

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELİPTİK DELİKLİ İNCE CİDARLI KOLONLARIN
BURKULMA DAVRANIŞININ NÜMERİK VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tuğrul BÖLÜKBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Osman Hamdi METE

Ocak 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELİPTİK DELİKLİ İNCE CİDARLI KOLONLARIN
BURKULMA DAVRANIŞININ NÜMERİK VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tuğrul BÖLÜKBAŞI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 06 / 01 / 2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Tuğrul BÖLÜKBAŞI

06.01.2022

TEŞEKKÜR

Doktora tez sürecindeki kıymetli desteklerinden ötürü sayın danışman hocam Doç. Dr. Osman Hamdi METE'ye teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez izleme komitesinde bulunan değerli hocalarım, Doç. Dr. Sedat İRİÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Zeki ÖZYURT'a, tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları desteklerinden ve ilgilerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Süreç içerisinde her türlü desteğini esirgemeyen değerli eşime ve neşe kaynağım olan biricik oğluma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Literatür İncelemesi	1
BÖLÜM 2.	
KOLON YAPILARIN EKSENEL YÜL ALTINDAKİ DAVRANIŞI	9
2.1. Kolonların Genel Deformasyon Davranışları	9
2.1.1. Lokal burkulma	9
2.1.2. Global burkulma	10
2.1.3. Maksimum ezilme kuvveti	11
2.1.4. Ortalama ezilme kuvveti	11
2.2. Referans Burkulma Yüğü	12
2.3. Enerji Sönümleme Kapasitesi	12
2.4. Dairesel Kolonların Kullanım Alanları	13
2.5. Deniz Üzeri Yapıların Tanımı	14
2.5.1. İskele taşıyıcı ayakları	14
2.5.2. Hasarlı iskele taşıyıcı ayakları	15

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Deneyde Kullanılan Malzeme Özellikleri	17
3.1.1. Test numunesinin malzeme özellikleri	17
3.1.2. Çekme testi	17
3.2. Eş Modelin Kurulması	20
3.3. Eksenel Basma Deney Düzenegi	22
3.4. Kolonun Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	23
3.5. Güçlendirme	26
3.5.1. Kompozit malzemeler	26
3.5.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	26
3.5.3. Elyaf takviyeli kompozitlerin sınıflandırılması	27
3.5.4. Çalışmada kullanılan elyaf çeşitleri	27
3.5.5. Epoksi reçine ristemleri	29
3.5.6. Güçlendirme prosedürü	30
3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması	30
3.6.1. Elyaf kumaşlar ile epoksi harcın hazırlanması	32
3.6.2. Kolonun elyaf ile sarılması	32
3.6.3. Güçlendirilmiş Kolon	33

BÖLÜM 4.

PARAMETRİK ÇALIŞMA	35
4.1. Taguchi Metodu	35
4.2. ANOVA Analizi	37

BÖLÜM 5.

DENEYSEL & NÜMERİK SONUÇLAR VE TARTIŞMA	38
5.1. Deneysel Sonuçlar	38
5.2. Sonlu Elemanlar Hesaplamaları ve Doğrulanması	40
5.3. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	41
5.4. Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarının Kıyaslanması	44
5.5. Parametrik Çalışma Sonuçları	50

5.5.1. Anova analizi sonuçları	52
5.5.2. Güçlendirme deney sonuçları	53
BÖLÜM 6.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	
6.1. Genel Sonuçlar	61
6.2. Öneriler	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	70



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AASHTO	: Amerikan devlet karayolu ve ulaştırma yetkilileri birliği
AISC	: Amerikan çelik yapı enstitüsü
AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü
ASTM	: Uluslararası Amerikan test ve materyalleri topluluğu
CAM T	: Cam elyaf kumaş ile tamamen sarılı kolon
CAM K	: Cam elyaf kumaş ile kısmi sarılı kolon
CHS	: Dairesel boş kesitli kolon
CNC	: Sayısal kontrollü bilgisayar
D	: Kolon çapı
δ	: Eksenel yöndeki ezme miktarı
E	: Elastiklik modülü
e	: Deliğin merkezi
e/L	: Deliğin yeri
FE	: Sonlu Elemanlar
ε	: Gerinim
ε_f (%)	: Toplam uzama
DKD	: Eliptik delik konumu değişken
DYD	: Eliptik delik yüksekliği değişken
DGD	: Eliptik delik genişliği değişken
F	: Kuvvet
F_{deney}	: Deneysel kuvvet
F_{fem}	: Nümerik analiz kuvveti
F_{ref}	: Referans burkulma yükü
GFRP	: Cam elyaf takviyeli polimer
h	: Eliptik delik yüksekliği
J	: Toplam enerji absorpsiyonu

K	: Mukavemet katsayısı
KARBON T	: Karbon elyaf kumaş ile tamamen sarılı kolon
KARBON K	: Karbon elyaf kumaş ile kısmi sarılı kolon
LDSS	: Yalın dubleks paslanmaz çelik
L	: Kolonun boyu
n	: Pekleşme Üsteli
P	: Eksenel sıkıştırma kuvveti
$\sigma_{0.2}$	: Yüzde 0,2 akma gerilmesi
σ_y	: Akma gerilmesi
σ_u	: Çekme gerilmesi
t	: Cidar kalınlığı
ν	: Poisson oranı
w	: Eliptik delik genişliği

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Lokal burkulmaya uğramış kolon [43]	10
Şekil 2.2. Global burkulma meydana gelmiş kolon [44] ve denge denklemi	10
Şekil 2.3. Tipik kuvvet-yer değiştirme grafiği [45]	12
Şekil 2.4. Eksenel basma deneyinin başlangıcı ve bitişini gösteren sonlu eleman modeli	13
Şekil 2.5. Offshore platform yapısının sıçrama ve su altı zonları [46]	14
Şekil 2.6. Kolonlarda meydana gelen eliptik şekilli delik oluşumu	15
Şekil 3.1. Kolonun kesilerek çekme numunesinin hazırlanması	18
Şekil 3.2. Çekme testi ekipmanları (Instron) ve numunenin çekme testi sonrası görünümü	18
Şekil 3.3. Numunenin gerilme-gerinim diyagramı	19
Şekil 3.4. Hasarlı iskele taşıyıcı ayağı ve eş modelin oluşturulması	21
Şekil 3.5. Tek eksenli basma testi düzeneği (a) Plakalar arasında numunenin başlangıç kurulumu, (b) Gerekli sınır koşullarını sağlamak için iki aparat arasında numunenin sıkıştırılmasıyla son kurulum	23
Şekil 3.6. (a) Rijit plakalar arası basma modeli, (b) Numunenin sonlu elemanlara ayrılması	24
Şekil 3.7. Delikli kolon için boyut duyarlılığı ile CPU hesaplama süresinin grafiği (DGD-4)	25
Şekil 3.8. (a) Dikdörtgen kabuk eleman için eleman formülasyonu, (b) Sınır koşulları	26
Şekil 3.9. Tek yönlü 330 gr ağırlıklı cam elyaf kumaş	28
Şekil 3.10. Tek yönlü 300 gr ağırlıklı karbon elyaf kumaş	29
Şekil 3.11. Reçine ve sertleştirici	29
Şekil 3.12. Rulo halinde karbon ve cam elyaf	30

Şekil 3.13. (a) Deney numunesinin geometric özellikleri, (b) Selülozik tiner kullanılarak yapılan yüzey hazırlığı	31
Şekil 3.14. Elyafın kesilmesi, epoksi harcın belirli oranlarda karıştırılması	32
Şekil 3.15. Harcın dökülmesi, harcın kumaşa yedirilmesi ve kolona sarılması	33
Şekil 3.16. Numunelerin kurumaya bırakılması	33
Şekil 3.17. Elyaf ile sarılarak hazır hale getirilen kolonlar	34
Şekil 5.1. Yük-eksenel kısalma grafiği ve deformasyon şekilleri (a) Sağlam-1 Kolon, (b) DGD-4	39
Şekil 5.2. (a) Sağlam numune için nümerik deformasyon, (b) Deneysel deformasyon	41
Şekil 5.3. Sağlam-1 için yük-eksenel kısalma davranışı ve kıyaslanması	41
Şekil 5.4. Sağlam-1 Kolon için nümerik simülasyon diyagramları ile detayları, (b) DGD-4	42
Şekil 5.5. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen toplam enerji absorpsiyon değerleri	44
Şekil 5.6. DGD için deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deformasyon şekilleri	45
Şekil 5.7. DKD için deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deformasyon şekilleri	45
Şekil 5.8. DYD için deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deformasyon şekilleri	46
Şekil 5.9. DGD-2-3-4 için yük-eksenel kısalma davranışı ve kıyaslanması	47
Şekil 5.10. DKD-5-6-7 için yük-eksenel kısalma davranışı ve kıyaslanması	48
Şekil 5.11. DYD-8-9-10 için yük-eksenel kısalma davranışı ve kıyaslanması	48
Şekil 5.12. Sayısal analize dayalı olarak elde edilen delikli kolonların nihai yükünün sağlam kolonla karşılaştırılması	49
Şekil 5.13. S/N oranları için ana etki grafiği	51
Şekil 5.14. Hasarsız numunelerin basma sonrası burkulma davranışı	54
Şekil 5.15. Hasarlı numunelerin basma sonrası şekil değişimi	54
Şekil 5.16. Deney için hazır hale getirilen güçlendirilmiş kolonlar	55
Şekil 5.17. Tam olarak sarılan kolon ile kısmi olarak sarılan kolonların deformasyon şekilleri	55

Şekil 5.18. Tam olarak sarılan kolon ile kısmi olarak sarılan kolonların deformasyon şekilleri	56
Şekil 5.19. Hasarlı-2 & Hasarsız-1 sarımsız kolonların yük - eksenel kısalma diyagramları.....	56
Şekil 5.20. Karbon T-3 & Karbon K-4 sarımlı kolanların yük-eksenel kısalma diyagramları	57
Şekil 5.21. Cam T-5 & Cam K-6 sarımlı kolanların yük-eksenel kısalma diyagramları	57
Şekil 5.22. Kelepçe ile sıkılan kolanların yük-eksenel kısalma diyagramı	58
Şekil 5.23. Hasarlı-2 kolonu ile sağlam kolunun nihai yük değerlerinin kıyaslanması	58
Şekil 5.24. Güçlendirilen kolonların Hasarlı-2 & Hasarsız-1 kolonlara göre kıyaslanması	59

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Numunenin mekanik özellikleri	19
Tablo 3.2. Kusursuz numunenin ve delik oluşturulmuş numunelerin geometrik karakteristikleri	21
Tablo 3.3. Hazırlanan güçlendirilmiş kolon numunelerinin karakteristik özellikleri	31
Tablo 4.1. Ortogonal dizi matrisinde kullanılan kontrol faktörleri ile seviye aralıkları.....	36
Tablo 4.2. L9 ortogonal dizin	36
Tablo 5.1. Deneysel çalışmalardan elde edilen DGD için nihai yük (N) değeri sonuçları.....	40
Tablo 5.2. Deneysel çalışmalardan elde edilen DKD için nihai yük (N) değeri sonuçları.....	40
Tablo 5.3. Deneysel çalışmalardan elde edilen DYD için nihai yük (N) değeri sonuçları.....	40
Tablo 5.4. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen DGD için nihai yük (N) değerleri	42
Tablo 5.5. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen DKD için nihai yük (N) değerleri	42
Tablo 5.6. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen DYD için nihai yük (N) değerleri	43
Tablo 5.7. Nümerik nihai yük değerlerinin teorik yaklaşımla elde edilen nihai yük değerlerinin karşılaştırılması	43
Tablo 5.8. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen nihai yüklerinin karşılaştırılması	50
Tablo 5.9. Analiz koşulları ve burkulma yükü değerleri	51
Tablo 5.10. S/N oranı kullanılarak elde edilen optimum koşullar	51

Tablo 5.11. Taguchi L9 deney tasarımına göre ANOVA sonuçları	52
Tablo 5.12. Burkulma yükü için 1. Dereceden regresyon denklem katsayıları	52
Tablo 5.13. Nihai yük değerini saptamak için Deneysel, 1. Dereceden regresyon ve Taguchi yöntemi tahmin değerleri.....	53
Tablo 5.14. Deneysel çalışmalardan elde edilen nihai yük (N) değerleri	59



ÖZET

Anahtar kelimeler: Eksenel yükleme, dairesel kesitli kolon, eliptik delik, sonlu elemanlar programı (Dynaform), Taguchi metodu, kolonların güçlendirilmesi, deneysel çalışma

Bakım ve kontrol çalışmaları mühendislik yapılarında planlanan uzun hizmet sürelerinin devamı açısından oldukça önemlidir. Çelik elemanlarda meydana gelen hasarlar, örnek olarak yapıdaki deliklerin büyümesi, taşıma kapasitesinin azalmasına ve hizmet süresinin kısılmasına sebep olur. Yapı üzerindeki deliğin ölçütü çelik yapılar için belirsiz bir durumdur. Bu nedenlerle hasara uğrayan bir yapının taşıma kapasitesinin önceden tahmin edilip analiz edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması bakımdan oldukça önemlidir. Bu makalede eliptik delikli çelik kolonların taşıma kapasitesinin hesaplanmasında bir dizi sistematik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Basma deneyine tabi tutulan kolonların deformasyon şekilleri ile yük-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Buna ilaveten kolonun eksenel yük altında davranışı sonlu elemanlar modeli kurularak analiz edilmiştir. Sayısal simülasyonlar Dynaform sonlu elemanlar paketi kullanılarak yapılmıştır. Kolon üzerindeki eliptik deliğin genişlik, yükseklik ve yeri değiştirilerek taşıma kapasitesine etkisi nümerik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Hazırlanan numuneler eksenel yükleme testine tabii tutularak nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Nümerik sonuçlardan elden edilen veriler kullanılarak kolon üzerindeki tek bir eliptik deliğin genişlik, yükseklik ve yerinin kolonun taşıma kapasitesine etkisi ortaya konmuştur. Karbon ve cam elyaf tekniği kullanılarak hasarlı kolonların güçlendirilmesi ile kolonların taşıma kapasitesi artırılmıştır. Taguchi metodu kullanılarak kolonun taşıma kapasitesine etki eden eliptik delik geometrik karakteristiklerinin etki oranları hesaplanmıştır.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BUCKLING BEHAVIOR OF ELLIPTICAL PERFORATED THIN WALLED COLUMNS

SUMMARY

Keywords: Axial compression, circular hollow section (CHS), elliptic hole, finite element program (Dynaform), Taguchi method, strengthening of columns, experimental study

Maintenance and control works are very important for the continuation of the planned long service periods in engineering structures. Damages in steel elements, for example the growth of the holes in the structure, cause a decrease in the bearing capacity and shorten the service time. The size of the hole on the structure is uncertain for steel structures. For these reasons, it is very important to predict and analyze the bearing capacity of a damaged structure and to take the necessary precautions. In this article, a series of systematic experimental studies have been carried out in calculating the bearing capacity of elliptical perforated steel columns. The deformation shapes of the columns subjected to the compression test and the load-displacement graphs were obtained. In addition, the behavior of the column under axial load is analyzed by finite element modelling. Numerical simulations were performed using the Dynaform finite element package. The effect on the bearing capacity by changing the width, height and location of the elliptical hole on the column was investigated numerically and experimentally. Prepared samples were subjected to compression test and compared with numerical results. Using the data obtained from the numerical simulations, the effect of the width, height and location of a single elliptical hole on the column on the bearing capacity of the column was revealed. The bearing capacity of the columns was increased by strengthening the damaged columns using carbon and glass fiber technique. Using the Taguchi method, the effect ratios of the elliptical hole geometric characteristics affecting the bearing capacity of the column were calculated.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Literatür İncelemesi

Dairesel çelik kolonlar üzerinde bulunan açıklıkların etkisinin irdelenmesinde literatürde deneysel, nümerik ve tasarım tahmin kodları çalışmaları ile birlikte hasarın meydana getirdiği yük taşıma kapasitesinin artırılması maksadıyla birçok güçlendirme teknikleri uygulanmıştır.

İlk çalışmalarda dairesel deliklerin silindirik yapılar üzerinde burkulma dayanımına etkisi genişlik ve yükseklik parametreleri bakımından araştırılmıştır. Toda dairesel deliklerin eksenel sıkıştırma altında dairesel silindirlerin burkulması üzerindeki etkilerini netleştirmek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Bir delik yeterince küçükse, silindirin burkulma dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı bununla birlikte daha büyük deliklerin burkulma yükünde önemli bir azalma ile meydana getirdiği sonucu ortaya koymuştur. İlerleyen çalışmalarda daha detaylı araştırmalar yapılmıştır [1]. Jullien ve Limam deneysel ve nümerik yöntemler kullanılarak delikli silindirik kabukların stabilite problemi üzerinde çalışarak deliğin sayısı, çapı, yüksekliği, çevresel boyutu, şekli ve lokasyonu olacak şekilde parametrik çalışma yapmışlardır. Analizde kritik yükün delik açısına veya deliğin çevresel boyutuna duyarlı olduğunu gösterilmiştir [2]. Umbarkar ve ark. dairesel tek deliklerin geometrik etkilerinin eksenel yüklü LDSS kısa kolonların kritik burkulma kuvvetine etkilerinin Delik çapı, eksantrisite (deliğin merkezi ile kolon kenarı mesafesi) ve kolon cidar kalınlığının kritik burkulma yüküne etkisini incelemişlerdir [3].

Delik sayısının artırılmasının ve deliğin geometrik özelliklerinin değişiminin etkisinin incelendiği çalışmalarda sıklıkla yapılmıştır. Rouzegar ve Elahi eksenel

yüklemeye sırasında dairesel metal tüplerde bulunan deliklerin deformasyon modları ve yük-uzama diyagramları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tüpün orta yüksekliğinde iki, üç ve dört delikli tüpler ve sağlam tüpler hazırlanarak iki rijit plaka arasında yarı-statik durumda eksenel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçlar abaqus sonlu elemanlar paketi ile elde edilen simülasyon sonuçları kıyaslanmıştır [4]. Shariati ve ark. silindirik panellerin burkulma yükünü belirlemek ve burkulma sonrası davranışını araştırmak için eksenel sıkıştırma yükü altında sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sayısal analizde uzunluk, çevresel açı, kalınlık ve farklı sınır koşullarının etkilerini incelemek için Abaqus FE paketini kullanmışlardır. Deneysel testlerde ise servo hidrolik makina kullanılarak panellere eksenel yükleme uygulamışlardır [5].

Delik sayısı ve geometrisi dışında silindirik çeliklerin çap ve boyunun da parametre olarak eklendiği araştırmalarda yapılmıştır. Shariati ve Rokhi ince cidarlı silindirik çelikler üzerindeki çeşitli çap ve uzunluktaki eliptik deliklerin pozisyonunun, uzunluk-çap (L/D) ve çap-cidar kalınlığı (D/t) oranlarının burkulma ve burkulma sonrası davranışına etkisini araştırmışlardır. Araştırmaları neticesinde eliptik delikli kolonlardaki burkulma yükünün hesaplanmasında düzgün nitelikli kolona göre formül elde etmişlerdir [6]. Qiao ve ark. çatlak kusurları olan dairesel içi boş kesitli (CHS) dairesel kolonlarının eksenel basınç davranışını değerlendirmek için deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Numunelerin kırılma modu, yük taşıma kapasitesi, gerinim yoğunluğu ve toplam çökme miktarını incelemişlerdir [7].

