KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KISA KONSOLLAR İÇİN TASARIM MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

MAHMUT İSLAM YILDIZ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KISA KONSOLLAR İÇİN TASARIM MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Mahmut İslam YILDIZ

Dr. Öğr. Üyesi Hilal Meydanlı ATALAY
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ENGİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZGÜR
Jüri Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üni. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.02.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde yapı elemanlarının güvenli tasarımı için hesap modelleri geliştirilmiş, ilerleyen yazılım teknolojisi sayesinde de bu yöntemler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu çalışmada, kısa konsolların kapasite hesabı için geliştirilmiş literatürde mevcut analitik yöntemler incelenmiş, deneysel ve analitik sonuçlar sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca benden destek ve yardımını esirgemeyen, aktardığı bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasına katkıda bulunan danışman hocam Sayın Dr. Hilal MEYDANLI ATALAY'a, çalışmamın başında katkılarından dolayı Arş. Gör. Aytuğ SEÇKİN'e ve hayatımın her anında yanımda olan bütün çalışmalarımda olduğu gibi yine maddi ve manevi hiçbir yardımdan kaçınmayan, desteklerini her an benimle birlikte hissettiğim çok kıymetli babam Bülent YILDIZ ve annem Esma YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Şubat - 2019 Mahmut İslam YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1. KISA KONSOLLARIN TANIMI VE DAVRANIŞI 3
2. LİTERATÜDEKİ MEVCUT ÇALIŞMALAR 7
2.1. Deneysel Çalışmalar 7
2.2. Analitik Çalışmalar 21
2.3. Çubuk Analojisi (Strut and Tie Model) Yöntemi 28
2.4. Yönetmeliklerdeki Tasarım Yöntemleri 29
2.4.1. TS 500-2000 Betonarme Yapıların Tasarım Yönetmeliği 29
2.4.2. ACI 318-14- Betonarme Yapı Tasarım Yönetmeliği 30
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ 33
3.1. Giriş 33
3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Modelleme Aşamaları 33
3.3. Malzeme Modelleri 37
3.3.1. Beton modeli 37
3.3.2. Donatı modeli 40
3.4. Sonlu Elemanlar Çözümü 40
4. KISA KONSOLLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 42
4.1. İncelenen Kısa Konsol Özellikleri 42
4.2. Deneysel Kısa Konsolların Modellenmesi 45
4.3. Sonlu Elemanlar Boyutunun Davranışa Etkisi 50
5. ANALİZ SONUÇLARI VE DENEYSEL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI 51
5.1. Beton Basınç Dayanımının Etkisi 51
5.2. Lif Oranının Etkisi 58
5.3. (a/d) Oranının Etkisi 64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 67
KAYNAKLAR 70
EKLER 74
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 93
ÖZGEÇMİŞ 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Konsol-kiriş birleşimleri 3
Şekil 1.2. Kısa konsol davranış modeli 4
Şekil 1.3. Kısa konsol görünüşü 5
Şekil 1.4. Kısa konsolların yük etkisi altındaki davranışları 6
Şekil 2.1. Betonarme kısa konsol tasarımı için franz ve niedenhoff tarafından dönerilen basit kafes modeli 8
Şekil 2.2. Kısa konsol detayları ve yükleme düzeneği 17
Şekil 2.3. Tam ölçekli kolon-kiriş birleşimi ve yükleme düzeneği 19
Şekil 2.4. Kısa konsolların kesme kuvvetine karşı tasarımı 23
Şekil 2.5. Kısa konsollarda çubuk analoji 24
Şekil 2.6. Kısa konsolun gerilme trajektuvarı 28
Şekil 2.7. Kısa konsolun yapısal tesirleri (ACI 318-14) 31
Şekil 2.8. Kısa konsol notasyonu ve donatı detayı (ACI 318-14) 32
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile geometri modelleme 35
Şekil 3.2. Kabuk elemandaki gerilmeler 36
Şekil 3.3. Kabuk eleman oluşumu 36
Şekil 3.4. Katmanlı kabuk eleman modeli 37
Şekil 3.5. Mander beton modeli 39
Şekil 3.6. Betonun çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi 40
Şekil 3.7. Donatı çeliği σ-ε eğrisi 41
Şekil 4.1. Kısa konsolların yükleme şeması ve özellikleri 43
Şekil 4.2. Kısa konsol sonlu eleman ağ modeli 46
Şekil 4.3. Donatılı beton katmanının modellenmesi 47
Şekil 4.4. Beton gerilme-şekil değiştirme davranışı 48
Şekil 4.5. Donatının gerilme-şekil değiştirme davranışı 49
Şekil 5.1. Normal dayanımlı betonarme kısa konsolların kesme kapasitesi 53
Şekil 5.2. Yüksek dayanımlı betonarme kısa konsolların kesme kapasitesi 53
Şekil 5.3. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 arası olan kısa konsollar 54
Şekil 5.4. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 arasında olan kısa konsollar 54
Şekil 5.5. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1,0 arasında olan kısa konsollar 55
Şekil 5.6. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 arasında olan kısa konsollar 56
Şekil 5.7. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 arasında olan kısa konsollar 56
Şekil 5.8. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1,0 arasında olan kısa konsollar 57
Şekil 5.9. Lifli beton kısa konsollar 60
Şekil 5.10. Lif oranı %0 olan betonarme kısa konsollar 61
Şekil 5.11. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 olan kısa konsollar 61
Şekil 5.12. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 olan kısa konsollar 62

Şekil 5.13. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1 olan kısa konsollar 62
Şekil 5.14. Lif katkısız betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 olan kısa konsollar 63
Şekil 5.15. Lif katkısız betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 olan kısa konsollar.. 63
Şekil 5.16. Lif katkısız betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1,0 olan kısa konsollar 64
Şekil 5.17. (a/d) oranı 0-0,5 olan kısa konsollar 65
Şekil 5.18. (a/d) oranı 0,5-0,75 olan kısa konsollar 66
Şekil 5.19. (a/d) oranı 0,75-1,0 olan kısa konsollar 66

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Kısa konsolların özellikleri 43
Tablo 4.2. Sonlu elemanlar mesh boyutu 45
Tablo 4.3. Mesh boyutunun kısa konsol kesme kapasitesine etkisi……...50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a : Kesme açıklığı (Tekil yükten mesnete olan uzaklık), (m)
A_{st} : Donatı kesit alanı, (mm^2)
A_{sv} : Kısa konsolda yatay donatı alanı,(mm^2)
A_{wf} : Kesme-sürtünme donatısı kesit alanı,(mm^2)
B : Betonda basınç bölgesinin eğimi
b_w : Beton tasarım basınç dayanımı,(MPa)
c : Tarafsız eksen derinliği (m)
d : Eğilme elemanlarında faydalı yükseklik,(m)
f_{cd} : Beton tasarım basınç dayanımı,(MPa)
f_{ct} : Yarma gerilmesi, (MPa)
f_{su} : Donatı çekme dayanım,(MPa)
f_{sy} : Akma dayanımı,(MPa)
F_{yd} : Kısa konsollarda yatay kuvvet,(MPa)
f_{ys} : Ana donatı akma oranı
f_{yt} : Firkete tabakasının akma gerilmesi,(MPa)
f_{yh} : Firkete donatısının akma oranı
H_d : Kısa konsollarda yatay kuvvet,(KN)
K_o : Test sonuçlarından elde edilen gerilmedeki lifli beton katkısı
l : Betonda basınç çubuğunun genişliği,(m)
n : Çeliğin elastisite modülünün beton elastisite modülüne oranı ($n= E_s/E_c$)
P_f : Eğilme donatı oranı,(mm^2)
p_h : Kolon ve kısa konsollar arasındaki firkete oranı
V_d : Tasarım kesme kuvveti,(KN)
V_u : Kesitin kesmede çatlama dayanımı,(MPa)
θ : Beton basınç çubuğuyla dikey düzlem arasındaki açı
Φ : Azaltma faktörü
η : Lif yoğunluk oranı,(%)
ε_{sy} : Akma birim uzaması,(%)
ϕ : Boyuna donatı çapı,(m)
ε_{cu} : Kopma birim uzaması(%)

BETONARME KISA KONSOLLAR İÇİN TASARIM MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

ÖZET

Derin kirişler, kazık başlıkları, çerçeve köşeleri, guse ve kısa konsol gibi kesme kuvvetinin etkin olduğu elemanlar betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kısa konsollar, genellikle bir kolona mesnetlenmiş, ağır tekil yükleri taşıyan yüksekliği sabit veya değişebilir olan kısa kirişlerdir. Kısa konsolların davranışı, klasik kiriş davranışından oldukça farklı olduğundan tasarımı için özel kriterler gerektirmektedir. Günümüzde laboratuvar olanaklarının artmasına karşın deneysel çalışmalar daha fazla kaynak ve zaman gerektiğinden kısa konsolların tasarımı için geliştirilmiş çeşitli analitik yöntemler literatürde mevcuttur.

Çalışmanın amacı betonarme kısa konsollar için mevcut tasarım yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini yapmaktır. Bunun için TS500 ve ACI318 tasarım yönetmelikleri, çubuk analojisi yöntemi ve literatürde gösterilen iki analitik yöntem incelenmiştir. Bu karşılaştırmanın amacı, kısa konsolların kesme kapasitesini belirleyen en iyi tasarım modelini belirlemektir. Bunun için çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen ve literatürde mevcut kısa konsol test sonuçlarından bir veri tabanı oluşturulmuş ve tasarım modelleri bu veri tabanına uygulanmıştır. Bununla birlikte, düşey yük etkisindeki kısa konsollar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak tasarım yöntemlerinin beton basınç dayanımı, kesme açıklığı/derinlik oranı, lif oranına duyarlılığı kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kesme Kapasitesi, Kısa Konsol, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Tasarım Modelleri.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN MODELS FOR REINFORCED CONCRETE CORBELS

ABSTRACT

Nonflexural members such as deep beam, pile head, frame corner, bracket and corbel are widely used in reinforced concrete structures. Corbels are short beams, usually fixed to a column, with fixed or variable height, bearing heavy vertical loads. Since the behavior of corbels is quite different from the classical beam behavior, the design is done according to specific criteria and constructive rules. Since the behavior of corbel is quite different from the classical beam behavior, it requires special criteria for its design. Although there is an increase in laboratory facilities nowadays, experimental studies require more resources and time, therefore various analytical methods have been developed for the design of corbels are available in the literature.

The objective of this study is performing a comparative analysis of many design models for corbels. For this, it was analyzed design models from TS 500 and ACI-318 design odes, strut-and-tie model and two analytical models in the literature. The objective of this comparative is identifying the best design models to represent the shear force capacity of concrete corbels. For this, a database was assembled from corbels test results conducted by several researchers was been established and is shown in the literature. The design models were applied to this database. Moreover, corbels in the effect of only vertical load were modeled by finite element method and the behavior of this members as a result of analysis was examined. The results consistent with the experimental data were obtained. As a result, the sensitivity of the design methods in terms of concrete compressive strength, shear span/depth ratio, fiber ratio were compared.

Keywords: Shear Capacity, Corbel, Finite Element Method, Design Models.

GİRİŞ

İnşaat sektöründe yapı sistemi olarak prefabrik beton kullanımı giderek artmaktadır ve bu durum prefabrike yapıların tasarım yöntemlerinde gelişmelere yol açmıştır. Prefabrike yapı sistemlerinin yaygınlaşması, yapım yönteminin avantajları nedeniyle ortaya çıkmıştır. Prefabrike elemanlar kullanıldığında daha iyi işçilik ve yüksek malzeme kalitesi sağlanırken inşaat süresi önemli oranda kısalmakta ve yapı estetiği korunmaktadır.

Kısa konsollar ise betonarme yapılarda kullanılan yapısal elemanlardır. Özellikle betonarme prefabrike sanayi yapılarında kiriş ve döşemeler kolonlarda oluşturulan kısa konsollara oturtularak mesnetlenmesi sağlanmaktadır. Kısa konsolların ana işlevi prefabrike yatay elemanlardan gelen düşey ve yatay kuvvetleri ana taşıyıcı elemanlara iletmektir. Yüksek bileşik kuvvetlere maruz kalan bu elemanların tasarımı için farklı hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Çubuk analojisi yöntemi kısa konsolların tasarımı ve analizinde kullanılan bir yöntemdir ve bu yöntemde kısa konsolda meydana gelen çekme ve basınç gerilmeleri kafes gibi modellenerek davranış sadeleştirilmektedir. Böylece kısa konsolların tasarımı ile dayanıklı, uzun ömürlü ve güvenli betonarme yapıların tasarımı hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında lifli beton, lifsiz beton, yüksek dayanımlı beton, düşük dayanımlı betonlardan oluşturulan betonarme kısa konsol numuneleri dikkate alınarak; (a/d) oranının, lif ilavesinin donatı alanının ve beton sınıfının kısa konsol kapasitesi ve davranışına etkisi incelenmiştir.

Deneysel olarak test edilmiş, geometrileri ve malzeme özellikleri belli olan kısa konsol numunelerinin kapasitesi, ulusal ve uluslararası yönetmelikler ve literatürde gösterilen analitik modellere göre hesaplanmıştır. Ayrıca betonarme kısa konsollar sonlu elemanlarla modellenerek analiz edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı betonarme kısa konsolların donatının akması veya betonun ezilmesi ile meydana gelen göçme yükünü en iyi tanımlayan hesap modelinin belirlenmesidir.

Bu çalışma toplam altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde kısa konsolların tanımı, düşey ve yatay yük etkisinde davranışları ve göçme modları hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde kısa konsolların davranışı ve kapasitesinin belirlenmesi için literatürde mevcut deneysel ve analitik çalışmalar açıklanmıştır. Önerilen denklemler gösterilmiştir. Ayrıca tasarım yönetmeliklerinde yer alan özel kriterler ve çubuk analojisi yöntemi de bu bölümde anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde yapı sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi incelenmiştir. Modelleme aşamaları, malzeme davranışları ve analiz adımları açıklanmıştır.

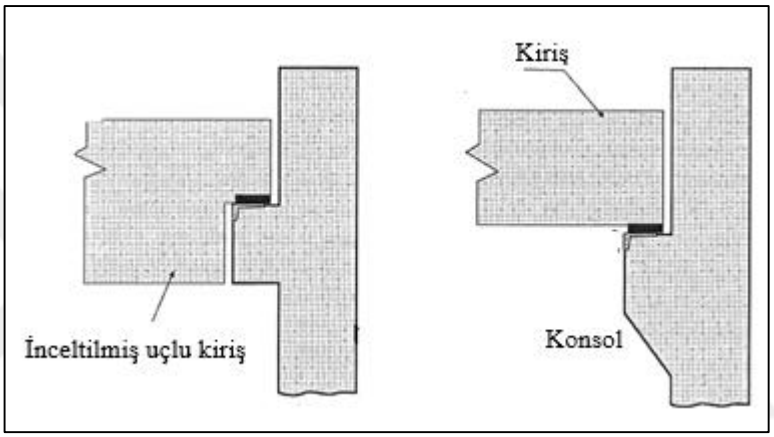
Dördüncü bölümde literatürde mevcut kısa konsol test sonuçlarından bir veri tabanı oluşturulmuştur. Veri tabanındaki numunelerin sonlu elemanlar analizi ile kapasiteleri bu bölümde belirlemiştir.

Beşinci bölümde ise veritababını oluşturan numunelerin ikinci bölümde açıklanan tasarım yöntemleri ile kapasiteleri hesaplanmıştır. Tasarım modellerinden elde edilen sonuçlar ve sonlu elemanlar analizi sonuçları deneysel kapasite ile karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde, bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler sunulmuştur.

1. KISA KONSOLLARIN TANIMI VE DAVRANIŞI

Kısa konsollar ile özellikle kiriş döşeme elemanları birleşimlerinde ve köprü kirişleri ile kolon başlarındaki mesnetlerde sıkça karşılaşılmaktadır. Bu tür kısa konsolların donatı hesaplarında konsolun özelliği ve taşıma kapasitesi belirleyici olmaktadır. Betonarme prefabrike yapılar için uygulanan kiriş-kolon ve konsol elemanlarının görünüşleri Şekil 1.1'de görülmektedir [1].

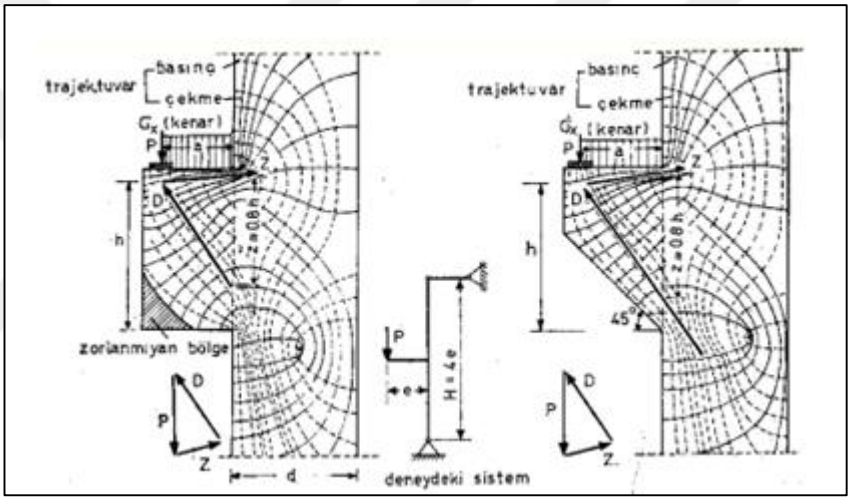


Şekil 1.1 Konsol-kiriş birleşimleri [1]

Kısa konsollar, genellikle bir kolona mesnetlenmiş, ağır tekil yükleri taşıyan yüksekliği sabit veya değişebilir olan kısa kirişlerdir. Bu kısa konsollarda, yükleme noktasının mesnet yüzüne olan uzaklığının (a) kesitin faydalı yüksekliğine (d) oranı, $a/d < 1$'dir. Bu oran gerilme durumunun iki eksenli olarak göz önüne alınmasını gerektirir. Oluşan kayma gerilmeleri konsolun davranışında etkili olurken, konsolun kesme kuvvet dayanımı taşıyıcı sistemde belirleyici olarak ortaya çıkmaktadır. Konsola etkiyen düşey yükün yanında önemli bir yatay yük de bulunmaktadır [2]. Bu tür konsolların davranışları klasik kiriş davranışından farklı olduğundan taşıma gücü hesapları ve donatı detayları da değişiklik göstermektedir. Eğilme etkisi ihmal edilerek özellikle kesme etkilerine karşı gerçekleştirilen bu hesaplarda, konsol üzerine etkiyen yükün bir beton basınç çubuğu aracılığıyla mesnet alt köşesine aktarıldığı kabul edilmektedir. Kısa konsolun düşey statik yüklemeye maruz kaldığında oluşan gerilme dağılımı Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Sürekli çizgiler

çekme kuvvetlerini temsil ederken basınç kuvvetleri kesikli çizgilerle gösterilmektedir. Gerilme dağılımı incelenerek aşağıdaki sonuçlar derlenmektedir;

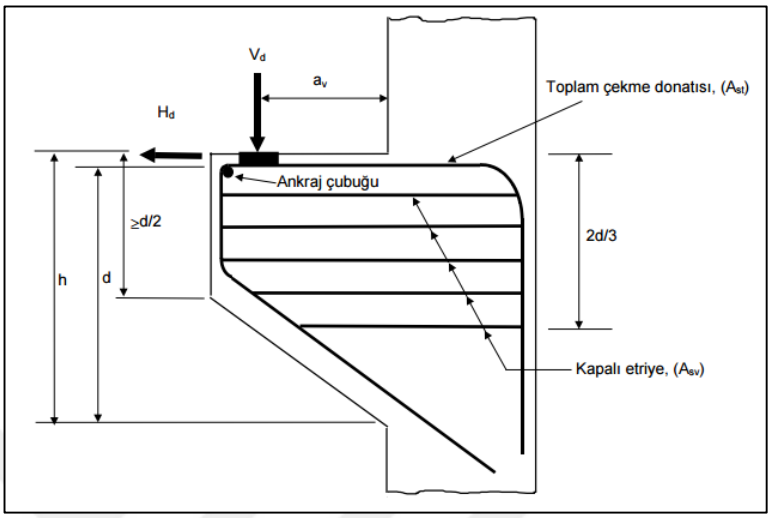
- Çekme kuvvetleri yükleme noktası ile kolonun kenarı arasındaki hemen hemen sabit bir yayılış göstermektedir.
- Konsol alt ucunda eğimli olarak kafes sistem benzeşimine uygun oluşan basınç kuvveti de sabit kabul edilebilir. Basınç kuvvetinin doğrultu değiştirmesinden oluşan çekme gerilmeleri oldukça küçük seviyelerdedir.
- Kısa konsolun dikdörtgen seklinde olması, gerilme durumunda hemen hemen hiç değişiklik oluşturmaz ve kısa konsolun dış-alt kısmında çok küçük gerilmeler meydana gelmektedir.



Şekil 1.2. Kısa konsol davranış modeli [3]

Kısa konsollarda asal gerilmelerin yönü konsol ekseni doğrultusuna yakın olduğundan, bu elemanlarda en etkili donatı, kiriş eksenine paralel çeşitli seviyelerde düzenlenecek çubuklardan oluşmaktadır. Bu bölgedeki çekme gerilmelerini karşılamak amacıyla yerleştirilen yatay donatılar yeterli biçimde kenetlenmelidir. Yükün konsola saplanan bir kirişe aktarıldığı durumlarda, konsol alt yüzüne etkiyen bu yükün yükseklik boyunca taşınması gerekmektedir. Bunu sağlamak için askı donatısı kullanılmaktadır. Ayrıca donatıların konsol ucunda ve kolon içinde kenetlenmesinin sağlanması için donatı çapının küçük olduğu durumlarda yatayda firkete yapılırken, donatı çapı büyükse mekanik kenetlenme kullanılmaktadır [2].

Kısa konsollarda sürtünme kesmesi dikkate alınarak, kesme sürtünme donatısı (A_{wf}) belirlenmektedir. Toplam çekme donatısı (A_{st}), eğilme ve eksenel kuvvet (H_d) için hesaplanan donatıların toplamıdır ve bu durum Şekil 1.3'te gösterilmektedir [4].



Şekil 1.3. Kısa konsol görünüşü[5]

Donatı konfigürasyonuna göre üstte çekme donatısı yerleştirilerek kafes sistem oluşumu sağlanırken, konsol yükü eğimli beton basınç çubuğu ve çekme kuvveti yatay donatı ile karşılanır. Bu tür donatı düzenine sahip kısa konsollar üzerinde yapılmış deneylerde, konsolun geometrik boyutlarına ve donatısına bağlı olarak, farklı göçme modları sergilediği görülmektedir (Şekil 1.4);

a) Üst donatı ucunun yeterli kenetlenme boyunun bulunmaması çekme kuvvetinin oluşmamasına neden olur ve ankraj göçmesi (anchorage failure) ile konsolda yük taşıma sona ermektedir.

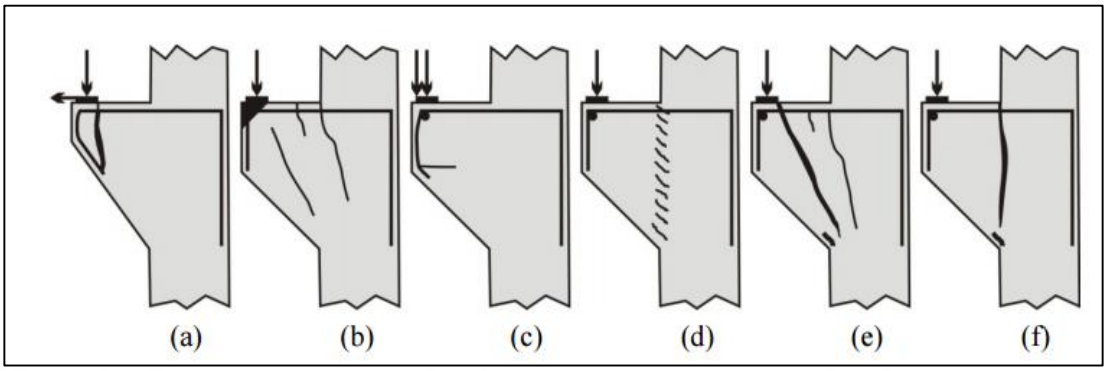
b) Mesnet yastığının çok esnek veya küçük olması mesnette betonun ezilmesine (bearing failure) sebep olur.

c) Konsol serbest ucuna çok yakın uygulanan düşey yük nedeniyle konsol ucunda yarılma göçmesi (splitting failure) oluşur.

d) Kolon yüzündeki kayma gerilmeleri eğik çatlaklar oluşmasına neden olur ve kısa konsolun kolon veya duvar yüzeyinden ayrılması ile kayma kesmesi (sliding shear failure) göçmesi meydana gelir.

e) Kesme basınç kırılması (shear compression failure), gövdede meydana gelen çekme gerilmeleri basınç çubuğu boyunca eğik çatlaklar oluşturmakta ve basınç çubuğunun ezilmesi ile diyagonal yarma göçme tipi meydana gelmektedir.

f) Eğilme çekmesi göçmesi (flexural tension failure), çekme donatısının akması ile kolon yüzünde çatlak oluşup açılmakta ve beton basınç çubuğunun ezilmesi ile göçme meydana gelmektedir.



Şekil 1.4. Kısa konsolların yük etkisi altındaki davranışları [4]

2. LİTERATÜDEKİ MEVCUT ÇALIŞMALAR

Kolonlarla birlikte birdöküm olarak inşa edilen betonarme kısa konsollar yapısal elemanlardır ve esas görevi prefabrike yatay elemanlardan gelen düşey ve yatay reaksiyonları mesnetlendiği ana taşıyıcı elemanlara aktarmaktır. Kısa konsollar esas olarak konsol ucundaki düşey kesme kuvvetini (V_u) taşımak için tasarlanmaktadırlar. Ancak büzülme, sünme veya sıcaklık değişiminin neden olduğu yatay kuvvetlerden (N_{uc}) kaçınmak için özel önlemler alınmadığı takdirde yatay kuvvetlerde tasarımda dikkate alınmaktadır. Bu tasarım genellikle sürtünme kesmesi teorisine göre yapılmaktadır.

Kısa konsolların düşey ve yatay yükler etkisinde davranışını belirlemek amacıyla çok sayıda deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kısa konsolların geometri ve boyutları, ana çekme donatısı oranı ve ikincil donatı oranı, lif tipi, lif oranı ve beton basınç dayanımı değişken olarak incelenmiştir. Bununla birlikte kısa konsolların kapasitesini artırmak amacıyla farklı güçlendirme tipleri de deneysel çalışmalar kapsamında incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçları dikkate alınarak kısa konsolların keme kapasitesinin belirlemek amacıyla analitik yöntemler geliştirilmiştir.

Bu bölümde kısa konsolların kapasitesinin ve davranışının belirlenmesi amacıyla tamamlanmış literatürde mevcut deneysel ve analitik çalışmalar özetlenecektir.

2.1. Deneysel Çalışmalar

Kısa konsolların kapasitesinin incelendiği en eski araştırmacılardan olan Franz ve Niedenhoff gerçekleştirdikleri çalışmada, kısa konsolların tasarımı için kafes kiriş benzetmesinin en basit şeklini önermişlerdir. Geliştirilen Denklemler (2.1) ve (2.2)'de gösterilmiştir [6];

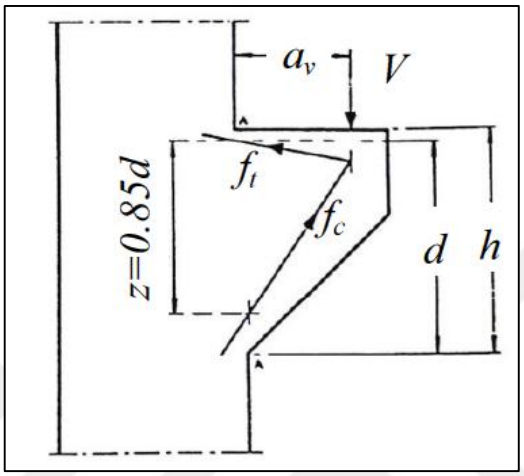
$$f_t = \frac{V.a_v}{z} \tag{2.1}$$

Kesme kuvveti (V) için gereken ana donatı alanı (A_{st});

$$A_{st}=\frac{f_t}{f_{adm}} \tag{2.2}$$

(f_t), Çekme kuvveti, kN

(f_{adm}), Donatının izin verilebilir çekme gerilmesi, MPa



Şekil 2.1. Betonarme kısa konsol tasarımı için Franz ve Niedenhoff tarafından önerilen basit kafes modeli [6]

Kriz ve Raths tarafından gerçekleştirilen çalışmada, üç farklı deney seti test edilmiştir. İlk sette deney yöntemi ve donatı konfigürasyonun belirlenmesi amacıyla 15 numune test edilmiştir. İkinci sette 114 kısa konsol numunesi sadece düşey yükler etkisinde test edilmiştir. Üçüncü sette ise 71 numune düşey ve yatay yükler etkisinde test edilmiştir. Deney parametreleri olarak konsol genişliği, faydalı derinlik, ana donatı oranı, beton dayanımı, a/d oranı, ikincil donatı oranı incelenmiştir. Deneyler sonucunda; kısa konsol kapasitesinin kesit geometrik boyutlarına, faydalı derinliğe, donatı oranına ve beton dayanımına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte a/d oranı arttıkça kesme kapasitesinin azaldığı raporlanmıştır [7].

Kısa konsolun kesme dayanımı (V_u), genişliği (b), efektif derinliği (d), donatı oranı (ρ), beton dayanımı (f_c) olarak adlandırılmıştır. Betonarme kısa konsolun kesme kapasitesinin (a / d) oranı arttıkça azaldığı ve ana donatı oranı (ρ) arttıkça arttığı tespiti yapılmıştır. Ayrıca yatay ikincil donatının olduğu kısa konsol deneylerinden elde edilen sonuçlar ikincil donatıların kısa konsol kapasitesine önemli oranda katkı sağladığı tespit edilmiştir. Düşey yük ile birlikte yatay yükün birlikte uygulandığı

durumda ise ikincil donatı kısa konsol kesme kapasitesini aynı oranda artırmadığı raporlanmıştır. Kapsamlı deneyler sonrasında kısa konsolların kapasitesini belirlemek amacıyla Denklemler (2.3)-(2.7) önerilmiştir;

$$V_u = \emptyset \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{fc'} F_1 \cdot F_3 \quad (2.3)$$

$$F_1 = 6{,}5\ (1\text{-}0{,}5^{d/a}) \quad (2.4)$$

$$F_3 = \frac{(1000\ p)^{\frac{1}{3}+\frac{0{,}4H}{V}}}{10^{\left(\frac{0{,}8H}{v}\right)}} \quad (2.5)$$

$$\rho = \frac{A_s + A_h}{b \cdot d} \geq 0{,}02 \text{ [dikey ve yatay yükler beraber yüklediğinde]} \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \geq 0{,}013 \text{[sadece dikey yük yüklendiğinde]} \quad (2.7)$$

H, yatay kuvvet ; V, düşey kuvvet

(ϕ), azaltma faktörü, $\phi = 0{,}85$

(A_s), donatı alanı(mm^2)

(A_h), kapalı etriye alanı, (A_s / 2) 'den az olmamalıdır.

