the beams with steel strands prevents beams to reach the desired moment capacity and crack pattern.

An analytical study is conducted to verify the experimental study. Beam cross sections are modeled in Vector5 program, then pushover analysis is done. Vector5 is a computer program which performs nonlinear cross-sectional analysis in 2D systems including beam, column, shear wall and calculate for temperature, static and dynamic loading conditions. Initially, only the first sample of conventional reinforced concrete steel is used for analytical analysis and material models for concrete and conventional reinforcements are verified. Analytical results are obtained by modeling for other samples with the same material models verified by the first analysis. Experimental results are compared with analytical analysis results and the behavior of reinforced concrete beams are investigated. The effects of the steel strand on behavior of the reinforced concrete beams when used with conventional reinforcements have been demonstrated.

In the experiments, it is observed that steel strands could not reach desired strains and stresses due to slip and bond loss. For this reason, the moment capacity of the beams with steel strand is 40 percent less than that the beams with conventional reinforcements.

In the analytical study, static pushover analysis is performed for all beams. In the comparisons the pushover and experimental results are not close to each other. As it is seen in the comparison of the experiment results, a new tensile stress value is calculated for the steel strand due to the bond loss. This stress value is called as

average stress. The average stress for yield and tensile stress of steel strands are defined to Vector5 program and static pushover analyzes are repeated. The results are closer to the experimental results. In other words, it is observed that the steel strands do not work as expected. This result is confirmed by the experiment and the analytical model.

Test samples are prepared outside and brought to the test area. Therefore, strain gauges could not be attached to reinforcements. In order to calculate the rotation and curvature values, transducers are placed on the concrete side surfaces at the midpoints of the beams. Data obtained from transducers were not sufficient to calculate the rotation and curvature values. Therefore, moment curvature or moment rotation expressions could not be used in this study. The comparison of the experimental results and analytical results is performed by means of relative displacement in the middle of the beam and moment.



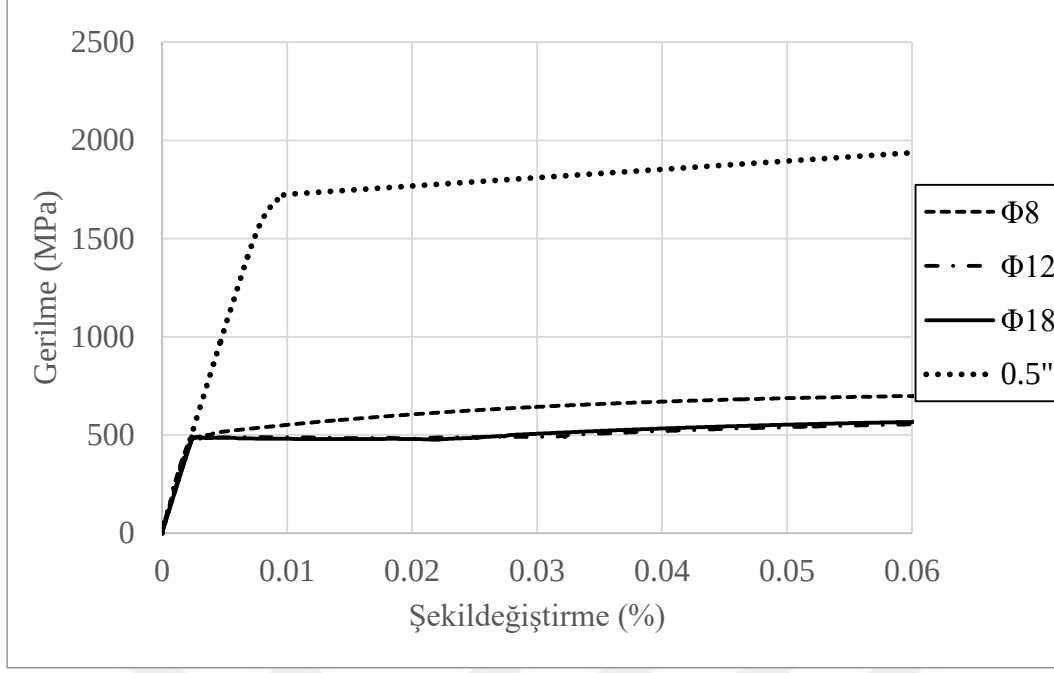
1. GİRİŞ

Bu bölümde tezin yazılma sebebi, önceki çalışmalar ve bu çalışmanın nasıl yapıldığı hakkında bilgiler verilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Betonarme, günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan, beton ve çeliğin beraber kullanılmasıyla oluşan kompozit malzemedir. Beton yüksek basınç dayanımına, düşük çekme dayanımına sahiptir. Çelik ise hem basınç hem de çekmede yüksek dayanıma sahiptir. Bu iki farklı gerilme şekildeğiştirme özelliklerine sahip malzemenin beraber çalışmasıyla daha yüksek dayanıma sahip bir malzeme elde edilmektedir. Bu çalışmada geleneksel donatı olarak bahsedilecek S420 çeliği için karakteristik akma gerilmesi 420 MPa kabul edilmektedir. Çelik halatlar ise 1700 MPa karakteristik akma dayanımına sahiptir. Hem S420 çeliği hem de çelik halatı için çekme testi yapılmış ve gerilme şekildeğiştirme özellikleri belirlenerek Şekil 1.1’de verilmiştir. Şekil 1.1’de çapları 8, 12 ve 18 olan S420 çelikleri ile çapı 0.5 inç olan çelik halatın gerilme şekildeğiştirme özellikleri görülmektedir. Analitik çözümde geleneksel betonarme çeliği ve çelik halatı çekme deneylerinden elde edilen gerilme şekildeğiştirme verileri kullanılmıştır. Numunelerdeki donatı miktarları eşdeğer çekme kuvveti verecek şekilde seçilmiştir.

Betonarme elemanlarda çekme gerilmelerini karşılamak amacıyla donatı olarak herhangi bir kuvvet verilmeden çelik halatların kullanılması durumunda betonarme kirişlerin davranışı araştırma konusu olarak yer almaktadır. Geleneksel olarak kullanılan donatılara nazaran daha yüksek akma dayanımına sahip çelik halatların geleneksel betonarme çelikleriyle beraber betonarme kirişlerde kullanılması durumunda kirişlerin yapısal davranışı irdelenmiştir. Deneysel çalışma analitik olarak da modellenerek, kiriş davranışları incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda çelik halatların betonarme kirişlere ve eksenel yükün ihmal edildiği kolonlarda dayanıma katkısı deneysel ve analitik çalışmalarla ortaya konmuştur.



Şekil 1.1 : Çelik halat ve S420 çeliği için gerilme şekil değiştirme değerleri.

1.2 Literatür Araştırması

Çelik halatların herhangi bir kuvvet verilmeden betonarme kirişlerde kullanılması pek yaygın bir konu değildir. Literatürde de bu konuyla ilgili deneysel veya analitik çalışma eksikliği bulunmaktadır. Literatür araştırmasındaki çalışmalar genellikle aynı kesitte aynı tip donatıların kullanıldığı çalışmalardır. Bu çalışma bu açıdan literatür araştırmasında yer alan çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu çalışmada amaç yüksek mukavemete sahip eğilme donatılarının betonarme kirişlerin davranışına etkisi araştırıldığından, araştırma kapsamı biraz daha genişletilerek betonarme kesitlerin taşıma kapasitelerine etki edecek yüksek dayanıma sahip farklı mekanik özelliklere sahip eğilme donatılarının kullanıldığı çalışmalar literatür araştırmasına eklenmiştir.

1.2.1 Arsava, T. tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışması

Bu çalışmada öngerme donatısı olarak kullanılan halatların öngerme işlemi uygulanmadan betonarme kirişlerde eğilme donatısı olarak kullanılması araştırılmıştır. Kesildikten sonra oluşan artık halatların betonarme elemanlarda kullanılıp kullanılmayacağı üzerine üreticilerden gelen istek üzerine, öngerme halatlarının geleneksel donatı gibi kullanıldığında betonarme kirişlerinin performansı incelenmiştir. Öngerme halatlarının geleneksel donatıya göre farklı gerilme-şekil değiştirme davranışı vardır ve daha yüksek akma dayanımına sahiptir. Bu

özeliklerini araştırmak için öngerme halatlarıyla donatılandırmış 6 adet, geleneksel donatı ile donatılandırılmış 7 adet betonarme numune olmak üzere toplamda 13 kiriş numunesi 2 noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmanın yanı sıra farklı kesitler ve farklı malzeme özelliklerinin tanımlandığı analitik bir çalışma da yapılmıştır. Deneysel ve analitik çalışmanın sonucunda, betonarme kiriş elemanlarının moment kapasiteleri ve sahip omaları gereken minimum süneklik seviyeleri ile ilgili Amerikan Beton Enstitüsü (ACI-318) ve TS500 yönetmeliklerinde belirtilen yöntemlerin yüksek mukavemetli öngerme halatlarıyla donatılandırılmış betonarme kiriş elemanları için uygulanabilirliği incelenmiştir. Eşdeğer gerilme bloğu kullanılarak, donatılar elastik ve elasto-plastik olarak iki eğri olarak tanımlanarak, çelik elastisite modülü 200000 MPa ve çelik akma dayanımı 1700 MPa alınarak, maksimum donatı oranı için verilen ifade aşılmadan donatı miktarları seçilirse öngerme halatlarının kullanılabilecekleri belirtilmiştir.

1.2.2 Marnie B. Giduquio, Min-Yuan Cheng and Leonardus S. B. Wibowo tarafından yapılan çalışma

Bu çalışma betonarme eğilme elemanlarında yüksek mukavemetli donatıların kullanılmasını incelemektedir. Geleneksel olarak kullanılan Grade 60 çeliği yerine Grade 100 ve SD685 yüksek mukavemetli çeliklerinin monotonik yükleme altında betonarme kesitlerde kullanılması araştırılmıştır. Geleneksel Grade 60 çeliğinin akma dayanımı 414 MPa olup, her iki yüksek mukavemetli çeliğin de akma dayanımları 690 MPa'dır. İki yüksek mukavemetli çeliğin en önemli farklarından biri SD685 çeliğinin daha belirgin akma bölgesine sahip olmasıdır. Deney sonuçları ACI yapı şartnamesinin her iki yüksek mukavemetli çeliğin kullanılması durumunda da geçerli olduğunu göstermiştir. En yüksek yerdeğiştirmeler bakımından yüksek mukavemetli çelikler ile geleneksel Grade 60 çeliği eşdeğer sonuçlar göstermiştir. Betonarme kesitin basınç bölgesinde, beton örtüsü döküldükten sonra basınç donatısının burkulması betonarme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Grade 60 çelikleri için basınç donatılarının burkulmasını önlemek amacıyla etriye aralıkları en küçük basınç donatısının çapının 8 katı ile sınırlandırılmıştır. Yüksek mukavemetli çelikler için de basınç donatılarının erken burkulmalarını önlemek amacıyla bu sınır koşulu önerilmiştir.

1.2.3 Felicia and Susanto Teng tarafından yapılan çalışma

Bu çalışma yüksek mukavemete sahip donatıların betonarme kesitlerde kullanılmasını araştırmaktadır. Kullanılan çelik miktarının azalması, malzeme ve işçi masraflarından tasarruf yüksek mukavemetli çeliklerin avantajlarındandır. İnşaat sektöründe yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılmasına başlanmasına rağmen, yapı şartnameleri bu konuda eksiklikler içermektedir. 500 MPa'dan yüksek mukavemete sahip çeliklerin Eurocode2 şartnamesine göre eğilme ve kesme performansları malzeme özelliklerine ve mevcut deneysel verilere göre incelenmiştir. Eurocode2'ye göre yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılması durumunda betonarme elemanların mukavemetlerinin yüksek hesaplandığı bulunmuştur. Eurocode2'nin tasarım yönteminin yüksek mukavemetli çelikler için güvenli olması için basit tasarım önerisi verilmiştir. Bu öneri, Eurocode2 tasarım denklemlerinde çelik mukavemetleri için çekme, basınç ve kesme durumları için sınır değer dayanımlarını belirtmektedir.

1.2.4 Jeffrey M. Rautenberga, Santiago Pujola, Hooman Tavallalib, Andres

Lepageb tarafından yapılan çalışma

Bu çalışmada yüksek mukavemete sahip çelikler ile donatılandırılmış betonarme kolonların performansları incelenmiştir. Mevcut Amerikan yapı şartnameleri betonarme kolonlarda boyuna donatı olarak kullanılabilecek çeliklerin akma dayanımlarını sınırlandırmaktadır. Bu makalede bu sınırlandırmaların sebepleri tekrar gözden geçirilmiştir. Kullanılan donatı miktarını azaltmak için akma dayanımları 550 MPa'dan fazla olan donatılar kullanıldığında betonarme elemanların deprem yüklerine karşı dayanımları araştırılmıştır. Analitik çözümlemeden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen veriler dengeli durumun altındaki eksenel yüklere sahip kolonlar için, boyuna donatı miktarının, dayanımın azalmasıyla ve betonarme kesitin eğrilliğini sınırlandırma ile ilişkili olmadığını göstermek için kullanılmıştır. Analitik ve deneysel sonuçlar, bir kolondaki donatı miktarının akma gerilmesindeki artış ile doğrudan orantılı olarak azaltılabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma, düşük eksenel yüke sahip kolonlar için, yüksek dayanımlı donatıların kullanılmasının, betonarme kolonlarda performansta kritik sonuçlar doğurmadan kullanılan donatı miktarını azaltacağı hipotezini desteklemektedir.

1.2.5 D. J. Kelly, A. Lepage, D. Mar, J. I. Restrepo, J. C. Sanders, and A.W.

Taylor tarafından yapılan çalışma

Amerikan yapı şartnameleri, betonarme çerçeveler ve betonarme perde duvarlar için kullanılan donatıların akma dayanımlarını 60 ksi (414 MPa) ile sınırlandırmıştır. Bu çalışmada yüksek dayanımlı donatıların depreme dayanıklı yapılarda kullanılması çalışılmıştır. Çalışmanın esas amacı, akma dayanımları 60 ksi'den daha büyük olan çeliklerin kullanılmasının performansa etkilerini incelemek ve tasarım gereksinimlerindeki değişiklikler ve kullanılacak donatı için yeni standartlar getirmektir. Özellikle ASTM A706 Grade 80 çeliğinin kullanımı incelenmiş ve Amerikan şartnamesi ACI 318'e göre çok az değişiklik ile kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, Grade 100 ve 120 çeliklerinin kullanılmaları için tam bir öneri yapılmadan önce ek araştırma yapılması gerektiği belirlenmiştir. Bu makalede, yüksek dayanımlı çeliklerin gerekli mekanik özellikleri, betonarme elemanların deformasyon kapasiteleri, betonarme çerçevelerdeki kolon kiriş birleşimlerindeki en küçük derinlik, boyuna donatıların burkulmalarını engelleyecek enine donatı aralıkları ve gerekli bindirme boyları yüksek dayanımlı donatıların kullanıldığı betonarme elemanlar için incelenmiştir.

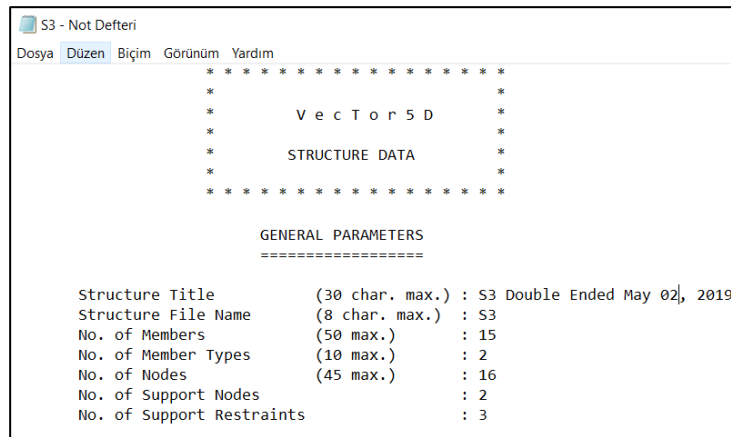
1.2.6 M. Dawood, H Seliem, Dr. T. Hassan, Dr. S. Rizkalla tarafından yapılan çalışma

Bu çalışmada, betonarme kirişlerde MMFX mikrokompozit donatılarının kullanılması incelenmiştir. Betonarme yapılarda ve köprülerde çelik donatıların korozyonu tüm dünyada ulaşım alanında karşılaşılan önemli bir sorundur. Amerika Birleşik Devletleri'nde bakım ve değişim maliyetleri milyarlarca doları bulmaktadır. Sıcak iklimlerdeki tuzlu ortam ve soğuk bölgelerde çözücü tuzların kullanılması, korozyon nedeniyle köprü tabliyelerinin sürekli bozulmasına neden olmuştur. Bu nedenler korozyona dayanıklı MMFX mikrokompozit donatıların kullanımı da dahil olmak üzere koruyucu önlemlerin sürekli gelişimini başlatmıştır. Bu makale betonarme kirişler ve döşemeler için eğilme donatısı olarak MMFX çelik kullanımı için tasarım yöntemleri verir. MMFX donatıları ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışı, çatlamış kesit kabulü yapılarak analiz edilmiştir. MMFX ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışı, geleneksel Grade 60 çelikleri ile donatılan kirişlerin davranışlarıyla karşılaştırılmıştır. Denge ve uyumluluk

ilkeleri kullanılarak donatı oranının MMFX ile donatılandırılmış betonarme kirişlerin dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm yükleme aralığı boyunca MMFX çeliği ile güçlendirilmiş betonarme elemanların süneklikleri değerlendirilmiştir. Çekme ve basınç kontrollü güç tükenmesi durumları için tasarım sınırları önerilmiştir. Son zamanlarda MMFX çelik kullanılarak inşa edilen betonarme köprülere ek olarak bu makalede, Kuzey Carolina'daki beton tabliyelerinde tamamen MMFX çeliği kullanılmış bir köprünün inşaat yöntemleri tartışılmıştır.