Delğin etkisinin yanı sıra kolonlarının boylarının da ayrı bir parametre olarak çalışıldığı çalışmalarda bulunmaktadır. Moen ve ark. soğuk şekillendirilmiş delikli çelik kolonların elastik burkulma yükü ile delik arasındaki ilişkiyi inceleyip değerlendirmişlerdir. Kısa ve orta uzunluklu soğuk şekillendirilmiş oluk delikli çelik yapısal elemanlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için deneysel çalışmışlardır [8]. Ifayefunmi eksenel yükleme altında kısa yumuşak çelik silindirik kabukların burkulmasını teorik ve deneysel sonuçları mukayese ederek araştırmıştır [9].

Tasarım tahmin kodlarının kullanıldığı çalışmalarda literatürde sıkça rastlanılmaktadır. Kulatunga ve ark. soğuk şekillendirilmiş kolon elemanlarının burkulma davranışı üzerine çeşitli şekillerde deliklerin etkisine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Burkulma yük kapasitesini belirlemek için ANSYS sonlu elemanlar analizi, deneysel araştırma ve AISI Spesifikasyonu, İngiliz Standartları (BS) ve AB Standartları kullanılarak tasarım kodu tahminleri kullanmışlardır. Düz ve sabit uçlu sınır koşulları altında kolonların burkulma davranışının deneysel bir incelemesi yapılarak elde edilen bulgular, sonlu eleman sonuçlarını doğrulamak ve tasarım kodu tahminleriyle karşılaştırmak için kullanmışlardır [10]. Lee ve ark. nonlinear sonlu elemanlar analizi kullanarak nihai dayanım üzerindeki kesiklerin etkisini incelemek ve eksenel yük ile eğilme altında dayanımlarını tahmin etmek için basit bir formül önermişlerdir. Sonlu eleman modelleme teknikleri geliştirerek nihai dayanım davranışını tasarım değişkenleriyle hesaplamışlardır [11]. Feng ve ark. dairesel boşluklu alüminyum alaşımlı CHS kolonların mukavemet ve davranışına narinlik oranı, delik boyut oranı ve delik sayısının etkisini test programı tanımlayarak değerlendirmişlerdir. Dairesel açıklıklı alüminyum alaşımlı kolonların deneysel sonuçlardan elde edilen en yüksek dayanım ile delikli çelik yapı elemanları için kullanılan mevcut tasarım kuralları kullanılarak elde edilen tasarım kuvvetleriyle de karşılaştırılmıştır [12].

Dairesel süreksizliklerin yanı sıra farklı geometrik boşluklar da kıyaslama amaçlı kullanılmıştır. Sangeetha ve ark. bu çalışmada küçük kalınlıklarda kullanılan delikli soğuk şekillendirilmiş çelik kolon ve kirişlerin burkulma ve deformasyon sonucu ortaya çıkan hasarları incelemişlerdir. Kirişler üzerinde oluşturdukları dairesel ve dikdörtgen şekilli açıklıkların eğilme yükü altında davranışını incelemişlerdir [13]. Mon ve ark. eksenel sıkıştırma yükü altında çalışan çeşitli geometrik şekillere ve bağlantılara sahip soğuk şekillendirilmiş çelik kolonlar üzerine yapılan son araştırmaları gözden geçirerek bir inşaa kolonundaki çeşitli burkulma modlarını özetlemişlerdir. Çalışmanın sonunda, kolonların hasar şekilleri üzerinden detaylı bir şekilde karşılaştırmalar yapıp önerilerde bulunmuşlardır [14].

Sonlu elemanlar analizi modelle tekniği de bu alanda sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Yao ve ark. bu çalışmada ince plaka üzerinde bulunan dairesel deliklerin burkulma performansına etkisini Abaqus sonlu sonlu elemanlar paket programını kullanarak analiz etmişlerdir. Deliklerin bulunduğu yere ve deliğin boyutuna bağlı olarak burkulma stabilite faktörünü hesaplamışlardır [15]. Ifayefunmi daha önce yapılan deneylerde silindirlerin eksenel olarak sıkıştırılmasında deneysel yük değerinin teorik yük değerinden %30 civarında daha az bulunduğunu fakat yapmış olduğu uygun deney prosedürleri ile teorik ve deneysel sonuçları daha iyi mukayese edebilmiştir. Mukayese için çap-et kalınlığı ve narinlik oranı gibi faktörleri seçmiştir. Yazar çalışmada ilk olarak malzeme bilgilerinin tam olarak kullanılmasını ve ikinci olarak deney sırasında sınır koşulları düzenlemesinin basitleştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır [16]. Singh ve ark. bu araştırmalarında delikli soğuk şekillendirilmiş ve sıcak haddelenmiş çelik kolonun burkulma kapasitesini ölçmek için sistematik bir sonlu eleman (FE) tabanlı parametrik çalışma sunmuşlardır. Analize dayalı olarak, beklendiği gibi, delik kolon orta yüksekliğine yerleştirildiğinde kolonun taşıma kapasitesindeki azalmanın maksimum olduğu bulmuşlardır [17]. Xiang ve ark. kenar takviyeli soğuk şekillendirilmiş çelik U profillerin eksenel davranışı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Sayısal sonuçlardan delik boyutunun arttırılmasının, sütunun nihai mukavemetinde, delik konumunu değiştirmekten daha büyük bir azalmaya yol açtığını bulmuşlardır. Ancak deliğin konumu, kolonun deforme olmuş şeklini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca parametrik analizden elde edilen sonuçlarda mühendislik uygulamaları için dairesel deliklerin aralıklarının deliğin nominal çapının üç ila altı katı arasında olması gerektiğini önermişlerdir [18]. Fereidoon ve ark. eğik yükleme altındaki eliptik delikli silindirlerin davranışını incelemişlerdir. Eliptik deliğin açısı, delik boyutu, delik konumu, delik boyutu oranı gibi parametreleri incelemişlerdir. Delik yüksekliğinin sabit kaldığı durumlarda kesik genişliğinin artmasının burkulma yükünü aşırı derecede azalttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, deliğin silindirin orta yüksekliğinden kenarlara doğru değişen konumu burkulma yükünü artırdığını bulmuşlardır [19].

İnce cidarlı elemanların burkulma dayanımı ile deformasyon davranışı dijital görüntü korelasyon metodu ile ultrasonik ölçümlerde kullanılmıştır. Zhao ve ark. geometrik kusurların ince cidarlı silindirik kabukların burkulma davranışına etkisini araştırmışlardır. Deneysel araştırmada üç boyutlu dijital görüntü korelasyonu metodunu kullanmışlardır. Nümerik simülasyon sonuçları ince cidarlı elemanların burkulma dayanımında delik yarıçapının önemli bir parametre olduğunu göstermiştir [20]. Vaz ve ark. eksenel sıkıştırmaya maruz kalan dairesel delikli hasara sahip boru yapılarının nihai dayanımını elde etmek için deneysel ve sayısal sonlu elemanlar modeli üzerine çalışmışlardır. Deney numunelerinin dış duvarından ayrıntılı üç boyutlu lazer tarama ve çeşitli kesitlerde ultrasonik kalınlık ölçümlerinden elden edilen verilere bağlı olarak mesh yapısı elde edilerek shell elemanlar kullanılmıştır [21].

Son zamanlarda Taguchi metodu uygulanarak araştırılan konularda faktörlerin etkisi incelenmiştir. Basmacı ve ark. ASTM B574 malzemesinin tornalamasında radius, kesme ve ilerleme hızları, yanalma açısı ve kesme derinliği gibi parametrelerinin sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir. Varyans analizi ile kesme özelliklerini etkileyen faktörler tespit edilirken parametrelerin optimasyonu için Taguchi ortogonal deney tasarımından faydalanmışlardır [22]. Akkuş ve Yaka AISI 1040 çeliğini CNC torna tezgahlarında işleyerek yüzey pürüzlülüğü değerlerine etki eden ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği parametrelerini L_{16} ortogonal dizisine göre araştırmışlardır. Taguchi tahmin sonuçlarında belirlenen parametrelere göre tekrar deney yapıldığında Taguchi metodunun yaklaşık %94 oranında doğrulukla çalıştığını saptamışlardır [23]. Yılmaz ve Keskin bilgisayar üzerinden yapılan okumayı etkileyen üç faktörden ışık şiddeti, müzik seviyesi ile punto büyüklüğü gibi faktörleri ele almışlardır. Işık seviyesinin hafif, punto büyüklüğünün en fazla ve ışık seviyesinin hafif olduğu ortamda okuma çalışması için en ideal olduğunu tespit etmişlerdir [24]. Erdem ve ark. Taguchi metodunu uygulayarak plastik enjeksiyon parçalarında meydana gelen çarpılmayı en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Yapılan çalışmalarda çarpılma miktarını en çok etkileyen parametrenin ürün tasarımı olduğunu bularak çarpılmaya olan etkisini yüzdesel olarak hesaplamışlardır [25].

Enerji absorbe kapasitesi hesabının yapıldığı çalışmalarda literatürde bulunmaktadır. Xu ve ark. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile sıkıştırılmış beton dolgulu paslanmaz çelik boru (CFRP-CFSST) kolonunun eksenel sıkıştırma davranışını incelemek için, önceki teste dayalı bir sayısal simülasyon çalışması yapılmıştır. Sonlu eleman modelini geliştirip modelin doğruluğu, tipik hasar modlarının test sonuçları ve numunelerin yük-sıkıştırma eğrileri ile doğrulamışlardır. [26]. Sezan cam elyaf ile güçlendirilmiş malzemelerde sarım açısı ve sayısının malzemelerde yük taşıma ve enerji absorbe kapasitesinde oldukça etkili olduğunu bulmuştur [27]. Rouzegar ve ark. çalışmasında, dairesel deliklerin sayısının ve çapının metal ve kompozit metal boruların eksenel yük altında deformasyon ve davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Delik sayısının ve çapının, nihai yük, absorbe edilen spesifik enerji ve ezilme kuvveti verimliliği gibi emilen enerjinin bazı temel parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır [28].

Çevresel faktörlerin etkisiyle çelik yapılarda korozyon oluşumu değerlendiren birçok çalışma yapılmıştır. Oszvald tez çalışmasında elektrik direklerindeki köşebentlerin korozyon sonucu burkulma davranışı ile burkulma dayanımı üzerine nümerik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Farklı korozyon tipleri için eşdeğer korozyon test modelleri geliştirerek korozyona uğramış köşebentlerin burkulma dayanımını tanımlamak için uygulanabilir yöntem geliştirmiştir [29]. Nazari ve ark. eksenel yük altında çalışan lokal korozyonlu tübüler elemanların davranışını araştırmak için nonlinear sonlu elemanlar analizi kullanmışlardır. Maksimum dayanım düşüşünün korozyonun tüpün orta noktasında bulunması halinde meydana geldiğini göstermişlerdir [30]. Karagah ve ark. eksenel yük altında çalışan H şekilli çelik köprü direklerinin, korozyon oluşumunun taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Korozyonları simüle etmek için kolonlar orta noktasından işlenmiştir. Deneysel sonuçlar tasarım kodları tarafından öngörülen eksenel kapasiteler mukayese edilmiştir [31]. Wang ve ark. lokal korozyonun dairesel çelik boruların mekanik özellikleri ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak için, farklı korozyon yerleri ve korozyon derecelerinin etkileri göz önünde bulundurarak korozyon testleri yapmışlardır. Korozyon derinliği, korozyon yeri, korozyon genişliği ve yüksekliği gibi dört parametrenin dairesel çelik boruların üzerindeki etki

katsayısını hesaplayarak göstermişlerdir [32]. Wang ve ark. orta derecede narinlik oranına sahip yerel olarak oyuklu boru şeklindeki çelik elemanlar üzerinde sıkıştırma testleri yapılmıştır. Korozyon yamasının şekil oranı, yerel olarak oyuklu elemanların nihai mukavemetini etkisini amprik formüllerle göstermişlerdir [33]. Yousefi ve ark. eksenel sıkıştırma yükü altında çalışan korozyona uğramış ince çelik kolonlar üzerinde çalışmışlardır. Eksenel basma yükü altında bulunan karbon fiber sargılarla güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumdaki çelik kolonların burkulma davranışlarını korozyon parametresi dikkate alınarak deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan güçlendirme tekniği ile hasarlı bölgelerdeki gerilim yoğunluğu azalırken korozyondan kaynaklı mukavemet kaybı tolere etmişlerdir [34]. Wei ve ark. çelik elemanlarda, kaplama malzemesinin yetersiz dayanıklılığından kaynaklanan boya soyulması, yapıların yük taşıma kapasitesini ve güvenlik performansını düşürebilen çarpmalar nedeniyle korozyon etkileri üzerinde çalışmışlardır [35].

Son zamanlarda fiber sargı tekniği ile hasarlı kolonlarda meydana gelen taşıma yükü kaybını tolere eden çalışmalar yapılmıştır. Ghaemdoust ve ark. bası yükleri altında çalışan, içi boş kare kesitli yapı elemanları üzerinde bulunan hasarları karbon fiberle güçlendirilmiş polimer sargılarla sararak yük taşıma kapasitesinde artış ve yerel burkulmanın geciktiğini gözlemlemişlerdir. Karbon fiber kumaş kullanılarak güçlendirilen numunelerin nihai yük taşıma kapasitesinde %54,49'a kadar kapasite artışı sağlayabilmişlerdir [36]. Shaat ve Fam içi boş kare şekilli uzun ve kısa kolonlar üzerinde karbon fiber takviyeli polimer sargının etkisi üzerinde çalışmışlardır. Kısa kolonlarda dışa doğru lokal burkulmalarda karbon fiber sargıların etkili olduğunu bulmuşlardır. Kısa kolonlarda %18 ve uzun kolonlarda ise %13-23 arasında maksimum güç kazancı sağladığını ortaya koymuşlardır [37]. Hou ve ark. filaman sarım tekniği kullanılarak farklı kompozit sarma katmanlarına sahip üç grupta oluşturulan 304 paslanmaz çelik / GFRP (Cam elyaf takviyeli polimer) hibrit tüplerin eksenel sıkıştırma performansı ve kırılma modlarını bulmak için basma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda sonlu elemanlar modeli kurularak analiz sonuçları deney sonuçları ile kıyaslanarak eksenel sıkıştırma performansına etki eden faktörler tartışılmıştır [38]. Nabati ve Ghazijahani kesikli dairesel çelik boruların Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Polimer ile güçlendirilmesinin eksenel yük taşıma

kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır [39]. Thirumalini ve ark. dairesel çelik boru şeklindeki kısa kolonları güçlendirmek için harici olarak bağlanmış cam elyaf takviyeli polimer levhaların deneysel, nümerik ve analitik modellemesini yapmışlardır. Deneysel sonuç, çelik borunun GFRP levhalarla güçlendirildiğini ve eksenel kesit kapasitesini arttırdığını göstermişlerdir. Harici olarak bağlanmış GFRP kolonunun yük taşıma kapasitesi, sınırlandırılmamış kolon ile karşılaştırıldığında yaklaşık %17 ila %49 arasındaki artışı göstermişlerdir [40]. Shokrgozar ve ark. lokal hasarlardan kaynaklı yük taşıma ve deformasyon kapasitesi azalan silindirik çelik yapıların güçlendirilmesinde karbon fiber kumaş ve kaynaklı çelik ceket teknikleri uygulayarak pratik güçlendirme önerilerinde bulunmuşlardır [41]. Ghazijahani ve ark. eksenel yük altındaki kapı girişi şekilli boşluklu tüplerin üzerinde deneysel olarak çalışmışlardır. Değişik şekilli açıklıkların tüpler üzerindeki yapısal etkisini azaltmak için deliklerin etrafına plaka kaynak etmişlerdir [42].

Bu çalışmanın asıl amacı eksenel yükleme altında çalışan eliptik delikli çelik kolonlarda bulunan deliklerin geometrik karakteristiklerinin nihai yük değerine, deformasyon şekillerine ve yük-yer değiştirme diyagramına etkilerini ortaya koymaktır. Parametrik çalışma için Taguchi metodunu uygulayarak en az deney sayısı ile nihai yük değerine etkisi olacak faktörlerin etkisini bulmaktır. Ayrıca hasara uğrayan kolon için karbon ve cam elyaf sarım teknikleri uygulanarak güçlendirme metodu uygulanmıştır. Bu çalışmayla üzerinde eliptik delik açılmış çelik kolonların sonlu elemanlar modeli kurularak deneysel çalışmalarla modelin güvenilirliği doğrulanmıştır. Doğrulamanın ardından sonlu elemanlar ve Taguchi metodu tabanlı parametrik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarla az sayıda test sonuçları ile deliğin konumu, deliğin genişliği ve deliğin yüksekliğinin kolonun nihai yük kapasitesi ve hasar şekline olan etkileri belirlenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda eliptik deliğin kolonlar üzerinde meydana getirdiği mukavemet azalması güçlendirme metoduyla artırılma yoluna gidilmiştir. Karbon ve cam elyaf sarım teknikleriyle eliptik delikli kolonların nihai yük taşıma kapasitesi artırılmış ayrıca hasar süresinde geçikme sağlayacak faydalı çözüm önerileri getirilmiştir.

BÖLÜM 2. KOLON YAPILARIN EKSENEL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Günümüzde dairesel kesitli yapılar, otomotiv sektöründen denizcilik sektörüne kadar birçok farklı alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Kolonlar nispeten iyi enerji absorbe etme verimliliklerinin yanı sıra tahmin edilebilir ve tekrarlanabilir deformasyon davranışları, bu alanlarda tercih edilmelerinin önemli nedenleri arasındadır. Özellikle deniz sektöründe taşıyıcı yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla bu yapıların yük taşıma kabiliyetlerinin kontrol altında tutulması, yapı güvenliğine ve dolaylı olarak servis süresine katkı sunacaktır. Bu kapsamda kolon üzerinde oluşan hasarların izlenmesi ve kontrolünün yanı sıra hasarın değerlendirilmesi oldukça önemli bir husustur. Literatür incelendiğinde hasarlı kolon yapıların taşıyıcı yük kapasitesinin belirlenmesine yönelik çok sayıda teorik, deneysel ve nümerik çalışmayla karşılaşmak mümkündür. Kolonlarda oluşan hasarların anlamlandırılması amacıyla kullanılan nümerik ve deneysel yöntemlerin kullanımı güncel bir durum olduğu, son yıllarda yapılan bu alandaki çalışmaların yoğunluğundan anlaşılmaktadır.