Betonarme kısa konsolların tasarımı için Kriz ve Raths tarafından önerilen denklem seti ACI 318-71'de kısa konsolların tasarım kriterleri olarak kabul edilmiştir [6].

Mattock ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, betonarme kısa konsolların davranışları düşey ve yatay yük etkisinde incelenmiştir. Bu kapsamda 28 numune test edilmiş olup, bu numunelerden 26 tanesinde yatay kapalı donatı kullanılmıştır. Deney parametreleri; (a / d) oranı, düşey yükün yatay yüke oranı (V / H), ana donatı miktarı ve ikincil donatı miktarı (etriye) ve agrega tipidir. Etriyesiz betonarme kısa konsol numunelerinin göçme modu kesme yarılması şeklindedir. Diğer numunelerde ise eğilme çatlakları sabit kalıp diyagonal çekme çatlaklarının açılması ve kısa konsolun kolon ile birleştiği eğik güzeyde betonun ezilmesi ile göçme meydana gelmiştir [8].

Mattock ve diğ. bu testlere dayanarak, ana donatıya paralel (A_s) olarak yerleştirilecek ve ($A_h > 0{,}5(A_s - N_u/f_y)$) koşulunu sağlayan yatay kapalı etriyelerin (A_h) kullanılmasını

önermişlerdir. Kapalı etriyelerin kısa konsolun toplam derinliğin üçte ikisine eşit olacak şekilde yerleştirilecektir. Bu kapalı etriyelerin miktarı kısa konsollarda ani oluşacak diyagonal çekme göçmesini önleyecek ve ana donatının akma dayanımına ulaşmasını sağlayacaktır. Bu durumda kısa konsol eğilme göçmesi veya çekme donatısının akmasından sonra kesme göçmesi gösterecektir. Aynı yıl içerisinde yine Mattock tarafından, kısa konsolların düşey ve yatay yükler etkisinde kapasite hesabı için eğilme davranışını esas alan basit bir hesap yöntemi önerilmiştir. Bu önerilen tasarım yöntemi ACI 318 yönetmeliği tarafından kabul edilmiş olup Denk. (2.8)'den (2.15)'e kadar gösterilmiştir [8].

1-) Kesme gerilmesi (V_u), Denklem (2.8)'de belirtilen değerleri aşmamalıdır;

$$V_u \leq \begin{cases} 0{,}2f'_c \text{ MPa} \\ 5{,}5 \text{ MPa} \end{cases} \tag{2.8}$$

2-) Kayma düzlemine yerleştirilecek gerekli donatı alanı (A_{vf});

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\emptyset \mu f_y} \tag{2.9}$$

ϕ= 0,85, kolon ile monolitik olarak dökülen kısa konsollar için μ =1,40 olarak önerilen değerlerdir.

3-) Maksimum moment hesaplanmalı, konsol-kolon arayüzü denklemden hesaplanan momente dayanıklı olmalıdır. N_u, yatay kuvvet (KN) olarak tanımlanmıştır;

$$M_u = V_u a_v + N_u (h-d) \tag{2.10}$$

4-) Önceki adımda hesaplanan momenti taşıyacak donatı alanı;

$$A_f = \frac{M_u}{\left(d - \frac{a}{2}\right) \emptyset f_y} \tag{2.11}$$

5-) Yatay kuvveti taşıyabilmesi için gerekli donatı alanı A_t;

$$A_t = \frac{N_u}{\emptyset f_y} \tag{2.12}$$

6-) Ana donatı alanı;

$$A_s \leq \begin{cases} A_f + A_t \\ \frac{2}{3} A_{vf} + A_t \end{cases} \quad (2.13)$$

7-) Kapalı etriye alanı;

$$A_h \geq 0{,}5(A_s + A_t) \quad (2.14)$$

8-) Donatı oranı;

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad ; \quad \left(\leq 0{,}04 \frac{f_c'}{f_y} \right) \quad (2.15)$$

Yong ve diğ. tarafından, ACI 318 yönetmeliğinde yer alan tasarım esaslarının ve kafes kiriş teorisinin yüksek beton dayanımlı kısa konsollarda uygulanabilirliğini kontrol etmek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneyde beton dayanımı 41,7-82,7 MPa arasında değişen toplam sekiz adet (a/d) oranı 0,393 olan yüksek beton dayanımlı kısa konsol monotonik düşey yük etkisinde test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda ACI 318'da yer alan kriterlerin yüksek beton dayanımlı kısa konsolların tasarımı için uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yüksek dayanımlı kısa konsolların tasarımında çubuk analojisi yönteminin, ACI tasarım kriterinden daha güvenli ve daha tutarlı sonuçlar verdiği raporlanmıştır. Fakat bu sonucun a/d oranı daha yüksek olan kısa konsollarda elde edilemeyeceği yazarlar tarafından değerlendirilmiştir [6].

Zeller, çift yönlü kısa konsollar üzerinde yaptığı testlere göre; basınç gerilmelerinin yatayla 45^0den daha az bir açıya sahip olması durumunda düşey etriyelerin etkin olduğu, buna karşın, a/d≤0,7-0,9 olduğu yani basınç gerilmelerinin yatayla yaptığı açının 45^0den fazla olduğunda yatay etriyelerin etkin olduğu sonucuna varmıştır [9].

Aziz, beton içerisindeki agrega türünün kısa konsolların kesme dayanımı üzerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla, aynı geometrik özelliklere sahip 11 numune test edilmiştir. Deney parametreleri ise agrega türü, ana donatı miktarı, kesme donatısı miktarı ve (a/d) oranı olmuştur. Araştırma sonucunda aynı kürleme ve test koşullarında; kırma taş, beton, doğal agregalı betona kıyasla daha yüksek basınç

dayanımı, çekme dayanımı ve kesme gerilmesi değerine ulaşmıştır. Betonarme kısa konsolun kesme dayanımının, ana donatı oranı, etriye miktarı ve beton basınç dayanımının artmasıyla arttığı ve kesme açıklığının derinliğe oranının (a/d) artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ve literatürde mevcut kesme göçmesi göstermiş diğer betonarme kısa konsol deney sonuçları dikkate alınarak kesme dayanımı için tasarım Denklem 2.16 önerilmiştir [6]. Deney sonuçları ile önerilen hesap yönteminin sonuçları arasında yüksek uyum sağlandığı gözlemlenmiştir;

$$V_u=[\frac{(\frac{k}{d})\cdot f_c^{'}\cdot(p_w+p_h)}{a/d}]^{0,175} \tag{2.16}$$

(f'_c),beton basınç dayanımı MPa

V_u, kısa konsolun maksimum kayma gerilmesi N/mm^2

(k, d), kesit özellikleri (k=150 mm)

(ρ_w,ρ_h) boyuna ve enine donatı oranı

Russo ve diğ., kısa konsolların kesme dayanımını belirlemek için yaptıkları çalışma kapsamında, çubuk analojisi yönteminden yararlanarak ana donatı alanının ve yatay etriye alanının kesme kuvvetine katkısını incelenmişlerdir. literatürden elde ettikleri deney verilerine dayanarak kısa konsolların kesme kuvveti hakkında tasarım denklemleri geliştirmiştir. Denklemler üretilmiştir. Denklemler (2.17)'den (2.22)'ye kadar gösterilmiştir [10];

$$V_u=(k\cdot f_c^{'}\cdot\cos\theta\cdot 0,65\cdot\rho_h\cdot f_{yh}\cdot\cot\theta) \tag{2.17}$$

k, sadece çekme donatısı olan kirişlerin klasik eğilme teorisinden hesaplanmaktadır;

$$k=\sqrt{\sqrt{(n\cdot\rho_f)^2}+(2\cdot n\cdot\rho_f)}\cdot(\rho_f) \tag{2.18}$$

n, elastisite modülü oranı ($n= E_s/E_c$)

ρ_f, eğilme donatısı oranı;

$$\rho_f = \frac{A_s - A_n}{b \cdot d} \tag{2.19}$$

$$A_n = \frac{N_u}{f_{ys}} \tag{2.20}$$

f_{ys}, ana donatı akma dayanımı

f_{yh}, kesme donatısı akma dayanımı

ρ_h kolon ve kısa konsolara yüzünde etriye oranı

$$\rho_f = \frac{A_h}{b \cdot d} \tag{2.21}$$

θ, beton basınç çubuğunun düşey düzlem ile açısı;

$$\theta = 2 \arctan\left(\frac{-1 + \sqrt{\left(\frac{a}{d}\right)^2 + 022 \cdot \left(1 - \frac{k^2}{4}\right)}}{\frac{a}{d} - \frac{k}{2}}\right) \tag{2.22}$$

$10 < f'_c < 105$ MPa

Bu önerilen hesap yöntemi deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiştir.

Fattuhi tarafından yapılan çalışmada, çelik liflerle üretilmiş 22 adet (150 × 150 × 200 mm) betonarme kısa konsol numunesini sadece düşey yük etkisinde test edilmiş, lifli betonun konsolun kesme dayanımına katkı sağladığı gözlenmiştir. Deney parametreleri, lif oranı ve (a / d) oranıdır. Elde edilen sonuçlara göre, lifli betonun konsolun kesme dayanımına katkı sağlaması sebebiyle etriye yerine ikincil donatı olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır [11]. Diğer bir çalışmada ise iki gruba ayrılmış kısa konsol numuneleri düşey yük etkisi altında test edilmiştir. Birinci grupta çelik lif oranı değişirken (a / d) oranı 0,522'de sabit tutulmuş, ikinci grupta ise lif oranı % 1 olarak sabit tutulurken (a/d) oranı 0,30- 0,57 olarak değiştirilmiştir. Kapsamlı deneysel çalışma sonucunda Fattuhi tarafından aşağıdaki tasarım denklemleri önerilmiştir [12];

$$V_{u=} \Phi \cdot V_{u1} \cdot V_{uf} \quad (2.23)$$

$$V_{uf} = \eta \cdot A_{vf} \cdot f_{fu} \cdot \mu \quad (2.24)$$

Φ , azaltma faktörü
η ,lif oranı

Ayrıca Fattuhi'nin kısa konsolların kesme dayanımı için önerdiği bir diğer hesap yöntemi aşağıdaki gibidir;

$$V_u = \Phi(\eta \cdot A_{vf} \cdot f_{fu} \cdot \mu) + \Phi(A_v \cdot f_y \cdot \mu) \quad (2.25)$$

Lif oranı η = 0,1 sürtünme katsayısı μ =1,4A_{vf}, lif alanı (mm^2) ,f_{fu} lifin akma dayanım (N/mm^2),f_y donatının akma dayanımıdır. V_{u1}, ACI-318'e göre betonarme kısa konsolun maksimum kesme dayanımıdır.

Hughes ve Fattuhi tarafından yapılan çalışma sonuçlarında, betona çelik liflerin hacimce % 0,7 oranında eklenmesinin kısa konsol kesme dayanımının yaklaşık ikiye katladığı raporlanmıştır. Düz betonlu numunelerde maksimum kapasiteye ulaşıldığında ani göçme gözlenirken lifli betonda neredeyse elastik-plastik bir davranış sağladığı gözlenmiştir [13].

Fattuhi, normal ve yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollar üzerinde yaptığı testlerde ise sadece ana donatı, ana donatı ile birlikte ikincil donatı olarak çelik lif ve polipropilen lif katkısını incelemiştir. Bu testler, çelik lif eklenmesinin kısa konsolların hem dayanım hem de sünekliğini arttırdığı, çatlak genişliklerini kısıtladığını göstermiştir [14]. Bu çalışma devamında kısa konsolların eğilme kapasitesinin belirlenmesi için tasarım denklemleri önerilmiştir. Kısa konsolların deneysel ve analitik olarak tespit edilen kesme kapasitesinin yüksek uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır. Eğilme modelinde, kısa konsolların kısa konsol kirişi gibi davrandığı varsayılmış ve kısa konsollar için normal kuvvet modeli aşağıda önerilmiştir [15, 16];

$$V_n = \frac{f_y}{a}\left(d - \frac{a_1}{2}\right) \cdot \left(\frac{K_o \cdot f_{ct} \cdot b}{2a}\right) \cdot \left(h - \frac{\alpha_1}{\beta_1}\right) \cdot \left(h - \frac{a_1}{\beta_1} + a_1\right) \quad (2.26)$$

$$a_1 = \beta_1 \cdot c = \frac{f_y \cdot A_s + K_o \cdot f_{ct} \cdot h \cdot b}{0{,}85 \cdot f_c^{'} \cdot b + K_o \cdot \frac{b}{\beta_1} \cdot f_{ct}} \tag{2.27}$$

a_1, betondaki dikdörtgen basınç bloğu derinliği

a, kesme açıklığı

β_1, ACI 318'e göre, 0,65 – 0,85 arasında değişir

c, tarafsız eksen derinliği

f_{ct}, yarmada çekme dayanımı MPa

K_o, test sonuçlarının regresyon analizinden elde edilen lifli betonun çekmeye katkısı;

$$K_0 = \frac{9{,}519}{\left(f_c^{'}\right)^{0{,}957}} \tag{2.28}$$

Hagberg tarafından geliştirilen eğilme modeli kafes analojisine dayanmaktadır ve lifli betonun kısa konsolun kapasitesine katkısını belirlemektedir. Kısa konsolun geometrik özellikleri, tarafsız eksen derinliği ve etriye konumlarını bilindiğinde kısa konsolun kapasitesi aşağıdaki gibi belirlenmektedir [17];

$$V_n = \left[\frac{f_y A_s \left(d - \frac{1 - \sin\beta}{2}\right) + f_{yt} A_{st} \left(d - \frac{1 - \sin\beta}{2}\right) + 0{,}5 K_0 f_{ct} bh\left(h - (1 - \sin\beta)\right)}{a + 0{,}5(1 - \sin\beta)\cot\beta} \right] \tag{2.29}$$

$$(1 - \sin\beta) = \frac{f_y \cdot A_s + f_{yt} \cdot A_{st} + K_0 \cdot f_{ct} \cdot b \cdot h}{0{,}85 \cdot f_c^{'} \cdot b + K_0 \cdot f_{ct} \cdot b} \tag{2.30}$$

l, beton basınç çubuğunun genişliği

β, beton basınç çubuğunun eğimi

f_{yt}, yatay donatı akma dayanımı Mpa, f_{ct}, , yarmada çekme dayanımı MPa

A_{st}, yatay donatı alanı

a, kesme açıklığı

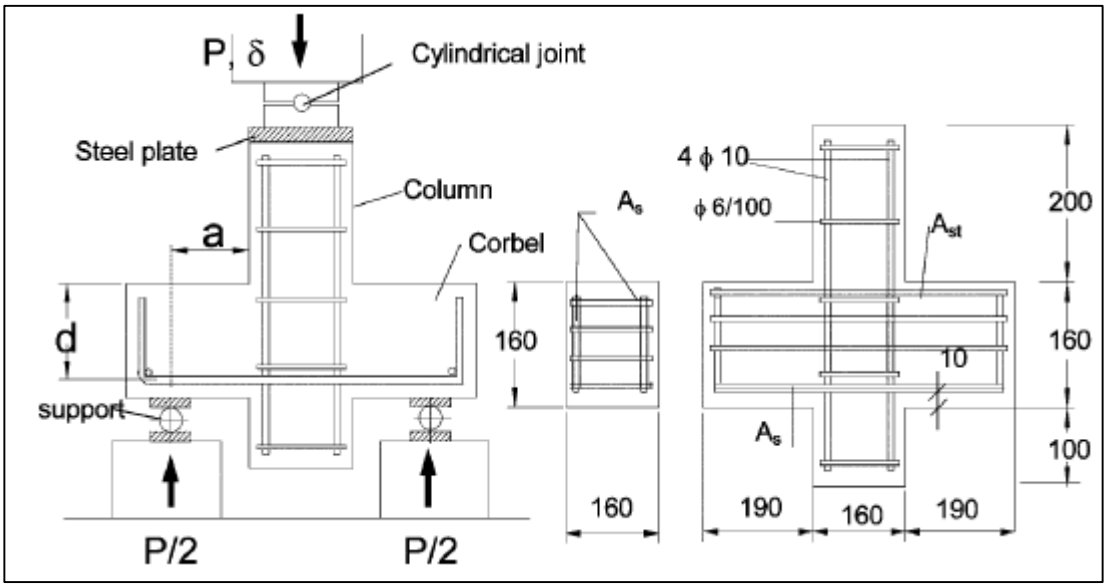
Foster ve diğ. tarafından, düşey yük etkisi altında otuz adet betonarme kısa konsol numunesi test edilmiştir. Deney parametreleri, beton basınç dayanımı (45-105 MPa), (a/d) oranı ve ikincil donatı alanıdır. Elde edilen sonuçlar, yüksek dayanımlı kısa konsolların, normal dayanımlı kısa konsollarla aynı şekilde davrandığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, tespit edilen ilk çatlaklar, konsoldan konsol-kolon

arayüzüne yayılan eğilme çatlakları olup artan kesme açıklığı derinlik oranıyla ters orantılı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, etriye ilavesinin çatlak genişliklerini azalttığı, konsolun sünekliğini arttırdığı, bu nedenle, yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollar üretilirken, normal dayanımlı betonlarda olduğu gibi minimum miktarda yatay etriye donatısının eklenmesi gerektiği raporlanmıştır [18].

Muhammed, yüksek dayanımlı lifli betonla üretilmiş kırk sekiz adet betonarme kısa konsol testi yapmıştır. Betonarme kısa konsolların göçme modları, ana donatı, ikincil donatı olarak etriye, çelik lif veya etriye oranı, çelik lif ve etriyenin birlikte kullanılması durumları incelenmiştir. Yüksek dayanımlı fiber beton (HSFRC) kullanılması, kısa konsol numunelerinde dayanımı ve davranışını iyileştirmiştir. Çelik liflerin ilavesiyle kısa konsolların sünekliliği artmış, çelik lifle birlikte etriye ilavesiyle deformasyonlarda büyük bir azalma meydana gelmiştir. Ayrıca çelik lif ilavesi kesme kapasitesini arttırdığı, bu artışın lif oranı ve (a / d) oranına bağlı olduğu raporlanmıştır [6].

Bourget ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, kısa konsol numuneleri düşey yük etkisinde test edilmiştir. Deney parametreleri beton basınç dayanımı (80, 100 ve 120MPa) ve donatı oranıdır [19].

Campione ve diğ., normal ve yüksek dayanımlı betonarme kısa konsolların eğilme davranışı üzerine deneysel araştırmalar yapmışlardır. Lif katkılı betonarme kısa konsollarda ana donatı ve ikincil donatı varlığında konsolun nasıl davranış sergileyeceğini incelemişlerdir. Deney parametreleri; ana donatı oranı, ikincil donatı oranı, çelik lif oranı ve kısa konsolun geometrik özellikleri ile beton basınç dayanımıdır. Deney sonuçları, çapraz etriye donatısının yerine çelik liflerin kullanılmasının veya her ikisinin birlikte kullanılmasının, beton basınç çubuğunun ezilmesini azaltabileceğini göstermiştir. Ayrıca ana donatı ve etriye olan lifli veya lifsiz üretilmiş kısa konsol numunelerinin karbon fiber katkılı polimerlerle dıştan sargılanmasının kısa konsolun eğilme davranışı üzerine etkisi analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Aynı geometrik özelliklere sahip fakat donatı miktarı ve beton basınç dayanımı değişen kısa konsol geometrik özellikleri Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir. Ayrıca ikincil donatı alanları ve lifli beton numunelerinin lif hacimleri üzerinde de çalışmalar yapmışlardır [20].



Şekil 2.2.Kısa konsol detayları ve yükleme düzeneği [20]

Campione ve diğ. tarafından yapılan deneysel çalışma devamında geliştirilen tasarım yöntemi aşağıda sunulmaktadır.

10MPa<$f_c^{'}$<105MPa koşulunu sağlayan deney numuneleri için;

$$X=0,74\left(\frac{f_c^{'}}{105}\right)^3-1,28\left(\frac{f_c^{'}}{105}\right)^2+0,22\left(\frac{f_c^{'}}{105}\right)+0,87 \tag{2.31}$$

$$F=\frac{vf.Lf}{D}\cdot\lambda \tag{2.32}$$

$$E_c=4700\sqrt{f_c^{'}} \tag{2.33}$$

$$f_r=0,2\cdot\sqrt{f_c^{'}}\cdot F \tag{2.34}$$

$$x_c=\left(\sqrt{A_s^2+\frac{2E_c b A_s d}{E_s}}-A_s\right)\frac{E_s}{bE_c} \tag{2.35}$$

$$V_{n1}=f_y A_s\frac{d-\frac{x_c}{3}}{a}+\frac{b}{\sin a\cos a}0,2\sqrt{f_c^{'}}F\left[(d-x_c)\left(1-\frac{f_{ctf}}{f_y}\cdot\frac{E_s}{E_{ct}}\right)+c\right] \tag{2.36}$$

$$V_{n2}=Xf_c^{'}(bx_c\cos a)\sin a+\frac{b}{\sin a\cos a}0{,}2\sqrt{f_c^{'}}F\left[(d-x_c)\left(1-\frac{f_{ctf}}{f_y}.\frac{E_s}{E_{ct}}\right)+c\right] \quad (2.37)$$

Ahmad ve Shah, yüksek dayanımlı çift yönlü betonarme kısa konsollarda çubuk analojisi modelinin (STM) uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yapmışlardır. ACI 318 tasarım yönetmeliği tarafından izin verilen minimum donatı alanı ile yüksek mukavemetli betondan (45, 52 ve 59 MPa) dokuz adet çift yönlü kısa konsol numuneleri üretip çubuk analojisi modeli temel alınarak analiz edilmiş ve daha sonra modelden çıkan sonuçları karşılaştırmak için laboratuvar ortamında üretilen numunelerin deneyleri yapılarak test edilmiştir. Deney değerleri ve çubuk analojisi yönteminden bulunan değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır [21].

Al-Zahawi, düşey yükleme etkisindeki lifli kısa konsolların kesme dayanımı ve davranışını inceledikleri çalışmasında test parametreleri (a / d) oranı, karbon lif oranı ve ikincil donatı miktarıdır. Deney sonuçları, karbon liflerinin beton içerisindeki çekme dayanımını arttırdığı ve oluşacak diyagonal kesme çatlaklarını geciktirdiğini göstermiştir. (a / d) oranı azaldığında maksimum kapasitesinin arttığı, (a / d) oranı 0,6'dan 0,3'e azaldığında kesme kapasitesindeki artış yaklaşık % 15,9 olarak tespit edilmiştir.

Atıf ve diğ., düşey yükleme etkisindeki lifli ve lifsiz betondan ürettikleri on yedi adet yüksek beton dayanımına sahip kısa konsol numunelerini test etmişlerdir. Bu çalışmada gözlemlenmiş test parametreleri (a/d) oranı, lif katkısı ve donatı miktarıydı. (a/d) oranı azaldıkça, beton basınç dayanım ve donatı miktar arttıkça, betona lif ilavesi yapıldığında konsolun maksimum kapasitesinin arttığı tespiti yapılmıştır. Ayrıca lifli numuneler için deneyde bulunan konsolun taşıma kapasitesi değerleriyle Campione'nin önerdiği hesap yönteminden bulunan değerlerin örtüştüğü tespiti yapılmıştır [22].

Abass, tekil düşey yüklemeye tabi tutulmuş lifli beton ve normal beton ile üretilmiş kısa konsolların davranışlarını ve dayanımını incelemek için deneysel ve analitik araştırmalar yapmıştır. Deneylerde parametreleri; (a/d) oranı, ana donatı alanı (A_s), etriye alanı (A_h), lif hacmi ve beton basınç dayanımıdır. Deneysel sonuçlar, çelik liflerin beton içerisinde kullanılmasının ve (a/d) oranının azalmasının konsol taşıma kapasitesini arttığını göstermiştir. Yüksek dayanımlı lifli betonla(HSCC) üretilen

konsol numuneleri, normal betonla(NSCC) üretilenlere göre taşıma kapasitesi daha fazla olduğu belirlenmiştir. Elde edilen deneysel verilere dayanılarak, lifli beton ve normal betonla üretilen betonarme kısa konsolların kesme dayanımlarını belirlemek için denklemler önerilmiştir. Bu önerilen Denklemler (2.38)'den (2.40)'a kadar gösterilmiştir;

$$V_n=\left(\frac{1}{1193}\right)\cdot\left((f_c')^2.665.\left(p_s\cdot f_y\cdot p_h\cdot f_{yh}\right)\cdot\left(\frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}}\right]\cdot(1\text{-}0{,}4F)\cdot b\cdot d \tag{2.38}$$

$$V_n=\left(\frac{1}{590}\right)\cdot\left[(f_c')^2\cdot 695\cdot\left(p_s\cdot p_h\cdot f_{yh}\right)\cdot\frac{1}{1+1{,}25\frac{a}{d}}\right][(1+0{,}4F)\cdot b\cdot d] \tag{2.39}$$

$$V_n=\left(\frac{1}{200}\right)\cdot\left[(f_c')^{1{,}75}\cdot 200\cdot\left(p_s\cdot f_y\cdot p_h\cdot f_{yh}\right)\cdot 2{,}4^{\left(\frac{a}{d}\right)}\right][(1+0{,}4F)+b\cdot d] \tag{2.40}$$

Dora ve Abdul Hamid, çelik lif takviyeli betonla (SFRC) üretilmiş kısa konsol davranışını, prefabrik kolon-kiriş birleşiminin tekrarlı yük etkisinde testi ile incelemiştir (Şekil 2.3) [23].



Şekil 2.3. Tam ölçekli kolon-kiriş birleşimi ve yükleme düzeneği [23]

Yapısal onarım ve güçlendirme için çelik gibi geleneksel malzemelere kıyasla fiber takviyeli polimer (FRP) malzemelerin kullanımı çeşitli avantajlar sağladığından gün geçtikçe artmaktadır. Bu avantajlar, hafif olması, uygulaması pratik olması, yüksek durabilite ve dayanıma sahip olması, geometri ve boyut olarak sınırsız uygulama alanı olmasıdır. Ayrıca, bu malzemeler, farklı formlarda lifli olarak üretilmekte,

epoksi eklenmeden önce her yapının geometrisine uyacak biçimde sarılabilen kuru halde bulunmakta ve kolaylıkla temin edilebilmektedir.

Heidayet ve diğ., çelik levhalarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kısa konsolları düşey yük etkisinde test etmiştir. Deney parametreleri; ana donatı oranı ve ilave (ikincil) donatı etkisi, (a/d) oranıdır. Test sonuçları, güçlendirme yönteminin kısa konsolların kapasitesini daha yüksek değerlere taşıdığı raporlanmıştır. Bu güçlendirme yönteminin mevcut yapıların güçlendirilmesi için etkili ve ekonomik bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Elgwady ve diğ., düşey yüklemeye tabi tutulmuş, farklı güçlendirme konfigürasyonlarına sahip karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) şeritlerle güçlendirilmiş kısa konsol numuneleri üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deney parametreleri, CFRP şeritlerinin alanı ve konfigürasyonudur. Test sonuçlarında diyagonal CFRP şeritlerinin sargılanmasıyla üretilen kısa konsol numunesinin dayanımının, sargılanmadan üretilmiş dayanımına göre yaklaşık %70 oranında arttığı raporlanmıştır [24].

Özden ve Atalay, cam lif takviyeli plastik (GFRP) malzeme ile güçlendirilen kısa konsolların dayanım ve kapasitelerini düşey yük etkisinde incelemiştir. Deney parametreleri; betonun basınç dayanımı, ana donatı alanı, (a/d) oranı ve GFRP sargı konfigürasyonudur. Deney sonuçlarında, 45 derecelik açı ile GFRP sargısının yatay sargılamadan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca GFRP sargılama ile güçlendirmede, (a/d) oranına ve GFRP şeritlerinin sargılama yönü, genişliği ve alanına bağlı olarak konsol düşey yük kapasitesini % 40-200 arasında artırdığı raporlanmıştır [25].

Mohamad-Ali ve Attiya, karbon fiber katkılı polimer (CFRP) levhaları ile güçlendirilmiş betonarme kısa konsolların davranışı üzerine deneysel bir araştırma yapmıştır. Deneyde değişkenleri; CFRP şeritlerinin genişliği, sayısı, uzunluğu, konumu ve doğrultusudur. Test sonuçları, çapraz şeritlerle güçlendirilmiş kısa konsolların, yatay şeritlerle güçlendirilmiş konsollara kıyasla daha iyi sonuçları verdiğini göstermiştir. Çapraz kullanılan CFRP şeritler için betonarme kısa konsol numunelerinde maksimum kesme kuvveti yaklaşık% 45-60 ve yatay şeritler içinse yaklaşık% 15-31 artış gösterdiği raporlanmıştır. İlk çatlama yükü üzerindeki etkisi,

çapraz şeritler için çatlama yükündeki yüzde artışı % 51, yatay yönlü şerit CFRP içinse %19 artış olduğu belirtilmiştir. Çatlak genişliği ise azalmıştır [26].

Ivelina Ivanova ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, kısa konsol numunelerinin mekanik davranışı incelenmiştir. Deney parametreleri; CFRP katman sayısı, lif doğrultusu, lif dayanımı, yapıştırma tipidir. Deneyde kısa konsolun sargıyla güçlendirilmesi, CFRP levhaların yapıştırılması ile güçlendirilmesine göre daha yüksek dayanım sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca CFRP ile güçlendirme, güçlendirme uygulanmamış duruma göre %37-%82 oranında bir taşıma kapasitesi artışı meydana gelmiştir [27].

Malgorzata Lachowicz ve Krystyna Nagrodzka çalışmalarında, ön germeli, çift yönlü kısa konsol numunelerinin davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney parametreleri;(a/d) oranı ve öngerme donatısının konumudur. Sonuç olarak (a/d) oranı arttığında öngerme çubuklarının yük taşıma kapasitesinin azaldığı saptanmıştır. Ayrıca ön gerilmeli üretilen kısa konsol numunelerinin öngermesiz numunelere oranla %30 daha fazla yük taşıma kapasitesi olduğu raporlanmıştır [28].

2.2. Analitik Çalışmalar

Kısa konsolların analiz ve tasarımı için geliştirilen bu yöntemler genel olarak çubuk analojisi yöntemi, (strut-and-tie model), sürtünme kesmesi yöntemi ve eğilme teorilerini de dikkate almaktadır. Aşağıda kısa konsolların kapasitesinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş yöntemleri özetlenmiştir. Hesap yöntemlerinin doğruluğu literatürde mevcut deneysel verilerle sağlanmıştır.