1.3 Yöntem

Deneyssel olarak yürütülen bu çalışma kapsamında 3 adet kirişi temsil eden ve 1 adet kolonu temsil eden numune hazırlanarak yükleme testine tabi tutulmuştur. Numuneler 1, 2a, 2b ve 3 olarak adlandırılmışlardır. Numune 1 yalnızca geleneksel betonarme çeliği içermektedir. Diğer numunelerde hem çelik halat hem de geleneksel betonarme çeliği kullanılmıştır. 2a ve 2b numuneleri tipik numunelerdir. 1, 2a ve 2b numunelerine dört nokta monotonik eğilme testi, 3 numunesine ise üç nokta çevrimsel eğilme testi yapılmıştır. Bütün numuneler için orta nokta kuvvet açıklık ortası görelî yerdeğiştirme değeri okunmuştur. Normal kuvvetin etkisi araştırılmadığından, deney numunelerine eksenel kuvvet uygulanmamıştır. Deneyler süresince numunelerde oluşan çatlaklar ve çatlak ilerlemeleri görsel olarak incelenmiştir. Deneyssel çalışmayı desteklemek amacıyla analitik bir çalışma da yapılmıştır. Deney düzenekleri sonlu elemanlar yöntemiyle matematiksel olarak modellenmiştir. Deney sonuçları ile analitik hesap sonuçları karşılaştırılmıştır. Analitik modelleme için Vector5 isimli program kullanılmıştır. Şekil 1.2'de Vector5 programında analizle ilgili verilerin girildiği not defteri görülmektedir.



Şekil 1.2 : Vector5 veri girişinin yapıldığı not defterinin girişı.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde deneyde kullanılan geleneksel betonarme çeliği, beton ve çelik halat hakkında bilgiler verilmiştir. Donatılar için yapılan çekme testleri ve beton için yapılan basınç deneyleri sonuçları bu bölümde yer almaktadır.

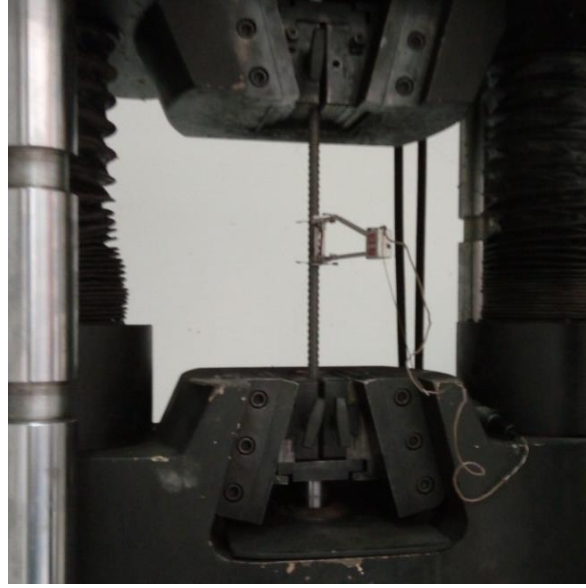
2.1 Betonarme Çeliği

Betonarme yapılarda kullanılacak donatı özellikleri TS708’de verilmiştir. TS500’e göre donatı çeliğinin elastisite modülü 200000 MPa’dır. Türkiye’de kullanılan diğer donatılar için mekanik özellikler Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bu çalışmada geleneksel donatı olarak S420 betonarme çeliği eğilme ve kesme donatısı olarak kullanılmıştır. Deneyde kullanılan çaplar sırasıyla boyuna donatılar için 18 ve 12, kesme donatıları için de 8 mm’dir. 3 çap için de 3’er adet olmak üzere toplamda 9 adet donatı için çekme testi yapılmıştır. Gerilme şekildeğiştirme grafikleri elde edilmiştir. Ekstansometrenin fiziki olarak zarar görmemesi amacıyla şekildeğiştirme yüzde 7’ye kadar okunmuştur. Yüzde 7 şekildeğiştirmeden sonra ekstansometre çıkarılarak numuneler çekme dayanımlarına ulaşıncaya kadar çekme testi devam ettirilmiştir.

Çizelge 2.1 : Türkiye’de kullanılan donatı çeliklerinin mekanik özellikleri.

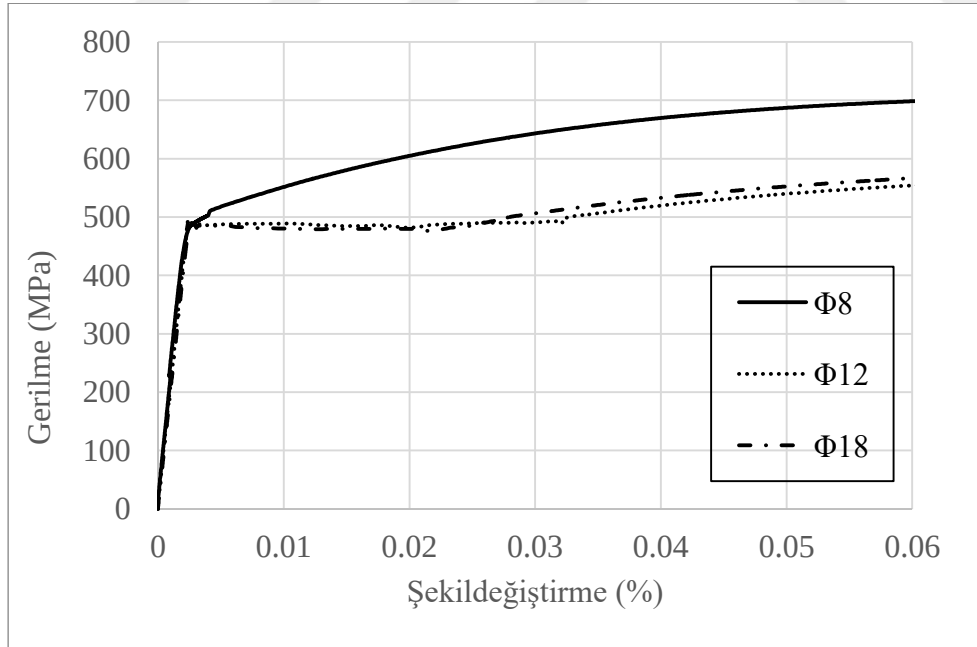
Mekanik Özellikler	Donatı Çubukları			Hasır Donatı		
	Doğal Sertlikte			Soğukta İşlem Görmüş		
	S220a	S420a	S500a	S 420b	S500bs	S500bk
Minimum akma dayanımı f_{yk} (MPa)	220	420	500	420	500	500
Minimum kopma dayanımı f_{su} (MPa)	340	500	550	550	550	550
$\phi \leq 32$ Minimum kopma uzaması ϵ_{su} (%)	18	12	12	10	8	5
$32 < \phi \leq 50$ Minimum kopma uzaması ϵ_{su} (%)	18	10	10	10	8	5

Çalışma kapsamında kullanılan geleneksel betonarme çelikleri için çekme testleri yapılmıştır. Kullanılan bütün donatılar için 3’er tane 1’er metrelik numune hazırlanmıştır. Bütün numuneler için gerilme şekildeğiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 2.1’de geleneksel betonarme çelikleri için yapılan çekme testi görülmektedir.



Şekil 2.1 : Betonarme çeliği malzeme çekme deneyi.

Şekil 2.2’de çekme testi sonucunda elde edilen gerilme şekildeğiştirme grafikleri verilmiştir. Buna göre donatıların elastisite modüllerinin 200000 MPa olduğu, akma dayanımlarının 480 MPa olduğu belirlenmiştir. 12 ve 18 çaplı donatılarının belirgin bir akma platolarının olduğu görülmüştür. Akma platosunun ardından pekleşme gerçekleşmiştir. Çizelge 2.2’de 9 numunenin mekanik özellikleri verilmiştir.



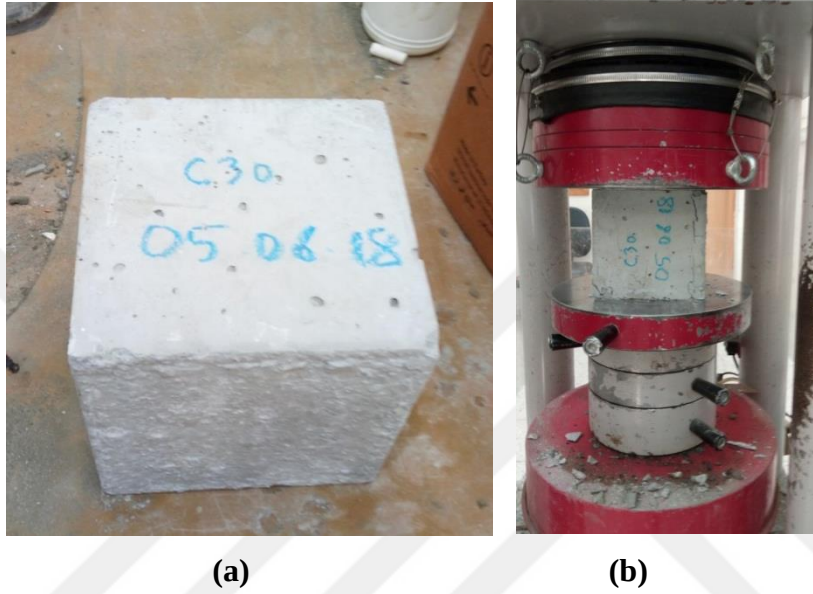
Şekil 2.2 : Betonarme çeliği deneysel gerilme-şekildeğiştirme grafiği.

Çizelge 2.2 : Betonarme çeliği çekme deneyi sonuçları.

	Anma Çapı (mm)	Ölçüm Çapı (mm)	Kütle (Kg/m)	Akma Sınırı (Re)		Çekme Dayanımı (Rm)		Çekme Akma Oranı	Re/Re.nom	Kopma Uzama Oranı %	Anma Kütlesi Kg/m min	Anma Kütlesi Kg/m max	Elastik Modülüs MPa	Çekme Uzaması (cm)	İlk Boy (cm)	Uzama%
				kN	Mpa	kN	Mpa									
1	8	8.0	0.394	25.8	513	35.8	712	1.39	1.22	20%	2.358	2.581	205000	41.80	40	4.5
2	8	8.0	0.395	25.9	515	35.8	712	1.38	1.23	20%	2.358	2.581	214400	42.00	40	5.0
3	8	8.0	0.394	25.5	507	35.6	708	1.40	1.21	21%	2.358	2.581	202500	42.70	40	6.8
4	12	12.0	0.880	57.9	512	68.5	606	1.18	1.22	25%	1.155	1.264	203900	68.10	60	13.5
5	12	12.1	0.905	58.3	515	67.4	596	1.16	1.23	28%	1.155	1.264	209100	68.20	60	13.7
6	12	12.1	0.898	52.3	462	62.8	555	1.20	1.10	29%	1.155	1.264	206800	68.50	60	14.2
7	18	17.8	1.950	121.3	477	148.4	583	1.22	1.13	27%	0.848	0.927	196100	101.10	90	12.3
8	18	17.8	1.951	121.9	479	148.5	584	1.22	1.14	27%	0.848	0.927	199500	102.80	90	14.2
9	18	17.8	1.946	121.7	478	148.5	584	1.22	1.14	26%	0.848	0.927	207200	102.60	90	14.0

2.2 Beton

Deneyde kullanılan betonarme kiriş numuneleri C30 betonuyla dökülmüştür. Deneyde kullanılan betonun basınç dayanımının belirlenmesi için 2 adet betonarme küp numunesi hazırlanmıştır. Şekil 2.3'te görülen küp numunenin kenar ebatı 150 mm'dir.



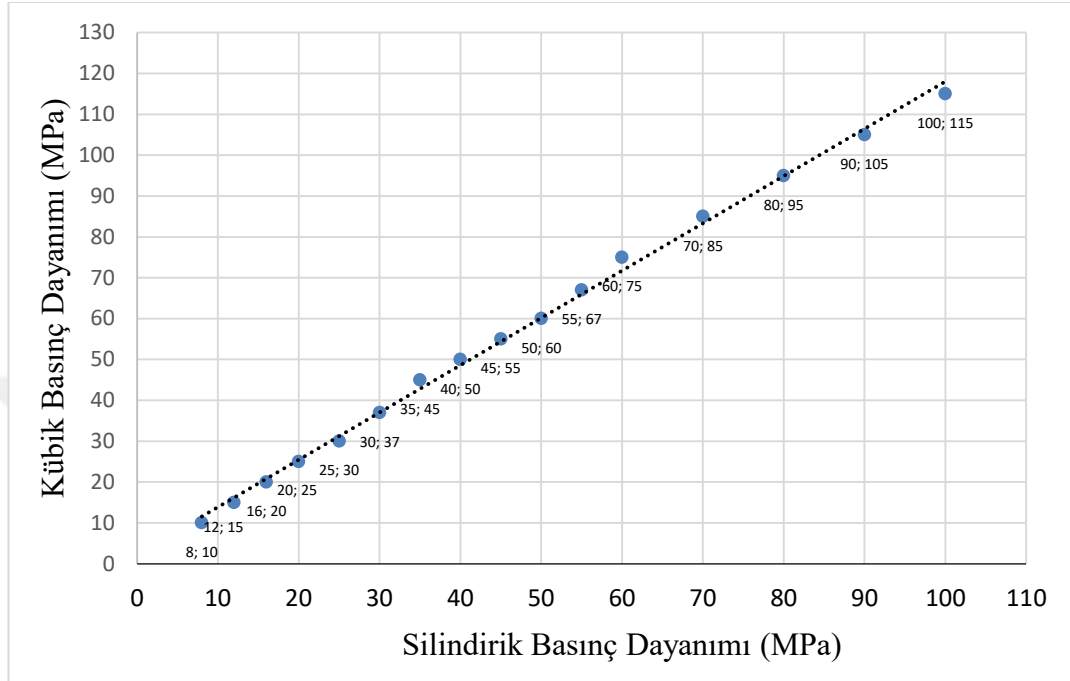
Şekil 2.3 : (a) Küp numune (b) Beton basınç deneyi.

Numuneler 5.06.2018 tarihinde hazırlanmış ve basınç testi 27.06.2018 tarihinde yapılmıştır. Elde edilen basınç dayanımları 22 günlük beton basınç dayanımlarıdır. Basınç dayanımı değerleri küp numune dayanımından silindir basınç dayanımına çevrilmiştir. Analitik çözümde silindirik basınç dayanımı kullanılmıştır. Çizelge 2.3'te beton basınç testi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Beton basınç deneyi sonuçları.

Numune Cinsi: 150*150*150 küp					
Beton Sınıfı: C30					
No	Döküm Tarihi	Deney Tarihi	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Kübik Basınç Dayanımı (MPa)
1	5.06.2018	27.06.2018	22	725.3	32.2
2	5.06.2018	27.06.2018	22	687.8	30.6

Şekil 2.4'te Türkiye'de kullanılan beton sınıfları için kübik ve silindirik basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir. Türkiye'de kübik basınç dayanımının silindirik basınç dayanımına çevrilmesi için deneysel olarak geçerliliği olan herhangi bir katsayı kullanılabilmektedir.



Şekil 2.4 : TS500'de yer alan beton basınç dayanımları.

Çizelge 2.4'te verilen ortalama silindirik basınç dayanımları 4 farklı yaklaşımla hesaplanmıştır. Analitik sonuçları kırış eğilme deneyi sonuçlarına en yaklaştıran değer beton basınç dayanımı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 2.4 : Kübik beton basınç dayanımının silindirik numune dayanımına çevrilmesi.

	Kübik Dayanım (Mpa)	Silindirik Dayanım (Mpa)	Ortalama Silindirik Dayanım (Mpa)
Day. K.W. 1996	32.2	28.65	27.8
Day. K.W. 1996	30.6	26.94	
Shanga.Dhir. 1976	32.2	25.29	24.6
Shanga.Dhir. 1976	30.6	23.86	
Monday. Dhir. 1984	32.2	24.20	23.5
Monday. Dhir. 1984	30.6	22.83	
TS-EN 206	32.2	25.80	25.1
TS-EN 206	30.6	24.40	

2.3 Çelik Halat

Çelik halat olarak öngerme donatısı kullanılmıştır. Öngerme donatısı TS 3233'e göre tel, toron, çubuk ve bunların her birinden teşkil edilen grupların oluşturduğu kablo şeklinde olabilir. Bu çalışmada çelik halat olarak 0.5 inç çapında toronlar kullanılmıştır.

2.3.1 Öngerme telleri

Çizelge 2.5'te mekanik özellikleri verilen öngerme telleri kaplamasız, gerilmeden arınmış, orantılılık sınırları yükseltilmiş tellerdir. Çapı çok ufak olanların dışındaki teller yan yüzleri nervürlü veya profilli olarak imal edilmektedirler. Çapları arttıkça minimum kopma dayanımları azalmaktadır. Minimum akma limitleri kopma dayanımlarının yüzde 80'idir. Kopmada birim uzamaları yüzde 4 ve elastisite modülleri 200000 MPa'dır.

Çizelge 2.5 : Öngerme teli mekanik özellikleri.

Anma Çapı (mm)	Minimum Kopma Dayanımı (MPa)	Minimum Akma Limit	Kopmada Birim Uzama (%)	Elastisite Modülü (MPa)
1.5 < çap ≤ 3.0	1800	Kopma dayanımının %80'i	4	2 x 10 ⁵
3.0 < çap ≤ 4.0	1700			
4.0 < çap ≤ 12.0	1500			

2.3.2 Öngerme toronu

Çizelge 2.6'da mekanik özellikleri verilen öngerme toronları iki veya daha fazla telin helis şeklinde üst üste sarılmaları ile edilen donatılarıdır. 7 telli toronlarda, bir telin çevresine konmuş 6 tel, iç tel üzerine helis şeklinde sarılmışlardır. Sargı işlemi fabrikalarda yapılır ve bu esnada teller kalıcı deformasyona uğrarlar. Minimum kopma dayanımları 1600 MPa ve 0.01 birim uzamaya denk gelen minimum akma limitleri kopma dayanımlarının yüzde 85'i kadardır. Kopmada birim uzamaları yüzde 3.5 ve elastisite modülleri 180000 MPa'dır.

Çizelge 2.6 : Öngerme toronu mekanik özellikleri.