2.1. Kolonların Genel Deformasyon Davranışları

Eksenel yükleme altına çalışan kolonların analizinde deformasyon davranışlarının da incelenmesi son derece önemlidir. Deformasyon şekillerinin belirlenmesi yapının yük altında göstereceği performansı doğrudan etkilemektedir.

2.1.1. Lokal burkulma

Dairesel kolon yapılarında sıklıkla meydana gelen deformasyon şekillerinden biri lokal burkulmadır. Eksenel yük altında lokal burkulmaya maruz kalan dairesel

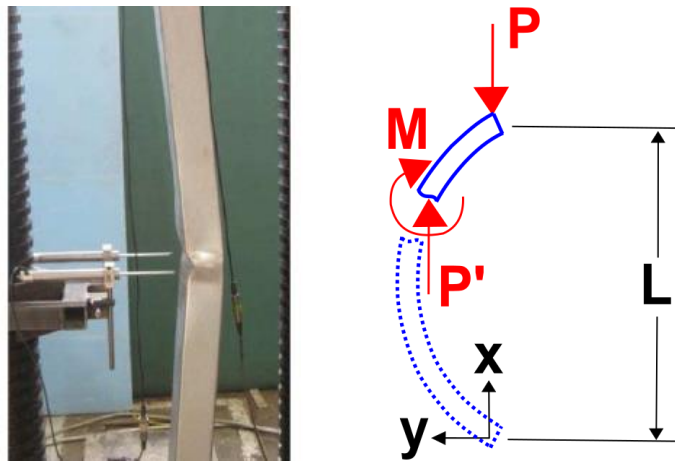
kolonun deformasyonu bölgesel olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu bölgesel deformasyon kademeli olarak tam deformasyon olana kadar bir başka deyişle maksimum ezilme gerçekleşene kadar devam eder. Şekil 2.1.'de lokal burkulmanın gözlemlendiği kolonun şekil değişimi verilmiştir.



Şekil 2.1. Lokal burkulmaya uğramış kolon [43].

2.1.2. Global burkulma

Dairesel kolon yapılarının üzerine gelen yükler eğilme momenti ile aksenal ezilme oluşturmaktadır. Aksenal yükler sonucunda oluşan eğilme momentinin yüksek olması halinde kolonun aksenal yönde ezilmesini engelleyerek global burkulmaya sebep olur. Şekil 2.2.'te global burkulma meydana gelmiş bir kolon verilmiştir.



Şekil 2.2. Global burkulma meydana gelmiş kolon [44] ve denge denklemi.

Şekil 2.2.' de bulunan serbest cismin denge denklemi (Denklem 2.1)

$$M = -Py \quad (2.1)$$

Global burkulmada ilk burkulma gerçekleşene kadar kuvvet artar ve ardından burkulma fenomeni gerçekleştiğinde kolonun eksenel olarak taşıyabileceği yük dramatik bir şekilde düşer. Bu durumda kolonların ani olarak çökmesiyle birlikte can ve mal güvenliğini tehdit edecek boyutlara varabilmektedir.

2.1.3. Maksimum ezilme kuvveti

Kolonların ezilmesi sonucunda ortaya çıkan pik kuvvet değerine maksimum ezilme kuvveti $P_{maks}(N)$ denir. Şekil 2.3.'teki grafikte belirtilmiştir. Yapısal tasarımlarda maksimum ezilme kuvveti önemli bir tasarım parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır. Maksimum ezilme kuvveti genel olarak kolonun ezilmeye başladığı ilk katlanma oluşumu sırasında meydana gelmektedir. Maksimum ezilme kuvvetinin büyük olması tasarımlarda beklenen önemli bir tasarım parametresidir.

2.1.4. Ortalama ezilme kuvveti

Toplam enerji absorpsiyonunun (E_{emilen}) toplam deformasyon miktarına ($\delta_1 - \delta_0$) bölünmesi sonucu ortalama ezilme kuvveti değeri bulunmaktadır. (Denklem 2.2)'te matematiksel ifadesi verilmiştir. Ortalama ezilme kuvveti Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi eksenel ezilme boyunca sabittir. Bu değer hesaplanması ezilme kutusunun hangi deplasmanda ne kadar enerji absorbe ettiğinin hesabını kolaylaştırmak ve diğer kolonların hesabında daha detaylı bilgi sağlamaktadır.

$$P_m = \frac{E_{emilen}}{\delta_1 - \delta_0} \quad (2.2)$$

2.2. Referans Burkulma Yüğü

Referans burkulma yüğü, F_{ref} , literatürde silindirin burkulmasına için gereken yük miktarı olarak tarif edilmiş ve aşağıdaki (Denklem 2.3)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. [4].

$$F_{ref} = \pi D t \sigma_y \quad (2.3)$$

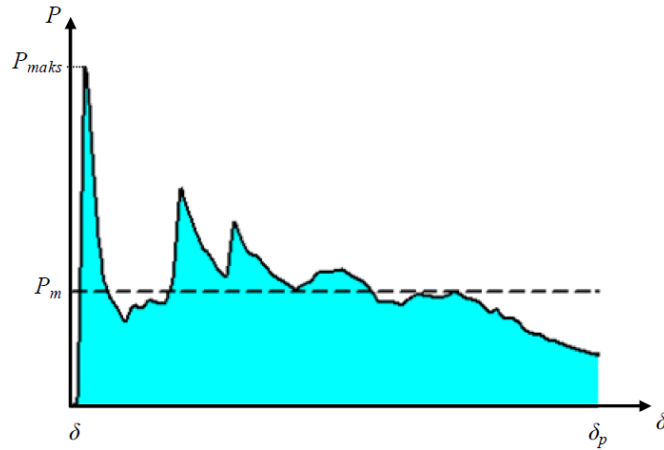
Burada; F_{ref} referans yüğü, D çapı, t et kalınlığını ve σ_y ise akma gerilmesini ifade etmektedir.

2.3. Enerji Sönümleme Kapasitesi

Bir kolon tarafından sönümlenen toplam enerji, deneysel olarak hasar yükünün işi olarak tanımlanabilir. Toplam enerji sönünlemesi (J) (Denklem 2.4) ile hesaplanabilir.

$$E_{emilen\ enerji} = \int P.d\delta \quad (2.4)$$

Burada $P(N)$ aksenal yöndeki sıkıştırma yüğü ve δ aksenal yöndeki ezme miktarıdır. Bu ifade, enerji emilimi için elde edilen yük-yer değıştirme grafiğinin altındaki alanla temsil edilmektedir (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. Tipik kuvvet-yer değıştirme grafiğı [45].

İfade geliştirilirse denklemde kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alanın integralini alarak toplam enerji sönümleme kapasitesi hesaplanabilir (Denklem 2.5).

$$E_{emilen} = \int_{\delta}^{\delta_p} P d\delta = P_m(\delta_p - \delta) = P_m \delta_t \quad (2.5)$$

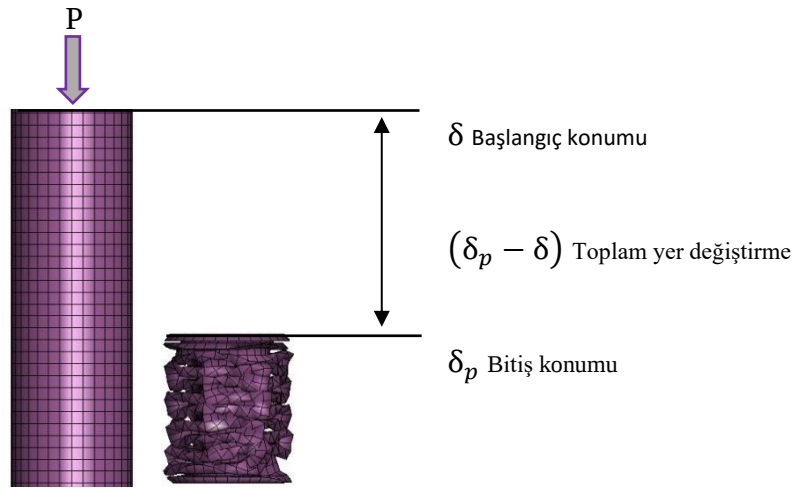
P_m =Ortalama ezilme kuvveti (N)

δ =Ezilmenin başlangıç konumu (mm)

δ_p =Ezilmenin bitiş konumu (mm)

δ_t =Toplam eksenel ezilme miktarı (mm)

Denklemde geçen toplam eksenel ezilme miktarı ezilmenin ilk konumu ile bitiş konumu arasındaki yer değiştirme miktarıdır. Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi ezilmenin başladığı ve bittiği konumları verilen bir ezilme kutusu modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Eksenel basma deneyinin başlangıcı ve bitişini gösteren sonlu eleman modeli

2.4. Dairesel Kolonların Kullanım Alanları

Dairesel kolonlar inşaat sektöründen otomotiv sektörüne kadar geniş bir alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Birçok sektörde dairese kolonlar mukavemet açısından

avantajıyla öne çıkmaktadır. Estetik ve güvenlik anlamında da birçok sektörde kendine ön planda yer edinmiş olan dairesel kesitli kolonlar özgül ağırlık avantajıyla da diğer kesitli kolonlara göre üstündürler.

2.5. Deniz Üzeri Yapıların Tanımı

Offshore platform yapıları gibi deniz üstünde kurulu sistemlerde iki temel bölge bulunmaktadır. Bu zonlar sualtı ve sıçrama bölgesi olarak tanımlanabilir. Bu bölgelerin haricinde atmosfer bölgesi olarak üçüncü bir bölge de eklenebilir (Şekil 2.5.).

Sıçrama bölgesindeki kusurlar temel olarak çarpışma ve korozyondan kaynaklanırken, su altı bölgesinde kusurların ana nedenleri korozyon ve yüksek yüklerden kaynaklanan arızalardır [46].



Şekil 2.5. Offshore platform yapısının sıçrama ve su altı zonları [46].

2.5.1. İskele taşıyıcı ayakları

Dairesel taşıyıcı kolonlar aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi aşırı korozif deniz şartlarına maruz kalmaktadır. İskele ayaklarında tercihen betonarme kolonlar ile çelik kolonların tercih edildiği görülmektedir. Türk karasularında aktif hizmet veren

bir limana ait iskelenin, çelik taşıyıcı ayaklarının koroziif şartlar altında tespit edilen eliptik delikli hasar durumu Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kolonlarda meydana gelen eliptik şekilli delik oluşumu.

2.5.2. Hasarlı iskele taşıyıcı ayakları

Deniz kenarında bekleyen deniz aracına binilerek limanın hasarlı ayaklarının bulunduğu bölgelere gidilmiştir. Bütün iskele ayakları teker teker incelenmiştir. İnceleme sırasında tespit edilen hasarlı bölgelerin resimleri çekilmiştir. Resmi çekilen eliptik deliklerin geometrik özellikleri ölçülerek not edilmiştir. Tespiti yapılan eliptik deliklerin yapının sıçrama ve/veya atmosferik bölgelerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Çelik kolonların su altında kaldığı bölgeler gibi denizen dalgalı olduğu zamanlarda sıçrama bölgelerinde de sıklıkla deniz suyuyla kolonun teması artmaktadır. Atmosferik bölgelerde bu deniz suyu teması olmamakla beraber atmosfer koşullarının etkisiyle yapıların atmosferik kısımları koroziif şartlardan etkilendiği bilinmektedir.

Koruyucu kaplama ve katodik koruma sistemlerinin uygulanmasına rağmen, bu yapılarda korozyon hasarı uzun yıllardır bilinmekte ve rapor edilmektedir. Korozyona bağlı olarak cidar kalınlığı azalan ve delinme meydana gelen dairesel şekilli taşıyıcı yapıların taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Böylece aşınmış alanlarda lokal burkulmaya karşı duyarlılık artmaktadır. İskele taşıyıcı ayaklar üzerinde korozyona bağlı delinmelerin, yapının taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin hesaplanması ile birlikte yapının yüzdesel olarak taşıma kapasitesinde değişim hesaplanabilir. Elde edilen sonuçlara göre değişimin gerekli olup olmadığı sorusuna cevap bulunabilir. Değişim gerekli değilse onarım söz konusu ise onarımın taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi yüzdesel olarak ortaya konabilir.

Özellikle silindirik taşıyıcı kolonlar üzerinde oluşan açıklıkların yapının nihai yük taşıma kapasitesinin azalmasıyla birlikte hatta global burkulma ile sonuçlanan çökme durumlarında kolonların absorbe edebileceği toplam enerji miktarı da azalmaktadır.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda deneysel yöntemde kullanılan numunelerin elde edilişi ile test ekipmanının özellikleri verilmiştir. Elde edilen numuneler sınıflandırılarak bir terminoloji oluşturulmuştur. Ayrıca CAD ortamında numunenin geometrisi elde edildikten sonra Dynaform FE programında sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Eleman özellikleri atandıktan sonra malzeme türü ve sınır koşulları seçilmiştir. Son aşamada gerekli yükleme yapılarak simülasyon oluşturulmuştur.

3.1. Deneyde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Deneylerde kullanılacak olan kolonların ve kolonlar üzerinde açılacak olan elips şeklindeki deliklerin geometrik özellikleri ile aralarındaki oransal ilişkiler aşağıdaki bölümde tanıtılmıştır.

3.1.1. Test numunesinin malzeme özellikleri

Test numuneleri St-37 kalite çelikten imal edilmiş olup numuneler “*TS EN 10219 Yapısal Çelik borular – Dikişli, alaşımsız ve ince taneli çeliklerden soğuk şekillendirilerek kaynak edilmiş*” standardına uygun olarak üretilmiştir.

3.1.2. Çekme testi

Bu kısımda, Sonlu elemanlar analizinde mekanik özelliklerine gerek duyulan numunenin çekme testi prosedürleri ve çekme deneyine ait sonuçlar verilmiştir.

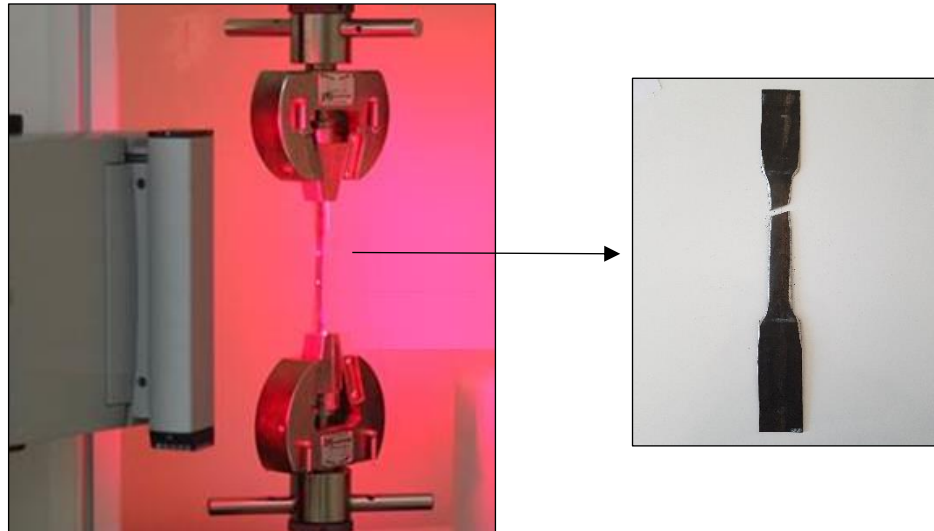
Sonlu elemanlar analizinde numunenin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme testi sonuçlarına ihtiyaç olmaktadır. Çekme numunesinin hazırlanması için piyasadan

temin edilen elik kolon uygun llerde kesilmiştir. şekil 3.2.'de gösterildiği üzere kolon 40 cm kadar boydan kesilerek şerit testere ile parça alınmıştır. Bilgisayar kontrollü freze ile standarda uygun geometrik llerde işlenmiştir.



şekil 3.1. Kolonun kesilerek çekme numunesinin hazırlanması.

Kolonun mekanik özelliklerini belirlemek adına EN ASTM-E8 standardına uygun çekme deney numunesi hazırlanarak 1,5 mm/dk çene hızında çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (şekil 3.3.).



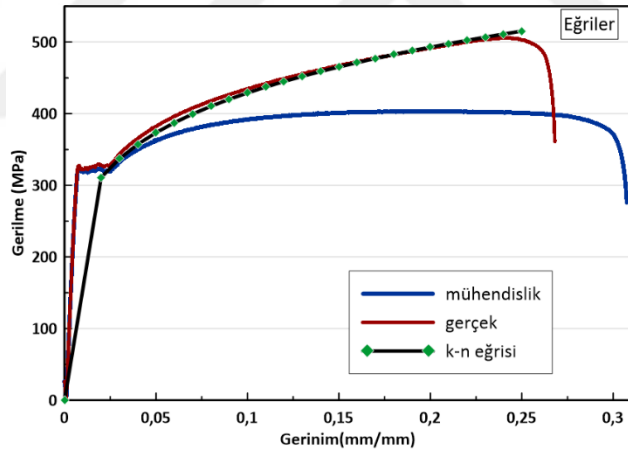
şekil 3.2. Çekme testi ekipmanları (Instron) ve numunenin çekme testi sonrası görünümü.

Sünek malzemeler için, sıkıştırma testlerindeki gerçek diyagramlar ile çekme testlerindeki sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir [47]. Deneysel olarak elde edilen gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrilerine benzer şekilde bazı ampirik denklemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri, Ludwing'ın ortaya koyduğu sabit sıcaklık ve sabit şekil değiştirme oranındaki (Denklem 3.1) ile aşağıda verilmiştir.

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (3.1)$$

Burada; σ_0 akma gerilmesini, K mukavemet katsayısını, ε gerinim, n pekleşme üstelini ifade etmektedir.

Gerilme-gerinim ilişkisi de aynı testle elde edilmiştir (Şekil 3.4.). Deneysel veriler değerlendirilerek malzemenin mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Numunenin gerilme-gerinim diyagramı.

