

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



ARD GERMELİ SEGMENTAL AÇIK DENİZ YAPILARIN TASARIMI

Seymur BASHIRZADE

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



ARD GERMELİ SEGMENTAL AÇIK DENİZ YAPILARIN TASARIMI

Seymur BASHIRZADE

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARD GERMELİ SEGMENTAL AÇIK DENİZ YAPILARIN TASARIMI

Seymur BASHIRZADE
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez
TC Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar (YTB) Başkanlığı tarafından
desteklenmiş burs programı aracılığı ile erseye gelmiştir.

MAYIS 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARD GERMELİ SEGMENTAL AÇIK DENİZ YAPILARIN TASARIMI

Seymur BASHIRZADE
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 29/05/2024 tarihinde jüri tarafından **Oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Okan ÖZCAN (Danışman)

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Doç. Dr. Rıfat TÜR

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ERDOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

ÖZET

ARD GERMELİ SEGMENTAL AÇIK DENİZ YAPILARIN TASARIMI

SEYMUR BASHIRZADE

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Okan ÖZCAN

Mayıs 2024; 90 sayfa

Dünya genelindeki enerji talebinin sürekli artışı, açık deniz platformlarının yapım teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyacı artırmıştır. Bunun bir örneği, Norveç'te başarıyla uygulanan, yüksek dayanımlı beton ve çelik gibi dayanımı yüksek malzemeler kullanılarak imal edilen Condeep tipi açık deniz platformlarıdır. Bu tip platformlar genellikle karada monolitik olarak imal edilip montaj için mavnalarla taşındığı için, bu yapıların hafif ve taşınabilir olması imalat sürecinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada Condeep tipi açık deniz petrol ve doğalgaz platformlarının tasarımında ard germeli ve segmental tekniklerin kullanılarak bu tip platformların derin sularda daha ekonomik, kolay ve güvenli şekilde inşa edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, geliştirilmiş analitik metotlarla dairesel ard germenin yapıya etkisi araştırılmış, sonrasında sayısal modelleme kısmında literatürden elde edilen deneysel sonuçların DIANA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılan analizler ile karşılaştırılmasıyla tasarımda kullanılacak en uygun sonlu eleman tipinin seçimi yapılmıştır. Burada, betonarme, ard germeli ve segmental ard germeli kirişlerin deneysel olarak saptanmış yük – yer değiştirme davranışı, 1 boyutlu çubuk, 2 boyutlu kabuk ve 3 boyutlu katı eleman tipleri kullanılarak oluşturulan sonlu eleman model sonuçları ile karşılaştırılmış ve 3 boyutlu katı modellemenin gerçek yapısal davranışa en yakın sonuç verdiği saptanmıştır. Sonrasında, belirlenen eleman tipi kullanılarak ve sıvı-yapı etkileşimi göz önünde bulundurularak yapılan dinamik analizlerde, literatürden elde edilmiş su ve vakum altındaki silindirin modal frekans ve mod şekillerinin yüksek hassasiyetle saptanabildiği görülmüştür.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ilk bölümde elde edilen sonuçlar ışığında elde edilen sonlu elemanlar modeli kullanılarak segmental yapıların yapısal davranışını incelemek amacıyla parametrik çalışma yapılmıştır. Yapılan parametrik çalışmada, beton basınç dayanımı, segment sayısı ve çatlak modeli değişkenlerinin segmental yapının kesme dayanımı, birleşim dayanımı, süneklik ve çatlak genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Son bölümde, açık deniz platformlarının tasarımı için yeni bir segmental analiz ve tasarım yaklaşımı ortaya konulmuştur. Bu bölümde, segmental yapıların monolitik ve segmental tasarımı detaylı bir şekilde incelenmiş ve açık deniz koşullarında yapısal performansın nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Bu çalışma, daha güvenli, verimli ve esnek

açık deniz platformları inşa etmek amacıyla modüler bir inşaat metodolojisi geliştirmeyi hedeflemektedir.

Anahtar Sözcükler: Açık Deniz Yapıları; Condeep Platformu; DIANA FEA; İçi Boş Dairesel Kirişler; Segmental Açık Deniz Yapıları; Segmentlararası Birleşim; Segmental Yapılar; Segmental Kirişler.

JÜRİ:

Prof. Dr. Okan ÖZCAN

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Doç. Dr. Rıfat TÜR

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ERDOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

DESIGN OF POST-TENSIONED SEGMENTAL OFFSHORE STRUCTURES

SEYMUR BASHIRZADE

PhD Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Okan ÖZCAN

May 2024; 90 pages

The continuous increase in global energy demand has heightened the need for innovative approaches in the construction technologies of offshore platforms. A notable example of this innovation is the Condeep-type offshore platforms, which have been successfully implemented in Norway. These platforms are constructed using high-strength materials such as high-strength concrete and steel. Typically, these platforms are manufactured monolithically on land and transported to their installation sites using barges, making it critical for these structures to be lightweight and portable during the manufacturing process. Therefore, this study aims to employ prestressed and segmental techniques in the design of Condeep-type offshore oil and gas platforms to facilitate their more economical, easier, and safer construction in deep waters.

In the first part of the study, the effectiveness of circular prestressing on the structure was investigated using advanced analytical methods. Subsequently, in the numerical modeling section, the experimental results obtained from the literature were compared with analyses conducted using DIANA finite element software, leading to the selection of the most appropriate finite element type for use in the design. Here, the experimentally determined load-displacement behavior of reinforced concrete, prestressed, and segmental prestressed beams was compared with the results of finite element models created using one-dimensional beam, two-dimensional shell, and three-dimensional solid element types. It was found that the three-dimensional solid modeling provided results that were closest to the actual structural behavior. Following this, dynamic analyses incorporating fluid-structure interaction were performed using the selected element type. These analyses demonstrated that the modal frequencies and mode shapes of a cylinder under water and vacuum conditions, as obtained from the literature, could be determined with high accuracy.

In the second part of the study, a parametric analysis was conducted using the finite element model developed based on the results from the first part, with the aim of examining the structural behavior of segmental structures. This parametric study investigated the effects of variables such as concrete compressive strength, number of segments, and crack models on the shear strength, joint strength, ductility, and crack width of the segmental structure.

In the final part of the study, a new segmental analysis and design approach for offshore platform design was proposed. This section thoroughly examined the monolithic and segmental design of segmental structures and explored how structural performance is affected under offshore conditions. This study aims to develop a modular construction methodology to build safer, more efficient, and more adaptable offshore platforms.

Keywords: Offshore Structures; Condeep Platform; DIANA FEA; Hollow Circular Beams; Segmental Offshore Structures; Intersegmental Joints; Segmental Structures; Segmental Beams;

COMMITTEE:

Prof. Dr. Okan ÖZCAN

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Assoc. Prof. Dr. Rıfat TÜR

Assist. Prof. Dr. Hakan ERDOĞAN

Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, açık deniz petrol ve doğalgaz platformlarının tasarımında ard germeli ve segmental tekniklerin kullanımını araştırmayı amaçlamaktadır. Geleneksel monolitik platformların aksine, segmental türdeki açık deniz platformları özellikle kurulum ve bakım kolaylığı sağlamakta, bu da mühendislik ve işletme süreçlerinde büyük esneklik sunmaktadır.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde büyük katkıları bulunan danışmanım Prof. Dr. Okan ÖZCAN'a rehberliği, desteği ve değerli önerileri için derin minnettarlığımı ifade ederim. Tez sürecinin her aşamasında bana yol gösteren Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ ve Prof. Dr. Barış BİNİCİ'ye ve aynı zamanda Doç. Dr. Rıfat TÜR'e de içten teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye'deki doktora eğitimimi kapsamlı bir burs programı ile desteklediği için Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar (YTB) Başkanlığı'na, Almanya'daki değişim programımı desteklediği için Erasmus programına teşekkürü bir borç bilirim. Her iki program da bana değerli fırsatlar sağlayarak bu tezin başarıyla tamamlanmasına yardımcı olmuştur.

Bu tezin ortaya çıkmasında her zaman yanımda olan aileme, sonsuz sevgi ve destekleri için minnettarlığımı sunarım. Onların sabrı, teşviki ve sevgisi, bu çalışmayı tamamlama yolunda bana büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu tez çalışmasının, açık deniz platformlarının tasarımında yenilikçi yaklaşımlar için ilham kaynağı olmasını ve aynı zamanda yapı ve deniz mühendisliği alanlarına değerli katkılar sağlamasını umuyorum. Bu süreçte katkıda bulunan herkese tekrar teşekkürlerimi sunar, bu çalışmanın sektörde ve akademide yararlı olmasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Condeep Tip Deniz Platformları	4
2.2. Segmental Yapılar.....	6
2.3. Segmental Kolonlar.....	7
2.4. Segmental Kirişler.....	10
2.5. Segmental Tuneller	12
2.6. Segmental Birleşimlerin Kesme Dayanımı	14
2.7. Dairesel Boşluklu Kesitler	15
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Dairesel Ard Germe Etkinliğinin Analitik Metotlarla Analizi.....	17
3.2. Sayısal Modelleme	21
3.2.1. Eleman modeli	21
3.2.2. Malzeme modeli.....	22
3.2.3. Doğrulama Çalışmaları	23
3.2.3.1. Betonarme kiriş	25
3.2.3.2. Ard germeli kiriş	26
3.2.3.3. Ard germeli segmental kiriş	27
3.2.3.4. Sıvı – yapı etkileşimi.....	30
3.2.4. Parametrik Çalışma	32
3.2.4.1 Ard Germeli Segmental kesit ve birleşimin kesme dayanımı.	35

3.2.4.2. Segmental Birleşim SE Modeli.....	36
3.2.4.3. Diana Doğrusal Olmayan Analiz Aşaması.....	37
3.2.5. Monopile Draugen Condeep Platformu	38
3.2.5.1. Genel Bakış	38
3.2.5.2. Dalga yükleri.....	39
3.2.5.3. Rüzgâr Yükleri	45
3.2.5.4. Deprem Yükleri.....	45
3.2.5.5. Hidrostatik Basınç.....	46
3.2.5.6. Ölü Yük	47
3.2.5.7. Boşluklu Dairesel Kesit ve Birleşimin Kesme Dayanımı	47
3.2.5.8. Sonlu Elemanlar Modeli	48
3.2.5.9. Birleşim SE Modelinin Açıklaması.....	50
3.2.5.10. Doğrusal Olmayan Analiz ve Tasarım Aşaması.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
4.1. Dairesel Ard Germanin Etkisinden Duvarlarda Oluşan İç Kuvvet Değişimi.....	53
4.2. DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI	55
4.2.1. Betonarme kiriş.....	55
4.2.2. AG kiriş.	56
4.2.3. AG segmental kiriş	58
4.2.4. Sıvı – yapı etkileşimi	60
4.3. Parametrik Çalışma	63
4.3.1. Yük – Deplasman ilişkisi.....	63
4.3.2. Segmentlararası birleşim açılması ve çatlama	66
4.3.3. Beton Basınç Dayanımı	70
4.4. Monopile Draugen Condeep Platformunun Monolit Ve Segmental Tasarım Versiyonlarının Karşılaştırılması.....	72

4.4.1. Modal Karakteristikler.....	72
4.4.2. Kesme Kapasitesi.....	74
4.4.3. Süneklik	74
4.4.4. Beton ve Donatı Gerilmeleri.....	75
4.4.5. Tendon Gerilmelerinin Karşılaştırılması	77
4.4.6. Çatlak Genişliği	79
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	80
6. KAYNAKLAR	85

ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “ARD GERMELİ SEGMENTAL AÇIK DENİZ YAPILARIN TASARIMI” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

29 / 05 / 2024

Seymur BASHIRZADE



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler:

F_z	: Z yönünde iç kuvvetlerin toplamı
N_z	: Normal yönde iç kuvvet
P_z	: Dikey basınç
F_r	: Radyal yönde iç kuvvetlerin toplamı
T_ϕ	: Tanjansal kuvvet
M_z	: Moment
P_i	: İç basınç
P_d	: Dış basınç
R	: Yarıçap
P_{ps}	: Ard germe kuvveti
σ_z	: Eksenel gerilme
σ_ϕ	: Dairesel gerilme
A	: Kesit alanı
w	: Radyal yer değiştirme
K_z	: zy düzlemine paralel yüzey eğriliği
K_x	: xy düzlemine paralel yüzey eğriliği
R_z	: z aksına normal yönde yarıçap
R_x	: x z aksına normal yönde yarıçap
E_D	: Eğilme dayanımı
w_{genel}	: Genel çözüm
w_{sp}	: Spesifik çözüm
C'	: Etki katsayısı
γ_i	: İçerdeki suyun yoğunluğu

γ_d	: Dışarıdaki suyun yoğunluğu
k_n	: Normal rijitlik
k_t	: Kesme rijitliği
t_n	: Normal sürtünme kuvveti
t_t	: Kesme sürtünme kuvveti
u_n	: Normal görelî yerdeğiřtirme
u_t	: Kesme görelî yerdeğiřtirme
E	: Beton elastisite modülü
G	: Beton kesme modülü
t	: Arayüz genişliği
$E_{ep.}$	: Epoksi elastisite modülü
$G_{ep.}$	: Epoksi kesme modülü
μ_1 & μ_2	: Sürtünme katsayıları
c	: Kohezyon
M	: Eğilme momenti
V	: Kesme kuvveti
q	: Yayılı yük
P	: Noktasal yük
α_{w2}	: Beton tasarım dayanıklılığı için azaltma faktörü
L	: Kiriş uzunluğu
V_c	: Dairesel boşluklu kesitin kesme kapasitesi
D	: Kesit dış çapı
d	: Kesit iç çapı
α_{cv}	: Yüksek normal gerilmelerin web ezilmesi üzerindeki olumsuz etkiler için katsayı.
f_{cd}	: Beton tasarım basınç

b_w	: Etkili gövde genişliği
σ_n	: Birleşim normal basınç gerilmesi
f_{ck}	: Beton karakteristik basınç dayanımı
A_j	: Birleşim alanı
f_{ym}	: Akma dayanımı
f_{um}	: Kopma dayanımı
ε_{su}	: Nihai gerinim
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_t	: Beton çekme dayanımı
ρ	: Beton yoğunluğu
D	: Boyuna donatı çapı
d	: Dairesel donatı çapı
D_f	: Tendon çapı
ν	: Poisson oranı
a	: Dalga genliği
ω	: Dalganın açısal frekansı
T	: Dalganın periodu
c	: Tekil dalga hızı
k	: Dalga numarası
L	: Dalga boyu
d	: Su derinliği
U_f	: En hızlı rüzgar hızı
U_{3600}	: 1 saatlık ortalama rüzgar hızı
U_A	: Rüzgar gerilme faktörü
F	: Feç mesafesi

H_s	: Belirgin dalga yüksekliği
T_s	: Belirgin dalga periodu
F_{total}	: Deniz yapısına gelen toplam kuvvet
F_d	: Sürükleme kuvveti, su ve yapı arasındaki hız farkı
F_i	: Atalet kuvveti, yani dalga parçacıklarının ivmesinden kaynaklanan kuvvet
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
A	: Referans alanı (genellikle silindirin ön yüzey alanı)
V_r	: Silindirik yapı eksenini seviyesindeki akışkan zerresinin eksene dik yatay hızı
D	: Silindir çapı
ρ_a	: Standard sıcaklık ve basınçtaki hava kütle yoğunluğu
V_w	: Rüzgâr hızı
C_s	: Şekil katsayısı

Kısaltmalar:

1D	: Bir boyutlu (One dimensional)
2D	: İki boyutlu (two dimensional)
3D	: Üç boyutlu (three dimensional)
SE (FE)	: Sonlu elemanlar (Finite element)
BA (RC)	: Betonarme (Reinforced concrete)
AG (PT)	: Ard Germe (Post-tensioned)
SPT	: Segmental post-tensioned

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Condeep tip açık deniz platformu.....	2
Şekil 3.1. Condeep platform destek bölümlerinde iç kuvvet ve yer değiştirme şeması 17	
Şekil 3.2. DIANA eleman modelleri: (a)1D çubuk, (b) 2D kabuk, ve (c) 3D katı eleman. (Ferreira, D., & Manie, J. (2022).)	22
Şekil 3.3. Deneysel çalışmanın yükleme prensibi (Jason vd. 2013).....	25
Şekil 3.4. Test kirişleri üzerinde yükleme düzeni. (Tao & Du, 1985)	26
Şekil 3.5. Segmental kirişin deneysel test programı	27
Şekil 3.6. Segmental arayüz modelleri: a) Birleşim rijitliği, b) 2D kabuk, ve c) 3D katı (Ferreira, D., & Manie, J. (2022).).....	28
Şekil 3.7. Suda esnek silindir (Han, 1996)	31
Şekil 3.8. Gerçek bir yapının temsiledici sonlu elemanlar modeli. a) Gerçek Condeep platformu (Oljemuseum) b) prototip yükleme modeli. c) SE modeli	33
Şekil 3.9. Dairesel boşluklu segmental kirişlerinin sonlu eleman modeli: (a) destek ve yükleme plakalı dairesele kiriş, (b) uzununa ve dairesele donatılar ve (c) ard germe tendonları, (d) segmental birleşim detayları.....	35
Şekil 3.10. Yedi hücreli destek alt yapısının dikey bir silindirik gövde ile değiştirilmesini öneren sadeleştirme (Faltinsen ve Timokha, 2016)	39
Şekil 3.11. Sinüzoidal dalga.....	40
Şekil 3.12. Dikey silindire etkileyen dalga yükleri.....	42
Şekil 3.13. Rüzgâr yönüne göre hız değişiminin değişimi (Metebblue, 2023).....	43
Şekil 3.14. Deprem analizi için ilgili tepki spektrumu	46
Şekil 3.15. DIANA SE ile Draugen Condeep platformunun modellenmesi: (a)- Monolitik model, (b) Segmental model, (c) Sıvı-yapı etkileşimi modelinin mesh olunmuş şekli, (d) Donatı modeli, (e) Tendon modeli.	50
Şekil 4. 1 Dairesel ard germenin etkisi altında olan sualtı yapının kabuğunda betonda oluşan çekme kuvveti (a)ve momentinin (b) değişimi.....	54
Şekil 4. 2. Betonarme kirişin yük – yer değiştirme eğrisi.....	55
Şekil 4. 3. Betonarme kirişin deneysel (a) ve sayısal (b) modelinde çatlak dağılımı (Jason vd., 2013)	56

Şekil 4. 4. A9 (a) ve A8 (b) ard germeli kirişlerinin Yük – Deplasman eğrisi.....	57
Şekil 4.5. Ard germeli betonarme kirişlerin (A8, A9) deneysel (a) ve sayısal (b) modelinde çatlak dağılımı. (Tao & Du, 1985)	58
Şekil 4.6 . Ard germeli segmental kirişlerin Yük – Deplasman eğrisi: (a)- G1 kirişi, (b)- G2 kirişi, (c)-G3 kirişi, (d)- G4 kirişi.....	60
Şekil 4.7. Deneysel ve sayısal modeller üzere çatlak dağılımı: (a)- G1 kirişi, (b)-G2 kirişi, (c)-G3 kirişi, (d)- G4 kirişi. (Al-Sherrawi vd., 2018)	60
Şekil 4.8. Vakum ve su ortamında titreşimler için doğal frekans tahminlerinin karşılaştırılması.	62
Şekil 4.9. Sıvı ve vakumda titreşim mod şekilleri	63
Şekil 4.10. Dairesel boşluklu segmental kirişin yük-deplasman eğrisi: (a) Dönen çatlak modeli, (b) Sabit çatlak modeli ve (c) segment sayısına göre rijitlik değişimi.....	66
Şekil 4.11. Nihai yük aşamasında boş daireseel segmental ard germeli kirişlerinin çatlak dağılımı ve birleşim açıklıkları: (a) 1 segmentli kiriş, (b) 2 segmentli kiriş, (c) 3 segmentli kiriş, (d) 4 segmentli kiriş.	67
Şekil 4.12. 5 segmentli boşluklu daireseel kirişin farklı yük aşamaları için çatlak dağılımı ve birleşim açıklıkları: (a) Yük aşaması=0.25, (b) yük aşaması=0.5, (c) yük aşaması=0.75, (d) yük aşaması=1	68
Şekil 4.13. Segment birleşiminde göçmeye kadar olan açıklık genişliği değişim grafiği: (a) Dönen çatlak modeli ve (b) Sabit çatlak modeli.....	69
Şekil 4.14. Beton basınç dayanımına göre kesit ve birleşim kapasitelerinin değişimi ...	70
Şekil 4.15. AG daireseel boşluklu segmental kirişin yük-deplasman eğrisi.....	71
Şekil 4.16. 5-segmentli kirişte her beton basınç dayanımı için segment birleşim genişliği: (a) Segment birleşim açıklığı yayılımı (b) Segment birleşim genişliğinin maksimum değerleri	72
Şekil 4.17. Kesit (VC) ve birleşim (Vn) kesme kapasitelerinin değişim eğrileri (a) ve iç kuvvetlerin (V), monolit (b) ve segmental (c) platform boyunca değişimi	74
Şekil 4.18. Yük–yatay yer değiştirme eğrileri: (a) monolit (b) ve segmental (c) platformlar.....	75
Şekil 4.19. Platformlar boyunca betonun maksimum Cauchy gerilmesi dağılım eğrileri: (a) monolit (b) ve segmental (c).....	76
Şekil 4.20. Platformlar boyunca donatının maksimum Cauchy gerilmesi dağılım eğrileri: (a) monolit (b) ve segmental (c).....	77

Şekil 4.21. Platformlar boyunca ard germe tendonunun maksimum Cauchy gerilmesi dağılım eğrileri(a), monolit (b) ve segmental (c) 78

Şekil 4.22. Çatlak yayılım eğrileri (a) monolit (b) ve segmental (c) platform 79



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Beton ve çelik için SE modelleri	23
Tablo 3.2. Doğrulama çalışmalarının parametreleri	24
Tablo 3.3. Prototip ve modelin geometrik özellikleri	33
Tablo 3.4. SE modelin tasarım değişkenleri	34
Tablo 3.5. Kesit ve birleşimin kesme kapasitesi.....	36
Tablo 3.6. Dalga parametreleri	44
Tablo 3.7. Boşluklu Dairesel Kesit ve Birleşimin Kesme Dayanımı	48
Tablo 3.8. SE modelin tasarım parametreleri.	49
Tablo 3.9. ULS ve SLS için önerilen kısmi yük faktörleri. (DNV-OS-C502).....	52
Tablo 4.1. Yükleme oranı ile segmental birleşim açılması arasında ilişki.	70
Tablo 4.2. Platformun modal karakteristikleri.....	73

1. GİRİŞ

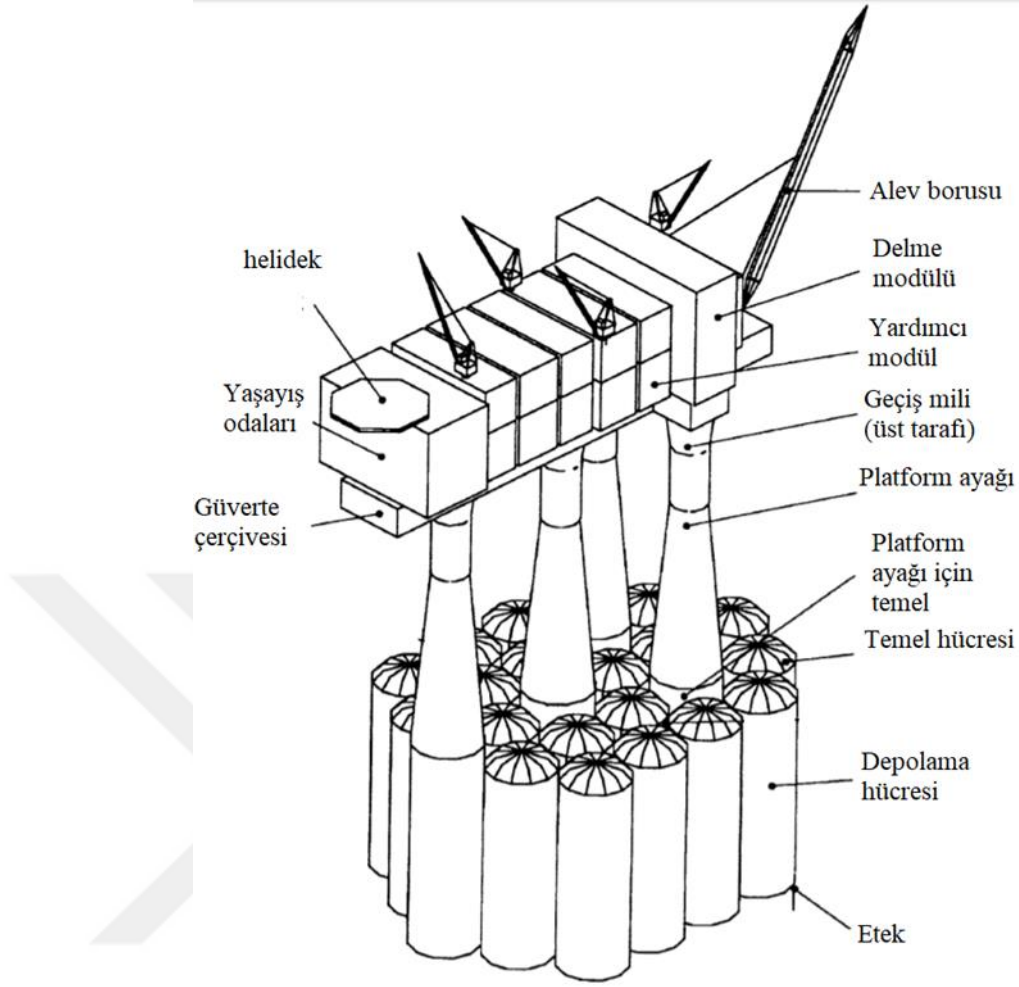
Açık deniz petrol ve doğalgaz platformları, modern endüstrinin artan enerji ihtiyacını karşılamak için önemli derecede kritik altyapı unsurlarıdır. Dünya genelindeki enerji talebinin artması, açık deniz platformlarının yapım teknolojilerinde yenilik ihtiyacını artırmıştır. Açık deniz platformları, deniz tabanından hidrokarbonların çıkarılması için kullanılır ve bu nedenle tasarımlarının hem ekonomik hem de yapısal olarak dayanıklı olması gereklidir. Bu noktada, platformun inşa edileceği su derinliği, çevresel koşullar ve platformun işlevi gibi faktörler tasarım sürecinin temel belirleyicileridir.

Platformlar genellikle hareketli ve sabit olmakla iki ana kategori altında sınıflandırılır. Hareketli platformlar, suyun üstünde konumlandırılarak dalgaların, rüzgârın ve akıntıların etkisiyle yer değiştirebilen yapılardır. Sabit platformlar ise, deniz tabanına sabitlenmiş veya ağır beton yapılar aracılığıyla yerinde duran yapılardır. Sabit platformlar genellikle daha derin sularda ve uzun vadeli projelerde tercih edilir.

Condeep tip platformların en büyük avantajı petrolün yapı içerisinde depolanmasına izin verme özelliğidir. Ayrıca, deniz veya okyanustan etkili bir şekilde korunan içi boş ayaklar, yapı içerisinde kullanılacak donanımların kurulumuna izin vermektedir. Buna karşılık, çelik platformlarla ilgili zorluklardan biri, üretim ile ilgili donanımların ve yaşam alanlarının ağırlığının nadiren sorun olduğu bir Condeep ile karşılaştırıldığında, platformda yalnızca sınırlı ağırlığa izin vermeleridir. Condeep platform yapısı temelde depolama hücreleri, kuleler ve güverte yapısı olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır (Şekil 1.1). Açık denizde yerinde döküm beton imalatının yapılmasındaki güçlüklerden dolayı, bu tip yapılarda ön üretimli beton ünitelerin açık deniz montaj yöntemleri kullanılmaktadır. Hücreler ve kulelerin tasarımı ard germeli olarak yapılabilmekte ve güverte çelik olarak tasarlanabilmektedir. Burada, kulelerin ve depolama alanlarının sayısı çıkarılan petrolün hacminden ve etkileyen yüklerin miktarına bağlı olarak belirlenmektedir.

Açık deniz platformlarının yapımında kullanılan malzemeler ve teknikler, projenin ekonomikliği ve yapısal bütünlüğü açısından belirleyici bir rol oynar. Betonarme (BA) ve ard germeli (AG) beton, açık deniz platformlarının inşasında yaygın olarak kullanılan ana malzemelerdir. Açık deniz platformlarının çoğu karada imal edilir ve ardından büyük taşıyıcı gemiler ve mavnalar aracılığıyla montaj alanlarına taşınır. Bu nedenle, yapı elemanlarının hafif ve taşınabilir olması büyük önem taşır. Bu doktora çalışmasının amacı, sabit bir açık deniz platform tipi olan ve daha önce Norveç'te uygulanmış Condeep tipli açık deniz platformlarının daha ekonomik ve daha kolay bir şekilde tasarımını gerçekleştirmektir. Bu bağlamda, ard germeli ve parçalı (segmental) tasarım tekniklerinin, Condeep tipi platformların daha derin sularda ve daha düşük maliyetle üretilmesi için nasıl uygulanabileceği araştırılmıştır.

Çalışmanın metodolojisi dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, dairesel ard germinin efektifliği mekanik denklemlerle araştırılmış ve iç ve dış basınca maruz kalmış yapıda dairesel ard germinin kabuk yapının duvarındaki betondaki çekme kuvvetine (dolayısıyla gerilme) nasıl etki ettiği araştırılmıştır.



Şekil 1.1. Condeep tip açık deniz platformu

İkinci bölümde SE analizi ile elde edilen sayısal sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği incelenmiştir. Bu bölümde, BA ve AG kirişlerin yanı sıra segmental kirişler üzerinde elde edilen sayısal sonuçlar, önceki deneysel çalışmaların verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu analizler, DIANA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve 1D çizgi, 2D kabuk ve 3D katı sonlu eleman (SE) modelleri kullanılmıştır. Özellikle 3D katı modellerin, içi boş dairesel segmental yapı sisteminin gerçek yapısal davranışını yansıttığı ve en doğru sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırma, SE analizi ile deneysel sonuçlar arasındaki uyumu doğrulayarak, modelleme yönteminin güvenilirliğini test etmiştir. Sonrasında, sıvı-yapı etkileşimi göz önünde bulundurularak yapılan dinamik analizlerde, 3D SE modelleme yönteminin yapının modal frekans ve mod şekli gibi dinamik karakteristiklerini ne ölçüde yansıttığı literatürden elde edilmiş olan su ve vakum altındaki silindirin titreşim özelliklerinin analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasıyla saptanmıştır. Çalışmanın üçüncü kısmında, yapılan parametrik çalışmada, farklı beton basınç dayanımı, segment bağlantı genişliği ve segment sayısı gibi değişkenlerin yapısal performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada, segmental yapıların SE analizi aracılığıyla yapısal davranışını incelemek hedeflenmiştir. Son bölümde, açık deniz platformlarının tasarımı için yeni bir segmental analiz ve tasarım yaklaşımı ortaya konulmuştur. Bu bölümde, gerçek deniz yapısının monolitik ve segmental türlerinin

tasarımı detaylı bir şekilde ele alınmış ve yapısal performansın zorlu açık deniz koşulları altında nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bu çalışma, daha güvenli, verimli ve esnek açık deniz platformları inşa etmek amacıyla modüler bir inşaat metodolojisinin geliştirilmesine odaklanmıştır.

Çalışmanın sonucunda, önerilen segmental tasarım yaklaşımının, açık deniz platformlarının daha ekonomik, güvenli ve esnek bir şekilde tasarlanmasına ve inşa edilmesine olanak sağlayacağı öngörülmektedir. Bu yaklaşım, derin deniz koşullarında bile güvenilirlik ve dayanıklılık sağlayacak modüler bir yapım metodolojisini desteklemektedir. Önerilen metodoloji, açık deniz platformlarının inşasında yeni bir endüstri standardı oluşturma potansiyeline sahiptir.



2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölümde, Condeep tipi deniz platformlarının analizi ve tasarımıyla ilgili kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu tarama, Condeep platformlar ve genel olarak segmental yapılarından başlayarak, bu yapıların tasarımı, malzeme seçimi, imalat teknikleri ve yapısal performansı ile ilgili çeşitli çalışmaları içermektedir. Condeep platformlarının segmental yapısının incelenmesi hem tek başına segmentlerin analizini hem de bu segmentlerin birleşimlerinin incelenmesini içermektedir. Bu kapsamda, segmental yapıların tasarımında ve uygulanmasında karşılaşılan mekanik, yapısal ve estetik zorluklar ele alınmıştır. Tarama, Condeep tipi deniz platformlarının segmental olarak tasarlanması ve inşa edilmesi sürecinde yol gösterici olacak önemli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

2.1. Condeep Tip Deniz Platformları

Condeep tipi deniz platformları, yüksek dayanımlı beton ve çelik gibi dayanıklı malzemeler kullanılarak inşa edilen ve özellikle Norveç'in zorlu deniz koşullarında başarıyla uygulanan yenilikçi açık deniz yapılarıdır. Bu platformlar, su altı petrol ve doğalgaz çıkarma faaliyetlerinde önemli bir rol oynamakta olup hem ekonomik hem de yapısal avantajları nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu literatür taramasında, Condeep tipi deniz platformlarının tasarımı, inşası ve performansı ile ilgili mevcut çalışmalar incelenecek ve bu alandaki teknolojik ilerlemeler değerlendirilecektir.

Eide vd. (1977), Brent B Condeep Üretim Platformu'nun başarılı bir şekilde kurulumunu inceleyerek, yapılan tasarımın arkasındaki mühendislik tekniklerini vurgulamıştır. Deniz altı koşullarının zorluklarına rağmen, platformun deniz yüzeyinden su altına taşınması, sabitlenmesi ve üretim sürecinin başlatılması gibi kritik adımlar incelenmiştir. Yazarlar, Brent B Condeep Üretim Platformu'nun tasarımını etkileyen detayları açıklarken, proje planlamasının, teknik tasarımın, malzeme seçiminin ve ekipman kullanımının önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma, deniz mühendisliği ve enerji endüstrisindeki önemli olarak, derin denizlerdeki yapıların tasarımı ve kurulumu konusundaki mühendislik becerilerinin ve çabalarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır.

Ramstad ve Gudbrandsen (1980) yaptığı çalışmada, STATFJORD B üretim, sondaj, platformunun yapısal analizini ele almaktadır. Platform, betondan yapılmış olup 1981 yılı ağustos ayında Kuzey Denizi'nde 149 metre derinlikte konumlandırılmıştır. Sonlu eleman modelinin seçiminde istenen sonuç doğruluğu, mevcut teknoloji, işgücü ve maliyet gibi temel etmenler ışığında tartışılmıştır. Burada, çatlak genişliği sıkı sınırlar içinde tutulmasının önemi vurgulanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan analitik çalışmalarda, donatı akması ve çatlama gibi durumlar nedeniyle betonun doğrusal olmayan davranışını açıklamak için, değiştirilmiş bir kabuk teorisi temel alınarak basitleştirilmiş doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Adebar (1989)'nin yaptığı çalışmada, beton kabuk deniz yapıların davranışını modellemek için SHELL474 adı verilen üç boyutlu doğrusal olmayan SE tipinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen eleman tipi, sekiz adet kesit tesirine (üç membran kuvveti, üç eğilme momenti ve iki kesme kuvveti) maruz kalan beton kabuk yapıların davranışını modellemek amacıyla kullanılmış olup, kesme kuvvetinin etkisini

verimli ve etkili bir şekilde hesaba katabilmek için kesitte sadece bölüm orta yüksekliğindeki üç eksenli beton gerilmelerini dikkate almaktadır. SHELL474 eleman tipi, modifiye edilmiş basınç alanı teorisinin üç boyutlu bir genelleştirmesine dayanmaktadır ve çatlak betondaki çekme gerilmelerini hesaba katarak bu gerilmelerin çatlaklar boyunca iletilen yükleri aktarabilmelerini sağlamaktadır. Taban tasarımında membran kesme ve enine kesmeye maruz kalan BA yapıların doğru bir şekilde tasarlanması, gerilme uyumluluğu prensiplerine dayalı yöntemlerin kullanımını gerektirmiştir.

Adebar ve Collins (1994), modifiye edilmiş basınç alanı teorisinin üç boyutlu genelleştirmesini kullanarak bu probleme odaklanmıştır. Geliştirilen yöntemde, çatlaklar arasındaki betonda oluşan üç eksenli gerilmeler ve çatlak yüzeyindeki kesme gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur. Araştırmada, mevcut tasarım yaklaşımlarının eksikliklerini vurgulanmış ve özellikle eksenel yük durumlarında geleneksel kiriş kesme tasarım denklemlerinin sınırlamalarına dikkat çekilmektedir. Ayrıca, önerilen üç boyutlu modifiye edilmiş basınç alanı yaklaşımının BA yapılar için daha uygun bir kesme tasarım yöntemi olarak kullanılmasını önerilmiştir.

Helmy (1998), hidrostatik basınç altındaki BA yapıların dayanımını değerlendirmek için deneysel ve analitik bir yöntem geliştirmiştir. Yapılan deneysel çalışma, Condeep yapısının bir depo hücresinin tipik üst kubbe-duvar birleşiminin 1:13 ölçekli üç boyutlu modeli ile gerçekleştirilmiş ve eleman 147 metre su derinliğinde hidrostatik basınca dayanacak şekilde test edilmiştir. Ancak, göçmeden hemen önce, kubbenin tabanında yatay çatlaklar ve bu çatlaklardan su akışı gözlenmiştir. Analitik çalışmada kullanılan eleman modellenmesinde LNADS adlı basit bir doğrusal olmayan uygunluk analizi programı ve MSP adlı bir global doğrusal olmayan SE programı kullanılmıştır.

Otunyo (2011), petrol ve gaz endüstrisinde ham petrol ve gaz depolama amaçlı deniz üstü BA yerçekimi platformlarının tasarımında kullanılan tasarım değişkenlerini incelemiş ve temel çevresel yüklerin (rüzgâr ve dalga), akım kuvvetlerinin, buz yüklerinin ve deprem yüklerinin tasarım ve inşaa sürecine olan etkilerini belirtmiştir. Araştırmada deniz üstü BA yerçekimi platformlarının tasarımı ve çelik platformlara göre beton deniz üstü yapılarının avantajları ele alınmış ve dalga yüklemesine beton yerçekimi platformlarının davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak, BA deniz üstü yapılarının kapsamlı bir kapasite analizi gerektirdiği ve bu analizin nadir doğal veya insan yapımı olaylar (deprem, olumsuz buz koşulları, çarpışmalar veya patlamalar gibi) durumunda yapıyı göçmeden korumak için gerekli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yapının kurulumunun tüm yönleri, batırma ve deniz tabanına yerleştirme dahil, en büyük dikkatle planlanması ve gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Helmy ve Collins (2016), BA yapıların analizini çatlak betonun üç boyutlu gerilme-gerinim ilişkisini kullanarak RASP olarak da adlandırılan VecTor6 adlı doğrusal olmayan SE programı ile gerçekleştirmiştir. Yapılan analizlerde, Condeep yapısının tipik bir üst kubbe-hücre duvar birleşimi 1:13 ölçekli 3 boyutlu modelinin davranışı incelenmiştir. Model, 129-134 m deniz suyu eşdeğerine maruz kaldığında hücre duvarının üst kısmında eğilme-kesme göçme modu öngörülmesine rağmen, analizde çatlaklardaki su basıncının zararlı etkisini göz ardı edildiğinden dolayı teorik ve gözlemlenen modelin davranışı arasında sapma olduğu vurgulanmıştır. RASP programı, model yapıda maksimum yük taşıma kapasitesini oldukça iyi tahmin etmesine rağmen ani göçme modunu tahmin

etmede daha az başarılı olmuştur. Ayrıca, 1:13 ölçekli modelin basınç testinin sonuçlarının prototip yapılara uygulanmadan önce kesme etkisi ve beton dayanımı gibi çeşitli değişkenlerin de incelenmesinin gerekliliği belirtilmiştir.

Faltinsen ve Timokha (2016), deniz tabanlı yerçekimi monotiplerinin titreşimlerini hesaplamak için kullanılan analitik bir yöntem geliştirmiştir. Yapılan çalışmada, deniz tabanlı yerçekimi monotipler için yapısal, zemin kaynaklı ve hidrodinamik sönümlenme kaynaklarını ve doğrusal olmayan etkileri ele alınmıştır. Bu tür yapılardaki titreşimleri hesaplamak için kullanılan matematiksel model ile zemin geri bildirim kuvvetleri, platform atalet kuvvetleri ve hidrodinamik yükleri hesaba katılmıştır. Ayrıca, Draugen platformu ve bazı tek gövdeli platformlar için farklı geometrik ve fiziksel parametrelerin etkisi sayısal örneklerle açıklanmıştır.

Sadeghi vd. (2017), deniz üstü platformlarının birçok türe ayrıldığı ve temel olarak kurulum yerindeki su derinliğine göre kategorize edildiği belirtilmektedir. Ancak, her bir türün kullanım amacına ulaşması için tasarımı farklılık göstermesi gerektiği belirtilmiştir. Modern platformlar genellikle çelikten yapılmakta, karada inşa edilmekte ve daha sonra kurulum noktalarına taşınmaktadır. Ancak Kuzey Denizi gibi bazı deniz derinlikleri ve agresif çevreler için çelik yapılar uygun olmadığından, en ağır tipte olan ve büyük bir kütlede olan yerçekimi platformları kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, yerçekimi platformlarının işletme prosedürleri, kullanılan malzeme türleri ve özellikleri, özel yapım yöntemleri, taşıma ve kurulum prosedürleri sunulmaktadır.

Okpe ve Edeh (2022), deniz üstü platformlarının birçok türe ayrıldığı ve temel olarak kurulum yerindeki su derinliğine göre kategorize edildiği belirtilmektedir. Bunun yanında, temel çevresel yüklerin (rüzgar ve dalga), akım kuvvetlerinin, buz yükleri ve deprem yüklerinin, deprem riski olan bölgeler için BA yerçekimi platformlarının tasarımı ve inşasında dikkat edilmesi gerekli noktalar açıklanmıştır. Kabuk yapıların analizi ve tasarımı için iki tasarım yöntemi ve deniz üstü BA yerçekimi platformlarının tasarımı için Tanjant Modülü yöntemleri tartışılmıştır.