Tel Çapı (mm)	Tel Sayısı	Minimum Kopma Dayanımı (MPa)	Minimum Akma Limiti (MPa)	Kopmada Birim Uzama (%)	Elastisite Modülü (MPa)
2 ile 3 2 ile 4	2 veya 3 7	1600 1800	Kopma dayanımının %85'i	3.5	1.8×10^5

2.3.3 Öngerme çubuğu

Çizelge 2.7’de mekanik özellikleri verilen öngerme çubukları çapları 7 ile 32 mm arasında değişen, sıcakta çekilmiş özel alaşımla tek parçadan oluşan çubuklardır. Minimum kopma dayanımları 1000 MPa ve 0.01 birim uzamaya karşı eden akma limitleri 800 MPa kadardır. Kopmada birim uzamaları yüzde 4 ve elastisite modülleri 200000 MPa’dır.

Çizelge 2.7 : Öngerme çubuğu mekanik özellikleri.

Çap (mm)	Minimum Kopma Dayanımı (MPa)	Minimum Akma Limiti (MPa)	Kopmada Birim Uzama (%)	Elastisite Modülü (MPa)
7 ile 32	1000	Kopma dayanımının %90’ı	4	2×10^5

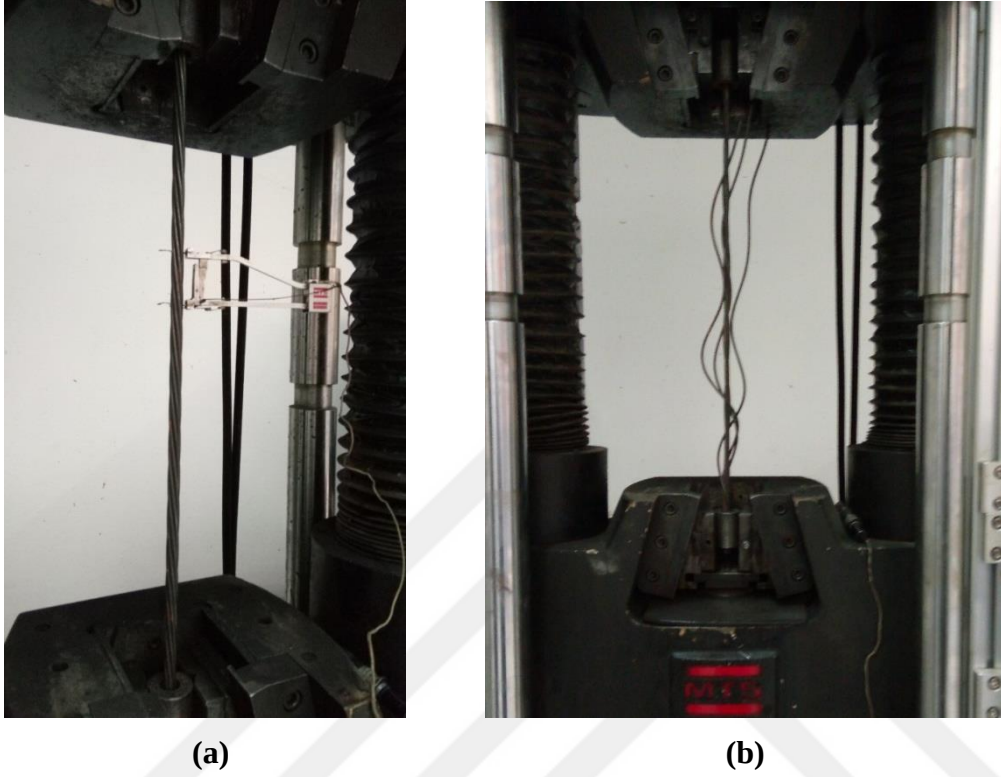
2.3.4 Öngerme kablosu

Öngerme kablosu, tel veya toron veya çubuk gruplarından oluşan germe elemanlarıdır. Mekanik özellikleri bu bakımdan değişiktir. İmal eden firmaların garanti belgelerinde gerekli özellikler belirtilmişlerdir.

2.3.5 Çelik halat çekme deneyi sonuçları

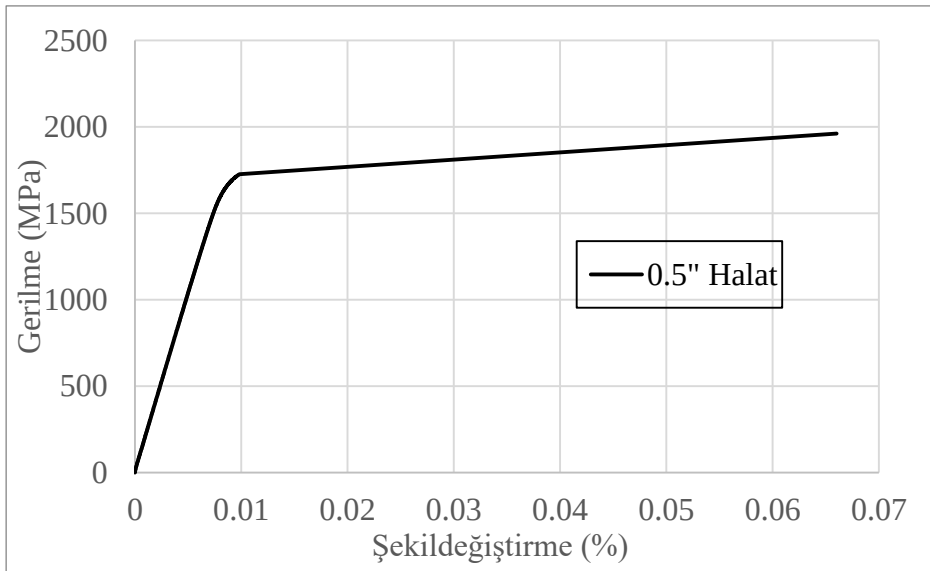
Toplamda 3 adet toron numunesi için çekme deneyi yapılmıştır. Yüzde 1 şekildeğiştirmeye kadar ekstansometre ile şekildeğiştirmeler okunmuştur. Yüzde 1’den sonra ekstansometre çıkarılmıştır. Yüzde 1 şekildeğiştirmeden sonra gerilme şekildeğiştirme eğrisi yaklaşık olarak devam ettirilmişir. Çekme deneyi toronların

sarmal yapılarını kaybedip çekme dayanımına ulaşmasıyla sonlandırılmıştır. Kopma uzama oranları yüzde 6.5 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.5'te çelik halat için yapılan çekme testi görülmektedir.



Şekil 2.5 : (a) Çelik halat çekme deneyi (b) Halatın kopması.

Şekil 2.6'da halat numuneleri için gerilme şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir. Bu değerler analitik çözümde halat malzeme modeli olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.6 : Çelik halat deneysel gerilme şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 2.8’de çelik halatlar için yapılan çekme deneyinin sonuçları verilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre çelik halat elastisite modülü 207000 MPa, akma dayanımı 1730 MPa ve çekme dayanımı 1960 MPa olarak belirlenmiştir. Diğer bilgiler Çizelge 2.8’de verilmiştir. Şekil 2.7’de öngerilme halatının çekme deneyinden önceki hali görülmektedir.

Çizelge 2.8 : Çelik halat çekme deneyi sonuçları.

Numune No	1	2	3	Ortalama
Ağırlık (gr)	544.2	548.5	546.4	546
Boy (cm)	737	742	740	740
İç Çap (mm)	4.25	4.25	4.25	4.25
Dış Çap (mm)	4.130	4.130	4.130	4.130
İlk Boy (cm)	619	631	631	627
Uzama (cm)	40.5	42.7	40.9	41.3
Akma (MPa)	164.7	162.7	163.7	163.7
Elastisite Modülü (MPa)	210400	206000	206000	207000
İlk Boy (ekstansometre)	50	50	50	50
Kütle Boy Endeksi	0.738	0.739	0.738	0.738
Kesit Alanı	94.6	94.6	94.6	94.6
Maksimum Yük (kgf)	18930	18950	18869	18916
Maksimum Yük (kN)	185.7	185.9	185.1	185.3
Çekme Dayanımı (MPa)	1964	1966	1957	1960
Kopma Uzama Oranı	6.5	6.8	6.5	6.6
Akma (MPa)	1742	1721	1731	1730



Şekil 2.7 : Çelik halat.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmayla ilgili bilgiler verilmiştir. Numunelerin enkesit ve boykesit detayları, kullanılan deney düzenekleri, yükleme durumları, deney sonuçları bu bölümde yer almaktadır. Numuneler dışarda üretilerek, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi İTÜ Yapı ve Deprem Laboratuvarı’na getirilmiştir. Dolayısıyla deney esnasında alınacak ölçümler donatılara şekildeğiştirme ölçer yapıştırılmadan yapılmak durumunda kalınmıştır. Deneysel çalışma kapsamında 3 adet kirişi temsil eden ve 1 adet kolonu temsil eden numune hazırlanarak teste tabi tutulmuştur. Numuneler 1, 2a, 2b ve 3 olarak numaralandırılmışlardır. 1, 2a ve 2b numuneleri monotonik, 3 numaralı numune ise çevrimsel yüklemeyle yüklenmiştir.



Şekil 3.1 : Numunelerin deney alanına getirilmesi.

3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney sonuçlarının numuneler üzerine işlenmesi amacıyla numuneler beyaza boyanmıştır. Boyanan numuneler yatayda 25 santimlik 16 eş parçaya, dikeyde ise 25 santimlik 2 eş parçaya siyah kalemle çizilerek bölünmüştür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Numunelerin deney için hazırlanması.

3.2 Deney Numunelerinin Özellikleri

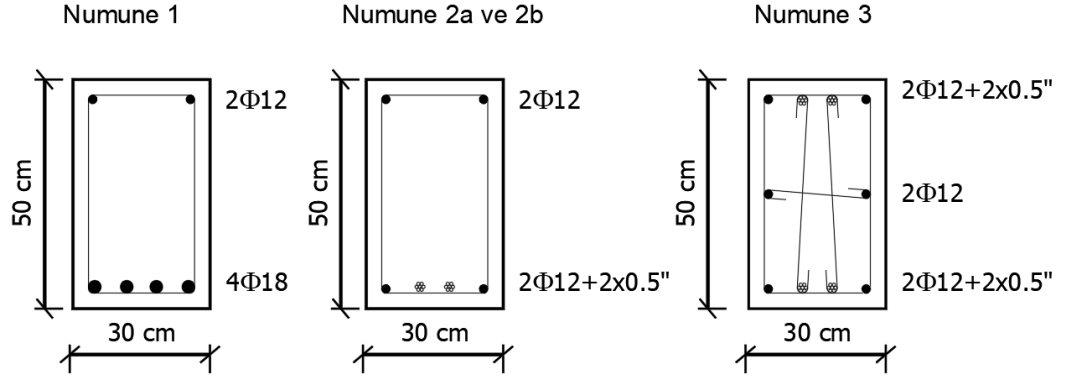
Deneyde kullanılan bütün donatı çeşitleri, çapları ve enkesit alanları Çizelge 3.1’te verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan donatıların çapları ve enkesit alanları.

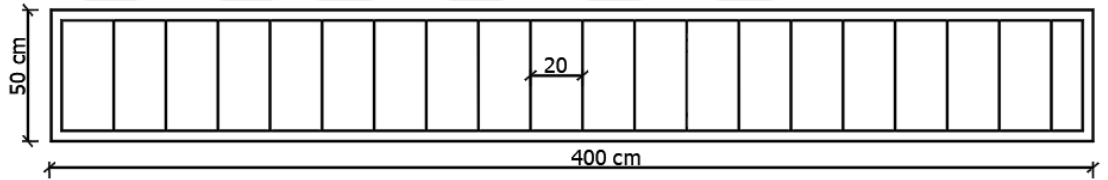
Donatı	Çap	Enkesit Alanı
Çelik halat	0.5” (12.50 mm)	94.6 mm ²
S420	8 mm	50 mm ²
S420	12 mm	113 mm ²
S420	18 mm	254 mm ²

Şekil 3.3’te deney numunelerinin enkesitleri verilmiştir. Numuneler 1, 2a, 2b ve 3 olarak isimlendirilmişlerdir. Bütün numunelerin genişlikleri 30 cm, yükseklikleri 50 cm, boyları ise 4 m olarak teşkil edilmişlerdir (Şekil 3.4). Kesme donatısı olarak bütün kirişlerde 8 mm çapında ve 20 cm aralıklarla etriye konmuştur. 1 numaralı numune yalnızca betonarme çeliği ile donatılmıştır. Altta 18 mm çapında 4 adet donatı üstte 12 mm çapında 2 adet montaj donatısı kullanılmıştır. 2a ve 2b numuneleri tipik olup S420 çeliği ve çelik halat ile beraber donatılmışlardır. Altta 12 mm çapında 2 adet S420 çeliği köşelerde, 2 çelik halat ortada ve üstte 12 mm çapında 2 adet S420 donatısı kullanılmıştır. 3 numaralı numunede altta 12 mm çapında 2 adet S420 çeliği köşelerde, 2 adet çelik halat ortada ve üstte 12 mm çapında 2 adet S420 çeliği köşelerde ve 2 adet çelik halat ortada kullanılmıştır.

Gövde bölgesinde 2 adet 12 mm çapında S420 donatısı koyulmuştur. Şekil 3.5'te numune 1, Şekil 3.6'da numune 2a ve Şekil 3.7'de numune 3 için deney öncesi durumları verilmiştir. Çelik halatlı numunelerdeki çekme donatısı miktarı numune 1 ile eşdeğer çekme kuvvetini verecek şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.3 : Sırasıyla 1, 2a, 2b ve 3 numuneleri enkesitleri.



Şekil 3.4 : Kiriş numuneleri boykesit çizimi.



Şekil 3.5 : Numune 1.



Şekil 3.6 : Numune 2a.

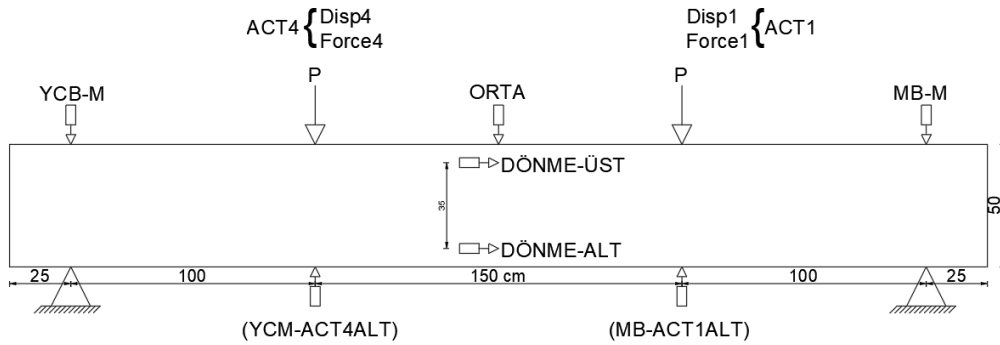


Şekil 3.7 : Numune 3.

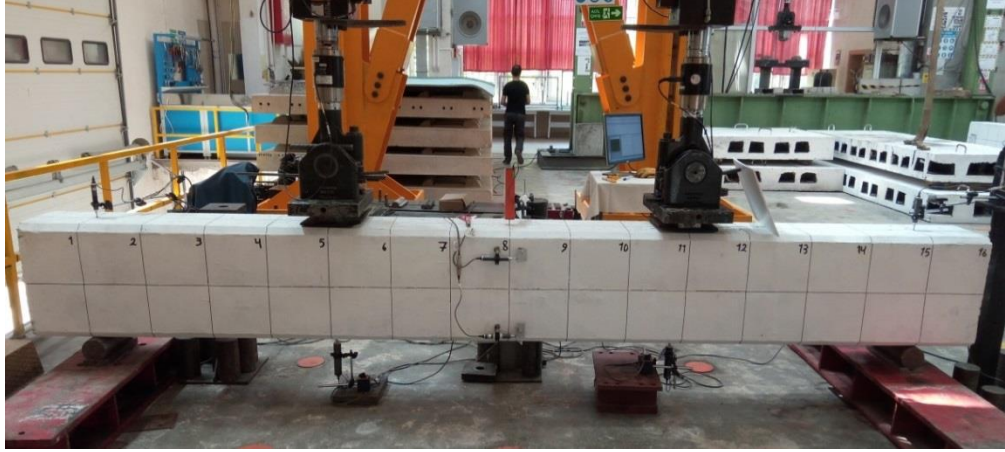
3.3 Deney Düzenekleri

1, 2a ve 2b numaralı numuneleri monotonik, 3 numaralı numune ise çevrimsel yükleme ile yüklenmiştir. Dolayısıyla 2 deney düzeneği kullanılmıştır. 1. deney düzeneğinde mesnet noktalarında, yükleme noktalarında ve orta noktada düşey yerdeğiştirmeler okunmuştur. Kiriş kesitinin orta bölgesinde altta uzama ve üstte kısılma transdüserler ile okunmuştur (Şekil 3.8). 2. Deney düzeneğinde mesnetlerde, mesnetlerden 75 cm uzakta ve orta noktalarda düşey yerdeğiştirmeler okunmuştur. Kiriş kesitinin orta bölgesinde altta uzama ve üstte kısılma transdüserler ile okunmuştur (Şekil 3.10). Betondaki uzamayı ve kısılma ölçen transdüserler betonun dışına yerleştirilmişlerdir. Deney esnasında çatlak oluşumları gözlenerek, çatlak çizelgesi oluşturulmuştur. Deneyde anlık olarak yük yerdeğiştirme grafikleri çıkarılmıştır. Şekil 3.9’da deney düzeneği 1 ve Şekil 3.11’de deney düzeneği 2 verilmiştir.

Deney Şeması 1

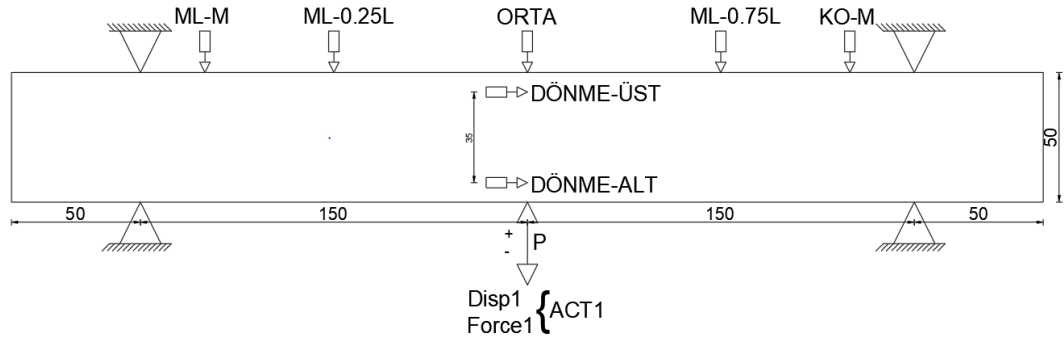


Şekil 3.8 : Numune 1, 2a ve 2b için test düzeneği şematik çizimi.