Çekme testinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Numunenin mekanik özellikleri

$\sigma_{0,2}$ (MPa)	E (MPa)	ν	σ_u (MPa)	ε_f (%)	K	n
320	257620	0,28	422	27,4	680	0,2

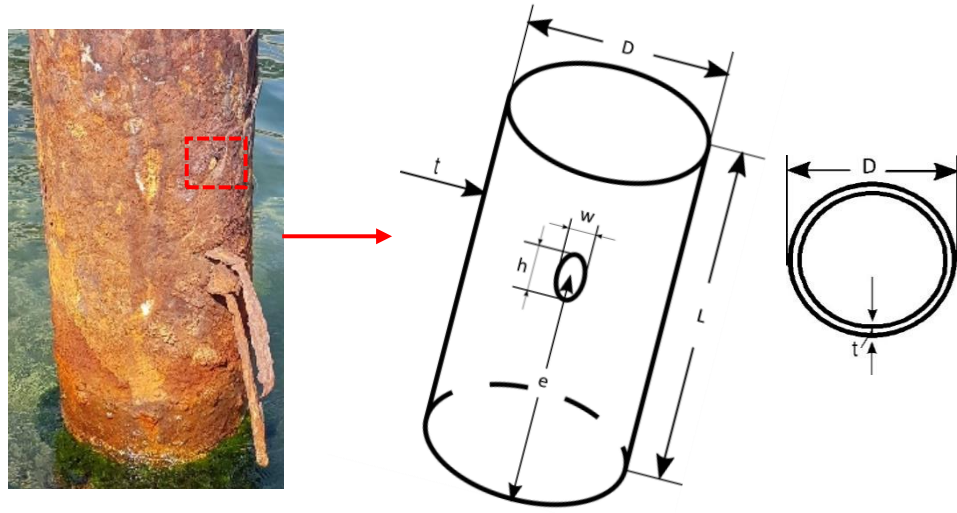
3.2. Eş Modelin Kurulması

Liman bölgesinde iskele taşıyıcı ayakları 300 mm çapında ve et kalınlığı 8.00 mm olacak şekilde montajı yapılmıştır. Eş model hazırlanması maksadıyla test numuneleri St-37 kalite çelikten imal edilmiş olup D/t oranı 37,68 olacak şekilde hazırlanmıştır. D:51,25 mm, t:1,36 mm, L:327,93 mm ölçüleri sabit olup e/L:deliğin merkezi, w:delik genişliği ve h:delik yüksekliğini ifade etmekte olup çalışmada değişken ölçülerde ele alınmıştır (Şekil 3.1.). Eş model hazırlanırken benzer eş model hazırlama teknikleri literatürde bulunmaktadır [30,48].

Numunelerin her iki ucu da rijit plakaya düzgün temas edebilmesi maksadıyla pürüzsüz olacak şekilde işlenmiştir. Numuneler üzerinde eliptik şekilli delikler açmak için dik işleme merkezi kullanılmıştır. Herhangi bir karışıklığa mahal vermemek üzere test numuneleri etiketlenmiştir.

Bahsedildiği üzere bu çalışmada amaç eliptik deliğin geometrik özellikleri ile kolon üzerindeki yerinin nihai yük değeri ve burkulma davranışına etkisini ortaya koymaktır. Sağlam kolon haricinde numuneler üç farklı grupta oluşturulmuştur. Birinci grup Eliptik Delik Genişliği Değişken (DGD), ikinci grup Eliptik Delik Konumu Değişken (DKD), üçüncü grup ise Eliptik Delik Yüksekliği Değişken (DYD) olarak isimlendirilmiştir.

İlk grupta eliptik deliğin yüksekliği değişmezken genişliği 5,63 mm, 8,05 mm ve 16,10 mm olacak şekilde değiştirilmiştir. İkinci grupta eliptik deliğin genişliği ve yüksekliği değişmezken kolon üzerindeki yeri diğer gruptaki deliklerin aksine bir başka deyişle 0,5L yerine 0,375L, 0,25L ve 0,125L olacak şekilde değiştirilmiştir. Son grupta ise eliptik deliğin genişliği değişmezken yüksekliği 38,43 mm, 51,25 mm ve 64,06 mm olacak şekilde değiştirilmiştir. Sağlam numune deneysel çalışmada referans olarak bulundurulmuştur (Tablo 3.2.).



Şekil 3.4. Hasarlı iskele taşıyıcı ayağı ve eş modelin oluşturulması.

Tablo 3.2. Kusursuz numunenin ve delik oluşturulmuş numunelerin geometrik karakteristikleri

Numune	Eliptik ölçü [wxh](mm)	Delik yeri (e/L)
SAĞLAM-1		
DGD-2	5,63 x 25,625	0,5
DGD -3	8,05 x 25,625	0,5
DGD -4	16,10 x 25,625	0,5
DKD-5	12,07 x 25,625	0,375
DKD -6	12,07 x 25,625	0,25
DKD -7	12,07 x 25,625	0,125
DYD-8	12,07 x 38,430	0,5
DYD -9	12,07 x 51,250	0,5
DYD -10	12,07 x 64,060	0,5

Deneylerin tekrar edilebilirliği gösterebilmek maksadıyla her bir durum için üç farklı numune hazırlanmış ve teste tabii tutulmuştur. Açılan deliklerin konumu kaynak dikişinin tam karşısında olup, artık gerilmelerden kaynaklı belirsizliklerden kaçınılmıştır. Oluşturulan eliptik deliğin görünümü Şekil 3.1.'deki gibidir.

Deneysel çalışma dört grupta ve on farklı durum için hazırlanmıştır. Birinci grupta hasarsız numuneler kullanılırken diğer üç grupta ise delikli numuneler kullanılmıştır. Her bir durum için üçer numune hazırlanarak 30 adet deney numunesi test edilmiştir.

3.3. Eksenel Basma Deney Düzeneği

Deligin geometrik özelliklerinin kolonun burkulma dayanımına etkisini araştırmak için istenilen ölçülerde delik açılarak eksenel yükleme altında bir dizi testler yapılmıştır. Deneysel araştırmada 250 kN kapasiteli ve 1-8 mm/s basma hız aralığına sahip hidrolik pres kullanılmıştır (şekil 3.5.). Test cihazının kalibrasyonu TSE tarafından yapılmıştır. Presin maksimum basma aralığı 400 mm'dir. Saniyede ortalama altı adet yük-deplasman verisi almaktadır. Elde edilen veriler eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılmaktadır.

Numuneler pres makinasının piston hızı 5 mm/s sečilerek quasi-statik şartlar altında iki rijit plaka arasında uniform bir şekilde eksenel sıkıştırma yüküne maruz bırakılmıştır. Üst tablası sabit olan hidrolik presin alt tablası 1 mm/s – 10 mm/s hız aralığında, yukarı-aşağı yönlü hareket edebilmekte, kuvvet-deplasman çiftine ait veriler de 6 veri/s sıklığı ile bilgisayara kaydedilmektedir. Bütün deneyler bir kamera yardımıyla kayıt altına alınmıştır.

EMWU-2 numunesi için şekil 3.5a.'da gösterildiği gibi numune, herhangi bir sıkıştırma plakası olmadan pres makinesinin plakaları arasına yerleştirildi. Daha sonra hareketli kafa, şekil 3.5b.'de gösterildiği gibi, numune ile aparat arasında bir temas kurulana kadar hassas olarak ayarlandı. Pres makinesinin plakasının istenilen sınır koşulunun sağlanması yardımcı olacağı varsayılmıştır. Rotasyon olmadan tam olarak kenetlenmiş duruma ulaşmak pratik olarak imkansız olsa da, döndürmenin silindirik kabuğun burkulma yükünün büyüklüğü üzerindeki etkisinin marjinal olduğu kanıtlanmıştır [49].

Deney ön hazırlıkları tamamlandıktan sonra hazırlanan otuz adet deney numunesi eksenel yükleme yapmak üzere basma cihazının alt ve üst tablasına yerleştirildi. Gerekli yük uygulanarak yük-deplasman diyagramı çizdirildi. Yük altında kolonun davranışı video çekilerek kayıt altına alındı. Eksenel yüklemeye maruz delikli kolonlarda ortaya çıkan deformasyon şekilleri de belirlenmiş oldu.



(a)



(b)

Şekil 3.1. Tek eksenli basma testi düzeneği (a) Plakalar arasında numunenin başlangıç kurulumu, (b) Gerekli sınır koşullarını sağlamak için iki aparat arasında numunenin sıkıştırılmasıyla son kurulum.

3.4. Kolonun Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemi, fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önceden bilinen birçok elemana bölünür. Elemanlar “nod” adı verilen noktalarla birleştirilir. Bu birleştirme sonunda yapının tamamını temsil eden bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlarda oluşan denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denlem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır [50].

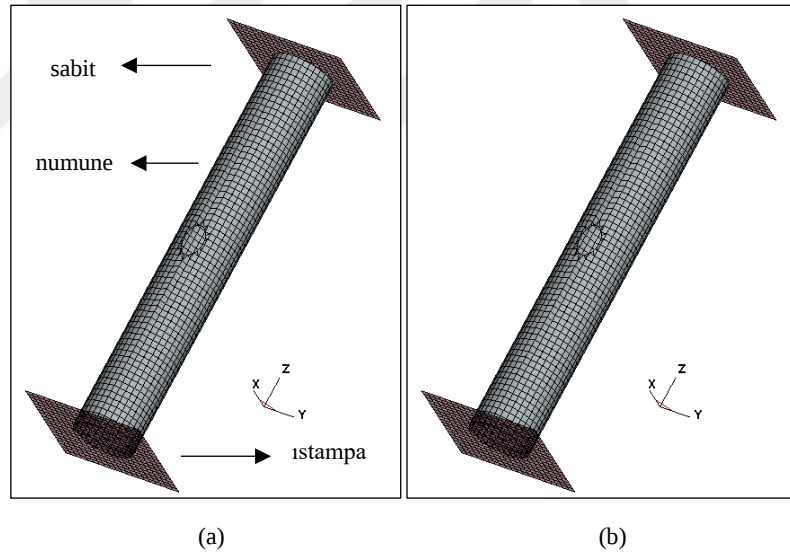
Tezde yapılan sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında nümerik simülasyon programı kullanılmıştır. Oluşturulan modelin matematiksel nonlineer denklem takımının çözümünde Ls-Dyna Explicit Dynamic çözücüsü kullanılmıştır. Bir problemin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken gerçekteki kurgudan uzaklaşmadan sistemi en doğru parametrelerle tanımlanması gereklidir. Problemin tanımlanmasında

bazı kabuller alınması gereklidir. Alınan bu kabuller ve problem verileri ne kadar gerçeğe yakınsa alınacak sonuçlarda gerçek sonuçlara o kadar yansıyacaktır [51].

Sistemde üç temel bileşen bulunmaktadır. Birincisi sabit tabla (kalıp), ikincisi hareketli tabla (zımba) ve üçüncüsü ise iki tabla arasında basınç yüküne maruz kalan bir iş parçasıdır. Analiz için kullanılan modelleme Şekil 3.6a.'da gösterilmektedir.

Bu aşamada öncelikle çekme testlerinden elde edilen veriler programa yüklenmiştir. Kolonun sonlu elemanlar ağı Şekil 3.6b.'de gösterilmektedir.

Sonlu eleman analizi için Dynaform 5.7.3 paket programı kullanılmıştır. Analizde "MAT_018" adlı malzeme türü seçilmiştir. Bu, güç yasası sertleştirme kuralı kullanan hız etkili izotropik bir plastisite modelidir [52].

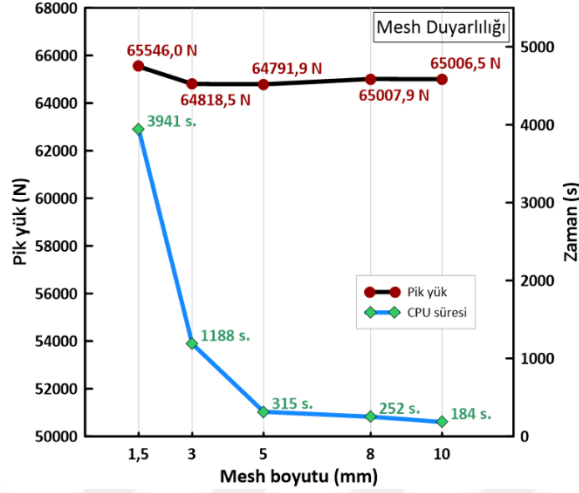


Şekil 3.6. (a) Rijit plakalar arası basma modeli, (b) Numunenin sonlu elemanlara ayrılması.

Bu, ince duvarlı elemanlar için makul kabul edilir. Doğrusal olmayan bir malzeme modeli için eleman başına 3-5 (veya daha fazla) entegrasyon noktası önerilir [53]. FE yönteminde doğrusal olmayan dinamik analiz kullanılır.

Beş farklı eleman boyutu ile bir mesh yakınsama çalışması yapılmıştır. Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi, farklı ağ boyutları, delikli kolonun tepe yükü üzerinde ihmal

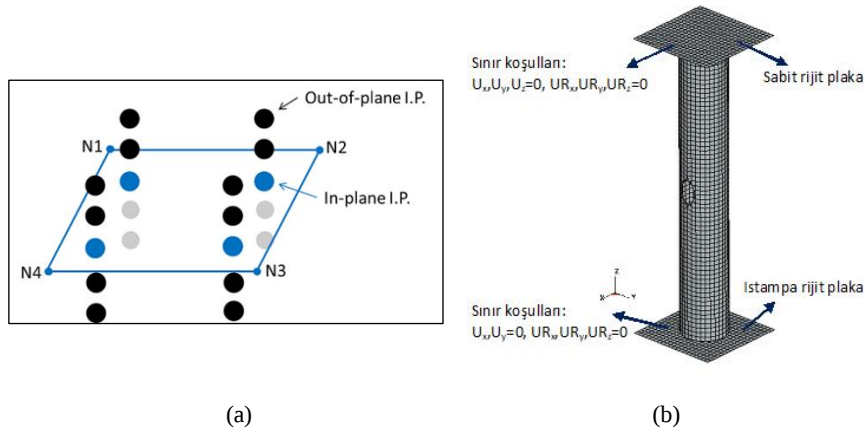
edilebilir etkilere sahiptir. CPU süresi, 5 mm'den küçük eleman boyutlarında önemli ölçüde artırmaktadır. Analizler için ağ boyutu 5 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.7. Delikli kolon için boyut duyarlılığı ile CPU hesaplama süresinin grafiği (DGD-4).

Alt uçta yer değiştirmesi serbest olan Z eksen (Uz) hariç, üst ve alt uçlarda (Ux, Uy, Uz, URx, URy, URz = 0) sınır koşulları tüm yönlerde sabitlenmiştir (Şekil 3.8b.). Deneylere göre gerçek yükleme koşullarını simüle etmek için modellerin üstünde ve altında sert plakalar kullanılmıştır [54].

Eleman yüzeyinde dört entegrasyon noktası sağlayan analizde tam entegre kabuk elemanı (ELFORM = 16) kullanılmıştır (Şekil 3.8a.). Kabuk elemanları, düzlem gerilme varsayımları ve plaka teorisinin bir kombinasyonuna dayanan iki boyutlu elemanlardır [55]. Seçilen eleman tipi eğilme ve kesme etkilerini dikkate almaktadır. Plakalar ile kolon arasında "Auto_Nodes_to_Surface" kontak tipi seçilmiştir.



Şekil 3.8. (a) Dikdörtgen kabuk eleman için eleman formülasyonu, (b) Sınır koşulları.

3.5. Güçlendirme

Eliptik delikli kolonlarda meydana gelen taşıma kapasitesindeki azalmayı artıracak olan malzeme özellikleri bu kısımda açıklanmıştır.

3.5.1. Kompozit malzemeler

En az iki farklı türde malzemenin makro seviyede bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni tipte malzemelere kompozit malzemeler denir. Burada amaç malzemedeki tek başına mevcut olmayan ya da yetersiz kalan hafiflik, sağlamlık gibi özelliklerin bir araya getirilmesi üstün özellikli malzemeler geliştirilmesidir [56].

3.5.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde birçok türde malzeme kullanılabildiğinden kompozitlerin gruplandırılmasında mutlak bir sınır olmamakla beraber daha çok matris ve takviye elemanlarına göre şu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,

3. Tabakalı kompozit malzemeler.

Bu üç farklı tipten oluşan takviye elemanlı kompozit plastik, metal veya seramik içerisinde bulunabilir. Takviye elemanı matriksten her zaman daha sert olup böylece istenen özellikler sağlanmış olur.

3.5.3. Elyaf takviyeli kompozitlerin sınıflandırılması

Daha önce yapılan araştırmalarda reçine ve elyaf malzemesinin birlikte uyumunun iyi olduğu saptanmış ve elyaf takviyeli polimer kompozitler günümüzde farklı uygulamalar için yaygın olarak kullanılan popüler mühendislik malzemesi haline gelmiştir [57].

Elyaf takviyeli kompozitlerde ise;

1. Sürekli elyaf takviyeli kompozitler,
2. Kesikli elyaf takviyeli kompozitler,
3. Rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozitler olarak alt sınıflara ayrılabilir [58].

3.5.4. Çalışmada kullanılan elyaf çeşitleri

Yapısal uygulamalar için geliştirilmiş kompozit malzemeler içerisinde kullanılan en yaygın elyaf türleri, karbon, cam elyafı ve aramittir.

Cam elyafın ana esasını; silis-kum (SiO_2) meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan ve maliyeti en düşük olan takviye elemanıdır. Bu elyaflar karbon kadar hafif ve rijit olmamasına rağmen maliyeti oldukça düşüktür [58].

Mekanik özellikleri ve çekme mukavemeti bakımından çeliğe göre üstün özelliklere sahiptir. Kimyasal etkilere karşı yüksek direnç gösterme kabiliyeti yüksektir. Nem absorbe edebilme kapasitesi düşük olmamasına rağmen elyaf kaplama yöntemleri uygulanarak bu durum ortadan kaldırılabilir. Güçlendirme uygulamalarında kullanılan tek yönlü dokuma cam elyaf kumaş Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Tek yönlü 330 gr ağırlıklı cam elyaf kumaş.

Karbon elyaflar, takviye elemanı olarak kullanılan yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastik modülüne sahip olan karbon elyaflar turbostratik grafitin küçük kristallerinden oluşan karbonun allotropik formundan biridir [58].

Karbon elyaf, alüminyum ve çelik gibi malzemelere göre çok daha iyi dayanım olarak avantaj sağlamaktadır. Karbon fiberler kimyasal ve korozyon etkilerine karşı oldukça dayanıklıdır. CFRP sistemleri esnek olmasından dolayı değişken geometrik özelliklere sahip yapı elemanlarında rahatlıkla uygulanabilmektedir.

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan tek yönlü dokuma karbon elyaf kumaş örneği Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Tek yönlü 300 gr ağırlıklı karbon elyaf kumaş.

3.5.5. Epoksi reçine sistemleri

Epoksi reçine karışımları kompozit malzeme imalatında kullanılan iki bileşenli sistemlerdir (Şekil 3.11.). Karbon ve cam fiber takviyelerle laminasyonları sonucunda yüksek performans gerektiren yapılarda istenen üstün performanslı kompozit ürünler elde edilebilmektedir. Termoset grubunda kendine yer edinmiş olan ve bağlar arası çekim gücü artırıcı özelliği sayesinde yüksek yapıştırıcılık sağlamaktadır. Su, alkali ve asidik ortamların aşındırıcılığına karşı çok iyi direnç göstermektedirler. Literatürde fiber kumaşların kolonların yük altında dayanımının artırılmasında epoksi reçine iler beraber kullanıldığı görülmektedir [36-41].



Şekil 3.11. Reçine ve sertleştirici

3.5.6. Güçlendirme prosedürü

Kumaşların kolon yapısı üzerine yapışması ve istenen performansı sağlayabilmesi için uygun reçine ve sertleştirici kullanımı gerekmektedir.