2.2.Segmental Yapılar

Segmental yapılar, modüler bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulur ve genellikle önceden imal edilmiş elemanlar kullanılarak monte edilirler. Segmental yapılar, esneklik, ekonomiklik ve yapısal dayanıklılık gibi avantajlar sunar ve farklı mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu bölümde, segmental yapıların tasarımı, üretimi ve uygulamasıyla ilgili mevcut araştırmaları inceleyecek ve bu alandaki en son gelişmeleri değerlendirecektir.

Sobek vd. (2013), deniz üstü rüzgâr türbinlerinin kulelerinin çoğunun çelikten oluştuğunu ve bazı yenilikçi sistemlerde yerçekimi tabanlı hibrit yapıların kullanıldığını vurgulamıştır. Çalışmada, çelik kulelerin yerine merkezi olarak ön gerilmeli bir kule kullanımını önererek ekonomik ve ekolojik açıdan umut vaat eden bir alternatif sunmaktadır. Bu alternatif, ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton (UHPFRC) ile segmental inşaat yöntemini bir araya getiren bir kule yapısını içermektedir. Çalışmada, UHPFRC kule yapısı kavramı sunulmaktadır. Kavramsal tasarımın sınırları içinde, bir öz frekans analizi gerçekleştirilmiş ve bu analiz sonuçları Campbell Diyagramı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu kavramın sunduğu yenilik, deniz üstü rüzgâr türbinleri için

merkezi olarak ön gerilmeli bir kule yapısı için UHPFRC ile segmental inşaat yöntemini son derece avantajlı bir şekilde bir araya getirmesinden kaynaklanmaktadır. Segmental inşaat yönteminin avantajları, UHPFRC kule yapısı için ön gerilme konsepti ile vurgulanmıştır. Kavramsal tasarımın sınırları içinde, yerçekimi taban temeli ve UHPFRC kule yapısından oluşan bir yapının birinci öz frekansıyla ilgili bir parametre çalışması yapılmış ve sonuç Campbell Diyagramında gösterilmiştir. Dinamik inceleme sonuçlarının umut vaat etmesi dikkate alındığında, sadece çelik kulelerin değil, aynı zamanda yerçekimi taban temelini de bir UHPFRC çözümü ile değiştirilmesi düşünülmektedir.

Loth vd. (2010) tarafından yapılan çalışma, suda yapılan büyük ölçekli rüzgar türbini sistemleri için bir şekil değiştirebilen segmental bir tasarım önermektedir. Bu konsept, vida soketleri ile birbirine bağlı olan segmental kanatlar ve bir AG kablosu sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Düşük rüzgar ve rotor hızlarında, segmental kanatlar tamamen gerilmekte ve düşük hızlarda başlatma ve maksimum güç sağlamak için yüksek eğime getirilmektedir. Ayrıca, segmental kanat konseptinin, aşırı ölçekli sistemler için imalat ve nakliye kısıtlamalarını hafifletebileceği gösterilmiştir.

Kim (2017), boşluklu segmental ön gerilmeli beton köprü kolonlarının performansını incelemeyi amaçlamaktadır. Segmental köprü kolonları, eksenel yük ve tersinir çevrimsel yanal kuvvet etkisi altında test edilmiştir. Analiz sırasında RCAHEST bilgisayar programı kullanılmıştır. P-M etkileşim diyagramları, segmental köprü kolonlarının tasarım dayanımını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Birçok değişken arasından, bu çalışma beton basınç dayanımı, ön germe donatı oranı, etkili ön germe, tendon merkez hatlarının dış çapı üzerinden geçen daire çapı ve kesitin dış çapı oranı ve kesitin iç çapı ile dış çapı oranı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çalışma, kesme direncine sahip bir bağlantı elemanı ile boşluklu ve ön üretimli segmental ön gerilmeli beton köprü kolonlarının kullanımını incelemiştir.

2.3.Segmental Kolonlar

Segmental kolonlar, büyük yapıların desteklenmesinde yaygın olarak kullanılan önemli yapısal bileşenlerdir. Bu kolonlar, genellikle beton veya çelik gibi dayanıklı malzemelerden imal edilir ve modüler segmentlere bölünmüş şekilde monte edilir. Segmental kolonların tasarımı ve uygulaması, yapıların dayanıklılığı, ekonomisi ve estetiği açısından kritik öneme sahiptir. Bu literatür taraması, segmental kolonların tasarım prensipleri, malzeme seçimi, montaj teknikleri ve yapısal performansıyla ilgili mevcut araştırmaları inceleyecek ve bu alandaki en son gelişmeleri ele alacaktır.

Ou diğ. (2013), kolon alt bölgesinin segmental olarak tasarlandığı yeni bir segmental beton köprü kolonu önermektedir. Segmental bölgenin yüksekliği ve bu bölgedeki gerilme kuvveti seçilmiş ve kolonun deprem yüklemesi altındaki davranışı, geleneksel bir plastik mafsal mekanizması ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, kolon tersinir ve çevrimsel yükleme altına test edilmiştir. Test sonuçları, kolonun sünek ve enerji absorpsiyonuna sahip olduğunu göstermektedir. Analitik çalışmada, kolonun tersinir çevrimsel yükleme altındaki davranışının zarfını, eksenel kuvvet artışını ve segmental bölgelerin kolon yanal yer değiştirmesine katkısını test sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Segmental birleşimde gözle görülür miktarda açılma ve eklem köşelerinde beton ezilmesi gözlenmiş, ancak eklem şekil değiştirmesinin kolon yanal yer değiştirmesine katkısı göçme durumunda önemli olmadığı ortaya çıkmıştır.

Bu vd. (2016) dört farklı donatı tipi ve düzenlemesi olan 1/4 ölçekli prefabrike segmental köprü kolonu ve monolitik referans kolonu çevrimsel statik yükleme altında test etmiştir. Testler sırasında segmental kolonlara eksenel yük, ard germe donatısı tarafından sağlanmıştır. Hem bağlanmamış tendonlarla hem de bağlanmamış tendonlar ve bağlanmış hafif çelik çubuklarla segmentleri birleştirmek için bağlanmamış gerilimli kablolar kullanılmıştır. Çalışmada, bağlı enerji dağıtıcı (ED) çubuklar kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, kolonun sadece alt birleşimlerde küçük beton çatlakları veya ezilmeleri olduğunu gözlemlenmiştir. Uygun tendon düzenlemesine sahip segmental kolonlar, yüksek yanal dayanım ve orta düzeyde enerji emme yeteneği göstermiştir. Çalışma, prefabrike segmental köprü kolonlarının inşaat hızını ve kalitesini artırmanın yanı sıra çevresel kirliliği azaltma ve yaşam döngüsü maliyetlerini düşürmenin avantajlarını sağladığını belirtmektedir.

Li vd. (2017), performansı henüz iyi bilinmediği için uygulamaları halen sınırlı olan segmental kolonların deprem performansını araştırmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, tersinir çevrimsel yükleme altında segmental kolonların yanal performansı belirlenmiş ve segmental kolonlar için 3D SE modelleri geliştirilmiştir. Sayısal modeller, öncelikle test sonuçlarına göre doğrulanmış ve ardından parametrik çalışmalar yapmak için kullanılmıştır. Tendon bağlama koşulları, toplam başlangıç eksenel kuvvet düzeyi, segmentlerin sıkıştırılması, segment sayısı ve ED çubuklar gibi beş değişkenin, segmental kolonların performansı üzerindeki etkileri sistemli bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, enerji emme kapasitesini artırmak ve segmental kolonların kalıcı kaymasını azaltmak için şekil hafızalı alaşım çubukları olan kolonlar da incelenmiştir. Hem yumuşak çelik hem de ED çubukların kolonun enerji emme kapasitesini artırabileceği, ancak çubuklarının karakteristik özellikleri nedeniyle kalıcı kaymayı en aza indirebileceği bulunmuştur. Bu çalışma, farklı faktörlerin segmental kolonların performansı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde belirlemektedir.

Li vd. (2017 ve 2018), ön üretimli segmental BA kolonlar deprem yüklerine karşı performansını araştırmak amacıyla tek bir monolitik kolonun referans olarak kullanıldığı deneysel bir çalışmayı sunmaktadır. Çalışma, ED çubuklarının yerleştirilmesi, kayma kilitlerinin kullanımı ve segment sayısının değiştirilmesi gibi farklı tasarım unsurlarının, segmental sütunların çevrimsel yüklere karşı performansı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, kolonların üst uçlarının dönme serbestliği bu çalışmada kısıtlanmıştır. Deney sonuçları, segmental kolonların monolitik kolona göre daha sünek davranış gösterdiğini ve dolayısıyla daha iyi deprem performansı sergilediğini belirtmektedir. Ancak segmental kolonların daha az yanal dayanıma ve daha az enerji absorpsiyonuna sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışma, ED çubuklarının segmental kolonlarda enerji absorpsiyonunu artırabildiğini, ancak daha büyük kalıcı yer değiştirmeye yol açabileceğini ve beton kayma kilitlerinin segmentler arasındaki kaymayı engelleyebildiğini, ancak aşırı stres konsantrasyonundan dolayı ciddi hasara neden olabileceğini göstermektedir. Segment sayısının ise segmental kolonun performansı üzerinde gözle görülür bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, segmental kolonların deprem performansını artırmak amacıyla geliştirilmesi gereken alanlar vurgulanmış ve ileri çalışmaların bu yapıların pratik uygulamalarda kullanımını artırma potansiyeli gösterilmiştir.

Zhang ve Hao (2019), ön üretimli segmental kolonların yanal darbe yüklemesi altında performansını incelemiş ve segmental kolonun tabanına yakın darbe aldığı anda

gösterdiği davranışa odaklanmıştır. Yanal darbeler, iki alt segment arasındaki segmental birleşime veya taban beton segmentinin merkezine doğrudan uygulanmaktadır. Çalışmada, detaylı üç boyutlu bir sayısal model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar laboratuvar darbe testi sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Kolon hasar durumu ve göçme modları analiz edilmiştir. Sayısal simülasyonlar aracılığıyla, AG tendonundaki ön germe düzeyinin ve beton dayanımının, tabana yakın darbelere maruz kalan segmental kolon performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Segmental kolonun davranışının, kolonun tabanına yakın darbelere maruz kalsa bile hala esas olarak eğilme baskınlı olduğu saptanmıştır. Ancak, alt segmente doğrudan darbe alındığında, sütun üzerinde kayma deformasyonu ve hasar oluşabilgi belirlenmiştir. Parametrik çalışma yoluyla, tendon içindeki ard germe kuvvet düzeyinin, kolonun yan darbelere karşı direncini artırdığı ve sütunun yanal yer değişime düzeyini azalttığı saptanmıştır. Ancak, alt beton segment doğrudan darbe altında yüklendiğine daha şiddetli beton kayma hasarına yol açabileceği ortaya çıkmıştır. Daha yüksek dayanımlı beton kullanımının, darbe yüklerine maruz kalan segmental kolon performansında fark edilir bir iyileşme sağlayabileceği belirlenmiştir.

Do vd. (2019), segmental kolonun iki en alt segmentin çelik tüplerden oluştuğu ve tüm segmentlerin çelik tüplerden oluştuğu kolon elemanlarını darbe yükleri altında sayısal olarak incelemiş ve karşılaştırmıştır. İki en alt segmentin çelik tüplerle sınırlanması, kolonun göçme modunu yerel göçmeden global göçmeye doğru kaydırarak saptanmıştır. Ayrıca, kullanılan çelik kayma kilitleri segmental kolona entegre edilmiş ve kolon kesme kapasitesini artırmak için kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, çelik kayma kilitlerinin kolon davranışının segmentler arasındaki kayma kaymaları tarafından belirlendiği durumlarda yanal yer değiştirmeyi ve tendonlardaki kesme kuvvetini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca, beton segmentlerin sınırlanmasının, segmental kolonların darbe direnci kapasitesini büyük ölçüde artırdığı, büyük darbe yükleri altında eklem açıklıklarından kaynaklanan tendon gerilmelerinin artabileceği ve tendon kopmasına neden olabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle, kolon AG kuvvetinin önerilen değerin altında olması önerilmiştir. Ayrıca, darbe yükleri altında segmentlerdeki yerel göçmenin azaltılmasının yanı sıra kolonun global tepkisinden kaynaklanan üst segmentlerdeki hasarı azaltması nedeniyle kolon segment sayısının sınırlandırılması önerilmiştir. Bunun yanında, tendon kesme göçmesini önlemek ve kolonun darbe yükü altında artık deplasmanını azaltmak için darbe noktasının alt segmentin üstüne yakın bir konumda tasarlanması gerektiği belirtilmiştir.

Teng vd. (2020), deniz suyunun donma-çözülme döngülerinin segmental beton köprü kolonlarının deprem performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Gelgitlerin döngüsel etkisi ve deniz suyu ile atmosfer arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle, soğuk iklimlerde kıyı iskeleler kaçınılmaz olarak deniz suyu donma-çözülme döngüleri yaşarlar. Çalışmanın amacı, farklı donma-çözülme döngüleri, askı demiri aralığı değerleri, eksenel basınç oranları ve boyuna donatı çaplarına sahip 12 numune üzerinde yapılan düşük çevrimli yükleme testine dayalı olarak, segmental beton kolonlarının deprem performansını, çatlama ve göçme modları, çevrimsel davranış özellikleri, zarf eğrileri, rijitlik azalımı ve enerji absorpsiyon kapasitesi analiz ederek değerlendirmektir. Deneysel sonuçlar, aynı tasarım değişkenlerine sahip numuneler için donma-çözülme döngü sayısındaki artışın, yan yükün tepe değerini, başlangıç rijitliğini ve kümülatif enerji absorpsiyonunu sürekli olarak azaltırken, tepe yer değiştirmesini sürekli arttırdığını göstermiştir. Tüm numunelerde düşük çevrimsel yükleme testi sırasında enine çatlaklar, çapraz çatlaklar ve

dikey kayma çatlakları temel olarak aynı olarak gözlemlenmiş ve klasik bir eğilme göçme deseni fark saptanmıştır. Donma-çözülme çevrimlerinin sayısı arttıkça, kalıcı yer değiştirme azalmış, beton granüler dökülme göstermiş ve betonun yer değiştirme genliği azalmıştır. Donma-çözülme çevrim sayısındaki artışın, maksimum yanıl kuvveti, ilk rijitliği ve kümülatif enerji absorpsiyonunu azalttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, daha yüksek donma-çözülme çevrim sayısında tepe yer değiştirme genliği azalmasına rağmen, segmental kolon sünekliğinin, donma-çözülme çevrim sayısından bağımsız olduğu belirlenmiştir. Boyuna donatı çapındaki artışın, başlangıç rijitliği, taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyon kapasitesini arttırdığı saptanmıştır.

2.4.Segmental Kirişler

Segmental kirişler, yapıların taşıyıcı sistemlerinde önemli bir rol oynayan ve genellikle büyük açıklıkları desteklemek için kullanılan yapısal bileşenlerdir. Segmental kirişlerin tasarımı ve uygulaması, yapıların dayanıklılığı, taşıma kapasitesi ve ekonomisi açısından kritik öneme sahiptir. Bu taramada, segmental kirişlerin tasarım prensipleri, malzeme seçimi, montaj teknikleri ve yapısal performansı ile ilgili mevcut araştırmaları inceleyecek ve bu alandaki en son gelişmeleri değerlendirecektir.

Turmo vd. (2006), dış AG ile segmental beton yapıların yapısal davranışı üzerine bir sonlu elemanlar yöntemi çalışması sunmaktadır. Çalışma, segmental yapıların bileşik kayma ve eğilme altındaki tepkisine odaklanmaktadır. 7 metre uzunluğundaki segmental kirişler üzerinde gerçekleştirilen deneysel kayma testleri kullanılarak SE modelleri doğrulanmıştır. Yapılan deneylerde, farklı segmental birleşim tasarımlara sahip üç tip model sunulmuş ve birleşimlerde kayma davranışına ışık tutmak amaçladığından, kiriş gövdelerinde oluşan gerilmeler saptanmıştır. Segmental birleşimlerin, Coulomb tipi sürtünme davranışına sahip arayüz elemanları kullanılarak simüle edilebildiği, segmentin gövdesinde önemli bir çatlama varsa, yapısal rijitliği büyük ölçüde etkilediği için gövdenin buna göre modellenmesi gerektiği ve ayrıca, betonun doğrusal olmayan basınç davranışını ve ikinci derece etkiler teorisini göz önünde bulundurarak analizi gerçekleştirmenin gerekli olduğu ortaya çıkmıştır.

Jiang vd. (2016), hibrit tendonlar ve segmental kirişlerin eğilme davranışını incelemek için bir dizi deney gerçekleştirilmiş ve hibrit tendonlu monolitik bir kiriş de karşılaştırma amacıyla test edilmiştir. Eğilme dayanımı, maksimum yük, AG tendonlarının gerilmeleri ve göçme modları araştırılmıştır. Sonuçlar, hibrit tendonlu segmental kirişin monolitik elemana yakın eğilme kapasitesine ve daha iyi sünekliğe ulaşabileceğini göstermiştir. Göçme bölgesinde belirgin çatlaklar bulunmadığı için düşey donatıların gerilmeleri düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Tendonların ve çevre betonun arayüzünde yapışma olmadığı için iç ve dış tendonların gerilme artışları arasında belirgin bir farklılık bulunmamıştır. Nihai aşamada, tendonlardaki gerilmeler 1500 MPa'ı aşmasına rağmen tendonlarda kopma gözlenmemiştir. Hibrit tendonlu segmental kiriş, yük taşıma kapasitesi ve süneklik açısından daha iyi yapısal davranış sergilemiştir.

Saibabu vd. (2016), ön üretimli segmental yapı tekniği ile AG ve dışsal germe yöntemlerini bir arada incelemiştir. Bu teknik, düz veya eğimli hizalama ile daha uzun açıklıklarda kullanılmakta olup hızlı, esnek ve ekonomik bir yapıyı sağlamıştır. Bu çalışmada, düz eklemli dıştan gerilmeli segmental AG kutu kirişlerinin iki noktalı yükleme altındaki tepkisi analitik olarak hesaplanmış ve sonrasında sayısal olarak

incelenmiştir. Sayısal simülasyon, segmental kirişin davranışını nihai duruma kadar analitik olarak saptanan davranışa yakın davranış göstermiştir. Kirişin segmentler arasındaki kuvvetleri ileten temas elemanlarının etkinliği ve doğruluğu kanıtlanmıştır. Yük – yer değiştirme eğrisi, artan yüklerle tendonlardaki gerilme değişimleri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Beton kutu kesitinin katı bir T-kesit olarak modellenmesinin çatlak aşamasında değişimin ve tendonlardaki gerilmenin tahmin edilmesinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Al-Sherrawi vd. (2018), farklı birleşim türündeki epoksi yapıştırılmış eklem tiplerine sahip tam ölçekli segmental kirişlerinin davranışını incelemek için bir dizi statik test yapılmıştır. Çoklu dişli, tek dişli ve düz dişsiz eklem tipleri kullanılmıştır. Referans numune olarak monolitik kiriş kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, dört kirişin hafif farklılıklarla benzer davranış gösterdiğini belirtmiştir. Kullanılan epoksi malzemenin betona kıyasla yüksek çekme dayanımına sahip olması nedeniyle eklem yerlerinde epoksi harcına bağlı beton kaplamalarında çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Monolit kirişe göre segmental kiriş yük kapasitelerinin değişim yüzdeleri %1.7 ile %6.6 aralığında kalmış ve bu aralığın alt sınırı çok dişli eklemlili kirişe, üst sınırı ise düz eklemlili kirişe karşılık gelmektedir.

Zhu vd. (2021), segmental ultra-yüksek performanslı beton (UYPB) kirişlerde eklem performansını artırmak için, AG tendonları ve bulon bağlantısını içeren yeni bir hibrit eklem konfigürasyonu önermiştir. Bu yeni hibrit eklem, UYPB'nin yüksek sünekliğinden faydalanmaktadır. Çalışmada, ön gerilmeli bulonlu hibrit eklemlili segmental UHPC kirişlerin eğilme davranışını incelemek için üç boyutlu SE modeli geliştirilmiştir. Çelik donatı çubukları hariç tüm yapısal bileşenler, sekiz düğümlü lineer katı elemanlar aracılığıyla ABAQUS SE yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modelde yapısal bileşenlerin etkileşimi ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. SE sonuçları, yük-yer değiştirme davranışları, göçme modları açısından önceki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak geliştirilen SE modelinin doğruluğu saptanmıştır. Doğrulan SE modellerine dayanarak, çelik levha sürtünme katsayısı, AG tendon miktarı ve yüksek mukavemetli bulon delik çapının, ön üretimli segmental UYPB kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için parametrik çalışmalar yapılmış ve delik çapındaki artışın UYPB kirişin eğilme kapasitesini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Tran vd. (2023), patlama etkisi altındaki ön üretimli segmental beton kirişlerin davranışı LS-DYNA SE yazılımı kullanılarak saptanmış ve ön üretimli segmental beton kirişlerin monolitik kirişlere göre patlama yükleri altındaki davranışındaki farklılıklar incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, kirişlerde meydana gelen patlama kaynaklı hasarın temel olarak patlama kaynaklı stres dalgalarının yayılması ve plastik mafsallar ile kirişin serbest titreşim eğilmesi mekanizmaları ile oluştuğunu göstermiştir. Birleşimler kapalı olduğunda, monolitik ve segmental kirişlerde benzer gerilme dalga yayılımı ve buna bağlı hasar meydana gelmektedir. Hasar, monolit kirişte daha ağır ve homojen dağılmışken, prefabrik segmental beton kirişlerde hasar genellikle patlayıcıya bitişik segmentte ve eklem çevresinde yoğunlaşmaktadır. Segmentler arasındaki göreceli hareket tarafından sağlanan enerji emilim mekanizması, prefabrik segmental beton kirişlerdeki azalmış hasarın temel nedeni olduğu saptanmıştır. Daha büyük yer değiştirme kapasitesine sahip olmasından dolayı, prefabrik segmental beton kirişler, monolitik kirişe göre daha iyi patlama direnci göstermektedir. AG tendon oranını artırmak veya etkili AG gerilmesini

artırmanın, kirişin tepe ve kalıcı yer değiştirme genliğini azalttığı, ancak beton hasarını artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, segment sayısını artırmanın, daha büyük bir kiriş yer değiştirmelerine yol açtığı, ancak beton hasarını azalttığı saptanmıştır. ED çubuklarının, segmentleri etkili bir şekilde birleştirdiği ve segmental kirişin monolitik muadiliyle benzer bir patlama davranışı sergilediği bulunmuştur.

Xiang ve Xu (2023), yeni bir çelik kesme kilidi tasarlamış ve 6 adet tam ölçekli deney gerçekleştirmiştir. Farklı kesme dişi ve birleşim tipleri deneysel değişkenler olarak göz önünde bulundurulmuş, çatlak yayılması, göçme modu, kesme dayanımı, nihai taşıma kapasitesi ve doğrudan kesme yüklemesi altında çeşitli derzlerin artık taşıma kapasitesi incelenmiştir. Sonuçlar, çelik kesme kilidi derzlerinin rijitliğinin ve kesme kapasitesinin beton kilitli derzlerden daha yüksek olduğunu ve yapısal sistemin çatlama anında beton kilitli derzlere göre daha kararlı olduğunu göstermektedir. Test sonuçları çelik kesme kilitli birleşimlerin endüstriyel üretime uygun olduğunu doğrulamıştır.

2.5. Segmental Tüneller

Segmental tüneller, ulaşım altyapısında yaygın olarak kullanılan ve genellikle toprak altında uzanan yapısal bileşenlerdir. Bu tüneller, modüler segmentlerden oluşur ve genellikle beton veya çelik gibi dayanıklı malzemelerden imal edilir. Segmental tünellerin tasarımı ve inşası, ulaşım projelerinin başarılı bir şekilde tamamlanması için kritik öneme sahiptir. Bu literatür taraması, segmental tünellerin tasarım prensipleri, malzeme seçimi, montaj teknikleri ve yapısal performansı ile ilgili mevcut araştırmaları inceleyecek ve bu alandaki en son gelişmeleri ele alacaktır.

Teachavorasinskun ve Chubuppakarn (2010), segmental bir tünel kaplamasının eğilme kapasitesini belirlemek için basitleştirilmiş bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem, gerçek ölçekli bir model testine karşı kalibrasyonla elde edilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen SE analizi sonuçlarına dayanmaktadır. Yapılan çalışmada, segmental birleşimlerin, segment sayısının ve zemin modülünün tünelin moment taşıma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birleşimler, yay serisi tarafından temsil edilmiştir. Model deneylerine dayanarak, açılabilir birleşim rijitliğinin pratik aralığının 1000 ila 3000 kN m/rad arasında olduğu bulunmuştur.

Molins ve Arnau (2011), tünel açma makineleri kullanılarak delinen tünellerde segmental kaplamaların kullanımının son yıllarda önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Buna rağmen, segmental tünel kaplamalarının yapısal davranışı hakkında belirsizlikler devam etmektedir. Bu belirsizlikleri aşmak için Barselona metrosunun yeni 9 Numaralı Hattı'nda (L9) yer alan deneysel bir bölümde gerçek ölçekli bir test için yeni bir metodoloji geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu testin temel özelliği, halkaların kesin yerleştirilmesinde ve dolayısıyla tünelin gerçek iş koşullarında gerçekleşmesidir. Daha önceki gerçek ölçekli test deneyimlerine göre ana avantajı, gerçek zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasıdır. Ayrıca, sahada gerçekleştirilen bu test, sert zemin koşullarında segmental tünel kaplamalarının yapısal davranışı hakkında önemli kanıtlar sunmaktadır.

Arнау ve Molins (2011), yukarıda belirtilen yerinde testin sayısal simülasyonunu tanımlamaktadır. Çalışmada, deneysel bölümdeki yapısal davranışı etkileyen temel olaylar ve modelleme teknikleri açıklanmakta ve analitik sonuçlar, yapısal davranış, yer

değiştirmeler, birleşimlerin davranışı ve çatlak desenleri açısından deneysel kanıtlarla karşılaştırılmaktadır.

Arnau ve Molins (2012), segmental tünel kaplamalarının bağlantı etkileri ile ilişkilendirilen davranışını incelemek amacıyla, ana etkilenen değişkenleri belirleyerek ve 3D sayısal bir model aracılığıyla gerçek bir kaplama yapısal davranışı üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Sonuçlar, bir segmental tünel kaplamasının boyuna dağılmış tasarım yüklerine tabi tutulduğunda, bağlantıların çapraz yerleşiminin, bitişik segmentler arasında kuvvet etkileşim mekanizmalarının etkinleştirilmesine neden olduğunu ve bu nedenle bağlantı etkileri olarak adlandırılan bu davranışı oluşturduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, kaplama izole segmente göre daha yüksek bir rijitlik ve iç kuvvet artışı gösterdiği saptanmıştır.

Do vd. (2013), segmental tünel kaplama davranışını etkileyen değişkenleri sayısal olarak incelemiştir. Analizler, iki boyutlu sonlu fark eleman modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir halka içindeki segmentler arasındaki uzunlamasına derz, altı serbestlikle temsil edilen ve altı yay tarafından temsil edilen çift düğme bağlantıları ile simüle edilmiştir. Önerilen model, dönme rijitliğinin yanında, aynı zamanda derzlerin radyal rijitliği ve eksen boyunca rijitliği dikkate almayı mümkün kılmıştır. Sayısal sonuçlar, birleşim sayısı arttıkça tünel kaplamasında oluşan eğilme momentinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Aynı zamanda derzlerin ekstenel ve radyal rijitliğinin segmental tünel kaplama davranışı üzerindeki etkisinin göz ardı edilebilir olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu sayısal parametrik çalışmanın sonuçlarının segmental tünel kaplamalarının ön tasarım süreci için yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Gong vd. (2019), tüneller için su sızıntısının hem inşaat hem de operasyon aşamalarında önemli bir sorun olduğunu belirtmektedir. Zemin suyunun girişini önlemeye yönelik endüstrideki pratik çözüm, tünel birleşimlerinde etilen-propilen-dien monomer (EPDM) contalarının uygulanmasıdır. Daha önce birkaç araştırma, birleşim contalarının su geçirmez performansına odaklansa da bu çalışma sonlu eleman analizine dayalı bir contalama mekanizması önermektedir. İlk olarak, contalı birleşimin yanal su basıncına maruz kaldığı durumda contalama davranışını belirlemek için kavramsal bir model oluşturulmuştur. Hiperelastik bir malzeme modeli, kompleks temas özellikleri ve büyük yer değiştirmeleri içeren doğrusal olmayan SE modeli, contalı birleşim contalama davranışını modellemek için geliştirilmiş ve modelin performansı deneysel verilerle doğrulanmıştır. Hesaplanan sonuçlar, birleşim su geçirmezlik kapasitesinin, birleşim açıklığının veya birleşim dönmesinin artmasıyla önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.

Salemi vd. (2015), mekanik olarak kazılmış tünellerin segmental kaplamalarının iç kuvvetlerine ve yapısal tasarımına etkisi olan temas noktalarının rijitliğinin etkisini araştırmıştır. 0.25 ila 2 MPa arasındaki normal gerilmenin seçilmesiyle, yalıtımlı ve yalıtımsız olarak kanallı küp örnekler üzerinde yaklaşık 90 test gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemi değerlendirmek için, bir kentsel tünel kaplamasının sonlu eleman modelleri geliştirilmiş ve bu modeller, bu araştırmanın önerdiği temas modelini (çubuk-temas yayları (BCS)) dikkate alarak, geleneksel temas modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, segmental kaplama yapısının temas noktalarındaki rijitliğin, kaplamanın iç kuvvetlerini etkileyebilecek değişkenlerden biri olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, tünellerin segmental kaplama yapılarının analizi ve tasarımında segment temas noktalarının gerçek davranışı göz önüne alınmalıdır. Bu araştırma, yalıtımlı veya

yalıtımsız olarak kanallı yüzeylere sahip segment temas noktalarındaki kesme ve normal reaksiyon modülleri için denklemler sunmuştur. Segment temas noktalarında yapılan deneysel DST sonuçlarına dayalı olarak, her iki örnek için kesme reaksiyon katsayısı ve normal reaksiyon katsayısı için normal gerilme ile ilişkili iki denklem türetilmiştir. Önerilen temas modelini doğrulamak için bir su iletim tüneli için 22 sayısal model geliştirilmiştir ve sonuçlar, bu araştırmanın önerdiği modelin en yüksek uyumu sağladığını göstermektedir.

Liu vd. (2017), çalışan metro tünellerinin hizmet koşullarına göre, segment birleşim noktalarının tünel kaplamalarında hassas bölgeler olduğunu göstermektedir. Şanghay Metro hızlı toplu taşıma sisteminin tipik segment birleşimleriyle açıklanan çalışmada, farklı yük koşulları altında uzunlamasına birleşimlerin nihai taşıma kapasitesini araştırmak için deneyler yapılmıştır. Segment birleşimlerinin göçme mekanizmaları tanıtılmıştır. Önerilen modelin doğrulanmasının ardından, önerilen modelin tam kesit modelleriyle mekanik davranışı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, pozitif ve negatif eğilme momenti etkisindeki birleşimlerinin göçme tipleri farklı olduğu belirlenmiştir.

Liu vd. (2020), yerel birleşim davranışının kaplama yapısının genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, kentsel metroya ilişkin çevresel boşaltma durumunu temsil eden mühendislik örneklerine dayalı olarak tek halkaların ve üst üste geçmiş bağlantılı çoklu halkaların yapısal taşıma kapasiteleri elde etmek için bir dizi tam ölçekli deney tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

2.6. Segmental Birleşimlerin Kesme Dayanımı

Segmental yapıların yapısal bütünlüğünü sağlayan birleşimlerin kesme dayanımı, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu birleşimlerin kesme dayanımı, yapısal performanslarını belirlemede belirleyici bir etmendir ve segmental yapıların tasarımı ve inşası sürecinde dikkate alınması gereken önemli bir değişkendir. Bu bölüm, segmental birleşimlerin kesme dayanımı ile ilgili mevcut araştırmaları inceleyecek ve bu alandaki en son bulguları ve yöntemleri ele alacaktır.

Turmo vd. (2006), segmental beton köprülerin performansı üzerine yaptığı çalışmada, birleşimlerin özelliklerini değerlendirmiştir. Bu kapsamda, birleşim kesme dayanımını belirlemek için literatürde yayınlanan deneysel sonuçlar ve geniş çaplı formülasyonlar dikkate alınmıştır. Farklı yaklaşımlar, saha deneyleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular, mevcut standartlara uyumlu hale getirilerek analiz edilmiştir. Çalışma, segmental birleşimlerin kesme dayanımı üzerine derinlemesine bir bakış sunarken, beton segmental köprülerin yapısal sağlamlığına ilişkin önemli öneriler içermektedir.

Rombach (2004), segmental inşaat tekniklerine odaklanarak, BA köprülerin yapımında kullanılan özel bir yapı tipi olan boşluklu segmental köprülerin birleşim davranışını incelemiştir. Boşluklu segmental köprüler, genellikle uzun açıklıklı köprülerde kullanılan bir yapı tipidir. Bu köprüler, genellikle birçok küçük parçadan oluşan ve birleştirilmiş BA boşluklu kutu kirişlerden oluşur. Birleşimler, segmental parçaların birleşim yerlerindeki boşlukları ifade eder ve genellikle yapının termal genleşme ve büzülmesine izin vermek için tasarlanmıştır. Çalışma, bu tür köprülerin

birleşim davranışını anlamak amacıyla yapılan araştırmalara odaklanmaktadır. Bu araştırma, birleşimlerin yük değişimlerine ve yapısal yüklerin etkilerine nasıl yanıt verdiğini ve köprünün genel performansını nasıl etkilediğini incelemiştir. Ayrıca, BA köprü inşaatındaki segmentlerin dayanımı, bakımı ve tasarımı incelenmiştir.

Büyüköztürk vd. (1990), segmental beton köprülerdeki segmentler arasındaki birleşimlerin tasarım ve yapımına özel dikkat gerektirdiğini vurgulamaktadır. Bu birleşimlerin köprüde normal ve kesme gerilmelerini iletmeleri gerekmektedir. Segmental beton köprü birleşimlerinin kesme dayanımı ve şekil değiştirme davranışını değerlendirmek için testler yapılmıştır. İncelenen değişkenler arasında düz ve dişli birleşimler, epoksi olmadan (kuru) ve epoksili, ön germe seviyesi ve epoksi kalınlığı yer almaktadır. Epoksili birleşimlerin dayanımının normal birleşimlerden daha yüksek olmasına rağmen, göçmesinin çok ani ve kırılğan olduğu bulunmuştur. Birleşimlerin kesme dayanımını değerlendirmek için formüller önerilmiştir. Bu formüllerin, göçmeyi önlemeyi hedefleyen mevcut ACI ve AASHTO şartnameleri ile birleştirilmesi ve segmental tasarımı için rasyonel bir temel sağlamıştır.

ATEP (1996) İspanya yönetmeliği, İspanya'nın başkenti Madrid'deki "Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos" tarafından yayımlanan önemli bir kaynaktır. Bu belge, inşaat mühendisliği ve alakalı disiplinlerde çalışan profesyonellerin dikkate alması gereken temel prensipleri ve teknikleri kapsamaktadır. Belge, önemli teknikle ilgili detayları içermekte ve özellikle köprülerin ve diğer yapıların tasarımı ve inşasıyla ilgili bilgiler sunmaktadır. İçeriği AG uygulamaları, köprülerin ve yapıların tasarımı ve inşaatı gibi konuları ele alır. Ayrıca, belge, BA yapıların dayanıklılığına ve uzun ömürlülüğüne nasıl katkıda bulunulabileceği konusunda rehberlik sağlamaktadır.

AASHTO (1999), Amerikan Eyalet Yol ve Ulaşım Yetkilileri Birliği tarafından hazırlanan kapsamlı bir yönetmeliktir. Yönetmelik, modern altyapı projelerinde kritik bir rol oynayan BA segmental köprülerin tasarımı ve inşasıyla ilgili önemli ölçütleri içermektedir. Yönetmelik, segmental beton köprülerin dayanıklılığını artırmak, uzun vadeli performansını sağlamak ve en son inşaat tekniklerini yansıtmak için detaylı talimatlar sunar. Segmental köprüler, karmaşık yapıları ve yüksek dayanım gereksinimleri nedeniyle bu kılavuzdaki ölçütlere uygun tasarlanmalıdır.

2.7. Dairesel Boşluklu Kesitler

Dairesel boşluklu kesitlerin tasarımı, malzeme seçimi, davranışı ve kullanım alanları hakkındaki araştırmaları inceleyen bu literatür taraması, bu alandaki en son gelişmeleri ve yöntemleri ele alacaktır.

Queiroz ve Horowitz (2016), 30 katın üzerindeki binaların birçoğunun temelini boş dairesel kazıkların oluşturduğunu belirtmektedir. Mevcut yönetmeliklerin çoğu, boş dairesel kesitler için kesme modellerine dayanmaktadır ve boş dairesel kesitli elemanların kesme dayanımının değerlendirilmesi için yönergeler neredeyse mevcut değildir. Bu çalışma, deneysel çalışmalardan elde edilen boş dairesel kesitli elemanların kesme dayanımını karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirmektedir ve bu değerleri Kanada Yönetmeliği (CSA A23.3, 2004) kullanarak ve Brezilya standardına (NBR 6118, 2014) dayalı önerilen basit bir prosedür kullanarak hesaplamaktadır. Literatürde sınırlı sayıda deneysel veri bulunmasına rağmen, bulunan 79 test üzerinden gerekli analizleri yapmıştır.

Literatürde bulunan tüm testler için kesme dayanımını hesaplamak için Brezilya ve Kanada kodlarının hükümlerini kullanmak, tüm testler için güvenli sonuçlar sunmuştur ve özellikle $0,125 \leq t/h \leq 0,33$ olan numuneler için güvenli sonuçlar sunmuştur. Kesme dayanımı, eksantrik basınç kuvvetini yükselterek, duvar kalınlığını (t) artırarak ve kesme açıklığını (a) azaltarak arttığını göstermiş, bununla birlikte, aşırı eksantrik basınç gerilimleri kesme dayanımı için zararlı olabildiğini belirtmiştir. A23.3-04 ve NBR 6118 standartları, gövde ezilmesi konusundaki kesme dayanımı analizinde bu etkiyi dikkate almadığını belirlemiştir. Önerilen basitleştirilmiş yönteme dahil edilen, bu nedenle EUROCODE 2, boş dairesel kesitli elemanların eksenel basınç kuvvetine, eğilme ve kesme etkisi altında kesme dayanımı analizini içeren bu etkiyi göz önüne almıştır.

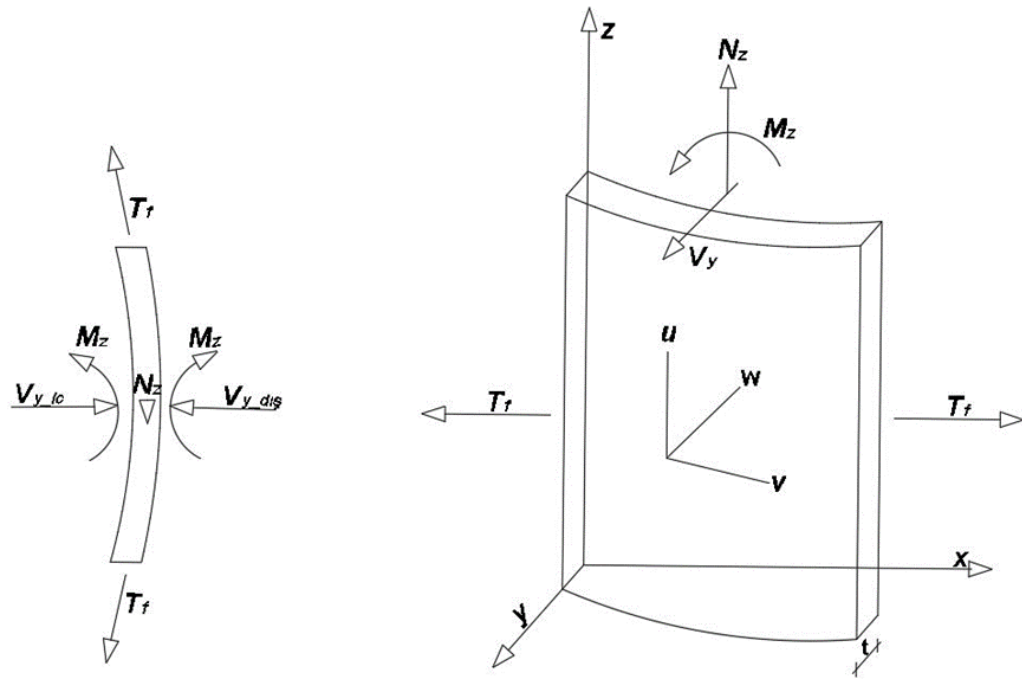
Liang ve Sritharan (2018), boşluklu BA kolonlarda etriye etkisinin incelenmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, boşluklu kesit betonun davranışı, beton çekme ve basıncı gibi temel değişkenler kullanılarak boşluklu kesitlerde sargı etkisi sistemli bir şekilde incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, katı ve boşluklu kesitler üzerinde etriye etkisinin çok farklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, dairesel boşluklu kolonlar göz önünde bulundurulduğunda duvar kalınlık oranı 0.1 olanlar için, bir katman enine donatının önemli bir sargı etkisi sağladığı gösterilmiştir. Daha büyük duvar kalınlık oranlarına sahip kolonlar için ise 0.2'ye kadar olanlar için birbirine bağlı iki katman donatı ile daha uygun olduğu ve iç/dış donatı oranının 1/9 olması önerilmektedir.