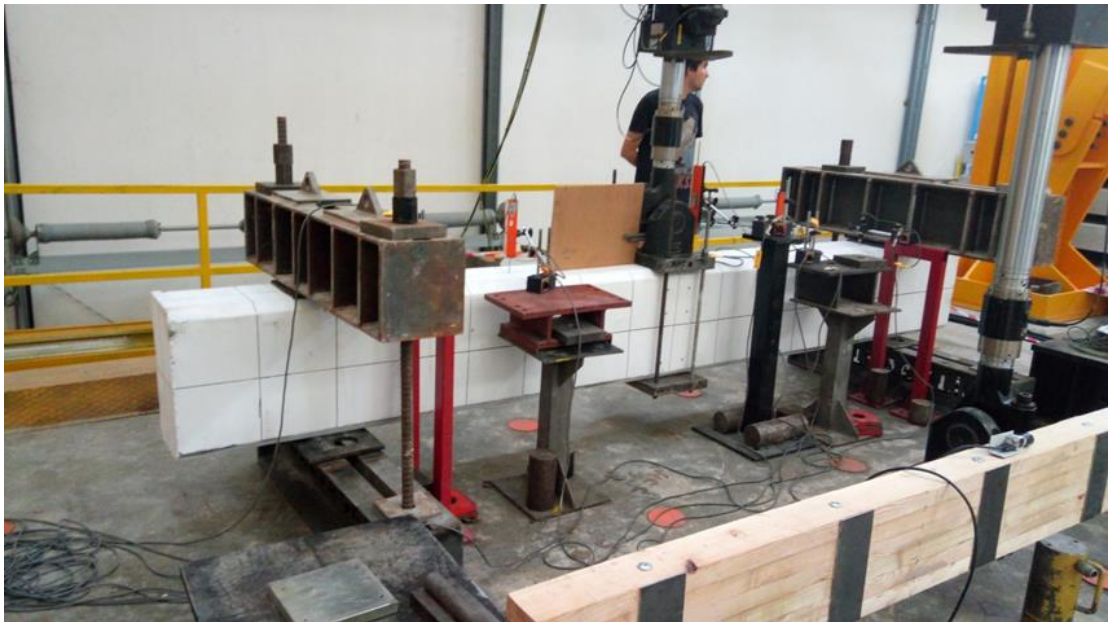


Şekil 3.9 : Numune 1, 2a ve 2b numuneleri için test düzeneği.

Deney Şeması 2



Şekil 3.10 : Numune 3 için test düzeneği şematik çizimi.



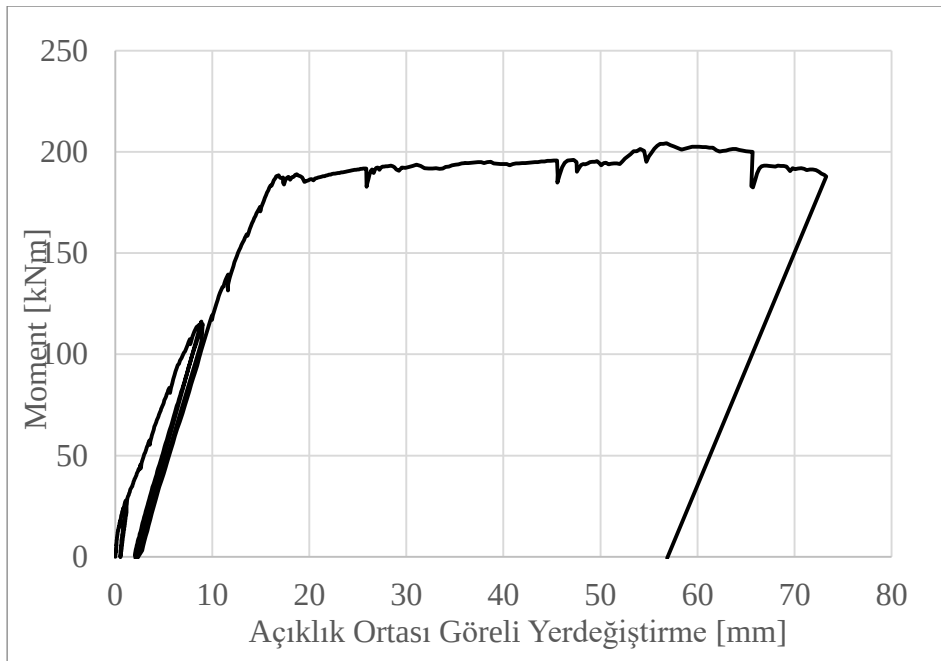
Şekil 3.11 : Numune 3 için test düzeneği.

3.4 Deney Sonuçları

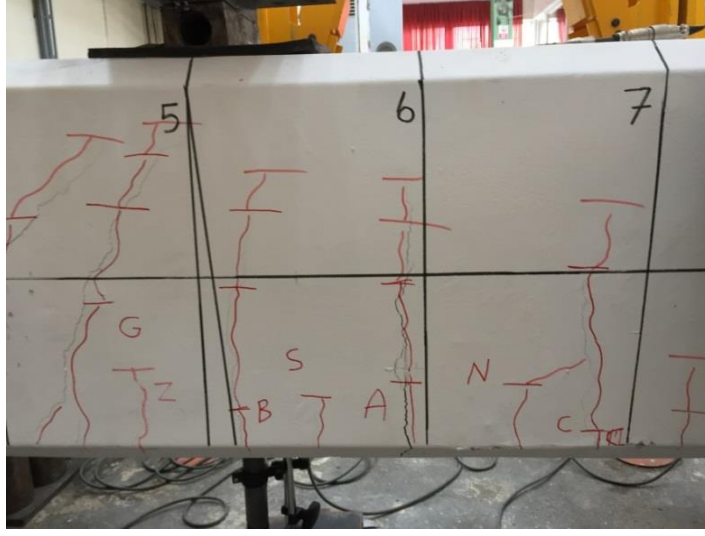
Bu bölümde yapılan deneylerin sayısal ve görsel sonuçları yer almaktadır. Her bir numune için kuvvet yerdeğiştirme ve moment yerdeğiştirme grafikleri çizilmiştir. Deney sırasında oluşan çatlakların işlendiği çizelgeler tablo olarak verilmiştir. Numunelerde oluşan hasarlar görsel olarak verilmiştir. Numune 1, 2a ve 2b numuneleri için moment kolları 1 metre olduğundan, moment yerdeğiştirme ve kuvvet yerdeğiştirme grafikleri aynıdır. Çekme kuvvetleri eşdeğer olması beklenen 1, 2a ve 2b numunelerinin moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme grafikleri karşılaştırılmıştır.

3.4.1 Numune 1

Sadece geleneksel donatı içeren 1 numaralı numunede eğilmeden dolayı ilk çatlağın oluştuğu moment 18 kNm olarak okunmuştur (Şekil 3.13). İlk kayma çatlağı ise 85.5 kN yükte meydana gelmiştir (Şekil 3.14). 190.2 kNm momentinde betonda basınç ezilmeleri oluşmuştur (Şekil 3.15). Şekil 3.12’de numune 1 için moment açıklık ortası yerdeğiştirme grafiğı verilmiştir. Şekil 3.16 numune 1 üzerine oluşan bütün çatlaklar verilmiştir. Çizelge 3.12’de deney süresince numune 1’de oluşan çatlaklar, çatlakların genişlikleri, hangi yük ve açıklık ortası yerdeğiştirmede meydana geldikleri verilmiştir.



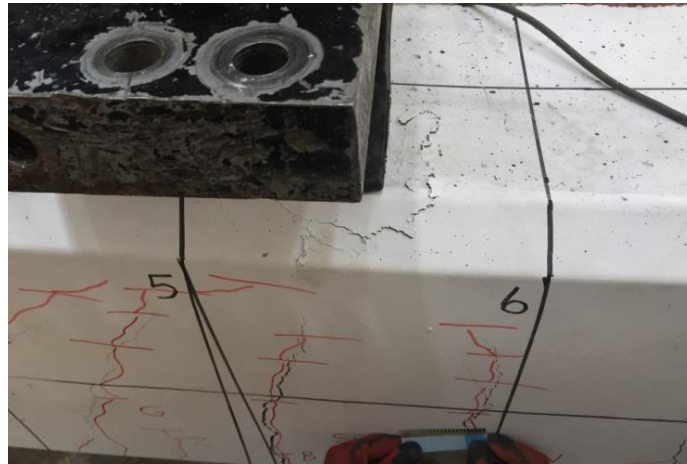
Şekil 3.12 : Numune 1 moment ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiğı.



Şekil 3.13 : Numune 1 ilk eğilme çatlağı (A).



Şekil 3.14 : Numune 1 ilk kayma çatlağı (V).



Şekil 3.15 : Numune 1 basınç ezilmesi.



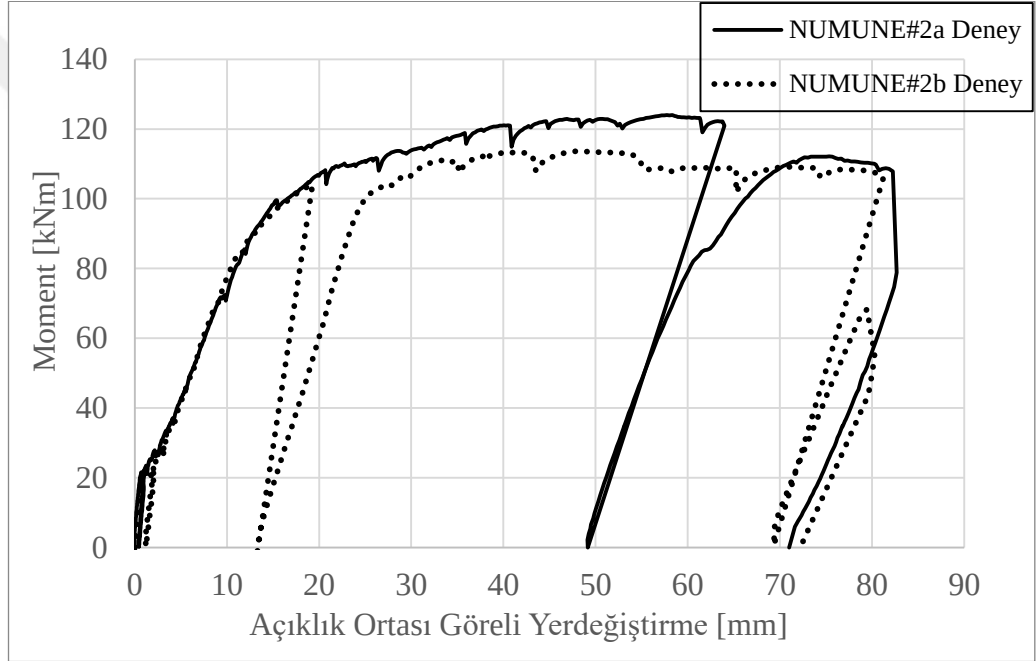
Şekil 3.16 : Numune 1 deney sonucunda oluşan.

Çizelge 3.2 : Numune 1 için çatlak ölçümleri.

δ (mm)	0.51	0.8	1.15	2.59	3.54	5.59	9.59	11.66	25.87	45.53	54.5	65.7
F (kN)	17.8	23.9	27.9	45.3	57.6	85.5	109.6	139.5	191.8	195.7	200.5	200
A	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.9	1.4	1.6	1.6
B		<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	<0.1	0.1	0.6	3.1
C			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	1.2	1.6	4.9
D			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4
E			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
F				<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
G				<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.15	0.18	0.2	0.2	0.2
H				<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.18	0.2	0.2	0.2	0.2
I					<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	0.8	0.8
J					<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.5	0.7	0.9	0.9
K					<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1.0	1.6	1.7	1.7
L					<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.4	0.5
M						<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.7	0.7
N						<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.7
O						<0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4
P						<0.1	0.1	<0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
R						<0.1	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
S							<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6
T							<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
U							<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
V							0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
Y							<0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3

3.4.2 Numune 2a ve 2b

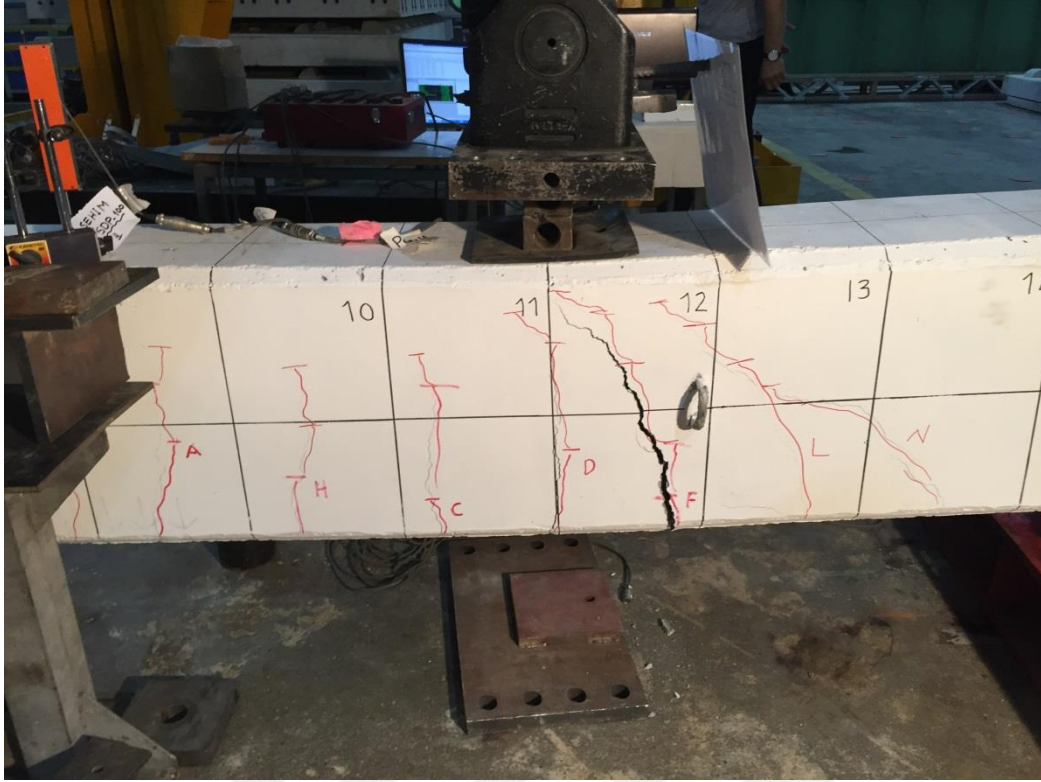
2a ve 2b numuneleri aynı özelliklere sahip olduklarından deney sonuçları aynı başlıkta verilmişlerdir. 2a numunesinin ilk eğilme çatlakları 22 kN yükte (Şekil 3.18), ilk kayma çatlakları 72.4 kN yükte oluşmuştur (Şekil 3.19). 2b numunesinin ilk eğilme çatlakları 17 kN yükte oluşmuştur. İki numunenin de eğilme çatlakları açıklık ortasına yakın bölgelerde oluşmuştur. Moment açıklık ortası yerdeğiştirme sonuçları Şekil 3.17’de verilmiştir. Buna göre 2 numune için de moment açıklık ortası yerdeğiştirme değerleri birbirine yakındır. Çizelge 3.3’te 2a numunesi için, Çizelge 3.4’te 2b numunesi üzerinden oluşan çatlaklar hakkındaki bilgiler yer almaktadır. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de sırasıyla numune 2a ve numune 2b için çatlak ölçümleri verilmiştir.



Şekil 3.17 : Numune 2a ve 2b moment ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 3.18 : Numune 2a ilk eğilme çatlakları (A).



Şekil 3.19 : Numune 2a eğilme çatlakları.

Çizelge 3.3 : Numune 2a için çatlak ölçümleri.

δ (mm)	0.65	1.40	2.53	3.39	4.12	5.49	9.73	11.9	20.7	26.3	40.7
F (kN)	22	20	22.3	33.5	37.1	45.8	72.4	85.6	108	111.6	121
A	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.15	0.18	0.18	0.2	0.2	0.2
B	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.15	0.18	0.18	0.3	0.7	0.7
C	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.18	0.2	0.3	0.4
D		<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
E			<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	3.5
F			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.15	0.9	3.0	8.0
G				<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.15	2.5
H				<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.18	0.25
I					<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
J					<0.1	<0.1	0.1	0.15	0.15	0.4	0.5
K						<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.15
L							0.1	0.18	0.18	0.18	0.18
M							0.1	0.15	1.5	3.0	3.3
N								<0.1	0.1	0.18	0.18

Çizelge 3.4 : Numune 2b için çatlak ölçümleri.

δ (mm)	0.59	3.13	4.13	6.11	11.1	19.3	35.0	43.2	65.3
F(kN)	16.99	29.63	34.19	49.9	83.5	104.1	110.9	112.4	108.8
A	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3
B	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	1.6	1.7	1.8	3.2
C	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
D	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7
E	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
F	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
G		<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
H		<0.1	<0.1	0.1	0.2	0.3	3.5	10	15
I			<0.1	<0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
J			<0.1	<0.1	0.2	3.4	3.5	5	10
K			<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
L				<0.1	0.25	0.3	2.2	3.5	3.5
M				<0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4



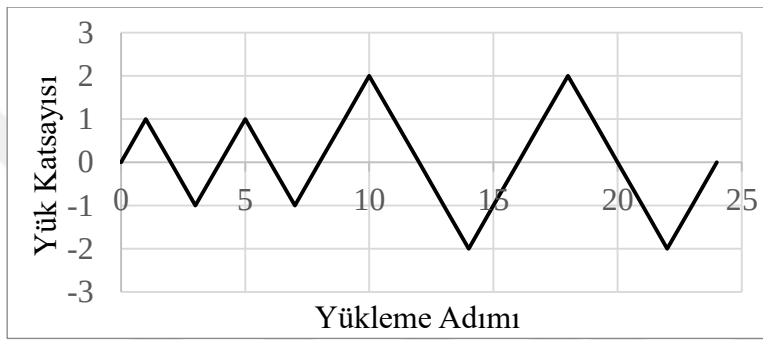
Şekil 3.20 : Numune 2a deney sonucu oluşan çatlaklar.