Somerville, betonarme kısa konsolların davranışlarını etkileyen temel parametreleri belirlemek için önceki tasarım yöntemlerine ilişkin değerlendirmeleri incelemiştir. Bu araştırma sonucunda (a/d) oranlarına bağlı olarak taşıma gücünü hesaplamak için alternatif bir denklem önemiştir. Önerilen denklem (2.41)'de gösterilmiştir;

$$\frac{V_{max}}{V_c} = \frac{3d}{a_v} \tag{2.41}$$

(V_c), tek başına beton tarafından taşınmasına izin verilen kesme kuvvetidir. Bu önerilen denklemin (a/d) oranı için geçerli olması belirtilmiştir. Yük altında erken

çatlak oluşumunu ve göçmeyi önlemek için (a/d) oranı (0,45-0,60) olarak önerilmiştir. Araştırmalar sonrasında konsol kenar yüksekliğinin en az kolon arayüzündeki yüksekliğin yarısı kadar olması gerektiği önerilmiştir.

Hermansen ve Cowan ise çalışmalarında kesme sürtünme donatısı önermişlerdir. Çalışma sonucunda, tek yönlü betonarme kısa konsol numunelerinin, çift yönlü betonarme kısa konsol numunelerine kıyasla davranış açısından bir fark göstermediği belirlenmiş olup, önerilen çatlak boyunca betonun hareketine karşı sürtünme dayanımı denklem (2.42)'ye göre hesaplanmaktadır;

$$V=c\ +p\cdot f_y\cdot \tan\alpha \tag{2.42}$$

Deneyde, c kohezyon gerilmesi (4 MPa) ve tanα sürtünme katsayısı (0,8) olarak alınması önerilmiştir.

Hagberg yapmış olduğu çalışmada, (a/d) oranının (0,15-1,5) pratik aralığını kapsayan ana donatı veya ikincil donatı miktarlarına göre kapasiteyi belirlemek için matematiksel bir model tanımlayarak, kafes-kiriş modelinin uygulanmasını göstermiştir.. Önerilen bu Denklemler (2.43)'ten (2.47)'ye kadar gösterilmiştir [17];

$$\left(1-\frac{2\cdot f_c^{'}\cdot b\cdot d}{F_s}\right)\cdot\tan^2\beta+\left(\frac{2\cdot f_c^{'}\cdot b\cdot a}{F_s}\right)\cdot\tan\beta+1=0 \tag{2.43}$$

(f'_c),betonun silindir basınç dayanımı MPa

$$F_s=F_{S1}+F_{S2} \tag{2.44}$$

$$F_{S1}=A_S\cdot F_y^{'} \tag{2.45}$$

$$F_{s2}=A_h+f_{vy} \tag{2.46}$$

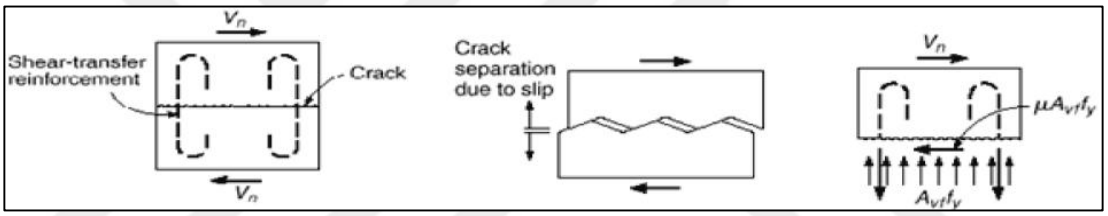
$A_{s,}$ çekme donatısı, $A_{h,}$ ikincil donatı (mm^2)

$F_{y,}$ ana donatı akma dayanımı, $F_{vy,}$ ikincil donatı akma dayanımı MPa

$$d=\frac{d_1\cdot F_{s1}+d_2\cdot F_{s2}}{F_s} \tag{2.47}$$

d_1,ana donatının ağırlık merkezi mesafesi, d_2, ikincil donatının ağırlık merkezi mesafesi (mm)

Mast, farklı tiplerdeki birleşim tasarımlarında uygulanabilecek sürtünme kesmesi hipotezine dayanan rasyonel bir çözüm yöntemi önermiştir. Sürtünme kesmesi basit bir yöntemdir ve davranış Şekil 2.4'te gösterildiği gibi kolayca görselleştirilir. Yöntemi önce kompozit kirişlerdeki arayüz bağlantısının tasarımı için uygulamış daha sonra Kriz ve Raths tarafından yapılan deney numuneleri ile çalışmalarına devam etmiştir. Yöntem betonarme kısa konsol numunelerinde kesme kuvvetinin, çatlak boyunca sürtünme ile karşılandığı belirtilmiştir. Eğer donatı çatlağa paralel olarak konulursa kaymanın meydana geleceği, donatıda gerilmenin artacağı tespit edilmiştir. Çekme kuvveti çatlak iki yüzü arasında eşit ve zıt yönlü basınç sağlayacaktır. Çalışma kapsamında önerilen denklemler aşağıda gösterilmiştir [29].



Şekil 2.4. Kısa konsolların kesme kuvvetine karşı tasarımı [29]

$$V_n = A_{vf} \cdot f_y \cdot \mu \quad (2.48)$$

A_{vf}, çatlağı kesen donatı alanı,

F_y, donatı akma dayanımı, MPa

μ, Betonun kesme kuvvetine karşı gösterdiği sürtünme katsayısı

$$\rho = A_{vf} \cdot A_c \quad (2.49)$$

$$V_n = \rho \cdot f_y \cdot \tan\alpha \quad (2.50)$$

$$V_n = \left(\frac{V}{A_c}\right) \quad (2.51)$$

V, maksimum kesme kuvveti

V_n, kesme gerilmesi

A_c, çatlak beton yüzey alanı

A_{vf}, toplam donatı alanı

F_y, donatı akma dayanımı

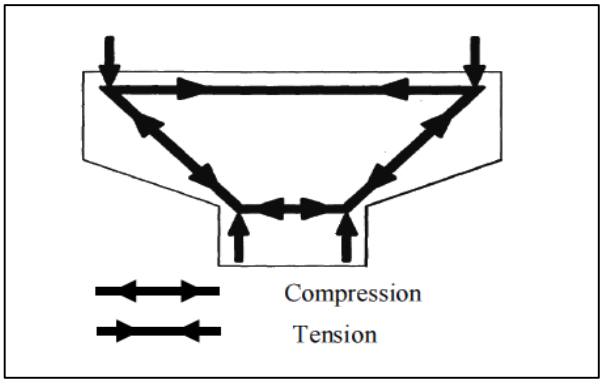
Bu değerler, Kriz ve Raths deney numunelerine uygulandığında (a/d) >0,7 olduğunda gerekli donatı miktarının kesme dayanımı yerine eğilme dayanımı tarafından kontrol edilmesi gerektiği raporlanmıştır. Yatay ve düşey yükleme durumunda geliştirilen kesme gerilmesi için önerilen denklem (2.52)'de gösterilmiştir;

$$V_n=\left(\rho \cdot f_y \cdot \frac{H}{b \cdot h}\right) \cdot \tan\alpha \qquad (2.52)$$

H, yükleme esnasında yatay kuvvet

Prasad ve diğ., doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak betonarme kısa konsolların analizini yapmışlardır. Analiz sonuçlarına bakıldığında, sonlu elemanlar yönteminin betonarme yapıların davranışların tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermiştir. Çatlakların yönlenmesi ve dağılımı ile beton ve donatıda oluşan gerilmelerin incelenmesini kolaylaştırdığı tespiti yapılmıştır. Sonlu elemanlar yaklaşımının, özellikle deney maliyetlerinin artması ve hesaplama maliyetlerinin azaltılması ile uygulanabilir bir analiz ve tasarım metodu olarak kabul edilebileceği raporlanmıştır [30].

Siao, derin kirişleri ve kısa konsolları analizi için basınç çubuklarının yanında kesmeye karşı çubuk analojisi yöntemini geliştirmiştir (Şekil 2.5). Deney verilerine dayanılarak geliştirilen hesap denklemleri aşağıda gösterilmiştir [31].Hesaplamalarda çatlamış betonlar için tüm çekme gerilmeleri donatı ile karşılanacaktır [7].



Şekil 2.5.Kısa konsollarda çubuk analoji [27]

$$V_u=1{,}8 \cdot f_t \cdot b \cdot d \qquad (2.53)$$

$$f_t=7\cdot f_c^{'}\left[1+n\left(p_h\cdot\sin^2\theta+p_v\cdot\cos^2\theta\right)\right] \quad (2.54)$$

$$f_t=\left(p_h\cdot\sin^2\theta+p_v\cdot\cos^2\theta\right)\cdot f_y \quad (2.55)$$

f_t, basınç çubuğu dayanımı

f_y, donatı akma dayanımı

n, elastisite modülü oranı ($n= E_s/E_c$)

ρ_h ve ρ_v sırasıyla, yatay ve düşey çubukların donatı oranı

θ, çubuk analojisi yönteminde basınç çubuğu açısı

Hwang ve diğ., betonarme kısa konsolların kesme dayanımını belirlemek için basit bir çubuk model önermişlerdir. Önerilen yöntem literatürden seçilen deney sonuçları ile test edilmiştir. Deneylerde incelenen kısa konsolların dayanım ve davranışına, (a/d) oranı, beton basınç dayanımı ve ikincil donatı oranı gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. (a/d) oranı küçük olan normal veya yüksek dayanımlı kısa konsollardaki kesme kapasitesinin daha yüksek olduğu, beton basınç dayanımının ve ilave donatı alanının artmasıyla konsolun kesme dayanımın arttığı raporlanmıştır [32].

Singh ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, çubuk analojisi yöntemi ile betonarme kısa konsolların analiz ve tasarımı ile ACI 318-02 kriterlerine göre yapılan tasarımların kıyaslanmıştır. Çubuk analojisi yönteminin kullanılmasıyla tasarım yönetmeliğindeki denklemler uyumluluk gösterdiği raporlanmıştır [33].

Rezaei ve diğ. çalışmalarında, kolona etkiyen tekil yükün kısa konsollar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı geometrilerde laboratuvar ortamında üretilmiş tek ve çift taraflı kısa konsol numunelerinde eksenel kolon yükü uygulanmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle davranış modellenmiştir. Kolonun eksenel yük kapasitesi hesaplanarak, belirlenen tekil kuvvet kolonun en üst orta noktasından etkitilerek numuneler kırılıncaya kadar kısa konsollar üzerine uygulanmıştır. Kolona etkiyen tekil yük etkisinde çift yönlü kısa konsolların dayanımının tek yönlü kısa konsollara kıyasla daha etkili olduğu raporlanmıştır [34].

He ve diğ., kesme kuvvetinin etkin olduğu betonarme yapıların kesme davranışlarını daha iyi anlamak için derin kirişler ve kısa konsollar üzerinde çalışmalar

yapmışlardır. Bu çalışmalarda betonarme yapıların kesme dayanımları ile ilgili teorik modeller ve beton ile donatının kesme dayanımı arasındaki ilişkinin belirlenmesine yönelik açık denklemler önermişlerdir [35];

$$\frac{1}{V_u}=\frac{1}{V_1^*}+\frac{1}{V_2^*} \tag{2.56}$$

$$V_u=\frac{k\cdot\tan\theta}{[1-\frac{\sin^2\theta\cdot\gamma_{ht}}{2}]}\cdot v\cdot f_c^{'}\cdot b\cdot d \tag{2.57}$$

$$V_1^*=\frac{\tan\theta}{[1-\frac{\sin^2\theta\cdot\gamma_{ht}}{2}]}\cdot v\cdot f_c^{'}\cdot b\cdot d \tag{2.58}$$

$$V_2^*=\frac{2n\cdot(1\text{-}0{,}6\cdot\gamma_{ht})\cdot\tan\theta}{[1-\frac{\sin^2\theta\cdot\gamma_{ht}}{2}]^2}\cdot\frac{(v\cdot f_c^{'})\cdot b\cdot d}{f_y} \tag{2.59}$$

V_u, maksimum şekil değiştirme kapasitesi

V_1^*ve V_2^*, sırasıyla beton ve donatının kesme dayanımına olan katkısı

$$\gamma_{ht}=\left(\frac{2z}{a}\text{-}1\right)\left(0\le\gamma_{ht}\le1\right) \tag{2.60}$$

Abdul-Wahab tarafından yapılan çalışmada, çelik lifli betonarme kısa konsolların dayanımının belirlenmesi için bir denklem önerilmiştir. Çalışmanın devamında önerilen denklem literatürde mevcut analitik modeller ve ACI 318 tasarım yönetmeliği kriterleri ile kıyaslanmış ve aşağıdaki denklem önerilmiştir [36];

$$V_u=\varphi\cdot(\eta\cdot A_{vf}\cdot f_{fu}\cdot\mu+\varphi\cdot(A_v\cdot f_y\cdot\mu) \tag{2.61}$$

Ridha tarafından yapılan çalışmada, betonarme kısa konsolların davranışlarını daha iyi anlamak için, monotonik yüklemeye tabi tutulan yüksek dayanımlı çelik lifli kısa konsolların davranışı lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi analiz edilmiştir. İncelenmiş parametreler; lif oranı, beton basınç dayanımı, ana donatı oranı ve (a/d) oranıdır. Çelik lif oranının, enerji tüketme kapasitesini arttırdığı, beton basınç

dayanımının artması, ana donatı oranının artması ve (a/d) oranın azalması kesme dayanımını azaltmaktadır [37].

Yousif çalışmasında, basitleştirilmiş çubuk analojisi yöntemini ile yüksek dayanımlı betonarme kısa konsolların davranışlarını incelemiştir. (a/d) oranı, ana donatı oranı, ikincil donatı oranı ve beton basınç dayanımının kesme kuvvetine etkisi analitik değerlendirilmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yönteminin yüksek dayanımlı betonarme kısa konsolların analizi için uygun bir araç olduğu ve çubuk analojisi yönteminin, yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollar için taşma kapasitesinin hesaplanmasında etkili bir yöntem olduğu raporlanmıştır [38].

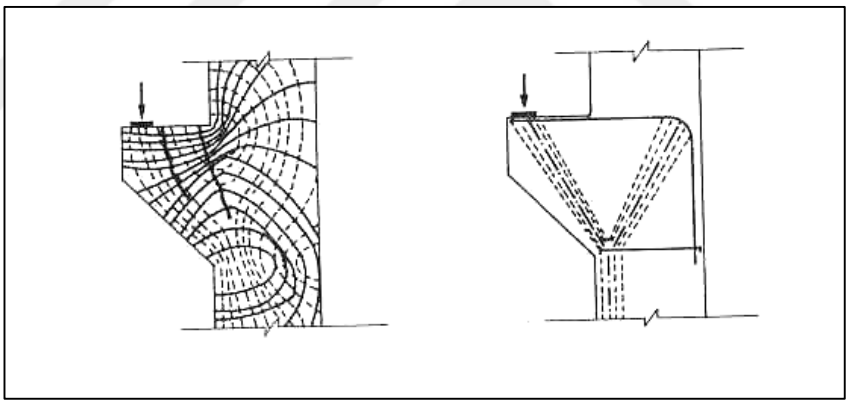
El-Maaddawy ve El-Sayed tarafından yapılan deneysel ve analitik çalışmada, dıştan karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit levhalarla güçlendirilmiş kısa konsolların yapısal davranışı incelenmiştir. Referans numunede sadece ana donatı ve ikincil donatı varken, diğer numunelerde CFRP alanı, konumu ve açısı test değişkeni olarak incelenmiştir. Test edilen numunelerin göçme modları ve çatlak dağılımları incelendiğinde, uygulanan yüke karşı yükleme plakasından kolona doğru oluşan iki basınç çubuğu ve düzensiz kuvvetlere karşı mesnet noktaları arasında oluşan çekme çubuğu oluşmuştur. Eğik kesme çatlakları kısa konsolların dış yüzüne doğru eğilerek artmaktadır. Ayrıca, CFRP ile dıştan güçlendirme uygulamasında kısa konsolun kesme kapasitesinin arttığı sonucuna varılmıştır. Bu artış oranı, ana donatı miktarındaki artışla azalmaktadır. Sadece ana donatı bulunan numunelerde kesme kapasitesi,% (21-40) aralığında artış gösterirken, ana donatı ile birlikte ikincil donatının bulunduğu güçlendirilmiş konsollar için, % (15-33) oranında kapasite artışı kaydedilmiştir. Analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında % 10 sapma tespit edilmiştir [39].

Canha ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, literatürden derlenmiş yüksek dayanımlı kısa konsollar sonlu elemanlar programı ile modellenerek monotonik yük etkisinde analiz yapılmıştır. Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının uyumlu olduğu, yatay etriyenin kısa konsolların yük kapasitesi artırdığı, çatlak dağılımı ve sünekliği geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Buna karşın düşey ikincil donatının kısa konsolların yük kapasitesine katkı sağlamadığı fakat çatlak dağılımı ve sünekliği

geliştirmektedir. Bu sebeple yüksek dayanımlı konsollarda yatay ve dikey ikincil donatıların eklenmesi gerektiği raporlanmıştır [40].

2.3. Çubuk Analojisi (Strut and Tie Model) Yöntemi

Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz sonuçları, donatılı betonun yük taşıma davranışının basınç gerilme alanları ve çekme gerilme alanlarından oluştuğunu göstermiştir. Basınç gerilmeleri basınç çubuğu ile temsil edilirken, çekme gerilmeleri çekme elemanları ile karşılanır. Beton basınç çubukları ile donatı çekme çubuklarının birleştiği noktalar düğüm noktaları olarak adlandırılır. Çekme elemanları beton çekme mukavemetinin aşılmadığı yerlerde beton çekme gerilme alanlarından ve aşılan yerlerde çekme donatılarından oluşmaktadır. Örneğin bir kısa konsolda beton çatlamadan oluşan gerilme trajektuvarları, çatlaklar, beton basınç çubukları Şekil 2.6 (a)'da, basınç ve çekme çubuklarının idealize edilerek oluşturulan model ise Şekil 2.6(b)'de gösterilmiştir [41].



Şekil 2.6. Kısa konsolun gerilme trajektuvarı [41]

Bu davranışa göre betonarme sistemin tasarım için gerekli iç kuvvetler ve şekil değiştirmeleri yansıtacak kabullerle bir "çubuk sistem" olarak temsil edilmesi mümkün olacaktır. Bir taşıyıcı sistemin geometrisi ve etkiyen dış kuvvetlere göre statik süreksizlik noktaları olan D bölgeleri belirlenir. Sistemde geri kalan bölgeler ise B bölgeleridir. B bölgelerinde iç kuvvetler klasik hesap yöntemleri ile belirlenir. D bölgelerinde ise yaklaşık yöntemler veya çubuk sistem modelleri ile iç kuvvetler hesaplanır. Bir eleman için birden fazla çubuk model oluşturulabilir. Bu durumda çubuk sistemin "optimizasyonu" da söz konusu olacaktır [42].

Çubuk analojisi yönteminde öncelikle geliştirilen model çubuk kuvvetleri hesaplanır, basınç ve çekme çubukları kabul edilebilir çatlak genişlikleri dikkate alınarak boyutlandırılır ve çubukların birleştiği düğüm bölgelerinde kuvvet aktarımının sağlandığı kontrol edilir. Çubuk analojisi yönteminde üç tip çubuk bulunmaktadır. Bunlar;

a. Beton basınç çubukları (C çubukları): donatılı veya donatısız
b. Donatısız beton çekme çubukları (Tc çubukları)
c. Donatılı çekme çubukları (Ts çubukları): normal donatı veya öngerme donatısı

Çekme çubukları, düğüm noktaları arasında bir boyutlu lineer elemanlar şeklindedir. Beton basınç ve çekme çubukları ise iki veya üç boyutlu gerilme elemanlarından oluşmaktadır. Basınç çubukları "yelpaze", "şişe" ve "prizma" olmak üzere üç farklı formda oluşabilmektedir. Düğüm noktaları ise, üç veya daha fazla basınç ve çekme çubuklarının kesişmesi ile meydana gelmektedir [41].

Ülkemizde yürürlükte olan tasarım yönetmeliklerinde çubuk analojisi yönteminde dikkate alınacak çekme ve basınç gerilmeleri hakkında bilgiler doğrudan mevcut olmadığından ACI318 tasarım yönetmeliğinde önerilen gerilme sınır değerlerinin kullanılması uygun olmaktadır [2].

2.4.Yönetmeliklerdeki Tasarım Yöntemleri

2.4.1. TS 500-2000 Betonarme Yapıların Tasarım Yönetmeliği

TS 500-2000 kesme açıklığının faydalı derinliğe oranının 1 veya 1'den küçük olduğu konsolların tasarımında sürtünme kesmesi için de hesap yapılması ve sürtünme-kesme donatısı A_{wf}'nin hesaplanmasını öngörmektedir. Ayrıca konsolda dış etkilerden oluşan büzülme, şekil değiştirme gibi nedenlerle uzama ve kısalmalar meydana getirirken, konsolda da yatay kuvvet oluşturmaktadır. Bu sebeple hesaplamalarda düşey yükün (V_d) %20 si kadar yatay yük (H_d) dikkate alınmaktadır. Konsol üst yüzünde bulundurulacak toplam çekme donatısı A_{st} için TS 500-2000'de aşağıdaki denklemler verilmiştir. Düşey ve yatay kuvvetlerin uygulama noktaları ile, kısa konsol ile ilgili boyut değişkenleri Şekil 1.3'te gösterilmektedir.

Asal basınç gerilmeleri etkisinde gevrek göçmenin engellenebilmesi amacıyla da kısa konsolun kesme dayanımı aşağıdaki koşulu sağlamalıdır;

$$V_d \leq 0{,}22 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \tag{2.63}$$

Kısa konsolda gereken toplam çekme donatısı A_{st};

$$A_{st}=(A_s+A_n) \geq \left(\frac{2}{3}A_{wf} + A_n\right) \tag{2.64}$$

$$A_{st} \geq 0{,}05 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b_w \cdot d \tag{2.65}$$

$$A_s=\frac{V_d \cdot a_v+H_d(h-d)}{0{,}8 \cdot f_{yd} \cdot d} \tag{2.66}$$

$$A_n=\frac{H_d}{f_{yd}} \tag{2.67}$$

Kısa konsolun kolon yüzünde kayması ile oluşacak göçmeyi dikkate alan sürtünme kesmesi modeli için gereken donatı alanı A_{wf} ise,

$$A_{wf}=\frac{V_d}{\mu \cdot f_{yd}} \tag{2.68}$$

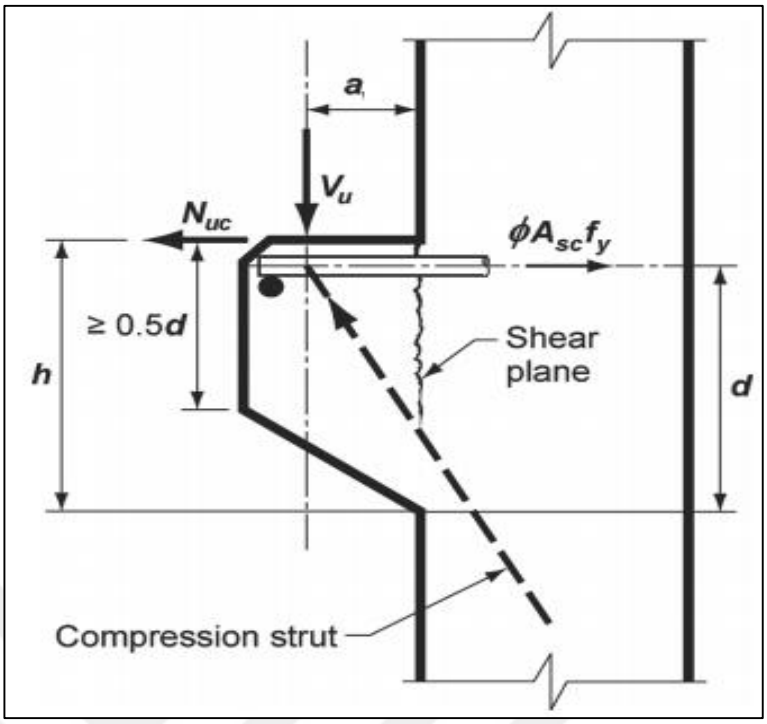
μ, döküm şekline göre değişen sürtünme katsayısı
Yatay donatı alanı A_{sv},

$$A_{sv} \geq 0{,}5\ (A_{st}-A_n) \tag{2.69}$$

Bu yatay donatı, konsolun üst yüzünden 2/3 derinliğine kadar yerleştirilecek kapalı etriye olarak düzenlenmelidir.

2.4.2. ACI 318-14- Betonarme Yapı Tasarım Yönetmeliği

Kesme açıklığın faydalı derinliğe oranı (a/d) 1'den küçük ve yatay yükün (N_{uc}), düşey yük (V_u) taşıma kapasitesinden küçük olduğu durumlarda ACI 318-14 kısa konsolların tasarımı için aşağıda maddeler halinde verilen kriter ve bağıntıları önermektedir. (Şekil 2.7).



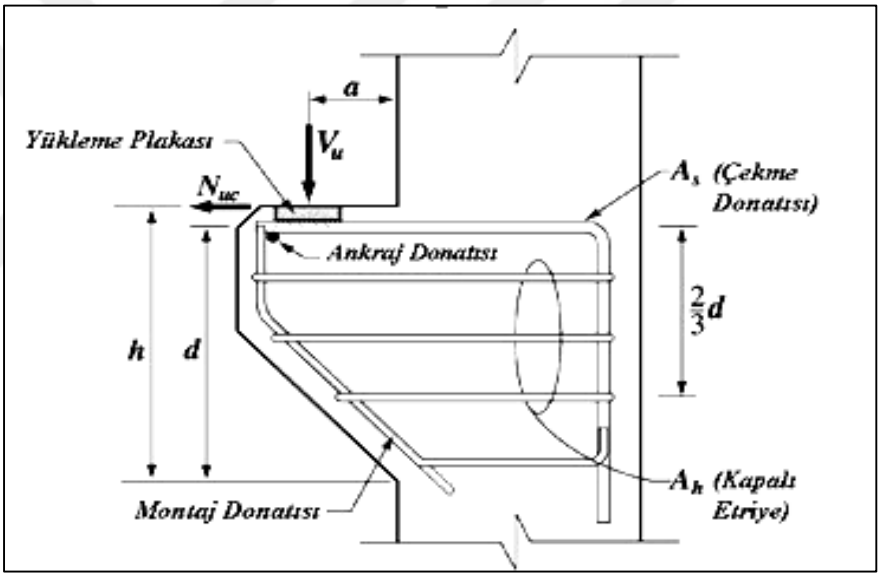
Şekil 2.7. Kısa konsolun yapısal tesirleri (ACI 318-14) [43]

- Kısa konsol V_u kesme kuvvetine, $[V_u a+N_{uc}(h-d)]$ momentine ve N_{uc} yatay çekme kuvvetlerine karşı eş zamanlı olarak direnç gösterecek şekilde dizayn edilmeli, düzeltme faktörü (ϕ) 0,75 alınmalıdır. Konsolun dış ucundaki derinlik de 0,5d'den büyük olmalıdır.
- V_u kesme kuvvetine karşı olan $A_{vf} = V_u/(\mu f_y \phi)$ kesme-sürtünme donatısı ACI 318-14 yönetmeliğinin 22.9 bölümünde verilen kesme-sürtünme katsayılarına göre hesaplanmalıdır.
- Normal dayanımlı betonda V_u kesme dayanımı $0,2f'_c b_w d$ veya $5,5b_w d$'yi geçmemelidir.
- $[V_u a+N_{uc}(h-d)]$ momentine karşı olan A_f donatısı aşağıda açıklanan ifadeye göre hesaplanmalıdır. Donatı düzeni Şekil 2.8'deki donatı konfigürasyonunda olmalıdır;

$$A_f = \frac{M_u}{\Phi \cdot f_y \cdot (d - \left(\frac{a}{2}\right))} \qquad (2.70)$$

- N_{uc} çekme kuvvetine karşı olan A_n donatısı $Nuc \geq \Phi A_n f_y$ kriterini sağlamalıdır. Ayrıca özel önlemler alınmadıkça N_{uc} çekme kuvveti, $0,2V_u$ değerinden küçük alınmamalıdır.

- A_s ana çekme donatısının alanı, $(A_f + A_n)$ veya $(2\,A_{vf}/3 + A_n)$ 'den büyük olanı olarak seçilmelidir. Burada A_{vf} kesme-sürtünme teorisinden elde edilen donatı miktarıdır.
- Toplam alanı A_h olan ve A_s ana donatıya paralel etriyeler, $0{,}5(A_s - A_n)$'den küçük olmamalı ve etkili derinlik boyunca iki veya üç tane olacak şekilde dengeli olarak dağıtılmalıdır.
- $\rho = A_s/(b.d)$ oranı, $0{,}04\,(f'_c / f_y)$'den küçük olmamalıdır.
- Ana çekme donatısı A_s kısa konsolun ön yüzünde;
  - Akma dayanımına ulaşabilecek kadar kaynaklanarak,
  - Yatay çember şeklinde geriye kıvrılarak,
  - Veya diğer pozitif ankraj elemanları ile iyice ankre edilmelidir.



Şekil 2.8. Kısa konsol notasyonu ve donatı detayı(ACI 318-14) [43]

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1. Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde doğruluğu yüksek ve tutarlı sonuçlar veren gelişmiş hesaplama yöntemidir. Bilgisayar kullanımının artması ve çözümlemelerin gerçeğe yakın değerler vermesi bu yöntemin önemini artırmasıyla günümüzde birçok mühendislik alanında kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak statik analiz, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, elektromanyetik analiz ve akustik gibi pek çok fiziksel olayın çözümünde uygulama alanı bulmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, inşaat mühendisliğinin özellikle yapı anabilim dalında, yapı sistemlerinin statik ve dinamik yükler etkisinde analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanabilirliği, deney ihtiyacı olmadan doğruluğu yüksek değerler elde etme ve parametrik çalışmalarda çıkan sonuçlar hakkında yorum yapma olanağı sağlaması önemli avantajlarıdır.