De Risi ve Verderame (2020), mevcut BA köprü kolonlarının deprem değerlendirmesine odaklanmaktadır. Çalışmada, İtalyan köprülerine özgü iki ölçekli BA dairesel kesitli kolon üzerinde gerçekleştirilen tersinir çevrimsel testler ele alınmıştır. Tasarım kriterleri, kullanılan kurulum, deneysel sonuçlar ve hasar gelişimi tartışılmıştır. Literatürden alınan deney verileri toplanmış ve mevcut olan kesme dayanım modelleri bu verilerle karşılaştırılmıştır. İki farklı en-boy oranına sahip ölçekli boşluklu dairesel BA kolonlar, tersinir çevrimsel yükleme ve sabit eksenel kuvvet altında test edilmiştir. Deney örnekleri, düşük oranda boyuna ve enine donatı, düşük kaliteli beton, yetersiz detaylar ve uygun sıkılaştırma donatısının eksikliği ile karakterize edilmiştir. Bu örnekler, dünya genelinde yaygın olan bir yapı türünü temsil etmektedir, ancak bu tür yapılarla ilgili çok az deneysel test literatürde bulunmaktadır. İki farklı göçme modu tespit edilmiştir ve sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1.Dairesel Ard Germe Etkinliğinin Analitik Metotlarla Analizi

Bu bölümde hem iç hem de dış hidrostatik basınçlara maruz kalan derin platform ayaklarının ve depolama tanklarının tasarımında dairesel öngerme etkisini araştırmıştır. Öngerme, beton yapıların dayanımını ve dayanıklılığını artırmak amacıyla, malzemenin dış yüklemelere tabi tutulmadan önce sıkıştırılması tekniğidir. Çalışmada, hidrostatik basınç altında Condeep platform kolonları ve depolama tankları için uygun öngerme kuvvetini belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu, güvenli ve etkili bir uygulama için kritik öneme sahiptir. Bu kısımda iç ve dış basıncın etkisinin belirlenebilmesi amacıyla platform yapısından alınmış bir kesite diğer tüm etmenlerin etkisi altında dairesel ard germe etkisi geliştirilmiş analitik formüllerin aracılığı ile araştırılmıştır. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1. Condeep platform destek bölümlerinde iç kuvvet ve yer değiştirme şeması

Denge Denklemleri

Kuvvet dengelemesi, bir cisim veya sistem üzerinde etki eden tüm kuvvetlerin dengede olduğu ve net bir kuvvetin etkilemediği durumu ifade eder. Sistemin kuvvet dengesinde olması için üzerine etki eden tüm kuvvetlerin toplamının sıfır olması gerekmektedir.

1. $\sum F_z = 0$; Sistemin dikey yönde (z eksenı boyunca) ivmelenmediği durumda, üzerine etki eden tüm kuvvetlerin toplamının sıfır olması gerekmektedir.

$$\frac{dN_z}{dz} + P_z = 0$$

$$N_z = - \int P_z dz + C_1 \quad (1)$$

2. $\sum F_r = 0$; Benzer şekilde, sistemin radial olarak ivmelenmediği durumda, üzerine etki eden tüm kuvvetlerin dairesel yönde (dönme eksenine dik) toplamının sıfır olması gerektiğini gerekmektedir.

$$\frac{dV_{y_{iç}}}{dz} + T_\phi \sin d\phi + P_i - \frac{dV_{y_{dış}}}{dz} - P_d - P_{ps} \sin d\phi = 0$$

Denge denklemi:

$$\frac{d}{dz} (V_{y_{iç}} - V_{y_{dış}}) + \frac{T_\phi}{R} - \frac{P_{ps}}{R} + P_i - P_d = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dV_y}{dz} + \frac{T_\phi}{R} - \frac{P_{ps}}{R} + P_i - P_d = 0$$

$$\frac{d}{dz} \left(-E_D \frac{d^3 w}{dz^3} \right) - \frac{Et w}{R^2} - \frac{P_{ps}}{R} + P_i - P_d = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{d^4 w}{dz^4} - \frac{Et w}{E_D R^2} - \frac{P_{ps}}{E_D R} + \frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} = 0 \quad (4)$$

Eğilme dayanımını dikkate alıp denklemi sadeleştirilirse,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)}{(2R)^2 t^2}} \quad E_D = \frac{Et}{(2R)^2 \beta^4}$$

Denklemin son hali;

$$-\frac{d^4 w}{dz^4} - 4\beta^4 w - \frac{P_{ps}}{E_D R} + \frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^4w}{dz^4} + 4\beta^4w = \frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \quad (6)$$

(9) denklemini homojen olmayan denklem olduğundan onun çözümüne genel (w_{genel}) ve özel (w_{sp}) çözümün toplamı olarak bakılırsa;

$$w = w_{genel} + w_{sp} \quad (7)$$

$$\frac{d^4w}{dz^4} + 4\beta^4w = 0$$

$$w_{genel} = e^{\beta z}(C_1 \cos \beta z + C_2 \sin \beta z) + e^{-\beta z}(C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z) = 0 \quad (8)$$

H t' den defalarca büyük olduğundan, C_1 ve C_2 katsayıları sıfırlanırsa.

$$w_{sp} = \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \right)$$

$$w = w_{genel} + w_{sp} = e^{-\beta z}(C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z) - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \right) \quad (9)$$

İç ve dış basınç hesabı için Denkem (11) ile yapılabilir.

$$\begin{cases} P_i = C' \gamma_i (H - z) R \\ P_d = C' \gamma_d H R \end{cases} \quad (10)$$

$$w = e^{-\beta z}(C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z) - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C' \gamma_i (H - z) R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \right) \quad (11)$$

C_3 ve C_4 katsayıları aşağıdan ankastre mesnetlenmiş durumdan belirlenir

$$w_{z=0} = 0 = C_3 - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C' \gamma_i (H - z) R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \right) = 0$$

$$C_3 = \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C' \gamma_i H R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dz}(z=0) &= \left[\beta C_3 e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) + \beta C_4 e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C' \gamma_i (H - z) R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_DR} \right) \right]_z = 0 \quad (12) \end{aligned}$$

$$\frac{dw}{dz}(z=0) = \beta(C_4 - C_3) - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C'\gamma_i HR}{E_D} \right) = 0$$

$$\frac{dw}{dz}(z=0) = \beta \left(C_4 - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C'\gamma_i HR}{E_D} - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \right) - \frac{1}{4\beta^4} \frac{C'\gamma_i HR}{E_D} = 0 \quad (13)$$

$$C_4 = \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C'\gamma_i HR}{E_D} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right)$$

$$\begin{aligned} w &= e^{-\beta z} \left(\frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C'\gamma_i HR}{E_D} - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \cos \beta z \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C'\gamma_i HR}{E_D} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \sin \beta z \right) \\ &\quad - \frac{1}{4\beta^4} \left(\frac{C'\gamma_i (H-z)R}{E_D} - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \\ w &= \frac{e^{-\beta z}}{4\beta^4 E_D} \left(\left(\left(C'\gamma_i HR - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \cos \beta z \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(C'\gamma_i HR \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \sin \beta z \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(C'\gamma_i (H-z)R - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Sonuç olarak, duvarda gelişen dairesel gerilimi ve moment aşağıdaki formül kullanılarak tahmin edilebilir:

$$T_{\phi} = -\frac{Et w}{R} = -\frac{Et}{R} \left\{ \frac{e^{-\beta z}}{4\beta^4 E_D} \left(\left(\left(C' \gamma_i HR - C' \gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \cos \beta z + \left(C' \gamma_i HR \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) - C' \gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \sin \beta z \right) - \left(C' \gamma_i (H - z) R - C' \gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \right) \right\} \quad (15)$$

Denklem (15), dairesel öngermeli duvarda öngirme etkisinden oluşan kuvvet için bir denklem olmakla duvar malzemesinin Young modülü, duvar kalınlığı, eğrilik yarıçapı, duvar derinliği ve basınç katsayıları ile öngirme kuvveti değişkenlerine bağlıdır. Bu denklem, trigonometri ve üstel fonksiyonlar içeren birkaç terimden oluşur ve farklı duvar derinliklerinde dairesel öngirme kuvvetini tahmin etmek için kullanılabilir.

$$M_z = -E_D \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) = \frac{e^{-\beta z}}{2\beta^2 E_D} \left(\left(C' HR (\gamma_i - \gamma_d) - \frac{P_{ps}}{R} \right) \sin \beta z + \left(C' \gamma_i HR \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) - C' \gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \cos \beta z \right) \quad (16)$$

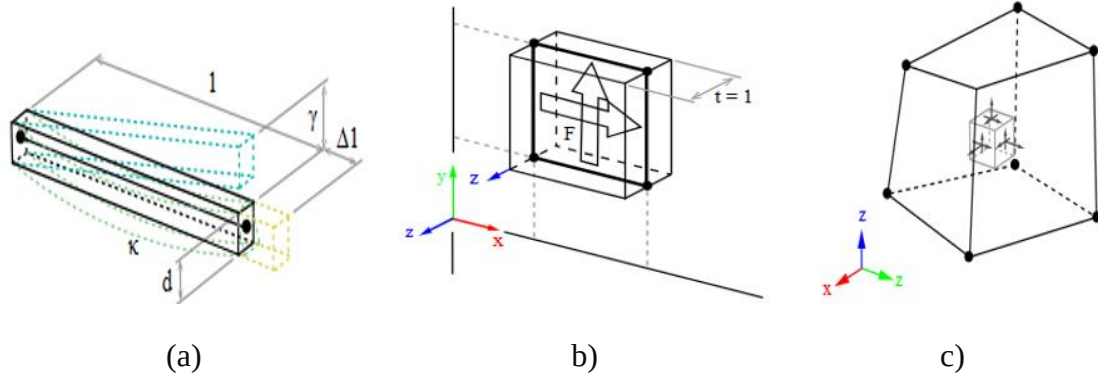
Denklem (16), moment için bir denklem sunar ve Denklem (15) ile benzer değişkenlere bağlıdır. Bu formül, duvarın derinliğine göre sapmasının ikinci dereceden türevini içerir ve trigonometri ile üstel fonksiyonlar içeren terimlere sahiptir. Bu formül, çeşitli duvar derinliklerindeki momenti tahmin etmek için kullanılabilir. Çalışmada dairesel hidrostatik basınç altında çalışan sualtı yapı duvarında oluşan iç kuvvet değişimini öğrenebilmek adına içi boşluklu dairesel en kesitli duvar kalınlığı 1m, en kesit çapı 10 m ve derinliği 100 m olan silindir üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır.

3.2.Sayısal Modelleme

3.2.1. Eleman modeli

Bu tez çalışması kapsamında, DIANA SE programı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların güvenilirliğini doğrulamak amacıyla önceden farklı bilim insanları tarafından yapılmış deneysel çalışmalara dayalı olarak çeşitli BA yapıların 1D çubuk, 2D kabuk ve 3D katı eleman modelleri oluşturulmuş ve detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 3.2). 1D SE modelinde, yapısal elemanlarının boyuna eksenleri boyunca temsil edilmesi için 2 düğüm içeren kiriş elemanları (L6BEN), 2D SE modelinde hem uzunlamasına hem de enine yönde yapısal davranışı yakalayan toplamda 4 düğüm ve düğüm başına 2 serbestlik derecesi (DOF) içeren kabuk elemanları (Q20SH) kullanılmıştır. 3D SE modelinde ise, segmental kirişlerin karmaşık geometrisini hesaba katmak amacıyla kullanılan 8 düğüm ve düğüm başına 3 DOF içeren katı elemanlar (HX24L), yapı içindeki gerilme, şekil değiştirme ve hasar dağılımının detaylı bir analizine olanak tanımıştır. Yapılan bu modellenmeler, DIANA programının analitik

sonuçlarının, gerçek dünya deneylerine uygunluğunu ve doğruluğunu değerlendirmek için tasarlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlarıyla elde edilen veriler, 1D, 2D ve 3D eleman modellerinin her birinin betonarme yapıların davranışını anlamada ne kadar etkili olduğunu değerlendirmek adına temel bir dayanak sağlamıştır.



Şekil 3.2. DIANA eleman modelleri: (a)1D çubuk, (b) 2D kabuk, ve (c) 3D katı eleman. (Ferreira, D., & Manie, J. (2022).)

3.2.2. Malzeme modeli

Tez çalışması sırasında, beton malzemesinin modellenmesi için Toplam Gerilimli Çatlak Modeli (Total Strain Crack Model) kullanılmıştır. Bu model, betonun çatlama davranışını ayrıntılı bir şekilde analiz etmek ve malzeme davranışlarını tahmin etmek amacıyla benimsenmiştir. Toplam Gerilimli Çatlak Modelleri, malzemenin şekil değiştirme ve çatlama süreçlerini bir arada ele alarak gerilim-şekil değiştirme ilişkilerini daha doğru bir şekilde tanımlamak için kullanılmıştır. Analizler sırasında, Dönen Çatlak Modeli (Rotating Crack Model) ve Sabit Çatlak Modeli (Fixed Crack Model) kullanılarak gerçekleştirilen çalışma detaylı analizle incelenmiştir.

Dönen Çatlak Modeli, malzeme hasar mekanizmalarını anlamak ve malzeme davranışlarını karakterize etmek için kullanılan bir analitik yaklaşımdır. Bu model, malzemenin içindeki çatlakların dönme hareketini dikkate alarak çatlak oluşumu ve yayılma süreçlerini açıklamayı amaçlamaktadır. Çalışmada, malzemenin bu dönme hareketinin nasıl etkilendiği, çatlak büyümesinin yönü ve hızı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

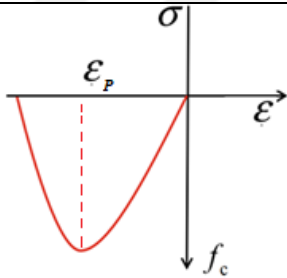
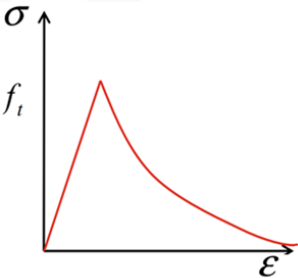
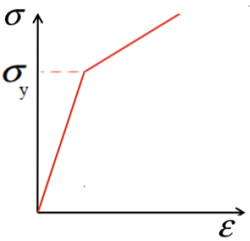
Öte yandan, Sabit Çatlak Modeli, malzeme mühendisliği ve dayanıklılık analizlerinde kullanılan bir diğer önemli modeldir. Bu model, malzeme içindeki çatlakların sabit bir konumda olduğu varsayımıyla malzeme davranışlarını modeller. Çalışmada, Sabit Çatlak Modeli kullanılarak malzeme hasar süreçlerinin nasıl değerlendirildiği, çatlakların oluşumunun ve büyümesinin nasıl modellendiği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Beton, çekme durumunda üstel yumuşama (exponential softening) ve basınç durumunda Hognestad beton modeli ile modellenmiştir (Ferreira, 2013) (Tablo 1). Üstel yumuşama, betonun artan gerilme etkisindeki davranışını karakterize eden bir modeldir ve bu modelde gerilme arttıkça betonun dayanıklılığında üstel bir yumuşama meydana gelir. Bu, betonun gerilme koşullarında daha gerçekçi bir şekilde davranmasını sağlar.

Öte yandan, Hognestad beton modeli, sargılanmamış betonun basınç durumundaki davranışını temsil eder.

Çelik modeli, Von Mises plastisitesi ve doğrusal plastik sertleşme prensiplerine dayanmaktadır (Tablo 3.1). Kullanılan modelle, çelik elemanlarının akma ve göçme durumları başarıyla simüle edilebilmiştir. Model ayrıca, BA yapıların hizmet durumlarında çatlak genişliklerini ve nihai durumda yapısal göçme durumunu belirlemek için kullanılmıştır. Çatlak genişlikleri ve yapısal göçme durumları, BA yapıların dayanıklılığını değerlendirmek adına kritik önemli olduğundan bu özellik, çelik ve beton etkileşimini daha iyi anlamak ve yapısal güvenilirliği artırmak için önemlidir. Tüm çelik elemanlar ve ön gerilmiş tendonlar, yapışma-kayma özellikleri ile gömülü olarak modellenmiştir.

Tablo 3.1. Beton ve çelik için SE modelleri

Malzeme	Model türü	Model davranış eğrisi	Formül
Beton	Hognestad		$f = -f_c \left(2 \frac{\epsilon}{\epsilon_p} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^2 \right)$ $\epsilon_p = -2 \frac{f_c}{E}$
	Exponential softening		$\frac{\sigma}{f_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^3 \right\} e^{(-c_2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0})}$ $- \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(1 + c_1^3 \right) e^{(-c_2)}$
Çelik	Von Mises plastisite		$f = \sqrt{3} \bar{\sigma} - \sigma_y$

3.2.3. Doğrulama Çalışmaları

Sayısal analizlere başlamadan önce, DIANA SE yazılımı kullanılarak oluşturulan BA yapıların SE modelleri, elde edilen nümerik sonuçların ilgili literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. (Tablo 3.2)

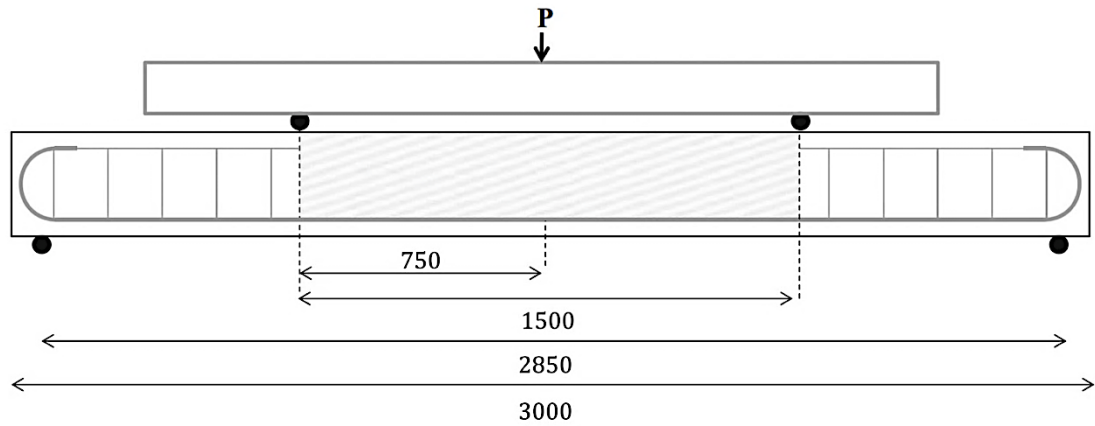
Tablo 3.2. Doğrulama çalışmalarının parametreleri

Çalışma	De ney	Çalışma türü	DeneySEL yükleme durumu	SE model türü	b H L	E GPa	f_c MPa	f_t MPa	ρ_t $\frac{m^3}{m^3}$	D mm	d mm	E_d MPa	f_{ym} MPa	f_{um} MPa	ϵ_{su}	D_f mm	E_t MPa	f_{ymt} MPa	f_{unt} MPa
1	Jason vd., 2013	1	BA kiriş	4 noktadan yükleme	1D, 2D, 3D	0.15 0.25 3	33	39	3.5	2.5	12	8	200	550	666	0.02	—	—	—
2	Tao ve Du, 1985	A8 A9	Ard- germeli kiriş	4 noktadan yükleme	3D 1D, 2D, 3D	0.16 0.28 4.2	30	33.1	3	2.5	A58.8 A156.6	200	400 395	480 475	0.02	A46 2 A80 4	200	1290 1108	1540 1330
3	Al- Sherrawi vd., 2018	G1 G2 G3 G4	Ard- germeli segmental Kiriş	3 Noktada n yükleme	2D, 3D	0.3 0.6 12	34	41.3	4.2	2.5	12	10	200	555	666	0.02	15.2	1680	1860
Sıvı – yapı etkileşimi doğrulaması																			
Çalışma	H, m	ρ_{su} $\frac{t}{m^3}$	$\rho_{yapı}$ $\frac{t}{m^3}$	E, GPa	a/h														
Han,1996	20	1	2.45	29.4	0.003	0.005	0.010	0.020	0.025	0.030	0.040	0.050							

Doğrulama çalışması sırasında üç ana yapısal eleman BA, ön germeli (ÖG) beton ve segmental ön germeli (SPT) beton kirişler olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca su-yapı etkileşiminin doğru modellenmesini doğrulamak için de daha önce analitik olarak analizi yapılmış bir yapının SE modellenmesi ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Bu doğrulama çalışmaları sırasında farklı yükleme türleri ve farklı arıza mekanizmaları incelenmiştir.

3.2.3.1. Betonarme kiriş

Jason vd. (2013), BA kirişlerin çatlama davranışını inceledikleri araştırmalarında detaylı bir deney gerçekleştirmiştir. Bu çalışma hem sayısal simülasyonları hem de deneyleri içermektedir. İncelenen yapı, basit mesnetli bir kiriştir. Yük, hidrolik bir kriko kullanılarak uygulanmış ve BA kirişe sabit bir moment bölgesi (dört noktalı eğilme) oluşturmak için rijit bir çelik kiriş aracılığıyla iletilmiştir. Kiriş deneyinin temel amacı, kiriş elemanının davranışı hakkında sayısal sonuçlar elde etmektir. Deneyde, çatlama detaylarını kaydetmek için özel araçlar kullanılmıştır. Beton kirişin boyutları toplam uzunluk 3.0 m, açıklık 2.85 m, derinlik 0.25 m ve web kalınlığı 0.15 m şeklindedir. Malzeme özellikleri orijinal yayında belirtilmiş olup, eksik parametreler, kirişin sonlu eleman analizi için beton ve çelik modelleri kullanılarak hesap edilmiştir. Betonun basınç dayanımı 39 MPa'dır. Basınç donatısının çapı 12 mm, çekme ve enine donatıların çapları ise 8 mm'dir. Donatının akma ve kopma dayanımları sırasıyla 550 ve 666 MPa olarak belirlenmiştir. Deneysel testi modellemek için toplam gerilme dönen çatlak modeli kullanılmış, malzemenin lineer elastik özellikleri çelik levhaların yük taşıma ve destekleme fonksiyonları için kullanılmıştır. Çelik levhalar ile beton kirişi arasında arayüz mekanizmaları modellenmiştir. Statik doğrusal olmayan analiz, çatlama noktasına kadar artan yer değiştirmelerle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Deneysel çalışmanın yükleme prensibi (Jason vd. 2013)

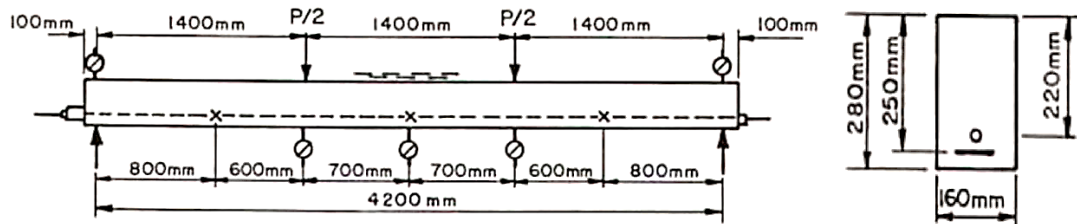
Analiz, göçme anına kadar devam eden doğrusal olmayan analizi içermektedir. Yapısal tepkinin doğrusal olmayan bölümünde, bu yöntem, kararlılık ve etkinlik açısından avantajlar sağlamaktadır. Bu amaçla, göçme noktasına kadar olan süreçte adım adım bir noktasal kuvvet uygulanmıştır. Doğrusal olmayan bir şekilde yakınsamayı sağlamak için, iteratif bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yük, 2.5 kat artırılarak uygulanmıştır. Güncellenmiş normal düzlem yaklaşımı, kiriş yük – yer değiştirme davranışını hassas bir şekilde izlemek için yay uzunluğu kontrolü (arc length control) olarak kullanılmıştır. Bu yöntem, yük fazlarının otomatik olarak ölçeklendirilmesini içerir. Denge iterasyon prosedüründe

Newton-Raphson yöntemi kullanılmış ve maksimum 25 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yakınsamayı hızlandırmak için varsayılan değişkenlerle bir çizgi arama yöntemi benimsenmiştir. Yakınsama kriterlerini oluşturmak için 0.0001 toleranslı enerji yakınsama normları ve 0.001 toleranslı kuvvet yakınsama normları kullanılmıştır. Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşamazsa, analiz devam etmiş, modeldeki doğrusallıktan çıkış, ayırık çatlak tekniği kullanılarak önemli ölçüde artırılmıştır ve bu durum daha karmaşık bir analize yol açmıştır. Denge iterasyon yaklaşımı, hesaplama kararlılığını sağlamak için secant (Quasi-Newton) yöntemini kullanılmıştır. Bununla birlikte, diğer tüm analitik parametreler sabit kalmıştır.

3.2.1.2. Ard germeli kiriş

Tao ve Du (1985), bağlanmamış ve tam bağlı kısmi ÖG beton kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir. Yirmi iki bağlanmamış ve dört tam bağlı kısmi ÖG kiriş, deneysel ve analitik açılardan değerlendirilmiştir. Analitik ve deneysel veriler arasında uyumluluk büyük ölçüde saptanmıştır. Bağlanmamış tendonların nihai şekil değiştirmesi, ampirik denklem kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada, düzlem kesit varsayımının bağlanmamış tendonların şekil değiştirme davranışına uygulanamaması nedeniyle, moment-eğrilik davranışı doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak analitik programlar kullanılarak geliştirilmiştir. Test değişkenleri arasında yük tipi, donatı oranı, tendon oranı ve açıklık-yükseklik oranı bulunmaktadır. Bu testlerin sonuçları (literatürde "A9" (A8) kirişi olarak bilinen kiriş), bu çalışmada DIANA modellemesi için incelenmiştir.

Beton, 33.1 MPa basınç dayanımına sahip doğrusal olmayan izotrop bir malzeme olarak modellenmiş ve doğrusal olmayan davranışı göz önünde bulundurmak için gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Bağlanmamış tendonların kayıplar sonrası gerilme değeri, 920 MPa olarak ayarlanmıştır. Bunun yanında, sayısal modeller aynı zamanda alanı 804 mm² (A8, 462 mm²) olan nervürlü çubukları da içermektedir. ÖG tendonlarının çekme dayanımı 1108 MPa (A8, 1290 MPa) ve donatının çekme dayanımı ise 395 MPa (A8, 400 MPa) olarak belirlenmiştir. Kirişlerin yük-yer değiştirme davranışını değerlendirmek için 1D çizgi, 2D kabuk ve 3D katı elemanları (A8, sadece 3D katı elemanı içeren bir FE modeli oluşturulmuştur. (Şekil 3.4.)



Şekil 3.4. Test kirişleri üzerinde yükleme düzeni. (Tao & Du, 1985)

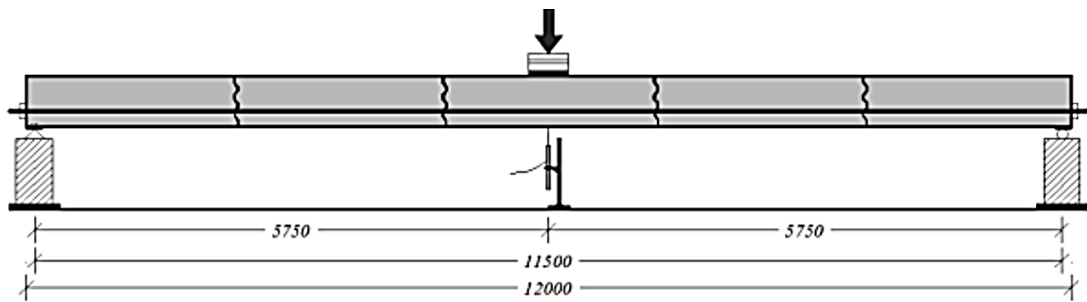
Analiz aşamasında, ÖG beton kirişi aşamalı nokta yüklerine maruz bırakılmış ve göçme gerçekleşene kadar bu yükler artırılmıştır. Yük-yer değiştirme davranışının özelliklerini incelemek için üç modelleme tekniği (1D, 2D ve 3D) kullanılmıştır. Sayısal modeller, yük-yer değiştirme davranışını değerlendirmek için her adımda 3.7 faktörü ile nokta yüklerine maruz bırakılmış, yükler, kirişler başarısız olana kadar kademeli olarak

arttırılmıştır. Kiriş tepkisinin başlangıç doğrusal elastik aralığı, uygulanan yük ile yer değiştirme arasında doğrusal bir bağlantı tarafından kurulmuş ve çatlama başlangıcı ve yayılmasına bağlı olarak doğrusal olmayan davranışla devam etmiştir. Stabilité ve verimliliği sağlamak için Newton-Raphson yöntemi, maksimum 25 iterasyon ile ve bir çizgi arama yaklaşımıyla kullanılmıştır. Maksimum iterasyon sayısında yakınsama elde edilemezse, analiz devam etmiş ve kirişler göçmeye ulaşana kadar yük-yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Doğrulanmış sayısal modellerin, çeşitli yükleme senaryolarında BA kirişlerin yapısal davranışını öngörme konusundaki doğruluk ve güvenilirliği, deneysel verilerle karşılaştırılarak saptanmıştır. Modellerin, kirişler içindeki çatlama başlangıcı ve yayılma mekanizmalarını etkili bir şekilde yansıtmaya yeteneği, deneysel ve sayısal veriler arasındaki sürekli uyum ile kanıtlanmıştır.

3.2.3.3. Ard germeli segmental kiriş

Al-Sherrawi vd. (2018), ön üretimli AG segmental beton kirişlerin çeşitli tipte epoksi ile birleşimlerin altındaki statik yükler altındaki davranışını inceleyen deneysel bir araştırmayı ele almıştır. Bu çalışmanın amacı, derz şekli, epoksi dayanımı ve ÖG kuvvetinin segment kirişlerin yapısal performansı üzerindeki etkilerini araştırmak ve sonuçları referans olarak kullanılan monolit dökme kirişin sonuçları ile karşılaştırmaktır. Makale aynı zamanda segmental yapılar üzerine önceki araştırmaların gözden geçirilmesini ve deneysel programın, malzemelerin, numunelerin, enstrümanların, yükleme sürecinin ve test değişkenlerinin açıklamasını içerir. Çalışma, yük-yer değiştirme eğrileri, çatlak desenleri, göçme mekanizmaları, derz şekil değiştirmeleri ve gerilme dağılımları gibi test bulgularını kapsamaktadır.

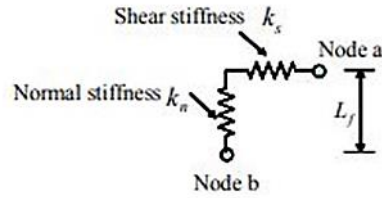
Beton basınç dayanımı 41.3 MPa, çekme dayanımı 4.2 MPa'dır. Çekme donatısının çapı 12 mm, etriye çapı ise 10 mm olarak belirlenmiştir. Tüm donatı elemanlarının toplam akma dayanımı 555 MPa olarak belirlenmiştir. AG tendonu dört adet 15.4 mm çubuktan oluşmaktadır. Tendonlar sırasıyla 1680 MPa ve 1860 MPa akma dayanımına sahiptir. Segmental kirişin deneysel yükleme şekli Şekil 3.5'te gösterildiği gibidir.



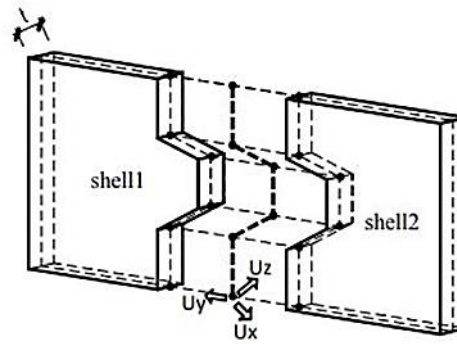
Şekil 3.5. Segmental kirişin deneysel test programı

Segmental kirişler düğümden düğüme birleştirilmiş ve bu konfigürasyon, kiriş segmentleri arasında etkili ve güvenilir bir bağlantı sağlamaktadır (Şekil 3.6). Kirişleri birleştirmek için kullanılan malzemeler farklı özelliklere sahip olabilir. Bağlantı noktasında Coulomb sürtünme bağlantısı kabul edilmiştir. Coulomb sürtünmesi, iki yüzeyin sürtünmeli etkileşimler aracılığıyla temas ettiği bir tür bağlantıdır. Normal ve kayma rijitlik değerlerini malzeme parametrelerine dayanarak oluşturmak için

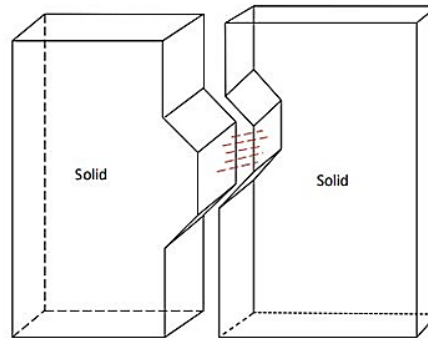
Matematiksel Modelleme (MC90, 1993; Kaya & Salim, 2017) kullanılmıştır. Bu rijitlik değerleri, segment kiriş birleştirmelerinin davranışını ve dayanıklılığını değerlendirmek için esastır.



a)



b)



c)

Şekil 3.6. Segmental arayüz modelleri: a) Birleşim rijitliği, b) 2D kabuk, ve c) 3D katı (Ferreira, D., & Manie, J. (2022).)

DIANA SE yazılımında kullanılan yapısal arayüz bileşenleri, geometrik kesintileri beton ve tuğla gibi malzemelerde simüle etme konusunda özellikle etkili olmuştur. Ayrıca, BA içindeki bağ-kayma katmanlarını da içermektedir (Ferreira vd.,

2022). Arayüz elemanları için kullanılan malzeme modelleri, arayüz boyunca çekme, gerilme ve göreceli yer değiştirmeler arasında doğrusal veya doğrusal olmayan bir ilişki kurmaktadır. Bu modellerde, normal ve kesme yer değiştirmeleri için t_n ve t_t kullanılmıştır. Göreceli yer değiştirmeler ise normal u_n ve kayma göreceli yer değiştirmesi u_t olarak adlandırılmıştır. İlk monolitik geometriyi tanımlamak için, rijitlik vektörü ile göreceli yer değiştirme vektörleri arasındaki doğrusal bağlantı k_n ve k_t olarak adlandırılan rijitlik değerleri ile atanmıştır (Červenka vd., 2016; Ferreira vd., 2022) (Denkem 17).

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Belirli durumlarda, arayüz elemanları için Gaussian entegrasyon şemasının kullanılması, kinematik eleman performansında doğruluk kaybına yol açabilir. Bu nedenle, rijitliği karakterize etmekte kullanılan arayüz bileşenleri için daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla birleşik bir entegrasyon stratejisi önerilmektedir. Bu bağlamda, rijitlik değerleri aşağıdaki Denklem (18) ile ifade edilebilir (Kaya & Salim, 2017).

$$\begin{cases} k_n = \frac{E}{t} \\ k_t = \frac{G}{t} \end{cases} \quad (18)$$

Segmental kiriş birleştirme işlemi sırasında dayanıklı ve kararlı bir bağlantı elde etmek için yüksek basınç kapasitesine sahip epoksi tercih edilmiştir. Bu özel kimyasal madde, segmental kirişlerin birleştirildiği yerde yüksek dayanıklılık ve yapışma yetenekleri sunarak yapı bütünlüğüne ve yük iletimine önemli katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, yüksek basınç kapasitesine sahip epoksinin çevresel direnç ve şekil değiştirme özellikleri, segmental kiriş birleşimlerinin uzun vadeli dayanımını artırmaktadır. Yüksek dayanıma sahip epoksinin elastikiyeti ve kayma modülü, malzemenin esneklik ve dayanıklılığını belirleyen önemli unsurlardır ve bu özellikler Denklem (19) ile entegre edilmiştir.

$$\begin{cases} k_n = \frac{E + E_{ep.}}{t} \\ k_t = \frac{G + G_{ep.}}{t} \end{cases} \quad (19)$$

Üst ve alt başlıklardaki birleşim noktalarını modelleyen arayüz elemanlarına, kohezyonlu bir Coulomb tipi sürtünme yasası atanmıştır. Kohezyon c , malzemelerin iç yapısının bir özelliği olarak segmental kirişlerin birleşim noktalarında kullanılan malzemeler arasında etkili ve güçlü bir bağlantı sağlar ve BA gibi malzemelerin iç yapısındaki karakteristik bir özellik olup parçacıklar arasındaki yapışmayı ifade eder. Yüksek bir kohezyon değeri, malzemeler arasındaki sürtünmeyi en aza indirerek birleşim noktasındaki yük iletimini ve taşıma kapasitesini etkileyen esas bir etmendir, bu da birleşim dayanıklılığını ve kararlılığını artırır. Diğer yandan, sürtünme açısı, iki malzemenin sürtünme davranışını tanımlar. Segmental kiriş birleşimlerinde kullanılan malzemelerin sürtünme açısı ϕ değerleri, birleşim noktasındaki sürtünme kuvvetlerini

belirler. Breen formülü (Ramírez vd., 1993; Turmo vd., 2006), kohezyon ve sürtünme açıları gibi birleşim dayanıklılığı bileşenlerinin belirtilen değerlerini tahmin etmiş ve bu da sürtünme katsayısını Denklem (20) kullanarak belirlemiştir.

$$\begin{cases} \mu_1 = 0.6 \\ \mu_2 = 0.205\sqrt{f_c} \\ c = 0.996\sqrt{f_c} \end{cases} \quad (20)$$

DIANA yazılımı kullanılarak bu AG segmental kirişin doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Bu analiz, kirişlerin göçme anına kadar olan davranışını simüle etmeyi ve post-peak tepkiyi doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlamaktadır. Doğrusal olmayan analiz yaklaşımı, simülasyon süreci boyunca sayısal kararlılığı ve yüksek verimliliği sağlamıştır. Göçmeye kadar olan süreçte kademeli olarak bir nokta yükü uygulanmış ve bu süreçte yinelemeli bir yaklaşım kullanılmıştır. Newton-Raphson yöntemi, hesaplama verimliliğini sağlamak ve göçmeye yol açan kritik tepkileri belirlemek için kullanılmıştır. Ayrıca, doğruluğu tehlikeye atmadan yaklaşımı hızlandırmak için bir çizgi arama yöntemi entegre edilmiştir.

Enerji ve kuvvet yakınsama normları, yakınsama kriterlerini belirlemek için kullanılmış ve maksimum yineleme sayısı içinde yakınsama elde edilemezse, analiz tepe sonrası tepkiyi doğru bir şekilde saptamak için genişletilmiştir. Sayısal kararlılığı sürdürmek için iç teğet (quasi-Newton) yöntemi kullanılmıştır. Tüm diğer analitik değişkenler, sayısal sonuçların güvenilirliğini ve geçerliliğini sağlamak için analiz boyunca dikkate alınmıştır. Gelişmiş sayısal tekniklerin, arc length control, Newton-Raphson yöntemi, yakınsama kriterleri ve kesik çatlak modelleme gibi, birleşimi, karmaşık yük senaryoları altında ön gerilmeli kirişlerin davranışını kapsamlı bir şekilde incelemeye imkân tanımıştır.

3.2.3.4. Sıvı – yapı etkileşimi

Yapılan araştırmada, sıvı-yapı etkileşiminin SE modellerine entegrasyonu, karmaşık süreçleri anlamak için kritik bir unsurdur. Araştırmacılar, sıvı-yapı etkileşimini etkin bir şekilde yönetmek için bir dizi etkili yaklaşım belirlemişlerdir.

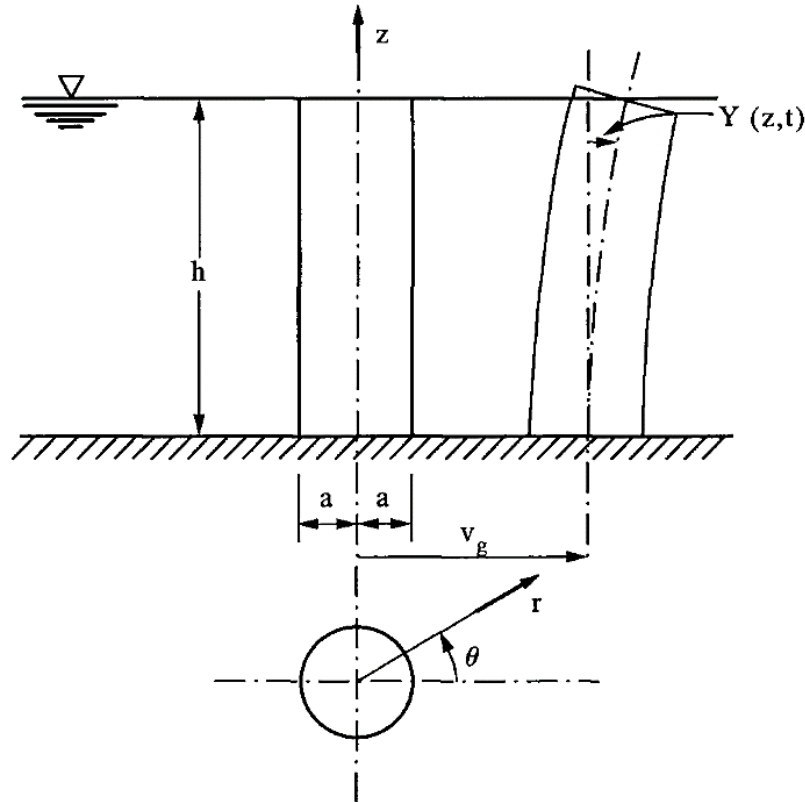
Sıkıştırılamaz sıvıların modellenmesinde, özel ek kütle etkileri ile güçlendirilmiş birleşim kullanımı uygun bir stratejidir. Bu yöntem, sıvının karmaşık davranışını SE modelinde doğru bir şekilde aktarmayı sağlar. Bu özel birleşim kullanımıyla, sıvı ve yapı bileşenleri arasında sağlam arayüzler kurulabilir, böylece hesaplama çerçevesi içinde sorunsuz entegrasyon sağlanır. Boşluk bağlantılarının entegrasyonu, sıkıştırılamaz sıvıların katı yapılarla sorunsuz entegrasyonunu sağlamak kullanılabilir (Van Brummelen vd., 2009; Idelsohn vd., 2009).