Şekil 3.12. Rulo halinde karbon ve cam elyaf

Bu iki malzemenin üretici firmanın tavsiye etmiş olduğu oranlarda(hacimce ya da ağırlıkça) karışım yapılarak gerekli epoksi harç oluşturulmuştur. Uygulamada kullanılacak olan sertleştirici, reçine, karbon ve cam elyaf kumaşlar dostkimya firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.12.).

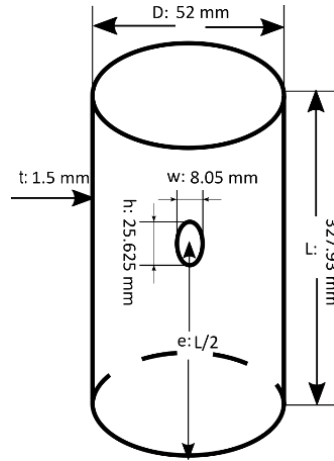
3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Güçlendirme deneyinde kullanılmak üzere temin edilen borular öncelikle boy kesimi yapılmıştır. Elips deliklerin açılması için bilgisayar kontrollü freze kullanılmıştır. Kolon üzerinde açılan elips deliklerin genişlik ile yükseklik değerleri sabit ölçüde ve deliğin merkezi kolonun orta noktasında olacak şekilde hazırlanmıştır. (Şekil 3.13a.). Kolonun her iki ucu bilgisayar kontrollü tornada düzgün bir şekilde işlenerek basma deneyinin uygun şartlarda olması sağlanmıştır. Güçlendirme deneylerinde kullanılmak üzere toplamda yirmi bir adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin özellikleri aşağıdaki Tablo 3.3.'te belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Hazırlanan güçlendirilmiş kolon numunelerinin karakteristik özellikleri

Numune	Adet	Özellikleri
HASARSIZ-1	3	Şahit numune olarak hazırlanmış olup deneysel çalışmada referans olarak alınmıştır.
HASARLI-2	3	Kolonun orta noktasında 8.05x25.625 mm geometrik ölçülerde elips delik açılmıştır.
KARBON T-3	3	Karbon elyaf kolonun boydan tamamına sarılı olacak şekilde yapıştırılmıştır.
KARBON K-4	3	Karbon elyaf kolonun hasarlı olan orta kısmından kısmi olarak sarılarak yapıştırılmıştır.
CAM T-5	3	Cam elyaf kolonun boydan tamamına sarılı olacak vaziyette yapıştırılmıştır.
CAM K-6	3	Cam elyaf kolonun hasarlı olan orta kısmından kısmi olarak sarılarak yapıştırılmıştır.
KELEPÇE	3	Kelepçe kolonun hasarlı olan orta kısmından kısmi olarak sarılarak sıkılmıştır.
Toplam Numune Sayısı	21	

Hasarlı kolonların güçlendirilmesi için kullanılacak olan karbon ve cam elyaf kumaşların kolonlara sarımından önce yüzey hazırlıkları yapılmıştır. Kolon üzerinde bulunan yağ, kir ve talaş gibi zararlı parçacıkların uzaklaştırılması için önce temiz bir bezle silindikten sonra selülozik tiner kullanılmıştır (Şekil 3.13b.).



(a)



(b)

Şekil 3.13. (a) Deney numunesinin geometrik özellikleri, (b) Selülozik tiner kullanılarak yapılan yüzey hazırlığı.

3.6.1. Elyaf kumaşlar ile epoksi harcın hazırlanması

Elyaf kumaşlar kolonun boy ve çapına uygun olacak şekilde kesilerek hazır hale getirilmiştir. Epoksi reçine ve sertleştirici, üretici firma tarafından tavsiye edilen oranlarda karıştırmak için hassas terazi kullanılmıştır. Tavsiye edilen orana göre ağırlıkça 100 birim epoksi reçine içerisine 40 birim sertleştirici kullanılmıştır. Karışım yeterli süre karıştırılarak istenilen kıvama getirilmiştir (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Elyafın kesilmesi, epoksi harcın belirli oranlarda karıştırılması.

3.6.2. Kolonun elyaf ile sarılması

Elyaf üzerine önceden hazırlanan epoksi harç hassas bir şekilde dökülmüştür. Dökülen epoksi harç kumaşın her bir noktasına iyice sürülerek tüm alan ıslatılmıştır. Her bir bölgenin epoksi harç ile iyice ıslatılmış olduğuna emin olunduktan sonra elyaf kumaşlar kolon üzerine üç kat olacak şekilde sarılmıştır (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Harcın dökülmesi, harcın kumaşa yedirilmesi ve kolona sarılması.

Sarılarak hazır hale getirilen numuneler dengeli kürlenmeyi sağlayacak şekilde 96 saatlik süreyle kurumaya bırakılmıştır.

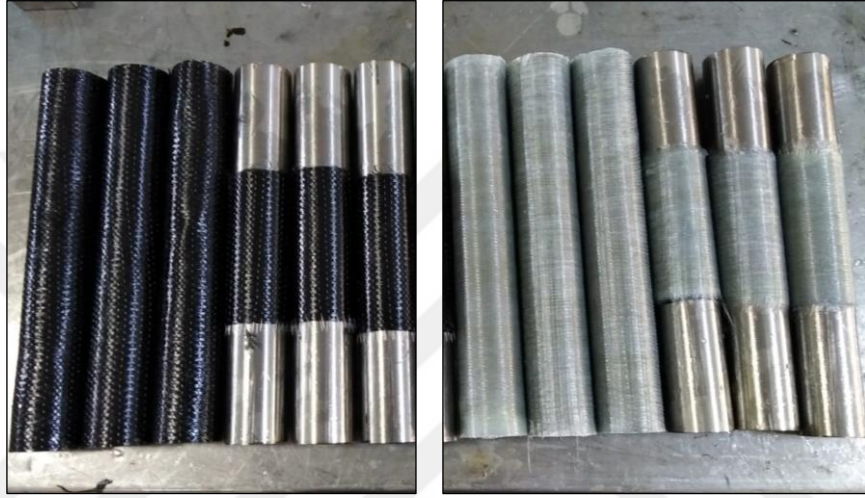


Şekil 3.16. Numunelerin kurumaya bırakılması.

Dengeli bir kuruma ortamı sağlamak maksadıyla numuneler askıya alınmış ve homojen kürlenme ortamı sağlanmıştır (Şekil 3.16.).

3.6.3. Güçlendirilmiş kolon

Hasarlı kolonların güçlendirilmesinde kullanılan cam elyaf ve karbon elyaf malzemelerin kolona güçlü bir şekilde yapışmasının sağlanması gerekmektedir. Epoksi reçine ile iyice ıslatılan elyaf kolona sarımı yapıldıktan sonra yeterli kuruma sonrası basma testine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Elyaf ile sarılarak hazır hale getirilen kolonlar

BÖLÜM 4. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Taguchi'ye göre bir ürünün kalitesini artırmada en önemli aşama parametre tasarımını yapma sürecidir. Parametre tasarımında etkili olan faktörlerin birbiri arasındaki etkileşimi belirlemek son derece önemlidir. Faktörler arası etkileşim bilindiğinde az deney sayısı ile kaliteye ulaşma yolunda hızlıca harekete geçile bilinmektedir. Bu bölümde Taguchi metodunun alt yapısında kullanılan matematiksel denklemler ile verilerin analizinde kullanılan ANOVA analizinin tanıtımı yapılmıştır.

4.1. Taguchi Metodu

Genichi Taguchi kendi adıyla bilinen yaklaşımı ile deneylerin yapılması ve değerlendirilmesindeki pratikliği ve verimliliği artıracak çözümler getirmiştir [56]. Deney için hazırlık aşamasındaki birtakım düzenlemelerle deney sayıları önemli oranda düşürülebildiği görülmüştür.

Bu yöntemdeki önemli hususlardan bir tanesi de deney tasarımının dengeli olması sağlanmalıdır. Bir başka ifadeyle faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesi için tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılması gerekmektedir. Taguchi'nin standart tasarımları bu kural üzerine temellendirilmiştir [59].

Taguchi yönteminde asıl hedef ulaşılması istenen değer etrafındaki değişkenlerin azaltılmasıdır. Bu yöntemin temeli deney tasarımına dayanmaktadır [60].

Bu çalışmanın amacı, istenen burkulma yükü için en uygun boyutları elde etmektir. İstenen burkulma yükü değeri en yüksek olanıdır. Bu nedenle, Minitab programında 'büyük olan en iyisidir' S/N oranı seçilmiştir. Analizler Taguchi L9 ortogonal

dizisine göre yapılmış ve burkulma yüklerinin değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı esas alınmıştır. Analizde kontrol faktörleri olarak delik genişliği, deliğin yeri ve delik yüksekliği olarak belirlenmiştir. Buna göre, nihai yük değeri yanıt olarak belirlenmiştir. Belirlenen kontrol faktörleri ile faktörlerin seviyeleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ortogonal dizi matrisinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviye aralıkları

Sembol	Faktörler	Seviyeler		
		1	2	3
A	Delik genişliği (mm)	5,63	8,05	16,10
B	Delik yeri (e/L)	0,125	0,25	0,5
C	Delik yüksekliği (mm)	25,625	38,43	64,06

Uygulanacak olan 9 adet deneyin hangi seviyelerle birlikte teste tabi tutulacağı belirlenmiş ve L9 ortogonal dizini Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. L9 ortogonal dizin

Deney no	Delik genişliği (A)	Delik yeri (B)	Delik yüksekliği (C)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Taguchi yönteminde en uygun koşullar üç başlıkta tanımlanmaktadır. Daha küçük-daha iyi, daha büyük-daha iyi ve nominal-daha iyi şeklindedir. Bu koşulları ifade eden formüller aşağıdaki denklemlerde olduğu gibidir [61].

Nominal değer en iyi olması durumunda (Denklem 4.1)'de verilmiştir.

$$\text{Nominal en iyi durumda: } \frac{S}{N} = 10 \log\left(\frac{\bar{y}}{s_y^2}\right) \quad (4.1)$$

En büyük değer en iyi olması durumunda (Denklem 4.2)'de verilmiştir.

En büyük en iyi durumda: $\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_i^n \frac{1}{y_i^2}\right)$ (4.2)

En küçük değerin en iyi olması durumunda kullanılan formül (Denklem 4.3)'te verilmiştir.

En küçük en iyi durumda: $\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_i^n y_i^2\right)$ (4.3)

y_i tüm gözlem değerlerinin ortalaması olduğunda, s_y^2 y için varyans, n deney sayısı ve y_i gözlem değerleridir. Bu çalışmada S/N değerlerinin belirlenmesinde (Denklem 4.2)'de verilen formül kullanılmıştır.

Bu yöntemde üç seviye ve üç faktör için deney tasarımı sayısı 27 deney sayısı yerine 9 deney ile faktör ve faktörlerin seviye değişiklerinin etkisi belirlenebilmiştir.

4.2. ANOVA Analizi

Bağımsız değişkende çok sayıda grup var ise ANOVA kullanılmaktadır. ANOVA bağımsız değişkenlerin kendi içerisinde nasıl bir etkileşim içinde olduklarını ve bu etkileşimlerin bağımlı değişkenin üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır [62].

Regresyon denklemleri sonucunda elde edilen belirleme katsayısı (R^2), bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından açıklanan varyans oranıdır. Regresyon sonuçlarında belirleme katsayısı (R^2) 1'e ne kadar yakınsa, bağımlı değişken, bağımsız değişkenler tarafından tam olarak açıklanabilir. Regresyon denklem katsayısı tablosunda; Katsayı: Değerlerin katsayılarını belirtir, Katsayı SE: Katsayılar da standart hata, T: Test istatistiklerinin sonucu, P: Regresyon analizinin anlamlı olup olmadığını gösterir. $P < 0,05$ ise, bağımsız değişkenin regresyon denklemindeki bağımlı değişken üzerinde etkili olduğu sonucunu verir [62].

Deney sonucunda elde edilen veriler analiz edilerek faktör ve seviyelerin etkisi hesaplanabilmektedir. Tasarımın önemli aşamasından bir tanesi verilerin analizidir.

BÖLÜM 5. DENEYSEL & NÜMERİK SONUÇLAR VE TARTIŞMA

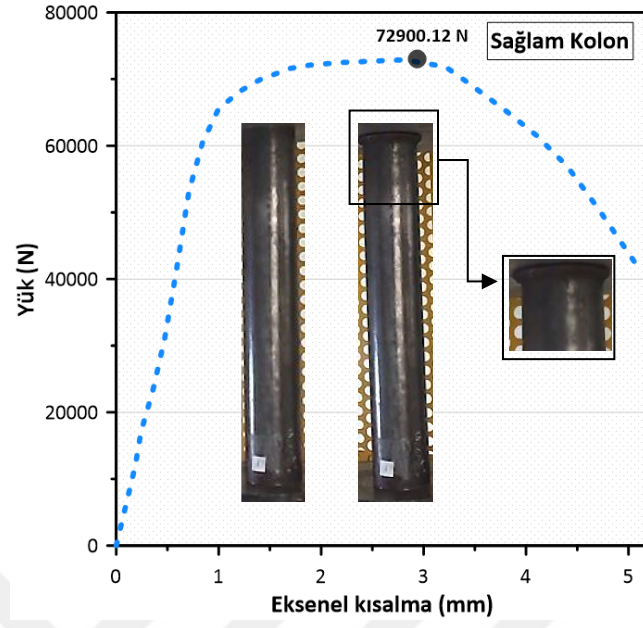
Bu bölümde çalışmanın tüm sonuçları verilerek yorumlanmıştır. Ortaya çıkan veriler grafik ve tablolar aracılığıyla gösterilerek mukayese edilmiştir. Hasarlı kolonlarda meydana gelen kapasite düşümü sonlu eleman modeli ile hesaplanmıştır. Parametrik çalışmalarla faktörler ve seviyelerin etkisi gösterilmiştir. Güçlendirme metodu ile taşıma kapasitesi düşüşü meydana gelen kolonlarda güç artışı oranları verilmiştir.

5.1. Deneysel Sonuçlar

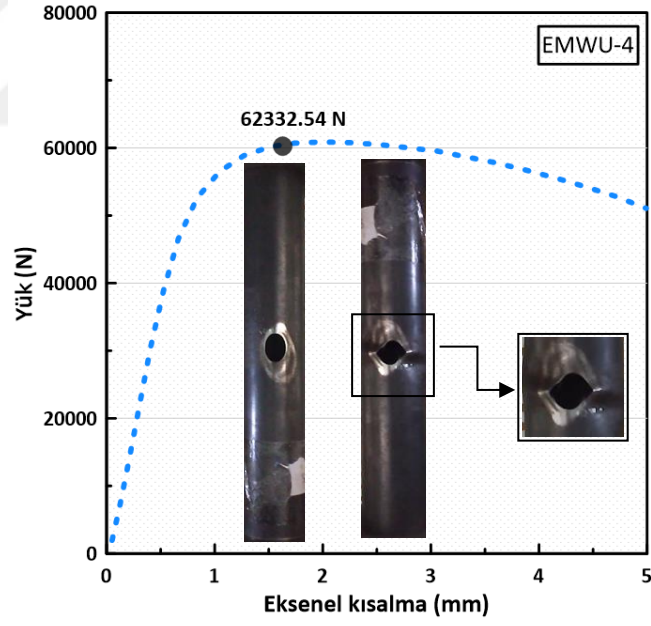
Deneysel kurulum hazırlandıktan tüm numuneler için basma testi gerçekleştirildi. Kolonun yük altındaki davranışını sonradan detaylı şekilde incelemek için kamera kayıt cihazı ile kayıt altına alınmıştır. Eksenel yük uygulanarak yük deplasman diyagramı çizilmiştir. Eksenel yüklemeye tabi tutulan sağlam delikli kolonların deformasyon şekilleri de gösterilmiştir (Şekil 5.1.).

Sağlam kolon taşıyabileceği maksimum yüke eriştikten sonra fil ayağı şeklinde dışa doğru bir başka değişle bilezik şeklinde dışa çıkıntı yaparak lokal olarak burkulmuştur (Şekil 5.1a.). Benzer deformasyon şekilleri literatürde rapor edilmiştir [17,28].

Hasarlı kolon taşıyabileceği maksimum yüke eriştikten sonra delik çevresinde dışa doğru açılma ve sonrasında global burkulma fenomeni meydana gelmiştir (Şekil 5.1b.). Deformasyon şekilleri daha önce literatürde delikli kolonlar için rapor edilenlerle şekillerle örtüşmektedir [1,4,14,16,18].



(a)



(b)

Şekil 5.1. Yük-eksenel kısalma grafiği ve deformasyon şekilleri (a) Sağlam-1 Kolon, (b) EMWU-4.

Deneysel çalışmalardan elde edilen DGD için nihai yük değerleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmalardan elde edilen DGD için nihai yük (N) değeri sonuçları

Numune	Sağlam-1	DGD-2	DGD-3	DGD-4
Test 1	75099,34	65162,55	63976,14	60879,25
Test 2	74112,66	68409,76	64408,34	58301,79
Test 3	72900,12	58150,83	63313,65	62332,54

Deneysel çalışmalardan elde edilen DKD için nihai yük değerleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Deneysel çalışmalardan elde edilen EHLU için nihai yük (N) değeri sonuçları

Numune	Sağlam-1	DKD-5	DKD-6	DKD-7
Test 1	75099,34	58827,42	53458,84	59376,05
Test 2	74112,66	61939,94	64447,44	66903,84
Test 3	72900,12	64791,04	64174,96	67628,82

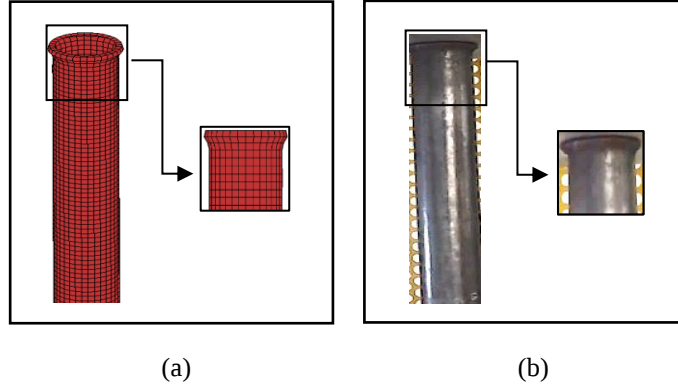
Deneysel çalışmalardan elde edilen DYD için nihai yük değerleri Tablo 5.3.'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Deneysel çalışmalardan elde edilen DYD için nihai yük (N) değeri sonuçları

Numune	Sağlam-1	DYD-8	DYD-9	DYD-10
Test 1	75099,34	49652,6	63752,54	59046,23
Test 2	74112,66	58186,38	65586,26	57543,97
Test 3	72900,12	62278,67	59884,62	58971,48

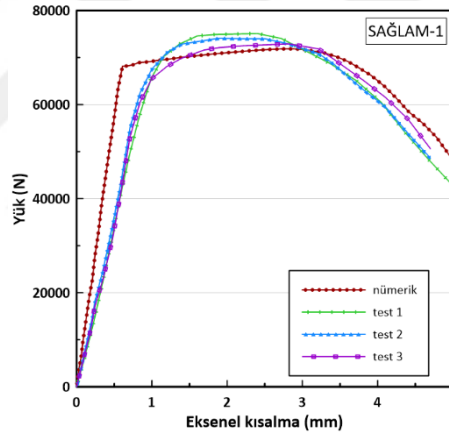
5.2. Sonlu Elemanlar Hesaplamaları ve Doğrulanması

Sağlam numuneye eksenel yük uygulandığında, kolonun tepesinde fil ayağı şeklinde bir başka deyişle dışa doğru bilezik şeklinde açılmayla birlikte çökme meydana gelmiştir. Bu deformasyon şeklinin hem nümerik simülasyonda hem de deneysel çalışmalarda aynı olduğu görülmüştür (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. (a) Sağlam numune için nümerik deformasyon, (b) Deneysel deformasyon

Nümerik ve deneysel çalışmalardan elde edilen yük-eksenel kısalma diyagramında elde edilen eğrilerin birbirine yakın olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 5.3.).