Çalışma kapsamında, deneysel olarak test edilerek dayanımı ve davranışı belirlenmiş betonarme kısa konsol elemanları sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Bu amaçla SAP2000 yapısal analiz programı kullanılmıştır. Betonarme kısa konsollar doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlar ile modellenmiş ve gerçek davranışını elde edebilmek için doğrusal olmayan özelliklerde tanımlanmıştır. Bu bölümde sonlu elemanlarla modelleme aşamaları anlatılmıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Modelleme Aşamaları

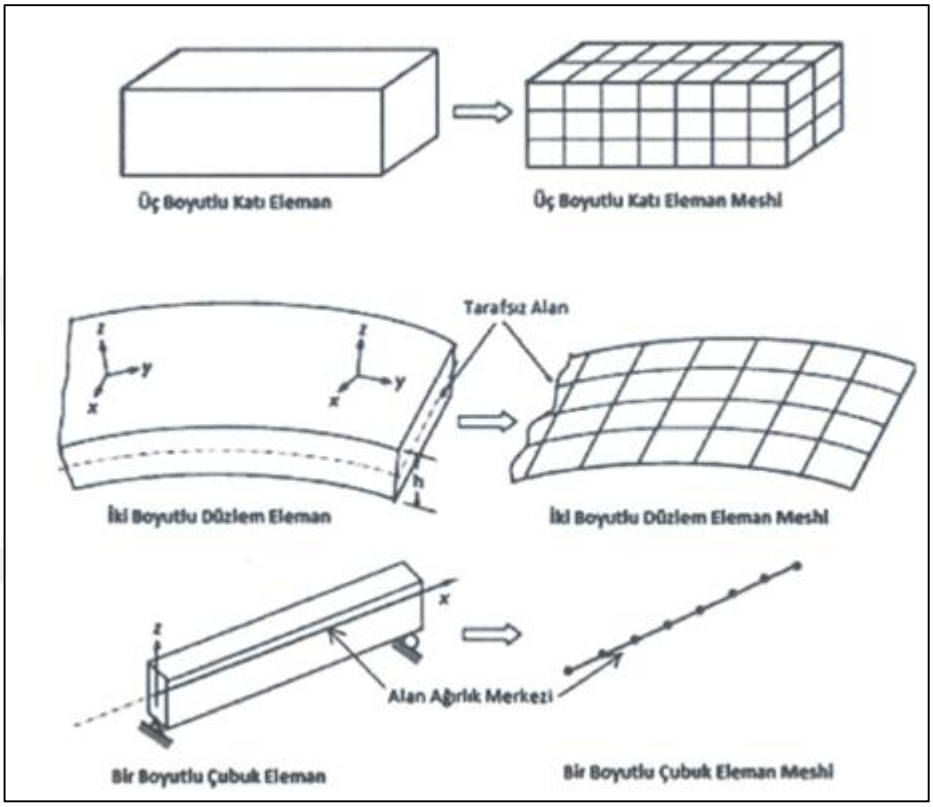
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde işlem adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir. İlk olarak, analizi yapılacak yapı ele alınır ve geometrik modelde gerekli sadeleştirmeler yapılmaktadır. Sadeleştirme, geometrik model üzerinde incelenmek istenmeyen veya sonuçlara daha az etkisi olacak kısımların çıkartılmasıdır. Bu sadeleştirme işleminden sonra kullanılacak eleman tipi seçilerek ağ yapısı oluşturulmaktadır. Daha sonra da elemanların kalınlık, uzunluk, atalet

momenti gibi geometrik malzeme özellikleri, yapı elemanının nereden mesnetlendiği ve yükün nereden uygulandığını gösteren sınır koşulları ağ elemanlarına tanımlanmaktadır. Devamında düğüm noktasındaki değerler ve ardından elemanlardaki sonuçlar hesaplanarak gerilme, deformasyon, kuvvet gibi bağıntılar oluşturulmaktadır. Son olarak elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde gerçek cisimleri ifade etmek için birbirine bağlanmış sonlu eleman adı verilen alt bölümler oluşturulur. Ağ oluşturma, meshleme veya mesh etme olarak isimlendirilen bu adım yönteminin temel uygulama adımıdır. Bu işlem ile düğüm noktalarının ve elemanların koordinatları oluşturulmaktadır. Elemanlar birbirine düğüm noktalarında bağlanırlar ve düğüm noktaları elemanların sınırlarını göstermektedir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken sonuçların tutarlılık göstermesi için mümkün olduğu kadar düzgün ve orantılı olarak bölünmesi, elemanın geometrisini olabildiğince temsil edebilecek bir ağ yapısının seçilmesi gerekmektedir. Daha hassas çözümler elde etmek, gerçeğe en yakın sonuçları saptamak için ağ elemanları olabildiğince küçültülmektedir ancak, sonlu elemanların boyutları küçüldükçe analiz süresi artmaktadır. Betonarme elemanlarda seçilen en küçük ağ elemanının boyutu betondaki agrega boyutunun 2-3 katından büyük alınmalıdır [44]. Bu çalışmada; farklı deneysel çalışmalarda incelenen betonarme kısa konsolların doğrusal olmayan çözümünde optimum sonlu eleman boyutu, hesaplama süresini de dikkate alarak deney sonuçları ile tutarlı yük-yerdeğiştirme eğrisini veren sonlu eleman boyutu olarak seçilmiştir.

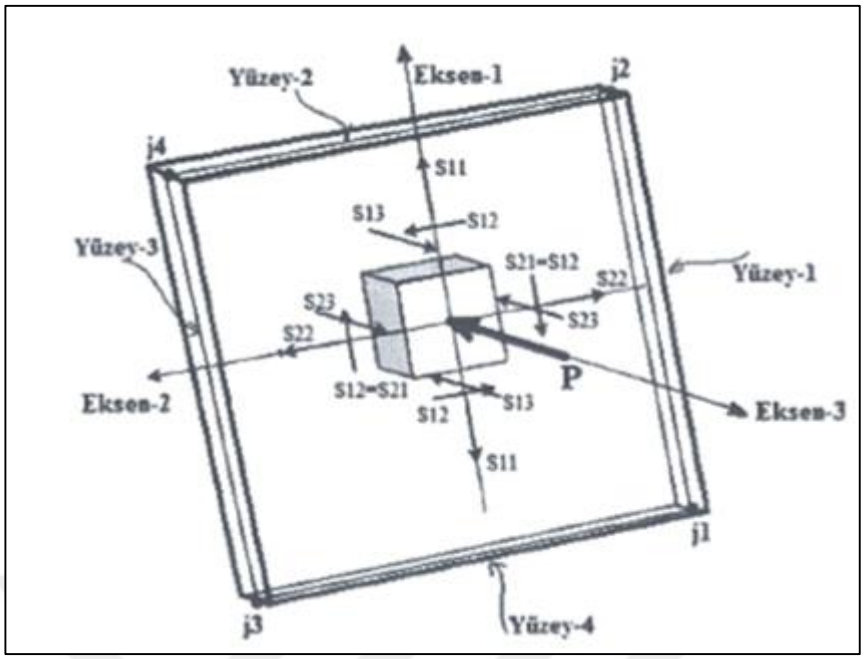
Sonlu elemanlar yöntemi, Şekil 3.1'de görüldüğü üzere bir boyutlu çizgisel eleman, iki boyutlu düzlem eleman ve üç boyutlu katı elaman olmak üzere üç eleman tipinden oluşmaktadır. Bir boyutlu çubuk elemanlar, iki boyutu üçüncü boyutunun yanında çok küçük olan, elemanın ekseni ve normal kesitiyle tanımlanmış olan elamanlardır. Bina türü sistemlerde kolon, kiriş, perde, nervürlü ve kaset döşemelerin dişleri, sürekli temel, ızgara temel, yay, profil, boru gibi yapısal elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır. İki boyutlu düzlem elemanlar, gerçek sistemde bir boyutu iki boyutundan çok daha küçük olan elemanlardır. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm içeren tipleri vardır. Üçgen eleman, çözüm bölgesini yeterince temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana

gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Levha, zar, kabuk gibi elemanlar iki boyutlu düzlem elemanlar kullanılarak modellenmektedir. Üç boyutlu katı elemanlar ise geometrik basitleştirme olmaksızın modellenebilen elemanlardır. Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması yani altı yüzeyli elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan sonlu eleman tipleridir [45].



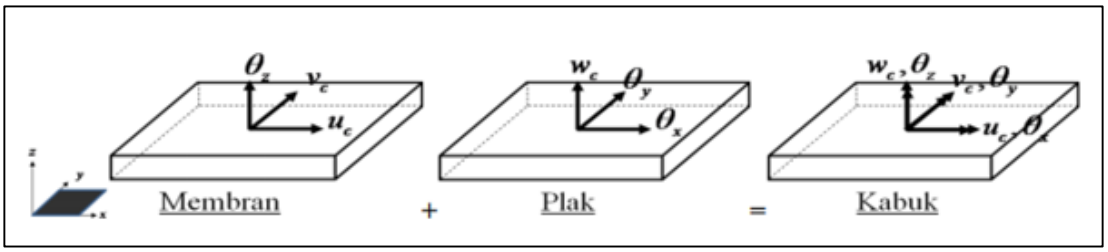
Şekil 3.1.Sonlu elemanlar yöntemi ile geometri modelleme [45]

Bu çalışmada kısa konsollar doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir. Bundan dolay kabuk eleman anlatımına geniş yer verilmiştir. Herhangi bir model, iki boyutlu kabuk elemanla doğrusal olmayacak şekilde modellendiğinde kabuk elemanlardaki gerilmeler doğrudan okunabilmektedir. Kabuk elemanlarda oluşan gerilmeler S11, S22, S12, S13 ve S23 olarak Şekil 3.2'de gösterilmektedir. S11 ve S22 kabuk elemanda düzlem içinde oluşan gerilmeleri, S12 düzlem içindeki kayma gerilmelerini, S13 ve S23 ise enine oluşan kayma gerilmelerini temsil etmektedir [46].



Şekil 3.2. Kabuk elemandaki gerilmeler [46]

Kabuk elemanlarda membran ve eğilme etkisinden aynı anda bahsedilebilmektedir. Membran elemanlar eğilme momentine karşı dirençli olmamasına rağmen düzlem içinde oluşan kuvvetleri taşıyabilmektedir. Plak elemanları ise eğilme momentini ve düzlem dışında oluşacak kuvvetleri taşıyabilmektedir. Bundan dolayı plak elemanları sadece düzlemine dik doğrultudaki yüzeysel taşıyıcıları modellemek için kullanılırken, membran elemanları düzlem içindeki yüzeysel taşıyıcı elemanları modellemek için kullanılmaktadır [43]. Bu durum Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

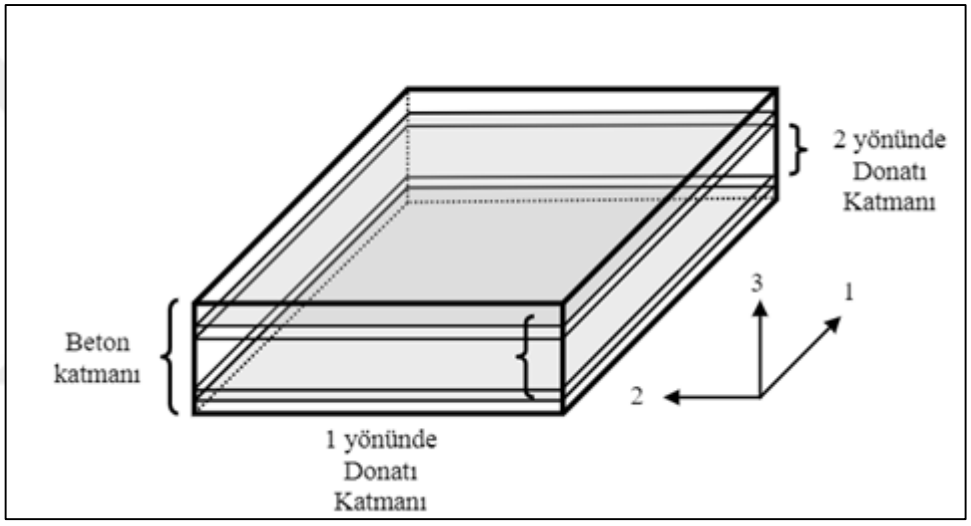


Şekil 3.3. Kabuk eleman oluşumu [47]

Kabuk elemanlar Şekil 3.3'teki gibi kesit boyunca homojen olarak tanımlanabildikleri gibi kabuğun kalınlığı boyunca farklı katmanlarla tanımlanarak heterojen biçimde de oluşturulabilmektedirler. Katmanlı kabuk elemanlar modellenirken her bir katmanda birbirinden farklı malzeme özellikleri tanımlanabilmektedir. Ayrıca, farklı kalınlıklarda ve konumlarda ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri ile de tanımlanabilmektedir. Betonarme elemanlar

modellerinde betonun bulunduğu bölgeyle donatının bulunduğu bölge farklı katmanlarla Şekil 3.4'te gösterildiği gibi modellenmektedir.

Katmanlı kabuk elemanlar öncelikle döşeme elemanlarının modellenmesinde kullanılmıştır. Schwetz ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, deneysel olarak test edilmiş dişli döşeme elemanının tablası ve dişleri katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir [49]. Bostan tarafından yapılan çalışmada, deneysel olarak test edilmiş gövdesinde boşluklar bulunan betonarme kirişler katmanlı kabuk elemanlar ile modellenmiş ve analitik olarak elde edilen yük-yer değiştirme davranışı deneysel olarak elde edilen davranışı yansıtmaktadır [45].



Şekil 3.4. Katmanlı kabuk eleman modeli [48]

3.3. Malzeme Modelleri

Bu bölümde modellemede kullanılan beton basınç ve çekme modeli ile donatı çeliğinin çekme modeli özetlenmektedir. Tüm malzemeler doğrusal olmayan davranışta tanımlanmıştır.

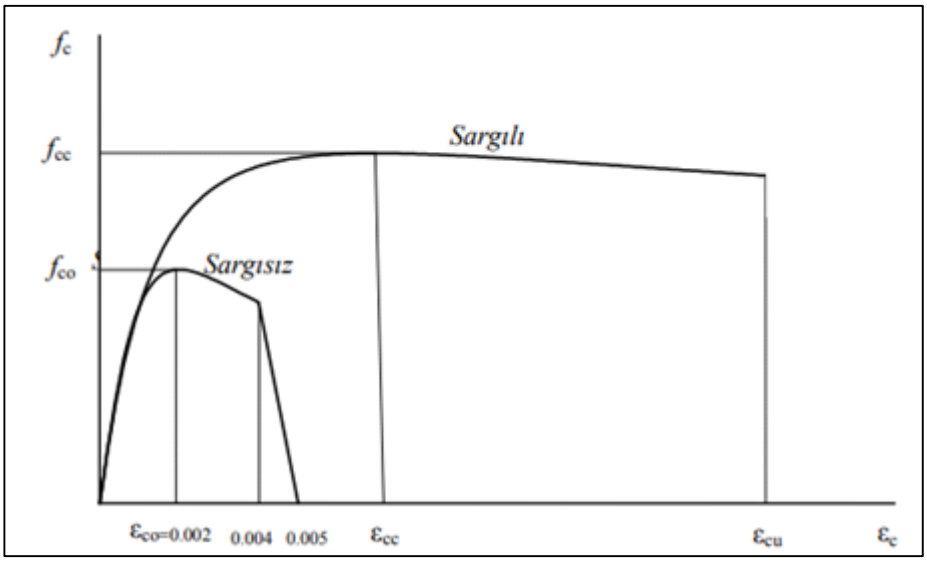
3.3.1. Beton modeli

Betonarme bir kesitin hesabının yapılabilmesi için, herhangi bir mekanik problemin çözümünde olduğu gibi denge ve uygunluk koşullarını sağlanmasının yanında malzeme veya malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Denge ve uygunluk koşulu malzemelerin davranışlarından bağımsızdır. Ancak, malzemelerin davranışı gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde dikkate alınmaktadır. Malzemenin davranışı ne kadar gerçekçi modellenirse analizin

çözümü o kadar doğru olacağından, malzemelerin gerilme-şekil değiştirme özeliklerinin de bilinmesi çözümün tutarlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak, betonun gerilme-şekil değiştirme özeliği, yükleme hızı, numune boyutu, kullanılan presin özelikleri gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Bu nedenle beton için tek ve kesin bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi tanımlamak oldukça güçtür. Çözümün yapılabilmesi için deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelenerek ve basite indirgenerek kullanılmaktadır. Bugüne kadar birçok araştırmacı matematiksel model olarak tanımlanan betonun idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üzerinde çalışmış ve bu zamana kadar beton için çok sayıda gerilme-şekil değiştirme modeli önerilmiştir [50].

Bu çalışmada ise literatürde önerilen birçok modelden Mander beton modeline göre malzeme davranışı tanımlanmıştır [51]. Mander beton modelinin yaygın olarak kullanılması, deprem yönetmeliğinde tanımlanması ve SAP2000 yapısal analiz programında modellenebilmesi bu çalışmada Mander beton modelinin seçilmesinde etkili olmuştur. Mander modeli Şekil 3.5'te görüldüğü gibi hem sargılı hem de sargısız beton için kullanılabilen beton basınç modelidir. Sargılı veya sargısız betonlar için gerilme-şekil değiştirme denklemleri detayları yönetmelikte tanımlanmıştır [52].

Sargılı beton modelinde maksimum basınç birim şekil değiştirmesi, beton basınç dayanımı, enine donatı akma dayanımı, oranı, konfigürasyonu ve betondaki etkili sargılama basıncının fonksiyonu olarak tespit edilmektedir. Sargısız beton modeli için, betonun maksimum gerilmedeki birim şekil değiştirme değeri ise 0,002 olarak alınır. Sargısız betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, birim şekil değiştirme değeri bu değerin iki katını aştığında kabuk beton modelinin döküldüğü varsayılır ve doğrusal olarak maksimum birim şekil değiştirme değerine ulaşılır.

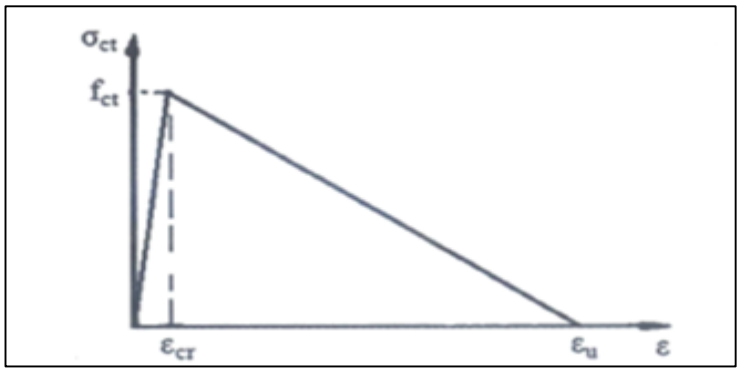


Şekil 3.5.Mander beton modeli [52]

Betonda oluşan gerilmeler betonun şekil değiştirmesine yol açar ve şekil değiştirme değerleri çatlama birim değiştirme değerinin üzerine çıktığında, betonun çekme gerilmesinin sıfıra yaklaştığı gözlenmektedir. Bu durumda çatlamadan sonra betonun çekme gerilmelerinin davranışa etkisi tamamen ihmal edilir ve beton çatladıktan sonra betonun içindeki donatının yük-şekil değiştirme davranışının sadece donatının davranışını yansıttığı değerlendirilir. Ancak betonarme elemanlarda betonun çekme gerilmeleri, çekme dayanımını aştığında çatlaklar genişlemeye başlar ve bütün yük ilk olarak beton tarafından karşılanmaktadır. Ardından donatı, yerel çekme gerilmelerini çatlaklar arasındaki sağlam betona iletir ve bu bölgedeki sağlam beton çatlak oluşumundan sonra bile çekme gerilmelerini taşımaya devam ederek betonarme yapının genel dayanımına katkıda bulunmaktadır. Çekme sertleşmesi olarak tanımlanan bu davranış hesaplara genel olarak ya donatının gerilme şekil değiştirme eğrisi düzeltilerek ya da çatlak oluştuktan sonraki süreçte betonun çekme katsayısında bir düzeltme yapılarak iki farklı şekilde dahil edilmektedir [45].

Literatürde betonarme elemanların çekme davranışı ile ilgili birçok model önerilmiştir. Bu çalışmada, SAP2000 programından yararlanarak betonun çekme gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.8'de gösterildiği gibi doğrusal olarak tanımlanmıştır. Literatürden derlenen deneylerin çoğunda betonun çekme dayanımı raporlanmıştır. Bu numunelerin beton çekme dayanımı, betonun lifli veya lifsiz olmasına ve beton basınç dayanıma göre değişmektedir. Betonun çekme dayanımı

bilinmeyen numunelerde ise beton basınç dayanımı esas alınarak yönetmelik kriterine göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Betonun çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi

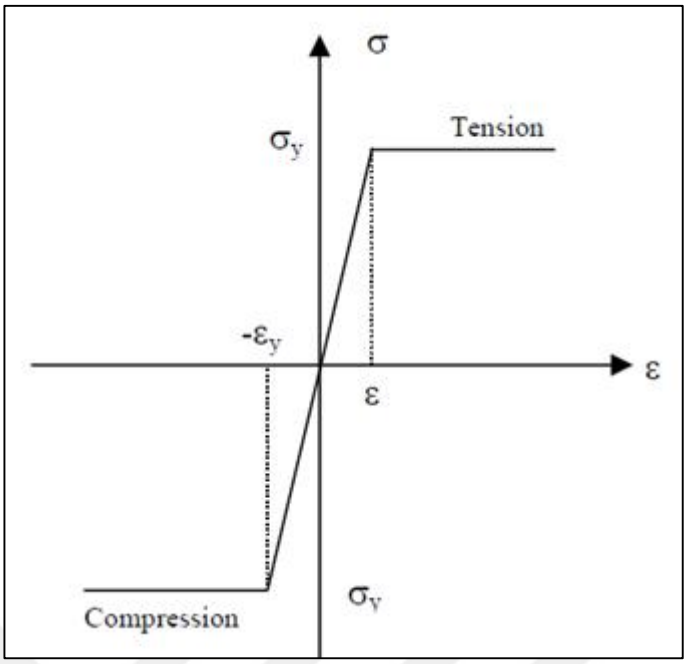
3.3.2. Donatı modeli

Betonarme elemanların sünekliğini donatı çeliği ile sağlanmaktadır. Donatı çeliğinin çekme veya basınç etkisindeki davranışı genel itibariyle aynıdır. Bu sebeple tasarımda donatı çeliği elasto-plastik davranış gösterdiği baz alınır. Elasto-plastik malzemeler, taşıma gücüne ulaşıncaya kadar doğrusal bir davranış gösterir. Taşıma gücünden fazla bir yük taşıtıldığında ise büyük deformasyonla yapma özelliği vardır.

Çalışmada donatı çeliğinin elasto-plastik davranış gösterdiği kabul edilmiş, donatı akma dayanımları ise kısa konsol deneylerinden alınmıştır. Donatı çeliğinin Elastisite modülü ise yönetmelik kriterlerine göre $2x10^5$ MPa olarak tanımlanmıştır.

3.4. Sonlu Elemanlar Çözümü

Betonarme elemanların karmaşık yapısını tanımlayabilmek için herhangi bir yük altında şekil değiştirmesini yaklaşık olarak tahmin edecek en uygun yer değiştirme modeli seçilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde, hesaplamalar elemanların birleştiği düğümler üzerinde gerçekleştirildiğinden düğümler üzerinde denklemler kurulur. Problemin büyüklüğüne göre yüzlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımlarının çözümü bilgisayar programları ile mümkün olmaktadır. Hesaplama sonucunda bulunan değerler sonuçta düğümler üzerinde bulunan değerlerdir. Bu nedenle tutarlı bir hesaplama için öncelikle iyi bir ağ yapısının kurulması önemlidir.



Şekil 3.7. Donatı çeliği σ-ε eğrisi

Sonlu elemanlar yönteminde sistemin tamamı matris formunda ([K][D]=[R]) idealize edilir. Burada D büyüklüğü, düğümlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Daha basite indirgersek R sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler gibi), K sistemin yapısını (katı, akışkan, gaz vb özellikleri) ve D ise aranan düğümler üzerindeki değerlerdir (gerilme, kuvvet vb). Buradan anlaşılacağı üzere; D matrisinin bulunabilmesi için sistemi temsil eden büyüklüklerin (K matrisi) ve dışarıdan etkiyen sınır şartlarının da (R matrisi) bilinmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle geometrik modeli oluşturmak gerekir. Ardından mesh işlemi ile eleman ve düğüm noktaları oluşturulmaktadır [53].

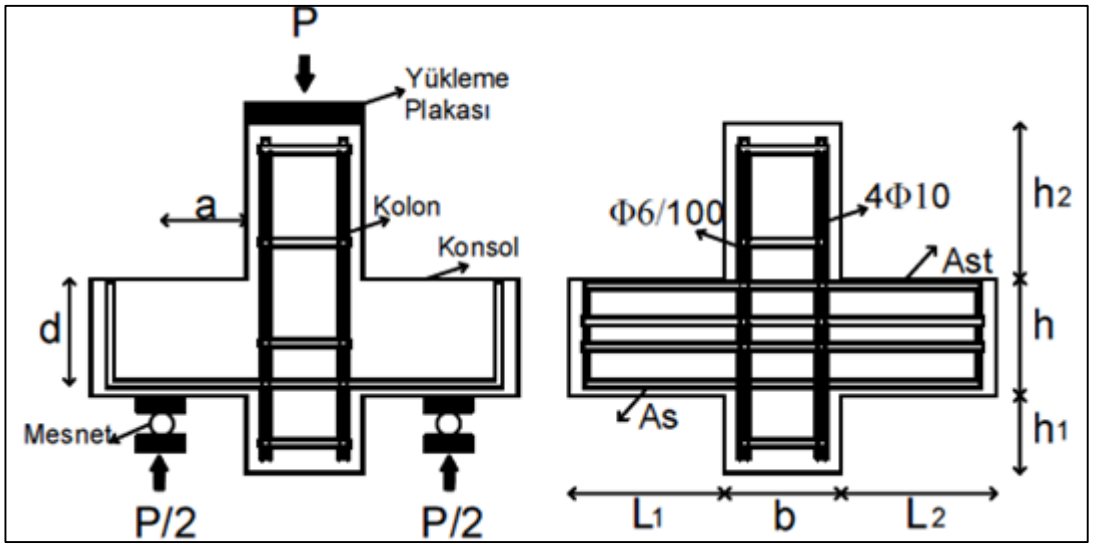
4. KISA KONSOLLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi yapabilen birçok yazılım modelleme teknikleri açısından çeşitli alternatifler sunmaktadır. Yapının seçilen modelleme tekniği, çalışmanın gereksinimlerine, hedeflenen ve seçilen sonuç parametrelerine göre farklılık gösterebilmektedir. Bir yapının modellenmesinde, eleman sayısının mümkün olduğunca az olması, geometrik detayların basite indirgenmesi, yapının fiziksel özelliklerinin mümkün olduğunca gerçeğe en yakın olarak tasarlanıp modellenmesi gerekmektedir. Kurulan bu model çalıştırılarak elde ettiğimiz sonuçlar, yapının genel davranışı hakkında bilgi verdiği gibi, yapılan el hesapları ile karşılaştırılarak doğru bir yaklaşım içerisinde olunup olunmadığı ile ilgili de bizlere fikir vermektedir [54].

Bu çalışmada, mevcut literatürde kısa konsol üzerine yapılmış deneysel çalışmalar incelenmiş, oluşturulan veri tabanındaki kısa konsollar maksimum kesme dayanımını belirleyebilmek için SAP2000 yapısal analiz programı ile modellenerek analiz yapılmıştır. Bu bölümde ilk olarak modellemesi yapılmış olan kısa konsol numunelerinin özellikleri tanıtılmış, sonrasında ise konsolların sonlu eleman yöntemiyle modelleme aşamaları ve analiz yöntemi açıklanmıştır.

4.1. İncelenen Kısa Konsol Özellikleri

Çalışma kapsamında 53 adet betonarme kısa konsol numunesi ile bir veri tabanı oluşturulmuştur. Deneyleri tamamlanmış ve değerlendirmeleri yapılmış tüm kısa konsolların kalınlıkları 150mm olup geometrisi aynıdır. Kolon boyutları, kolon boy donatı alanı (4Φ10), etriye alanı (4Φ6) olup tüm numuneler aynı özelliktedir. Lif türü, lif oranı, donatı oranı, (a/d) oranı, beton basınç dayanımı, kesit faydalı yüksekliği, donatı akma dayanımı, beton çekme dayanımı ve mesnet noktaları arasındaki mesafe değişken olarak incelenmiştir. Test edilen kısa konsolların yükleme şeması ve geometrik özellikleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Kısa konsolların yükleme şeması ve özellikleri

Analitik olarak modellenen kısa konsol numuneleri üç grupta toplanmıştır. Üç ayrı deney setinin aynı geometride olması değişen parametrelerin davranışa etkisini daha doğru yorumlama olanağı sağlamıştır. Aynı geometrik özelliklere sahip betonarme kısa kısa konsolların (a/d) oranı, donatı oranı ve beton basınç dayanımının değişmesiyle yapı elemanının davranışı, maksimum dayanımının değişimi incelenmiştir. Deneysel olarak testleri tamamlanan literatürden seçilen kısa konsolların özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir. Bu tabloda gösterilen, f_c' beton basınç dayanımı, d konsol faydalı yüksekliği, a kesme açıklığı, f_y boy donatısının akma dayanımı, A_s ana donatı alanı, lif oranı ise betonun içindeki lifin hacimsel olarak oranı, ρ, ana donatı oranıdır.