Daha karmaşık durumlar için, sıvının kapsamlı bir modellemesi gereklidir. Bu yaklaşımda, yapısal bileşenler, izotrop malzemelerden yapılmış katı elemanlar kombinasyonu kullanılarak tanımlanır. Sıvı ile yapı arasındaki dinamik etkileşimi hesaba katmak için, yapısal elemanların yüzeylerine özel sıvı-yapı arayüz elemanları entegre edilir. Bu elemanların doğru bir şekilde kullanılması, belirli gereksinimlere dikkatli bir şekilde uyulmasını gerektirir (Barone vd., 2005).

Bu çalışmada, DIANA SE yazılımı kullanılarak sıvı-yapı etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesi hedeflenmiştir. Gerçekçi bir sıvı modeli oluşturulmuş ve yapısal bileşenler sıvı ortamına yerleştirilmiştir. Daha sonra, modelin doğruluğunu değerlendirmek için doğal frekans verileri ve mod şekilleriyle karşılaştırma yapılmıştır. Bu alt bölüm, DIANA programının sıvı ile yapı arasındaki etkileşimi başarıyla simüle etme yeteneğini doğrulamayı amaçlamaktadır.

Han (1996), hesaplamalı akışkan dinamiği yöntemleri kullanarak, sıvı-yapı etkileşiminin (SYE) analitik modellemesinde ek kütle etkilerinin eklenmesine vurgu yapmıştır. Sıvının ataleti tarafından oluşturulan ek kütle kavramı, sıvı ortamıyla etkileşim halinde olan yapıların dinamik tepkisini doğru bir şekilde tahmin etmede önemli bir rol oynamaktadır.

Yapılan çalışmada gerçekleştirilen parametrik analiz, su altında yer alan yapısal olarak esnek bir silindirin serbest ve zorlanmış titreşim yanıtlarını kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Suda esnek silindir (Han, 1996)

Çalışmada su ortamındaki sıvı yoğunluğu $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, silindirin malzeme yoğunluğu $\rho = 2450 \text{ kg/m}^3$, Young modülü $E = 2.94 \times 10^7 \text{ kPa}$ ve yapı karakteristik yüksekliği $h = 20 \text{ m}$ ve $a/h = (0.003 \div 0.050)$ olarak belirlenmiştir. Denkem (21) kullanılarak hesaplanan ilk üç özfrekansın oluşturduğu titreşim frekanslarının sonuçları, karşılaştırma ve analiz için Şekil 1'de sistemli bir şekilde sunulmuş ve kaydedilmiştir. Bu frekanslara ait mod şekilleri, Denklem (22) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (21)$$

$$y(z) = C_1 S(\beta z) + C_2 T(\beta z) + C_3 U(\beta z) + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \xi (C_1 S_n + C_2 T_n + C_3 U_n) \cos(\lambda_n z) \quad (22)$$

DIANA modelleme süreci sırasında gerçekçi bir sıvı modeli oluşturulmuş ve sıvı ile yapı arasındaki etkileşim tanımlanmıştır. Sıvı belirli boyutlara sahip bir katı olarak modellenmiş olmasına rağmen, alt kısımdan tamamen kısıtlanmış ve diğer tüm yanalardan sonsuz sınırlı olarak kabul edilmiştir. Malzeme modeli, yapı ve sıvının özelliklerine uygun olarak seçilirken, eleman modeli her iki bileşen için de katı olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, simülasyon içinde karmaşık SYE'nin kapsamlı bir temsilini sağlamıştır, böylece sistemin dinamik davranışının ve tepkisinin detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır. Yapısal modal tepki analizinin başlangıç aşaması, önceden belirlenmiş bir frekans aralığına düşen özmodları tanımlayan bir özdeğer analizi yapılmasını içerir. Bu özdeğerler daha sonra frekans tepki analizi için kullanılmıştır.

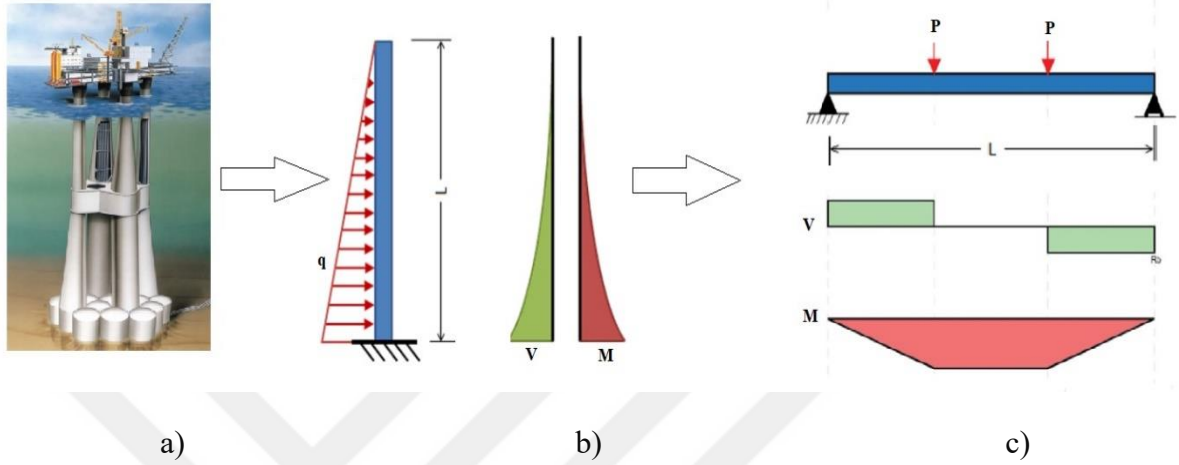
Sonuçların doğruluğunu sağlamak için, periyodik kuvvet artan sıralı frekans adımlarında aşama aşama uygulanmıştır ve adım büyüklüklerinin belirlenmesinde ilk üç yapının özdeğerlerine odaklanılmıştır. Frekans adım büyüklükleri, analizin doğruluğunu ve güvenilirliğini korumak için 0.03 Hz. olarak belirlenmiştir.

3.2.4. Parametrik Çalışma

Gerçek yapı davranışının güvenilir bir şekilde modellenmesi, doğru ve uygun sonuçlar elde edilmesi için kullanılan SE modellerinde yapının moment ve kesme kuvveti oranı ($\frac{M}{V}$) üzerine odaklanılarak, gerçek yapı performansına uygun bir yaklaşım elde etmek gerekmektedir. Önerilen modelleme tekniği, modelle aynı veya en yakın elde edilebilir $\frac{M}{V}$ oranını koruyarak hem monolit hem de segmental davranışları etkili bir şekilde simüle edilmiştir.

Bu yöntemin etkinliği, bir Condeep platform modelini temsil eden bir konsol kirişi ve dört noktadan yüklenen bir kirişin karşılaştırılması ile gösterilmiştir (Şekil 3.8). $\frac{M}{V}$ Oranının kritik olduğu durumlar, platformun yerle gömülü bir konsol kirişi olarak ele alındığında, maksimum $\frac{M}{V}$ oranının yapının yüksekliğine benzer olduğu görülmektedir. Ardından, $\frac{M}{V}$ oranını eşleştirmek için kiriş üzerine dört konumda yük uygulanan bir sayısal model oluşturulmuştur. Burada, yapı içindeki iç kuvvetlerin ve şekil değiştirme karakteristiklerini kontrol eden $\frac{M}{V}$ oranının bu hassasiyetinden kaynaklanmaktadır. (Denkem 23)

$$\frac{M}{V} = \begin{cases} \left(\frac{q \cdot L^2}{2} \right) = L = \infty & \rightarrow \text{Gerçek yapı} \\ \left(\frac{q \cdot L}{2} \right) & \\ \frac{M_{max}}{0} = \infty & \rightarrow \text{SE modeli} \end{cases} \quad (23)$$



Şekil 3.8. Gerçek bir yapının temsiledici sonlu elemanlar modeli. a) Gerçek Condeep platformu (Oljemuseum) b) prototip yükleme modeli. c) SE modeli

DIANA SE yazılımında yapılan dört noktalı eğme testinde değerlendirilen segmental boşluklu AG dairesel kirişin doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler toplamda 10 m uzunluğunda ve dış çapları 1 m, iç çapları ise 0.8 m'dir. Kirişin test edilen kısmı 5 m'dir ve sırasıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 segmente ayrılmıştır (Tablo 3.3). Sayısal analizi konu edildiği yapısal davranışı kontrol eden temel parametreler segmental boşluklu dairesel kirişin geometrik ve malzeme özellikleri dikkate alınmıştır.

Tablo 3. 3. Prototip ve modelin geometrik özellikleri

	Uzunluk	Dış çap	İç çap	Segment yüksekliği, m (Segment sayısı)				
	<i>m</i>							
Prototip	50	8-12	8-10	10	12.5	16.67	25	50
				(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
Model	5	1	0.8	1	1.25	1.67	2.5	5
				(5)	(4)	(3)	(2)	(1)

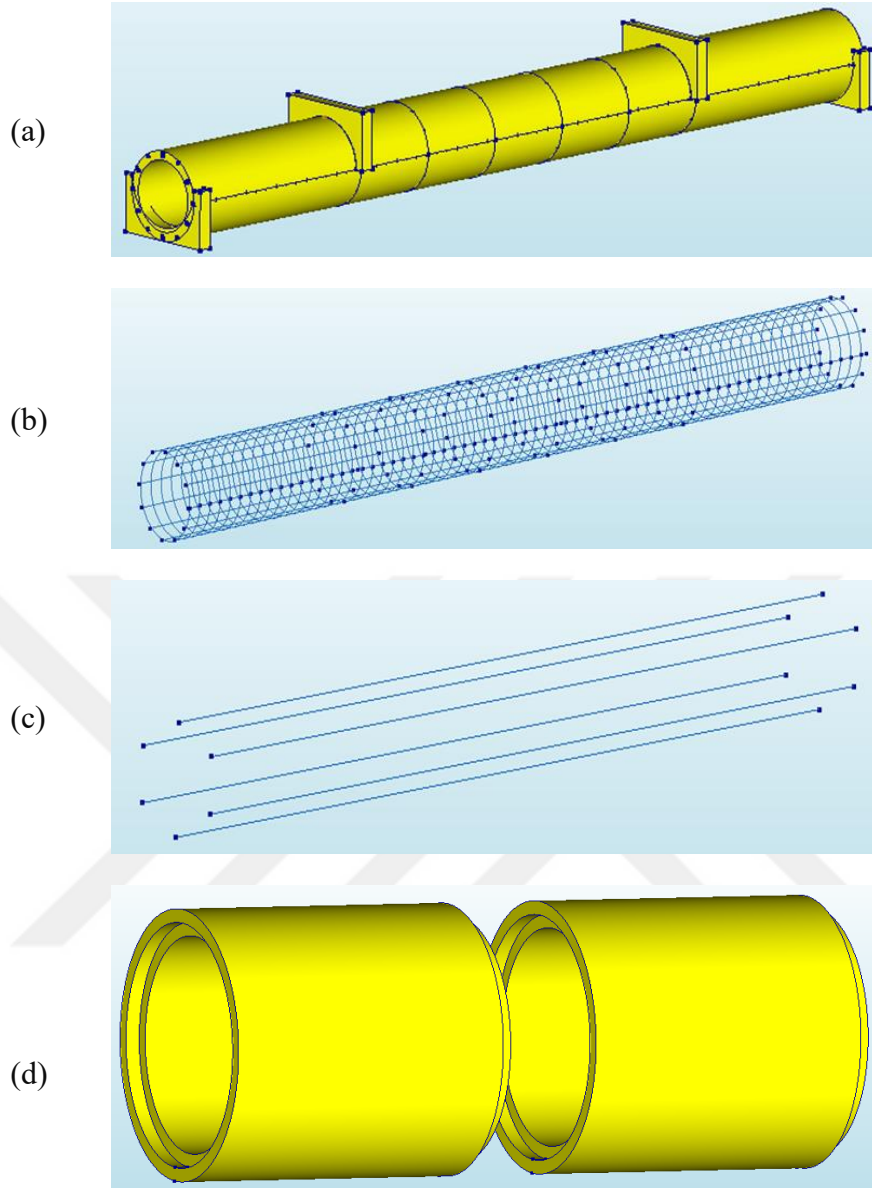
Dairesel boşluklu segmental kirişte kullanılan betonun mekanik özellikleri, malzeme karakterizasyonu kapsamında belirlenmiştir (Tablo 3.4). Ayrıca, SE analizi için

kullanılan beton, donatı ve tendonlara dair malzeme modelleri, bu bileşenlerin sayısal simülasyondaki temsilini ve mekanik davranışlarını gösteren Şekil 3.9'da grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 3.4. SE modelin tasarım değişkenleri

Malzeme	Parameter	Değer
Beton	Elastisite modulu E	30 GPa
	Poisson oranı ν	0.2
	Basınç dayanımı f_c	40 MPa
	Çekme dayanımı f_t	4.1 MPa
	Yoğunluk ρ	2500 kg/m ³
Donatı	Boyuna donatı çapı D	12 mm
	Dairesel donatı çapı d	10 mm
	Elastisite modülü E	200 GPa
	Akma mukavemeti f_{ym}	555 MPa
	Kopma mukavemeti f_{um}	676 MPa
	Gerinim ε_{su}	0.02
Ard germe tendonu	Tendon çapı D_f	6×15.4 mm
	Elastisite modülü E	200 GPa
	Akma mukavemeti f_{ym}	1680 MPa
	Kopma mukavemeti f_{um}	1860 MPa
	Gerinim ε_{su}	0.02

Sayısal SE simülasyonunda, beton malzemesini, çelik taşıma desteklerini ve donatıları temsil etmek için 3D katı elemanlar (Şekil 3.2c) kullanılarak gerçekçilik ve kararlılık sağlanmıştır. Çelik donatılar, kirişin her segmentinde ayrı-ayrı modellenmiştir. AG donatı, segmentlerin uçtan uca bir arada çalışmasını sağladığından dolayı boydan boya modellenmiştir. Beton ile donatılar arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde temsil etmek için DIANA yazılımındaki "embedded" (gömülü) anahtar kelimesini kullanarak tutarlı bir bağ yaratılmıştır. Bu terim, donatı elemanlarının dış kuvvetlere doğru etkileşimini doğru bir şekilde modellemeye olanak tanır. Bu kapsamlı modelleme yöntemi, çeşitli yükleme koşullarında bir yapının karmaşık davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için modern sayısal yöntemleri birleştirmektedir.



Şekil 3.9. Dairesel boşluklu segmental kirişlerinin sonlu eleman modeli: (a) destek ve yükleme plakalı daireseel kiriş, (b) uzununa ve daireseel donatılar ve (c) ard germe tendonları, (d) segmental birleşim detayları.

3.2.4.1 Ard Germeli Segmental kesit ve birleşimin kesme dayanımı.

AG segmental kirişler, tasarımda önemli olanaklar sağlayan, malzeme tüketimini azaltan ve etkin yük taşıma kapasitelerine sahip kritik unsurlardır. Bu elemanların tasarımında en önemli hususlardan biri de kesme dayanımıdır. İki kirişin birleştiği ve yük aktarımının gerçekleştiği segmental birleşimler, yapıların toplam kapasitesini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Yapısal bütünlüğü sağlamak ve erken göçmeni önlemek için birleşimin kesme kapasitesi, kiriş kesitinin kesme kapasitesini aşmalıdır.

Segmental bir kirişin kesme kapasitesi hem dayanım hem de geometrik özelliklerinden etkilenmektedir. Birleşim bölgelerine etki eden kuvvetler, birleşimin toplam kesme kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Birleşimin taşıma kapasitesini genel kiriş kesitinden daha yüksek tasarlamak, uygulanan yük altında stabiliteyi garanti etmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 3.5. Kesit ve birleşimin kesme kapasitesi

Kesit kesme kapasitesi		
Queiroz ve Horowitz, 2016	$V_c = 0.27 \cdot \alpha_{w2} \cdot \alpha_{cv} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$	2058.5 kN
Segmental birleşim kesme kapasitesi		
AASHTO, 1999	$V_n = A_k \sqrt{f_{ck}} (0.2048 \sigma_n + 0.9961) + 0.6 A_{sm} \sigma_n$	3492.9 kN
Turmo vd., 2006	$V_n = A_k \frac{\sqrt[3]{f_{ck}^2}}{100} (7 \sigma_n + 33) + 0.6 A_{sm} \sigma_n$	2304.4 kN
Rombach vd., 2004	$V_n = A_k f_{ck} + 0.65 A_j \sigma_n$	2628.5 kN
ATEP, 2009	$V_n = A_j (1.14 \sigma_n + 0.0564 \sqrt{f_{cd}})$	2062.3 kN

Kesitin kesme kapasitesi, Queiroz ve Horowitz (2016) tarafından sağlanan analitik ifade kullanılarak, boş dairesel kesitler için 2058.5 kN olarak hesaplanmıştır. Segmental birleşimlerin kesme kapasitesi, doğrudan toplam yapının kesme kapasitesini etkileyen dayanım ve geometrik özelliklere bağlıdır. Segmental birleşimlerin kesme kapasitesi ve AG kuvvetini belirleme amacıyla önceki çalışmalardan alınan analitik ifadeler (AASHTO, 1999; Rombach, 2004; Turmo vd., 2006; ATEP, 1996) kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3.5).

İfadeler, basınç, normal ve kesme gerilmelerinin katkılarını dikkate alarak kesitlerin ve birleşimlerin kesme kapasitelerine dayanmaktadır. Analizlerde AG kuvveti 1500 kN olarak alınmış ve segmental birleşimin kesme kapasitesi, Tablo 3.5'te verilen ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır. Birleşimin kesme kapasitesi, 2058.5 kN olan kesit kesme kapasitesini aşan 2062.3 ile 3492.9 kN arasında belirlenmiştir.

3.2.4.2. Segmental Birleşim SE Modeli

Birleşim, arayüz elemanları kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir ve bunun da her biri geometri temelinde kendi prensiplerine sahiptir. Birleşimin kesme kapasitesini belirlemek ve AG kuvvetini belirlemek amacıyla önceki çalışmalardan (Queiroz & Horowitz, 2016; AASHTO, 1999; Turmo vd., 2006; Rombach vd., 2004; ATEP, 1996) alınan denklemler kullanılmıştır. Arayüz elemanlarının elastik davranışı, birleşim modelinde normal ve teğetsel rijitlik katsayıları (k_n ve k_t) tarafından belirlenmiştir. Bu katsayılar, birleşim elemanının normal ve teğetsel gerilmeleri (t_n ve t_t) ile ilgili normal

ve teğetsel göreceli deplasmanlar arasında bir ilişki kurmaktadır. k_n ve k_t 'ye önemli ceza değerleri verilmiştir ve bu, sıkıştırmadan önce başlangıçta sürekli geometriyi doğru bir şekilde yeniden oluşturur. Penalty değerlerini elde etmek için Denklem (17) ve (18) kullanılmıştır.

Birleşimdeki segmentler arasındaki etkileşimi temsil etmek için bir Coulomb tipi sürtünme yasası kullanılmıştır. Bu sürtünme kuralı, hareket eden segmentler arasındaki temas yüzeylerinin mekanik davranışını simüle etmek için sıklıkla uygulanmaktadır. Modeldeki kohezyon, birleşimde mevcut olan yapışma kuvvetlerini dikkate alır ve genel bir birleşim davranışını etkileyebilir.

Birleşimdeki normal ve teğetsel rijitlikler, Coulomb sürtünme yasası tarafından tanımlanmıştır. Bu, iki temas eden yüzey arasındaki kayma direncinin arayüz uygulanan normal kuvvet ve sürtünme katsayısı (μ olarak gösterilen) ile orantılı olduğu teorisine dayanmaktadır. Sürtünme katsayısı, temas noktasına uygulanan teğetsel (kesme) kuvvetinin normal kuvvetine oranıdır.

Kirişin segmentleri arasındaki birleşimler, bu sürtünme kuralı ile birlikte tanımlanan arayüz elemanları kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Bu, birleşimleri daha gerçekçi bir şekilde simüle edmekte ve birleşim yüzeyleri boyunca kayma kuvvetlerinin iletilmesini sağlamaktadır. Bu özel problemin deneysel ve sayısal çalışmalarının bulguları, Breen ve Roberts'ın tamamen teorik bir temele dayanan, deneme sonuçlarını en iyi şekilde tahmin eden Denklem (20) ile geliştirdiği formülün olduğunu göstermektedir. (Ramírez vd., 1993; Turmo vd., 2006).

3.2.4.3. DIANA Doğrusal Olmayan Analiz Aşaması

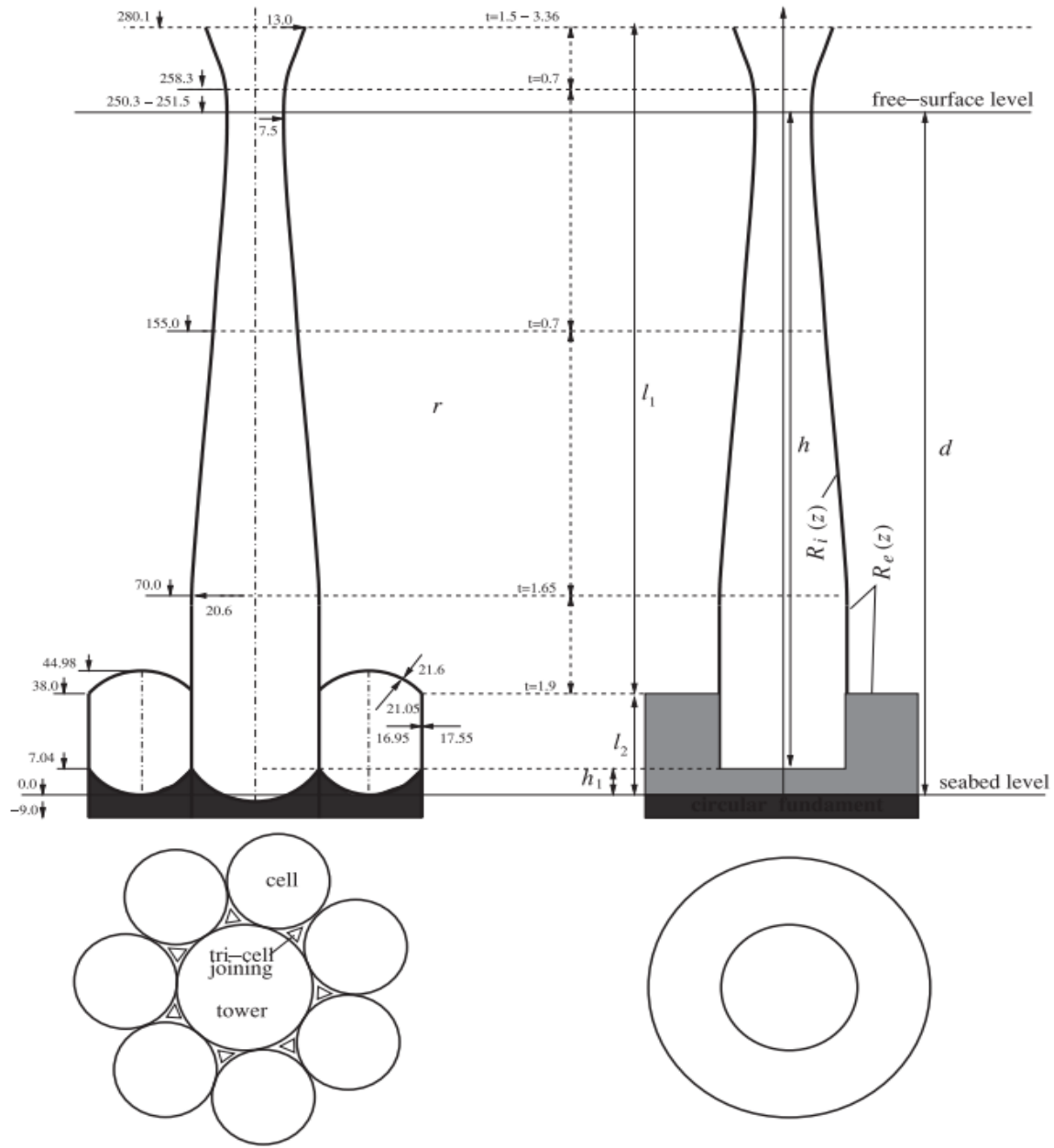
Analiz aşamasında, dairesel boşluklu AG segmental beton kiriş artan nokta yüklerine maruz bırakılarak göçene kadar incelenmiştir. Yük-yer değiştirme davranışı karakteristiklerini değerlendirmek için katı bir modelleme yaklaşımı kullanılmış ve yük-yer değiştirme davranışını analiz etmek için sayısal modeller, her adımda uygulanan 2.8 faktör ile nokta yüküne maruz bırakılmıştır. Yakınsama sorunlarının azaltmak için bir iteratif yöntem kullanılmıştır. Burada, her iterasyon, önceki aşamaların etkilerini hesaba katan bir örtük bir yöntem sağlamakta ve daha kararlı ve doğru sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Sayısal simülasyonda kirişlere uygulanan yükler, kirişler göçene kadar yavaşça artırılmıştır. Başlangıçta kiriş davranışı, uygulanan yük ile buna karşılık gelen yer değiştirme arasındaki anında ilişki tarafından tanımlanan lineer elastik bir özelliği göstermiştir. Bu kontrol mekanizması, kirişlerin doğrusal olmayan davranışını etkili bir şekilde elde etmek için güncellenmiş normal düzlem yaklaşımı özellikle kullanıldığında, kirişlerde çatlak gelişimi gibi doğrusal olmayan davranışlar sergilediğinde bu kontrol mekanizmasının analizi doğru bir şekilde takip etmesini sağlamıştır.

Kirişler doğrusal olmayan davranış sergiledikçe, bu kontrol mekanizması, analizin kirişlerin göçmeye yanıtını daha gerçekçi bir şekilde modellemesine olanak tanımıştır. Newton-Raphson yöntemi, çalışmada kullanılan sayısal analizde, 25 iterasyon maksimum varsayılan değeri ile bir çizgi arama metodolojisi ile kullanılmıştır. Seçilen stratejinin amacı, analiz sırasında hem kararlılığı hem de sayısal etkinliği sağlamaktır.

3.2.5. Monopile Draugen Condeep Platformu

3.2.5.1. Genel Bakış

Draugen Condeep platformu, Norveç Denizi'nde yer alan açık deniz petrol ve doğal gaz platformudur. Bu dikkate değer yapı, 1990'ların başında kurularak petrol endüstrisinin mühendislikteki çalışmalarına bir örnek teşkil etmektedir. Norveç kıyılarının yaklaşık 150 kilometre açığında konumlanan bu platform, Monopile Condeep olarak bilinen tasarımıyla açık deniz inşaatında muazzam bir başarıyı temsil etmektedir ve o tarihten bu yana Norveç'in petrol üretimine önemli katkılarda bulunmuştur. 1993 yılında kurulan Draugen platformu, Kuzey Denizi bölgesinde petrol ve doğal gaz üretiminde kritik bir rol oynamıştır. Yaklaşık 250 metre derinlikte deniz tabanına oturan Draugen Condeep platformu, Draugen petrol sahasında faaliyet göstermektedir. İhtişamlı beton yerçekimi-temelli yapısıyla, platform yıllar boyunca sert deniz koşullarına ve fırtınalı havalara dayanmış, Kuzey Denizi'nin zorlu ortamında güçlü bir şekilde ayakta kalmıştır. Platformun tasarımı, denizin güçlü kuvvetlerine karşı koymasını sağlamakta ve onu açık deniz petrol endüstrisinde dayanıklılığın ve direncin sembolü haline getirmektedir. Gelişmiş sondaj teknolojisi ve güvenlik önlemleriyle donatılmış olan Draugen Condeep platformu, ham petrol çıkarımında ve üretiminde önemli bir rol oynamış ve bölgenin enerji sektörüne ciddi katkılar sağlamıştır (Alm ve diğerleri, 1995; Faltinsen ve Timokha, 2016). Platformun kesit alanı ve duvar kalınlığının su derinliğine göre değişimi bazı çalışmalarda titizlikle incelenmiştir. Bu konuda önemli bir referans çalışması olan Faltinsen ve Timokha'nın 2016 yılındaki çalışması, Şekil 3.10'da bu değişiklikleri açıkça göstermektedir. Bu grafik, platformun su derinliği arttıkça nasıl evrildiğini ve bu değişikliklerin platformun yapısal bütünlüğüne olan etkisini net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 3.10. Yedi hücreli destek alt yapısının dikey bir silindirik gövde ile değiştirilmesini öneren sadeleştirme (Faltinsen ve Timokha, 2016)

3.2.5.2. Dalga yükleri

Condeep platformlarının tasarımını ve inşasını önemli ölçüde etkilediğinden dalga değişkenlerinin doğru olarak belirlenmesi ve deniz yapısı-dalga etkileşiminin daha derinlemesine incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Denizlerde oluşan dalgaların en sık görüleni rüzgar etkenli dalgalardır.

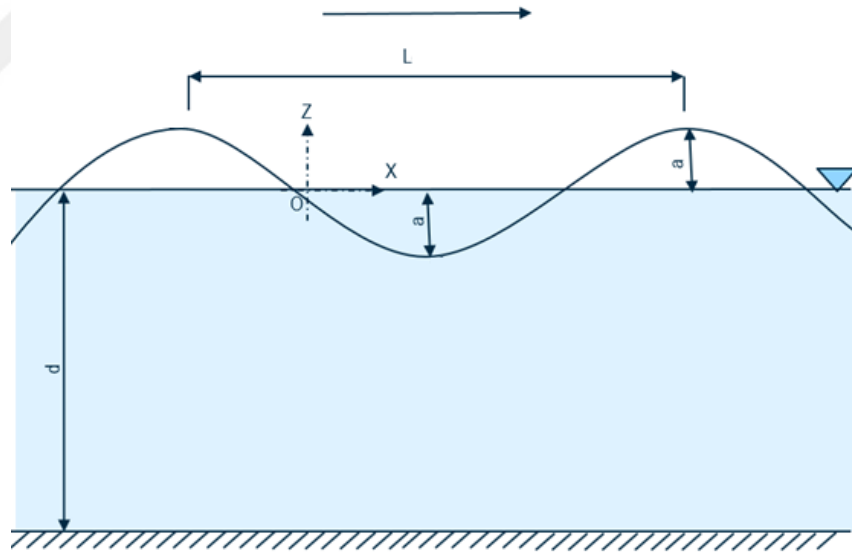
Rüzgâr, su kütlelerinin yüzeyi boyunca estiğinde suya enerjisini ileterek rüzgar etkenli dalgaları oluşturur. Oluşacak olan dalgaların yüksekliği, periyodu vs. parametreleri, rüzgâr esme hızı, feç mesafesi ve rüzgar esme süresi ile değişmektedir. Güçlü rüzgarlar açık denizlerde uzun feç mesafeleri nedeni ile oluşacak dalgalar istisnai büyüklüklere ulaşabilir.

Pozitif x-yönünde hareket eden bir dalga profili karakterize edilirken kullanılan denklem (24) gösterilmiştir:

$$\varphi(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (24)$$

Burada, a dalga genliğini temsil etmekte, $H = 2a$ dalga yüksekliğini, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ dalganın açısal frekansını, T dalganın periyodunu, $c = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T}$ tekil dalga hızını, $k = \frac{2\pi}{L}$ dalga numarasını ve L dalga boyunu temsil etmektedir.

Dalga boyu L , kritik bir parametredir, bir tepe ve çukur içeren tam bir dalga döngüsünün uzamsal sürede kat ettiği mesafeyi temsil eder. Dalga davranışını ve yayılmasını anlamak için bu kavramın kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Sinüzoidal dalga

Okyanuslarda veya diğer su kütlelerinde gözlemlenen dalgaların, dalga boyu (L), dalga periyodu (T) ve su derinliği (d) arasındaki ilişki temel denklem aracılığıyla ifade edilir (Denklem 25)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (25)$$

Çalışılan bölgenin batimetrisi, kıyı yapısı vs. dalga parametreleri tahminlerini gerçek değere yakın ve güvenilir hale getirmektedir. Dalga ilerleme formülleri, rüzgârın etki alanı boyunca kat ettiği mesafe ve rüzgâr esme hızıyla ilişkilidir. (Denklem 26) Verilen rüzgâr hızı dönüşümleri uygulandıktan sonra, gerçek rüzgâr hızı verileri aşağıdaki matematiksel ifadeler kullanılarak rüzgâr hızına dönüştürülür:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{1609}{U_f} \\ U_{3600} = \frac{U_f}{\left(1.277 + 0.296 \tanh \left[0.9 \log \left(\frac{45}{t}\right)\right]\right)} \\ U_A = 0.71 \cdot U^{1.23} \end{array} \right. \quad (26)$$

Burada, t 1 mil için geçen süreyi, U_f en hızlı rüzgâr hızını, U_{3600} - 1 saatlik ortalama rüzgâr hızını ve U_A rüzgâr gerilme faktörü ($U = U_{3600}$) temsil etmektedir.

Feç sınırı bulunan durumda, temel parametreler feç (F) ve rüzgâr hızını içerir. Buradan belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve belirgin dalga periyodu (T_s) elde edilmektedir. (Denklem 27)

$$\left\{ \begin{array}{l} H_s = \frac{U^2}{g} \cdot 0.283 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{g \cdot F}{U_A^2}\right)^{0.42}\right] \\ T_s = \frac{2\pi \cdot U}{g} \cdot 1.2 \tanh \left[0.077 \left(\frac{g \cdot F}{U_A^2}\right)^{0.25}\right] \end{array} \right. \quad (27)$$

Morison denklemi deniz yapılarına etki eden hidrodinamik yükleri hesaplamak için kullanılmaktadır. Denklem (28), su altındaki deniz yapıları üzerine etki eden atalet kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin bileşkesidir.

$$F_{total} = F_d + F_i \quad (28)$$

F_{total} = Deniz yapısına gelen toplam kuvvet,

F_d = Sürüklenme kuvvetidir, yani suyun ve yapı arasındaki hız farkıdır.

F_i = Atalet kuvvetidir, yani dalga parçacıklarının ivmesinden kaynaklanan kuvvettir.

Sürüklenme kuvvetleri (Drag forces) dalgalar ilerlerken yapı ve suyun göreceli hareketinin bir sonucudur. Sürüklenme kuvveti, göreceli su-yapı hızının karesi ile ilişkilidir. Bu matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir: (Denklem 29)

$$F_d = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V_r^2 = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot D \cdot u \cdot |u| \quad (29)$$

Burada silindirik bir deniz yapısı için;

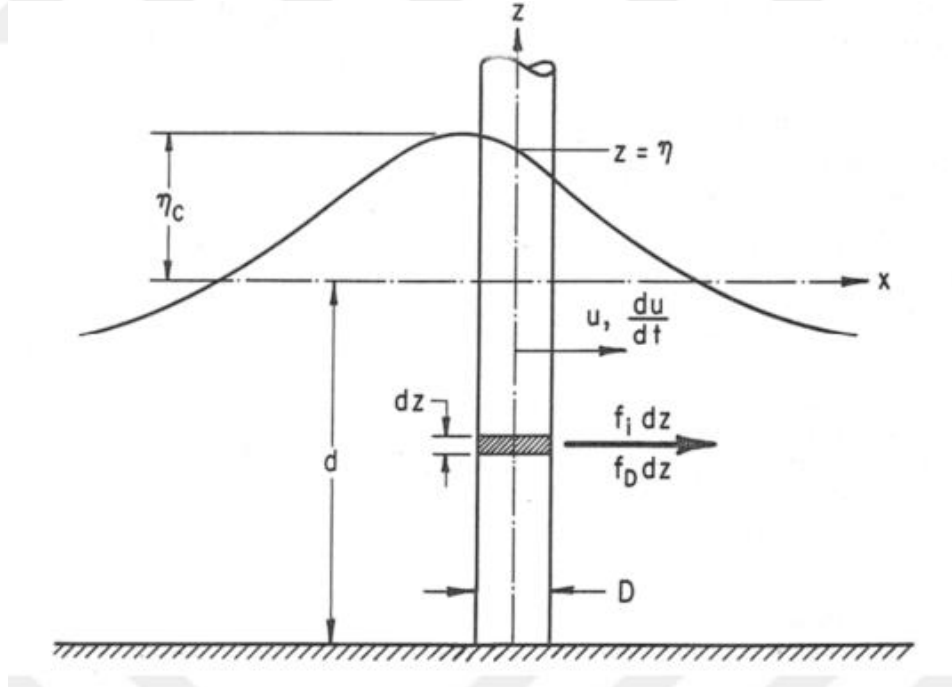
F_d –Yapı üzerinde birim uzunluk başına düşen sürüklenme kuvveti, ρ - akışkanın yoğunluğudur (deniz suyu için genellikle 1025 kg/m^3), C_d – sürüklenme kuvveti sabiti (genellikle 0.5 ile 1.5 arasındadır), A - referans alanı (genellikle silindirin ön yüzey alanıdır), V_r – silindirik yapı eksen seviyesindeki akışkan zerresinin eksene dik yatay hızı, D – silindirin çapıdır.

Atalet kuvvetinin hesaplanması için Morison denklemi kullanılabilir ve bu şu şekilde temsil edilir (Denkem 30):

$$F_i = 0.5 \cdot \rho \cdot C_m \cdot A \cdot V_r = 0.25 \cdot \rho \cdot C_m \cdot \pi \cdot D^2 \frac{du}{dt} \quad (30)$$

Burada: F_i –yapı üzerinde birim uzunluk başına düşen atalet kuvveti, ρ - akışkanın yoğunluğu (deniz suyu için genellikle 1025 kg/m^3), C_m – atalet kuvveti sabiti (yaklaşık 2.0), A – referans alanı (genellikle silindirin ön yüzey alanı). V_r – silindirik yapı eksen seviyesindeki akışkan zerresinin eksene dik yatay hızı, D – silindirin çapıdır.

Morison denklemi, belirli bir derinlikte suya batmış dikey silindirik bir yapı üzerine etki eden dalgaların neden olduğu sürüklenme ve inersiyel kuvvetlerin birleşik etkisinin hesaplanmasına imkân vermektedir (Şekil 3.12). Dairesel sütunlar ve yük hesaplamaları için geliştirilen denklemin aşağıdaki versiyonu, deniz mühendisliği ve sahil altyapı tasarımının önemli bir bileşenidir ve yapıların okyanus dalgalarının ürettiği dinamik kuvvetlere dayanabilecek şekilde güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır (Denkem 31).