Şekil 3.21 : Numune 2b deney sonucu oluşan çatlaklar.

3.4.3 Numune 3

Çelik halatların, hem betonarme kirişlerde hem de normal kuvvet etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu betonarme kolonlarda kullanılması durumlarında tersinir yükler altındaki davranışının incelenmesi amacıyla numune 3 çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Şekil 3.22'deki yükleme protokolünde olduğu gibi her çevim 2 kez uygulanmıştır. 2. çevrim sonlarında çatlak genişlikleri ve yayılmaları kontrol edilmiştir. Çizelge 3.5'te her yükleme adımı için ölçülen açıklık ortası yerdeğiştirme bunlara karşılık gelen itme ve çekme durumları için yüklemeler verilmiştir.

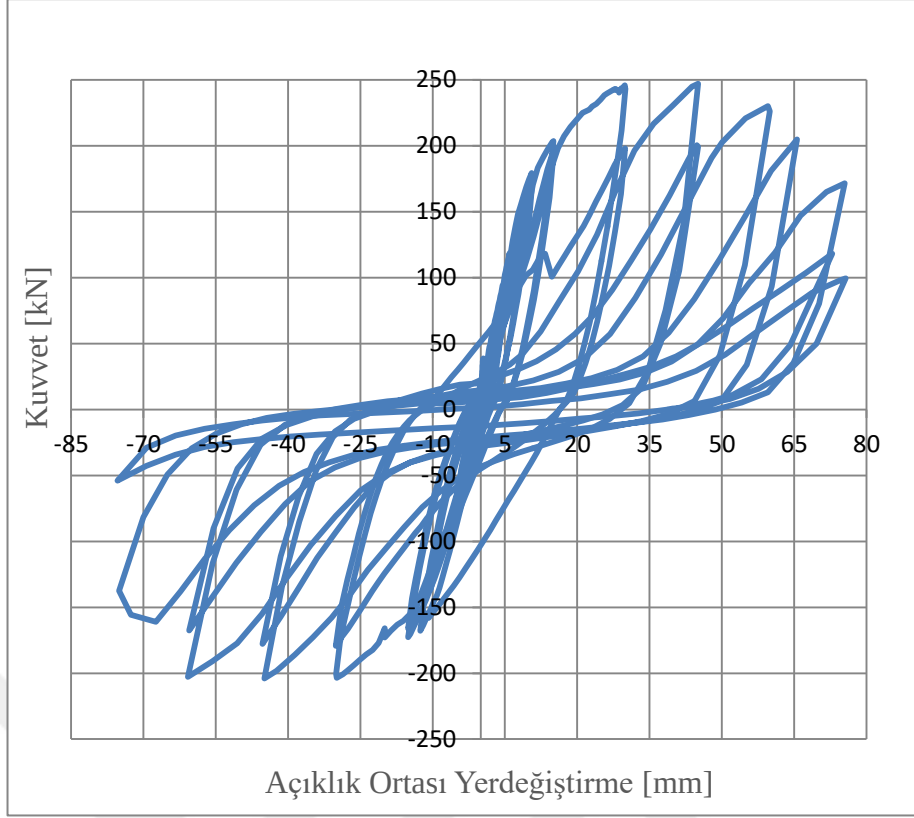


Şekil 3.22 : Numune 3 yükleme protokolü.

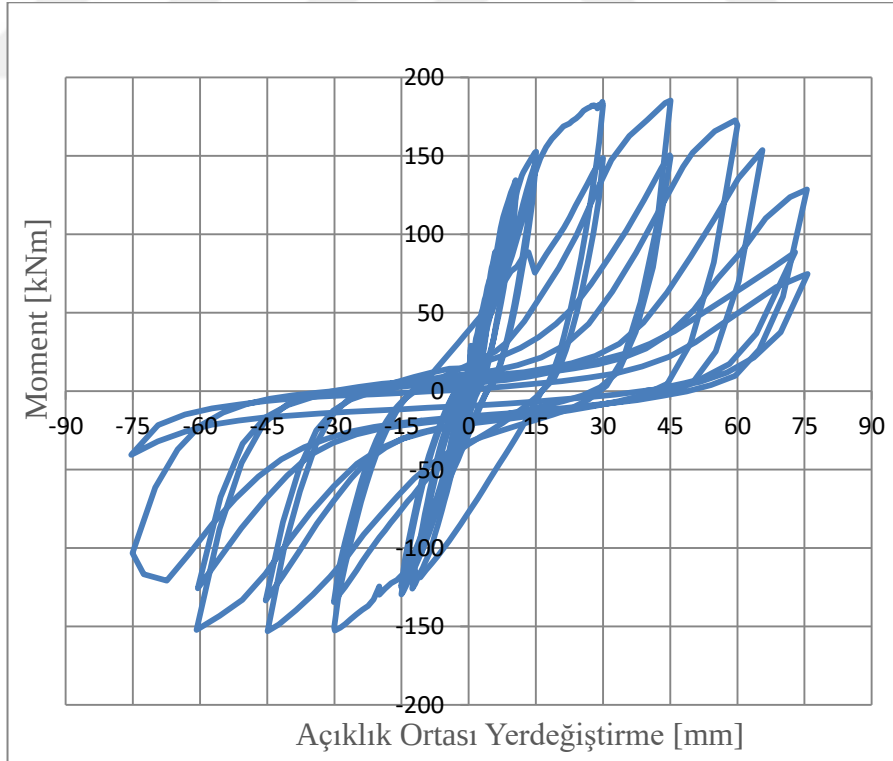
Çizelge 3.5 : Numune 3 itme ve çekme kuvvetleri.

		İtme	Çekme	İtme	Çekme
δ	θ	1P	1N	2P	2N
1.5 mm	0.001	+	+	36.28	-35.33
6.0 mm	0.004	118.7	-94.0	117.9	-92.8
10.5 mm	0.007	179.3	-154.8	175.0	-137.1
15.0 mm	0.010	203.5	-172.7	195.5	-166.0
30.0 mm	0.020	243.3	-200.6	198.7	-179.1
45.0 mm	0.030	247.0	-204.0		

Numune için sırasıyla kuvvet açıklık ortası yerdeğiştirme ve moment açıklık ortası değiştirme grafikleri Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te verilmiştir. Yükleme devam ettirilip açıklık ortası yerdeğiştirme devam ettirildikçe numune dayanımının azaldığı görülmektedir. Deney, betonun ezilmesinden sonra da devam ettirilip betonarme çeliğinin kopmasına kadar devam ettirilmiştir. Şekil 3.26'da alt bölgede betonarme çeliğinin koptuğu gösterilmiştir. Şekil 3.27'de üst bölgede betonarme çeliğinin koptuktan sonra itme yüklemesinde burkulmaları verilmiştir.



Şekil 3.23 : Numune 3 kuvvet ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 3.24 : Numune 3 moment ve açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.

İtme yüklemesi, numunenin alt kesitinde çekme gerilmelerinin oluştuğu durumdur. Çekme yüklemesi ise numunenin üst kesitinde çekme gerilmelerinin oluştuğu

durumdur. İlk itme çatlağı 38 kN yüklemesinde oluşmuştur. 80 mm açıklık ortası yerdeğiştirmesinde ve 171 kN yükte betonarme çeliğı kopmuştur. İlk kayma çatlağı 220 kN yükte oluşmuştur. Üst donatılar 220 kN yükte burkulmuşlardır. Çekme yüklemesinde ilk çatlak 35 kN mertebesinde oluşmuştur. 75 mm açıklık ortası yerdeğiştirmesinde ve 137 kN yüklemesinde üst betonarme çelikleri kopmuştur. Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de itme ve çekme çatlak ölçümleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Numune 3 için itme çatlak ölçümleri.

δ (mm)	+1.5	+6.0	+10.5	+15.0	+30.0	+45.0	+60.0
F (kN)	+36.28	+117.99	+175.01	+195.50	+198.7	+199.2	+180.2
A	<0.1	0.1	<0.1	<0.1			
B	<0.1	0.2	0.3	0.6			
C	<0.1	0.1	0.2	0.2			
D	<0.1	0.2	0.6	2.1	10 mm	21	30
E	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
F	<0.1	<0.1	0.1	0.1			
G	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
H	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
I	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
J	<0.1	<0.1	0.1	0.1			
K	<0.1	<0.1	<0.1	0.2			
L		<0.1	<0.1	<0.1			
M		<0.1	<0.1	<0.1			
N		0.1	0.5	1.2			
O			<0.1	<0.1			

Çizelge 3.7 : Numune 3 için çekme çatlak ölçümleri.

δ (mm)	-1.5	-6.0	-10.5	-15.0	-30.0	-45.0	-60.0
F (kN)	-35.33	-69.57	-137.1	-166	-179.13	-177.7	-167.6
A	<0.1	0.1	0.3	1.2	15 mm	33	60
B	<0.1	0.1	0.3	0.7			
C	<0.1	<0.1	0.1	0.2			
D	<0.1	<0.1	0.1	0.1			
E	<0.1	<0.1	0.1	0.1			
F	<0.1	<0.1	0.1	0.1			
G	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			
H		<0.1	0.2	0.5			
I		<0.1	0.1	0.1			
J		<0.1	0.1	0.1			
K		<0.1	<0.1	<0.1			
L		<0.1	0.2	<0.1			
M			0.1	0.1			
N			<0.1	<0.1			

Şekil 3.25’te numune 3 üzerinde oluşan çatlaklar verilmiştir. İtme çatlakları kırmızı, çekme çatlakları mavi renk ile görölmektedir.



Şekil 3.25 : Numune 3 deney sonucu oluşan itme ve çekme çatlakları.



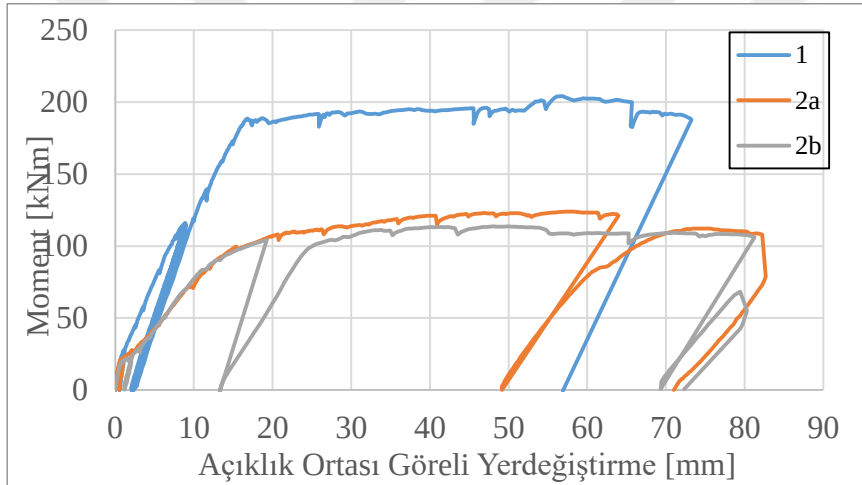
Şekil 3.26 : Numune 3 alt donatılarının kopması.



Şekil 3.27 : Numune 3 üst donatılarının burkulması.

3.4.4 Deney sonuçlarının yorumlanması

Çelik halatlı 2a ve 2b numuneleri çekme donatısı miktarları numune 1 ile eşdeğer çekme kuvvetine sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.28’de 1, 2a ve 2b numuneleri için deneylerde elde edilen moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme grafiği görölmektedir. Buna göre numune 1 yaklaşık 200 kNm moment kapasitesine sahipken, yaklaşık aynı moment kapasitesine ulaşması gereken 2a ve 2b numuneleri yaklaşık 120 kNm moment kapasitesine ulaşmıştır. Deneyler sırasında çelik halatların betondan sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Sıyrılmadan dolayı yaşanan aderans kayıpları çelik halatların beton ile tam çalışmasını engellemiştir. Dolayısıyla çelik halatların beklenen şekildeğiştirmeleri yapamadığı ve akma dayanımına ulaşamadığı görölmüştür. Bu da kirişlerin beklenenden yüzde 40 daha az moment kapasitesine ulaşmalarına neden olmuştur.



Şekil 3.28 : Numune 1, 2a ve 2b moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme deney sonuçları.

Deneyler sırasında numuneler üzerindeki çatlaklar da incelenmiştir. 1, 2a ve 2b üzerinde ilk eğilme çatlakları sırasıyla 18 kN, 22 kN ve 17 kN yüklerinde oluşmuştur. İlk eğilme çatlakları bakımından geleneksel numune ve çelik halatlı numuneler yakın değeri almıştır. Yüklemlerin devamında çatlaklar incelendiğinde geleneksel numunedeki çatlakların çelik halatlı numunelerdekilere göre daha sık ve genişliklerinin daha az olduğu görölmüştür. Geleneksel numunede eğilme çatlakları orta bölgede yoğunlaşmış ve sıklaşmıştır. Çelik halatlı numunelerde çatlaklar daha hızlı ilerleme kaydetmiştir. Çelik halatlar geleneksel betonarme çelikleriyle beraber kullanıldıklarında, çelik halatlardaki aderans kayıpları kesitin istenildiğı gibi moment kapasitesine ve çatlak düzenine ulaşmasını engellemektedir.

4. ANALİTİK ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada elde edilen sonuçları doğrulamak üzere Vector5 programı kullanılarak analitik çözümleme yapılmıştır. Bu bölümde Vector5 programı kullanılarak monotonik yükleme analizinin nasıl yapıldığı hakkında bilgiler verilmiştir. Vector5 programına girilen veriler bu bölümde detaylı olarak verilmiştir. Bu verileri Vector5 programının işlemesi sonucu ortaya çıkan veri çıktıışlarının nasıl yorumlandığı anlatılmıştır.

4.1 Vector5 Programı

Vector5 kiriş, kolon, perde duvar içeren 2 boyutlu sistemlerde doğrusal olmayan kesit analizi yapan, sıcaklık, statik ve dinamik yükleme durumları için hesap yapabilen bir bilgisayar programıdır. Vector5 programında girdiler text dosyalarına yazılmaktadır. Program çalıştırıldıktan sonra çıktılar yine text olarak verilmektedir. Janus isimli arayüz sayesinde text çıktıları görsel olarak ve grafiksel olarak yorumlanabilmektedir. Bu çalışmada Janus programı kullanılmamıştır. Text çıktılarından alınan sonuçlar Excel programı kullanılarak grafiklendirilmiştir.

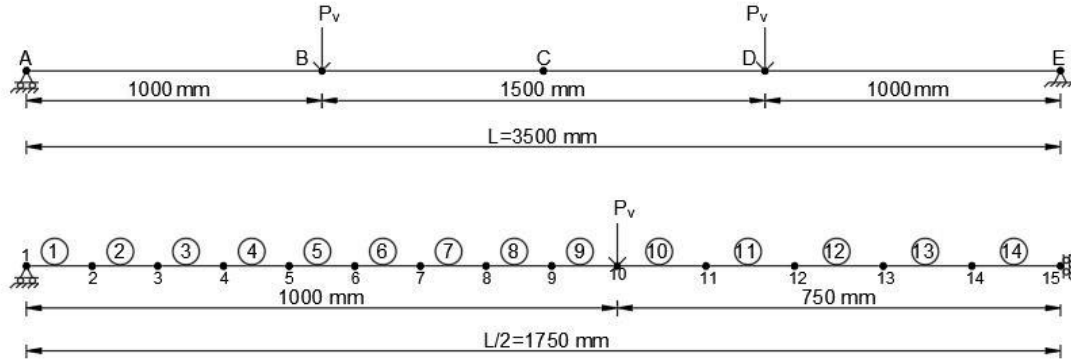
Vector5 öncelikle direkt rijitlik yöntemi kullanarak global çerçeve analizi yapmaktadır. Daha sonra her eleman için eleman uzunluğu boyunca yayılı doğrusal olmayan fiber model yaklaşımıyla kesit analizi yapmaktadır. Her kesitte, dengelenmemiş kuvvetleri dengelemeye çalışarak, kesitte yatay kuvvet dengesini yakalayana kadar ardışık hesaplamalar yapmaktadır.

Sonuç olarak her eleman için iç kuvvetleri, her elemandaki fiberler için şekildeğiştirme, gerilme, kuvvet gibi değerleri vermektedir.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi yükleme durumu simetrik olduğundan kirişin yarısı modellenmiştir. Sol mesnet yatayda kayıcı, sağ mesnet ise dikeyde kayıcı ankastre mesnet olarak kabul edilmiştir. 15 düğüm noktası tanımlanarak 14 eleman oluşturulmuştur. Yüke kadar olan 1 metrelik parça 111.1 milimetrelik 9 elemana, kuvvetten açıklık ortasına kadar olan 750 milimetrelik parça 150 milimetrelik 5

parçaya bölünmüştür. 10. nokta kuvvetin etkidiği ve itme analizi için düşey yerdeğiştirmenin verildiği noktadır. Maksimum moment kuvvetin etkidiği noktalarda oluşur ve denklem 4.1 ile hesaplanır. Kuvvet kolu 1m olduğunda etkiyen kuvvet ile moment değeri aynı değeri alır.

$$M = P_v \times 1 \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 : Numune 1, 2a ve 2b için analitik sistem.

Şekil 4.1'de oluşturulan geometrik sistem Vector5 programına düğüm noktaları olarak girilmiştir. Çizelge 4.1'de 1'den 15'e kadar x ve y koordinatları olarak verilmiştir.