Tablo 4.1. Kısa konsolların özellikleri [13, 15, 22]

SN	NA	F_c' MPa	b mm	d mm	a mm	f_y MPa	f_{wy} MPa	Ana Donatı mm^2	ikincil donatı mm^2	Lif orani %	a/d	ρ %
I	C21	47,2	150	135	52,5	495	495	100,5	0	0,0	0,39	0,50
	C22	50,1	150	135	88,5	495	495	100,5	0	0,0	0,66	0,50
	C23	50,1	150	135	124,5	495	495	100,5	0	0,0	0,92	0,50
	C24	47,2	150	135	52,5	558	495	157	0	0,0	0,39	0,78
	C25	49,8	150	135	64,5	491	495	226	0	0,0	0,48	1,12
	C26	48,2	150	135	124,5	491	495	226	0	0,0	0,92	1,12
	C27	47,3	150	135	52,5	495	495	100,5	0	0,7	0,39	0,50
	c28	55,7	150	135	88,5	495	495	100,5	0	0,7	0,66	0,50
	c29	55,7	150	135	124,5	495	495	100,5	0	0,7	0,92	0,50
	c30	51,4	150	135	52,5	558	495	157	0	0,7	0,39	0,78
	c31	57	150	135	54,5	491	495	226	0	0,7	0,40	1,12
	c32	47,3	150	135	124,5	491	495	226	0	0,7	0,92	1,12
	T3	47,9	150	135	88,5	558	495	157	0	0,7	0,66	0,78
	T10	47,9	150	135	88,5	491	495	226	0	0,7	0,66	1,12

Tablo 4.1.(Devam) Kısa konsolların özellikleri [13, 15, 22]

SN	NA	F_c' MPa	b mm	d mm	a mm	f_y MPa	f_{wy} MPa	Ana Donatı mm^2	ikincil donatı mm^2	Lif orani %	a/d	ρ %
II	51	35,3	150	132,3	110	452	451	226	0	2,0	0,83	1,14
	55	34,4	150	135,3	75	451	451	100,5	0	1,0	0,55	0,50
	56	34	150	115,8	75	451	451	100,5	0	1,0	0,65	0,58
	57	37,3	150	135,1	80	454	451	157	0	2,0	0,59	0,77
	58	37,3	150	113,3	80	454	451	157	0	2,0	0,71	0,92
	60	33,9	150	112,6	110	452	451	339	0	2,0	0,98	2,01
	61	33,9	150	95	60	451	451	100,5	0	2,0	0,63	0,71
	63	34,9	150	94	80	454	451	157	0	2,5	0,85	1,11
	64	34,9	150	92,5	60	452	451	226	0	2,5	0,65	1,63
	67	35,1	150	132,4	110	452	451	226	0	0,0	0,83	1,14
	68	35,1	150	112,4	110	452	451	226	0	0,0	0,98	1,34
	71	32,3	150	121,5	110	452	451	276	0	0,0	0,91	1,51
	72	32,3	150	123,2	110	452	451	226	0	0,0	0,89	1,22
	73	32	150	124	75	451	451	100,5	0	0,0	0,60	0,54
	74	32	150	94,2	75	451	451	100,5	0	0,0	0,80	0,71
	75	29,6	150	125,9	75	451	451	100,5	0	1,0	0,60	0,53
	76	29,6	150	94,8	75	451	451	100,5	0	1,0	0,79	0,71
	77	30,8	150	122,3	110	452	451	226	0	2,0	0,90	1,23
	80	31,5	150	122,1	110	452	451	226	0	2,0	0,90	1,23
	85	32,2	150	112,5	110	452	451	226	0	2,0	0,98	1,34
	87	33,8	150	93,5	60	454	451	157	0	2,5	0,64	1,12
	88	33,8	150	93,1	80	452	451	226	0	2,5	0,86	1,62
III	B1	70,5	150	127,5	76,5	400	330	402	0	0,0	0,60	2,10
	B3	82	150	127,5	76,5	400	330	402	0	1,0	0,60	2,10
	B4	75	150	127,5	76,5	400	330	402	0	2,0	0,60	2,10
	B5	82,4	150	127,5	57,38	400	330	402	0	0,0	0,45	2,10
	B6	96,4	150	127,5	57,38	400	330	402	0	1,0	0,45	2,10
	B7	82,4	150	127,5	95,63	400	330	402	0	0,0	0,75	2,10
	B8	96,4	150	127,5	95,63	400	330	402	0	1,0	0,75	2,10
	B9	62,7	150	127,5	76,5	400	330	402	0	0,0	0,60	2,10
	B10	65	150	127,5	76,5	400	330	402	0	1,0	0,60	2,10
	B11	106,5	150	127,5	76,5	400	330	402	0	0,0	0,60	2,10
	B12	106	150	127,5	76,5	400	330	402	0	1,0	0,60	2,10
	B15	85	150	127,5	76,5	400	330	402	2Φ6	0,0	0,60	2,10
	B16	78,3	150	127,5	76,5	400	330	402	2Φ6	1,0	0,60	2,10
	B17	73	150	127,5	76,5	400	330	226	0	0,0	0,60	1,18
	B18	94	150	127,5	76,5	400	330	226	0	1,0	0,60	1,18
	B19	73	150	127,5	76,5	400	330	509	0	0,0	0,60	2,66
	B20	73	150	127,5	76,5	400	330	509	0	1,0	0,60	2,66

I ve III set kısa konsollar sırasıyla yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı betondan imal edilmiştir. (a/d) oranı, donatı oranı, lif oranı değişkendir. II set numuneleri normal dayanımlı beton olup (a/d) oranı, donatı oranı, lif oranı değişken kısa konsol numuneleridir. Veritabanını oluşturan kısa konsolların geometrik özellikleri Tablo 4.2'de sunulmaktadır.

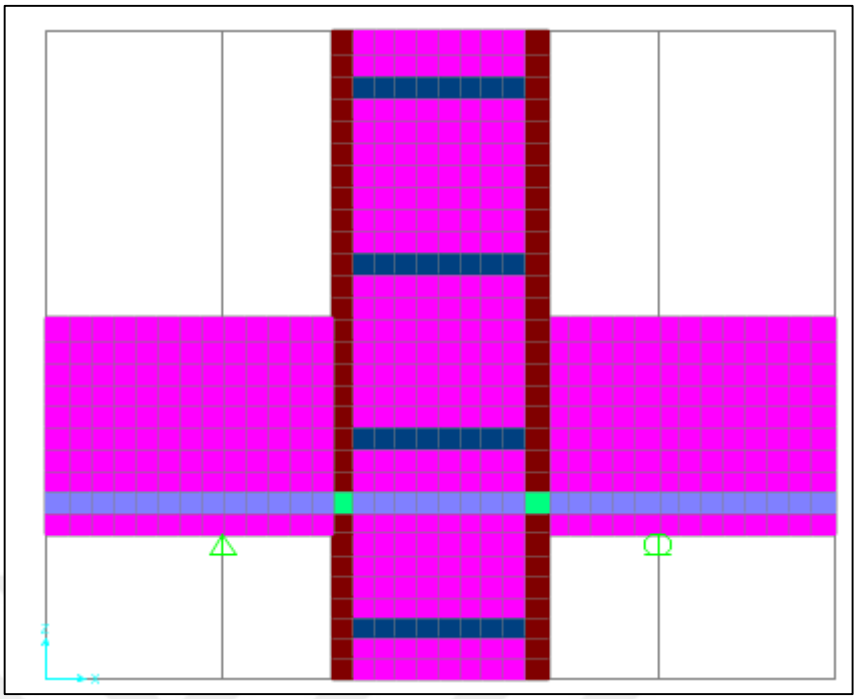
Tablo 4.2. Kısa konsol veritabanında dikkate alınan parametreler

Parametre	Aralık
a / d	0,39 – 0,98
h (mm)	150
d (mm)	92,50 – 135,30
b (mm)	150
f_c' (MPa)	29,60 – 106,50
V_f (%)	0,70 – 2,50
ρ (%)	0,50 – 2,66
f_y (MPa)	400 - 558
N_s	53

4.2. Deneysel Kısa Konsolların Modellenmesi

Çalışma kapsamında oluşturulan veri tabanında mevcut kısa konsollar geometrik özellikleri ve malzeme dayanımları dikkate alınarak SAP2000 yapısal analiz programı ile modellenerek sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Modelleme aşamaları bir numune üzerinde örnekleme yapılarak aşağıda özetlenmiştir.

İlk olarak katmanlı kabuk modeli ile konsolun geometrisi oluşturulmuştur. Kısa konsol modeli SAP2000 programında xz düzleminde oluşturulmuş olup katman kalınlığı konsolun derinliği olarak değil genişliği olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar ağ boyutları eleman geometrisine bağlı olarak 15 mm seçilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Kısa konsol sonlu eleman ağ modeli

Katmanlarda donatının olduğu bölgeler donatılı beton katman, donatının olmadığı bölgeler sadece beton olan kısımlar ise donatısız beton olarak isimlendirilmiştir. Donatılı beton katmanlar numunedeki konumuna göre oluşturulmuş ve analizi yapılmıştır. Donatı kalınlığı mesh yüksekliğine göre belirlenmiştir.

B10 kısa konsol numunesinin eşdeğer donatı kalınlığının hesaplanması şu şekildedir;

$$h' = \frac{b}{10} = \frac{150}{10} = 15 \text{ mm} \tag{3.1}$$

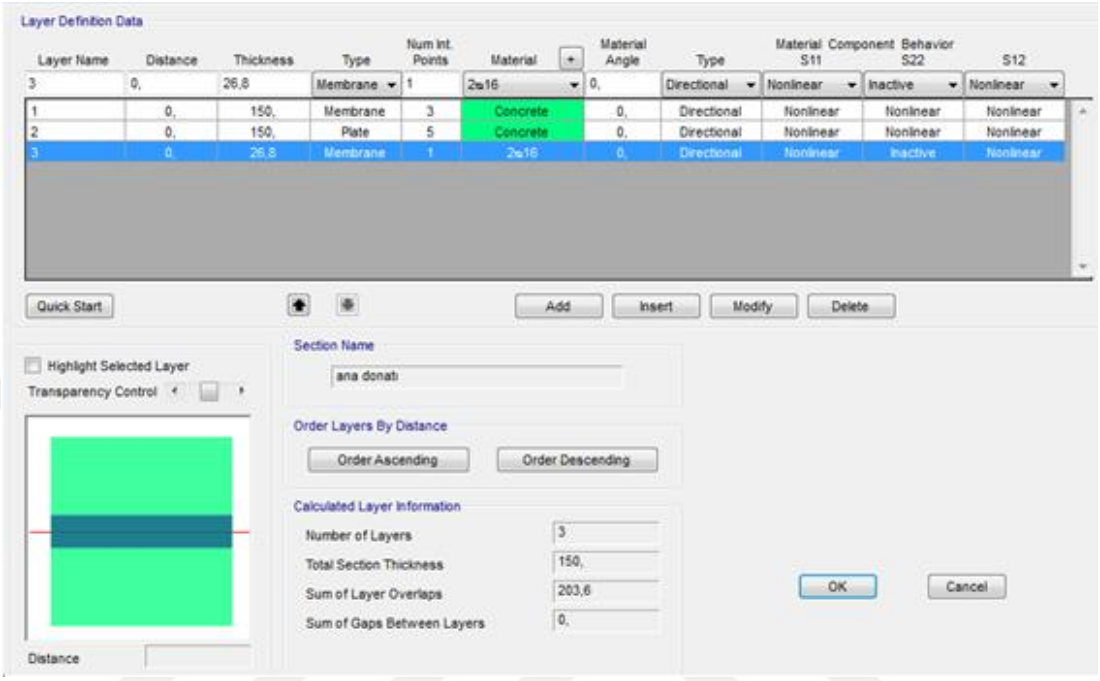
$$A_s = (2\ \Phi 16) = 402 mm^2 \tag{3.2}$$

$$t' = \frac{A_s}{h'} = \frac{402}{15} = 26{,}8 \text{ mm} \tag{3.3}$$

Yukarıda denklemleri verilen h' ağ elemanı yüksekliği, b ağ elemanı genişliği, A_s, ağ elemanı donatı alanı ve t' eşdeğer donatının kalınlığıdır.

SAP2000 programında oluşturulan kısa konsol modelinde donatısız beton katman membran ve plak olacak şekilde iki tip katmana ayrılmıştır. Membran tipindeki katman sadece eksenel gerilmeleri taşıması için, plak tipindeki katman ise eğilme momentlerini taşıması amacıyla oluşturulmuştur. Donatılı beton katmanında ise bu

iki türde oluşturulan katmana ek olarak eksenel gerilmeleri karşılayabilmesi için donatı malzemesi membran tipinde tanımlanmıştır. SAP2000 yapısal analiz arayüzünde katmanlı kabuk eleman tanımı Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



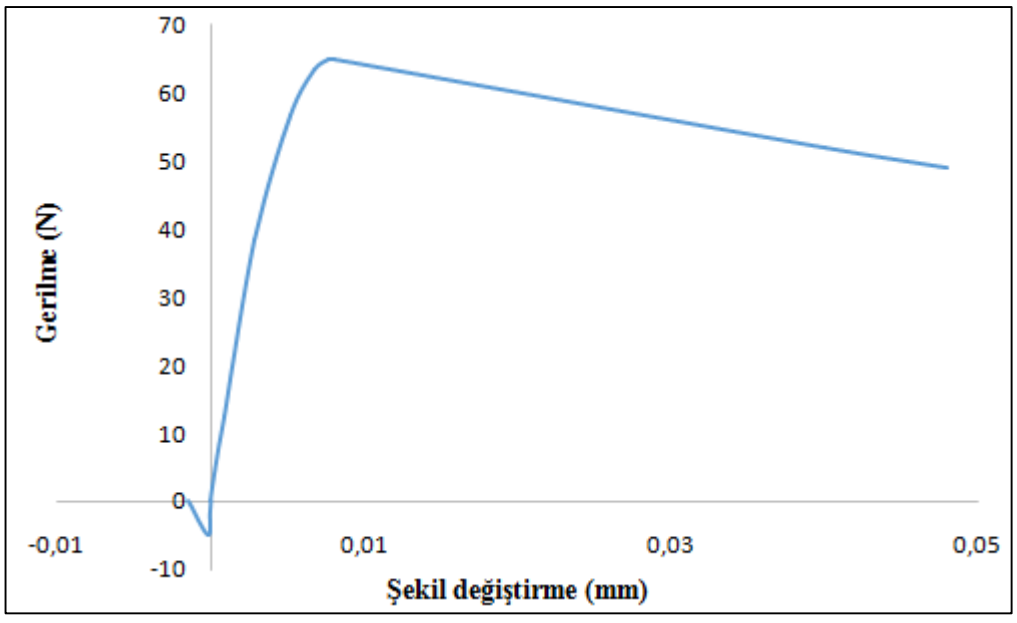
Şekil 4.3. Donatılı beton katmanının modellenmesi

Sonlu elemanlar yönteminde gerilme ve şekil değiştirme değerleri entegrasyon noktası diye de isimlendirilen noktalardan hesaplanmaktadır. Bu noktalarda hesaplanan gerilmeler, yazılım tarafından düğüm noktalarına aktarılmaktadır. Tasarımcının belirlediği entegrasyon nokta sayısı her tabaka için 1-5 arasında seçilebilmektedir. Genellikle membran ve plak davranışını yakalayabilmek için iki noktanın seçilmesi yeterli olmasına rağmen, doğrusal olmayan analizdeki donatının akma davranışını yakalayabilmek için daha çok entegrasyon noktasına ihtiyaç olabilmektedir. Fakat fazla entegrasyon noktası seçildiğinde analiz süresi uzamakta ve analiz verimliliği düşmektedir. Bu çalışmada entegrasyon nokta sayıları için Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi beton malzemesinden oluşan membran tipindeki katmanda 3 nokta, plak tipindeki katmanda ise 5 nokta bulunmaktadır. Ayrıca donatılı beton için donatı malzemesi ilave olarak membran tipindeki katman 1 nokta olacak şekilde seçilmiştir.

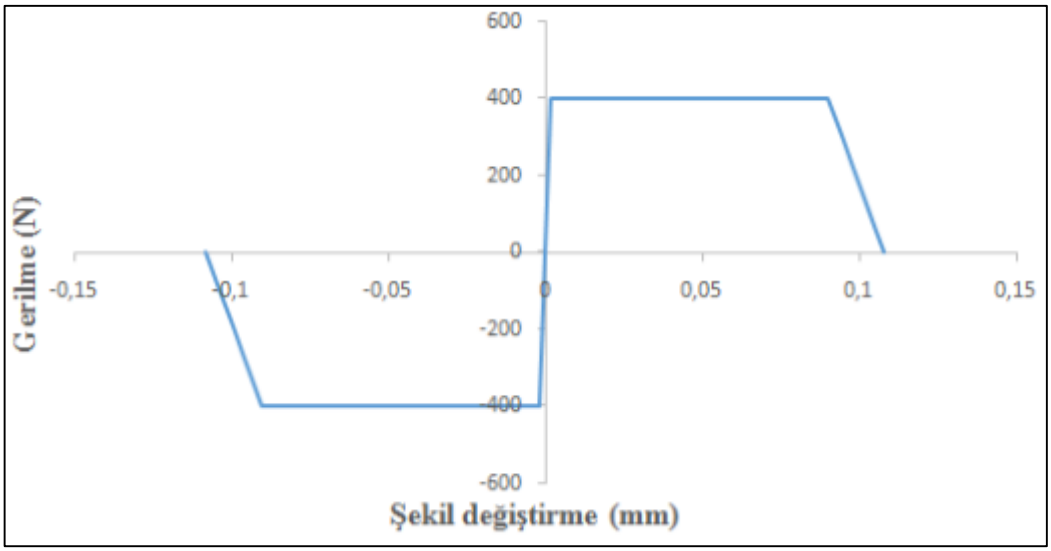
Kabuk elemanların iç gerilmelerindeki katmanları doğrusal olmayan özelliklerde tanımlanmıştır. Aynı şekilde beton ve donatı malzemeleri gerçek davranışların

modelleyebilmek için doğrusal olmayan özellikte modellenmiştir. Betonarme kısa konsolların beton elastisite değerleri Tablo 4.1'de gösterilen basınç dayanımları kullanılarak ACI 318-08 yöntemine göre $E=4700\sqrt{f_c'}$ hesaplanmış ve beton poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır.

Betonun eksenel basınç kuvveti altında Mander beton model davranışı sergileyeceği esas alınmıştır. Modellemede kısa konsolların eksenel basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışları, donatının akma dayanımı, etriye oranı, donatı alanına göre tanımlanmıştır. Betonun çekme dayanım değeri ise deneylerde belirlendiği şekliyle girilmiştir. Çekme dayanımı bilinmeyen numunelerde ise lifli veya lifsiz beton olması göz önünde tutularak beton basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanmıştır. Modellemede oluşturulan eksenel basınç ve çekme altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi davranışı ise Şekil 4.5'te gösterildiği gibidir. Modellenen kısa konsol numunesinde en üst orta noktasından düşey doğrultuda tekil yükleme yapılmıştır. Doğrusal olmayan analiz artan yük etkisinde yer değiştirme kontrolü ile tamamlanmıştır.



Şekil 4.4 Beton gerilme-şekil değiştirme davranışı



Şekil 4.5.Donatının gerilme-şekil değiştirme davranışı

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

1. Kısa konsolların uygulanan yüke paralel olacak şekilde tek katmandan oluşan kabuk elemanlarla modellenmesi yapılmıştır. Katmandaki kabuk model betonarme kısa konsol numunesinin geometrik özellikleri esas alınarak tüm kabuk bölgeleri için yatayda ve düşeyde sonlu elemanlara bölünmüştür.
2. modellenen kısa konsollarda donatı alanı ve akma dayanımı, betonun basınç ve çekme dayanımı, (a/d) oranı değerleri deney formatında verilenlerin birebir aynısıdır.
3. Modellemede oluşturulan katmanlar, donatının olması halinde donatılı beton katmanı, sadece betonun olduğu bölgelerde ise 49onatışız beton katmanı olarak tanımlanmıştır. Taşıyıcı ana donatının konumu (a/d) oranına göre her numunede farklılık göstermektedir. Donatılı beton katmanında donatının kalınlığı ise donatı alanının, sonlu eleman yüksekliğine bölünmesiyle elde edilen değerdir.
4. Donatısız beton katmanında, beton malzemesi membran ve plak olmak üzere iki tip katman oluşturulmuştur. Membran tipindeki katman sadece oluşacak eksenel gerilmeleri, plak tipindeki katman ise oluşacak eğilme momentlerini taşıması amacıyla tanımlanmıştır. Donatılı beton katmanında ise 49onatışız beton katmanlarına ilave olarak eksenel gerilmeleri üzerine alması için donatı membran katman olarak tanımlanmıştır.
5. Gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin bulunduğu entegrasyon nokta sayıları, membran tipinden oluşan beton katmanında 3, plak tipinden oluşan beton

katmanında 5, membran tipinden oluşan donatı katmanından ise 1 olacak şekilde model kurulmuştur.

6. Donatının elasto-plastik davranış sergilediği kabulü yapılmıştır.
7. Kısa konsol numunelerine, konsolun üst orta noktasından tekil yükleme yapılarak deplasman kontrolleri doğrusal olmayan analizlerle yapılmıştır.

4.3. Sonlu Elemanlar Boyutunun Davranışa Etkisi

Sonlu elemanlar yönteminde ağı oluşturan eleman sayısı ve eleman boyutunun sonucun doruluğunu etkilediği bilinmektedir. Bu sebeple betonarme kısa konsollarda sonlu elemanlar boyutunun kesme kapasitesine etkisinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Veritabanından seçilen iki kısa konsol numunesi için farklı mesh boyutu tanımlanmıştır. SAP2000 yapısal analiz programında C24 ve C26 numunelerinin sonlu elemanlar modelinde mesh boyutları değişken olarak incelenmiştir. Yapılan analitik çalışmada mesh boyutları 5, 10, 15, 25 ve 30 mm olarak dikkate alınmıştır. Seçilen bu mesh boyutlarına göre ayrı ayrı analizler tekrarlanmış, elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde mesh boyutları arttıkça kısa konsolun taşıma kapasitesi artmaktadır. V_{deney}'de elde edilmiş konsol dayanımına göre sonlu elemanlar mesh boyutlandırmasında en uygun mesh boyutu C24 ve C26 numunelerinde 10 mm olarak bulunmuş fakat analiz süresinin uzaması verimliliği düşüreceğinden mesh boyutu 15 mm alınarak analizler yapılmıştır.

Tablo 4.3. Mesh boyutunun kısa konsol kesme kapasitesine etkisi

Numune Adı	Mesh Boyutu (mm)	V_{deney} (KN)	V_{FEM} (KN)	V_{deney}/V_{FEM}
C24	5	144,8	89	1,63
	10		129	1,12
	15		197	0,74
	25		309	0,47
	30		351	0,41
C26	5	90,0	73	1,34
	10		75	1,31
	15		104	0,94
	25		159	0,62
	30		209	0,47

5. ANALİZ SONUÇLARI VE DENEYSEL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmanın bu bölümünde daha önce detayları çıkarılan denklemlerden bazıları uygulanarak veri tabanındaki kısa konsolların kesme kapasitesi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen kesme kuvveti değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak tasarım yöntemlerinin doğruluğu değerlendirilmiştir. Veri tabanı oluşturulurken kısa konsolların tasarımı için gerekli geometrik özellikleri ile malzeme (beton ve çelik) özellikleri Tablo 4.1'de detaylatı ile gösterilmektedir.

Her bir kısa konsol numunesinin, TS 500 ve ACI-318 tasarım hesap yönetmelikleri tasarım kriterleri, çubuk analojisi yöntemi, Campione ve diğ. (2007) tarafından geliştirilen analitik yöntem ve Fattuhi (1994) tarafından önerilen yönteme göre maksimum kesme kapasitesi belirlenmiştir.

Bu bölümde analitik yöntemlere göre belirlenen kesme kapasitesi deneysel sonuçlar ile grafiksel olarak karşılaştırılacaktır. Karşılaştırılmalar beton basınç dayanımı, lif oranı, (a/d) oranı açısından değerlendirilecektir Sonuçlar Tablo A.1'de sunulmaktadır. Analitik olarak belirlenen kesme dayanımlarının deneysel kesme dayanımına oranı kıyaslanırken, ortalama, standart sapma ve mutlak toplam hata gibi istatistiksel parametreler kullanılmıştır. Uygulanan tüm analitik yöntemler Bölüm 2 ve 4'de açıklanmıştır. Grafiklerdeki veriler tablo A2 - A-16'da gösterilmektedir.

5.1. Beton Basınç Dayanımının Etkisi

TS 500 tasarım yönetmeliğine göre betonun basınç dayanımı 50 MPa'dan düşükse normal dayanımlı beton, 50 MPa'dan büyükse yüksek dayanımlı beton olarak sınıflandırılmaktadır. Veritabanındaki numuneler otuz adet normal dayanımlı beton ve yirmi üç adet yüksek dayanımlı kısa konsollar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Sonuçlar Tablo A2 ve A3'de yer almaktadır.

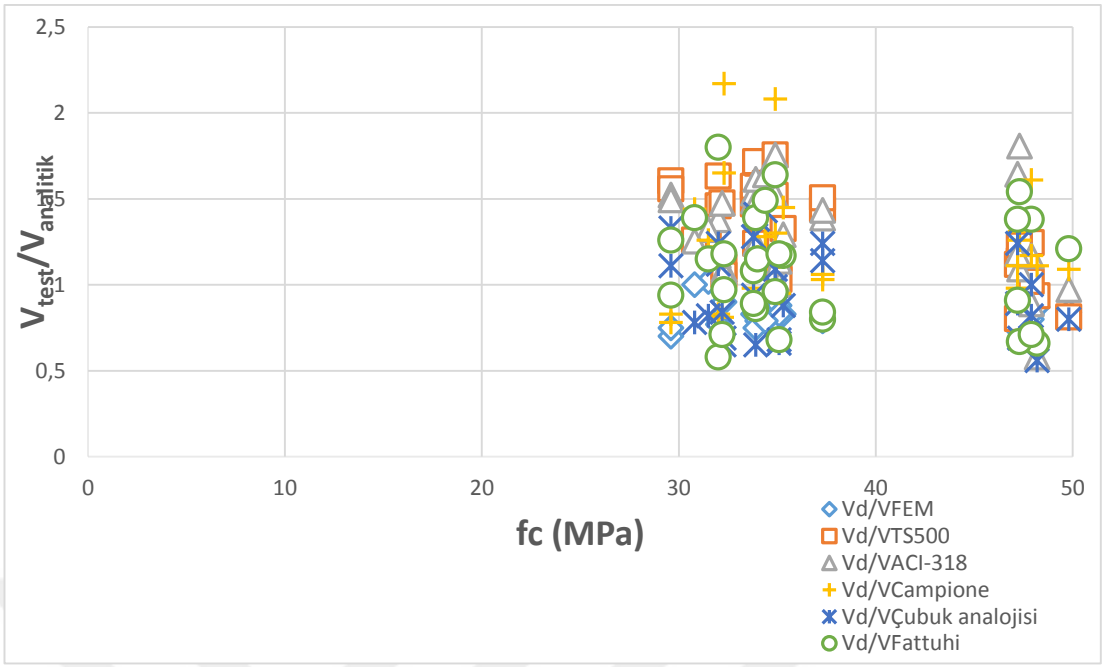
Normal dayanım sınıfına göre kıyaslama yapıldığında FEM'de 30-35 MPa basınç dayanımına sahip numuneler için tutarlı sonuçlar verirken, ACI ve TS500 tasarım yönetmeliklerinde 32-48 MPa bandında tutarlı sonuçlar vermektedir. Campione 33-50 MPa basınç dayanımına sahip numuneler için tutarlı sonuç vermektedir. Çubuk analojisi ve Fattuhi yöntemlerinde ise 29-48 MPa beton basınç değerlerine sahip kısa konsol numuneleri arasında tutarlı sonuç vermektedir.

Yüksek dayanım sınıfına göre kıyaslama yapıldığında, FEM'de 62-85 MPa beton basınç dayanımına sahip numuneler için tutarlı sonuçlar verirken, TS500 Tasarım Yönetmeliğinde 50-96 MPa arasındaki numuneler için, ACI Tasarım Yönetmeliğinde 50-83 MPa arasındaki numuneler için, Campione Hesap Modelinde 51-56 MPa arasındaki numuneler için, Çubuk Analojisi Yönteminde 50-107 MPa arasındaki numuneler için Fattuhi Hesap Modelinde 56-83 MPa arasındaki numuneler için tutarlı sonuç vermektedir.

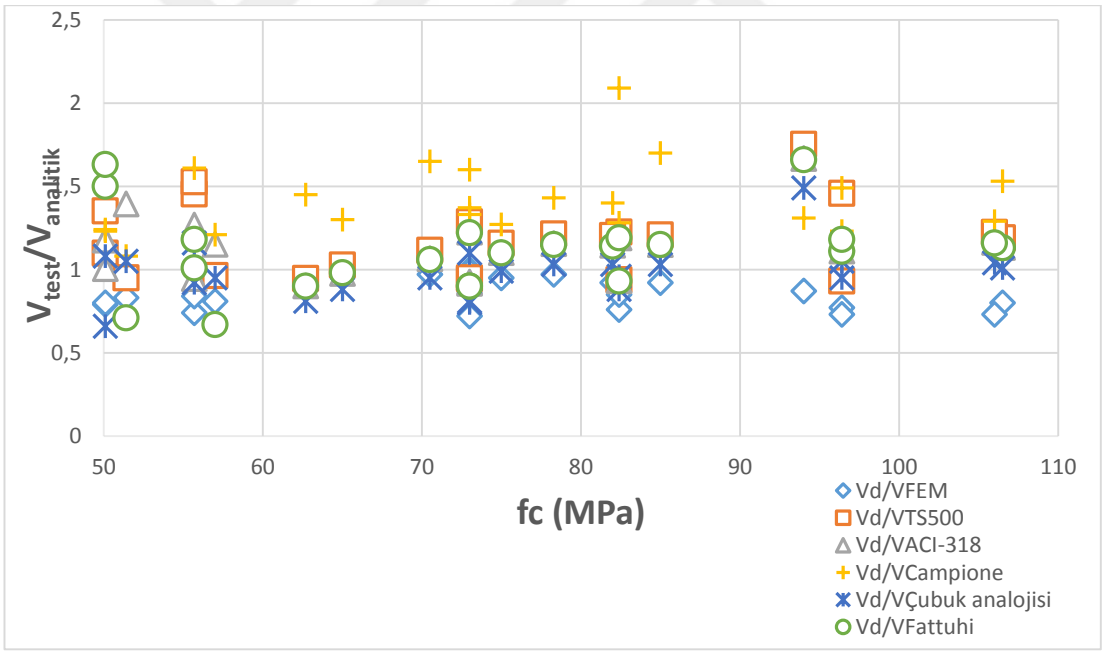
Betonarme kısa konsollar için beton basınç dayanım sınıflarına göre kıyaslama yapıldığında normal dayanımlı betonarme kısa konsol numuneleri için en uyumlu sonuç çubuk analojisi yöntemi ile elde edilirken yüksek dayanımlı kısa konsollarda en uyumlu sonuç Fattuhi yönteminde elde edilmiştir. Her iki durumda da sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan göçme yükü deneysel sonuçları sağlamış, güvenli tarafta kalmıştır. Ayrıca kısa konsolların davranışına beton basınç dayanımıyla birlikte (a/d) oranının etkisi incelenmiştir. (a/d) oranı, 0-0,5 arası, 0,5-0,75 arası ve 0,75-1 arasında olan numunelerin kapasitesinin hangi hesap yöntemiyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Normal dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0-0,5 arasındaki numunelerde TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,39 olan numuneler için, ACI Tasarım Yönetmeliği ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,48 olan numuneler için tutarlı elde edilmiştir.

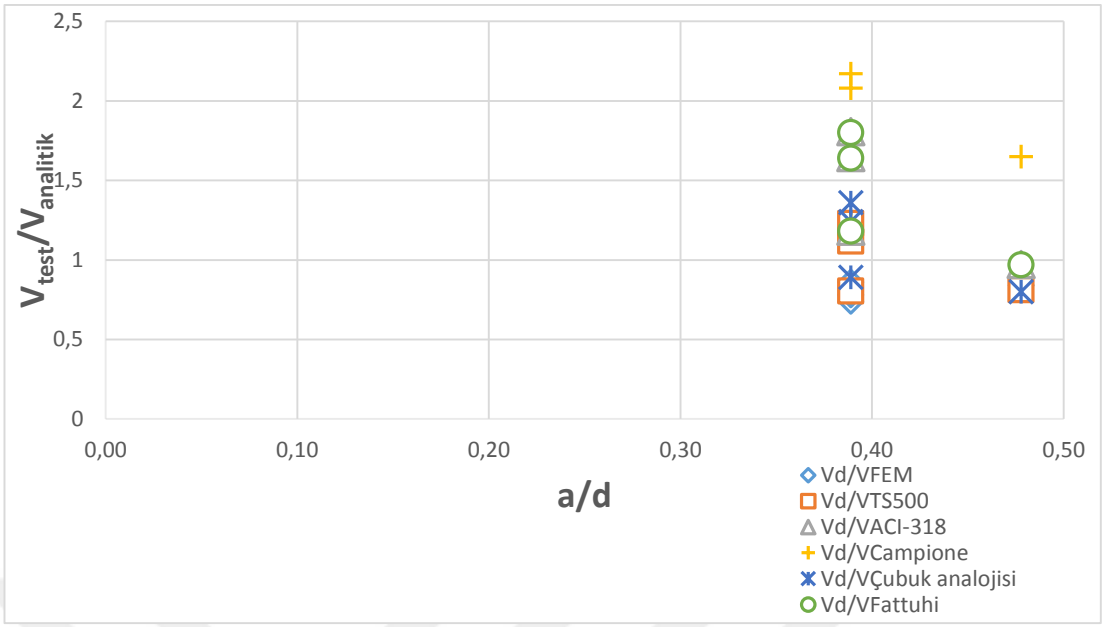
Normal dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,5-0,75 arasındaki numunelerde FEM'e ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre tutarlı sonuç vermektedir.