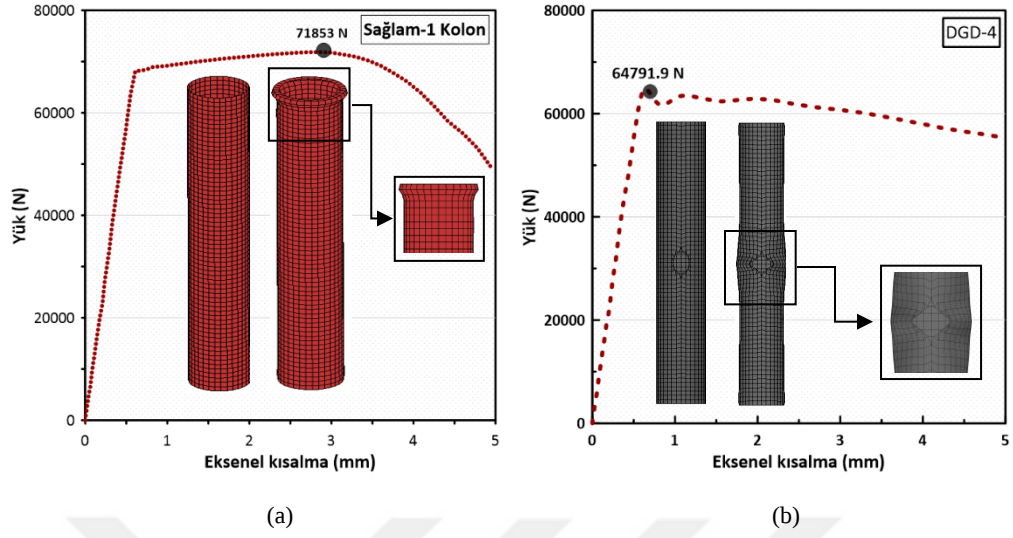


Şekil 5.3. Sağlam-1 için yük-eksenel kısalma davranışı ve kıyaslanması.

Sonlu eleman modellemesinin geçerliliğini gösteren iki yöntem arasında çok sayıda tutarlı deformasyon şekli elde edilmiştir. Delikli kolonlar için delik bölgesinde dışa katlanma mekanizmaları oluşmuştur.

5.3. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Ön hazırlıklar tamamlandıktan sonra sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Eksenel yük uygulanarak yük-deplasman diyagramı çizilmiştir. Eksenel yüklemeye tabi tutulan sağlam ve delikli kolonların deformasyon şekilleri de gösterilmiştir (Şekil 5.4.).



Şekil 5.4. Sağlam-1 Kolon için nümerik simülasyon diyagramları ile detayları, (b) DGD-4.

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen DGD için nihai yük değerleri Tablo 5.4.'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen DGD için nihai yük (N) değerleri

Numune	Sağlam-1	DGD-2	DGD-3	DGD-4
Nümerik	71853	68065.6	67700.8	64791.9

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen DKD için nihai yük değerleri Tablo 5.5.'te verilmiştir.

Tablo 5.5. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen DKD için nihai yük (N) değerleri

Numune	Sağlam-1	DKD-5	DKD-6	DKD-7
Nümerik	71853	67363.7	68107.3	68426.2

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen DKD için nihai yük değerleri Tablo 5.6.'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Sonlu elamanlar analizinden elde edilen EMHU için nihai yük (N) değerleri

Numune	Sağlam-1	DYD-8	DYD-9	DYD-10
Nümerik	71853	66312.7	66071.7	63706.5

Teorik tahmin değeri F_{ref} hesaplandığında;

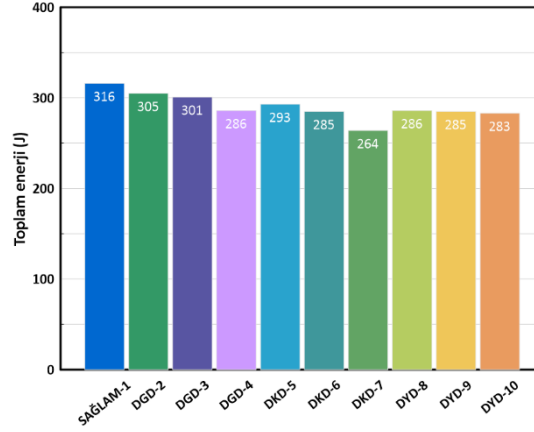
$$F_{ref} = \pi \times 51.25 \text{ mm} \times 1.36 \text{ mm} \times 320 \text{ N/mm}^2 = 70070.1 \text{ N}$$

Nümerik analizlerden elde edilen nihai yük değerleri ile malzeme verilerine dayalı elde edilen teorik tahmin sonuçları Tablo 5.7.'de gösterilmektedir. Sonuçların birbirleri ile iyi bir yakınsama sağladığı görülmektedir. İki yöntem arasında yüzdesel hata payı 2,54 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.7. Nümerik nihai yük değerlerinin teorik yaklaşımla elde edilen nihai yük değerlerinin karşılaştırılması

Numune	Analiz metodu	Nihai yük(N)	Hata
Sağlam-1	FE Analiz	71853	%2,54
	Teorik tahmin	70070,1	

Sayısal analizler sonucunda sağlam ve delikli kolonların toplam enerji absorbe değerleri bulunmuştur (Şekil 5.5.). Bulunan değerler birbiriyle mukayese edilmiş olup 5 mm eksenel kısalma durumuna göre hesaplanmıştır. Delikli kolonların ortalama toplam enerji absorpsiyon değeri 287,5 J olarak hesaplanmıştır. Bu ortalama değer sağlam numune ile karşılaştırıldığında delikli kolonların toplam enerji absorpsiyon değeri hasar durumunda ortalama olarak %9,01 oranında azalmaktadır. Bu durum, kolondaki deliğin enerji absorpsiyon kapasitesini azalttığını göstermektedir.

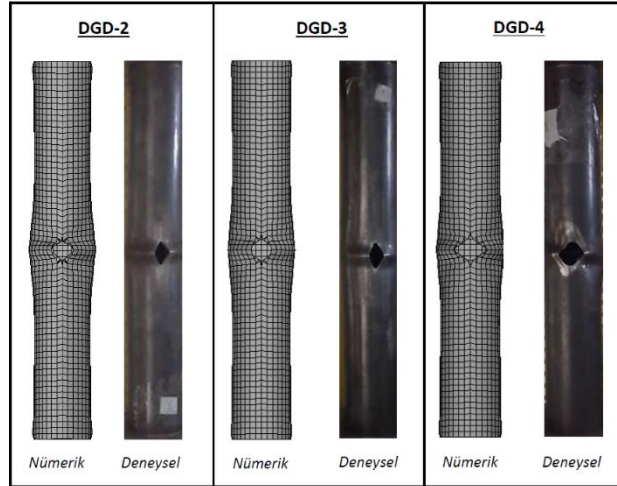


Şekil 5.5. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen toplam enerji absorpsiyon değerleri.

5.4. Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarının Kıyaslanması

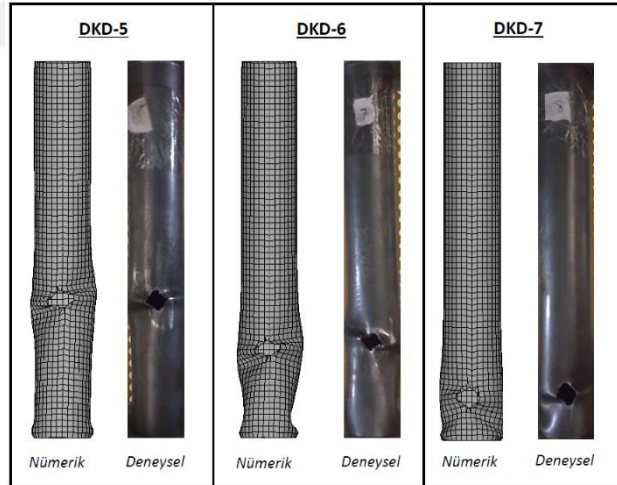
Sağlam ve eliptik delikli numunelerin aksenal yükleme altındaki davranışını araştırmak için dört set numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Test edilen sağlam ve eliptik delikli numunelerin deformasyon şekilleri ve yük-yer değiştirme diyagramları, Dynaform 5.7.3 paketi kullanılarak elde edilen sonlu eleman simülasyonları ile karşılaştırılmıştır.

DGD grubu içerisinde bulunan numunelerin delik genişliği arttıkça nihai yük değeri azalmıştır. Delik genişliği arttıkça delik çevresinde bilezik şeklinde çıkıntıyla beraber buruşma oluşumu da ayrıca gözlemlenmiştir (Şekil 5.6.). Benzer deformasyon şekilleri daha önce literatürde rapor edilmiştir [1,4,14,16].



Şekil 5.6. DGD için deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deformasyon şekilleri.

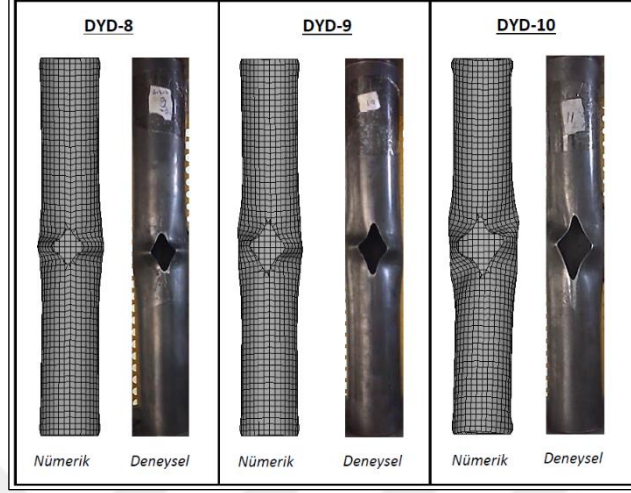
EHLU grubu içerisinde bulunan numunelerde delik yeri uçlara doğru yaklaştıkça nihai yük değeri artmıştır. Her bir numunede delik çevresinde bilezik şeklinde çıkıntıyla beraber iç kısımlara doğru buruşma meydana gelmiştir. (Şekil 5.7.). Benzer sonuçlar literatürde de görülmektedir [4].



Şekil 5.7. DKD için deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deformasyon şekilleri.

DYD grubu içerisinde bulunan numunelerin delik yüksekliği arttıkça nihai yük değeri azalmıştır. DYD -8 için deformasyon şekli irdelendiğinde bilezik şeklinde çıkıntıyla beraber delik çevresi yanal olarak genişlemiştir. DYD-9 incelendiğinde ise DYD-8 göre yanal açılma miktarı daha da artmış ancak bilezik şeklinde çıkıntı oluşumu aynı şekilde gerçekleşmiştir. DYD-10 için bir değerlendirme yapıldığında

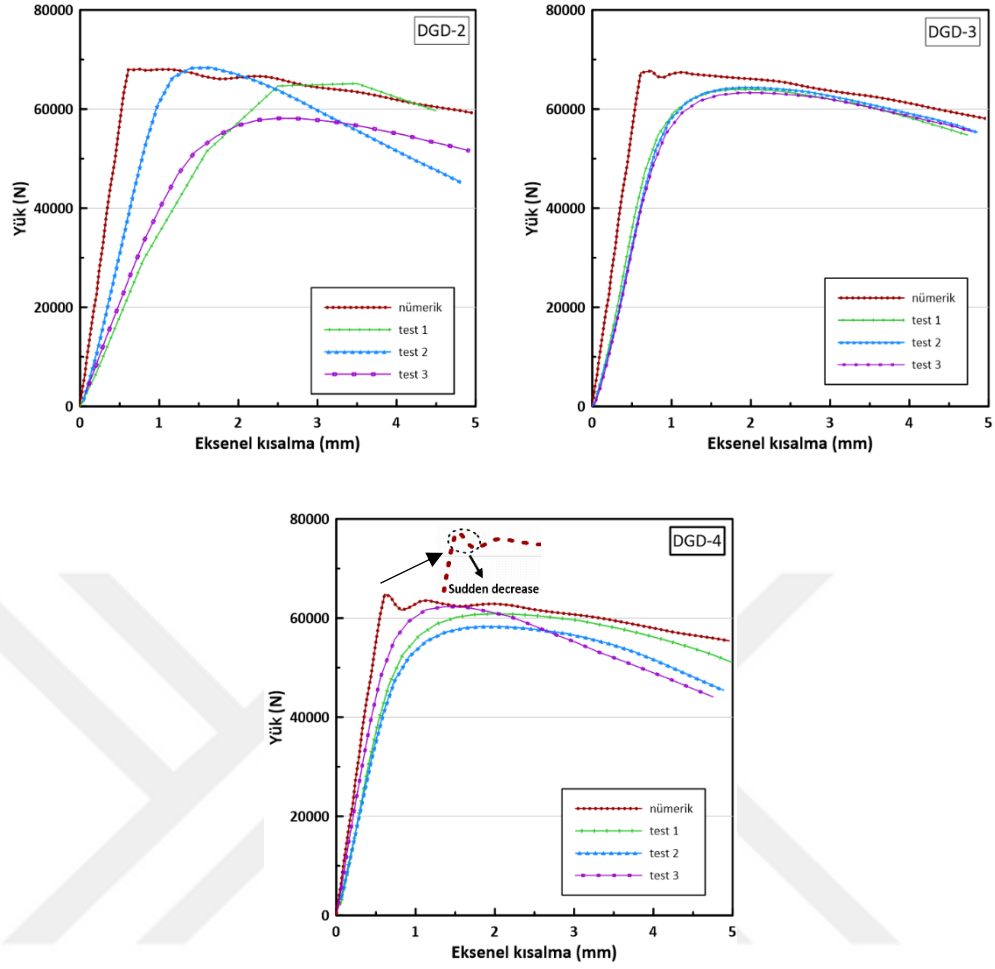
bilezik şekli de çıkıntı diğer numunelere göre tam olarak oluşmadan yanıl açılma ve buruşma kombinasyonuyla deformasyon şekli meydana gelmiştir (Şekil 5.8.).



Şekil 5.8. DKD için deneyisel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deformasyon şekilleri.

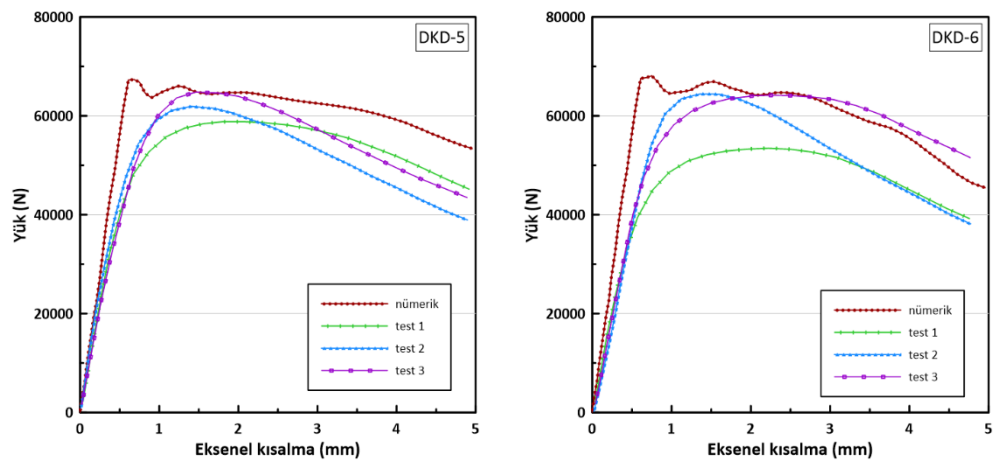
Sonlu elemanlar simülasyonları ile elde edilen delikli kolonların yük-eksenel kısalma diyagramları deneyisel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 5.9., 5.10. ve 5.11.). Deneyisel ve sayısal modellerin rijitliği arasındaki fark, malzeme ve geometrik kusurlara, yükleme kusurlarına ve boyuna dikiş kaynağının varlığına bağlanabilir. Bu noktalara rağmen, farklılıklar kabul edilebilir bir aralıkta bulunmuştur.

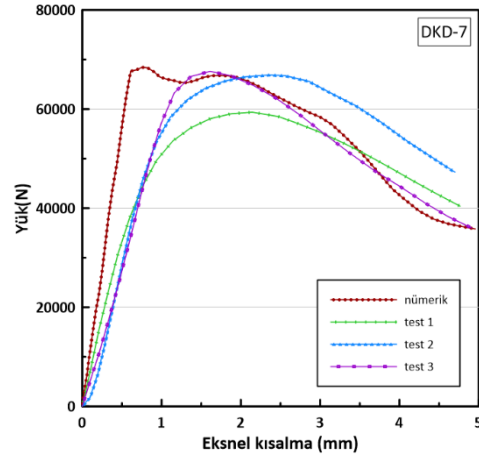
Sayısal sonuçlardan elde edilen yük eksenel kısalma eğrileri dikkatlice incelenmiştir. Şekil 5.9.'da deliğin genişliğinin artmasına bağlı olarak değişen yük-eksenel kısalma diyagramları verilmiştir. Eğri tepe noktasına ulaştıktan sonra, yükte ani bir azalma gözlenmiştir. Eğri deformasyon platosunu çizdikten sonra aşağı doğru devam etmiştir. Deneyisel çalışmalarda bu olgunun net olarak elde edilememesinin nedeni ise; test cihazının veri okumasının doğruluğu ile ilgilidir. Bu durum Şekil 5.9.'da DGD-4'ün yük-yer değiştirme diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 5.9. DGD-2-3-4 için yük-eksenel kısalma davranışı ve kıyaslanması.