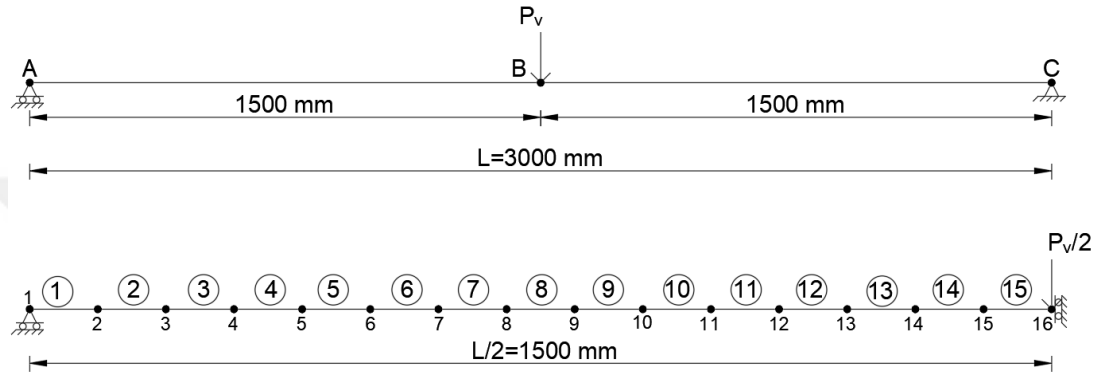
Çizelge 4.1 : Numune 1, 2a ve 2b Vector5 düğüm noktaları.

NODE	X	Y	[#NODES	d(NODE)	d(X)	d(Y)	] <-- up to 2 directions /
1	0	0					/
2	111.111	0					/
3	222.222	0					/
4	333.333	0					/
5	444.444	0					/
6	555.555	0					/
7	666.666	0					/
8	777.777	0					/
9	888.888	0					/
10	1000	0					/
11	1150	0					/
12	1300	0					/
13	1450	0					/
14	1600	0					/
15	1750	0					/

Numune 3 için oluşturulan analitik sistem Şekil 4.2'de verilmiştir. Numune 3 için iki mesnet arası 3000 mm'dir. Sistemin simetrik olma özelliğinden yararlanılarak orta

noktaya kadar modellenmiştir. Toplamda 16 düğüm noktası ve 15 eleman oluşturulmuştur. Çizelge 4.2’de numune 3 için Vector5 programına girilen düğüm noktası koordinatları verilmiştir. Her eleman 100 mm uzunluğunda olup, 15 eleman 1500 mm kiriş uzunluğu tanımlanmıştır. Şekil 4.2’deki orta noktadan yapılan yükleme için maksimum moment denklem 4.2 ile hesaplanabilir.

$$M = \frac{P_v \times L}{4} \quad (4.2)$$



Şekil 4.2 : Numune 3 için analitik sistem.

Çizelge 4.2 : Numune 3 Vector5 düğüm noktaları.

NODE X Y [#NODES d(NODE) d(X) d(Y)] <-- up to 2 directions /				
1	0	0	/	
2	100	0	/	
3	200	0	/	
4	300	0	/	
5	400	0	/	
6	500	0	/	
7	600	0	/	
8	700	0	/	
9	800	0	/	
10	900	0	/	
11	1000	0	/	
12	1100	0	/	
13	1200	0	/	
14	1300	0	/	
15	1400	0	/	
16	1500	0	/	

Çizelge 4.3’te 1, 2a ve 2b numuneleri için Vector5 programına girilen elemanların düğüm noktası ve malzeme tipi bilgisi verilmiştir. Sütun 1’de eleman indisi, sütun

2’de o eleman sol düğüm noktası, sütun 3’te sağ düğüm noktası ve 4. sütun’da o elemanın malzeme tipi görülmektedir.

Çizelge 4.3 : Numune 1, 2a ve 2b eleman indisleri.

MEM	INC1	INC2	MEM.TYPE	[#MEMS	d(MEM)	d(INC)	] <-- up to 2 directions /
1	1	2	1	1	1	1	/
2	2	3	2	1	1	1	/
3	3	4	2	1	1	1	/
4	4	5	2	1	1	1	/
5	5	6	2	1	1	1	/
6	6	7	2	1	1	1	/
7	7	8	2	1	1	1	/
8	8	9	2	1	1	1	/
9	9	10	1	1	1	1	/
10	10	11	2	1	1	1	/
11	11	12	2	1	1	1	/
12	12	13	2	1	1	1	/
13	13	14	2	1	1	1	/
14	14	15	2	1	1	1	/

Çizelge 4.4’te 1, 2a ve 2b için mesnetlenme koşulları verilmiştir. İki mesnet düğüm noktası 1 ve 15’e tanımlanmıştır. Düğüm noktası 1’deki mesnet x yönünde yerdeğiştirmeye, z etrafında dönmeye izin verilmiş olan ve y yönünde yerdeğiştirmesi kısıtlanan kayıcı mesnet olarak tanımlanmıştır. Düğüm noktası 15’te tanımlanan kayıcı ankastre mesnet ise yalnızca y yönünde düşey yerdeğiştirme yapabilir.

Çizelge 4.4 : Numune 1, 2a ve 2b mesnetlenme koşulları.

NODE	X-RST	Y-RST	Z-RST	[#NODES	d(NODE)	] <-- up to 2 directions /
1	0	1	0	/		
15	1	0	1	/		

Çizelge 4.5’te Vector5’e girilen sargısız betonun özellikleri verilmiştir. Beton dayanımı silindirik basınç dayanımı olarak kübik deney sonuçlarından elde edilmiştir. Beton basınç dayanımı f'_c ile çekme dayanımı f'_t ile ve elastisite modülü E_c ile gösterilmiştir. Bu değerler programın önerdiği Amerikan şartname değerleri olarak kabul edilmiştir.

$$f't = 0.33 \times \sqrt{f'c} = 0.33 \times \sqrt{24} = 1.61 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

$$Ec = 5000 \times \sqrt{f'c} = 5000 \times \sqrt{24} = 24495 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

Formül 4.3 ile $f't$ ve formül 4.4 ile E_c hesaplandı. e_0 değeri 0.002 olarak kabul edildi.

Çizelge 4.5 : Vector5 sargısız beton özellikleri.

MT	$f'c$	$f't$	E_c	e_0	μ_u	C_c	K_c	Agg	Dens	S_{mx}	S_{my}
	MPa	MPa	MPa	me		/deg.C	mm ² /hr	mm	kg/m ³	mm	mm
1	24	1.61	24495	2.0	0	0.00001	0	10	0	0	0
2	24	1.61	24495	2.0	0	0.00001	0	10	0	0	0

Çizelge 4.6’da Vector5’e girilen enine donatı özellikleri verilmiştir. MT malzeme tipi, N_c enkesitteki toplam beton katman sayısı N_s enkesitteki toplam donatı katman sayısı, F_{yz} akma dayanımı, St enine donatı aralığı, Dbt enine donatı çapı, F_{ut} çekme dayanımı, E_{st} enine donatı elastisite modülü, e_{sht} enine donatının pekleşmeye başladığı şekildeğiştirme durumudur. Bu değerler çekme deneyi sonuçlarından alınıp Vector5’e tanımlanmıştır.

Çizelge 4.6 : Vector 5 enine donatı özellikleri.

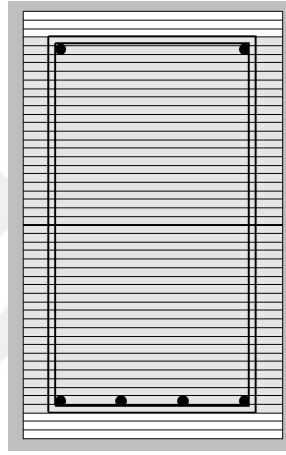
MT	N_c	N_s	F_{yz}	St	Dbt	F_{yt}	F_{ut}	E_{st}	E_{sht}	e_{sht}	C_s	Ref Type
	#	#	MPa	mm	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	me	/deg.C	
1	50	2	480	200	8	480	560.0	200000	3000	24	0.00001	1
2	50	2	480	200	8	480	560.0	200000	3000	24	0.00001	1

Çizelge 4.7’de Vector5’e girilen enkesit özellikleri verilmiştir. Buna göre D_c fiber kalınlığı W_c fiber genişliği, $Rho-t$ kesme donatısının etkisi, $Rho-z$ sargılamanın etkisi, N_x toplam katman sayısı olarak girilmiştir. Buna göre numune 1 için 500 mm yüksekliğindeki kesit 10 milimetrelık 50 parçaya bölünmüştür.

Şekil 4.3’te numune 1 için katmanlara bölünmüş enkesit gösterilmiştir. Altta ve üstte paspayı bölgesinde 3 katman, etriye bölgesi 1 katman ve çekirdek bölge için 42 katman olmak üzere toplamda 50 katman oluşturulmuştur. Altta 4 adet 18 mm çapında, üstte 2 adet 12 mm çapında geleneksel betonarme çeliği ve kesme donatısı da görülmektedir. Şekil 4.3’te 1 numaralı numune için fiber katmanları gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Numune 1 enkesit özellikleri.

MT	Dc	Wc	Rho-t	Rho-z	Nx
	(mm)	(mm)	(%)	(%)	
1	10	300	0	0.002	3
1	10	300	0	0.025	1
1	10	300	0.167	0.025	42
1	10	300	0	0.025	1
1	10	300	0	0.002	3
2	10	300	0	0.002	3
2	10	300	0	0.025	1
2	10	300	0.167	0.025	42
2	10	300	0	0.025	1
2	10	300	0	0.002	3



Şekil 4.3 : Numune 1 Vector5 için tanımlanan fiber katmanları.

Çizelge 4.8’de numune 1 için Vector5 programına girilen donatı özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 4.8 : Numune 1 donatı özellikleri.

MT	N	Ys	As	Db	Fy	Fu	Es	esh	eu	BLDR	Dep
		mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	me	me	L/Db	me
1	1	50	226	12	480	560	200000	32	70.0	17	0
1	2	447	1017	18	480	560	200000	22	70.0	1	0
2	1	50	226	12	480	560	200000	32	70.0	17	0
2	2	447	1017	18	480	560	200000	22	70.0	1	0

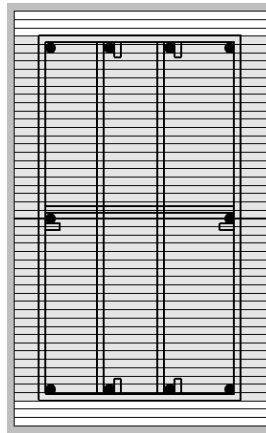
Çizelge 4.9’da numune 2 için, Çizelge 4.10’da numune 3 için Vector5 programına girilen geleneksel betonarme çeliği ve çelik halatın özellikleri verilmiştir. Şekil 4.4’te 3 numaralı numune için fiber katmanları gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : Numune 2 donatı özellikleri.

MT	N	Ys	As	Db	Fy	Fu	Es	esh	eu	BLDR	Dep
		mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	me	me	L/Db	me
1	1	50	226	12	480	560	200000	12	180	17	0
1	2	446	189.2	11	1730	1960	200000	24	65	1	0
1	3	450	226	12	480	560	200000	12	180	1	0
2	1	50	452	12	480	560	200000	12	180	17	0
2	2	446	378.4	11	1730	1960	200000	24	65	1	0
2	3	450	452	12	480	560	200000	12	180	1	0

Çizelge 4.10 : Numune 3 donatı özellikleri.

MT	N	Ys	As	Db	Fy	Fu	Es	esh	eu	BLDR	Dep
		mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	me	me	L/Db	me
1	1	50	226	12	480	560	200000	12	180	17	0
1	2	54	189.2	11	1730	1960	200000	24	65	17	0
1	3	250	226	12	480	560	200000	12	180	1	0
1	4	446	189.2	11	1730	1960	200000	24	65	1	0
1	5	450	226	12	480	560	200000	12	180	1	0
2	1	50	452	12	480	560	200000	12	180	1	0
2	2	54	378.4	11	1730	1960	200000	24	65	1	0
2	3	250	452	12	480	560	200000	12	180	1	0
2	4	446	378.4	11	1730	1960	200000	24	65	1	0
2	5	450	452	12	480	560	200000	12	180	1	0



Şekil 4.4 : Numune 3 Vector5 için tanımlanan fiber katmanlarının şematik çizimi

Vector5 ile yerdeğiştirme kontrollü statik itme analizi yapmak üzere yük tanımlamaları yapıldı. Şekil 4.4'te Vector5 programında numune 1 için girilen yükleme bilgisi verilmiştir. 0 mm açıklık ortası yerdeğiştirmeden 0.4 mm artışla 70 mm'ye kadar yük verileceğİ bilgisi programa girilmiştir.

Load Case	File Name	Initial	Final	LS-Inc	Type	Reps	C-Inc
1	HL	0.000	70.000	0.400	3	1	0.0

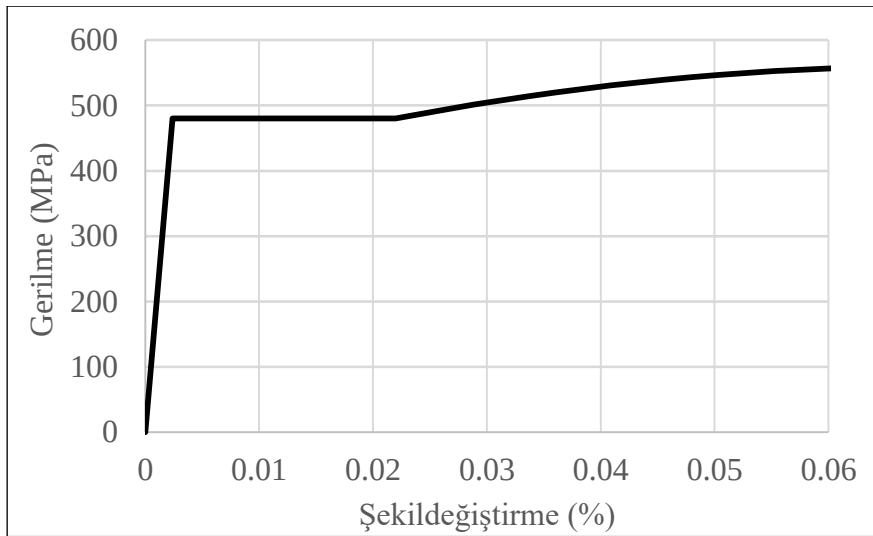
Şekil 4.5 : Vector5 yükleme verisi

4.2 Betonarme Çeliğİ Malzeme Modeli

Donatı çelikleri için TBDY-2018'de gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları verilmiştir. Donatı çeliğinin elastisite modülü 200000 MPa'dır. Türkiye'de kullanılan donatı çelikleri için diğİr bilgiler Çizelge 4.11'de verilmiştir. Deneyde kullanılan donatılar için çekme testi sonuçları analitik modelde donatı modeli olarak kullanılmıştır. Şekil 4.6'da geleneksel betonarme çeliğİ için gerilme şekildeğiştirme grafiğİ verilmiştir.

Çizelge 4.11 : TBDY-2018 donatı özellikleri

Kalite	f_{sy} (MPa)	ϵ_{sy}	ϵ_{sh}	ϵ_{su}	f_{su} / f_{sy}
S220	220	0.0011	0.011	0.12	1.20
S420	420	0.0021	0.008	0.08	1.15 - 1.35
B420C	420	0.0021	0.008	0.08	1.15 - 1.35
B500C	500	0.0025	0.008	0.08	1.15 - 1.35



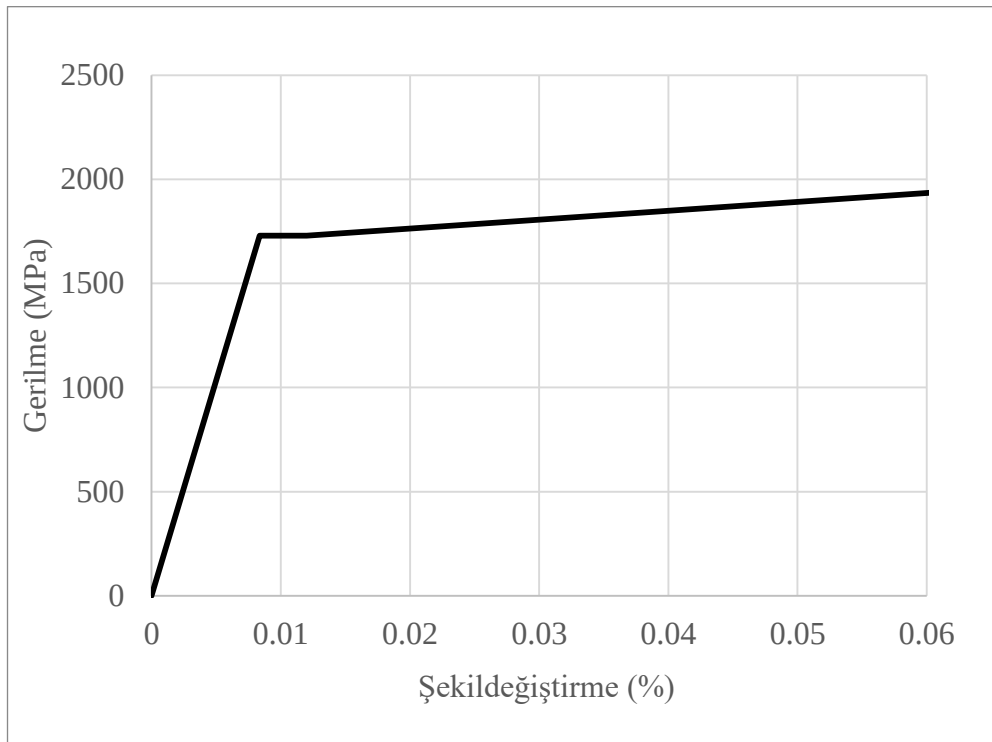
Şekil 4.6 : Analitik modelde kullanılan betonarme çeliğİ için malzeme modeli

4.3 Beton Malzeme Modeli

Deneyde kullanılan beton için gerilme şekil değiştirme deneyi yapılmadı, yalnızca 2 adet küp numuneye basınç testi yapıldı. Bu iki numunenin 22 günlük ortalama kübik basınç dayanımı 31.4 MPa olarak hesaplandı ve silindirik basınç dayanımına çevrildi. Silindirik basınç dayanımı 24 MPa olarak kabul edildi. Vector5 programında programın kabul ettiği sargılı ve sargısız beton modelleri kullanılmıştır. Hognestad beton malzeme modeli kullanılmıştır.