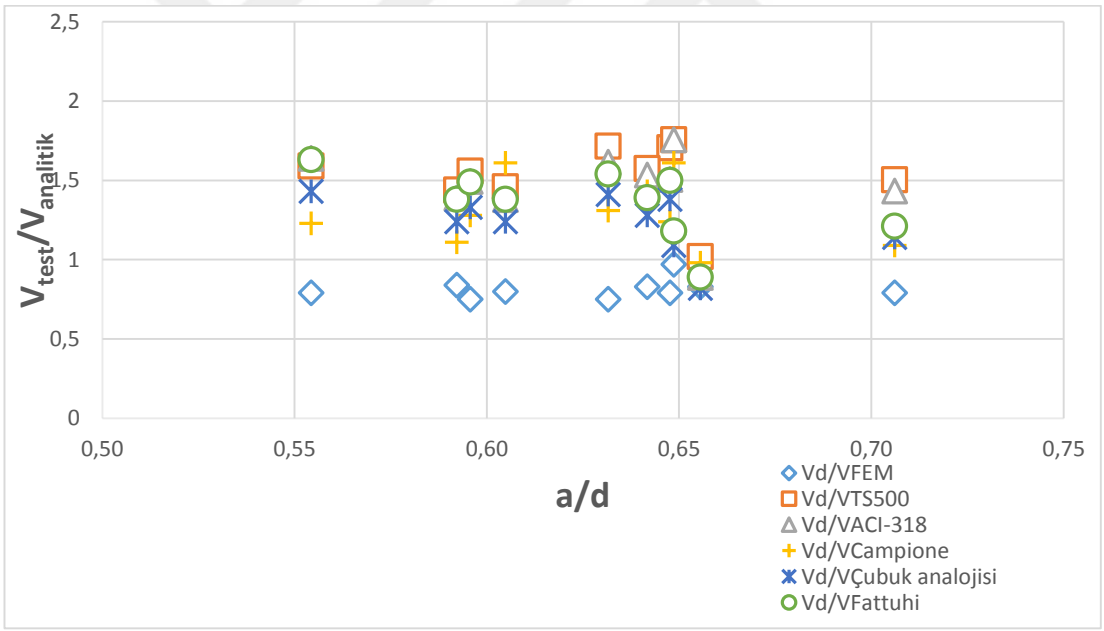
Şekil 5.1. Normal dayanımlı betonarme kısa konsolların kesme kapasitesi



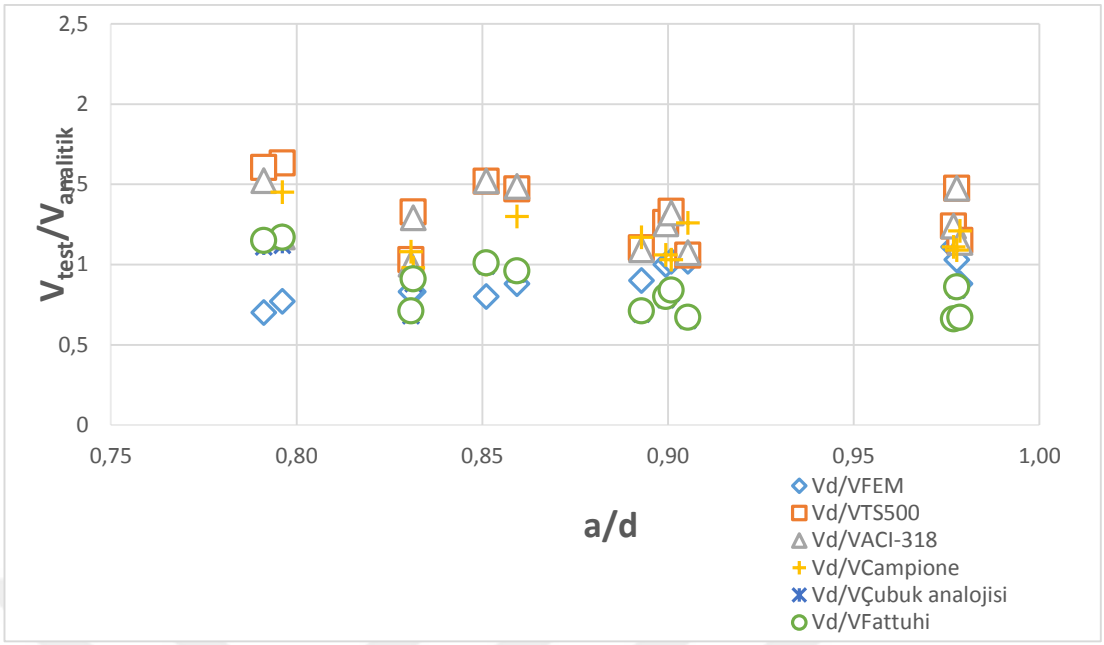
Şekil 5.2. Yüksek dayanımlı betonarme kısa konsolların kesme kapasitesi



Şekil 5.3. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 arası olan kısa konsollar



Şekil 5.4. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 arasında olan kısa konsollar



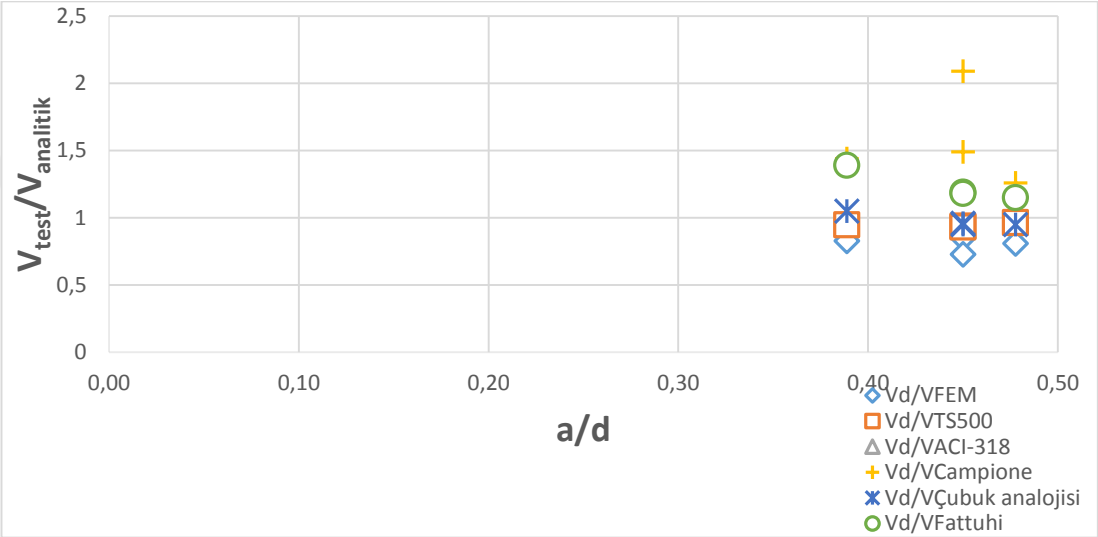
Şekil 5.5. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1,0 arasında olan kısa konsollar

Normal dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0-0,5 arasındaki numunelerde TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,39 olan numuneler için, ACI Tasarım Yönetmeliği ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,48 olan numuneler için tutarlı sonuç vermektedir.

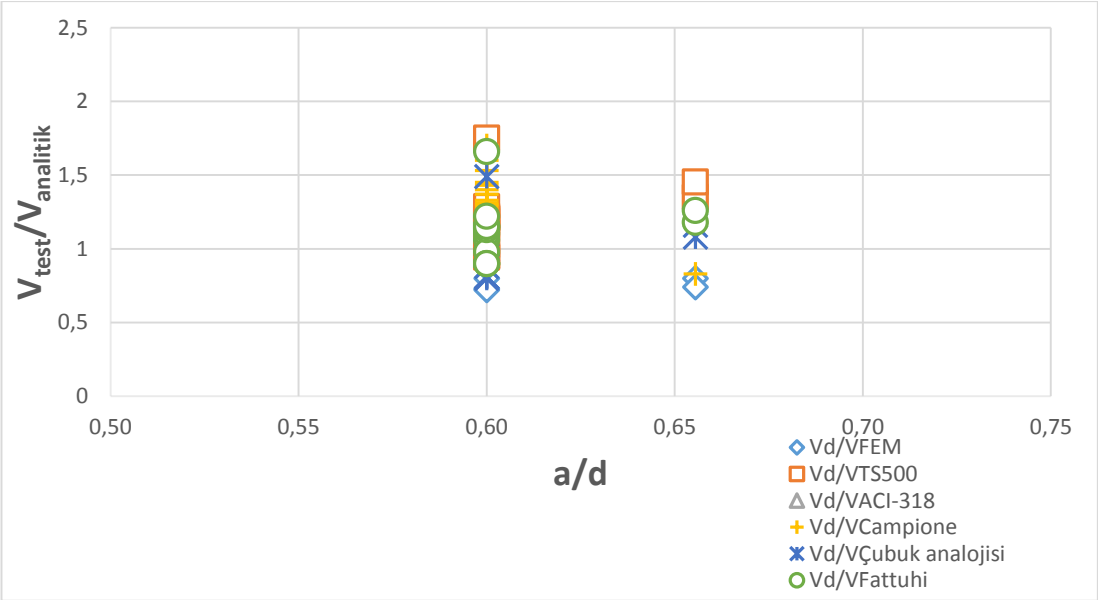
Normal dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,5-0,75 arasındaki numunelerde FEM'e ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,65 olan numune,TS500 ve ACI Tasarım Yönetmeliğine, Campione ve Fattuhi Hesap Modellerine göre a/d oranı 0,66 olan numuneler için tutarlı sonuç vermektedir.

Normal dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,75-1 arasındaki numunelerde FEM'e göre a/d oranı 0,89-0,98 arasındaki numuneler, TS500 Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,89-0,92 arasındaki numuneler, ACI Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,83-0,92 arasındaki numuneler, Campione Hesap Modeline göre a/d oranı 0,83-0,98 arasındaki numuneler, Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,85-0,86 arasındaki numuneler, Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,83-0,86 arasındaki numuneler için tutarlı sonuç vermektedir.

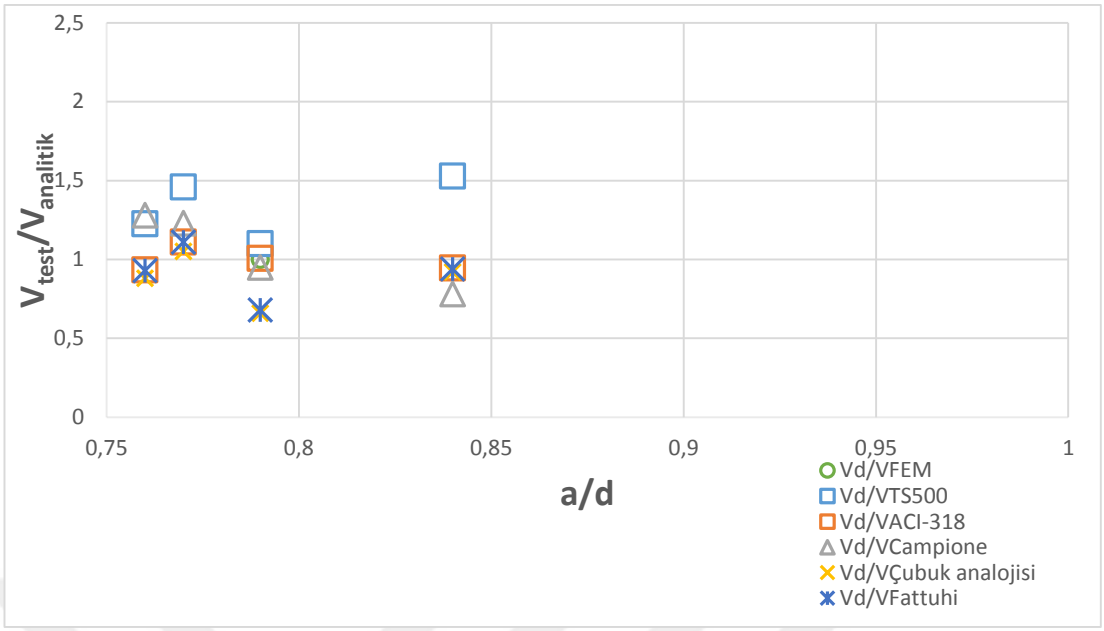
Normal dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında en uyumlu sonuçlar; a/d oranı 0-0,5 arasında olan numuneler için TS 500 Tasarım Yönetmeliği olmaktadır. a/d oranı 0,5'ten küçük olan kısa konsollar düşey yük etkisinde beton basınç çubuğunun ezilmesi ile göçme göstermektedir. a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numuneler için Çubuk Analojisi Yöntemi en uyumlu sonuçları verirken, a/d oranı 0,75-1 arasında olan kısa konsollarda ise Campione Hesap Modeli ile en uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 arasında olan kısa konsollar



Şekil 5.7. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 arasında olan kısa konsollar



Şekil 5.8. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1,0 arasında olan kısa konsollar

Yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0-0,5 arasındaki numunelerde TS500 Tasarım Yönetmeliğine ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,39-0,48 arasında olan numuneler için tutarlı sonuç vermektedir.

Yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,5-0,75 arasındaki numunelerde FEM'e, Çubuk Analojisi Yöntemine, TS500 ve ACI Tasarım Yönetmeliğine ve Fattuhi Hesap Modellerine göre a/d oran 0,60 olan numuneler için tutarlı sonuç vermektedir.

Yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,75-1 arasındaki numunelerde, TS500 Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,92 olan numune, ACI Tasarım Yönetmeliğine ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oran 0,75 ve 0,92 olan numuneler, Campione Hesap Modeline göre a/d oranı 0,92 olan numunelerde, Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,92 olan numune için tutarlı sonuç vermektedir.

Yüksek dayanımlı betonarme kısa konsollarda a/d oranına göre kıyaslama yapıldığında en uyumlu sonuçlar; a/d oranı 0-0,5 arasında olan numuneler için yine TS500 tasarım kriteri ve çubuk analojisi yöntemi olmuştur. a/d oranı 0,5-0,75

arasında olan numuneler için çubuk analojisi yöntemi, a/d oranı 0,75-1 arasında olan numuneler içinse ACI-318 tasarım kriterleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak çubuk analojisi yöntemine göre konsol kapasitesinin hesabında a/d oranının çok az etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

5.2. Lif Oranının Etkisi

Deneyleri yapılan betonarme kısa konsolların bir kısmı lif katkılı, bir kısmı ise lif katkısız olarak üretilmiştir. Toplamda otuz üç betonarme kısa konsol lif katkılı, geriye kalan yirmi konsol numunesi ise lif katkısızdır. Lifli betonarme kısa konsol numunelerinde lif katkı oranları %0,7 ile %2,5 değerleri arasında değişmektedir. Ayrıca kısa konsolların kapasitesine a/d oranının etkisi incelenmiştir.

Betonarme kısa konsollar için betonun lif katkılı veya lif katkısız üretilmesine göre kıyaslama yapıldığında lifli betondan üretilen kısa konsollarda FEM'e göre beton basınç dayanımı 30-82 MPa arasındaki numuneler, TS500 Tasarım Yönetmeliğine göre 47-97 MPa arasındaki numuneler için, ACI Tasarım Yönetmeliğine göre 47-73 MPa arasındaki numuneler için, Campione Hesap Modeline göre 32-48 MPa arasındaki numuneler için, Çubuk Analojisi Yöntemine göre 33-107 MPa arasındaki numuneler için, Fattuhi Hesap Modeline göre 33-75 MPa arasındaki numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Betonarme kısa konsollar için betonun lif katkılı veya lif katkısız üretilmesine göre kıyaslama yapıldığında lif katkısız betondan üretilen kısa konsollarda FEM'e göre beton basınç dayanımı 32-73 MPa arasındaki numuneler, TS500 ve ACI Tasarım Yönetmeliğine göre 32-83 MPa arasındaki numuneler için, Campione Hesap Modeline göre 35-51 MPa arasındaki numuneler için, Çubuk Analojisi Yöntemine göre 50-107 MPa arasındaki numuneler için, Fattuhi Hesap Modeline göre 49-83 MPa arasındaki numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Betonarme kısa konsollar için betonun lif katkılı veya lif katkısız üretilmesine göre kıyaslama yapıldığında lifli betondan üretilen kısa konsollarda en uyumlu sonuç Campione yöntemi ile elde edilirken lif katkısız betondan üretilen kısa konsol numuneleri için ACI Tasarım Yönetmeliği ile elde edilmiştir.

Lifli betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında a/d oranı 0-0,5 arasında olan numunelerde TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oran 0,39-0,48 arasında olan numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Lifli betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numunelerde FEM'e göre a/d oranı 0,6-0,65 arasındaki numuneler için, TS500 Tasarım Yönetmeliği, Çubuk Analojisi Yöntemi ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,6-0,66 arasındaki numuneler için, ACI Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,6 olan numuneler için, Campione Hesap Modeline göre a/d oranı 0,66-0,71 arasındaki numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Lifli betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında a/d oranı 0,75-1 arasında olan numunelerde FEM'e göre a/d oranı 0,90-0,98 arasındaki numuneler için, AC Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,92 olan numuneler için, Campione Hesap Modeline göre 0,83-0,98 arasındaki numuneler için, Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,75-0,92 arasındaki numuneler için, Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,83-0,92 arasındaki numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Lifli betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında en uyumlu sonuçlar; a/d oranı 0-0,5 arasında olan numuneler için TS500 Tasarım Yönetmeliği, a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numuneler için Çubuk Analojisi Yöntemi, a/d oranı 0,75-1 arasında olan numuneler içinse Campione Hesap Modeli olmuştur.

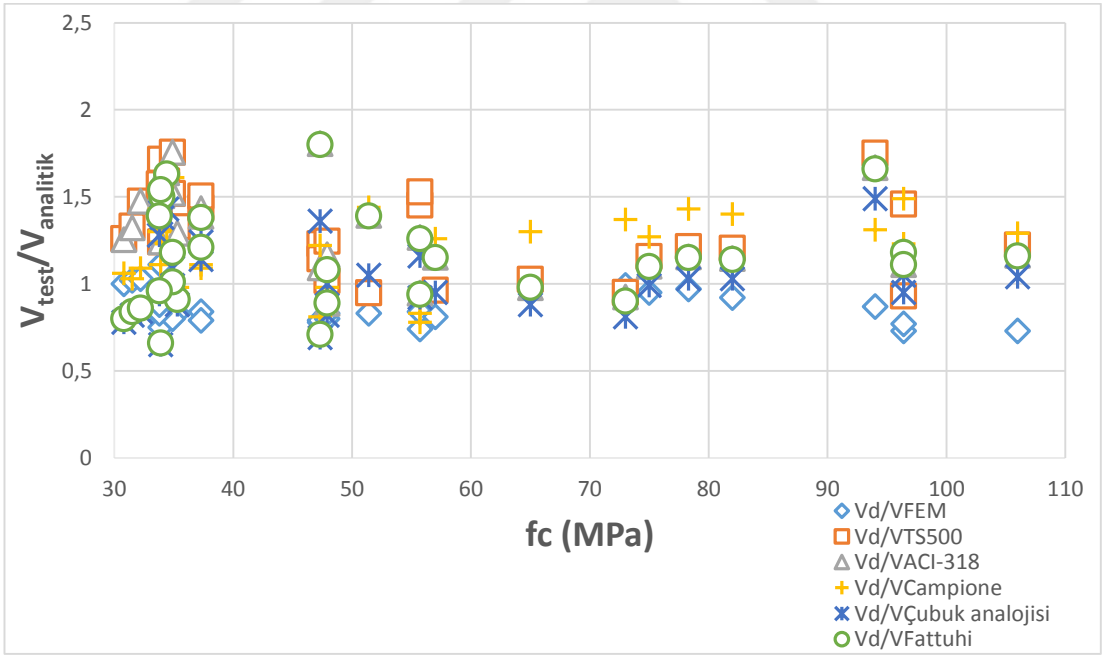
Lif katkısız betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında a/d oranı 0-0,5 arasında olan numunelerde TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,45 olan numunede, ACI Tasarım Yönetmeliği ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,48 olan numunede tutarlı sonuçlar vermektedir.

Lif katkısız betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numunelerde FEM'e,TS500 ve ACI

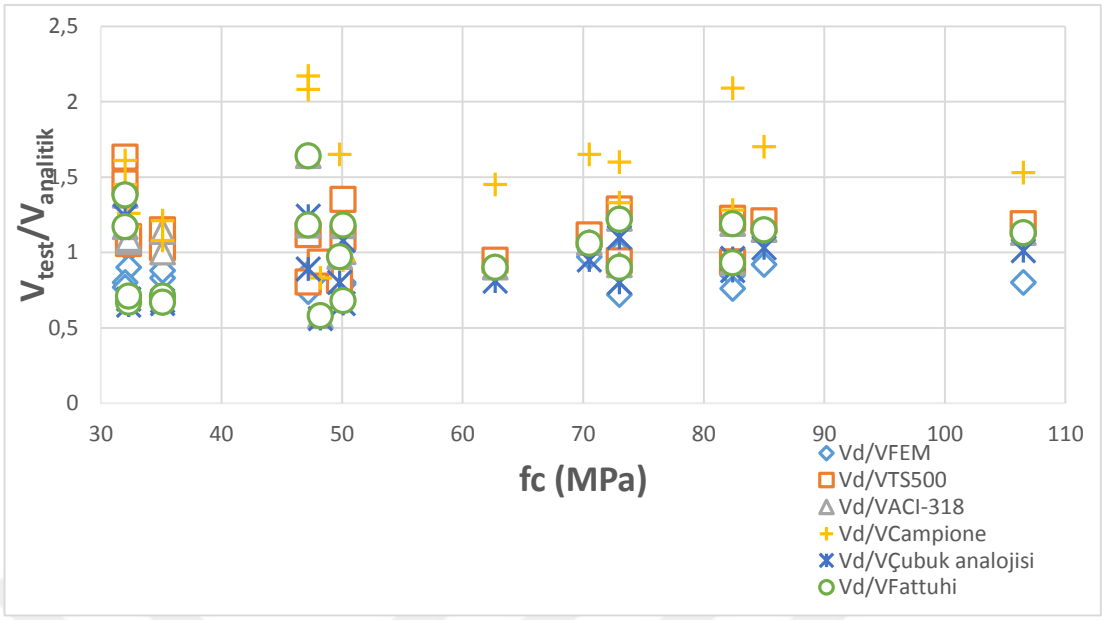
Tasarım Yönetmeliği ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,6 olan numunelerde, Çubuk Analojisi Yöntemine göre ise 0,6-0,66 arasındaki numunelerde tutarlı sonuçlar vermektedir.

Lif katkısız betonarme kısa konsollar a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslandığında a/d oranı 0,75-1 arasında olan numunelerde FEM'e göre a/d oranı 0,89-0,91 arasındaki numunelerde,TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Campione Hesap Modeline göre a/d oranı 0,83-0,92 arasındaki numunelerde, ACI Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,75-0,92 arasındaki numunelerde, Fattuhi Hesap Modeline göre ise a/d oranı 0,75 olan numune için tutarlı sonuçlar vermektedir.

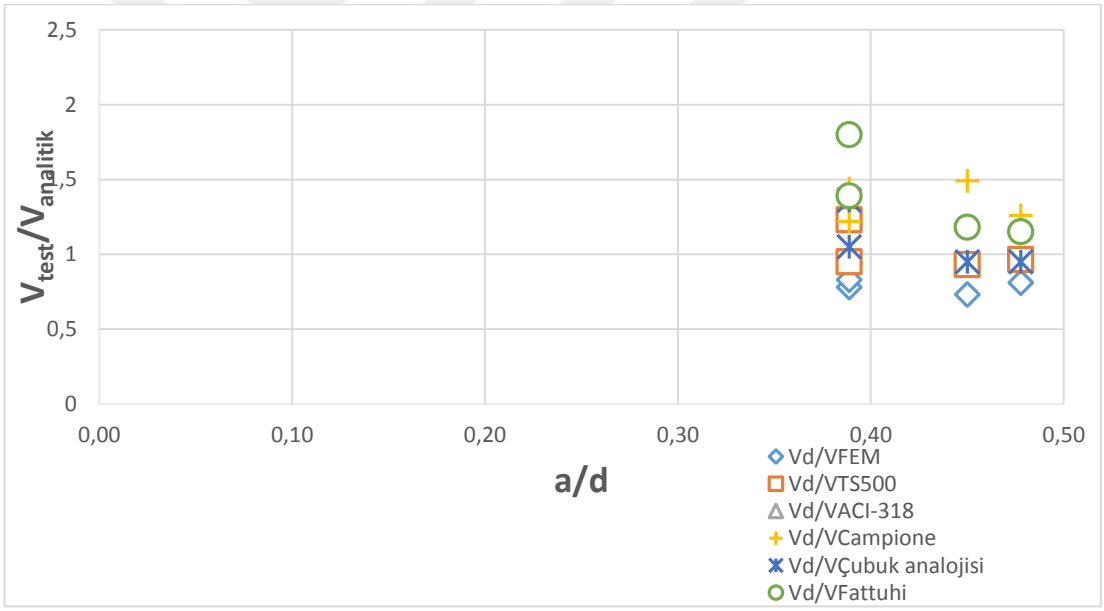
Lif katkısız betondan üretilmiş betonarme kısa konsol numunelerinin a/d oranı 0-0,5 arasında olan numuneler için TS500 Tasarım Yönetmeliği, a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numuneler için çubuk analojisi yöntemi, a/d oranı 0,75-1 arasında olan numuneler içinse ACI Tasarım Yönetmeliği olmuştur.