Şekil 3.12. Dikey silindire etkileyen dalga yükleri

$$F_{total} = F_d + F_i = \int_{-d}^{\eta} f_i dz + \int_{-d}^{\eta} f_D dz = -F_i \sin \omega t + F_d \cos^2 \omega t \quad (31)$$

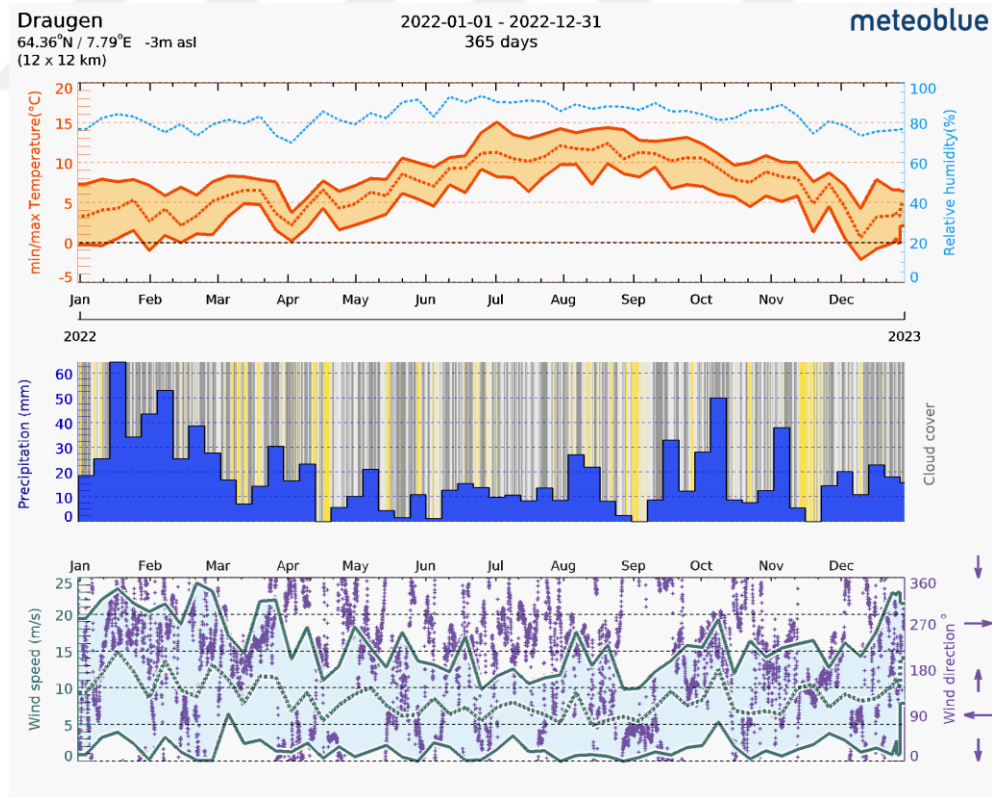
$$F_i = \frac{\pi}{4} \rho \cdot g \cdot C_m \cdot D^2 \cdot H \cdot K_i$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot C_d \cdot D \cdot H^2 \cdot K_D$$

Burada,

$$K_i = \frac{1}{2} \tanh kd \quad \text{ve} \quad K_D = \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

Bu çalışma parametrik çalışma olarak Norveç'te bulunan Draugen platformu üzerinden yapıldığından rüzgâr hızı da oranın yıllık rüzgâr hızı esas alınmıştır. Çalışmada Meteoblue veri seti API'si kullanılarak 10 yıllık rüzgâr hızı verileri belirli alan verileri kullanılmıştır. (Şekil 3.13) Dolayısıyla, dalga yükü, yukarıda belirtilen dört ana yöne bağlı en yüksek rüzgâr hızı değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Maksimum rüzgâr hızı istatistiği (U_f), belirli bir dönemde kaydedilen en yüksek rüzgâr hızını gösteren önemli bir parametredir. Elde edilen verilere göre, Kuzey'den 24 m/s ve Batı'dan 20 m/s maksimum rüzgâr hızı gözlenmektedir. Bu değerler, 10 yıllık zaman dilimi içinde gerçekleşen aşırı rüzgâr koşullarını temsil etmektedir (Meteoblue, 2023). Maksimum rüzgâr hızının (U_f) kabul edilmesini izleyen aşamada, dalga yüksekliği ve periyodu, kıyı hattından istenilen açık deniz platformun konumuna uzanan mesafe (F) dikkate alınarak yukarıda belirtilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.13. Rüzgâr yönüne göre hız değişimin değişimi (Meteoblue, 2023)

Tablo 3.6. Dalga parametreleri

Yön	F (km)	t (s)	U_{3600} (m/s)	U_A (m/s)	H_s (m)	T_s (s)
Kuzey	1380	57.5	19.21	26.91	6.51	10.57
Batı	985	49.25	15.79	21.14	4.88	8.89

Hesap sırasında küçük genlikli dalga teorisi (Small Amplitude Wave Theory) esasen alınarak dalga parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar, belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve belirgin dalga periyodu (T_s) hesaplamak için kullanılan maksimum değerleri sağlamaktadır. Tasarım, değerlendirme ve karar alma süreçlerinin güvenlik odaklı bir yaklaşıma dayandığından emin olmak için bu hesaplamalardan elde edilen maksimum değerleri H_s ve T_s olarak temsil etmek için aşırı dalga olaylarını önceliklendirmektedir.

$$\begin{cases} H_s = H = 6.51 \text{ m} \\ T_s = T = 10.57 \text{ s} \end{cases}$$

Monopile Condeep platformunun $d = 250 \text{ m}$ derin olduğunu göz önünde bulundurarak, dalga boyu için hesaplanmıştır:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{9.81 \cdot 10.57^2}{2 \cdot 3.1415} \tanh\left(\frac{2 \cdot 3.1415 \cdot 250}{L}\right)$$

İterasyonun sonucunda: $L = 174.52 \text{ m}$

$$\frac{d}{L} = \frac{250}{174.52} > 0.5$$

Bu nedenle, derin su dalgaları, su derinliğinin dalga boyunun yarısından büyük olduğu bir su kütlesi boyunca yayılan dalgalardır ($d > 0.5 L$).

$$k = \frac{2\pi}{L} = \frac{2 \cdot 3.1415}{174.52} = 0.036 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{2} \tanh kd = \frac{1}{2} \tanh (0.036 \cdot 250) = 0.5 \\ K_D = \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) = \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2 \cdot 0.036 \cdot 250}{\sinh 2 \cdot 0.036 \cdot 250}\right) = 0.125 \end{cases}$$

Hidrodinamik katsayılar (C_m ve C_d)), özellikle hidrodinamikte, suya batmış veya suyun içinden geçen nesnelerin veya yapıların davranışını açıklamak için kullanılır: $C_m = 2$ ve $C_d = 0.7$ kabul edilmiştir.

$$F_i = \frac{\pi}{4} \rho \cdot g \cdot C_m \cdot D^2 \cdot H \cdot K_i = \frac{3.14}{4} \cdot 1025 \cdot 9.81 \cdot 2 \cdot \left(\frac{45 + 16.4}{2} \right)^2 \cdot 6.51 \cdot 0.5$$

$$= 4.843 \cdot 10^7 N$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot C_d \cdot D \cdot H^2 \cdot K_D = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 9.81 \cdot 0.7 \cdot \left(\frac{45 + 16.4}{2} \right) \cdot 6.51^2 \cdot 0.125$$

$$= 0.572 \cdot 10^7 N$$

$$F_{total} = -F_i \sin \omega t + F_d \cos^2 \omega t$$

$$\frac{F_i}{2F_d} > 1$$

$$\cos \omega t = 0 \quad \rightarrow \quad \omega t = \frac{\pi}{2}$$

$$F_{total} = -F_i \sin \omega t = -4.843 \cdot 10^7 N = -48.43 MN$$

3.2.5.3. Rüzgâr Yükleri

Rüzgâr yükleri, birçok farklı yapısal unsura büyük basınçlar ve momentler uyguladıkları için açık deniz yapıların analizi, tasarımı, inşası ve işletilmesinde önemli bir dikkate alınması gereklidir. Rüzgâr hızlarının ortalama alındığı zaman aralığı, rüzgâr yükü analizinde önemli bir unsurdur. Petrol platformları ve rüzgâr türbinleri gibi deniz yapıları, güvenlik ve yapısal bütünlük için dikkatlice incelenmesi gereken dinamik rüzgâr kuvvetlerine maruz kalmaktadırlar. Rüzgâr yükleri, bu yapıların dış kısımlarını değil, aynı zamanda iç bileşenleri, ekipmanları ve diğer güverte kurulumlarını da etkilemektedir. Yapı ve çevresindeki rüzgâr akışı arasındaki karmaşık ilişki, bu tür yapılar üzerinde rüzgâr gerilmelerine neden olmaktadır. Bu yükler, yapıya dış ve iç şeffaf bileşenler de dahil olmak üzere tüm maruz kalan yüzeylerde mevcuttur.

Aşağıdaki denklem vasıtasıyla, bir yapı üzerine rüzgâr hızı ve rüzgâr yükü arasındaki temel ilişki Denkem (32)deki gibi ifade edilmektedir:

$$F_{rüzgar} = 0.5 \cdot \rho_a \cdot V_w \cdot C_s \cdot A \quad (32)$$

Burada,

ρ_a – standard sıcaklık ve basınçtaki hava kütle yoğunluğu, V_w – rüzgar hızı, C_s – şekil katsayısı, A – rüzgar tutan sathin alanıdır.

$$F_{rüzgar} = 0.5 \cdot \rho_a \cdot V_w \cdot C_s \cdot A = 0.5 \cdot 1.3 \cdot 24 \cdot 1.5 \cdot 4270 = 99918 N \approx 0.1 MN$$

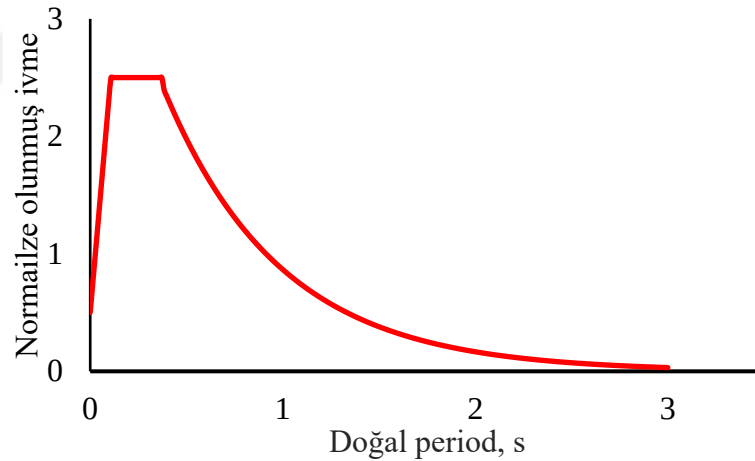
3.2.5.4. Deprem Yükleri

Açık deniz yapıları için depreme dayanıklı tasarımların geliştirilmesi, ileri düzeyde dinamik analiz tekniklerini gerektirmektedir. Bu analitik yaklaşımlar, platformun deprem olayları tarafından neden olan sert kuvvetlere dayanma kapasitesini değerlendirmek ve sağlamak için vazgeçilmezdir. Bu bağlamda, iki önemli yöntemin sıkça kullanıldığı dinamik analiz metodolojilerinden yararlanmak gereklidir: spektrum

analizi ve zaman tanım alanı analizi. Standartlara göre (DNV-OS-C502), platformlar en az biri olmak üzere bu dinamik analiz metodolojilerinden en az birini kullanılarak değerlendirilmelidir. Bu yöntemler, yapısal tepkinin deprem uyarımına karşı benzersiz bir perspektif sağlar. Spektrum analizi, tipik olarak bir tepki spektrumu tarafından temsil edilen bir dizi deprem yer hareketine bir yapının tepkisini değerlendirmeyi içerir.

Deprem aktivitesine yatkın bölgelerde bulunan Yerçekimi Tabanlı Yapılar, yalnızca yeterli mukavemet ve rijitlik sergilemekle kalmayıp aynı zamanda yeterli derecede süneklik de göstermelidir, böylece dayanım düzeyi depremlerinin (Strength Level Earthquake - SLE) oluşturduğu kuvvetlere dayanabilecek ve aynı zamanda süneklik düzeyi depremlerinin (Ductility Level Earthquakes - DLE) daha az sık ve daha şiddetli yer hareketlerine maruz kaldığında yapısal stabiliteyi sağlayabilirler. DNV-OS-C502'ye göre, SLE (MSD), ortalama tekrarlanma aralığı 100 yıl olan bir deprem olayı olarak tanımlanır.

Analiz sırasında, deprem analizi, tepki spektrumu analizi yoluyla gerçekleştirilmiş ve spektrum eğrisinin değerleri (Şekil 3.14) Norveç'te geçerli olan değerlere uygun olduğu kabul edilmiştir (Rønnquist vd., 2012). Yapının yan yük direnç elemanları içeren yapısal özellikler için deprem azaltma katsayısı kullanılmıştır. Bu değer, Hindistan Standartları (IS, 2008) tarafından belirlenen yönergeleri takip ederek, bu tür yapılar için 3 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.14. Deprem analizi için ilgili tepki spektrumu

3.2.5.5. Hidrostatik Basınç

Hidrostatik basınç, yerçekimi etkisi altında sıvının, özellikle suyun, dengede olduğu durumda ortaya çıkan basıncı ifade etmektedir. Söz konusu basınç, suyun derinliği arttıkça artış göstermektedir. Draugen Condeep platformunun 250 metre derinlikte yer aldığı düşünüldüğünde, hidrostatik basınç, platformun üzerine düşen su kolonunun toplam ağırlığı nedeniyle birim alan başına uygulanan kuvveti temsil etmektedir. Bu kuvvet, suyun yoğunluğu, yerçekimi ivmesi ve suyun yüzeyinden ölçülen dikey mesafeye bağlı olarak değişmektedir.

Derinlik arttıkça, su kolonunun ağırlığı da artış göstermekte ve platform gibi açık deniz yapılarının yüzeyine daha fazla kuvvet uygulanmasına neden olmaktadır. Hidrostatik basınç, açık deniz yapılarının tasarımında ve inşasında kritik bir rol oynamaktadır, çünkü bu basınç platformun yapısal bütünlüğünü, stabilitesini ve dayanıklılığını etkilemektedir. Platformların, bu basınca dayanabilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Ayrıca, hidrostatik basınç, platformun üzerinde yer alan ekipman ve cihazların uzun ömürlülüğünü de etkilemektedir. Platformun yapısal bileşenlerinin, suyun derinliğiyle artan basınca dayanacak şekilde tasarlanması ve malzeme mukavemetinin bu koşullara göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Hidrostatik basınç, su altı kabloları, boru hatları ve diğer altyapı elemanları için de önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, hidrostatik basınç, suyun yoğunluğu, yerçekimi ivmesi ve derinliğe göre hesaplanmaktadır.

3.2.5.6. Ölü Yük

Draugen Condeep platformu, diğer birçok açık deniz yapısı gibi, statik kuvvetlerin etkisi altındadır; bu kuvvetler öncelikle yapının kendi ağırlığı (27800 ton) ve kalıcı bileşenlerin ağırlığı ile belirlenmektedir. Ölü yükler, yapıyı etkileyen ve zamanla veya dış faktörlerle değişmeyen sabit kuvvetlerdir. Ölü yüklerin Draugen Condeep platformu üzerindeki etkisi, yapısal tasarım ve analiz sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Draugen Condeep platformunun ölü yük etkisinin değerlendirilmesi, beton yapılar, çelik elemanlar, ekipmanlar ve diğer kalıcı kurulumlar gibi platformun çeşitli bileşenlerinin ağırlığını dikkate almaktadır.

Ölü yükler, platformun dayanıklılığı, stabilitesi ve yapısal bütünlüğü açısından kritik bir parametre olarak görülmektedir. Tasarım sürecinde dikkate alınan ölü yükler, platformun üzerine yerleştirilen her türlü kalıcı bileşeni içermektedir. Bu bileşenler arasında ana taşıyıcı beton yapılar, çelik iskeleler, donanım ekipmanları ve platformun temel fonksiyonlarını yerine getiren diğer kalıcı elemanlar bulunmaktadır.

Yapısal analiz sırasında, ölü yüklerin oluşturduğu gerilme ve deformasyonlar incelenerek, platformun güvenliği ve uzun ömürlülüğü için gerekli önlemler alınmaktadır. Ölü yüklerin etkisi, platformun taşıyıcı kapasitesinin hesaplanmasında ve malzeme seçimi ile boyutlandırmada kritik bir unsurdur. Ölü yüklerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, platformun güvenilir ve uzun süre dayanıklı olmasını sağlamak için temel bir gerekliliktir.

3.2.5.7. Boşluklu Dairesel Kesit ve Birleşimin Kesme Dayanımı

Segmental birleşimlerin ve kesitlerinin kesme kapasitesi, yük aktarımının bu bölgelerde sağlanmasından dolayı tasarım aşamasında önemli bir etmendir. Dolayısıyla, segmental kolonun birleşimlerin kesme kapasitesi, birleşim bölgelerindeki dayanım, geometrik özellikler ve kesme kuvvetleri gibi unsurlara bağlıdır ve bu faktörler segmental yapının toplam kesme kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Sonuç olarak, yapının maksimum kapasitesine ulaşmadan önce birleşimlerde erken arızayı önlemek için, birleşimin kesme kapasitesi, tüm yapı kesitinin kapasitesinden yüksek olmalıdır. Birleşimdeki AG kuvveti ve gerilmeler, boyuna basınç gerilmesi, normal gerilmeler ve

kesme gerilmeleri gibi faktörlerin katkıları dikkate alınarak Tablo 3.7'de verilen farklı formüller kullanılarak hesaplanabilir.

Bu bağlamda, AG kuvveti 1500 kN olduğu halde, kesit ve birleşimler için hesaplanan kesme kapasitesi değerleri Tablo 3.7'de gösterilmiştir. Bu kesme kapasitesi hesaplamaları, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Tablo 3.7. Boşluklu Dairesel Kesit ve Birleşimin Kesme Dayanımı

Boşluklu Dairesel Birleşimin Kesme Dayanımı	
AASHTO, 1999	$V_n = A_k \sqrt{f_{ck}} (0.2048 \sigma_n + 0.9961) + 0.6 A_{sm} \sigma_n$
Turmo vd., 2006	$V_n = A_k \frac{\sqrt[3]{f_{ck}^2}}{100} (7 \sigma_n + 33) + 0.6 A_{sm} \sigma_n$
Rombach vd., 2004	$V_n = A_k f_{ck} + 0.65 A_j \sigma_n$
Boşluklu Dairesel Kesitin Kesme Dayanımı	
Queiroz and Horowitz, 2016	$V_c = 0.27 \cdot \alpha_{w2} \cdot \alpha_{cv} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$

3.2.5.8. Sonlu Elemanlar Modeli

DIANA SE yazılımı kullanılarak monolitik ve segmental yapıların gerçek yükleme koşullarında doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilmiştir. Monolitik ve segmental yapı parçalarında kullanılan malzemelerin kapsamlı mekanik özellikleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Ayrıca, beton, donatı ve tendonlar için kullanılan malzeme modelleri Şekil 3.15a-c'de gösterilmektedir.

SE modelinde, yeterli gerçekçiliği ve kararlılığı sağlamak için 3D katı elemanlar kullanılmıştır. Boşluklu dairese kolonun her segmenti içinde çelik donatılar ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Özellikle AG donatısı, uçtan uca segmentlerin birlikte çalışmasını sağlayan ve yapısal performansı artıran stratejik bir bileşen olarak işlev görmektedir. Donatılar ile beton arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde temsil etmek için Diana yazılımında "embedded" anahtar kelimesi kullanılarak uyumlu bir bağ oluşturulmuştur.

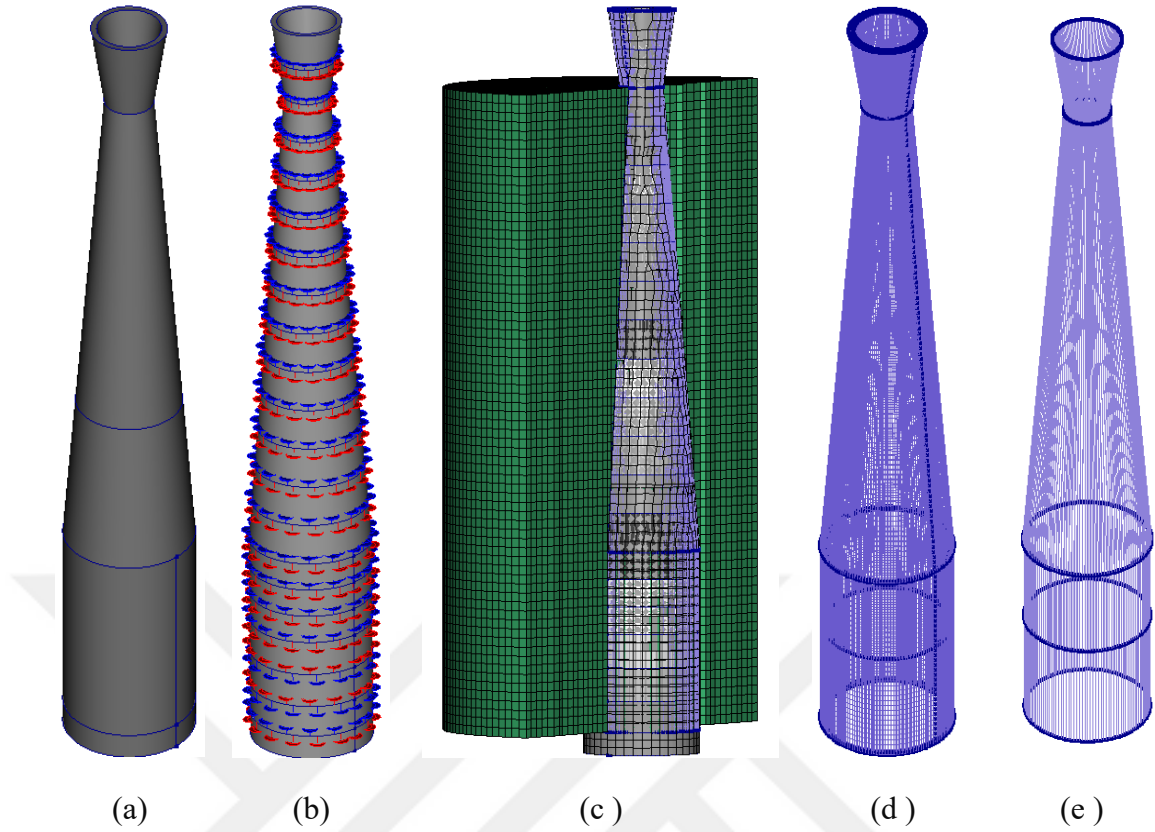
Bu çalışmada kullanılan yapısal analiz ve tasarım metodolojisi, platformun farklı koşullar altındaki davranışını kapsamlı bir şekilde anlamak amacıyla modelleme yaklaşımının kademeli olarak güncellenmesini içermektedir. Başlangıçta, platformu monolitik bir yapı olarak temsil eden bir monolitik model (Şekil 3.15a) kullanılmıştır. Bu, sonraki analizler için bir temel sağlamıştır. Yapının yapısal tepkisini daha derinlemesine incelemek ve segmental tasarımın etkinliğini değerlendirmek için platform, 10 m ile 15 m arasında değişen yüksekliklerde segmentlere ayrılmıştır (Şekil 3.15b). Yapının çevresindeki sıvı ortamıyla dinamik etkileşimini daha doğru bir şekilde analiz etmek için platform, gerçek sıvı alanına yerleştirilerek daha da detaylandırılmıştır (Şekil 3.15c). Bu SYE modelleme tekniği, açık deniz yapılarında hidrodinamik kuvvetlerin ve dalga

kaynaklı tepkilerin karmaşık etkilerini yakalamak açısından kritiktir. Her segment içinde, uzunlamasına donatılar ve etriyeler, çift sıralı bir düzenlemeyle konumlandırılmış (Şekil 3.15d), tendonlar ise platformun tamamını kapsayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.15e). Bu detaylandırma, yapının yapısal bütünlüğünü artırmanın yanı sıra genel yük taşıma kapasitesi ve dayanıklılığına da katkıda bulunmaktadır.

Draugen platformunun deniz tabanına 9 metre uzanan batık temeli doğru bir şekilde modellenmiştir. Bu batık temel, sakin su seviyesinin 250 metre altında sabit bir destek olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.8. SE modelin tasarım parametreleri.

Malzeme	Parameter	Değer
Beton	Elastisite modülü E	30 GPa
	Poisson oranı ν	0.2
	Basınç dayanımı f_c	60 MPa
	Yoğunluk ρ	2500 kg/m ³
Donatı	Boyuna donatı çapı D	25 mm
	Dairesel donatı çapı d	8 mm
	Elastisite modülü E	200 GPa
	Akma dayanımı f_{ym}	555 MPa
	Kopma dayanımı f_{um}	676 MPa
	Gerinim ϵ_{su}	0.02
Ard germe tendonu	Tendon çapı D_f	45 mm
	Elastisite modülü E	200 GPa
	Akma dayanımı f_{ym}	1680 MPa
	Kopma dayanımı f_{um}	1860 MPa
	Kopma gerinimi ϵ_{su}	0.02



Şekil 3.15. DIANA SE ile Draugen Condeep platformunun modellenmesi: (a)- Monolitik model, (b) Segmental model, (c) Sıvı-yapı etkileşimi modelinin mesh olunmuş şekli, (d) Donatı modeli, (e) Tendon modeli.

3.2.5.9. Birleşim SE Modelinin Açıklaması

Birleşimler, geometriye dayalı olarak her biri kendi malzeme yasalarına sahip yüz-yüze arayüz elemanları kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Birleşimlerin kesme kapasitesini ve AG kuvvetini belirlemek amacıyla, önceki çalışmalardan (Queiroz & Horowitz, 2016; AASHTO, 1999; Turmo vd., 2006; Rombach vd., 2004) alınan malzeme yasaları kullanılmıştır. Yapıyı birleştirmek için kullanılan malzemeler farklı özelliklere sahip olabileceğinden, bağlayıcı birleşimlerde Coulomb sürtünme bağlantısı kabul edilmiştir. Malzeme parametrelerine dayanarak normal ve kesme rijitlik değerlerini hesaplamak için, segmental birleşimlerin davranışını ve dayanıklılığını değerlendirmek açısından kritik olan matematiksel formülasyonlar (MC90, 1993; Kaya & Salim, 2017) uygulanmıştır.

DIANA'nın yapısal arayüz bileşenleri, betondaki ayrık çatlaklar gibi geometrik süreksizlikleri ve BA'da görülen bağlama-kayma katmanlarını simüle etmek için son derece kullanışlıdır (Ferreira, vd., 2022). Denklem 17'de belirtildiği gibi, arayüz elemanları için malzeme modelleri, arayüz boyunca çekme gerilmeleri, normal gerilmeler ve göreceli yer değiştirmeler arasında doğrusal veya doğrusal olmayan bir ilişki sağlar. Normal çekme gerilmesi ve kesme çekme gerilmesi sırasıyla t_n ve t_t olarak tanımlanırken, normal ve kesme göreceli yer değiştirmeleri u_n ve u_t olarak adlandırılmıştır. (Turmo vd., 2006).

Başlangıçtaki sürekli geometriyi tanımlamak için, rijitlik vektörleri k_n ve k_t arasında doğrusal malzeme bağlantısı kullanılmıştır. Bu bağlantılar genellikle önemli rijitlik değerleriyle belirlenir (Červenka, vd., 2016; Ferreira, vd., 2022). Rijitlik değerleri Denklem 2'de verilmiştir (Kaya ve Salim, 2017). Arayüz elemanlarının elastik davranışı, birleşim modelinde normal ve teğetsel rijitlik katsayıları (k_n ve k_t) ile belirlenmiştir. Bu katsayılar, Birleşimdeki normal ve teğetsel gerilmeler (t_n ve t_t) ile karşılık gelen normal ve teğetsel göreceli yer değiştirmeler (u_n ve u_t) arasındaki ilişkiyi kurar. Rijitlik değerlerini elde etmek için Denklem 17 ve 18 kullanılmıştır. Birleşim sayısal modellemesinde segmentler arasındaki etkileşimi temsil etmek için kohezif bir Coulomb tipi sürtünme yasası kullanılmıştır. Bu model hareketli segmentler arasındaki temas yüzeylerinin mekanik davranışını simüle etmek için sıklıkla uygulanmıştır.

Coulomb sürtünme yasası ile normal ve teğetsel rijitlikler, sürtünme katsayısı (μ) ile tanımlanmıştır. Boşluklu dairesel segmental yapıların segmentleri arasındaki birleşimler, kohezif bir Coulomb sürtünme yasası ile tanımlanan arayüz elemanları kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Bu, birleşim yüzeyleri boyunca segment temasını ve kesme kuvvetlerinin iletimini daha gerçekçi bir şekilde simüle etmektedir. Bu soruna yönelik deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen bulgular, Breen ve Roberts'ın tamamen teorik bir temelde geliştirdiği formülün (Denklem 20), kohezivlik ve sürtünme katsayısı için test sonuçlarını en iyi şekilde tahmin ettiğini göstermektedir (Ramírez vd., 1993; Turmo vd., 2006).

3.2.5.10. Doğrusal Olmayan Analiz ve Tasarım Aşaması

Yapısal analiz, belirli bir yapı veya bileşenlerinin çeşitli ve önemli yükleme koşulları altında yük taşıma kapasitesi ve davranışını sistematik olarak inceleyen ve değerlendiren bir yaklaşımdır. Bu bölüm, yapının işletim ömrü boyunca yapısal tepkiyi kapsamlı bir şekilde karakterize etmek için gerekli olan farklı türde yapısal analizler için temel kriterleri belirtmektedir. Draugen Condeep platformunun SE modeli, bu aşamada artan farklı yüklemelere tabi tutulmuş ve nihai sınır durum (Ultimate Limit State, ULS) ile kullanım sınır durumu (Serviceability Limit State, SLS) değerlendirilmiştir. Katı modelleme yaklaşımı, yapı davranışının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. DIANA yazılımında doğrusal olmayan analiz sırasında birincil artımlı strateji, aşırı küçük adım boyutları kullanılmadığı sürece sıklıkla yanlış sonuçlara yol açabilmektedir. Bu durum, doğrusal olmayan problemlerin değişimlere yüksek derecede duyarlı olmasından ve artımlı analizdeki büyük adım boyutlarının sayısal istikrarsızlık ve yakınsama sorunlarına yol açabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sorunu çözmek için yinelenen bir yöntem kullanılmaktadır. Sayısal simülasyonda, yapıya uygulanan yükler yavaş yavaş artırılmıştır. Yapının doğrusal olmayan tepkisini doğru bir şekilde yakalamak için özellikle güncellenmiş normal düzlem yaklaşımı olan bir yay-boyu kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Yapı, eklem ve segmentlerde çatlak oluşumu gibi doğrusal olmayan davranışlar sergiledikçe, bu kontrol mekanizması analizin doğru bir şekilde tepkiyi takip etmesini sağlamıştır. Kontrol yönteminin otomatik yük adımı ölçeklendirme işlevi, her adımda yük artışlarının değiştirilmesine ve tüm yapının gelişen davranışına dinamik olarak tepki vermesine olanak tanımıştır. Bu uyarlanabilir ölçeklendirme, doğrusal olmayan analiz sırasında iyileştirilmiş yakınsama ve yapının arıza tepkisinin daha gerçekçi modellenmesini sağlamıştır. Mevcut çalışmada sayısal analiz için Newton-Raphson

yöntemi, maksimum 25 yineme ile bir çizgi arama metodolojisi ile kullanılmıştır. Seçilen strateji, analiz sırasında hem stabilite hem de sayısal etkinlik sağlamayı hedeflemektedir. Newton-Raphson yöntemi, artımlı yük altında segmental beton yapının karmaşık davranışını yakalamak için uygun, doğrusal olmayan denklemleri çözmek için yinelenen bir sayısal metodolojidir.

Yapısal tasarım, limit durumları tasarımı için DNV-OS-C502'de belirtilen şartlara sıkı sıkıya bağlı kalmış, standartlara tam uyum sağlamıştır. Ayrıca, yönergelerde açıkça belirtilen yük faktörleri, tüm tasarım sürecine titizlikle entegre edilmiştir. Kapsamlı değerlendirme süreci boyunca platform, ULS karşısında dayanıklılığını ve SLS gereksinimlerini karşılama yeteneğini sağlamak için titizlikle incelenmiştir. ULS, farklı stres senaryolarını kaldırma kabiliyetini sağlamak için iki farklı yük kombinasyonu altında detaylı olarak incelenmiştir. Benzer şekilde, SLS, operasyonel koşullar altında hizmet edebilirliğini göstermek için belirli bir yük kombinasyonu altında dikkatle değerlendirilmiştir (Tablo 3.9).

Tablo 3.9. ULS ve SLS için önerilen kısmi yük faktörleri. (DNV-OS-C502)

Limit Durumları	Yük kategorileri			
	Kalıcı Yük	Değişken İşlevsel Yük	Çevresel Yük	Deformasyon Yükü
ULS	1.3	1.3	0.7	1
	1.0	1.0	1.3	1.0
SLS	1.0	1.0	1.0	1.0

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

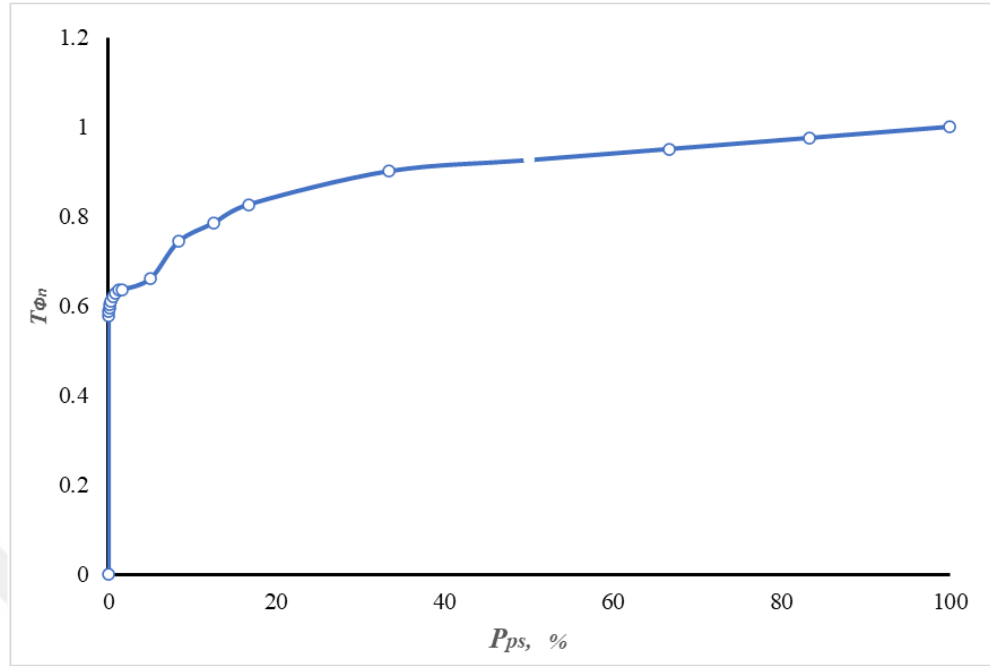
Bu bölümde, analitik çalışma kapsamında Condeep türü açık deniz platformlarının ayakları ve rezervuarları üzerinde dairesel ard germenin etkisi incelenmiştir. Araştırma, dairesel ard germenin beton duvarlarda meydana getirdiği iç teğet kuvvet ve momentin nasıl değiştiğini belirlemeye odaklanmıştır. Bu kapsamda, beton duvarlardaki gerilme ve moment dağılımlarının dairesel AG uygulanmasıyla nasıl etkilendiği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Analitik yöntemler kullanılarak, ard germeli beton duvarların performans ve dayanıklılığının optimize edilmesine yönelik sonuçlar elde edilmiştir.

Sayısal analiz kısmında DIANA SE yazılımında yapılmış sayısal analizlerin güvenilirliğini doğrulamak amacıyla gerçekleştirilen betonarme, AG betonarme ve segmental AG doğrulama çalışmaları karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışma kısmında, 10 metrelik boş dairesel SPT kirişlerinin itme analizleri DIANA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin ortasındaki 5 metrelik bölümde kesme kuvveti olmadığı için bu bölge segmentler halinde kabul edilmiş ve 1 ile 5 arasında segmentlere ayrılmıştır. Prototip ve modelin geometrik özellikleri önceki bölümde sunulmuştur. 20 ila 100 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları, 5 segmental model için kullanılmıştır.

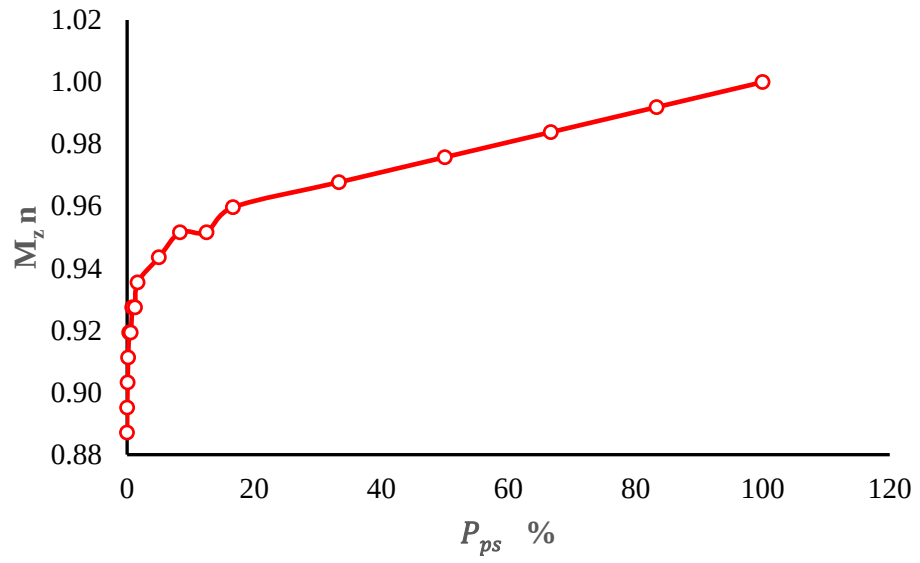
Tasarım kısmında, bu çalışmada, mevcut Draugen Condeep platformunun segmental tasarımını detaylı bir şekilde incelemeyi ve segmental tasarımın kurulum ve kullanım açısından önemli avantajlar sağlamasını amaçlanmaktadır. Bu analiz, öncelikle çevresel etkiler, deniz hareketleri, rüzgâr yükleri, sismik kuvvetler ve diğer dış etkenlerle birlikte operasyonel yükler de dahil olmak üzere platformu etkileyen tüm yüklerin ayrıntılı bir şekilde belirlenmesiyle başlamıştır. Daha sonra, mevcut monolit yapı ile önerilen segmental yapı için aynı yükler altında detaylı analizler ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, segmentlerin yüksekliği ve şekli, yapısal bütünlük ve güvenlik açısından dikkatlice değerlendirilmiş, 10 m ile 15 m arasında uygun değer aralıkları belirlenmiştir. Segmental yapısal tasarımın amacı, platformun potansiyel gelecekteki yükleme senaryolarına karşı dayanıklılığını ve uyarlanabilirliğini artırmaktır. Ayrıca, platformun ULS ve SLS kriterlerine tam uyum sağlaması için, çeşitli yük kombinasyonlarının etkileri dikkatlice incelenmiştir. Bu inceleme, yapısal güvenlik ve bütünlüğün korunması için kritik öneme sahip faktörlerin önemini vurgulamıştır. SE Modelleri için hem monolitik hem de segmental yapılar için katı modellerin kullanılması, yapısal analizlerde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

4.1. Dairesel Ard Germinin Etkisinden Duvarlarda Oluşan İç Kuvvet Değişimi

Bir örnek incelemesi olarak, temel mekanik Denklem (15) ve (16) kullanılarak 100 metre derinlikteki bir kabuk yapı üzerinde dairesel ard germinin neden olduğu gerilim ve moment değişiklikleri hassas bir şekilde değerlendirilmiştir. Şekil 4.1a, su altında çalışan Condeep yapısının kabuğunda dairesel AG etkisiyle betonda oluşan dairesel çekme kuvvetlerinin dağılımını, Şekil 4.1b ise momentin değişimini göstermektedir. Grafiklerin analizinden anlaşılmaktadır ki, su altında iç ve dış basınçların ve eksenel kuvvetlerin etkisi altında bulunan dairesel kesitli yapılar için dairesel AG yapısal performans üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Dairesel AG, farklı basınç koşullarına maruz kalan yapısal elemanlarda ilave çekme gerilmeleri oluşturarak yapının performansını düşürmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Dairesel ard germinin etkisi altında olan sualtı yapının kabuğunda betonda oluşan çekme kuvveti (a) ve momentinin (b) değişimi

Spesifik olarak, tam ard germe ile yüklenmiş söz konusu yapıda duvarda oluşan çekme gerilmesi ortalama %40, çekme momenti ise ortalama %6 artmaktadır. Bu artışlar, betonda oluşan çekme gerilmelerinin önemli ölçüde yükselmesine yol açmaktadır.

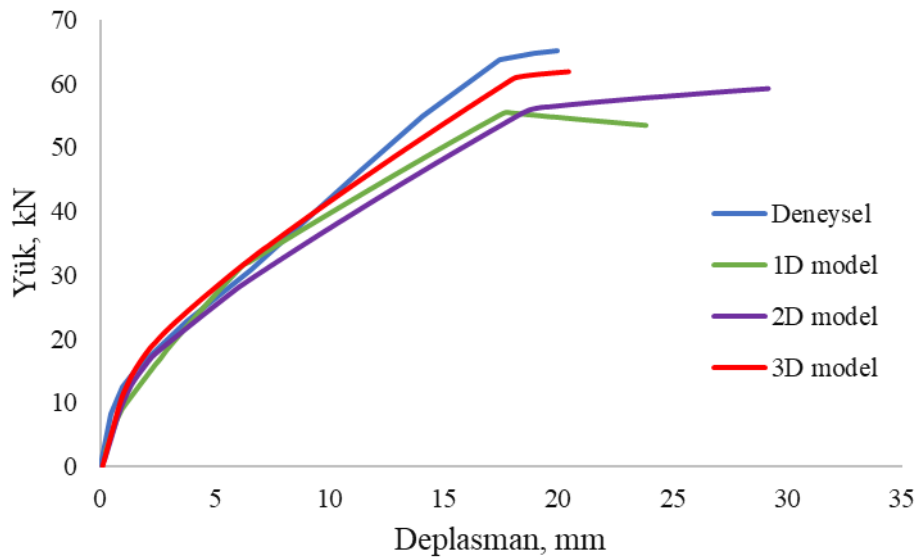
Bu bulgular ışığında, çalışmamızda dairesel ard germe kullanılmadan, sadece boyuna ard germenin etkisi altında segmental yapıların davranışını incelemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, dairesel ard germenin olumsuz etkilerini elimine ederek daha güvenilir ve performans açısından daha uygun yapı tasarımlarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

4.2. DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

4.2.1. BA kiriş

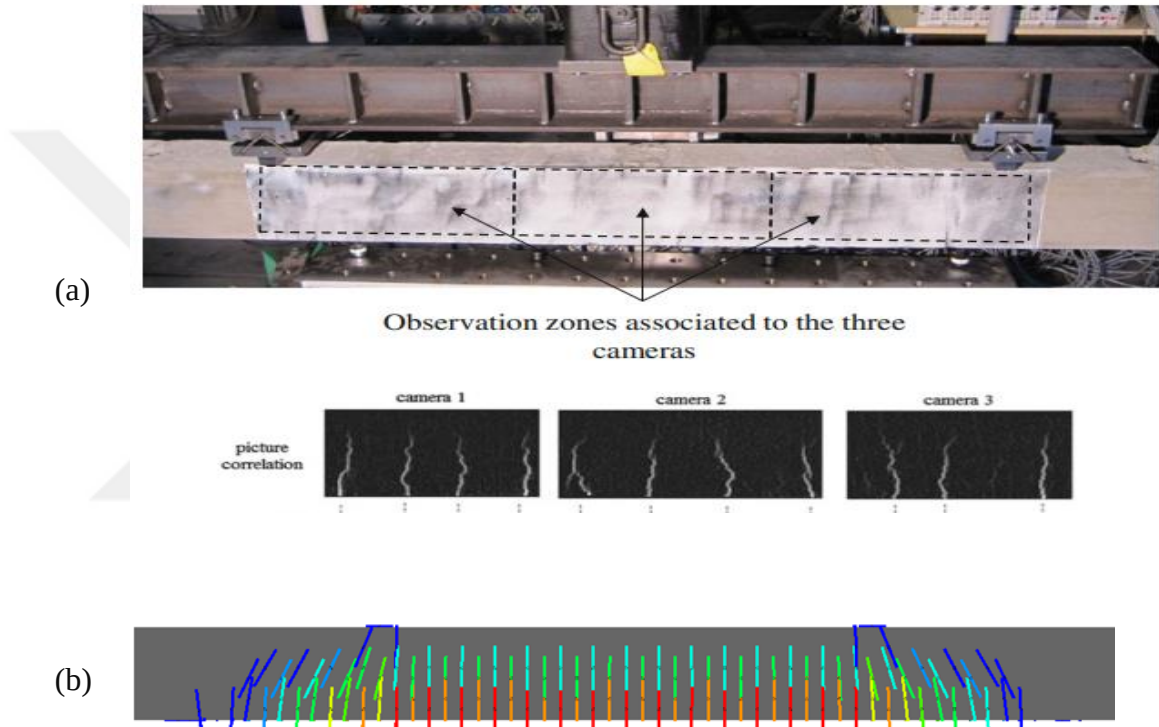
Deneylerden elde edilmiş yük-yer değiştirme grafikleri, sayısal simülasyonlarla karşılaştırmaya tabi tutularak, BA kirişlerin karmaşık davranışını doğru ve güvenilir bir şekilde yansıtan sayısal modellerin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 4.2). Sayısal yaklaşımın güvenilirliği, 1D çubuk, 2D kabuk ve 3D katı eleman modellerinden elde edilen Yük-Yer Değiştirme tepkilerinin karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. Genel olarak, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında yük altındaki kirişlerin yapısal tepkisini tahmin etme yeteneğini gösteren iyi bir derecede uyumluluk gözlemlenmiştir.