4.4 Çelik Halat Malzeme Modeli

Çelik halatın gerilme şekil değiştirme özellikleri, çekme deneylerinin sonuçlarından elde edilmiştir. Öngerme halatları için TS 3233'te kabul edilen elastisite modülü 190000 olmasına rağmen çekme deneyleri sonucu çıkan değer olan 207000 MPa elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Akma dayanımı 1730 MPa akma şekil değiştirmesi 0.0084 ve çekme dayanımı 1960 MPa ve şekil değiştirmesi 0.065 olarak alınmıştır. Çekme deneyinde çelik halat yüzde 1 şekil değiştirme yaptıktan sonra ekstansometre çıkarılmıştır. Yüzde 1'den sonra eğri yaklaşık olarak devam ettirilmiştir. Şekil 4.7'de çelik halat için gerilme şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



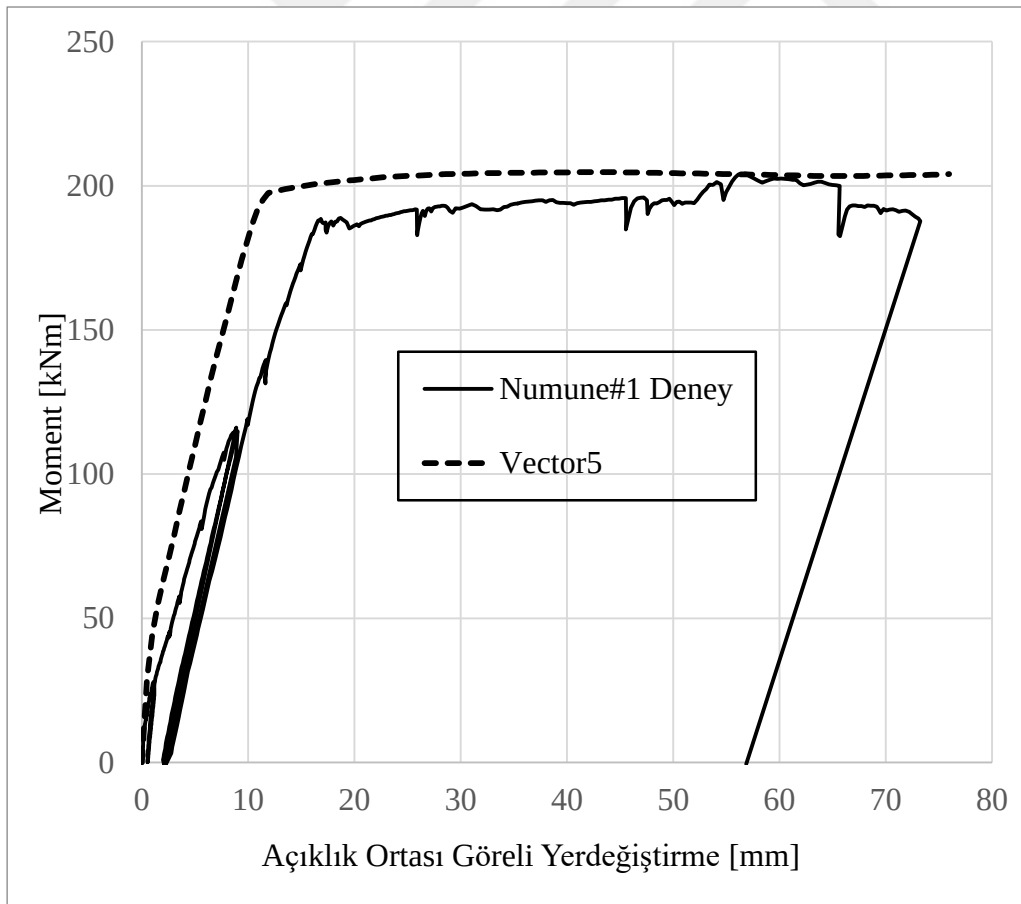
Şekil 4.7 : Analitik modelde kullanılan halat için malzeme modeli.

4.5 Deneysel ve Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde analitik olarak yapılan modellemeler sonucu elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları her bir numune için karşılaştırılmıştır. 2a ve 2b kiriş numuneleri tipik olduğundan bu iki numunenin sonuçları aynı başlıkta verilmiştir. Diğer iki numune 1 ve 3 farklı donatı oranlarına ve donatı düzenine sahip oldukları için grafiksel karşılaştırmalar yapılmamıştır. 1, 2a, 2b ve 3 numuneleri için de monotonik yükleme analizi yapılmıştır.

4.5.1 Numune 1

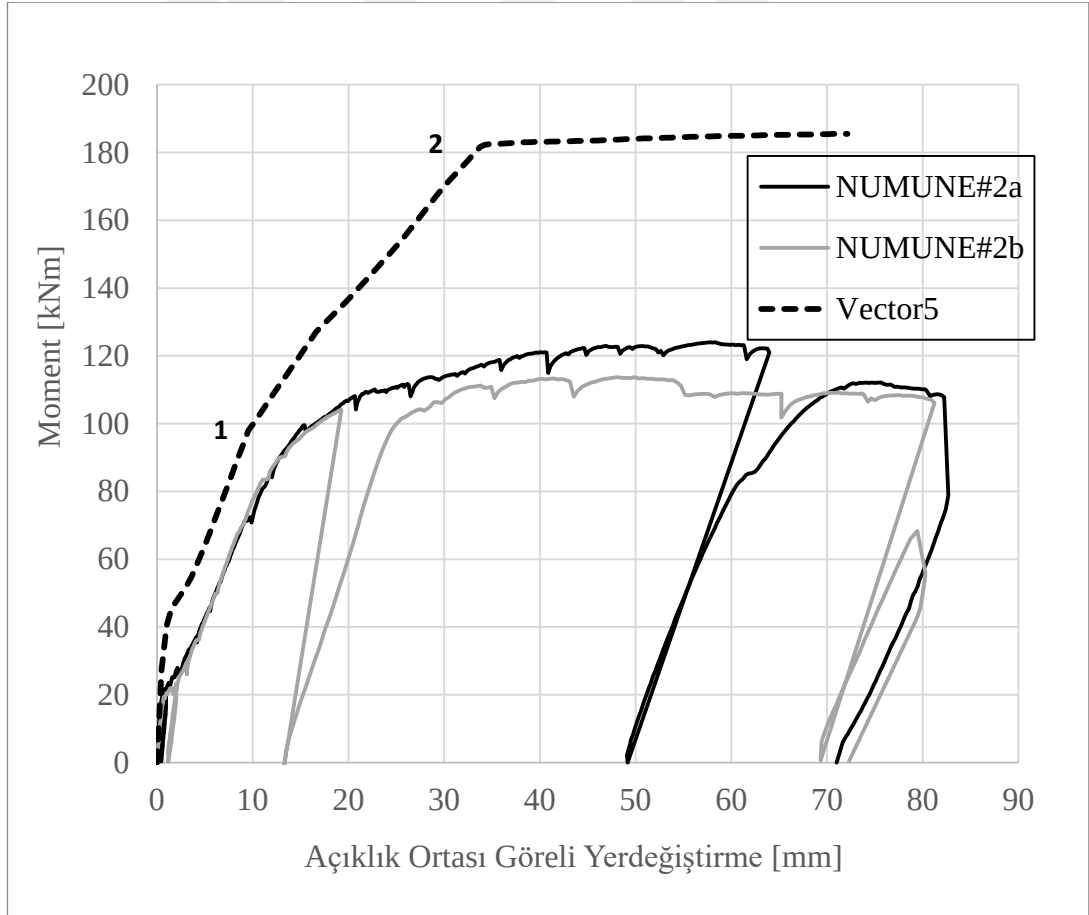
Yalnızca geleneksel betonarme çeliğinin donatı olarak kullanıldığı numune 1 için deney sonucunda çizilen ve analitik hesaptan çizilen moment açıklık ortası yerdeğiştirme sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir. Numune 1 için Vector5 programı kullanılarak yapılan çözümün deney sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8 : Numune 1 analitik ve deney sonuçları karşılaştırılması.

4.5.2 Numune 2a ve 2b

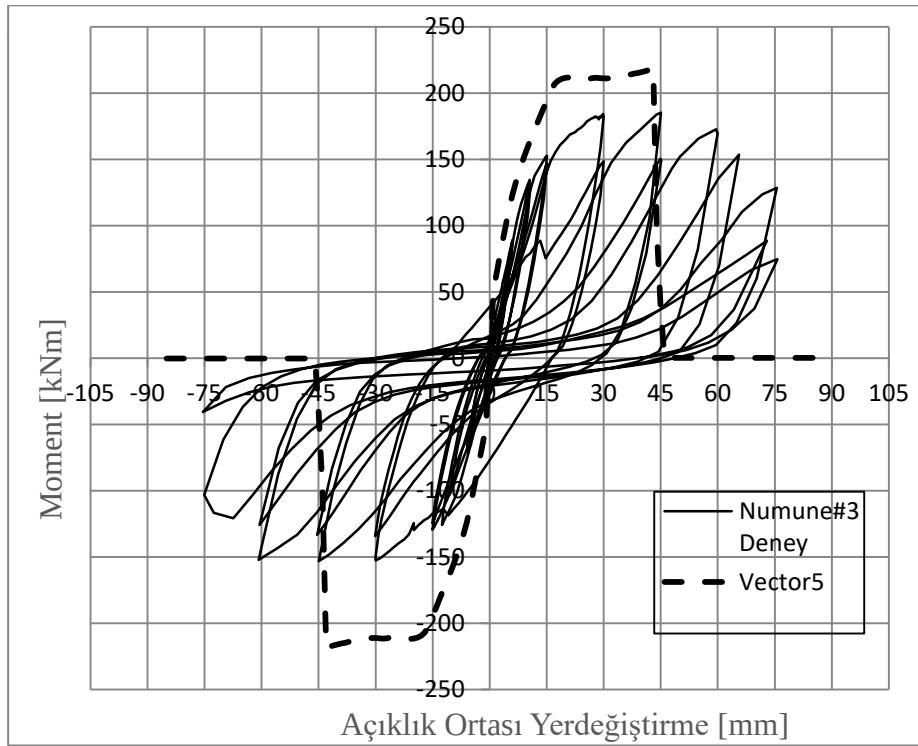
2a ve 2b numuneleri için moment açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği hem deney sonuçları hem de analitik model sonuçları şekil 4.9’da verilmiştir. İlk numunede deney sonuçları analitik hesap ile yakın sonuçlar vermişti. Dolayısıyla beton ve geleneksel betonarme şeliği için aynı kabul edildi. çelik halat için de malzeme modeli eklenerek itme analizi geręekleřtirildi. Hem çelik halat hem de geleneksel betonarme şeliği içeren 2a ve 2b numuneleri için analitik sonuçlar ile deneysel belli bir noktaya kadar yakınlık göstermektedir. Bir noktadan sonra sonuçlar birbirinden ayrışmaya başlamıştır. şekil 4.9’da gösterilen bu 1 numaralı nokta geleneksel betonarme şeliğinin akmaya başladığı andır. Bu noktadan sonra analitik hesapta kesitin taşıyabildiği momentin arttığı görölmüştür. 2 numaralı noktadan itibaren kesitin taşıdığı momentin yataylaştığı noktadır. Bu nokta ise çelik halatın akmaya başladığı andır. Deney sonuçlarında aderans kayıplarından dolayı çelik halatların akma kapasitelerine ulaşamadığı görölmektedir.



şekil 4.9 : Numune 2a ve 2b analitik ve deney sonuçları karşılaştırılması.

4.5.3 Numune 3

Çelik halatın kullanıldığı betonarme elemanlarda tersinir yükler altındaki davranışın incelenmesi amacıyla, 3 numaralı numune çevrimsel yüklemeyle test edilmiştir. Çevrimsel yüklenen elemana herhangi bir normal kuvvet etkitilmemiştir. Dolayısıyla normal kuvvet etkisinin ihmal edildiği betonarme kolonlarda herhangi bir kuvvet verilmeyen çelik halatların kullanılması durumunda numune davranışı gözlenmiştir. Çevrimsel yükleme analizinden önce monotonik yükleme analizi yapılarak deney sonuçlarında elde edilen çevrimsel yükleme moment açıklık ortası yerdeğiştirme grafiğinde iskelet eğrisi yakalanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.10'da numune 3 için deney ve analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.10 : Numune 3 analitik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.

4.5.4 Deney sonuçlarının analitik bir yaklaşımla kestirilmesi

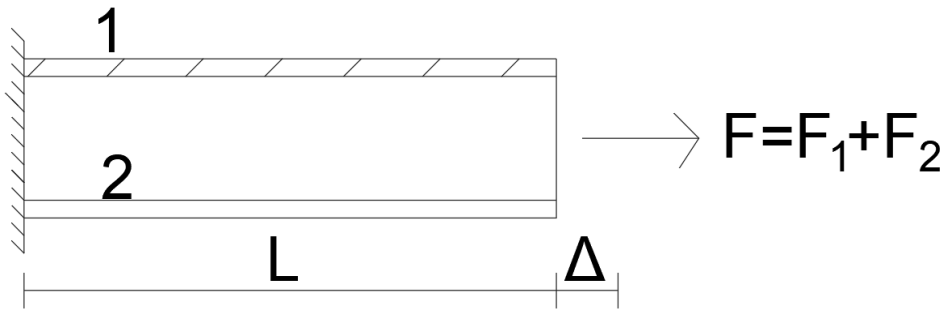
Numune 1 için moment yerdeğiştirme grafiği, Vector5 programında modellenerek malzeme modelleri ve geometrik sistem belirlenmiştir. Numune 1'deki modellemelere çelik halatın malzeme modeli de eklenerek numune 2 için moment yerdeğiştirme grafiği belirlenmiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi çelik halatın ve geleneksel betonarme çeliğinin beraber kullanılması durumunda, malzeme modelleri aynen kullanılarak oluşturulan analitik modeller deney sonuçlarını

yakalayamamaktadır. Bunun sebebi aderans kayıplarından dolayı çelik halatın akma değerlerine ulaşamamasıdır. Dolayısıyla kesit için ortalama bir gerilme hesaplanarak, bu bulunan değer çelik halat için akma değeri olarak kullanılacaktır.

Çekme bölgesindeki betonarme çeliği ve çelik halatlar düşünülürse, üzerlerine gelecek toplam yük altında bir Δ yerdeğiştirmesi yaptıkları kabul edilip, toplam uzunluğa da L denilirse, aşağıdaki şekildeğiştirme denklem 4.5'teki bağıntı yazılabilir.

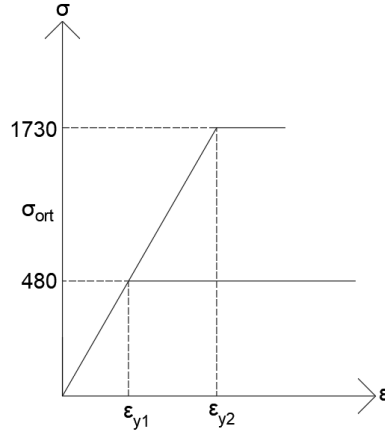
$$\frac{\Delta}{L} = \varepsilon_{ort} = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (4.5)$$

Bu hesaplanan ortalama şekildeğiştirme betonarme kesitlerde düzlem kesit düzlem kalır kabulü yapıldığından, tarafsız eksene dik uzaklığı aynı olan iki eleman için aynı olmalıdır. Dolayısıyla denklem 4.5'te gösterilen ifadedeki ε_1 olarak ifade edilen betonarme çeliği şekildeğiştirmesi, ε_2 olarak ifade edilen çelik halat şekildeğiştirmesi ile aynı ve ε_{ort} değerine eşit olmalıdır. Şekil 4.11'de betonarme kesitin çekme bölgesinde oluşan çekme kuvveti görülmektedir. 1 ile gösterilen geleneksel betonarme çeliği, 2 ile gösterilen çelik halattır. F_1 geleneksel betonarme çeliğinde oluşan kuvvet, F_2 ise çelik halatta oluşan kuvvettir.



Şekil 4.11 : Çelik halat ve geleneksel betonarme çeliği için kuvvetler.

Şekil 4.12'de çelik halat ile geleneksel betonarme çeliği için idealleştirilmiş gerilme şekildeğiştirme grafiği verilmiştir. Çelik halatın akma anında çekme bölgesinde bir kuvvet eşitliği yazılabilir. Bu kuvvet denkliği kullanılarak ortalama gerilme bulunabilir.



Şekil 4.12 : Çelik halat ve geleneksel betonarme çeliği gerilme şekildeğiştirme grafikleri.