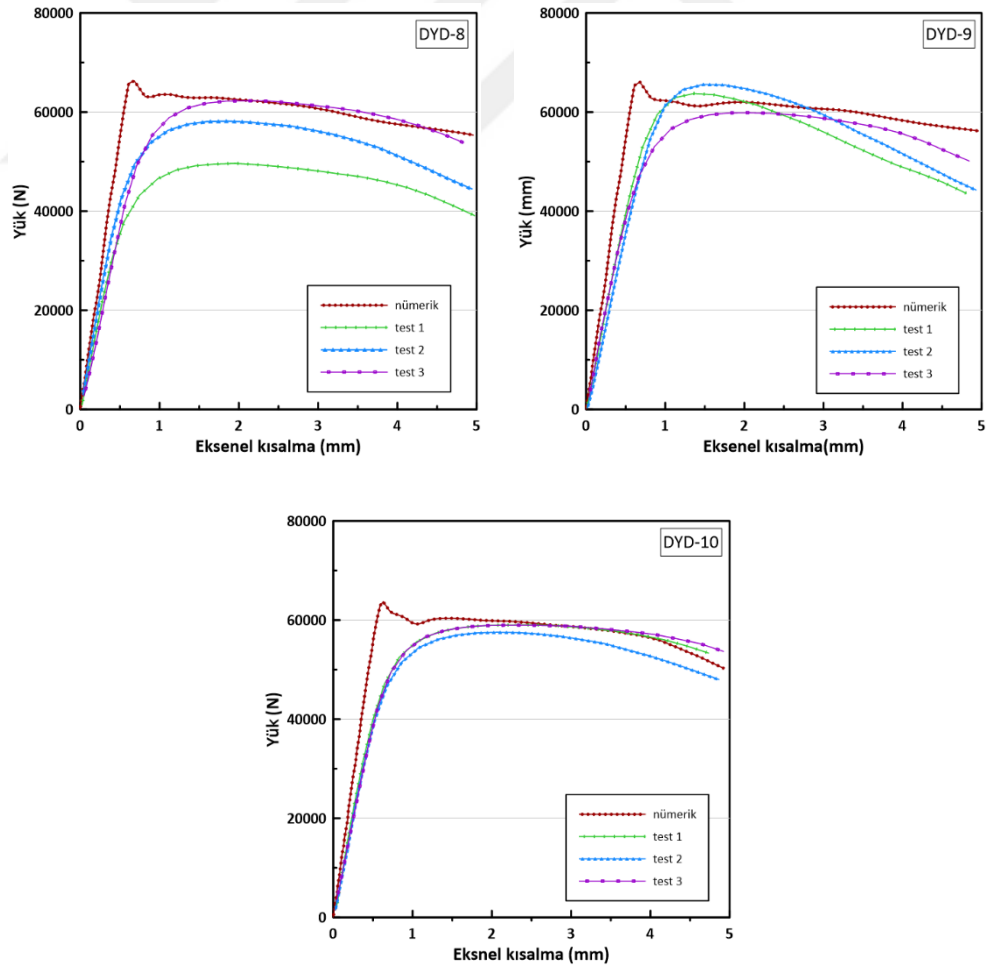
Şekil 5.10.'da deliğin kolonun merkezinden uçlarına doğru yaklaşmasına bağlı olarak değişen yük-eksenel kısalma diyagramları verilmiştir. Eğri tepe noktasına ulaştıktan sonra, yükte ani bir azalma gözlenmiştir. Eğri deformasyon platosunu çizdikten sonra aşağı doğru devam etmiştir.





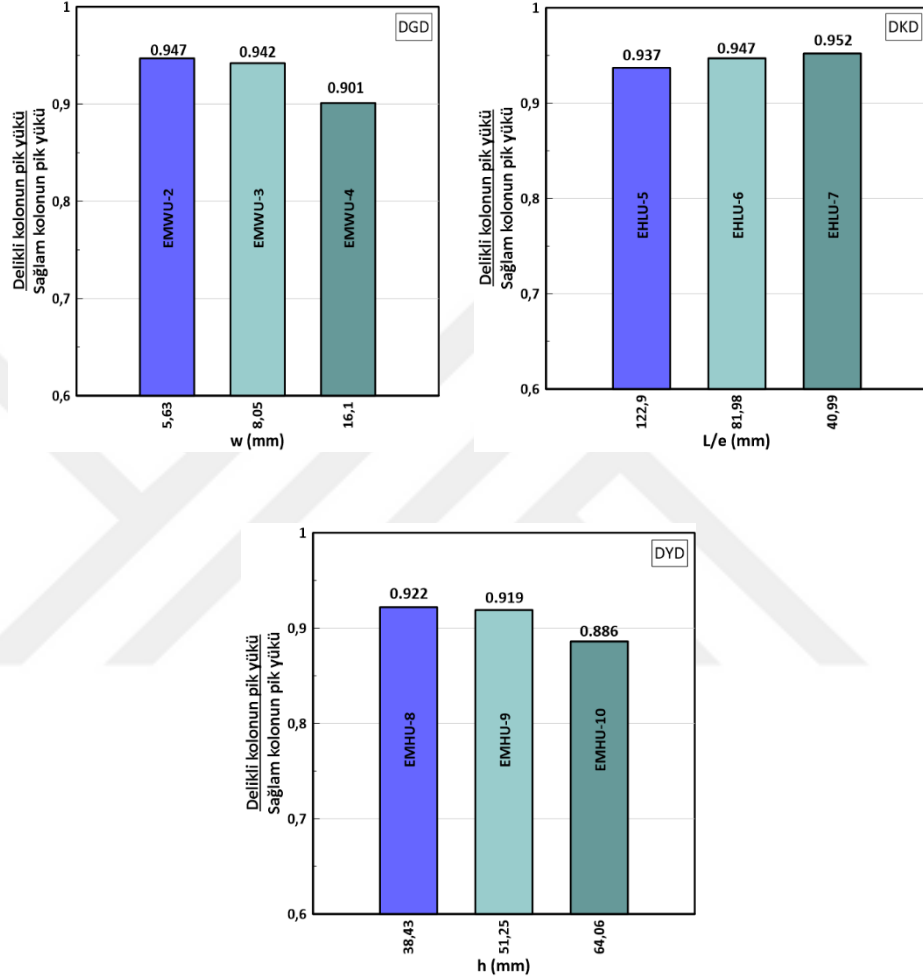
Şekil 5.10. DKD-5-6-7 için yük-eksenel kısılma davranışı ve kıyaslanması.

Şekil 5.11.'de ise delik yüksekliğinin artışına bağlı olarak değişen yük-eksenel kısılma diyagramı verilmiştir. Eğri tepe noktasına eriştikten sonra ani bir yük düşüş ardından deformasyon platosunu çizerek aşağı yönlü devam etmiştir.



Şekil 5.11. DYD-8-9-10 için yük-eksenel kısılma davranışı ve kıyaslanması.

Aşağıdaki çubuk grafikler, w , L/e ve h parametrelerine bağlı olarak eliptik delikli numunelerin tepe yük değişimlerini göstermektedir (Şekil 5.12.). Değerler genel olarak değerlendirildiğinde, eliptik deliğin geometrik büyümesi sonucunda burkulma mukavemeti azalmıştır.



Şekil 5.12. Sayısal analize dayalı olarak elde edilen delikli kolonların nihai yükünün sağlam kolonla karşılaştırılması.

Kolonların nihai yük değeri sadece delik genişliğinin artırılması durumunda %5,27, %5,78 ve %9,83 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür. Benzer azalma oranları literatürlerde belirtilmiştir [9]. Sadece delik yüksekliğinin artırılması durumunda da %7,71, %8,04 ve %11,33 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür.

Sadece delik konumu kolonun orta yüksekliğinden tabana doğru değişmesi durumunda kolonların nihai yük değeri %1,10 ve %1,57 oranında arttığı görülmüştür. Hesaplanan kapasite düşümleri ve oranları literatürde rapor edilenlerle benzer olduğu görülmektedir [2,9].

Tablo 5.8. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen nihai yüklerinin karşılaştırılması

Numune	Nihai yük (N)					$ F_{deney} - F_{fem} /F_{deney} \times \%100$ hata			
	Nümerik	Test 1	Test 2	Test 3	Test ort.	Test 1	Test 2	Test 3	Test ort.
Sağlam-1	71853	75099,34	74112,66	72900,12	74037,37	4,32	3,05	1,44	2,95
DGD-2	68065,6	65162,55	68409,76	58150,83	63907,71	4,46	0,50	17,05	6,51
DGD-3	67700,8	63976,14	64408,34	63313,65	63899,38	5,82	5,11	6,93	5,95
DGD-4	64791,9	60879,25	58301,79	62332,54	60504,53	6,43	11,13	3,95	7,09
DKD-5	67363,7	58827,42	61939,94	64791,04	61852,80	14,51	8,76	3,97	8,91
DKD-6	68107,3	53458,84	64447,44	64174,96	60693,75	27,40	5,68	6,13	12,21
DKD-7	68426,2	59376,05	66903,84	67628,82	64636,24	15,24	2,28	1,18	5,86
DYD-8	66312,7	49652,60	58186,38	62278,67	56705,88	33,55	13,97	6,48	16,94
DYD-9	66071,7	63752,54	65586,26	59884,62	63074,47	3,64	0,74	10,33	4,75
DYD-10	63706,5	59046,23	57543,97	58971,48	58520,56	7,89	10,71	8,03	8,86
						Ort. hata %8			

Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarından elde edilen nihai yükleri arasındaki ortalama fark %8 olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.8.). İki yöntem arasındaki en yüksek yük değeri farkı minimumdur. Deneysel ve sayısal modellerin tepe yükleri arasındaki fark, sabit sınır koşulu oluşturmak için silindirleri örtmek için kullanılan üst ve alt plakaların etkisine bağlanabilir.

5.5. Parametrik Çalışma Sonuçları

Analizden sonra elde edilen analiz koşulları ve burkulma yükleri Tablo 5.9.'da verilmiştir. Kontrol faktörlerinin S/N oranı üzerindeki temel etkileri Tablo 5.10.'da verilmiştir. Her kontrol faktörü için S/N oranında en yüksek değere sahip düzey, o faktör için en iyi düzey anlamına gelir.

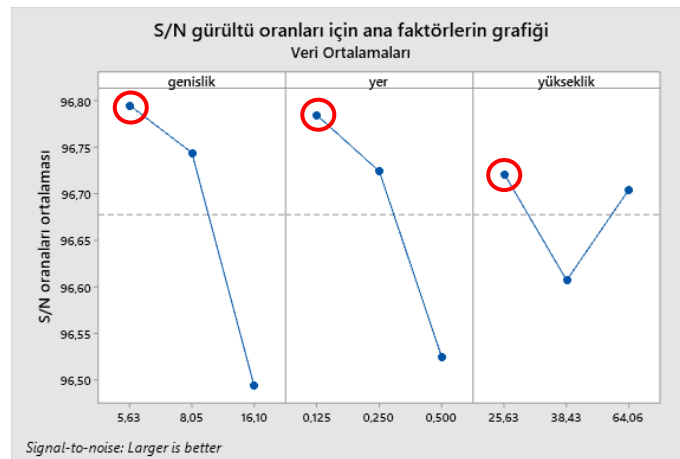
Tablo 5.9. Analiz koşulları ve burkulma yükü değerleri

Deney no	Delik genişliği (mm)	Delğin yeri (e/L oranı)	Delik yüksekliği (mm)	Nihai yük (N)
1	5,63	0,125	25,625	69938,5
2	5,63	0,25	38,430	69205,9
3	5,63	0,5	64,060	68300,4
4	8,05	0,125	38,430	69189,6
5	8,05	0,25	64,060	68912,6
6	8,05	0,5	25,625	68120,5
7	16,10	0,125	64,060	68071,6
8	16,10	0,25	25,625	67637,2
9	16,10	0,5	38,430	64690,4

Tablo 5.10. S/N oranı kullanılarak elde edilen optimum koşullar

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Max-Min	Optimum
Delik genişliği	96,80*	96,74	96,49	0,31	A1
Delik yeri	96,78*	96,72	96,52	0,26	B1
Delik yüksekliği	96,72*	96,61	96,70	0,11	C1

Böylece en iyi faktör/seviye kombinasyonu A1, B1 ve C1 olarak belirlenmiştir. Burkulma yükü için kontrol faktörlerinin S/N oranı grafiği Şekil 5.13.'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde A1, B1 ve C1 deney kombinasyonunun S/N oranına göre en iyi faktör kombinasyonu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13. S/N oranları için ana etki grafiği.

5.5.1. Anova analizi sonuçları

Değişkenlerin burkulma yüküne etki düzeyleri deneysel sonuçlara %95 güven aralığında varyans analizi (ANOVA) uygulanarak belirlenmiştir. Tablo 5.11.'de ANOVA sonuçları görülmektedir. Tablodaki sonuçlardan elde edilen bilgilere göre burkulma yükünde en önemli faktörün delik genişliği olduğu görülmektedir. Ayrıca faktörlerin katkıları incelendiğinde; delik genişliği etkisi %51,97, delik yeri etkisi %37,11 ve delik yüksekliği etki oranı %7,22 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.11. Taguchi L9 deney tasarımına göre ANOVA sonuçları

Faktörler	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri	Katkı (%)
Delik genişliği	2	9449684	4724842	14,09	0,066	51,97
Delik yeri	2	6747134	3373567	10,06	0,090	37,11
Delik yüksekliği	2	1313040	656520	1,96	0,338	7,22
Hata	2	670485	335243	-	-	3,7
Toplam	8	18180344	-	-	-	100

DF: serbestlik derecesi, MS: ortalama kare, SS: ortalama karenin toplamı

Faktörlerin önem derecesine göre bir sıralaması yapıldığında, faktörlerin sırası A, B ve C olarak listelenmiştir. A ve B faktörlerinin burkulma yüküne daha büyük etkisi olduğu görülmektedir.

Burkulma değerleri için elde edilen birinci dereceden regresyon denklemi (Denklem 5.1)'de verilmiştir.

$$\text{Nihai yük} = 72065 - 228,5w - 5523(e/L) + 1,0h \quad (5.1)$$

Birinci dereceden regresyon denkleminde burkulma yükü için belirleme katsayısı (R²) %88,52'dir.

Tablo 5.12. Burkulma yükü için 1. Dereceden regresyon denklem katsayıları

Terim	Coef	SE Coef	T-Değeri	P-Değeri
Sabit	72065	877	82,20	0,000
Delik genişliği	-228,5	48,1	-4,75	0,005
Delik yeri	-5523	1382	-4,00	0,010
Delik yüksekliği	1,0	13,5	0,08	0,942

Bağımlı değişkendeki değişimin %88,52'sine yakın olduğu için değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir, bağımsız değişkenler ile açıklanabilir (Tablo 5.12.).

Nihai yük değerinin tespiti için deneysel, 1. dereceden regresyon ve Taguchi yöntemi tahmin değerleri Tablo 5.113.'te verilmiştir. Tablo 5.13.'te tahmin sonuçları incelendiğinde en düşük ortalama hata değeri %0,37 oranıyla Taguchi yöntemi olduğu saptanmıştır.

Tablo 5.13. Nihai yük değerini saptamak için Deneysel, 1. Dereceden regresyon ve Taguchi yöntemi tahmin değerleri

Deney no	Taguchi metodu			1. Dereceden regresyon denklemi		
	Deneysel	Tahmin	Hata (%)	Deneysel	Tahmin	Hata (%)
1	69938,5	70320,9	0,55	69938,5	70113,8	0,25
2	69205,9	68969,6	0,34	69205,9	69436,2	0,33
3	68300,4	68154,3	0,21	68300,4	68081,1	0,32
4	69189,6	69043,5	0,21	69189,6	69573,6	0,55
5	68912,6	69295,1	0,56	68912,6	68908,8	0,01
6	68120,5	67884,1	0,35	68120,5	67489,7	0,93
7	68071,6	67835,2	0,35	68071,6	67759,8	0,46
8	67637,2	67491,1	0,22	67637,2	67031,1	0,90
9	64690,4	65072,9	0,59	64690,4	65663,1	1,50
		Ort. hata	%0,37		Ort. hata	%0,58

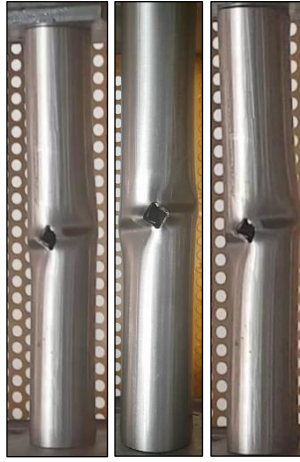
5.5.2. Güçlendirme deney sonuçları

Basma deneyinde ilk olarak hasarsız numuneler test edilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen veriler hasarlı kolonların değerlendirilmesinde şahit numune olarak kullanılmıştır. Test edilen hasarsız numunelerin basma sonrası nihai yük değerine ulaştıktan sonra meydana gelen şekil değişimi aşağıdaki Şekil 5.14.'teki gibidir.



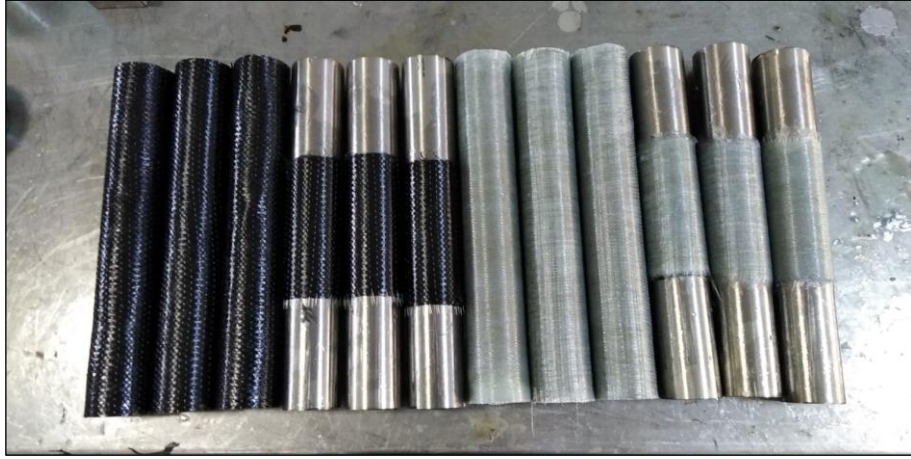
Şekil 5.14. Hasarsız numunelerin basma sonrası burkulma davranışı.

Hasarlı numuneler test edilerek hasar sonrası kolonda meydana gelen nihai yük kapasitesindeki azalmalar belirlenmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.15.'te basma deneyi sonrası hasarlı kolonlardaki şekil değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Hasarlı numunelerin basma sonrası şekil değişimi.

Son olarak karbon ve cam elyaf ile sarılarak güçlendirilen kolonlar test için hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.16.).



Şekil 5.16. Deney için hazır hale getirilen güçlendirilmiş kolonlar.