Deneysel ve sayısal veriler, Yük-Yer Değiştirme grafiklerinde benzer eğilimleri sergilemiştir. İlk lineer-elastik aralıkta, uygulanan yük ile sonuç deplasman arasında, tam kirişler için öngörülen gibi, lineer bir ilişki gözlemlenmiştir. Yük arttıkça, kirişler, kırılma başlangıcı ve yayılmasına bağlı olarak doğrusal olmayan bir davranış sergilemiştir. Bu doğrusal olmayan davranış, Yük-Yer Değiştirme eğrilerinde lineerlikten sapma olarak temsil edilmiş ve kirişler içinde hasarın başlangıcını işaret etmektedir.



Şekil 4.2. Betonarme kirişin yük – yer değiştirme eğrisi

Sayısal modeller, çatlamanın başladığı ve ardından kiriş boyunca yayıldığı kritik yük düzeylerini etkili bir şekilde öngörmüştür. Deneysel çatlak yayılma yerleri ve desenleri, sayısal simülasyonlardakilerle benzerlik göstermiştir, bu da sayısal modelin kirişlerin çatlama davranışını yakalama yeteneğini doğrulamaktadır. Deneysel ve sayısal veriler arasındaki bu tutarlılık, sayısal yaklaşımın takviyeli beton kirişlerde karmaşık çatlama başlangıcı ve yayılma mekanizmalarını modellemedeki güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Sayısal modeller, çatlama başlangıcı ve ardından kiriş boyunca yayılma noktalarını doğru bir şekilde tahmin ettiği için, deneysel çatlak yayılma konumları ve desenleri sayısal simülasyonlarla benzer olarak elde edilmiş ve bu da sayısal modelin kirişlerin çatlama davranışını yakalama doğruluğunu arttırmıştır (Şekil 4.3, Jason vd., 2013).



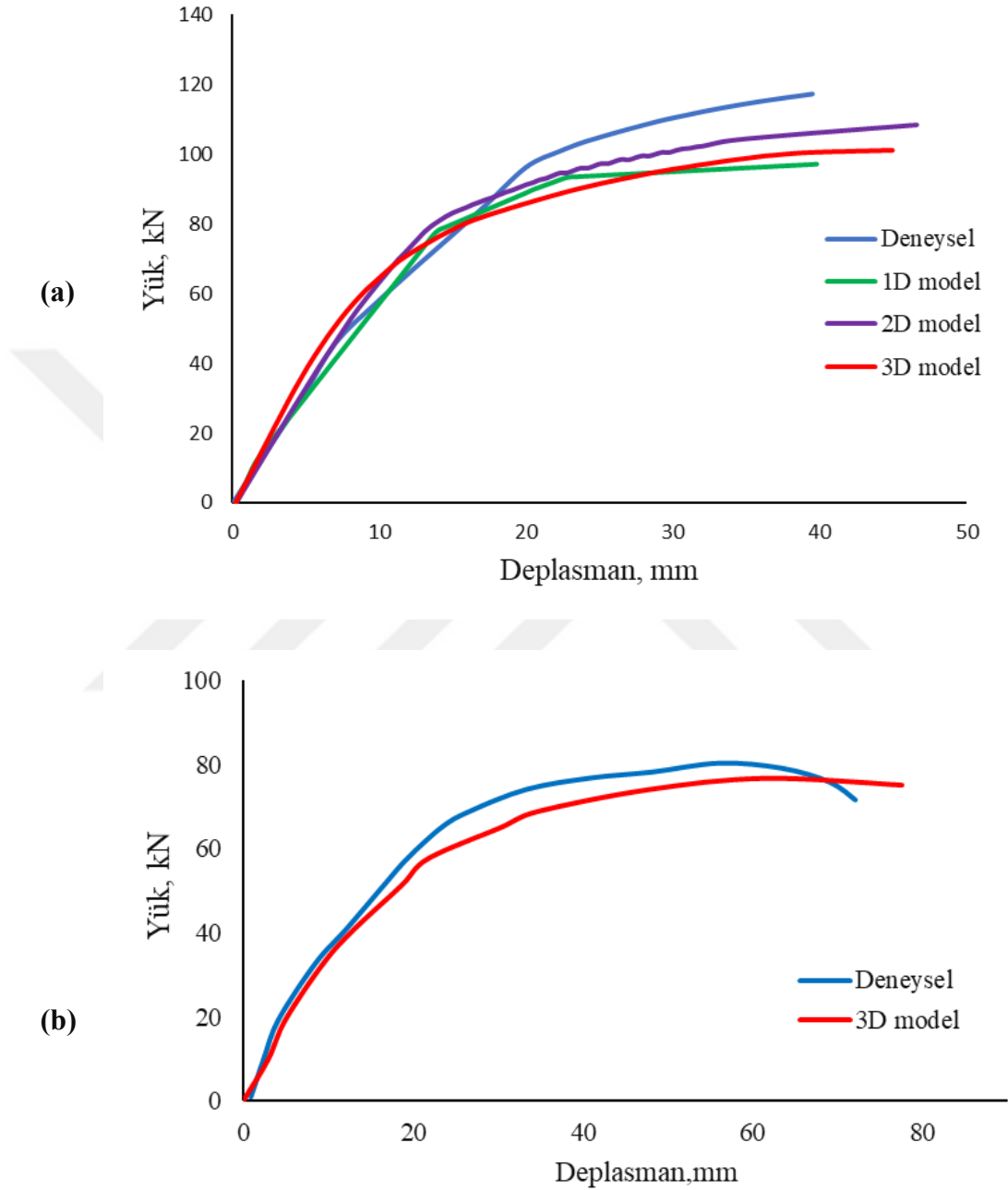
Şekil 4.3 . Betonarme kirişin deneysel (a) ve sayısal (b) modelinde çatlak dağılımı (Jason vd., 2013)

1D modelde kirişler çubuk elemanlar olarak temsil etmiştir. 2D model, kirişlerde kayma ve burulma etkilerini, boyuna davranışı da içerecek şekilde temsil etmiştir. En kapsamlı analiz hem boyuna hem de enine davranışı inceleyen ve tüm üç boyutlu tepkiyi hesaba katan 3D katı eleman modeli tarafından sağlanmıştır.

4.2.2. AG Kiriş

AG kirişte yük-yer değiştirme davranışları ile çatlak başlangıcı ve yayılma süreçleri hakkında önemli detaylar sağlamıştır. Pratik testlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri, sayısal simülasyonlarla karşılaştırıldığında yüksek derecede bir uyumluluk gözlemlenmiş ve sayısal modellerin AG kiriş davranışını doğru bir şekilde yansıtmaktadır (Şekil 4.4). Sayısal yaklaşım, bir kirişin yük altındaki yapısal tepkisini

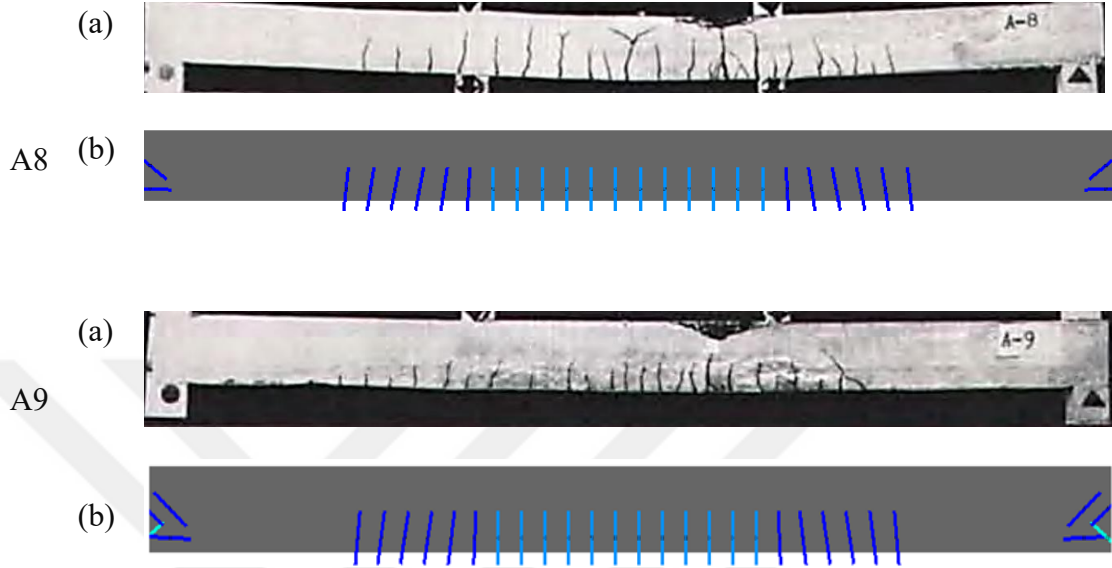
doğru bir şekilde öngörmüştür. Yük-yer değiştirme grafiklerinde hem deneysel hem de sayısal veriler benzer davranışlar sergilemiştir. Uygulanan yük ile deplasman arasında doğrusal bir ilişki, kirişin tamamı için öngörüldüğü gibi erken doğrusal elastik aralıkta gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. A9 (a) ve A8 (b) ard germeli kirişlerinin Yük – Deplasman eğrisi

Sayısal modeller, çatlakların oluştuğu ve kiriş boyunca yayıldığı kritik yük düzeylerini doğru bir şekilde öngörmüştür. Deneysel ve sayısal simülasyonların benzer

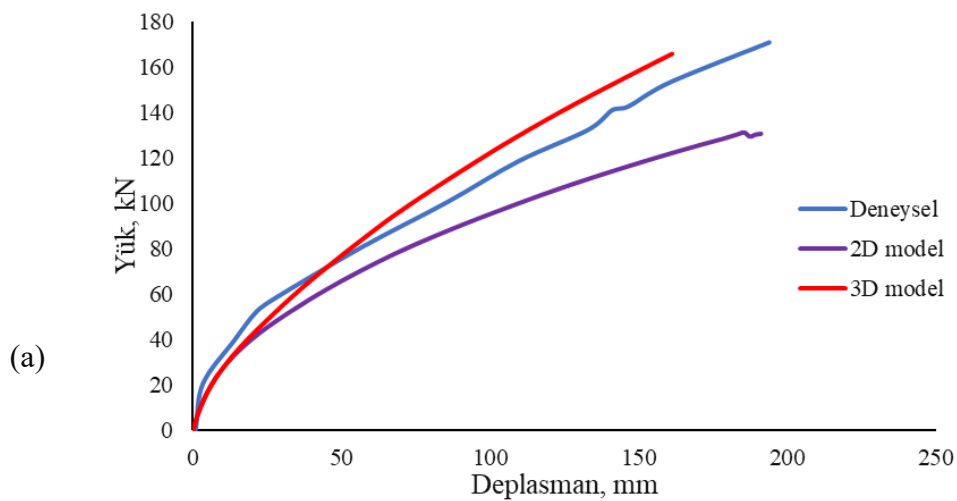
çatlak yayılma konumları ve desenleri benzer sayısal modelin çatlama davranışını doğru bir şekilde temsil etme yeteneğini doğrulamıştır (Şekil 4.5). Sonuç olarak, Tao ve Du'nun (1985) çalışmasına dayanan 1D, 2D ve 3D katı eleman modellerini kullanan sayısal analiz, AG kirişlerde Yük-Yer Değiştirme davranışını, çatlak başlangıcını ve yayılma süreçlerini başarılı bir şekilde yansıtmıştır.

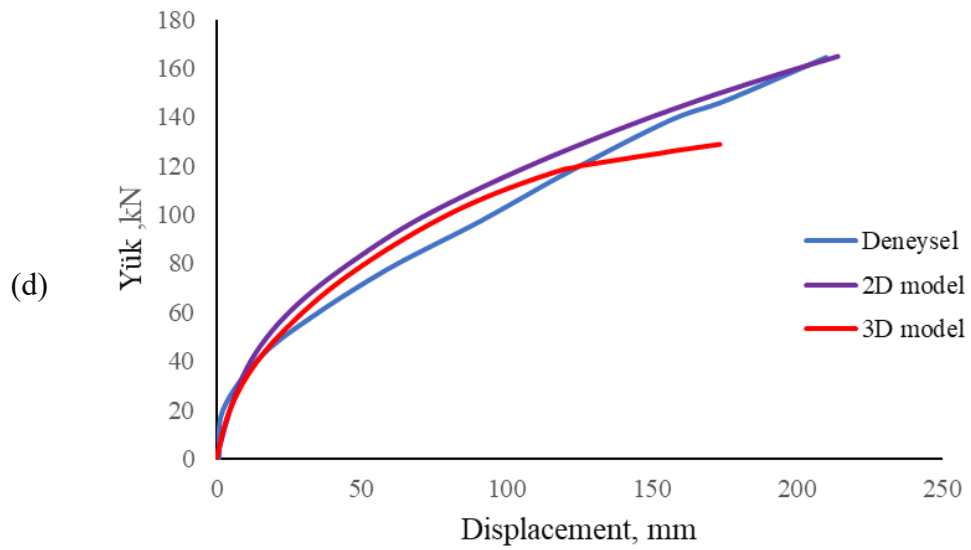
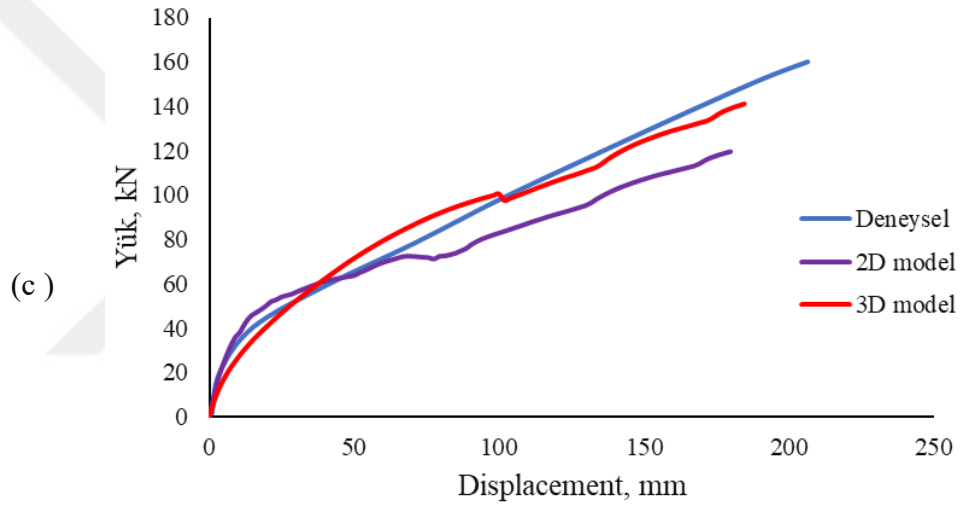
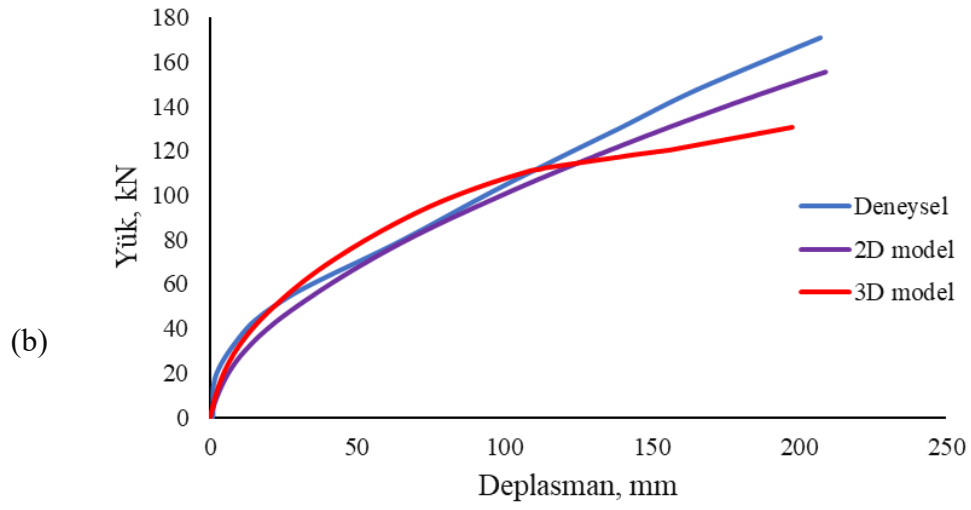


Şekil 4.5. Ard germeli betonarme kirişlerin (A8, A9) deneysel (a) ve sayısal (b) modelinde çatlak dağılımı. (Tao & Du, 1985)

4.2.3. AG Segmental Kiriş

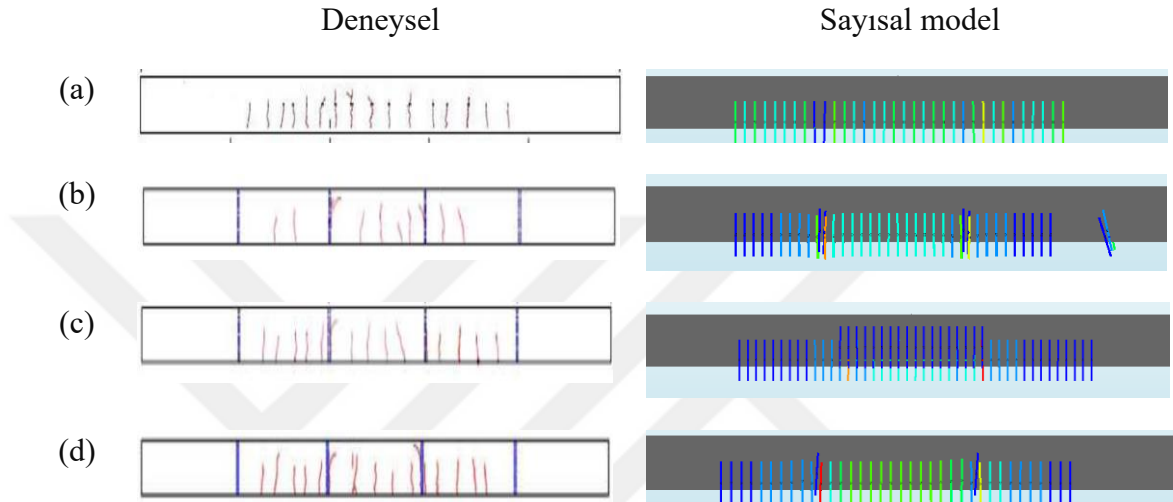
AG segmental kirişin analiz sürecinde 1D, 2D ve 3D elemanları kullanarak segmental kirişlerin davranışını ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 2D ve 3D modellerin deneysel verilerle uyumlu sonuçlar sunduğunu göstermektedir (Şekil 4.6). Ancak, 1D modelinin segmental birleşimleri doğru bir şekilde işleyemediği ve bu nedenle analizin doğru bir şekilde tamamlanamadığı belirlenmiştir.





Şekil 4.6 . Ard germeli segmental kirişlerin Yük – Deplasman eğrisi: (a)- G1 kirişi, (b)- G2 kirişi, (c)-G3 kirişi, (d)- G4 kirişi.

Analizler, farklı birleşim tipleri ve segmentteki diğer çatlaklar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş ve epoksi harcının betondan daha yüksek çekme dayanımına sahip olmasının, epoksi harcının yapıştığı betonda çatlaklara neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca SE analiz sonuçları 2D ve 3D modeller için göçme anında segment birleşimi ve genel olarak kirişte çatlak dağılımının yeterli kadar uyumlu olduğunu göstermektedir (Şekil 4.7).



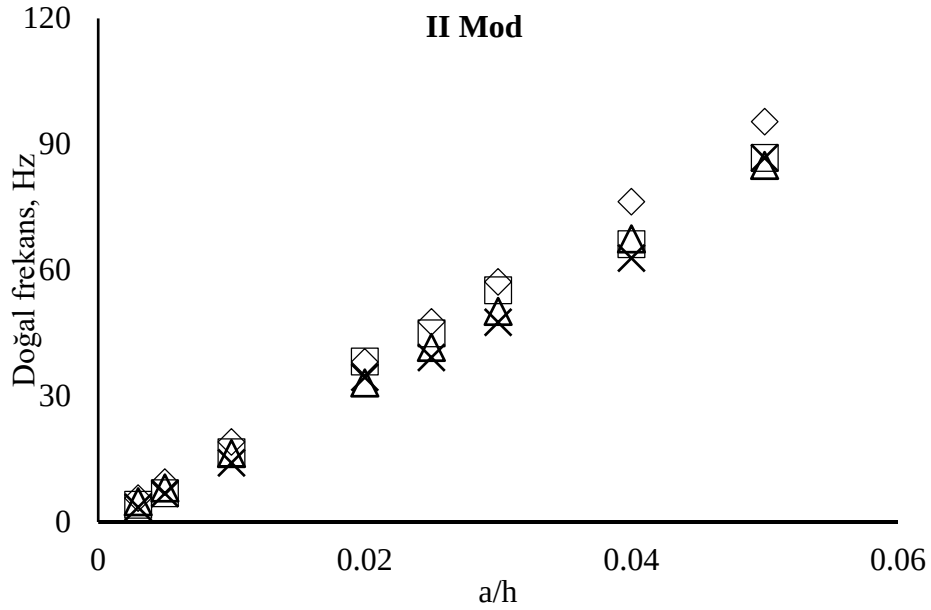
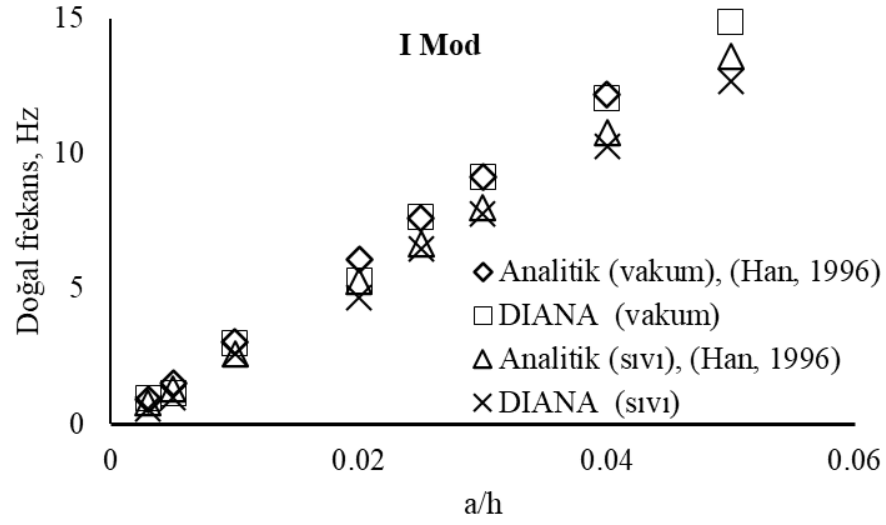
Şekil 4.7. Deneyisel ve sayısal modeller üzere çatlak dağılımı: (a)- G1 kirişi, (b)-G2 kirişi, (c)-G3 kirişi, (d)- G4 kirişi. (Al-Sherrawi vd., 2018)

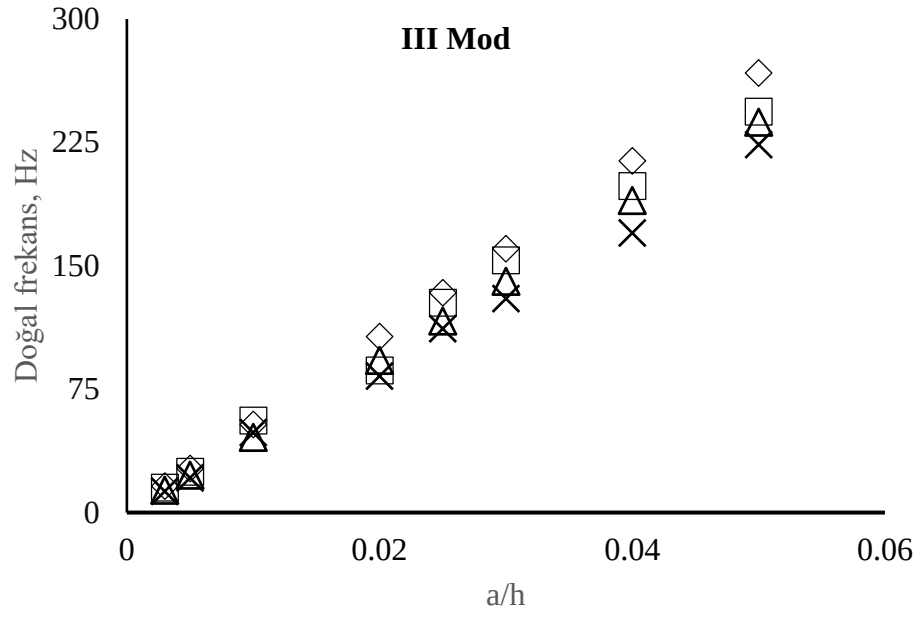
Sonuç olarak, bu çalışma, AG segmental kirişlerin davranışını analiz etmek için farklı boyutlardaki modellerin (1D, 2D ve 3D) kullanılmasının uygun olduğunu vurgulamakta ve 1D modelinin kısıtlamalarını ele almaya yönelik gelecekteki çalışmalara ihtiyaç olduğunu belirtmektedir.

4.2.4. Sıvı – Yapı Etkileşimi

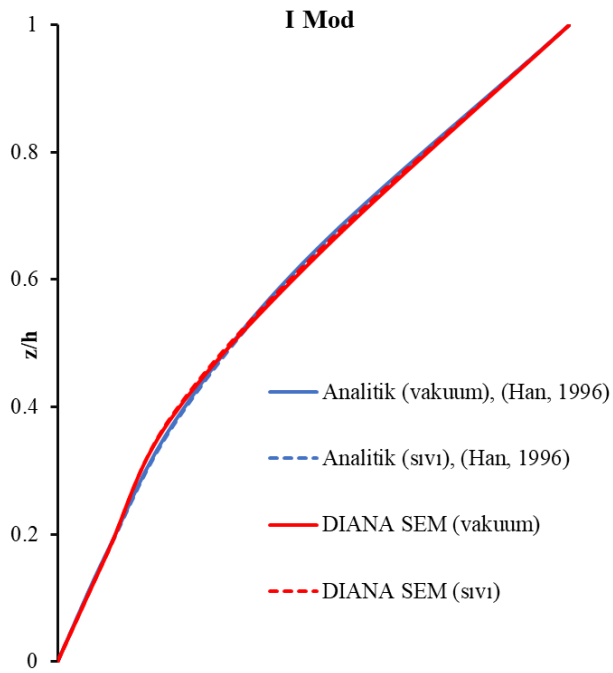
Bu araştırmada gerçekleştirilen parametrik analiz, daha önce tartışılan analitik formülasyonları doğrulamak için tasarlanmış sistemli bir değerlendirmeyi içermektedir. Çalışmada, su altında yer alan yapısal olarak esnek bir silindirin serbest ve zorlanmış titreşim yanıtlarını kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Sonuçlar, mod şekillerinin kapsamlı bir şekilde sunulmasıyla, ortamın su ile vakum arasında geçiş yaptığında temel titreşim modları arasındaki belirgin farklılıkların gözlemlenmesine olanak tanımıştır. Özellikle, temel titreşim modlarının her iki ortamda da dikkate değer bir uyum sergilediği görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.8'den anlaşılabileceği üzere, daha yüksek modlarda belirgin bir dönüşüm gözlemlenmektedir, bu da teorik beklentilerimizi doğrulamaktadır. Temel ve daha yüksek titreşim modları arasındaki bu fark, sıvı içindeki bir silindirin doğal dinamikleri ile vakum ortamındaki dinamikleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır (Şekil 4.9). Özellikle, sıvı ortamda bir silindirin azaltılmış titreşim frekansı, örneğin su, vakumda olanına kıyasla bu farklılıkları şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Göreceli frekans farklarının değişkenliği, ayrıca en-boy oranına (a/h) bağlı olarak belirgin

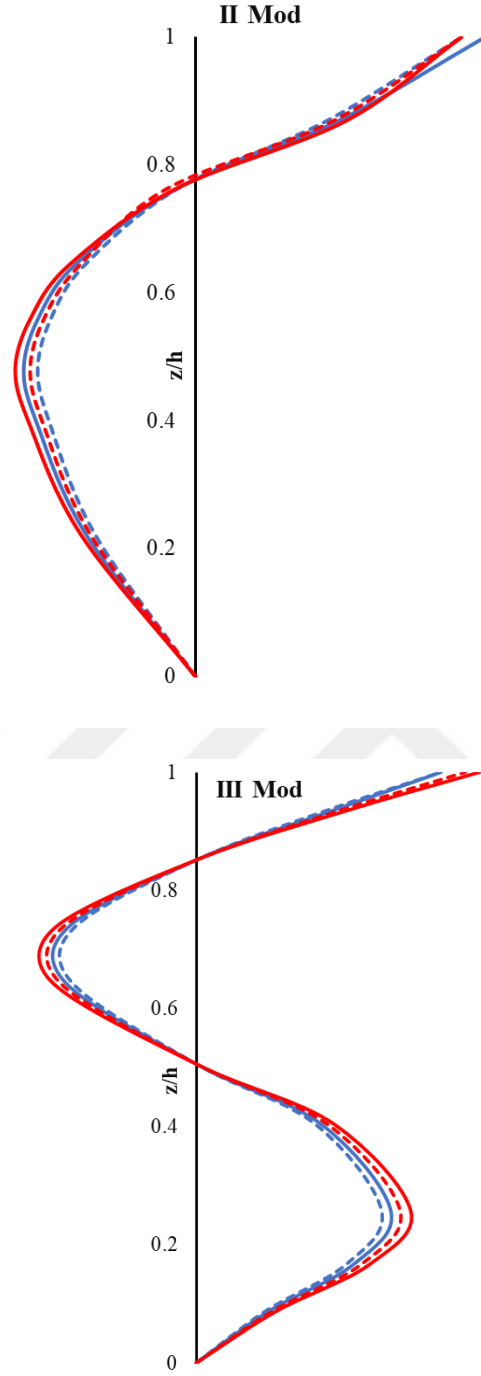
bir eğilim göstermektedir. Bu oran azaldığında, daha ince bir yapıyı ifade edilirken göreceli frekans farkının büyüklüğü dikkat çekici bir şekilde artmaktadır.





Şekil 4.8. Vakum ve su ortamında titreşimler için doğal frekans tahminlerinin karşılaştırılması.





Şekil 4.9. Sıvı ve vakumda titreşim mod şekilleri

4.3. Parametrik Çalışma

4.3.1. Yük – Yer Değiştirme İlişkisi

Segmental kirişlerin dört noktalı yükleme altında analizi sırasında, parametrik çalışmanın sonuçlarına dayanarak segmental kirişlerin mekanik davranışı ve performansı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. İlk olarak, Şekil 4.10a ve 4.10b'de sunulan yük-yer

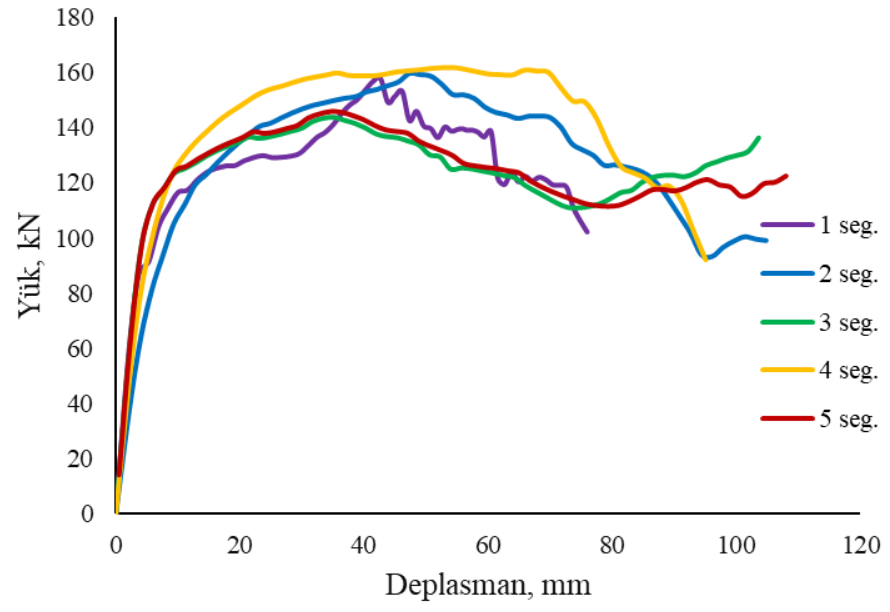
değiştirme eğrilerde sunulan yer değiştirmeler, kirişlerin alt yüzeylerinin en büyük yer değiştirme değerlerini temsil etmektedir.

Analiz sonuçlarına göre, tüm kirişler için yaklaşık 120 kN yük düzeyinde, segment birleşimlerinin alt yüzeylerinde boşluklar meydana gelmiş ve bu durum genel kiriş rijitliğinde belirgin bir düşüşe neden olmuştur. Bu gözlem, kirişlerin bu yük seviyesindeki mekanik sınırlarının aşıldığını ve önemli deformasyonlarla sonuçlandığını göstermektedir. Özellikle, tendon ön gerilmeleri tarafından üretilen basınç gerilmeleri, kirişin eğilmesinden kaynaklanan gerilme gerilmeleriyle dengelenememiştir, bu da segmental kirişlerin rijitliklerinin azalmasına yol açmıştır.

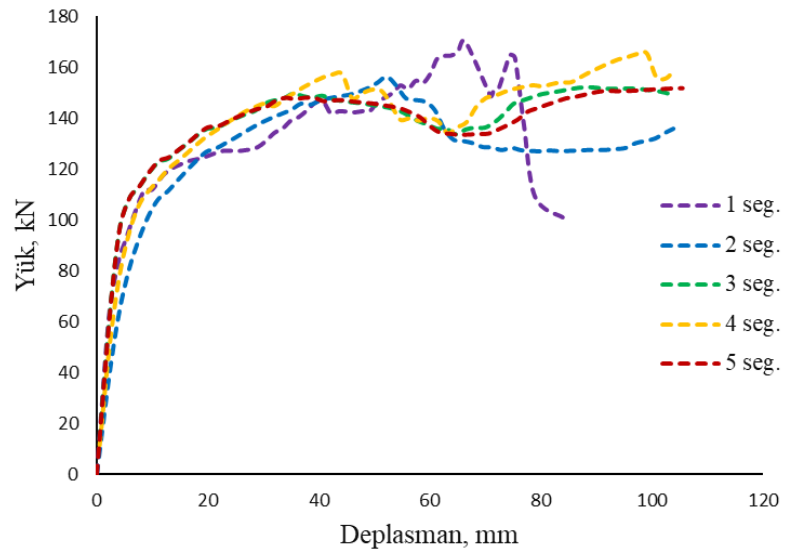
Ayrıca, analiz sonuçlarına göre, kirişlerde göçme noktasına ulaştığı yük seviyesi yaklaşık 150 kN olarak belirlenmiştir. Bu yük seviyesine gelindiğinde, artık uygun birleşmeler olmadığı için yeni boşluk açıkları gelişmemiştir. Göçme noktasına ulaşıldığında, tüm kirişlerin belirli bir düşey yer değiştirme ile çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle, tek segmentli kiriş için düşey yer değiştirme yaklaşık 80-85 mm iken, çok segmentli kirişler için bu değer yaklaşık 100 mm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, segmental kirişlerin genel mekanik performansını anlamak için önemlidir ve segment sayısının artmasıyla birlikte kirişlerin sünekliğinin arttığını göstermektedir.

Bununla birlikte, çatlak modellerinin yük-yer değiştirme davranışının incelenmesi de yapılmıştır. Şekil 4.10a ve 4.10b'nin karşılaştırılması, dönen ve sabit çatlak modelleri için benzer yük-yer değiştirme davranışı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, çeşitli çatlak modellerinin benzer mekanik davranış sergilediğini ve segmental kirişlerin çeşitli çatlaklara karşı dirençli olduğunu göstermektedir.

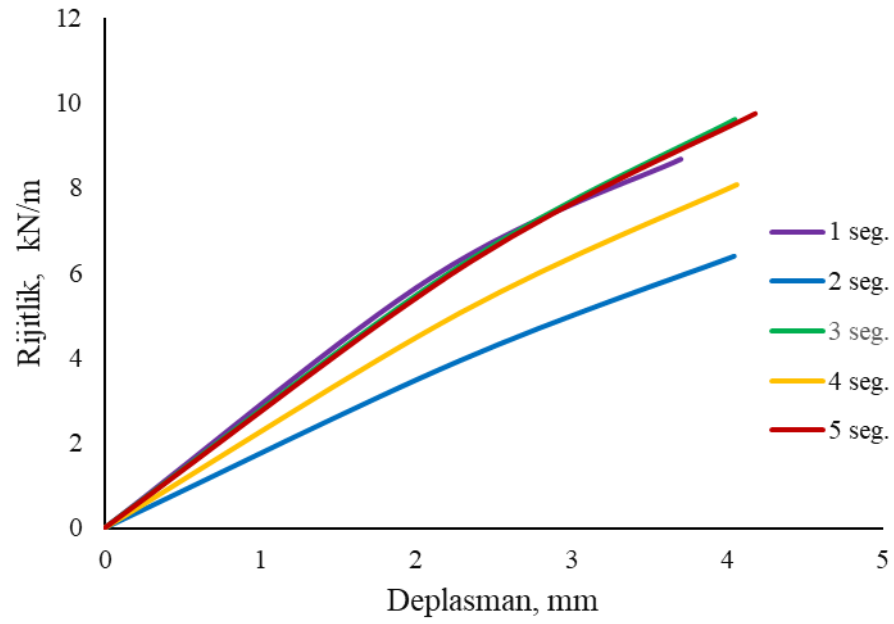
Segmental kirişlerin segment sayısı ile rijitliği arasındaki ilişkiye (Şekil 4.10c) dikkat etmiş olursak, monolit ve tek sayıda segmentten oluşmuş kirişlerde, rijitliğin neredeyse üst-üste denk geldiğini, çift sayıda segmentten oluşmuş kirişlerde ise diğerleri ile rijitlik farkının ortaya çıktığı belli olmuştur.



(a)



(b)



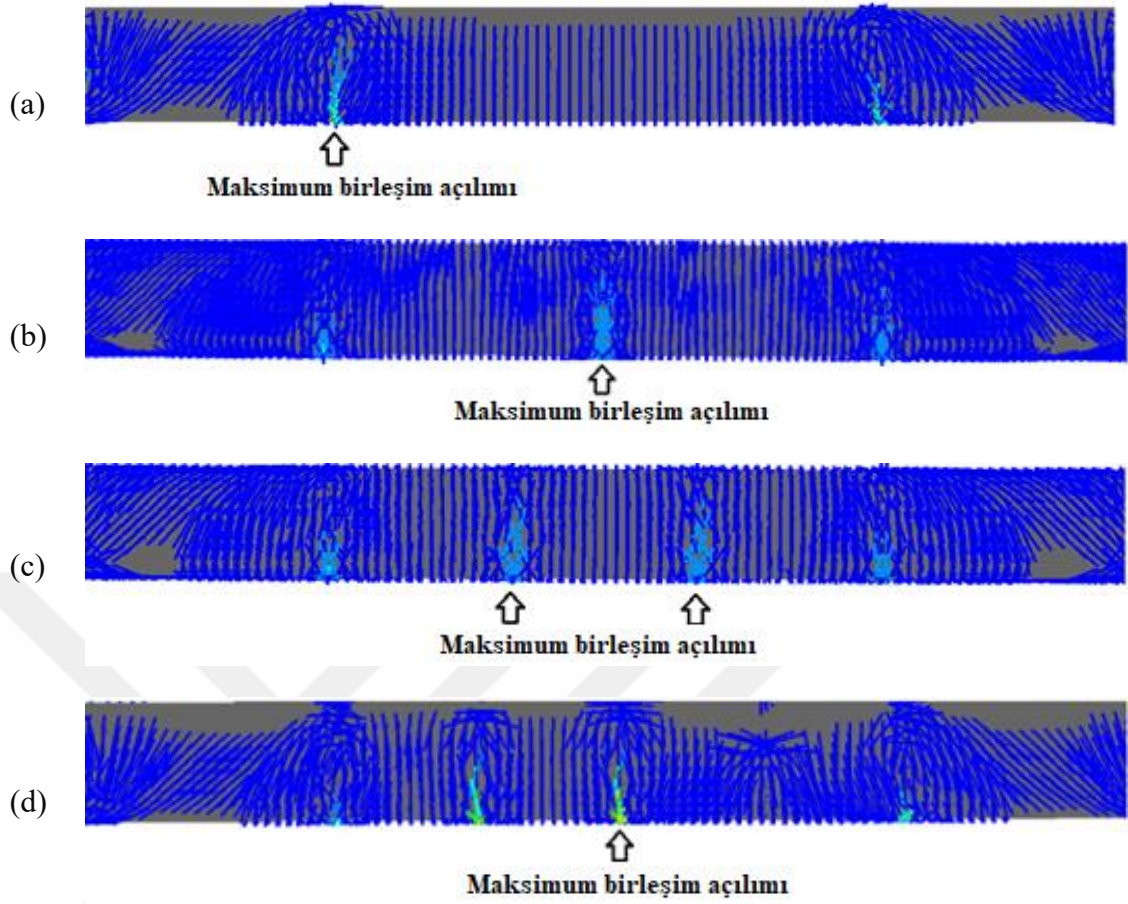
Şekil 4.10. Dairesel boşluğu segmental kirişin yük-deplasman eğrisi: (a) Dönen çatlak modeli, (b) Sabit çatlak modeli ve (c) segment sayısına göre rijitlik değişimi

4.3.2. Segmentlararası birleşim açılması ve çatlama

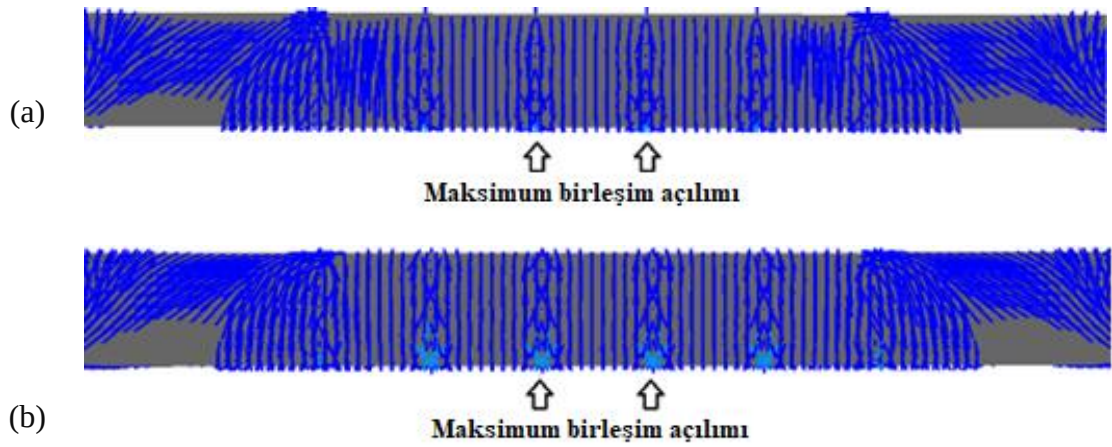
Şekil 4.10a ve 4.10b'nin karşılaştırılması, her iki çatlak modeli kullanılarak elde edilen yük-deplasman eğrilerinin benzer olduğunu göstermektedir. Bu durum, segmental kirişlerin mekanik davranışını anlamak ve segmental yapıların performansını değerlendirmek için önemli bir bulgu sunmaktadır. Bu nedenle, bu bölümde, çatlak desenlerinin incelenmesi için yalnızca dönen çatlak modeli sonuçları sunulmuştur. Çatlak desenlerinin ve birleşim açıklıklarının analizi, segmental kirişlerin yük altındaki davranışını daha derinlemesine anlaşılmasını sağlamaktadır.