Geleneksel betonarme çeliğinin taşıdığı kuvvet denklem 4.6 ile hesaplanabilir.

$$F_1 = A_{s1} \times \sigma_1 \quad (4.6)$$

Çelik halatın taşıdığı kuvvet denklem 4.7 ile hesaplanabilir.

$$F_2 = A_{s2} \times \sigma_2 \quad (4.7)$$

Çekme bölgesindeki toplam kuvvet ise F_1 ve F_2 kuvvetlerinin toplamına eşit kabul edilebilir.

$$F = F_1 + F_2 \quad (4.8)$$

Denklem 4.9 kullanılıp geleneksel betonarme çeliği ve çelik halatın taşıdığı toplam kuvvet, bu kuvveti taşıyan toplam çekme donatısı enkesit alanına bölünerek ortalama bir gerilme hesaplanabilir.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_1 \times A_{s1} + \sigma_2 \times A_{s2}}{(A_{s1} + A_{s2})} \quad (4.9)$$

Denklem 4.9’da σ_1 geleneksel betonarme çeliği için, σ_2 çelik halat için sırasıyla gerilme durumlarıdır. A_{s1} ve A_{s2} de sırasıyla geleneksel betonarme çeliği ve çelik halat için çekme bölgesindeki toplam enkesit alanlarıdır. Çelik halatın akma anında gerilmesi 1730 MPa, geleneksel betonarme çeliğinin gerilmesi 480 MPa, çelik halatın çekme bölgesindeki toplam enkesit alanı 189.2 mm² ve geleneksel

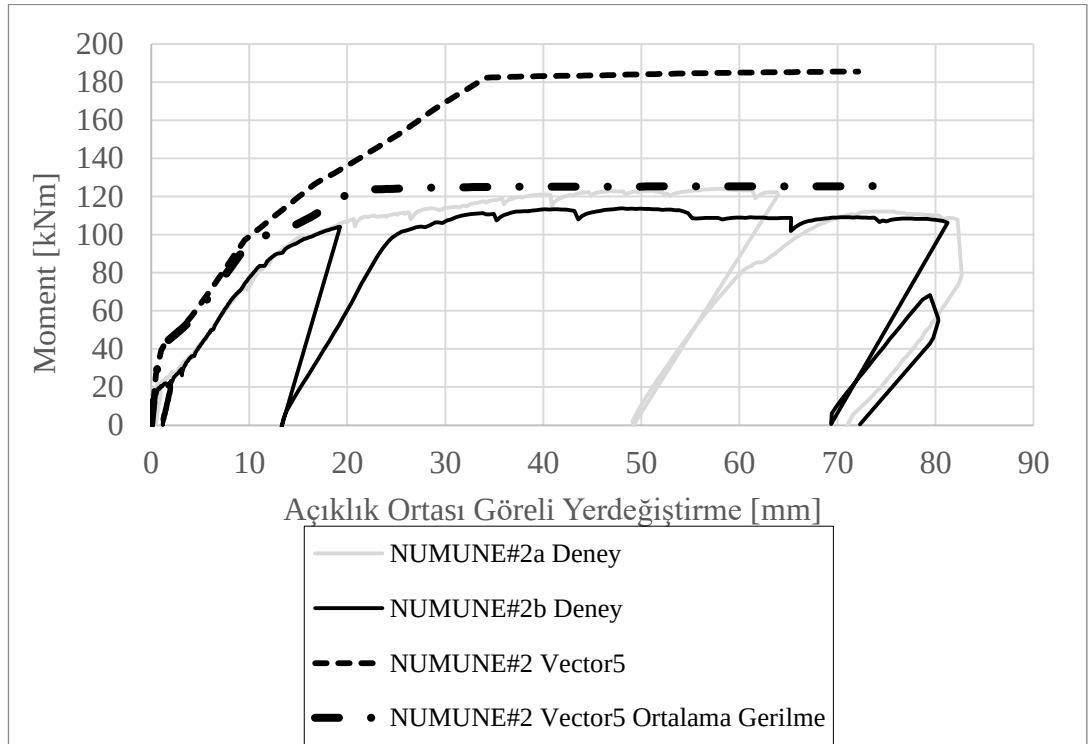
betonarme çeliğinin çekme bölgesindeki toplam enkesit alanı 226 mm² olarak alınıp denklem 4.9’da yerine konursa denklem 4.10 ile ortalama gerilme bulunabilir.

$$\sigma_{ort} = \frac{480 \times 226 + 1730 \times 189.2}{(226 + 189.2)} = 1049.6 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10’da ortalama gerilme değeri σ_{ort} 1050 MPa olarak bulunur. Bu değer çelik halatın akma dayanımı olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.12’de gösterildiği gibi Vector5 programında analitik modelde malzeme modeli yeniden girilerek moment yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.13’teki gibi elde edildi.

Çizelge 4.12 : Vector5 numune 2 donatılar için girilen yeni değerler.

MT	N	Ys	As	Db	Fy	Fu	Es	esh	eu	BLDR
		mm	Mm2	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	me	L/Db
1	1	50.0	226	12	480	560	200000	24	180.0	17
1	2	446	189.2	11	1050	1060	200000	12	65.0	1
1	3	450	226.0	12	480	560	200000	24	180.0	1
2	1	50	226.0	12	480	560	200000	24	180.0	17
2	2	446	189.2	11	1050	1060	200000	12	65.0	1
2	3	450	226.0	12	480	560	200000	24	180.0	1



Şekil 4.13 : Numune 2 ortalama gerilme değeri için moment açıklık ortası yerdeğiştirme.

Şekil 4.13'te 2a ve 2b numuneleri için deney sonuçları, gerçek malzeme modellerinin kullanıldığı analitik çözüm ve hesaplanan ortalama gerilmenin kullanıldığı analitik çözüm yer almaktadır.

Ortalama gerilme ile hesaplanan moment açıklık ortası yerdeğiştirme eğrisinin deney sonuçlarına yakınlığı belirlenmiştir. Bu değerler çelik halatın akma dayanımına ulaşmadığını belirli bir gerilme değerinde yataylaştığını göstermiştir. Bu değer ortalama şekildeğiştirmeler kullanılarak hesaplanan ortalama gerilme değeridir.

Çevrimsel yüklemenin yapıldığı numune 3 için iskelet eğrisi, numune 1'deki malzeme modelleri kabul edilerek Şekil 4.10'da verilmiştir. Burada da analitik hesap sonuçlarının gerçek sonuçlar ile örtüşmediği görülmüştür. Numune 3 için de numune 2 için yapılan kabuller yapılarak Vector5 programında yine çelik halat için ortalama gerilme değeri girilerek analiz yapılmıştır.

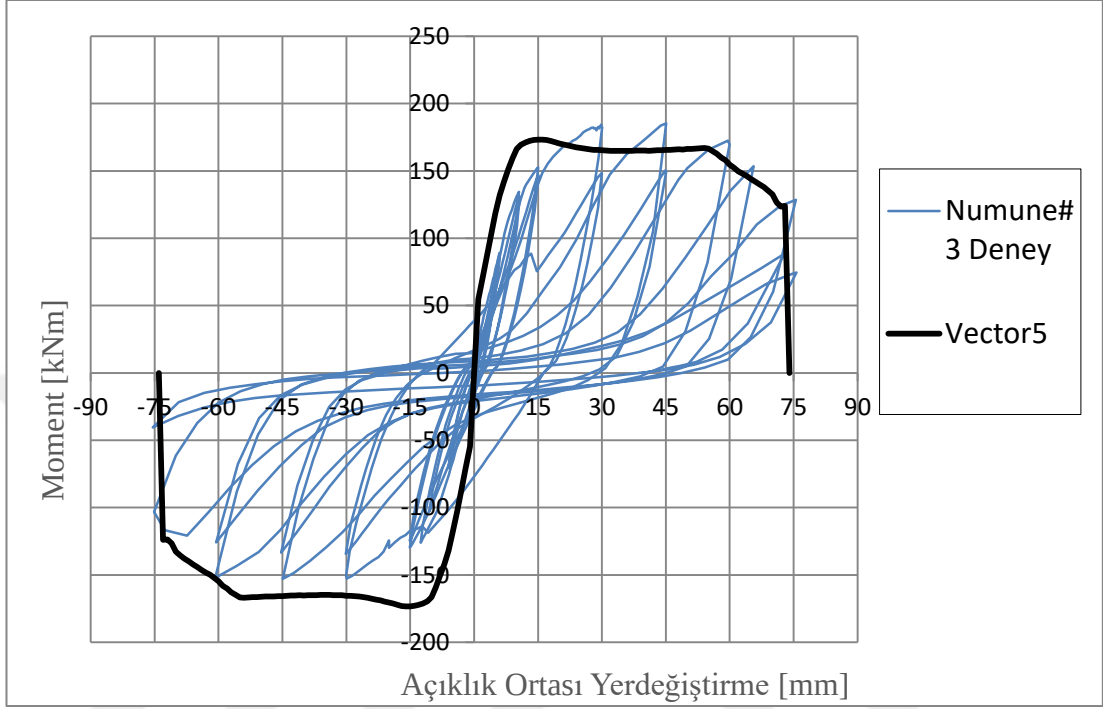
Şekil 4.14'te moment açıklık ortası yerdeğiştirme, Şekil 4.15'de kuvvet açıklık ortası yerdeğiştirme grafikleri görülmektedir. Bu grafiklere bakıldığında ortalama gerilme değerleri kullanılarak hesaplanan değerler gerçek sonuçlara yakın değerler almaktadır.

Çizelge 4.13'te numune 3 için Vector5 programına girilen donatı katmanları görülebilir. Burada halat için akma değeri 1050 MPa, kopma değeri ise 1060 MPa olarak girilmiştir.

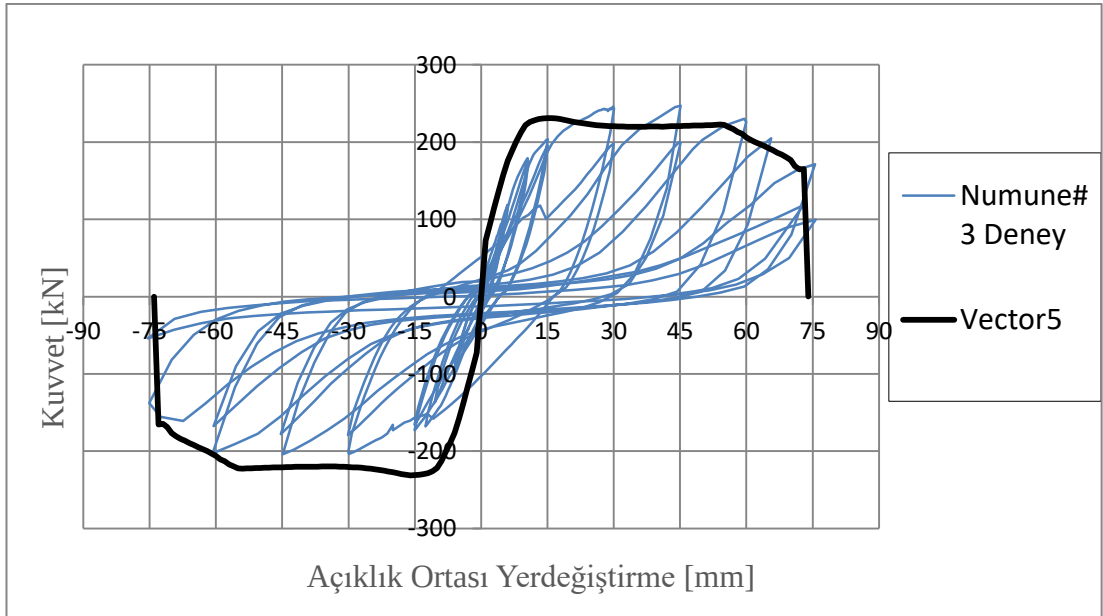
Çizelge 4.13 : Vector5 numune 3 donatılar için girilen yeni değerler.

MT	N	Ys	As	Db	Fy	Fu	Es	esh	eu	BLDR	Dep
		mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	me	L/Db	me
1	1	50	226	12	480	560	200000	12	150	17	0
1	2	54	189.2	11	1050	1060	200000	24	150	17	0
1	3	250	226	12	480	560	200000	12	150	1	0
1	4	446	189.2	11	1050	1060	200000	24	150	1	0
1	5	450	226	12	480	560	200000	12	150	1	0
2	1	50	452	12	480	560	200000	12	150	1	0
2	2	54	378.4	11	1050	1060	200000	24	150	1	0
2	3	250	452	12	480	560	200000	12	150	1	0
2	4	446	378.4	11	1050	1060	200000	24	150	1	0
2	5	450	452	12	480	560	200000	12	150	1	0

Çizelge 4.13'te 1. sütunda MT değerleri için 2 adet malzeme değeri tanımlanmıştır. İki malzeme tipi arasındaki fark boyuna donatı enkesit alanları toplamıdır. Vector5 programı, kayma problemi oluşan durumlarda, mesnete yakın yerlerde ve yükün etkitildiği noktalardaki elemanlara 2 kat donatı tanımlanabileceğini söylemektedir.



Şekil 4.14 : Numune 3 ortalama gerilme ile hesaplanan moment açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 4.15 : Numune 3 ortalama gerilme ile hesaplanan kuvvet açıklık ortası yerdeğiştirme grafiği.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çelik halatların herhangi bir kuvvet verilmeden betonarme kirişlerde ve eksenel kuvvetin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu betonarme kolonlarda kullanılması deneysel ve analitik olarak incelenmiştir.

Numune 1 yalnızca betonarme çeliği ile donatılmıştır. Diğer 3 numunede hem betonarme çeliği hem de çelik halat bulunmaktadır. Çelik halatlı numunelerdeki donatı miktarı, numune 1 ile eşdeğer çekme kuvvetini verecek şekilde belirlenmiştir. Deney sonucunda elde edilen moment yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Yakın moment kapasitelerine sahip olması beklenen geleneksel ve çelik halatlı numunelerin deney sonucunda aynı moment kapasitelerine ulaşamadıkları görülmüştür. Geleneksel numune yaklaşık 200 kNm, çelik halatlı numuneler yaklaşık 120 kNm momente erişmişlerdir. Deneylerde çelik halatların betondan sıyrılması ve aderans kayıpları yaşaması sebebiyle istenen şekildeğiştirmelere ve gerilmelere ulaşamadığı görülmüştür. Bu nedenle çelik halatlı numunelerin moment kapasiteleri geleneksel numunelere göre yüzde 40 daha az olmuştur.

Kirişlerde oluşan eğilme çatlakları da deney süresince gözlenmiştir. İlk eğilme çatlakları 1 numunesinde 18 kN, çelik halatlı 2a ve 2b numunelerinde sırasıyla 22 kN ve 17 kN yükte meydana gelmiştir. Çelik halatlı numunelerde çatlaklar daha hızlı yayılmıştır. Bu kirişlerdeki eğilme çatlakları daha az sayıda, daha fazla genişlikte ve daha seyrek oluşmuştur.

Yalnızca betonarme çeliği içeren numune 1 için deney sonuçları ile Vector5 programı ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Numune 1 analiz edilirken kullanılan malzeme modellerinin hem beton hem de geleneksel betonarme çeliği için doğrulandığı kabul edilmiştir. Numune 1 ve numune 2 için deney düzeneği dahil diğer her değişken aynı olduğu için yalnızca numune 2 analitik modelinde kesite çelik halatlar tanımlanarak Vector5 programında analiz yapılmıştır. Çıkan sonuçların deney sonuçlarına yakın olmadığı görülmüştür. Analitik olarak düzlem kesit düzlem kalır kabülü yapıldığından çelik halatın tam

olarak kuvvet taşıdığı kabul edilmektedir. Gerçekte ise çelik halatın akma değerine ulaşamadığı belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak ortalama gerilme hesaplanarak, analitik modelde çelik halatın akma ve çekme dayanım değerleri ortalama gerilme değerine göre yeniden girilmiştir. Çıkan sonuçların deney sonuçları ile yakın olduğu görülmüştür.

Son numune için, deney düzeneği değiştirildiği için yeniden düğüm noktaları tanımlanarak eleman ağı oluşturulmuştur. Donatılar da kesit içine tanımlanarak gerçek malzeme değerleriyle analiz yapılarak deney sonucu elde edilen çevrimsel yüklemede elde edilen yük yerdeğiştirme ve moment yerdeğiştirme değerleri için iskelet eğrileri çıkarılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analitik sonuçlar ile deney sonuçlarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Numune 3 için çelik halatın akma ve çekme dayanımları ortalama gerilme seviyelerine düzeltilip tekrar analiz yapılmıştır. Bu durumda iskelet eğrisinin deney sonuçlarını yakaladığı belirlenmiştir.

Çelik halatların herhangi bir kuvvet verilmeden betonarme kirişlerde kullanılması durumunda akma değerlerine ulaşamadığı, betondan sıyrıldığı ve aderansını kaybettiği belirlenmiştir.

Deney numuneleri dışarda hazırlanıp, deney alanına getirilmiştir. Dolayısıyla donatılara şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılamamıştır. Dönme ve eğrilik değerlerini hesaplamak amacıyla kirişlerin orta noktalarında beton yan yüzeylerine yatay yerdeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Bu ölçümlerden hem dönme hem de eğrilik hesaplamak için sağlıklı veriler elde edilememiştir. Bu yüzden moment eğrilik veya moment dönme ifadeleri bu çalışmada kullanılamamıştır. Deney sonuçlarının hem kendi içinde hem de analitik sonuçlarla karşılaştırılması moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme üzerinden yapılmıştır.

Betonarme çeliğinin ve herhangi bir kuvvet verilmeyen çelik halatın aynı kesitte çekme donatısı olarak kullanılmaları araştırılmıştır. Bu çalışma bu konuda yapılan tek çalışmadır. Dolayısıyla gelecekte yapılacak çalışmalarda betonarme çeliğine ve çelik halata şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılması, betonarme kesit için daha detaylı incelemeler yapılmasını sağlayacaktır. Beton yüzeyine yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden sağlıklı veriler elde edilememektedir.

KAYNAKLAR

- Arsava, T.**, (2011). "Investigating Use Of Untensioned Prestressing Strands In Reinforced Concrete Flexural Members", Graduate Thesis, Atılım University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Istanbul.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N., Girgin, C.** "Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil - Boyut Etkisi", *Hazır Beton Dergisi*, Ocak-Şubat 1999, s.40-50.
- B. Giduquio, Min-Yuan Cheng, and Leonardus S. B. Wibowo** (2015). High-strength flexural reinforcement in reinforced concrete flexural members under monotonic loading, *ACI Structural Journal*, V. 112, No. 6, November-December.
- Celep, Z., Kumbasar, N.**, 2004, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- Chu, P. and Guner, S.** (2016), "User Bulletin 5: Determination of Material Properties," Online Publication, 11 pp.
- Felicia and Susanto Teng**, Design Concrete Members with High Strength Steel Reinforcements, The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15), Incheon, Korea, August 25-29, 2015.
- Guner, S. and Vecchio, F. J.** (2008), "User's Manual of VecTor5," Online Publication, 88 pp.
- Karaesmen, E.**, 2015, Ardgermeli Beton ve Yeni Çözümler, Lord Matbaacılık ve Kağıtçılık, İstanbul.
- Kelly, D.J. & Lepage, Andres & Mar, David & Restrepo, Jose & Sanders, J.C. & Taylor, A.W.**. (2014). Use of high-strength reinforcement for earthquake-resistant concrete structures. NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering. 10.4231/D3Z31NP6Z.
- M. Dawood , H Seliem, Dr. T. Hassan, Dr. S. Rizkalla. S.**"Design Guideline for Concrete Beams Reinforced with MMFX Microcomposite Reinforcing Bars", NCSU.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.**, 1988, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of the Structural Division*. Vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826.
- Rautenberg, Jeffrey & Pujol, Santiago & Tavallali, Hooman & Lepage, Andres.** (2012). Reconsidering the use of high-strength reinforcement in concrete columns. *Engineering Structures*. 37. 135–142. 10.1016/j.engstruct.2011.12.036.

- TBDY**, 2018. Tükiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TS3233**, 1979, Öngerilmeli beton yapıların hesap ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS500**, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS708**, 2016, Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Viana, H. F. and Guner, S.** (2014), "User Bulletin 1: Beam Modeling with VecTor5," Online Publication, 20 pp.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muzaffer Yazar
Doğum Tarihi ve Yeri : 26.08.1992
E-posta : yazarmu@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mühendisliği