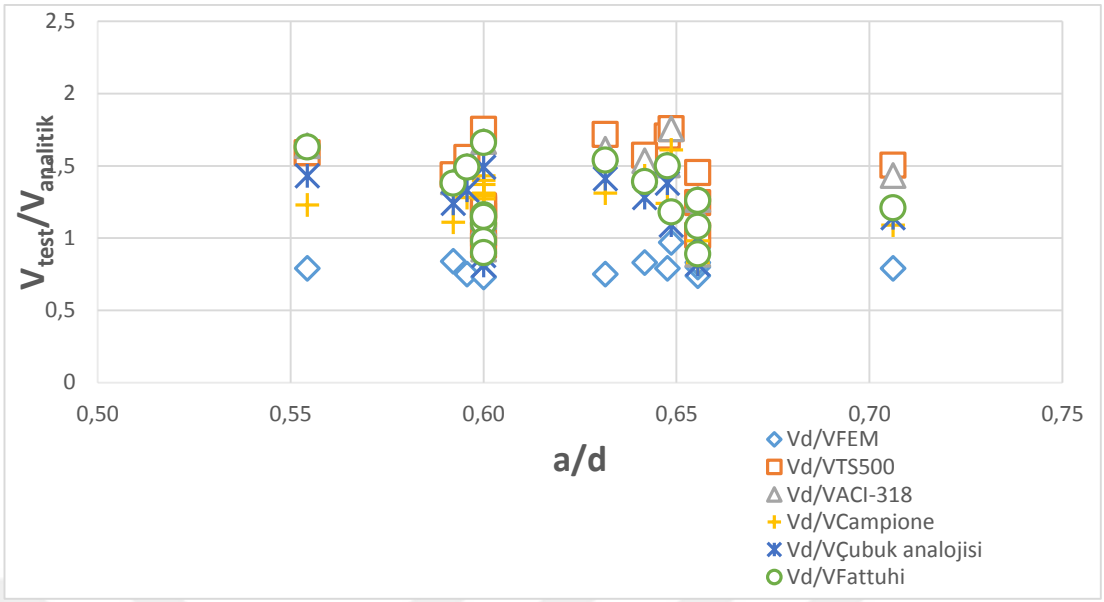
Şekil 5.9. Lifli beton kısa konsollar



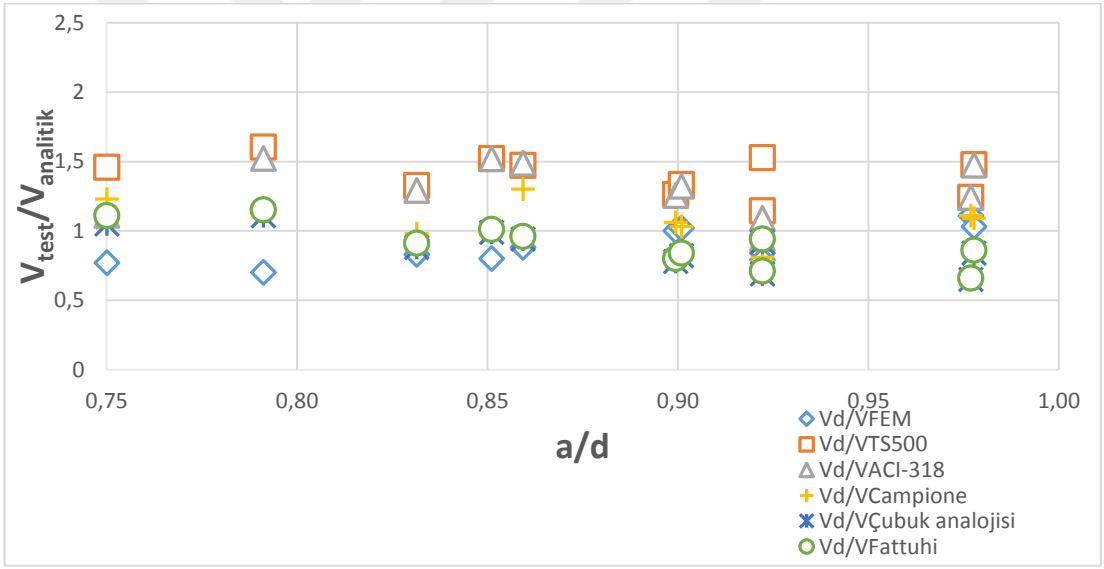
Şekil 5.10. Lif oranı %0 olan betonarme kısa konsollar



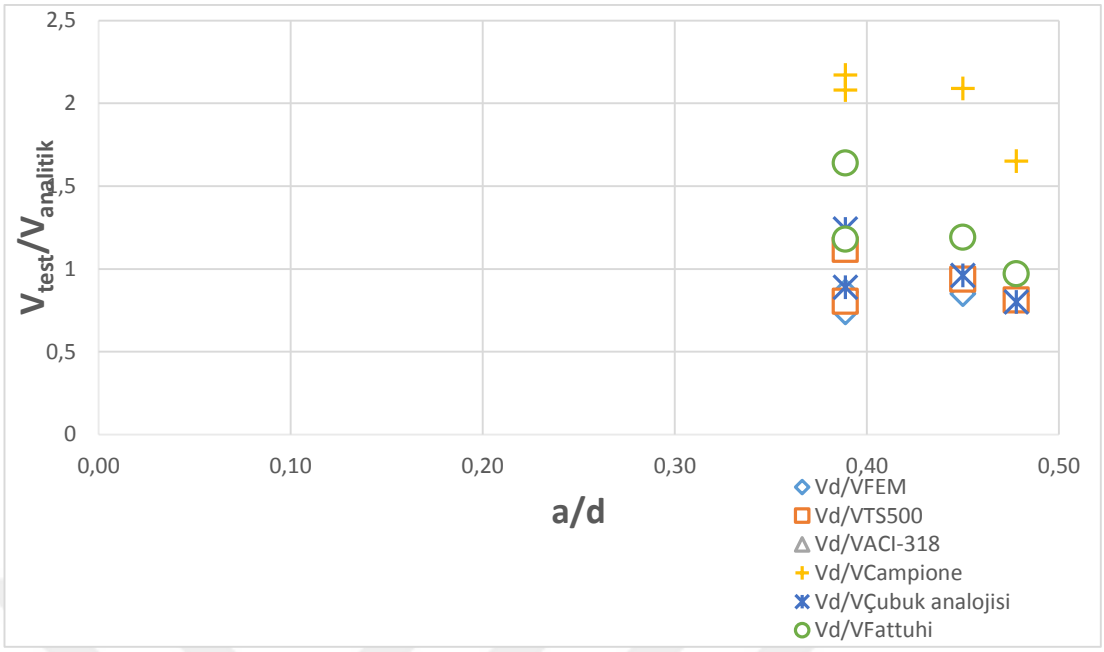
Şekil 5.11. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 olan kısa konsollar



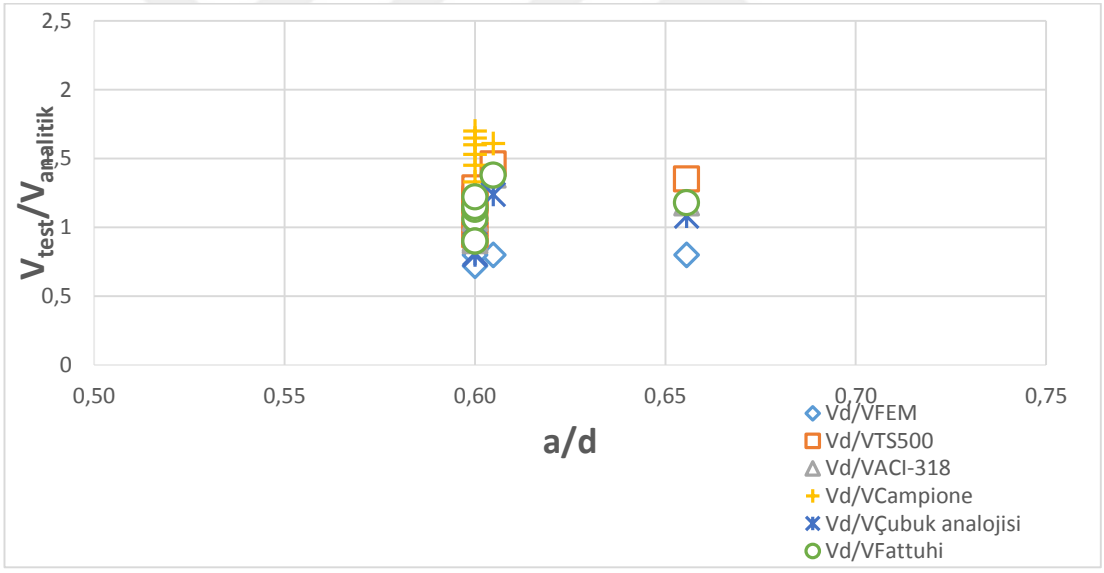
Şekil 5.12. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 olan kısa konsollar



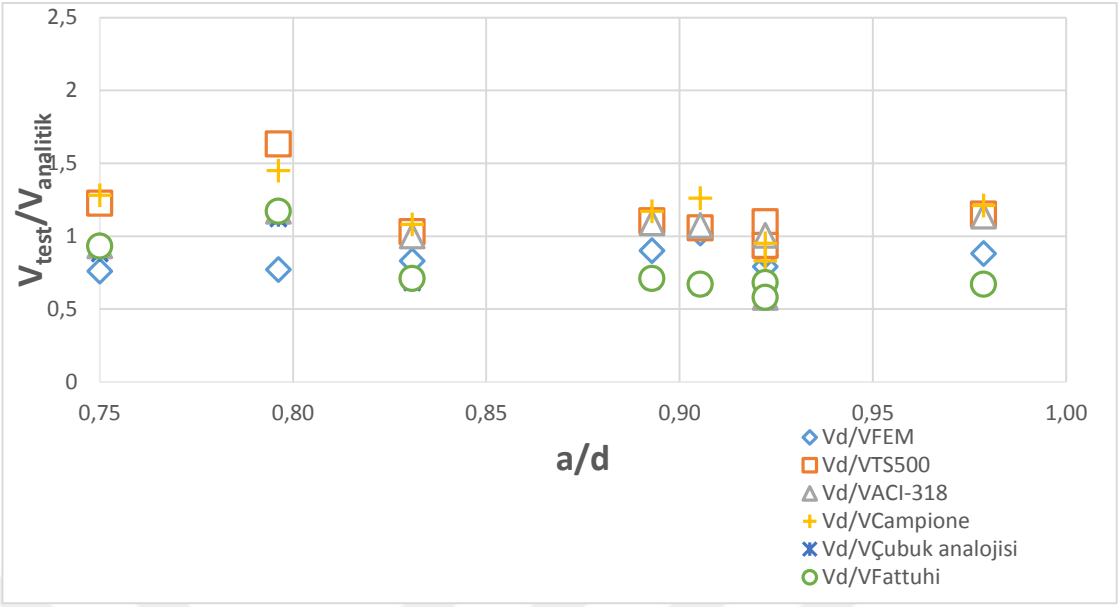
Şekil 5.13. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1 olan kısa konsollar



Şekil 5.14. Lif katkısız betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,5 olan kısa konsollar



Şekil 5.15. Lif katkısız betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,5-0,75 olan kısa konsollar



Şekil 5.16. Lif katkısız betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1,0 olan kısa konsollar

5.3. (a/d) Oranının Etkisi

Veritabanını oluşturan test edilmiş betonarme kısa konsolların sekizinde a/d oranı 0-0,5 değerleri arasında, yirmi altısında a/d oranı 0,5-0,75 arasında ve geriye kalan on dokuz numune ise a/d oranı 0,75-1,0 değerleri arasındadır.

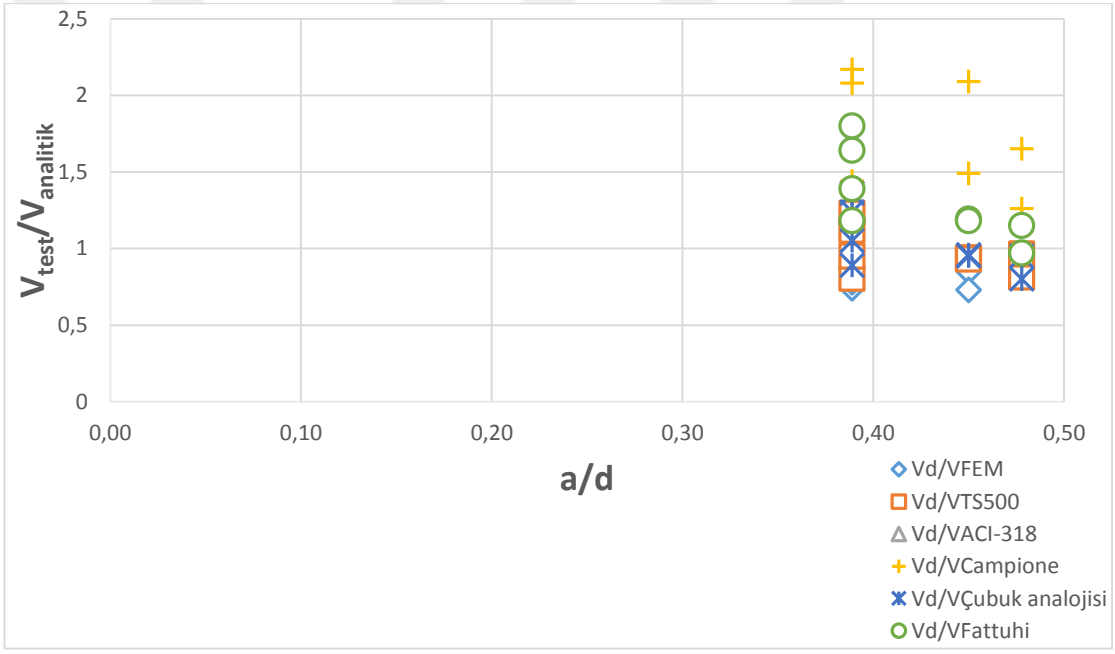
Kısa konsol numunelerinin diğer parametreler göz ardı edilerek sadece a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0-0,5 arasında olan numunelerde, TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Çubuk Analojisi Yöntemine göre a/d oranı 0,39-0,48 arasında olan numuneler, ACI Tasarım Yönetmeliği ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,48 olan numune için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Kısa konsol numunelerinin diğer parametreler göz ardı edilerek sadece a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numunelerde FEM'e göre a/d oranı 0,6-0,65 arasındaki numuneler,TS500 Tasarım Yönetmeliği, Çubuk Analojisi Yöntemi ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,6-0,66 arasındaki numuneler, ACI Tasarım Yönetmeliğine göre a/d oranı 0,6 olan numuneler, Campione Hesap Modeli için a/d oranı 0,66-0,71 arasında olan numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

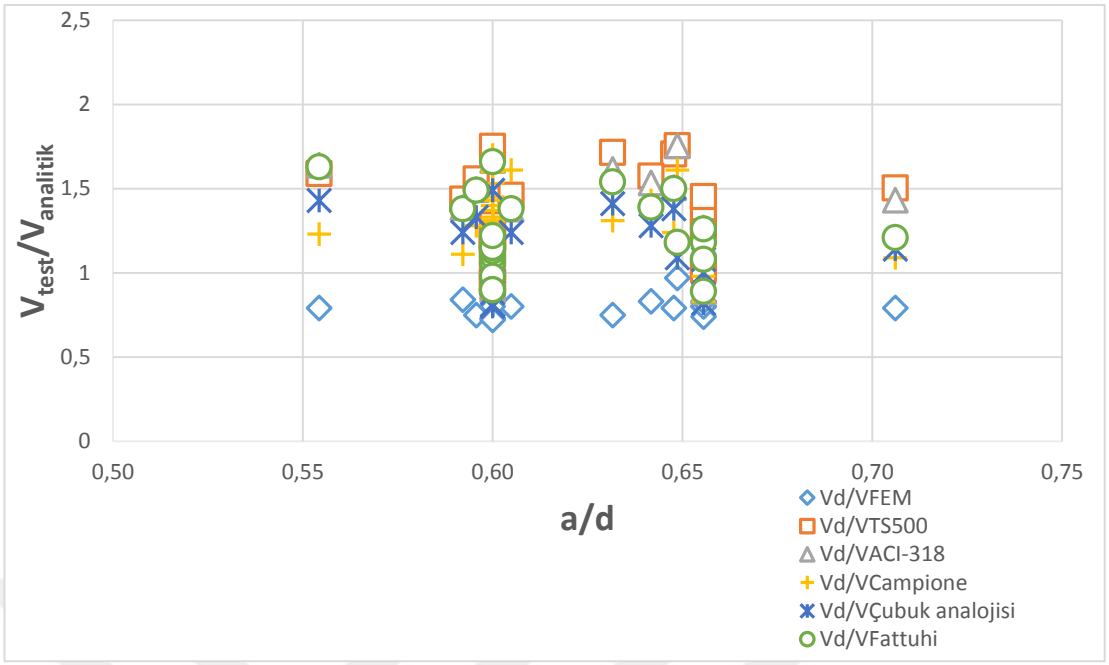
Kısa konsol numunelerinin diğer parametreler göz ardı edilerek sadece a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslama yapıldığında a/d oranı 0,75-1 arasında olan

numunelerde FEM'e göre a/d oranı 0,89-0,98 arasında olan numuneler,TS500 Tasarım Yönetmeliği ve Campione Hesap Modeline göre a/d oranı 0,83-0,92 arasında olan numuneler, ACI Tasarım Yönetmeliği, Çubuk Analojisi Yöntemi ve Fattuhi Hesap Modeline göre a/d oranı 0,75-0,92 arasındaki numuneler için tutarlı sonuçlar vermektedir.

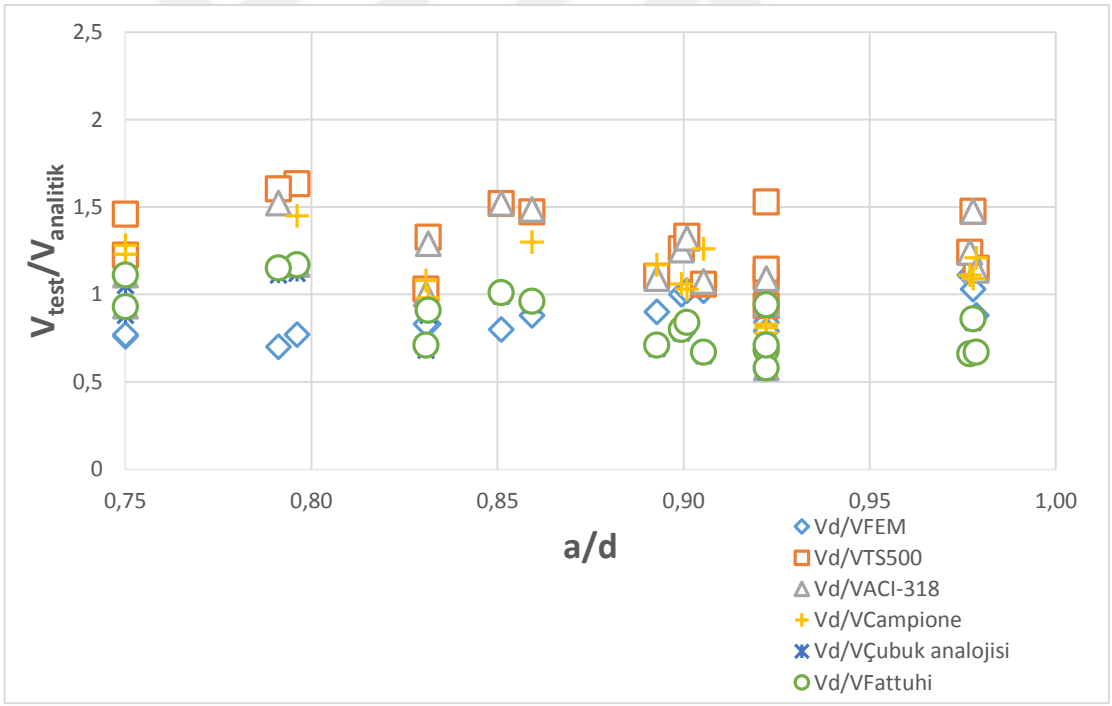
Kısa konsol numunelerinin diğer parametreler göz ardı edilerek sadece a/d oranlarına göre sınıflandırılarak kıyaslama yapıldığında en uyumlu bulunan sonuçlar; a/d oranı 0-0,5 arasında olan numuneler için TS500 tasarım kriter yöntemi, a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numuneler için Çubuk Analojisi Yöntemi, a/d oranı 0,75-1 arasında olan numuneler içinse Campione Hesap Modeli olmuştur.



Şekil 5.17. (a/d) oranı 0-0,5 olan kısa konsollar



Şekil 5.18. (a/d) oranı 0,5-0,75 olan kısa konsollar



Şekil 5.19. (a/d) oranı 0,75-1,0 olan kısa konsollar

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme kısa konsolların davranışının belirlenmesi ve kapasitesinin geliştirilmesi amacıyla deneysel ve analitik çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çalışmada kapsamında literatürden seçilen kısa konsollar ile bir veri tabanı oluşturulmuştur. Veri tabanındaki numunelerin sonlu elemanlar yöntemiyle SAP2000 yapısal analiz programı kullanılarak doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir. İtme analizi yapılan konsolların maksimum göçme yükü deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Ayrıca aynı kısa konsollar kesme kapasitesi TS 500 ve ACI-318 tasarım yönetmeliği kriterleri ile çubuk analojisi yöntemi, Campione ve diğ. tarafından önerilen yöntem ve Fattuhi tarafından önerilen yönteme göre hesaplanmıştır.

Deneysel kesme kapasitesi analitik kesme kapasitesine oranlanarak elde edilen sonuçlar tablo üzerinde gösterilerek kıyaslanmıştır. Deneysel sonuç tasarım modellerinden elde edilen sonuçların oranı 1 değerinin etrafında toplandığı hesap modelinin uygun olduğu kabulü yapılmıştır. Ayrıca Campione ve diğ. tarafından önerilen hesap modeli için beton basınç dayanımının $10 < f_c' < 105$ MPa arasında olması gerektiği belirtilmiş fakat B11 ve B12 numaralı konsolların beton basınç dayanımı 105 MPa'dan büyük olduğu için bu kriter iki numune için esnetilmiştir.

Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucunda betonarme kısa konsolların kesme kapasitesini bazı yapısal parametrelerin doğrudan etkilediği gözlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Betonarme kısa konsolların kesme kapasitesini (a/d) oranı doğrudan etkilemektedir. (a/d) oranı konsolun göçme tipini belirlemektedir. (a/d) oranı 0,5 den küçük olan numunelerde kesme göçmesi etkinken oran 1'e yaklaştıkça göçme modunda eğilme etkin olmaktadır. Ayrıca (a/d) oranı azaldığında kısa konsolların kesme kapasitesi artmaktadır.

- Betonarme kısa konsollar için beton basınç dayanımının artması doğrudan kesme kapasitesini artırmaktadır. Betonda lif oranının artması ile kesme kapasitesinin arttığı, lif etkisi ile enerji tüketme kapasitesi geliştiğinden kısa konsolun gevrek kırılmasını engellediği değerlendirilmiştir.
- Betonarme kısa konsollar için donatı alanının ve donatı çeliğinin çekme dayanım sınıfının artması taşıma kapasitesini arttırmaktadır.
- Kısa konsolların sonlu elemanlar analizinde elde edilen sonuçların deneysel kesme kapasitesi ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu oran (a/d) oranı arttıkça artmaktadır.
- Betonarme kısa konsolların kesme kapasitesi beton basınç dayanımına göre kıyaslandığında normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kısa konsol numuneleri için genel olarak en uyumlu sonuç çubuk analojisi yöntemi ile elde edilmiştir.
- Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı kısa konsollarda a/d oranı 0-0,5 arasında olan numunelerde TS 500 tasarım kriterleri ile tespit edilen kesme kapasitesinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu, a/d oranı 0,75-1 arasında konsolların kesme kapasitesinin Campione ve diğ. tarafından önerilen hesap yöntemi ile uyumlu olduğu sonucu elde edilmiştir.
- Kısa konsolların kesme kapasitesine betondaki lif oranının etkisi incelendiğinde lifli betondan üretilen kısa konsolların kapasitesi Campione ve diğ. tarafından önerilen yöntem hesap yöntemi ile uyumlu sonuçlar verirken , Fattuhi yöntemi güvenli tarafta kalmaktadır.
- Deneysel olarak test edilen kısa konsolların sadece a/d oranlarına göre kıyaslandığında en uyumlu sonuçlar; a/d oranı 0-0,5 arasında olan numuneler için TS 500 tasarım kriterleri, a/d oranı 0,5-0,75 arasında olan numuneler için çubuk analojisi yöntemi, a/d oranı 0,75-1 arasında olan numuneler içinse Campione hesap yöntemi ile elde edilmiştir.
- Elde edilen sonuçlara göre kısa konsolların tasarımında a/d oranının en etkin parametre olduğu, beton basınç dayanımı ve donatı oranının artması ile konsol kesme kapasitesinin doğrudan arttığı belirlenmiştir.

- Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde elde edilen sonuçların deneysel veriler ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmış, numune sayısı artırılarak yapılacak analizlerle yöntemin doğruluğunun geliştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Kaplan S.A., *Prefabrike Yapıların Hesap Metotları*, Bilbeyki Yayınları, İstanbul, 1998.

[2] Turhan E., Düşey Düzensizliğe Sahip Betonarme Bir Konut Binasının Sismik Performansının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223205.154848.

[3] Küçük H., Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Kapsamında Türk (TS500 – TS498) ve Rus Standartlarının Karşılaştırmalı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251998.

[4] Celep Z., Kumbasar N., *Betonarme Yapılar*, Beta Dağıtım, İstanbul, 2005.

[5] TS-500-2000, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2000.

[6] Yassin L.A.Gh.,Sayhood, E.K., Hasan, Q.A.M., Reinforced Concrete Corbels – State of The Art, *Journal Of Materials and Engineering Structures,* **2**(2015) 180–205.

[7] Kriz L.B., Raths C.H., Connections in Precast Concrete Structures-Strength of Corbels, *Journal of The Prestressed Concrete Institute*, 1965, **10**(1),16-61.

[8] Mattock A.H., Design Proposals for Reinforced Concrete Corbels, *PCI Journal*, 1976, **21**(3) 18-42.

[9] Zeller W., Conclusions from Tests on Corbels, IABSE Colloquium, Structural Concrete, *International Association for Bridge and Structural Engineering*, 1991, **62**, 577-582.

[10] Russo G., Venir R., Pauletta M., Somma G., Reinforced Concrete Corbels – Shear Strength Model and Design Formula, *ACI Structural Journal*, 2006, **103**(1), 3-10.

[11] Fattuhi I. N., SFRC CorbelTests, *ACI Structural Journal*, 1987, **84**(2), 119-123.

[12] Fattuhi I.N.,Corbels With Shear Reinforcement in the Form of Stirrups or Fibres, *3rd RILEM International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, University of Sheffield, 12 June 1986.

[13] Fattuhi I.N., Hughes B. P., Reinforced Steel Fiber Concrete Corbels with Various Shear Span-to- Depth Ratios, *ACI Materials Journal*, **86**(6), 29 November.- 3 December 1989, 590-596.

[14] Fattuhi I.N., Column-Load Effect on Reinforced Concrete Corbels, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1990, **116**(1), 188-197.

[15] Fattuhi I.N., Strength of FRC Corbels in Flexure, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1994, **120**(2), 360–377.

[16] Fattuhi I.N.,Reinforced Corbels Madewith High-Strength Concrete and Various Secondary Reinforcements, *ACI Structural Journal*, 1994, **91**(4), 376-383.

[17] Hagberg T., Design of Concrete Brackets: On the Application of the Truss Analogy. *ACI Structural Journal*, 1983, **80**(1), 3-12.

[18] Foster S.J., Powell R.E., Selim H.S., Performance of High-Strength Concrete Corbels, *ACI Structural Journal*, 1996, **93**(5), 555-563.

[19] Bourget M., Delmas Y., Toutlemonde F., Experimental Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Short Corbels, *Material Structure Journal*, 2001, **34**(5), 155-162.

[20] Campione G., Mendola L., Mangiavillano M.L., Steel Fiber-Reinforced Concrete Corbels: Experimental Behavior and Shear Strength Prediction, *ACI Structural Journal*, 2007, **104**(5), 570-579.

[21] Ahmad S., Shah A., Evaluation of Shear Strength of High Strength Concrete Corbels Using Strut and Tie Model (STM), *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2009, **34**(1B), 27-35.

[22] Hafez A.M.A., Ahmed M.M., Diab H., Drar A.A.M.,Shear Behaviour of High Strength Fiber Reinforced Concrete Corbels, *Journal of Engineering Sciences*, **40**(4), 2012, 969-987.

[23] Dora A.G., Abdul Hamid N.H., Seismic Performance of SFRC Beam-Column Joint with Corbel under Reversible Lateral Cyclic Loading, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, **4**(1) .

[24] Elgwady M.A.,Rabie M., Mostafa M.T., Strengthening of Corbels Using CFRP: An Experimental Program, Cairo University, Giza, Egypt, 2005.

[25] Ozden S., Atalay H., Strengthening of Reinforced Concrete Corbels with GFRP Overlays, *Science and Engineering of Composite Materials*, 2011, **18**(1), 69-77.

[26] A.A. Mohamad-Ali, M.A. Attiya, Experimental Behavior of Reinforced Concrete Corbels Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips, *Basrah J. Eng. Sci*., 2012, **12**(1), 31-45.

[27] Ivanova I., Assih J., Li A., Dontchev D., Delmas Y., Experimental İnvestigation into Strengthened Short Reinforced Concrete Corbels by Bonding Carbon Fiber Fabrics, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, **29**(20), 2176-2189.

[28] Lachowicz M., Nagrodzka K., Experimental Study of The Post Tensioned Prestressed Concrete Corbels, Engineering Structures, 2016, **108**, 1-11.

[29] Mast R.F., Auxiliary Reinforcement in Concrete Connections. *Proceedings American Soc. Civil Eng.,* 1986, **94**(6), 1485-1504.

[30] Prasad H.N.R., Channakeshava C., Prasad B.K.R., Iyengar K.T.S.R., *Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Corbel. Comp. Struct.,*1993**,** **46**(2), 343-354.

[31] Siao W.B., Shear Strength of Short Reinforced Concrete Walls, Corbels, and Deep Beams. *ACI Struct. J.,* 1994, **91**(2), 123-132.

[32] Hwang S.J., Lu W.Y., Lee H.J., Shear Strength Prediction for Reinforced Concrete Corbels, *ACI Struct. J.,* 2000, **97**(4), 543-552.

[33] Singh B., Mohammadi Y., Kaushik S.K., Design of a Double Corbel using the Strut-and Tie Method, *Asian J. Civil Eng. Building Housing*, 2000, **6**(1-2), 21-33.

[34] Rezaei M., Osman, S.A., Shanmugam N.E., Effect of Column-Load on Single and Double Corbels, *1st Iranian Students Scientific Conference in Malaysia*, 9-10 April 2011.

[35] He Z., Liu Z., Ma, Z.J., Investigation of Load-Transfer Mechanisms in Deep Beams and Corbels. *ACI Struct. J.*,2012, **109**(4),467-476.

[36] Abdul-Wahab H.M.S., Strength of Reinforced Concrete Corbels With Fibers. *ACI Struct. J.*,1989, **86**(1), 60-66.

[37] Ridha M.M.S., Nonlinear Finite Element Analysis of High Strength Fiber Reinforced Corbels, *Eng. Tech. J.*, 2008, **26**(1), 1-15.

[38] Yousif, A.R.,Prediction of Ultimate Load Capacity of High-Strength Reinforced Concrete Corbels. *Al-Rafida in Eng. J.*, 2009, **17**(4), 12-27.

[39] El-Maaddawy T.A., El-Sayed I.Sh., Response of Concrete Corbels Reinforced with Internal Steel Rebars and External Composite Sheets: Experimental Testing and Finite Element Modeling, *J. Composites Construction*, DOI: 10.1061/ (ASCE) CC.1943-5614.0000403.

[40] Canha R.M.F., Kuchma D.A., El Debs M.K., Sozua R.A. Numerical Analysis of Reinforced High Strength Concrete Corbels, *Engineering Structures*, 2014, **74**, 130-144.

[41] Özden K., *Betonarme ve Öngerilmeli Betonda Davranış ve Hesap Modelleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Matbaası, İstanbul, 1992.

[42] Özkal F. M., Uysal H., Betonarme Yapı Elemanlarında En Uygun Donatı Yerleşiminin Belirlenmesi: Konsol Kiriş Örneği, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* , 2017, **7**(2), 157-169.

[43] ACI 318 Committee, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, 1st ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2011.

[44] Arslan G., Mesh Size Effect on Load Carrying Capacity of the Reinforced Concrete Beams Without Stirrups by Using Drucker-Pragerand Cracking Concrete Fracture Criteria, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2004, **3**, 34-42.

[45] Bostan S., Gövdesinde Geniş Boşluk Bulunan Betonarme Kirişlerin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017,474084.

[46] Computers and Structures, Inc., *CSI Analysis Reference Manual*, Berkeley, California USA, 2016.

[47] Kömürcü S., Yılmaz M.,, 24 Serbestlik Dereceli Kabuk Sonlu Elaman Formulasyonu, *XIX Ulusal Mekanik Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 24-28 Ağustos 2015.

[48] Fahjan Y.M., Başak K., Kubin J., Tan M.T., Perdeli Betonarme Yapılar için Doğrusal Olmayan Analiz Metotları, *7th National Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, 30 May - 3 June 2011.

[49] Schwetz P.F., Gastal F.P.S.L., Silva F.L.C.P., Numerical and Experimental Study of a Waffle Slab Designed to Serve As a Tennis Court Floor, *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2013, **6**(3), 375-391.

[50] Uzbaş B., Beton için Geliştirilen Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2008, 177759.

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

[52] Bayındırlık Ve İskan Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar HakkındaYönetmelik,2019,http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf (Ziyaret Tarihi:09.01.2019).

[53] Güler M. S., Şen S., Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler Ordu Üniv. *Bil. Tek. Dergisi*, 2015, **5**(1), 56-66.

[54] Kaplanlıoğlu B. Gemalmayan N., Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Analitik Yöntemler Kullanılarak Bulunan Gerilmelerin Karşılaştırılması, *Mühendis ve Makina*, 2015, **56**(665), 62-72.