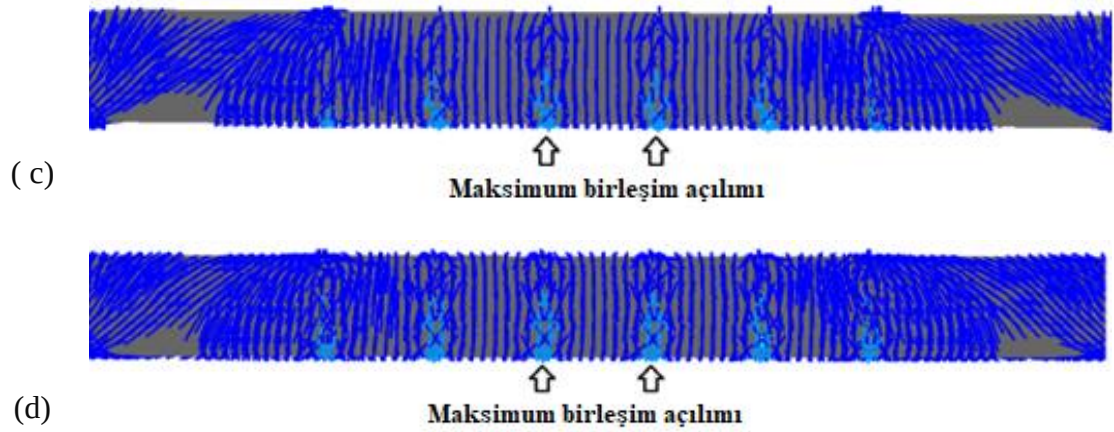
Ek olarak, çalışmada incelenen farklı segment sayılarına sahip kirişler için çatlak dağılımı ve segment uzunlukları, nihai yük aşamasında incelenmiştir. Şekil 4.11a-4.11d, 1 ila 4 segmental kirişler için çatlak desenlerini ve birleşim açıklıklarını göstermektedir. Benzer desenlerin gözlemlenmesi nedeniyle, çatlak yayılımı analizi sadece 5 segmental kiriş için sunulmuştur ve bu sonuçlar Şekil 4.12a-4.13d'de görülmektedir.

Bu sonuçlar, SE modeli kullanılarak elde edilen çatlak desenlerinin ve çatlak yayılımının, ardışık yük aşamalarında tutarlı ve fiziksel olarak kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Segmental kirişlerin çatlak oluşumu ve yayılması, yapısal tasarım ve dayanıklılık açısından kritik öneme sahip olduğundan, bu analizlerin sonuçları segmental yapıların daha güvenli ve dayanıklı olması için tasarım sürecinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 4.11 . Nihai yük aşamasında boş dairesel segmental ard germeli kirişlerinin çatlak dağılımı ve birleşim açıklıkları: (a) 1 segmentli kiriş, (b) 2 segmentli kiriş, (c) 3 segmentli kiriş, (d) 4 segmentli kiriş.



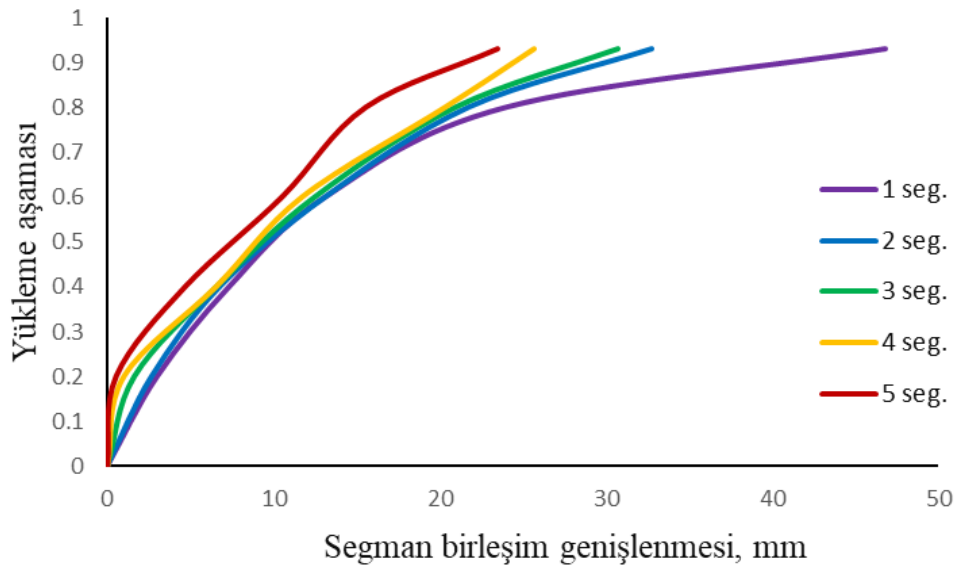


Şekil 4.12. 5 segmentli boşluklu dairesel kirişin farklı yük aşamaları için çatlak dağılımı ve birleşim açıklıkları: (a) Yük aşaması=0.25, (b) yük aşaması=0.5, (c) yük aşaması=0.75, (d) yük aşaması=1

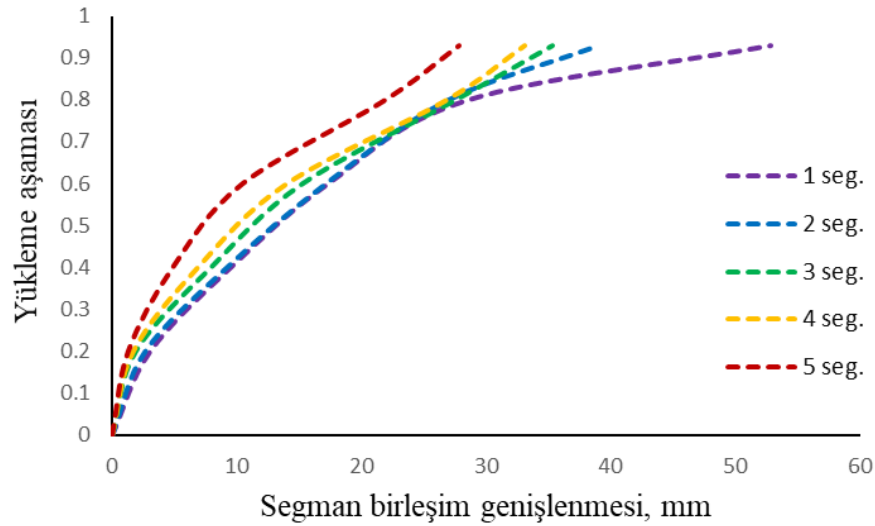
Şekil 4.13a ve 4.13b, her iki çatlak modeli için segment birleşim açıklıklarının maksimum değerlerini göstermektedir. Bu sonuçlar, segmental kirişlerin mekanik davranışını anlamak ve segmental yapıların performansını değerlendirmek için önemli ipuçları sunmaktadır. Şekil 4.11a-4.11d, 4.12d, 4.13a ve 4.13b'de gözlemlenen segment birleşim açıklığı ve çatlak dağılımları, farklı yük aşamalarında incelenmiştir.

Sonuçlar, segment sayısının artmasıyla birlikte maksimum birleşim açıklık genişliklerinin azaldığını göstermektedir. Özellikle, 1'den 5'e kadar segment sayısının artmasıyla birleşim açıklıklarının yaklaşık olarak 46 ila 23 mm arasında azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, segment birleşimleri arasında kiriş eksenine paralel ince çatlakların oluşumu tespit edilmiştir. Bu çatlaklar ve birleşim açıklıkları, kirişin genel rijitliğini azaltmıştır. Ancak, bu etkinin nihai yük kapasitesi üzerinde önemsiz olduğu bulunmuştur. Segmental birleşim açıklık genişliklerinin, segment sayısının artmasıyla azaldığı göz önüne alındığında, çoklu segmental kirişlerin küçük genişlik boşluklarıyla mücadele etme yeteneğinin arttığı sonucuna varılmıştır. Çünkü genellikle çatlaklar nedeniyle meydana gelen toplam genişleme miktarı, segmentler arasında daha iyi dağıtılmaktadır.

Ayrıca, gözlemlenen veriler, segment sayısındaki artışın birleşim genişlemesinde ortalama %8-10'luk bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Bu azalmanın, 2-segmentli kirişlerde 35 ila 39 mm arasında değişirken, 5-segmentli kirişlerde 23 ila 27 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu bulgular, segmental kirişlerin yapısal tasarımında ve uygulamasında önemli bir rol oynar. Çünkü bu analizler, segmental yapıların daha güvenli ve dayanıklı olması için tasarım sürecinde dikkate alınması gereken önemli faktörleri vurgulamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.13 . Segment birleşiminde göçmeye kadar olan açıklık genişliği değişim grafiği: (a) Dönen çatlak modeli ve (b) Sabit çatlak modeli

Tablo 4.1, farklı segmental kiriş yapılandırmaları için yük oranı ile karşılık gelen segment açıklık genişliği arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 2 segmentten 5 segmente kadar değişen segment sayısına sahip segmental kirişler için bu ilişki incelenmiştir. Yük oranı 0.25'ten 1'e arttıkça, segment açıklık genişliğinin genellikle tüm kiriş yapılandırmalarında karşılık gelen bir artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu durum, daha yüksek yük oranlarının segmental birleşimlerde daha fazla yer değiştirme ve genişlemeye yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, segment sayısı arttıkça, belirli bir yük oranı için segment açıklık genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ek segmentlerin

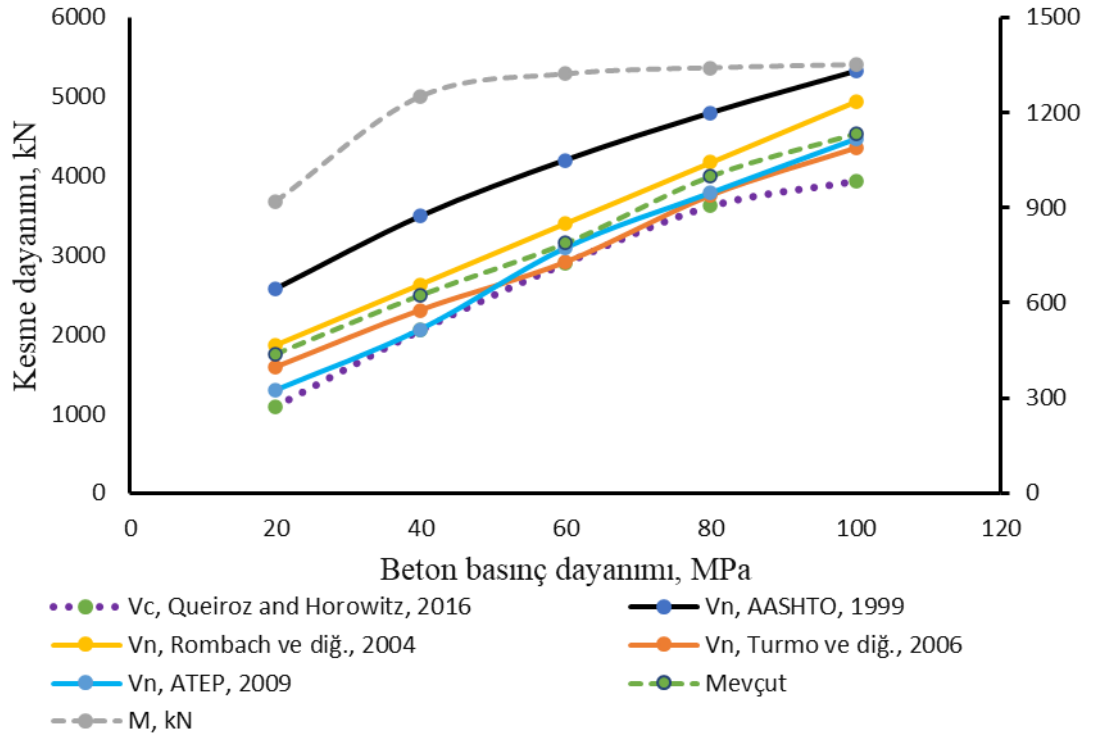
varlığının yükü daha etkili bir şekilde dağıttığını, dolayısıyla segmental birleşimlerdeki yer değiştirmenin azaldığını önermektedir.

Tablo 4.1. Yükleme oranı ile segmental birleşim açılması arasında ilişki.

Yükleme aşaması	Segment birleşim genişliği, mm			
	2 segmentli kiriş	3 segmentli kiriş	4 segmentli kiriş	5 segmentli kiriş
0.25	3.02	2.13	1.06	0.38
0.50	10.23	9.5	8.34	6.27
0.75	19.64	18.95	17.86	14.93
1	34.89	31.24	25.68	23.12

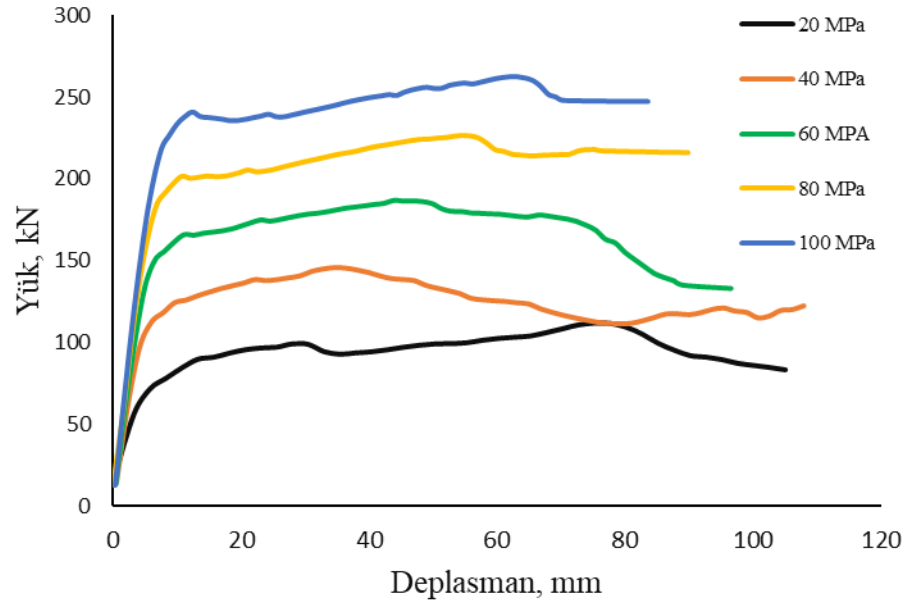
4.3.3. Beton Basınç Dayanımı

Parametrik çalışmada, segment sayısının yük-deplasman ve segment birleşim açılma davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla betonun basınç dayanımı sabit olarak (40 MPa) alınmıştır. Bu bağlamda, 5 segmentli kiriş için 20 MPa ile 100 MPa arasında değişen farklı beton dayanımı değerleri dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları, kesit moment kapasitesindeki hemen hemen 5200 kNm'ye kadar olan artışa rağmen, betonun dayanımının artmasıyla kesme ve birleşim kesme kapasitesinin neredeyse doğrusal bir şekilde arttığını göstermektedir (Şekil 4.14). Bu bulgu, betonun dayanımının artmasıyla segmental kirişlerin yük taşıma kapasitesinin arttığını ve daha sağlam bir yapı elde edildiğini ortaya koymaktadır.



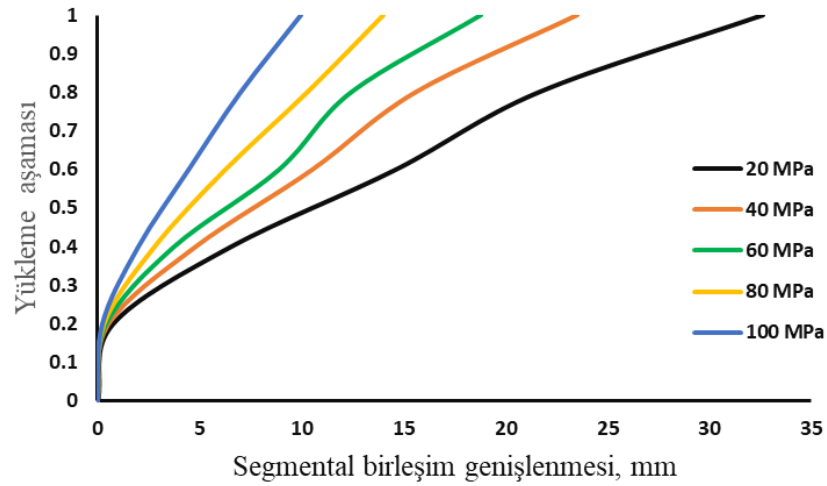
Şekil 4.14. Beton basınç dayanımına göre kesit ve birleşim kapasitelerinin değişimi

Ayrıca, tüm beton dayanımı değerleri için, segmental birleşimlerin kesit kesme kapasitesini aştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, segmental birleşimlerin, kirişin genel kesme dayanımını artırarak yapısal bütünlüğü sağlamak için önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Benzer bir gözlem, beton dayanımının artmasıyla kirişlerin başlangıçta neredeyse doğrusal bir rijitlik ve dayanım artışı gösterdiğini, ancak benzer bir süneklik seviyesinin korunduğunu belirtmektedir (Şekil 4.15). Bu, segmental kirişlerin yük altında daha istikrarlı bir şekilde davrandığını ve yüksek beton dayanımının yapısal performansı artırdığını göstermektedir.

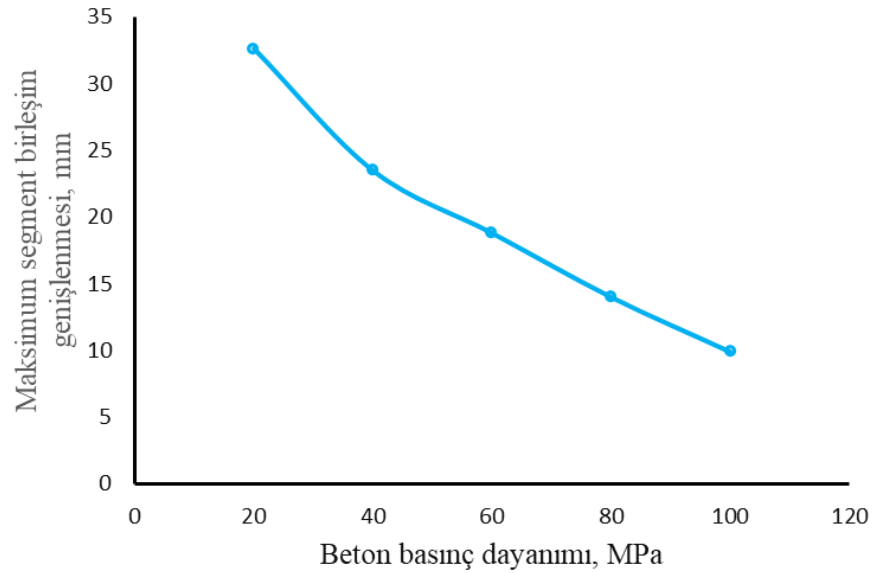


Şekil 4.15. AG dairesel boşluklu segmental kirişin yük-deplasman eğrisi

Aynı zamanda, Şekil 4.16a'da, her bir yük seviyesi için normalleştirilmiş olarak belirtilen en büyük birleşim genişliğinin, beton dayanımının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Örneğin, betonun basınç dayanımı 20 MPa olduğunda, çökme anındaki segment birleşim genişliği 32,62 mm iken, 100 MPa dayanımlı beton kullanıldığında bu değer önemli ölçüde 9,92 mm'ye kadar azalmaktadır (Şekil 4.16b). Bu, beton dayanımının artmasıyla segmental kirişlerin yapısal performansının iyileştiğini ve birleşim genişliğinin azaldığını göstermektedir. Beton dayanımındaki bu iyileşme, kirişlerin dayanıklılığını ve yük taşıma kapasitesini artırarak yapısal bütünlüğünü sağlamlaştırmaktadır. Bu da segmental kirişlerin daha yüksek beton dayanımına sahip olması durumunda daha güvenilir ve dayanıklı bir yapı elde edilmesine olanak sağlamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.16. 5-segmentlı kirişte her beton basınç dayanımı için segment birleşim genişliği: (a) Segment birleşim açıklığı yayılımı (b) Segment birleşim genişliğinin maksimum değerleri

4.4. Monopile Draugen Condeep Platformunun Monolitik ve Segmental Tasarım Türlerinin Karşılaştırılması

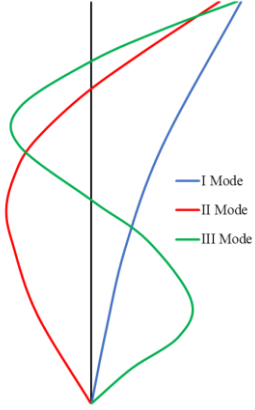
4.4.1. Modal Karakteristikler

Modal karakteristikler, farklı yükleme koşulları altında bir yapının dinamik özelliklerini inceleyen önemli bir yapısal analiz unsurudur. Bu çalışmada hem monolitik hem de segmental platformlar için modal analizin sonuçlarını, mod şekilleri, periyotlar

ve kütle katılım oranlarına odaklanarak ele alınmıştır. Bir yapının mod şekilleri, belirli bir mod sırasında titreşimlerin uzaysal dağılımını tanımlar (Tablo 4.2). Monolitik platform için mod şekilleri, segmental platform için karşılık gelen şekillerle birlikte gösterilmiştir. 3.226 saniyelik birinci doğal titreşim periyoduna sahip olan segmental platform, monolitik platforma göre daha uzun bir ilk doğal titreşim periyoduna sahiptir (2.028 saniye). Benzer şekilde, 0.549 saniye ve 0.256 saniye periyotlarında, segmental platformun ikinci doğal titreşim periyodu monolitik platformdan daha uzundur (sırasıyla 0.833 saniye ve 0.524 saniye). Monolitik ve segmental platformların doğal titreşim periyotları karşılaştırıldığında, segmental platformun monolitik muadilinden yaklaşık %50 daha uzun doğal titreşim periyotlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu, segmental yapının genel rijitliğinin daha düşük olduğunu ve analiz edilen doğal frekanslarda daha uzun titreşimlere yol açabileceğini düşündürmektedir.

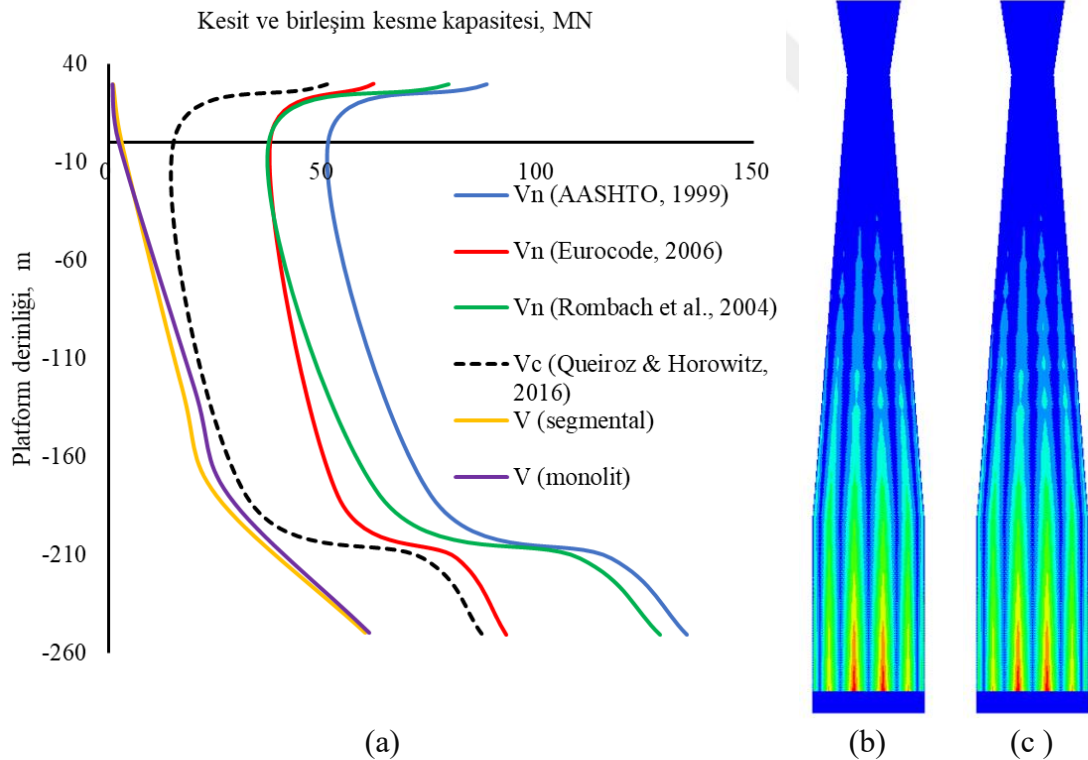
Farklı modlar için monolitik ve segmental platformlar arasında kütle katılım oranlarında değişimler görülmektedir. Örneğin, 2.028 saniye periyotunda, monolitik platformun kütle katılım oranı (%31,5) segmental platforma (%28,2) göre daha yüksektir. Bu eğilim, 0.549 saniye ve 0.256 saniye periyotlarında da devam eder, monolitik platform daha yüksek kütle katılım oranları sergilemektedir. Sunulan sonuçlarda, monolitik ve segmental platformlar için kütle katılım oranlarının, moddan moda geçişte benzer bir düşüş eğilimini takip ettiği görülebilir. Ayrıca, segmental platformun, tüm modlar boyunca, monolitik platforma göre daha düşük kütle katılım oranlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Bu, segmental konfigürasyonda yapının daha büyük bir kısmının dinamik tepkisine daha yüksek modlarda katkıda bulunduğunu belirtmektedir.

Tablo 4.2. Platformun modal karakteristikleri.

Mod şekilleri	Period, s		Kütle katılım oranı, %	
	Monolit	Segmental	Monolit	Segmental
 I Mode II Mode III Mode	2.028	3.226	31.50	28.20
	0.549	0.833	21.76	19.63
	0.256	0.524	15.43	12.45

4.4.2. Kesme Kapasitesi

Önceden belirlenmiş analitik formüller (Queiroz & Horowitz, 2016; AASHTO, 1999; Turmo vd., 2006; Rombach vd., 2004) kullanılarak yapılan yapısal hesaplamalar, segmental birleşim ve kesitlerin kesme kapasitesini belirlemeye odaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, kesitlerin geometrik özellikleri hesaplanan kesme kapasitelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durum, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır ve tasarım aşamasında dikkate alınması gereken bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4.17). Hesaplamalar, segmental bağlantıların kesme kapasitelerinin genel olarak kesitin kesme kapasitesinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, segmental kesitlerin monolit yapı prensiplerine uygun şekilde davranabileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, segmental yapıların güvenilirliği hakkında yeni bir bakış açısı sunmakta ve tasarım ve inşaat süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir noktayı vurgulamaktadır. Ayrıca, Şekil 4.17'de dış yüklerin oluşturduğu iç kuvvetlerin platformun derinliğine göre değiştiği ve bu değişimin hem monolitik hem de segmental platformlarda benzer bir eğilim sergilediği gözlemlenmiştir. Bu benzerlik, segmental ve monolitik yapıların iç kuvvet dağılımı açısından benzer davranış gösterdiğini işaret etmektedir. Bu nedenle, segmental yapıların tasarım ve analizinde, yalnızca iç yüklerin etkisini değil, aynı zamanda geometrik özelliklerin de dikkate alınmasının gerekliliğini göstermektedir.



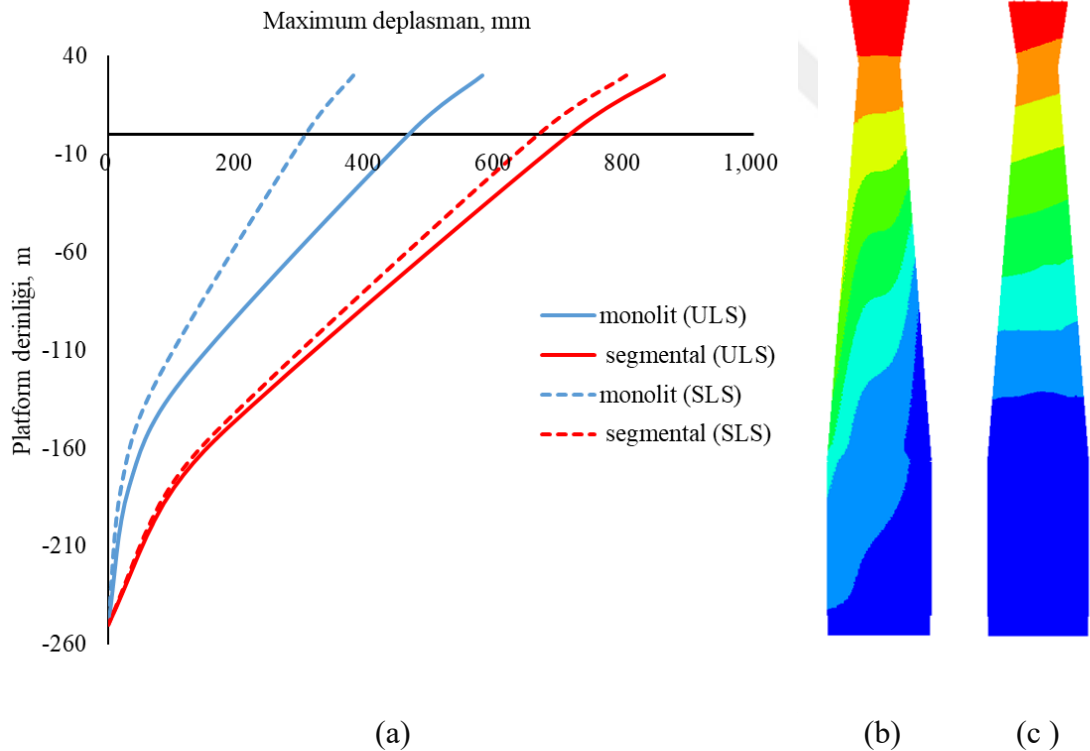
Şekil 4.17. Kesit (V_c) ve birleşim (V_n) kesme kapasitelerinin değişim eğrileri (a) ve iç kuvvetlerin (V), monolit (b) ve segmental (c) platform boyunca değişimi

4.4.3. Süneklik

Yapıların güvenli davranışının belirlenmesinde, yapıların sünekliği kritik bir etken olarak kabul edilir. Doğrusal olmayan analizler sırasında, monolitik ve segmental

platformlar arasında süneklik açısından önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, yapıların dayanıklılığını ve davranışını anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle, segmental platformların, monolit olanlara göre ULS'de %15 ve SLS'de %21 daha sünek davranış sergilediği tespit edilmiştir (Şekil 4.18). Bu durum, segmental platformların yanal yer değiştirme için daha fazla toleransa sahip olduğunu göstermektedir. Monolitik platform ULS'de 580 mm'ye kadar yanal yer değiştirmeye dayanabilirken (SLS'de 380 mm), segmental platform 861 mm'ye kadar dayanabilmektedir (SLS'de 802 mm). Bu, segmental yapıların depremler veya diğer dış etkiler karşısında daha fazla süneklik sağlayabileceğini ve dolayısıyla daha güvenli bir davranış sergileyebileceğini göstermektedir. Şekil 4.18, yanal yer değiştirmenin monolitik ve segmental platformlarda yapı boyunca dağılımını göstermektedir.

Monolitik yapının tüm bileşenleri aynı anda ve aynı yönde hareket ederken, segmental yapının segmentleri, birbirine bağlı gibi görünseler de birbirlerini benzer şekilde etkileyebilen ve bağımsız hareket edebilen bir yapısal düzenleme sergilemektedir. Bu farklılık, segmental yapıların daha esnek ve bağımsız bir yapısal düzenleme sunduğunu gösterir. Bu tür bir yapısal düzenleme, depremler gibi ani darbelerin etkilerini daha etkin bir şekilde emmeye ve dağıtmaya yardımcı olabilir. Ayrıca bu, segmental yapıların daha karmaşık yapısal zorluklara karşı daha dayanıklı ve güvenli olabileceğini de öne sürmektedir.



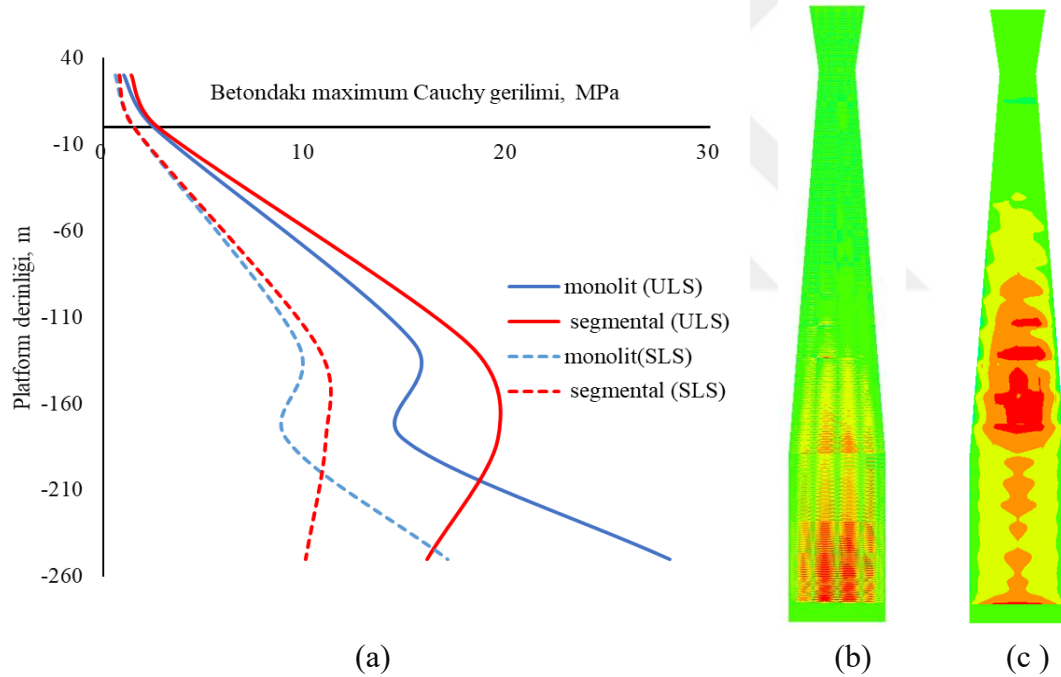
Şekil 4.18. Yük–yatay yer değiştirme eğrileri: (a) monolit (b) ve segmental (c) platformlar

4.4.4. Beton ve Donatı Gerilmeleri

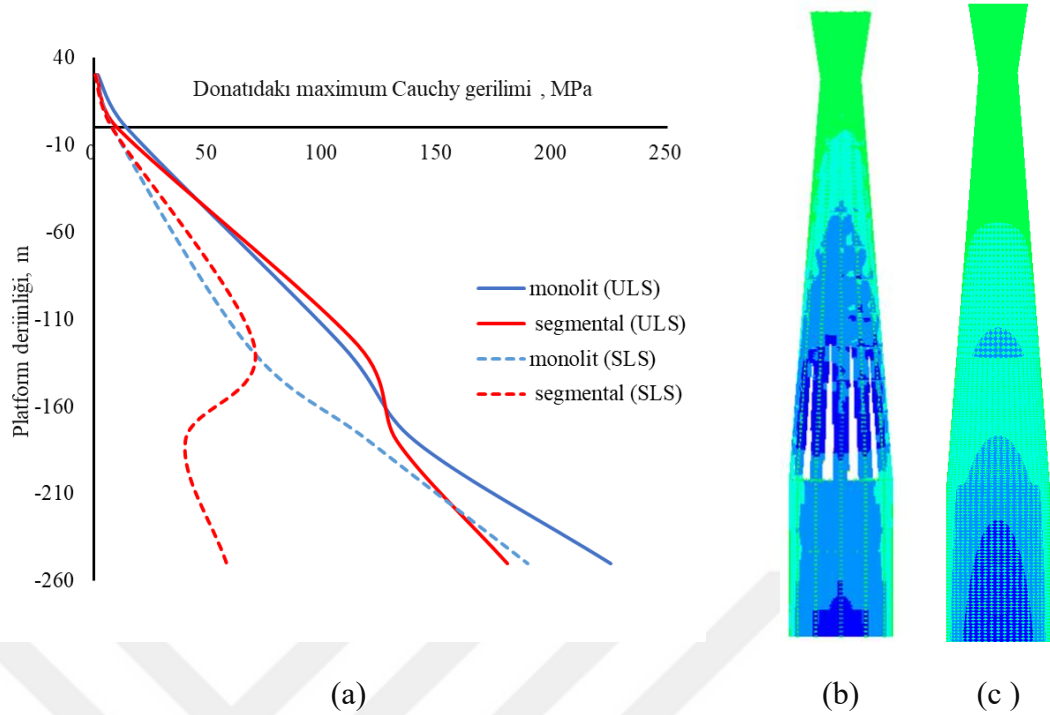
Monolitik ve segmental platformlarındaki Cauchy gerilmesinin dağılımı incelendiğinde, farklı davranış özellikleri gözlemlenmiştir. Monolitik platform,

platformun tepesinde başlangıçta düşük gerilme düzeyleriyle başlamakta ve derinlik arttıkça kademeli olarak artmaktadır. Derinlik arttıkça, gerilme artış oranı da artmakta ve platformun altında maksimum değere ulaşmaktadır (Şekil 4.19). Monolitik yapıda derinlikle artan gerilme dağılımı, yapısal homojenlik ve tutarlılığın önemli bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Diğer taraftan, segmental tipte, Cauchy gerilmesi derinlik arttıkça daha doğrusal olarak artmaktadır. Segmentler arasındaki birleşim bölgelerinde yoğunlaşan gerilmeler derinlikle birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Şekil 4.19, segmental platformda Cauchy gerilmesinin en yüksek değerinin yapının ortasında gözlemlendiğini göstermektedir. ULS ve SLS limit durumlarında beton içinde oluşan Cauchy gerilmelerinin aynı şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yapının derinliği boyunca beton duvar kalınlığının değişimi gözlemlendikçe de betonda oluşan gerilmelerin değişimi uyumlu olarak değişimi gözlemlenmiştir.

Yapıdaki donatılmış çelik için de benzer eğilimler ortaya çıkar (Şekil 4.20). Ancak, segmental kolonların esnek yapısal düzenlemesi, bu yoğunlaşan gerilmelere daha etkin bir şekilde dayanabilmelerini sağlar. Bu, segmental yapıların esneklik ve daha dengeli gerilme dağılımı açısından avantajlarını ortaya koymaktadır.