EKLER

Tablo A.1. Kısa konsolların kesme kapasitesi

SN	NA	V_d	V_{FEM}	V_{TS500}	V_{ACI}	$V_{Campione}$	V_{STM}	$V_{Fattuhi}$	V_d / V_{FEM}	V_d / V_{TS500}	V_d / V_{ACI}	$V_d / V_{Campione}$	V_d / V_{STM}	$V_d / V_{Fattuhi}$
I	**C21**	114,4	133	102,34	69,65	54,93	92,56	69,65	0,86	1,12	1,64	2,08	1,24	1,64
	C22	82	102	60,71	69,65	70,42	75,77	69,65	0,8	1,35	1,18	1,16	1,08	1,18
	C23	47,4	60	43,15	47,14	50,05	71,42	69,65	0,79	1,1	1,01	0,95	0,66	0,68
	C24	144,8	197	180,22	122,65	66,58	163,01	122,65	0,74	0,8	1,18	2,17	0,89	1,18
	C25	151	180	185,8	155,35	91,73	188,65	155,35	0,84	0,81	0,97	1,65	0,8	0,97
	C26	90	104	96,26	155,35	107,98	159,3	155,35	0,87	0,93	0,58	0,83	0,56	0,58
	C27	125,8	161	102,34	69,65	102,81	92,56	69,77	0,78	1,23	1,81	1,22	1,36	1,8
	C28	88,2	120	60,71	69,65	106,27	75,77	69,77	0,74	1,45	1,27	0,83	1,16	1,26
	C29	65,9	78	43,15	69,65	84,34	71,42	69,77	0,84	1,53	0,95	0,78	0,92	0,94
	C30	171	205	180,22	122,65	118,4	163,01	122,77	0,83	0,95	1,39	1,44	1,05	1,39
	C31	179	220	185,8	155,35	142,21	188,65	155,48	0,91	0,96	1,15	1,26	0,95	1,15
	C32	110,1	140	96,26	100,91	136,21	159,3	155,48	0,79	1,14	1,08	0,81	0,69	0,71
	T3	133	166	106,91	113,88	126,76	133,43	122,77	0,8	1,24	1,17	1,05	1	1,08
	T10	138	167	135,42	155,35	140,45	169,02	155,48	0,83	1,02	0,89	0,98	0,82	0,89

Tablo A.1. (Devam) Kısa konsolların kesme kapasitesi

SN	NA	V_d	V_{FEM}	V_{TS500}	V_{ACI}	$V_{Campione}$	V_{STM}	$V_{Fattuhi}$	V_d / V_{FEM}	V_d / V_{TS500}	V_d / V_{ACI}	$V_d / V_{Campione}$	V_d / V_{STM}	$V_d / V_{Fattuhi}$
II	**51**	130,5	158	98,36	101,1	133,48	148,22	143,73	0,83	1,33	1,29	0,98	0,88	0,91
	55	104	132	65,41	63,46	84,29	72,78	63,81	0,79	1,59	1,64	1,23	1,43	1,63
	56	95,5	121	55,98	63,46	77,32	69,27	63,81	0,79	1,71	1,5	1,24	1,38	1,5
	57	138,5	165	96,3	99,79	125,21	111,92	100,5	0,84	1,44	1,39	1,11	1,24	1,38
	58	121,5	154	80,76	84,84	111,82	106,55	100,5	0,79	1,5	1,43	1,09	1,14	1,21
	60	142	128	114,51	114,51	128,18	219,25	215,23	1,11	1,24	1,24	1,11	0,65	0,66
	61	98,5	132	57,41	61,02	75,3	69,77	63,99	0,75	1,72	1,61	1,31	1,41	1,54
	63	101,8	127	67	66,95	102,29	103,12	100,68	0,8	1,52	1,52	1	0,99	1,01
	64	170	175	96,85	96,85	105,83	156,04	143,91	0,97	1,76	1,76	1,61	1,09	1,18
	67	101,3	122	98,36	101,12	93,83	148,23	143,01	0,83	1,03	1	1,08	0,68	0,71
	68	96	109	83,5	84,4	79,04	146,16	143,01	0,88	1,15	1,14	1,21	0,66	0,67
	71	116,5	114	110,24	108,56	92,27	179,35	174,65	1,02	1,06	1,07	1,26	0,65	0,67
	72	101	112	91,53	92,6	86,01	147,04	143,01	0,9	1,1	1,09	1,17	0,69	0,71
	73	87,5	110	59,95	63,46	54,48	70,69	63,46	0,8	1,46	1,38	1,61	1,24	1,38
	74	74,3	97	45,54	63,46	51,38	66,19	63,46	0,77	1,63	1,17	1,45	1,12	1,17
	75	94,8	126	60,87	63,46	73,84	71,03	63,81	0,75	1,56	1,49	1,28	1,33	1,49
	76	73,5	105	45,83	48,3	63,59	66,25	63,81	0,7	1,6	1,52	1,16	1,11	1,15
	77	114,5	115	90,86	91,35	107,9	146,94	143,55	1	1,26	1,25	1,06	0,78	0,8
	80	120,8	118	90,71	91,42	117,67	146,92	143,77	1,02	1,33	1,32	1,03	0,82	0,84
	85	123,3	120	83,58	83,63	112,75	146,16	143,73	1,03	1,48	1,47	1,09	0,84	0,86
	87	139,8	169	88,86	91,13	97,69	109,21	100,68	0,83	1,57	1,53	1,43	1,28	1,39
	88	139,8	158	94,4	93,37	107,08	147,62	143,91	0,88	1,47	1,49	1,3	0,94	0,96

Tablo A.1. (Devam) Kısa konsolların kesme kapasitesi

SN	NA	V_d	V_{FEM}	V_{TS500}	V_{ACI}	$V_{Campione}$	V_{STM}	$V_{Fattuhi}$	V_d / V_{FEM}	V_d / V_{TS500}	V_d / V_{ACI}	$V_d / V_{Campione}$	V_d / V_{STM}	$V_d / V_{Fattuhi}$
III	**B1**	239	246	214,4	224,28	145,12	251,41	225,12	0,97	1,11	1,07	1,65	0,95	1,06
	B3	258	281	214,4	225,12	184,76	251,41	225,57	0,92	1,2	1,15	1,4	1,03	1,14
	B4	248	262	214,4	225,12	195,27	251,41	225,79	0,95	1,16	1,1	1,27	0,99	1,1
	B5	268	314	285,8	225,12	128,45	280,33	225,12	0,85	0,94	1,19	2,09	0,96	1,19
	B6	266	366	285,8	225,12	178,18	280,33	225,57	0,73	0,93	1,18	1,49	0,95	1,18
	B7	210	276	171,51	225,12	163,99	237,31	225,12	0,76	1,22	0,93	1,28	0,88	0,93
	B8	250	324	171,51	225,12	203,55	237,31	225,57	0,77	1,46	1,11	1,23	1,05	1,11
	B9	203	215	214,4	225,12	139,54	251,41	225,12	0,94	0,95	0,9	1,45	0,81	0,9
	B10	220	229	214,4	225,12	168,84	251,41	225,57	0,96	1,03	0,98	1,3	0,88	0,98
	B11	255	320	214,4	225,12	166,82	251,41	225,12	0,8	1,19	1,13	1,53	1,01	1,13
	B12	262	360	214,4	225,12	202,34	251,41	225,57	0,73	1,22	1,16	1,29	1,04	1,16
	B15	259	283	214,4	225,12	152,76	251,41	225,12	0,92	1,21	1,15	1,7	1,03	1,15
	B16	260	268	214,4	225,12	182	251,41	225,57	0,97	1,21	1,15	1,43	1,03	1,15
	B17	155	216	120,53	126,56	116,28	141,34	126,56	0,72	1,29	1,22	1,33	1,1	1,22
	B18	211	242	120,53	126,56	161,48	141,34	127,01	0,87	1,75	1,67	1,31	1,49	1,66
	B19	256	256	271,47	279,2	160,45	318,33	285,04	1	0,94	0,92	1,6	0,8	0,9
	B20	258	260	271,47	279,2	188,39	318,33	285,49	0,99	0,95	0,92	1,37	0,81	0,9

Tablo A.2. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,50 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
C21	0,39	47,2	0,50	0,00	114,40	0,86	1,12	1,64	2,08	1,24	1,64
C24	0,39	47,2	0,78	0,00	144,80	0,74	0,80	1,18	2,17	0,89	1,18
C27	0,39	47,3	0,50	0,70	125,80	0,78	1,23	1,81	1,22	1,36	1,80
C25	0,48	49,8	1,12	0,00	151,00	0,84	0,81	0,97	1,65	0,80	0,97
Ortalama						0,81	0,99	1,40	1,78	1,07	1,40
Standart Sapma (%)						0,06	0,22	0,39	0,44	0,27	0,39
Ortalama Mutlak Hata (%)						24,67	19,17	25,48	40,82	20,80	25,45

Tablo A.3. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,50-0,75 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
55	0,55	34,4	0,50	1,00	104,00	0,79	1,59	1,64	1,23	1,43	1,63
57	0,59	37,3	0,77	2,00	138,50	0,84	1,44	1,39	1,11	1,24	1,38
75	0,60	29,6	0,53	1,00	94,80	0,75	1,56	1,49	1,28	1,33	1,49
73	0,60	32	0,54	0,00	87,50	0,80	1,46	1,38	1,61	1,24	1,38
61	0,63	33,9	0,71	2,00	98,50	0,75	1,72	1,61	1,31	1,41	1,54
87	0,64	33,8	1,12	2,50	139,80	0,83	1,57	1,53	1,43	1,28	1,39
56	0,65	34	0,58	1,00	95,50	0,79	1,71	1,50	1,24	1,38	1,50
64	0,65	34,9	1,63	2,50	170,00	0,97	1,76	1,76	1,61	1,09	1,18
T10	0,66	47,9	1,12	0,70	138,00	0,83	1,02	0,89	0,98	0,82	0,89
T3	0,66	47,9	0,78	0,70	133,00	0,80	1,24	1,17	1,05	1,00	1,08
58	0,71	37,3	0,92	2,00	121,50	0,79	1,50	1,43	1,09	1,14	1,21
					Ortalama	0,81	1,51	1,44	1,27	1,21	1,33
					Standart Sapma (%)	0,06	0,22	0,24	0,21	0,19	0,22
					Ortalama Mutlak Hata (%)	23,59	32,30	31,03	20,15	20,25	25,73

Tablo A.4. Normal dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1.00 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
76	0,79	29,6	0,71	1,00	73,50	0,70	1,60	1,52	1,16	1,11	1,15
74	0,80	32	0,71	0,00	74,30	0,77	1,63	1,17	1,45	1,12	1,17
67	0,83	35,1	1,14	0,00	101,30	0,83	1,03	1,00	1,08	0,68	0,71
51	0,83	35,3	1,14	2,00	130,50	0,83	1,33	1,29	0,98	0,88	0,91
63	0,85	34,9	1,11	2,50	101,80	0,80	1,52	1,52	1,00	0,99	1,01
88	0,86	33,8	1,62	2,50	138,80	0,88	1,47	1,49	1,30	0,94	0,96
72	0,89	32,3	1,22	0,00	101,00	0,90	1,10	1,09	1,17	0,69	0,71
77	0,90	30,8	1,23	2,00	114,50	1,00	1,26	1,25	1,06	0,78	0,80
80	0,90	31,5	1,23	2,00	120,80	1,02	1,33	1,32	1,03	0,82	0,84
71	0,91	32,3	1,51	0,00	116,50	1,02	1,06	1,07	1,26	0,65	0,67
C26	0,92	48,2	1,12	0,00	90,00	0,87	0,93	0,58	0,83	0,56	0,58
C32	0,92	47,3	1,12	0,70	110,10	0,79	1,14	1,09	0,81	0,69	0,71
60	0,98	33,9	2,01	2,00	142,00	1,11	1,24	1,24	1,11	0,65	0,66
85	0,98	32,2	1,34	2,00	123,30	1,03	1,48	1,47	1,09	0,84	0,86
68	0,98	35,1	1,34	0,00	96,00	0,88	1,15	1,14	1,21	0,66	0,67
					Ortalama	0,90	1,29	1,22	1,10	0,80	0,83
					Standart Sapma (%)	0,12	0,22	0,25	0,17	0,17	0,18
					Mutlak Ortalama Mutlak Hata (%)	15,69	20,96	22,85	13,37	32,37	29,86

Tablo A.5. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,50 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	**(a/d)**	**f_{ck}**	**ρ (%)**	**V_f (%)**	**V_d**	**V_d/V_{FEM}**	**V_d/V_{Ts500}**	**$V_d/V_{ACI-318}$**	**$V_d/V_{campione}$**	**V_d/V_{STM}**	**$V_d/V_{fattuhi}$**
C30	0,39	51,4	0,78	0,70	171,00	0,83	0,95	1,39	1,44	1,05	1,39
B5	0,45	82,4	2,10	0,00	268,00	0,85	0,94	1,19	2,09	0,96	1,19
B6	0,45	96,4	2,10	1,00	266,00	0,73	0,93	1,18	1,49	0,95	1,18
C31	0,48	57	1,12	0,70	179,00	0,81	0,96	1,15	1,26	0,95	1,15
					Ortalama	0,81	0,95	1,23	1,57	0,98	1,23
					Standart Sapma (%)	0,05	0,01	0,11	0,36	0,05	0,11
					Ortalama Mutlak Hata (%)	24,64	5,82	18,21	34,06	4,86	18,08

Tablo A.6. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,50-0,75 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
B9	0,60	62,7	2,10	0,00	203,00	0,94	0,95	0,90	1,45	0,81	0,90
B10	0,60	65	2,10	1,00	220,00	0,96	1,03	0,98	1,30	0,88	0,98
B1	0,60	70,5	2,10	0,00	239,00	0,97	1,11	1,07	1,65	0,95	1,06
B17	0,60	73	1,18	0,00	155,00	0,72	1,29	1,22	1,33	1,10	1,22
B19	0,60	73	2,66	0,00	256,00	1,00	0,94	0,92	1,60	0,80	0,90
B20	0,60	73	2,66	1,00	258,00	0,99	0,95	0,92	1,37	0,81	0,90
B4	0,60	75	2,10	2,00	248,00	0,95	1,16	1,10	1,27	0,99	1,10
B16	0,60	78,3	2,10	1,00	260,00	0,97	1,21	1,15	1,43	1,03	1,15
B3	0,60	82	2,10	1,00	258,00	0,92	1,20	1,15	1,40	1,03	1,14
B15	0,60	85	2,10	0,00	259,00	0,92	1,21	1,15	1,70	1,03	1,15
B18	0,60	94	1,18	1,00	211,00	0,87	1,75	1,67	1,31	1,49	1,66
B12	0,60	106	2,10	1,00	262,00	0,73	1,22	1,16	1,29	1,04	1,16
B11	0,60	106,5	2,10	0,00	255,00	0,80	1,19	1,13	1,53	1,01	1,13
C22	0,66	50,1	0,50	0,00	82,00	0,80	1,35	1,18	1,16	1,08	1,18
C28	0,66	55,7	0,50	0,70	88,20	0,74	1,45	1,27	0,83	1,16	1,26
					Ortalama	0,89	1,20	1,13	1,37	1,01	1,13
					Standart Sapma (%)	0,10	0,21	0,19	0,21	0,17	0,19
					Ortalama Mutlak Hata (%)	14,42	16,75	13,69	27,93	11,24	13,83

Tablo A.7. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1.00 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
B7	0,75	82,4	2,10	0,00	210,00	0,76	1,22	0,93	1,28	0,88	0,93
B8	0,75	96,4	2,10	1,00	250,00	0,77	1,46	1,11	1,23	1,05	1,11
C23	0,92	50,1	0,50	0,00	47,40	0,79	1,10	1,01	0,95	0,66	0,68
C29	0,92	55,7	0,50	0,70	65,90	0,84	1,53	0,95	0,78	0,92	0,94
					Ortalama	0,79	1,33	1,00	1,06	0,88	0,92
					Standart Sapma (%)	0,04	0,20	0,08	0,24	0,16	0,18
					Mutlak Ortalama Mutlak Hata (%)	26,77	23,30	5,85	18,51	19,65	17,72

Tablo A.8. Lifsiz betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,50 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
C21	0,39	47,2	0,50	0,00	114,40	0,86	1,12	1,64	2,08	1,24	1,64
C24	0,39	47,2	0,78	0,00	144,80	0,74	0,80	1,18	2,17	0,89	1,18
B5	0,45	82,4	2,10	0,00	268,00	0,85	0,94	1,19	2,09	0,96	1,19
C25	0,48	49,8	1,12	0,00	151,00	0,84	0,81	0,97	1,65	0,80	0,97
					Ortalama	0,82	0,92	1,25	2,00	0,97	1,25
					Standart Sapma (%)	0,06	0,15	0,28	0,24	0,19	0,28
					Ortalama Mutlak Hata (%)	22,03	16,17	18,32	49,35	15,22	18,33

Tablo A.9. Lifsiz betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,50-0,75 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
B9	0,60	62,7	2,10	0,00	203,00	0,94	0,95	0,90	1,45	0,81	0,90
B1	0,60	70,5	2,10	0,00	239,00	0,97	1,11	1,07	1,65	0,95	1,06
B17	0,60	73	1,18	0,00	155,00	0,72	1,29	1,22	1,33	1,10	1,22
B19	0,60	73	2,66	0,00	256,00	1,00	0,94	0,92	1,60	0,80	0,90
B15	0,60	85	2,10	0,00	259,00	0,92	1,21	1,15	1,70	1,03	1,15
B11	0,60	106,5	2,10	0,00	255,00	0,80	1,19	1,13	1,53	1,01	1,13
73	0,60	32	0,54	0,00	87,50	0,80	1,46	1,38	1,61	1,24	1,38
C22	0,66	50,1	0,50	0,00	82,00	0,80	1,35	1,18	1,16	1,08	1,18
					Ortalama	0,87	1,19	1,12	1,50	1,00	1,12
					Standart Sapma (%)	0,10	0,18	0,16	0,18	0,15	0,16
					Ortalama Mutlak Hata (%)	16,51	16,85	13,98	32,53	11,68	14,16

Tablo A.10. Lifsiz betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1.00 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
B7	0,75	82,4	2,10	0,00	210,00	0,76	1,22	0,93	1,28	0,88	0,93
74	0,80	32	0,71	0,00	74,30	0,77	1,63	1,17	1,45	1,12	1,17
67	0,83	35,1	1,14	0,00	101,30	0,83	1,03	1,00	1,08	0,68	0,71
72	0,89	32,3	1,22	0,00	101,00	0,90	1,10	1,09	1,17	0,69	0,71
71	0,91	32,3	1,51	0,00	116,50	1,02	1,06	1,07	1,26	0,65	0,67
C26	0,92	48,2	1,12	0,00	90,00	0,87	0,93	0,58	0,83	0,56	0,58
C23	0,92	50,1	0,50	0,00	47,40	0,79	1,10	1,01	0,95	0,66	0,68
68	0,98	35,1	1,34	0,00	96,00	0,88	1,15	1,14	1,21	0,66	0,67
					Ortalama	0,85	1,15	1,00	1,15	0,74	0,77
					Standart Sapma (%)	0,09	0,21	0,19	0,20	0,18	0,19
					Mutlak Ortalama Mutlak Hata (%)	18,77	12,95	15,29	17,32	43,97	40,22

Tablo A.11. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0-0,50 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	**(a/d)**	**f_{ck}**	**ρ (%)**	**V_f (%)**	**V_d**	**V_d/V_{FEM}**	**V_d/V_{Ts500}**	**$V_d/V_{ACI-318}$**	**$V_d/V_{campione}$**	**V_d/V_{STM}**	**$V_d/V_{fattuhi}$**
C27	0,39	47,3	0,50	0,70	125,80	0,78	1,23	1,81	1,22	1,36	1,80
C30	0,39	51,4	0,78	0,70	171,00	0,83	0,95	1,39	1,44	1,05	1,39
B6	0,45	96,4	2,10	1,00	266,00	0,73	0,93	1,18	1,49	0,95	1,18
C31	0,48	57	1,12	0,70	179,00	0,81	0,96	1,15	1,26	0,95	1,15
					Ortalama	0,79	1,02	1,38	1,35	1,08	1,38
					Standart Sapma (%)	0,04	0,14	0,30	0,13	0,19	0,30
					Ortalama Mutlak Hata (%)	27,28	8,82	25,37	25,53	10,44	25,20

Tablo A.12. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,50-0,75 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
55	0,55	34,4	0,50	1,00	104,00	0,79	1,59	1,64	1,23	1,43	1,63
57	0,59	37,3	0,77	2,00	138,50	0,84	1,44	1,39	1,11	1,24	1,38
75	0,60	29,6	0,53	1,00	94,80	0,75	1,56	1,49	1,28	1,33	1,49
B10	0,60	65	2,10	1,00	220,00	0,96	1,03	0,98	1,30	0,88	0,98
B20	0,60	73	2,66	1,00	258,00	0,99	0,95	0,92	1,37	0,81	0,90
B16	0,60	78,3	2,10	1,00	260,00	0,97	1,21	1,15	1,43	1,03	1,15
B3	0,60	82	2,10	1,00	258,00	0,92	1,20	1,15	1,40	1,03	1,14
B18	0,60	94	1,18	1,00	211,00	0,87	1,75	1,67	1,31	1,49	1,66
B12	0,60	106	2,10	1,00	262,00	0,73	1,22	1,16	1,29	1,04	1,16
B4	0,60	75	2,10	2,00	248,00	0,95	1,16	1,10	1,27	0,99	1,10
61	0,63	33,9	0,71	2,00	98,50	0,75	1,72	1,61	1,31	1,41	1,54
87	0,64	33,8	1,12	2,50	139,80	0,83	1,57	1,53	1,43	1,28	1,39
56	0,65	34	0,58	1,00	95,50	0,79	1,71	1,50	1,24	1,38	1,50
64	0,65	34,9	1,63	2,50	170,00	0,97	1,76	1,76	1,61	1,09	1,18
T10	0,66	47,9	1,12	0,70	138,00	0,83	1,02	0,89	0,98	0,82	0,89
T3	0,66	47,9	0,78	0,70	133,00	0,80	1,24	1,17	1,05	1,00	1,08
C28	0,66	55,7	0,50	0,70	88,20	0,74	1,45	1,27	0,83	1,16	1,26
58	0,71	37,3	0,92	2,00	121,50	0,79	1,50	1,43	1,09	1,14	1,21
					Ortalama	0,85	1,39	1,32	1,25	1,14	1,26
					Standart Sapma (%)	0,09	0,27	0,27	0,18	0,21	0,24
					Ortalama Mutlak Hata (%)	19,10	26,21	24,16	21,13	16,55	20,96

Tablo A.13. Lifli betondan üretilmiş (a/d) oranı 0,75-1.00 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
B8	0,75	96,4	2,10	1,00	250,00	0,77	1,46	1,11	1,23	1,05	1,11
76	0,79	29,6	0,71	1,00	73,50	0,70	1,60	1,52	1,16	1,11	1,15
51	0,83	35,3	1,14	2,00	130,50	0,83	1,33	1,29	0,98	0,88	0,91
63	0,85	34,9	1,11	2,50	101,80	0,80	1,52	1,52	1,00	0,99	1,01
88	0,86	33,8	1,62	2,50	138,80	0,88	1,47	1,49	1,30	0,94	0,96
77	0,90	30,8	1,23	2,00	114,50	1,00	1,26	1,25	1,06	0,78	0,80
80	0,90	31,5	1,23	2,00	120,80	1,02	1,33	1,32	1,03	0,82	0,84
C32	0,92	47,3	1,12	0,70	110,10	0,79	1,14	1,09	0,81	0,69	0,71
C29	0,92	55,7	0,50	0,70	65,90	0,84	1,53	0,95	0,78	0,92	0,94
60	0,98	33,9	2,01	2,00	142,00	1,11	1,24	1,24	1,11	0,65	0,66
85	0,98	32,2	1,34	2,00	123,30	1,03	1,48	1,47	1,09	0,84	0,86
					Ortalama	0,89	1,40	1,30	1,05	0,88	0,90
					Standart Sapma (%)	0,13	0,14	0,19	0,16	0,14	0,15
					Mutlak Ortalama Mutlak Hata (%)	17,48	27,64	22,17	12,36	19,31	17,92

Tablo A.14. (a/d) oranı 0-0,50 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
C21	0,39	47,2	0,50	0,00	114,40	0,86	1,12	1,64	2,08	1,24	1,64
C24	0,39	47,2	0,78	0,00	144,80	0,74	0,80	1,18	2,17	0,89	1,18
C27	0,39	47,3	0,50	0,70	125,80	0,78	1,23	1,81	1,22	1,36	1,80
C30	0,39	51,4	0,78	0,70	171,00	0,83	0,95	1,39	1,44	1,05	1,39
B5	0,45	82,4	2,10	0,00	268,00	0,85	0,94	1,19	2,09	0,96	1,19
B6	0,45	96,4	2,10	1,00	266,00	0,73	0,93	1,18	1,49	0,95	1,18
C25	0,48	49,8	1,12	0,00	151,00	0,84	0,81	0,97	1,65	0,80	0,97
					Ortalama	0,81	0,97	1,31	1,68	1,03	1,31
					Standart Sapma (%)	0,05	0,14	0,28	0,39	0,19	0,28
					Ortalama Mutlak Hata (%)	24,65	12,50	21,85	37,44	12,83	21,77

Tablo A.15. (a/d) oranı 0,50-0,75 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	fck	ρ (%)	Vf (%)	Vd	Vd/VFEM	Vd/VTs500	Vd/VACI-318	Vd/Vcampione	Vd/VSTM	Vd/Vfattuhi
55	0,55	34,4	0,50	1,00	104,00	0,79	1,59	1,64	1,23	1,43	1,63
57	0,59	37,3	0,77	2,00	138,50	0,84	1,44	1,39	1,11	1,24	1,38
75	0,60	29,6	0,53	1,00	94,80	0,75	1,56	1,49	1,28	1,33	1,49
B1	0,60	70,5	2,10	0,00	239,00	0,97	1,11	1,07	1,65	0,95	1,06
B3	0,60	82	2,10	1,00	258,00	0,92	1,20	1,15	1,40	1,03	1,14
B4	0,60	75	2,10	2,00	248,00	0,95	1,16	1,10	1,27	0,99	1,10
B9	0,60	62,7	2,10	0,00	203,00	0,94	0,95	0,90	1,45	0,81	0,90
B10	0,60	65	2,10	1,00	220,00	0,96	1,03	0,98	1,30	0,88	0,98
B11	0,60	106,5	2,10	0,00	255,00	0,80	1,19	1,13	1,53	1,01	1,13
B12	0,60	106	2,10	1,00	262,00	0,73	1,22	1,16	1,29	1,04	1,16
B15	0,60	85	2,10	0,00	259,00	0,92	1,21	1,15	1,70	1,03	1,15
B16	0,60	78,3	2,10	1,00	260,00	0,97	1,21	1,15	1,43	1,03	1,15
B17	0,60	73	1,18	0,00	155,00	0,72	1,29	1,22	1,33	1,10	1,22
B18	0,60	94	1,18	1,00	211,00	0,87	1,75	1,67	1,31	1,49	1,66
B19	0,60	73	2,66	0,00	256,00	1,00	0,94	0,92	1,60	0,80	0,90
B20	0,60	73	2,66	1,00	258,00	0,99	0,95	0,92	1,37	0,81	0,90
73	0,60	32	0,54	0,00	87,50	0,80	1,46	1,38	1,61	1,24	1,38
61	0,63	33,9	0,71	2,00	98,50	0,75	1,72	1,61	1,31	1,41	1,54
87	0,64	33,8	1,12	2,50	139,80	0,83	1,57	1,53	1,43	1,28	1,39
56	0,65	34	0,58	1,00	95,50	0,79	1,71	1,50	1,24	1,38	1,50
64	0,65	34,9	1,63	2,50	170,00	0,97	1,76	1,76	1,61	1,09	1,18
C22	0,66	50,1	0,50	0,00	82,00	0,80	1,35	1,18	1,16	1,08	1,18
C28	0,66	55,7	0,50	0,70	88,20	0,74	1,45	1,27	0,83	1,16	1,26
T10	0,66	47,9	1,12	0,70	138,00	0,83	1,02	0,89	0,98	0,82	0,89
T3	0,66	47,9	0,78	0,70	133,00	0,80	1,24	1,17	1,05	1,00	1,08
58	0,71	37,3	0,92	2,00	121,50	0,79	1,50	1,43	1,09	1,14	1,21
Ortalama						0,85	1,33	1,26	1,33	1,10	1,21
Standart Sapma (%)						0,09	0,26	0,26	0,22	0,20	0,22
Ortalama Mutlak Hata (%)						18,30	23,33	21,03	24,64	15,05	18,87

Tablo A.16. (a/d) oranı 0,75-1.00 arası olan kısa konsolların kapasite değerleri

NA	(a/d)	f_{ck}	ρ (%)	V_f (%)	V_d	V_d/V_{FEM}	V_d/V_{Ts500}	$V_d/V_{ACI-318}$	$V_d/V_{campione}$	V_d/V_{STM}	$V_d/V_{fattuhi}$
B7	0,75	82,4	2,10	0,00	210,00	0,76	1,22	0,93	1,28	0,88	0,93
B8	0,75	96,4	2,10	1,00	250,00	0,77	1,46	1,11	1,23	1,05	1,11
76	0,79	29,6	0,71	1,00	73,50	0,70	1,60	1,52	1,16	1,11	1,15
74	0,80	32	0,71	0,00	74,30	0,77	1,63	1,17	1,45	1,12	1,17
67	0,83	35,1	1,14	0,00	101,30	0,83	1,03	1,00	1,08	0,68	0,71
51	0,83	35,3	1,14	2,00	130,50	0,83	1,33	1,29	0,98	0,88	0,91
63	0,85	34,9	1,11	2,50	101,80	0,80	1,52	1,52	1,00	0,99	1,01
88	0,86	33,8	1,62	2,50	138,80	0,88	1,47	1,49	1,30	0,94	0,96
72	0,89	32,3	1,22	0,00	101,00	0,90	1,10	1,09	1,17	0,69	0,71
77	0,90	30,8	1,23	2,00	114,50	1,00	1,26	1,25	1,06	0,78	0,80
80	0,90	31,5	1,23	2,00	120,80	1,02	1,33	1,32	1,03	0,82	0,84
71	0,91	32,3	1,51	0,00	116,50	1,02	1,06	1,07	1,26	0,65	0,67
C23	0,92	50,1	0,50	0,00	47,40	0,79	1,10	1,01	0,95	0,66	0,68
C26	0,92	48,2	1,12	0,00	90,00	0,87	0,93	0,58	0,83	0,56	0,58
C29	0,92	55,7	0,50	0,70	65,90	0,84	1,53	0,95	0,78	0,92	0,94
C32	0,92	47,3	1,12	0,70	110,10	0,79	1,14	1,09	0,81	0,69	0,71
60	0,98	33,9	2,01	2,00	142,00	1,11	1,24	1,24	1,11	0,65	0,66
85	0,98	32,2	1,34	2,00	123,30	1,03	1,48	1,47	1,09	0,84	0,86
68	0,98	35,1	1,34	0,00	96,00	0,88	1,15	1,14	1,21	0,66	0,67
					Ortalama	0,87	1,29	1,17	1,09	0,82	0,85
					Standart Sapma (%)	0,11	0,21	0,24	0,18	0,17	0,18
					Mutlak Ortalama Mutlak Hata (%)	19,02	22,65	20,34	15,26	31,34	28,82

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Meydanlı Atalay H., **Yıldız M. İ.**, Shear Strength Determination for Reinforced Concrete Corbels, *3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering*, Izmir, Turkey, April 24-27, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Mahmut İslam Yıldız 1993'te İzmit'te doğdu. Lise öğrenimini Aliağa Alp Oğuz Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini 2011-2015 yılları arasında tamamladı. Mezun olduğu yıl Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 01.03.2017-07.07.2017 tarihleri arasında Erşan İnşaat Ltd.Şti'nde çalıştı.