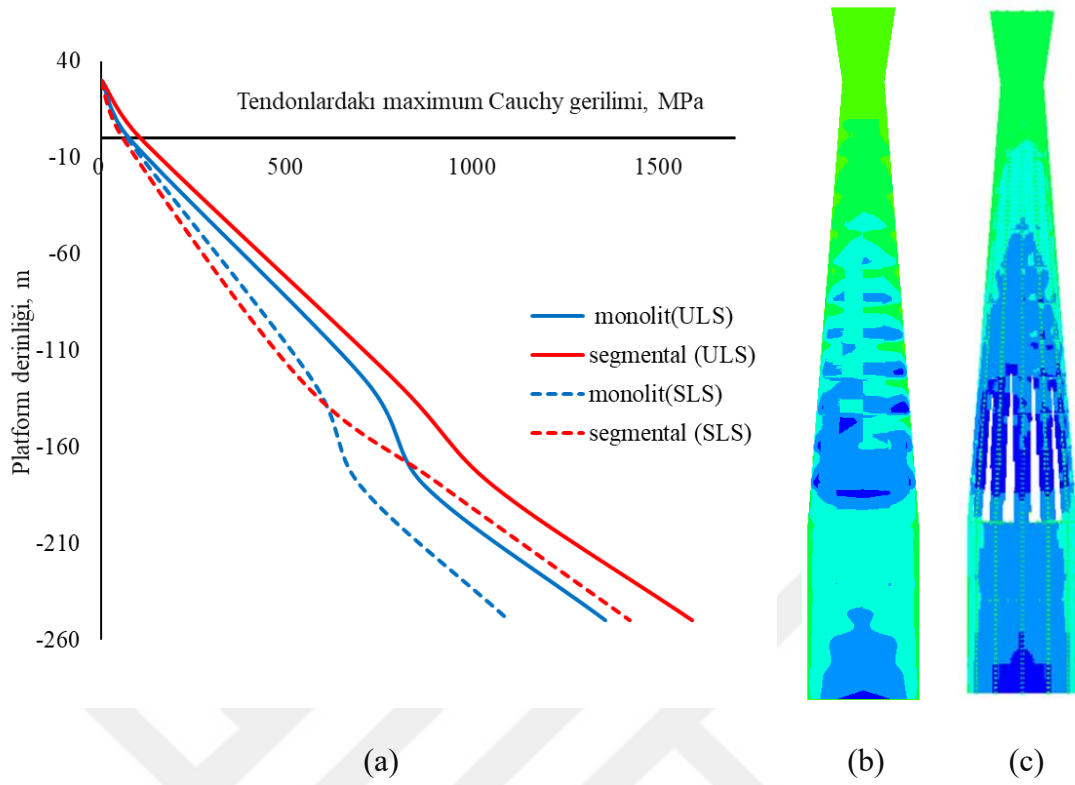
Şekil 4.19. Platformlar boyunca betonun maksimum Cauchy gerilmesi dağılım eğrileri: (a) monolit (b) ve segmental (c)



Şekil 4.20. Platformlar boyunca donatının maksimum Cauchy gerilmesi dağılım eğrileri: (a) monolit (b) ve segmental (c)

4.4.5. Tendon Gerilmelerinin Karşılaştırılması

AG tendonlarındaki Cauchy gerilmelerinin dağılımı, monolit ve segmental yapılar arasındaki beton ve donatı gerilmeleri arasındaki farkları anlamak için kritik bilgiler sağlamaktadır (Şekil 4.21). Platformun tendonlarının derinliği boyunca gerilme dağılımının, beton ve donatıda gözlemlenen dağılımdan farklılık gösterdiği görülmektedir. Özellikle, segmental platformda hem ULS hem de SLS için tendonlardaki gerilmenin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Segmental platformda oluşan gerilmelerin monolit yapıya kıyasla ULS'de %30, SLS'de %18 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların temelinde, segmental yapıların esneklik ve bağımsız hareket kabiliyetleri bulunmaktadır. AG tendonlarının avantajlı özellikleri, segmental yapıların daha karmaşık yükleme koşullarında bile üstün performans sergilemesini sağlamıştır. Bu bağlamda, beton ve donatıdaki gerilme dağılımındaki varyasyon, monolit ve segmental yapılar arasındaki önemli farklılıklara ışık tutan kilit bir bilgi olarak işlev görmektedir.



Şekil 4.21. Platformlar boyunca ard germe tendonunun maksimum Cauchy gerilmesi dağılım eğrileri(a), monolit (b) ve segmental (c)

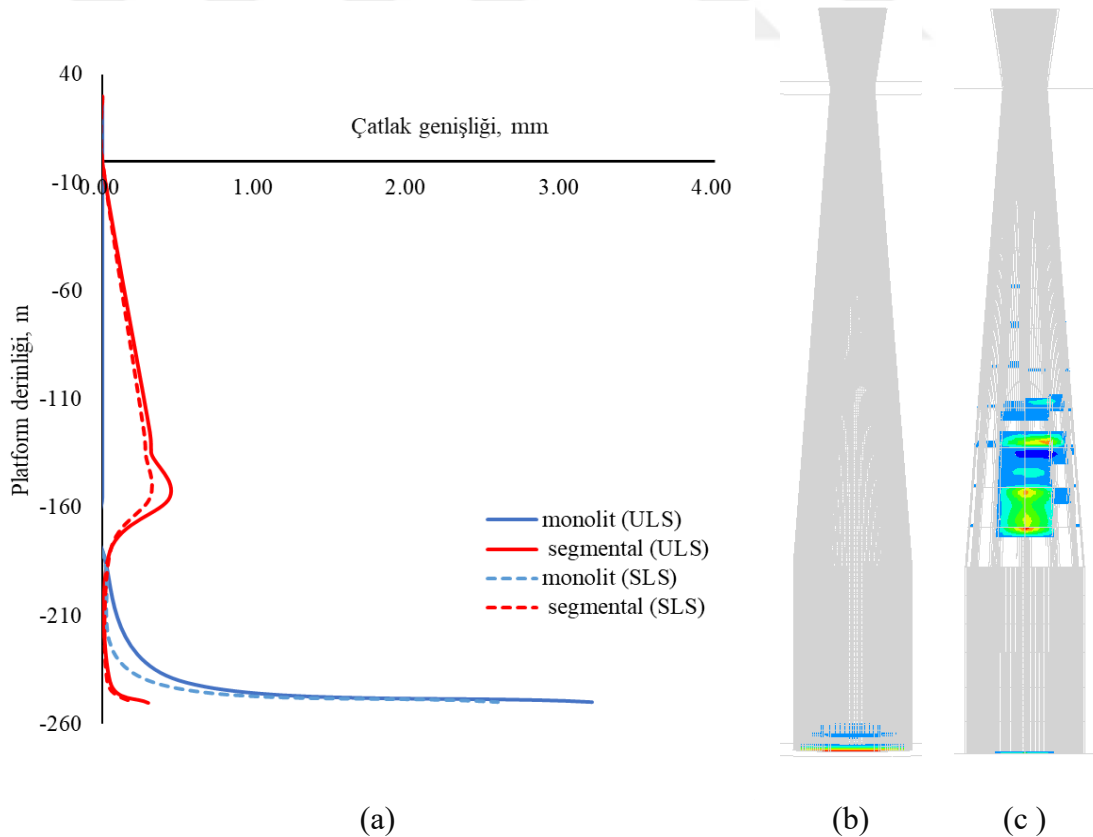
Bu sonuçlar, monolitik ve segmental yapıların farklı yapısal davranışlarını yansıtmaktadır. Derinlikle birlikte gözlemlenen gerilme dağılımındaki farklılıklar, yapısal tasarım ve dayanıklılık analizinde dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Monolit ve segmental yapılar arasındaki Cauchy gerilmesinin dağılımındaki farklılıklar, bu iki yapı türünün farklı yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Monolitik yapılar tipik olarak homojen bir yapıya sahip oldukları için yükü yapı boyunca eşit olarak dağıtırlar ve bu nedenle en yüksek gerilme yapının en alt kısmında meydana gelir. Öte yandan, segmental platformlar birbiriyle bağlantılı parçalardan oluşur. Bu nedenle gerilme, segmentler arasındaki birleşim bölgelerinde yoğunlaşabilir. Yapının ortasında en yüksek gerilmenin oluşması, segmental platformun esnek yapısından ve birleşim bölgelerindeki yoğunlaşan gerilmenin etkisinden kaynaklanabilir.

Bu farklılıklar, monolitik ve segmental yapılar arasındaki yapısal karakteristiklerin nasıl farklılaştığını ortaya koyar. Monolit yapılarda, gerilme homojen olarak yayılır ve genellikle yapı boyunca eşit şekilde artar. Buna karşın, segmental yapılarda, gerilme belirli noktalarda yoğunlaşabilir, bu da yapının içindeki farklı bölgelerde farklı gerilme seviyeleriyle sonuçlanır. Bu farklılıklar, segmental yapıların tasarımında ve analitik incelemesinde dikkate alınmalıdır. Özellikle birleşim noktaları, yoğun gerilmelere karşı daha dikkatli bir şekilde tasarlanmalı ve dayanıklılık açısından değerlendirilmelidir. Bu sonuçlar, segmental yapılar ile monolit yapılar arasındaki temel farkları ve bu farkların yapısal dayanıklılık üzerindeki etkilerini göstererek, tasarım ve analiz süreçlerinde dikkate alınması gereken kritik bilgileri sağlar.

4.4.6. Çatlak Genişliği

Sonuçlar, SE tabanlı doğrusal olmayan analizlerde döner çatlak modellerinin kullanılarak monolitik ve segmental platformların davranışlarını incelediğini göstermektedir. Bu döner çatlak modeli, çatlakların yükleme koşulları altında nasıl büyüyebileceği ve gelişebileceği konusunda daha gerçekçi bir simülasyon sağlamaktadır. Çatlak analizinin sonuçları, hizmet yüklemesi sırasında segmentlerde meydana gelen çekme gerilmeleri ve segmental platformdaki çatlakların varlığının, genel yapısal dayanım veya deplasman kapasitesi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunu gösterir. Çatlak oluşumunun neden olduğu çekme şekil değiştirmesindeki artışa rağmen, platformun yük taşıma yeteneğinin neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yükleme sırasında, segmental yapıdaki birleşim açıklıklarının monolit yapıya göre azaldığı da gözlenmiştir (Şekil 4.22). Örneğin, monolitik platformda maksimum çatlak genişliği (ULS-3.21 mm, SLS-2.58 mm) zeminle birleştiği kısımda yoğunlaşırken, segmental yapıda bu genişlik segmentler arasında bölünmekte ve ULS'de maksimum 0.34 mm (SLS'de 0.31 mm) çatlak genişliğine ulaşılmaktadır. Bu, segmentler arasındaki birleşim bölgelerinde gerilme yoğunlaşmasını işaret eder.

Segment sayısının birleşim açılması üzerindeki azaltıcı etkisi, platformun yük taşıma kapasitesi ve yapısal bütünlüğü için olumlu sonuçlar vermektedir. Segment sayısının artması, birleşim açıklığı genişliğindeki gözlemlenen eğilimi yansıtarak, bu tür yapılarda daha fazla segment kullanmanın potansiyel faydalarını vurgulamaktadır. Dolayısıyla, daha fazla segmente sahip yapılar, monolitik yapılara göre yük taşıma kapasitesini azaltmadan daha yüksek yapısal stabiliteye sahip olabilir.



Şekil 4.22. Çatlak yayılım eğrileri (a) monolit (b) ve segmental (c) platform

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, öncelikle analitik çalışma kısmında geliştirilmiş analitik formüllerin aracılığı ile dairesel ard germenin Condeep türlü platform ayaklarının ve depolama rezervuarlarına etkisi araştırılmıştır. Sayısal modelleme kısmında dört noktali yükleme altında boş dairesel segmentli AG kirişlerin doğrusal olmayan yapısal davranışı incelenmiştir. Ölçekli bir prototip yapı, DIANA SE yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Üç set doğrulama problemi 1D, 2D, 3D elemanlar kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar ilgili çalışmalarda modeller sunulan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan doğrulama çalışmasıyla seçilen yazılım kullanılarak betonarme, ard germeli beton ve segmental ard germeli beton kirişler için doğru SE modelleri oluşturulabileceği gösterilmiştir. Tasarım kısmında çalışmada, Condeep tipi deniz üstü platformların segmental yük taşıyan desteklerinin modüler bir inşaat yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapıların etkin bir şekilde modellenmesi için DIANA SE yazılımı kullanılarak yapılan sayısal analizlerde, SYE yapısı ve daha önce yapılan analitik çözümle gerilmiş kirişin güvenilirliği ve doğruluğu doğrulanmıştır. Draugen Monopile Condeep platformu, önce monolitik ve ardından segmental tasarımda incelenmiştir. Platformun gerçek davranışını anlamak için sistem üzerindeki tüm yüklerin detaylı hesaplaması yapılmıştır. Bu hesaplamalar hem monolitik hem de segmental tasarımın çeşitli özelliklerinin analiz edilmesini mümkün kılmıştır. Monolitik yapıdaki elemanların etkileşimleri ve segmental tasarımdaki farklı bileşenlerin performans üzerindeki etkileri titizlikle incelenmiştir. Bu sayede, stratejik girişimleri uygulamak için kritik verilere dayalı bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- a) Dairesel AG için geliştirilmiş analitik formüllerle yapılan analizler ve grafiklerin incelenmesi sonucunda, su altında çalışan Condeep yapısının kabuğunda dairesel ard germenin etkisinin betonda oluşan dairesel çekme kuvvetlerini ve momenti nasıl değiştirdiği detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu inceleme, iç ve dış basınçların ve eksenel kuvvetlerin etkisi altında bulunan dairesel kesitli yapılar için dairesel ard germenin yapısal performansı olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Özellikle, dairesel ard germe farklı basınç koşullarına maruz kalan yapısal elemanlarda ilave çekme gerilmeleri oluşturarak yapının performansını düşürmektedir. Bu, betonda oluşan çekme gerilmelerinin önemli ölçüde yükselmesine neden olmaktadır.
- b) Doğrulama çalışmalarında, SE modelleri kullanılarak elde edilen çatlak desenlerinin, alıntılanan çalışmalarda deneysel olarak elde edilen desenlerle mükemmel bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Elde edilen sayısal sonuçlar, ölçekli prototip yapının karmaşık geometrisi nedeniyle birleşim arayüzü modelleme tekniği kullanılarak 3D SE modelinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.
- c) Parametrik çalışmada segment sayısındaki artışın, segmental kirişlerin yük kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu, ancak göçme sırasında birleşim genişliğini azalttığı görülmüştür. Beton dayanımının artmasıyla birleşim aralıklarının genişliğinde gözlenen azalma eğilimi, daha fazla segmentli yapının ve yüksek dayanımlı betonun kullanımının potansiyel faydalarını işaret etmektedir. Farklı basınç dayanım seviyelerinde yapılan analizler, yüksek basınç dayanımına sahip betonların kullanımının, göçme koşullarında bile minimum segment açıklıklarına yol açtığını göstermektedir. Bu tür kurulumların yapısal

tasarımında, dayanıklılık ve süneklik açısından avantajlar sağlayan segmental metodun, tercih edilebilir bir seçenek olarak değerlendirilebileceği vurgulanabilir. Bu nedenle, birleşim aralıklarının kesme kapasitesi ve açıklık genişliği yönetmeliklerin belirtilen sınırları aşmadığı sürece, segmental yapının mümkün bir seçenek olduğu vurgulanabilir.

- d) Tasarım kısmında monolitik ve segmental yapıların kesme kapasitesi arasındaki karşılaştırma, kesme kapasitesinin yapısal davranışı ve güvenilirliği ile ilgili temel görüşleri ortaya koymaktadır. Geometrik özelliklerin hesaplanmış kesme kapasitelerini etkilemesinin önemini vurgulayan kesme kapasitesi hesaplamalarına odaklanılarak, segmental bağlantıların ilgili kesitlerden daha yüksek kesme kapasitelerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, segmental yapıların davranışının monolit yapılarla uyumlu olduğunu göstermektedir. İç kuvvetlerin, monolitik ve segmental platformların derinliği boyunca farklılık gösterdiği gözlemi, iki yapının davranışındaki benzerliği vurgulamaktadır. Bu iç kuvvet dağılımındaki benzerlik, tasarımda ve analizde iç yüklerin etkisinin yanı sıra geometrik özelliklerin de dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Özetle, segmental birleşimlerin daha yüksek kesme kapasiteleri ve iç kuvvet dağılımındaki benzer eğilimler, segmental yapıların genel olarak monolitik yapıların prensipleriyle uyumlu davranabileceğine dair bir anlayışa katkıda bulunmaktadır. Bu sonuç, yapısal güvenliğin ve dayanıklılığın sağlanması için tasarım ve analiz süreçlerinde geometrik özelliklerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.
- e) Monolitik ve segmental platformlar arasındaki süneklik karşılaştırması, segmental platformlarla ilişkilendirilen önemli avantajları ortaya koymaktadır. Sonuçlar, segmental platformların ULS ve SLS altında sırasıyla %15 ve %21 artışla daha yüksek sünek davranış sergilediğini göstermektedir. Bu artan süneklik, segmental platformların yanal yer değiştirme toleransının arttığını gösterir. Bu artan süneklik düzeyi, özellikle deprem olayları karşısında, dış kuvvetlere dayanma kapasitesini arttırmaktadır. Monolitik yapılar aynı anda ve eşit hareket ederken, segmental platformlar daha esnek ve bağımsız bir yapı konfigürasyonu sergileyerek, birbirine bağlı segmentlerin bireysel hareketine izin verir. Segmental yapıların ani darbelerin etkilerini absorbe edip dağıtma yeteneği, güvenlik performanslarını artıran kritik bir özelliktir. Sonuç olarak, segmental yapılar, yapısal uygulamalarda daha sünek, esnek ve güvenli bir alternatif sunar, çeşitli dış etkilere karşı daha yüksek bir güvenlik ve güvenilirlik seviyesi sunmaktadır.
- f) Monolitik ve segmental platformlardaki beton ve çelik donatıların Cauchy gerilme dağılımının karşılaştırılması, belirgin davranışsal özellikleri ortaya koymaktadır. Monolit yapıda, gerilme seviyeleri platformun üst kısmında görece düşük başlar ve derinlikle birlikte artarak en altta maksimuma ulaşır. Bu model, yapısal homojenliğin ve tutarlılığın belirgin bir göstergesi olup, monolit yapının stresi artan bir şekilde işleme yeteneğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, segmental platform, derinlikle birlikte Cauchy gerilimin daha doğrusal bir artış göstermektedir. Segmental platformdaki en yüksek Cauchy gerilmesi, platformun yaklaşık olarak ortasında olup, monolitik platform ile karşılaştırıldığında farklı bir gerilme dağılımı sergilemektedir. Betondaki gözlemlenen Cauchy gerilmelerindeki değişiklikler, ULS ve SLS dahil olmak üzere benzer eğilimler göstermektedir. Donatı da benzer eğilimleri izlemektedir. Segmental platformun

esnek yapı düzeni, yoğun gerilmeleri etkili bir şekilde karşılamalarına olanak tanımakta, esneklik ve daha dengeli bir gerilme dağılımı avantajlarını birlikte sunmaktadır. Bu gözlem, segmental yapıların esnekliğini ve uyarlanabilirliğini vurgularken, yapısal tasarımın kritik bölgeleri, özellikle segment arası birleşim noktaları arasındaki streslerin daha verimli bir şekilde ele alınmasına izin vermektedir. Bu nedenle, segmental platformların gerilme dağılımını yönetme avantajları, genel yapısal bütünlüğüne katkıda bulunurken çeşitli yükleme koşullarına karşı uygunluğunu vurgulamaktadır.

- g) Monolitik ve segmental platformların AG donatılarındaki Cauchy gerilmelerin karşılaştırılması, iki platform tipi arasındaki gerilim dağılımındaki farklılıklara dair değerli bilgiler sunmaktadır. İnceleme, platformun tendon derinliği boyunca gerilme dağılımının beton ve donatıdakinden farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, segmental platformda AG donatılarda monolitik yapıların üzerinde daha yüksek gerilme düzeyleri gözlenmiştir. Bu fark, segmental yapıların ULS ve SLS durumlar açısından üstün performansını göstermektedir. Segmental platformlarda, monolit yapılarla karşılaştırıldığında %30 daha yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların ana nedeni, segmental yapıların esnek yapıları ve bağımsız hareket yetenekleridir. Bu avantajlı özellikler, segmental yapıların üstün performans sergilemesini sağlarken, karmaşık yükleme koşulları altında bile dayanıklılık ve uyarlanabilirliklerini vurgulamaktadır. Özetle, monolit ve segmental yapılarda derinlikle birlikte Cauchy gerilme dağılımındaki farklılıklar, iki platform tipinin belirgin yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Homojen monolitik yapılar, yapı boyunca yükün eşit dağılımını gösterirken, en yüksek gerilmenin taban seviyesinde oluşmasına neden olur. Buna karşılık, birbirine bağlı parçalardan oluşan segmental platformlar, segmentler arasındaki birleşim noktalarında gerilme yoğunlaşması potansiyelini göstermektedir. Segmental platformlardaki yapıların ortasında oluşan en yüksek gerilme, esnek yapı ve segmentler arasındaki birleşim noktalarında konsantre stresin etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu yapısal davranışlar, tasarım ve analiz aşamalarında her bir yapı tipinin özel özelliklerini dikkate almanın önemini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, monolitik yapılarda daha homojen bir gerilme dağılımı oluşurken, birbirine bağlı bileşenlere sahip olan segmental yapılar, olası gerilme yoğunlaşmalarına neden olmaktadır.
- h) Monolitik ve segmental platformlardaki çatlak genişliklerinin SE tabanlı dönen çatlak modelleri kullanılarak yapılan karşılaştırması, yapısal davranışları hakkında kapsamlı bilgiler sağlamıştır. Döner çatlak modeli, yük altındaki çatlak büyümesinin gerçekçi bir simülasyonuna izin verir. Çatlak oluşumuna bağlı olarak çekme gerilmelerinde artış olmasına rağmen, platformun yanal yük taşıma kapasitesi tutarlı bir şekilde monolitik platform yanal yük kapasitesine yakın kalır. Önemli olan, segmental yapıların birleşim noktalarındaki eklem açıklıklarının yük altında azaldığının gözlemlenmesi ve maksimum çatlak genişliğinin segmentler arasında dağıtılmasıdır. Bu, segmental yapıların küçük genişlikteki boşluklara karşı üstün direncini vurgulamakta olup, daha fazla segmente sahip yapıların daha yüksek yapısal istikrar elde edebileceğini ortaya koymaktadır. Döner çatlak modeli kullanılarak çatlak davranışının incelenmesi, segmental platformlardaki çatlakların yük altında uyumlu deformasyonlara dayanmasının ve yapısal dayanıklılık veya yük taşıma kapasitesi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunun altını çizmektedir. Önemli olan, elde edilen çatlaklar, deniz üstü

platform tasarım yönetmelikleri tarafından tanımlanan kabul edilebilir tasarım sınırları içinde kalmıştır.

Sonuç olarak, bu sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar, AG segmental beton deniz üstü Condeep tipi yapılar için yapılarının ekonomik, daha basit ve daha uygulanabilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Çalışmada vurgulanan segmental yapıların daha fazla segment kullanımının faydaları, deniz üstü platformların geliştirilmesi için umut verici bir yönde ilerleme sunmaktadır. Özellikle, bu yapılar, yük taşıma kapasitesini koruyarak yapısal istikrarı artıran bir avantaj sağlarlar. Bulgular, segmental yapıların geleneksel deniz üstü Condeep yapılarına kıyasla daha kolay inşaat ve ekonomik avantajlar sunabileceğini göstermektedir. Segmental yapıların etkili bir şekilde gerilmeyi dağıtma, çatlak gelişimini engelleme ve çeşitli yükleme koşullarında yapısal bütünlüğü koruma yeteneği, onları deniz uygulamaları için uygun ve potansiyel olarak daha üstün bir seçenek haline getirir. Bu çalışma, segmental yapıların pratik avantajlarını ve güvenlik iyileştirmelerini vurgulayarak değerli bilgiler sunmaktadır. Bu araştırmada belirlenen umut verici yol, segmental tasarımların deniz üstü platform inşaatında benimsenmesine yol açarak, karmaşık deniz ortamlarının sunduğu zorluklara güvenilir ve etkili bir çözüm sunabilmesidir.

Bununla birlikte, belirli sınırlamaları kabul etmek ve gelecek araştırmalar için olanaklar sunmak, segmental yapı anlayışını daha da artırmak için önemlidir. Bu çalışmada gerçekleştirilen kapsamlı incelemeye rağmen, dikkate alınması gereken birkaç kısıtlama ve gelecekteki araştırmalar için potansiyel yönlendirmeler bulunmaktadır. Bir kısıtlama, bu çalışmanın, öncelikle dört noktalı bükme altında boş dairesel segmentli AG kirişlerin doğrusal olmayan yapısal davranışına odaklanmasıdır. Bu, segmental yapıların davranışı hakkında değerli bilgiler sağlasa da gelecek araştırmaların kapsamını artırarak, segmental kiriş davranışının çeşitli senaryolarda daha kapsamlı bir anlayışını sağlayabilir veya diğer yapısal konfigürasyonları inceleyebilir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan SE modellerinin kirişlerin yapısal tepkisini belirleme konusunda doğruluğunu göstermesine rağmen, sayısal analizdeki modelleme varsayımları ve basitleştirmelerin bazı belirsizlikler getirebileceği unutulmamalıdır. Gelecek çalışmalar, alternatif modelleme yaklaşımlarını araştırabilir veya bulguları deneysel testlerle doğrulamak için yapılan analizlerin sağlamlığını artırabilir. Çalışma, öncelikle segmental yapıların yapısal performansına odaklanmış olup, inşaatın gerçekleştirilebilirliği, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi diğer önemli yönleri dikkate almamıştır. Gelecek araştırmalar, bu faktörleri analize dahil ederek segmental yapı yöntemlerinin daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlayabilir. Gelecek araştırma yönlendirmeleri açısından, potansiyel bir yol, özellikle deniz ortamlarında deniz üstü tesislerin yaygın olduğu sert deniz ortamlarında segmental yapıların uzun vadeli dayanıklılığını ve direncini incelemeyi içerebilir. Ayrıca, inovatif inşaat tekniklerinin veya malzeme ilerlemelerinin araştırılması, segmental kiriş yapılarının tasarımını ve performansını daha da optimize etme fırsatları sunabilir. Bu sınırlamaları ele alarak ve yeni araştırma yönelimlerini keşfederek, alan segmental yapı yöntemlerini geliştirmeye ve rafine etmeye devam edebilir, sonuç olarak deniz üstü yapıların güvenliğini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırabilir.

Çalışmanın bulgularına dayanarak, segmental ard germeli (AG) beton yapılarının deniz üstü platformlar için ekonomik, güvenilir ve uygulanabilir bir alternatif sunduğu ortaya konulmuştur. Buna benzer yapıların performansını daha da iyileştirmek ve mevcut

sınırlamaları aşmak için gelecekteki araştırmalara yönelik bazı öneriler verilebilir. Gelecekteki çalışmalar çeşitli çevresel koşullar (tuzlu su korozyonu, sıcaklık değişimleri) ve farklı deniz yüklerinin (akıntı yükleri, tsunami yükleri, deniz büyümesinin etkisi, gemi çarpası vd.) altında segmental yapıların davranışı incelenebilir. Bunun yanı sıra segmental yapıların deniz üstü platformların farklı konfigürasyonları (örneğin, çok ayaklı yapılar, yüzer platformlar) üzerindeki performansı araştırılmalıdır.

Sayısal modelleme sürecinde kullanılan varsayımlar ve basitleştirmelerin getirdiği belirsizlikler göz önüne alınarak, yeni alternatif modelleme yaklaşımları geliştirilmesi yönünde çalışmalar yapılabilir ki, bu zaman önerilen modelleme sonuçları doğrulanmalıdır. Malzeme açısından yeni inovatif malzemeler (yüksek performanslı beton, fiber takviyeli beton) ve inşaat tekniklerinin (prefabrikasyon, modüler inşaat) araştırılması, segmental yapıların tasarımını ve performansını optimize etme fırsatları sunabilir.

Segmental yapıların inşaat sürecindeki maliyet etkinliği ve pratik uygulanabilirliği üzerine daha fazla çalışma yapılması segmental yapıların geleneksel monolitik yapılara göre ekonomik avantajlarını ve inşaat sürecinin hızını belirlemeye yardımcı olabilir. Ayrıca, inşaat sırasında karşılaşılan zorluklar ve bu zorlukların üstesinden gelmek için kullanılabilecek yöntemler araştırılabilir. Segmental yapıların uzun vadeli performansı ve bakım gereksinimleri üzerine çalışmalar yapılması yapısal bütünlüğün korunması ve bakım maliyetlerinin minimize edilmesi için önemlidir.

6. KAYNAKLAR

- Ove T. Eide, Leif G. Larsen ve Olav Mo. 1977. Installation of the Brent B Condeep Production Platform. *Journal Of Petroleum Technology*. Pp 231-238
<https://doi.org/10.2118/6221-PA>
- H. Ramstad ve G. Gudbrandsen. 1980. The Analysis Of The Condeep Statfjord B Platform Choice Of Model With Regard to Wanted Accuracy, Time And Cost Involved. *Computers & Structures* Vol. 12. Pp 445-458.
[https://doi.org/10.1016/0045-7949\(80\)90120-0](https://doi.org/10.1016/0045-7949(80)90120-0)
- Adebar, Perry Erwin. 1989, 'Shear design of concrete offshore structures' PhD thesis, University of Toronto
- Adebar, P., & Collins, M. P. 1994. Shear design of concrete offshore structures. *Structural Journal*, 91(3), 324-335.
- Amr Ibrahim I. Helmy. 1998. Behaviour of Offshore Reinforced Concrete Structures under Hydrostatic Pressure. PhD thesis. University of Toronto. Toronto. 271 p.
- Otunyo, A. W. (2011). Design of offshore concrete gravity platforms. *Nigerian Journal of Technology*, 30(1), 34-46.
- Amr I. Helmy, Michael P. Collins, 2016. Predicting the behaviour of storage cells in early Condeep structures. *NRC Research Press*. Vol. 43. Pp 643-656.
<https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0355>
- Faltinsen, O. M., & Timokha, A. N. (2016). Undamped eigenperiods of a sea-based gravity monotower. *Applied Mathematical Modelling*, 40(19-20), 8217-8243.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.003>
- Sadeghi, K., Houseen, Q. A. H., & Alsels, S. A. (2017). Gravity platforms: Design and construction overview. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng*, 7(3), 6-11.
- Sadeghi, K., Al Haj Houseen, Q., & Abo Alsels, S. (2018). General guidance for design and construction of gravity platforms. *Asian journal of natural and applied sciences*, 7(1), 19-27.
- Okpe, S. A., & Edeh, J. E. (2022). Analysis, design and construction of gravity offshore structure; state-of-the-art. *International Journal of Advanced Engineering, Sciences and Applications*, 3(1), 12-17. <https://doi.org/10.47346/ijaesa.v3i1.74>
- ACI - 357R. 1984. Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures (Reapproved 1997)
- ACI - 373R. 1997. Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons
- ACI - 357.3R. 2014. Guide for Design and Construction of Waterfront and Coastal Concrete Marine Structure
- Zwerneman, F.J., & Digre, D. (2010). 22nd Edition of API RP 2A Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design.

- Younan, Adel, and Frank Puskar. "API RP2EQ - Seismic Design Procedures and Criteria for Offshore Structures." Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2010. doi: <https://doi.org/10.4043/21047-MS>
- Sobek, W., Plank, M., Frettlöhr, B., Röhm, J., & Corvez, D. (2013). Conceptual design of an UHPFRC tower structure in segmental construction for offshore wind turbines. In *Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete* (pp. 423-432).
- Loth, E., Selig, M., & Moriarty, P. (2010, June). Morphing segmented wind turbine concept. In *28th AIAA Applied Aerodynamics Conference* (p. 4400).
- Kim, T. H. (2017). Hollow precast segmental prestressed concrete bridge columns with a shear resistant connecting element. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(6), 472-484
- Ou, Y. C., Oktavianus, Y., & Tsai, M. S. (2013). An emulative precast segmental concrete bridge column for seismic regions. *Earthquake Spectra*, 29(4), 1441-1457. <https://doi.org/10.1193/082511EQS205M>
- Bu, Z. Y., Ou, Y. C., Song, J. W., Zhang, N. S., & Lee, G. C. (2016). Cyclic loading test of unbonded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section. *Journal of Bridge Engineering*, 21(2), 04015043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000807](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000807)
- Li, C., Hao, H., & Bi, K. (2017). Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading. *Engineering Structures*, 148, 373-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.062>
- Li, C., Hao, H., & Zhang, X. (2017). CYCLIC TESTS OF PRECAST SEGMENTAL CONCRETE COLUMNS WITH UNBONDED POST-TENSIONED TENDONS 2. In *IAEE. 16th World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo: IAEE (Vol. 1747).
- Li, C., Hao, H., Zhang, X., & Bi, K. (2018). Experimental study of precast segmental columns with unbonded tendons under cyclic loading. *Advances in Structural Engineering*, 21(3), 319-334.
- Zhang, X., & Hao, H. (2019). The response of precast concrete segmental columns subjected to near base impact. *International Journal of Protective Structures*, 10(2), 229-250.
- Do, T. V., Pham, T. M., & Hao, H. (2019). Effects of steel confinement and shear keys on the impact responses of precast concrete segmental columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, 331-349.
- Teng, F., Qiu, W. L., Pan, S. S., & Hu, H. S. (2020). Experimental study on seismic performance of precast segmental concrete columns after seawater freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 260, 120482. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120482>
- Turmo, J., Ramos, G., & Aparicio, A. C. (2006). FEM modelling of unbonded post-tensioned segmental beams with dry joints. *Engineering Structures*, 28(13), 1852-1863. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.03.028>

- Jiang, H., Cao, Q., Liu, A., Wang, T., & Qiu, Y. (2016). Flexural behavior of precast concrete segmental beams with hybrid tendons and dry joints. *Construction and Building Materials*, 110, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.003>
- Saibabu, S., Joshuva, R., Kumar, K., Lakshmikandhan, K., & Sivakumar, P. (2016). Finite element modelling of segmental model beam. *Indian Concr. J*, 90, 1-8.
- Park, J., Choi, J., Jang, Y., Park, S.-K., & Hong, S. (2017). An Experimental and Analytical Study on the Deflection Behavior of Precast Concrete Beams with Joints. *Applied Sciences*, 7(11), 1198. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app7111198>
- Al-Sherrawi, M. H., Allawi, A. A., Al-Bayati, B. H., Al Gharawi, M., & El-Zohairy, A. (2018). Behavior of precast prestressed concrete segmental beams. *Civil Engineering Journal*, 4(3), 488-496. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-0309109>
- Zhu, Y., Zhang, Y., & Shi, J. (2021). Finite element analysis of flexural behavior of precast segmental UHPC beams with prestressed bolted hybrid joints. *Engineering Structures*, 238, 111492. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111492>
- Tran, D. T., Pham, T. M., Hao, H., Do, T. V., & Tran, T. T. (2023). Blast behaviour of precast segmental vs monolithic concrete beams prestressed with unbonded tendons: A numerical investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 173, 104434. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104434>
- Zou, Y., Xiang, T. & Xu, D. Shear behavior and construction method of steel shear keyed joints in precast segmental beams. *Sci Rep* 13, 11166 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37442-0>
- Teachavorasinskun, S., & Chub-uppakarn, T. (2010). Influence of segmental joints on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 490-494. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.003>
- Molins, C., & Arnau, O. (2011). Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test.: Part 1: Test configuration and execution. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(6), 764-777. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.05.002>
- Arnau, O., & Molins, C. (2011). Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(6), 778-788. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.04.005>
- Arnau, O., & Molins, C. (2012). Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering structures*, 44, 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.001>
- Do, N. A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.008>
- Gong, C., Ding, W., Soga, K., & Mosalam, K. M. (2019). Failure mechanism of joint waterproofing in precast segmental tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, 334-352. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.003>

- Salemi, A., Esmaeili, M., & Sereshki, F. (2015). Normal and shear resistance of longitudinal contact surfaces of segmental tunnel linings. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 77, 328-338. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.04.014>
- Liu, X., Zhang, C., Zhang, C., & Yuan, Y. (2017). Ultimate load-carrying capacity of the longitudinal joints in segmental tunnel linings. *Structural Concrete*, 18(5), 693-709. <https://doi.org/10.1002/suco.201600070>
- Liu, X., Zhang, Y., & Bao, Y. (2020). Full-scale experimental investigation on stagger effect of segmental tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 102, 103423. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103423>
- Turmo, J., Ramos, G. and Aparicio, A. C., 2006. Shear strength of match cast dry joints of precast concrete segmental bridges: Proposal for Eurocode 2. *Materiales de Construcción*, 56, 282, pp. 45-52. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i282.26>
- Rombach, G., 2004. Dry joint behavior of hollow box girder segmental bridges. In *Proceedings of the FIP Symposium "Segmental Construction in Concrete"*, 2004, New Delhi. <http://hdl.handle.net/11420/7271>
- Buyukozturk, O., Bakhoun, M. M., & Michael Beattie, S. (1990). Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges. *Journal of Structural Engineering*, 116(12), 3380-3401. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:12\(3380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:12(3380))
- ATEP, 1996. Proyecto y construcción de puentes y estructuras con pretensado ext. H.P.10-96. Colegio de Ing. de Caminos, Madrid.
- AASHTO, 1999. Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials
- Queiroz Junior, F. O., & Horowitz, B. (2016). Shear strength of hollow circular sections. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9, 214-225. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000200004>
- CSA A23.3-04 (2004) Design of Concrete Structures. Standard CAN/CSA A23.3-04, Canadian Standards Association, Mississauga, Ont.
- NBR 6118 (2014) Projeto de Estruturas de Concreto Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, RJ
- Liang, X., & Sritharan, S. (2018). Effects of confinement in circular hollow concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, 144(9), 04018159. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002151](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002151)
- Cassese, P., De Risi, M. T., & Verderame, G. M. (2020). Seismic assessment of existing hollow circular reinforced concrete bridge piers. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(10), 1566-160 <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.14714301>
- Jason, L., Torre-Casanova, A., Davenne, L. et al. Cracking behavior of reinforced concrete beams: experiment and simulations on the numerical influence of the steel-concrete bond. *Int J Fract.* 2013;180:243–260. <https://doi.org/10.1007/s10704-013-9815-6>

- Tao, X., & Du, G. Ultimate stress of unbonded tendons in partially prestressed concrete beams. *PCI Journal*. 1985;30(6):72-91.
- Al-Sherrawi, M. H., Allawi, A. A., Al-Bayati, B. H., Al Gharawi, M., & El-Zohairy, A. Behavior of precast prestressed concrete segmental beams. *Civil Eng. J.* 2018;4(3):488-496. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-0309109>
- Han, R. P. (1996). A simple and accurate added mass model for hydrodynamic fluid—Structure interaction analysis. *Journal of the Franklin Institute*, 333(6), 929-945. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(96\)00043-9](https://doi.org/10.1016/0016-0032(96)00043-9)
- Van Brummelen, E. Harald. "Added mass effects of compressible and incompressible flows in fluid-structure interaction." (2009): 021206.
- Idelsohn, Sergio R., et al. "Fluid–structure interaction problems with strong added-mass effect." *International journal for numerical methods in engineering* 80.10 (2009): 1261-1294.
- Barone, Matthew Franklin, and Jeffrey L. Payne. *Methods for simulation-based analysis of fluid-structure interaction*. No. SAND2005-6573. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2005.
- Sobek, W., Plank, M., Frettlöhr, B., Röhm, J., & Corvez, D. (2013). Conceptual design of an UHPFRC tower structure in segmental construction for offshore wind turbines. In *Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete* (pp. 423-432).
- Yao, P., Fang, H., Zhu, L., Zhu, J., Han, J., Wan, Y., & Zhang, X. (2022). Experimental study on the behavior of precast segmental piers under ship impact loading. *Ocean Engineering*, 253, 111324. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111324>
- Qiu, T., Chen, X., Su, D., Hong, C., Chen, K., Shen, J., ... & Xu, Z. (2023). Full-scale experiments and modeling of precast two-wall-in-one diaphragm wall components for oceanic artificial cities. *Ocean Engineering*, 288, 116074. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116074>
- Van der Aa, P., & Manie, J. (2017, August). Simple to advanced finite element shape modelling with DIANA. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proceedings of the 2017 fib Symposium, held in Maastricht, The Netherlands, June 12-14, 2017* (pp. 1183-1190). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_137
- Saviotti, A., Olmati, P., & Bontempi, F. (2012, July). Finite element analysis of innovative solutions of precast concrete beam-column ductile connections. In *Proceedings of the 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2012*.
- Ghebreselasie, H. M., & Situ, Y. (2015). Structural analysis of thin concrete shells (Master's thesis, NTNU).
- Žvanut, P. (2022). 3D finite element analysis of a concrete dam behavior under changing hydrostatic load: A case study. *Materials*, 15(3), 921. <https://doi.org/10.3390/ma15030921>

- Luna Castilla, P. E. (2023). Numerical modeling of the cyclic response of reinforced concrete walls using continuum finite element models (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). <http://hdl.handle.net/2117/385096>
- Haddara, M. R., and C. Guedes Soares. "Wind loads on marine structures." *Marine Structures* 12.3 (1999): 199-209. [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(99\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(99)00023-4)
- Haritos, Nick. "Introduction to the analysis and design of offshore structures—an overview." *Electronic Journal of Structural Engineering* 1 (2007): 55-65. <https://doi.org/10.56748/ejse.651>
- Meteoblue, 2023.Dataset.
https://www.meteoblue.com/en/weather/week/draugen_norway_6296732
- Wolfram, Julian. (1999): "On alternative approaches to linearization and Morison's equation for wave forces." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 455.1988 2957-2974. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0434>
- Sarpkaya, Turgut. 1981.Morison's equation and the wave forces on offshore structures. Carmel, CA, USA: Naval Civil Engineering Laboratory,
- Rønnquist, A., S. Remseth, and C. Lindholm. 2012."Earthquake engineering design practice in Norway: Implementation of Eurocode 8." 15th World Conference on Earthquake engineering 15WCEE, Lisbon.
- DNV-OS-C502, 2010-October, Offshore Standard, OFFSHORE CONCRETE STRUCTURES,
- IS (Second Reprint SEPTEMBER 2008) "Criteria for earthquake resistant design of structures." Bureau of Indian Standards, PART 4 INDUSTRIAL STRUCTURES INCLUDING STACK-LIKE STRUCTURES ICS 91.120.25

ÖZGEÇMİŞ

Seymur BASHIRZADE

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2018-2024	Akdeniz Üniversitesi <i>Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Antalya</i>
Doktora (Değişim) 01.03.2022 – 02.10.2022	Ştuttgart Üniversitesi <i>İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Ştuttgart</i>
Yüksek Lisans 2016-2018	Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi <i>İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bakü</i>
Lisans 2012-2016	Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi <i>İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bakü</i>