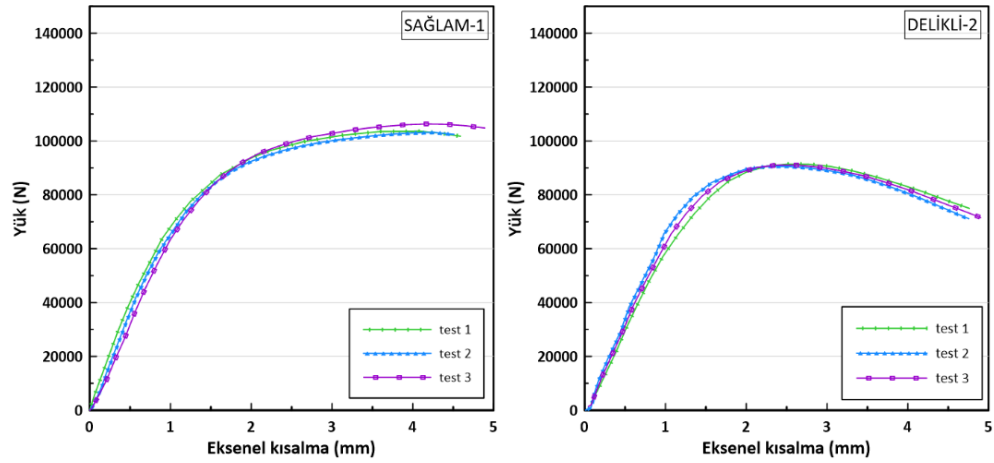
Şekil 5.17. Tam olarak sarılan kolon ile kısmi olarak sarılan kolonların deformasyon şekilleri.

Test edilen güçlendirilmiş kolonların yük altındaki deformasyon şekilleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.). Her iki şekilde de görüldüğü gibi elyaf ile tamamen sarılan kolonlarda global burkulma meydana gelirken kısmi olarak sarılan kolonlarda da lokal burkulma fenomeni meydana gelmiştir. Lokal burkulma meydana gelen kolonlardan elde edilen sonuçlara göre kısmi olarak sarılan kısım, sarılmamış bölgeden daha fazla dayanım performansı sağlamıştır. Lokal burkulma meydana gelen kısmi sarılı kolonlarda elmas şeklinde deformasyonlar gerçekleşmiştir. Bu elde edilen sonuç literatürde benzer çalışmalardaki sonuçlarla örtüşmektedir [30,38,41].



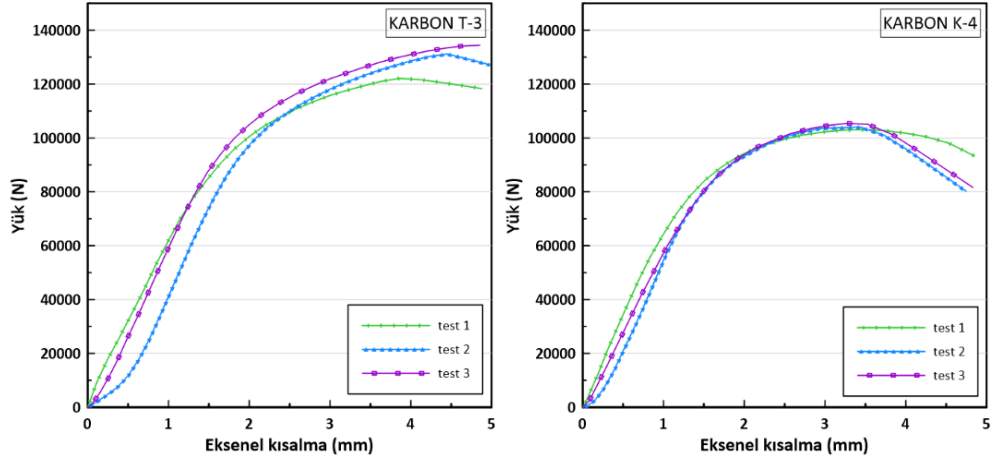
Şekil 5.18. Tam olarak sarılan kolon ile kısmi olarak sarılan kolonların deformasyon şekilleri.

Elyaf kumaşla sarılarak teste tabi tutulan numunelerin basma deneyi sonucunda elde edilen yük-eksenel kısalma diyagramları aşağıda gösterilmiştir. Sağlam kolon ile delikli kolonların basma yükü altında yük-eksenel kısalma test sonuçları incelendiğinde sağlam kolona göre delikli kolonun nihai yük değerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.19.).



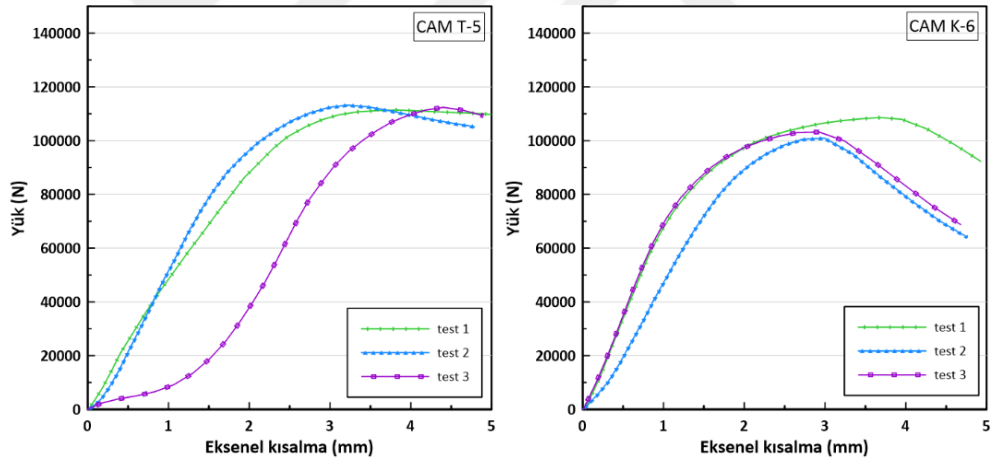
Şekil 5.19. Hasarlı-2 & Hasarsız-1 sarımsız kolonların yük-eksenel kısalma diyagramları.

Test sonuçları incelendiğinde kolonların tamamı sarıldığında kısmi sarıma göre nihai yük artışı daha fazla olmaktadır. (Şekil 5.20.).



Şekil 5.20. Karbon T-3 & Karbon K-4 sarımlı kolanların yük-eksenel kısalma diyagramları.

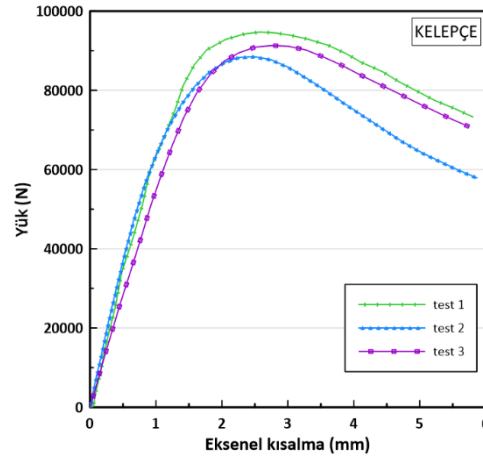
Test sonuçları incelendiğinde kolonların cam elyafı tamamı sarıldığında kısmi sarıma göre nihai yük artışı daha fazla olmaktadır. (Şekil 5.21.).



Şekil 5.21. Cam T-5 & Cam K-6 sarımlı kolanların yük-eksenel kısalma diyagramları.

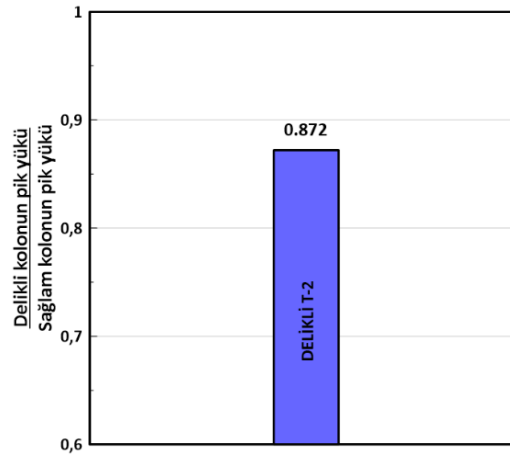
Cam elyaf ile tam olarak sarılan Şekil 5.21.'de gösterilen test 3 numunesinin rijitliğinin az oluşunun sebebi hasarlı kolon ile cam elyafın birbirine tutunmasını sağlayan epoksi harcın, hasar bölgesinde tam olarak nüfus etmemesinden kaynaklandığı yapılan incelemelerde saptanmıştır.

Şekil 5.22.'de ise kelepçe ile sarılarak teste tabi tutulan kolonların yük-eksenel kısalma diyagramını göstermektedir.



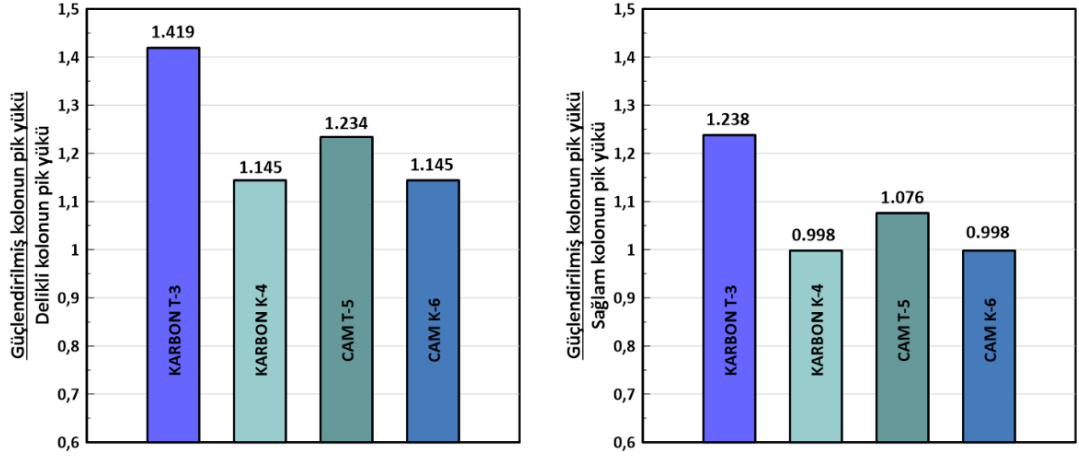
Şekil 5.22. Kelepçe ile sıkılan kolanların yük-eksenel kılma diyagramı.

Delikli kolonda meydana gelen kapasite azalışı %12,80 olarak bulunmuştur (Şekil 5.23.).



Şekil 5.23. Hasarlı-2 kolonu ile sağlam kolunun nihai yük değerlerinin kıyaslanması.

Gerçekleştirilen güçlendirme çalışmalarıyla elde edilen değerler sağlam ve delikli numunelerle kıyas edilerek aşağıdaki bar grafiklerinde gösterilmiştir (Şekil 5.24.).



Şekil 5.24. Güçlendirilen kolonların Hasarlı-2 & Hasarsız-1 kolonlara göre kıyaslanması.

Güçlendirme çalışmalarında kullanılan numunelerde elde edilen nihai yük değerlerinin tamamı aşağıdaki Tablo 5.14.'te gösterilmiştir.

Tablo 5.14. Deneysel çalışmalardan elde edilen nihai yük (N) değerleri

Numune	Sağlam-1	Delikli-2	Karbon T-3	Karbon K-4	Cam T-5	Cam K-6
Test 1	103606	91401,84	122100,6	103087,1	111382	108595,1
Test 2	103222,5	90637,07	131168	104052,2	113254,3	100959
Test 3	106323,6	91043,9	134423,3	105421	112389,1	103212,4
Testort.	104384,1	91027,6	129230,6	104186,7	112341,8	104255,5

Delikli kolonun tamamı karbon elyaf ile sarılması durumunda nihai yük taşıma kapasitesinde %41,97 oranında artış olduğu görülmüştür. Sadece delik bölgesinin karbon elyaf ile sarılması durumunda ise %14,46 oranında kapasite artışı olduğu görülmüştür.

Delikli kolonun tamamı cam elyaf ile sarılması durumunda %23,42 oranında nihai yük değerinde artış olduğu görülmüştür. Sadece delik çevresinin karbon elyaf ile sarılması durumunda %14,53 oranında artış olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle delikli kolonun elyaf ile tamamen sarılması durumunda karbon elyaf cam elyafa göre güçlendirme noktasında yaklaşık 2 kata yaklaşan kapasite artışı

sağlamaktadır. Ancak delikli kolonların karbon ya da cam elyaf ile kısmi olarak sarılması durumunda birbirine yakın güçlendirme sağladığı bulunmuştur.

Hasarlı kolonların elyaf ile sarılıp güçlendirilmesinde elde edilen sonuçlardan bir diğeri de lokal burkulma fenomenini uzatma durumudur. Bu sonuç yapılar da kullanılan taşıyıcı kolonlardan beklenen hizmet süresinin uzaması anlamına gelmektedir. Bu durum dayanım, hizmet süresi ve güvenlik açısından hedeflenen bir durumdur.

Literatürde elyaf sarım tekniği uygulamalarında daha çok hasarlı bölgelere yoğunlaşarak kısmi sarım uygulandığı görülmektedir. Ancak bu tez çalışmasında kolonun tam boy sarılması halinde kapasite ve deformasyon durumuna etkisi de incelenerek literatürde fazla yer bulmayan bu duruma açıklık getirilmeye çalışılmıştır.

Karbon fiber kumaş maliyet açısından cam elyaf kumaşa göre yüksektir. Karbon elyaf cam elyafa göre beş kat daha maliyeti yüksektir. Ancak karbon elyaf cam elyafa göre çevresel faktörlere daha dayanıklıdır.

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Genel Sonuçlar

Delik genişliği, delik yeri ve yükseklik parametrelerindeki değişimin taşıyıcı kolonların burkulma yüküne etkileri sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar ile hesaplanmıştır.

1. Sağlam numunenin sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra eksenel yük altında hesaplanan tepe yük değeri literatürdeki teorik formül ile karşılaştırılmıştır. Teorik yük değeri ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen nihai yük arasında %2,54 hata payı hesaplanmıştır. Ortaya çıkan bu hata payının kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı bulunmuştur.

2. Deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile elde edilen yük eksenel kısalma davranışı karşılaştırıldığında, sonuçlar tutarlı bulunmuştur. Sayısal yöntem geçerli kılındıktan sonra, parametrelerdeki değişikliğe bağlı olarak nihai yük sonuçları incelenmiştir. İnceleme sonucunda;

a. Nihai yük değeri yalnızca delik genişliği artışına bağlı olarak %5,27, %5,78 ve %9,83 oranında azaldığı hesaplanmıştır.

b. Nihai yük değeri yalnızca delik yüksekliği artışına bağlı olarak %7,71, % 8,04 ve %11,33 oranında azaldığı hesaplanmıştır.

c. Nihai yük değerinin, yalnızca delik konumu kolonun orta yüksekliğinden uçlara doğru değişmesi durumunda %1,10 ve %1,57 oranında arttığı hesaplanmıştır.

3. Her iki yöntem kullanılarak elde edilen deformasyon şekillerinin benzer olduğu bulunmuştur. Sağlam numuneye eksenel yük uygulandığında, kolonun tepesinde fil ayağı bir çökme meydana gelmiştir. Delikli kolonlar için ise delik bölgesinde dışa katlanma mekanizması oluşmuştur.

4. Delikli kolonların ortalama toplam enerji absorbe etme değeri 287,5 J olarak bulunmuştur. Bu ortalama değer sağlam numune ile karşılaştırıldığında hasarlı kolonların toplam enerji yutma kabiliyetinin %9,01 oranında azaldığı sonucu ortaya konmuştur.

5. Burkulma yükünü etkileyen faktörlerin Taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. Burkulma yükünü maksimize eden delik genişliği, delik yeri ve delik yüksekliği koşulları hesaplanarak sinyal/gürültü oranları belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen optimum değerler incelendiğinde; Delik genişliği 5,63 mm, delik yeri (e/L) 0,125 ve delik yüksekliği 25,63 mm ise burkulma yükü maksimum bulunmuştur.

6. ANOVA analizi sonuçlarına göre burkulma yükünde en etkili parametrelerin sırasıyla delik genişliği (%51,97), delik yeri (%37,11) ve delik yüksekliği (%7,22) olduğu sonucuna varılmıştır.

7. Tahmin deneyleri sonucunda birinci dereceden matematiksel eşitlik kullanılarak ortalama hata oranı %0,58 olarak hesaplanmıştır. Taguchi yönteminin tahmininde ortalama hata oranı %0,37 olarak hesaplanmıştır. Eliptik delikli kolonların burkulma yükünün hesaplanmasında Taguchi yönteminin kullanılmasının iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

8. Delikli kolonun tamamı karbon elyaf ile sarılması durumunda %41,97 oranında nihai yük değerinde artış sağlanmıştır. Sadece delik çevresinin karbon elyaf ile sarılması durumunda %14,46 oranında artış sağlanmıştır. Delikli kolonun tamamı cam elyaf ile sarılması durumunda %23,42 oranında nihai yük değerinde artış

sağlanmıştır. Sadece delik çevresinin karbon elyaf ile sarılması durumunda %14,53 oranında artış sağlanmıştır.

9. Sadece delik çevresi sarılması durumunda karbon elyaf ile cam elyaf performansı hemen hemen aynı sınırlarda olup delikli kolonun nihai yük değeri sağlam numuneyle aynı mertebelere ulaştığı bulunmuştur.

10. Elyaf ile delikli kolonların sarılmasında elde edilen sonuçlardan bir tanesi de lokal burkulma geçikmesi durumudur. Bu da yapılarda kullanılan taşıyıcı kolonlardan beklenen hizmet süresinin uzaması anlamına gelmektedir. Bu durum dayanım, hizmet süresi ve güvenlik açısından istenen bir durumdur.

6.2. Öneriler

1. Bundan sonra yapılacak farklı araştırmalarda, tamir kelepçesi kullanımı veya plaka destekleri ile hasarlı bölge çevresi kaynak edilerek taşıma kapasitesinde artışlar sağlanabilir.

2. Boyuna kaynak dikişi bulunan silindirik kolonların basma yükü altında davranışını etkileyen kaynak dikişi varlığının etkisi nümerik çalışmalarda modellenerek daha da hassas bir çalışma gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Toda, S., Buckling of cylinders with cutouts under axial compression, SESA-JSME Joint Conference, 1983.
- [2] Jullien, J. F., Limam, A., Effects of openings of the buckling of cylindrical shells subjected to axial compression, Thin-Walled Structures 31: 187-202, 1998.
- [3] Umbarkar, K. R., Patton, L. M., Singh, K. D., Effect of single circular perforation in lean duplex stainless steel (LDSS) hollow circular stub columns under pure axial compression, Thin-Walled Structures 68: 18-25, 2013.
- [4] Rouzegar, J., Elahi, M., Experimental and numerical study on axial compression of metal tubes with holes, International Journal of Mechanical and Production Engineering, ISSN:2320-2092, Volume- 4, Issue-3, Mar., 2016.
- [5] Shariati, M., Sedighi, M., Saemi, J., Allahbakhsh, H. R., A Numerical and Experimental Study on Buckling of Cylindrical Panels Subjected to Compressive Axial Load, Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering 56: 10, 609-618, 2010.
- [6] Shariati, M., Rokhi, M. M., Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with elliptical cutout subject to axial compression. Thin-Walled Structures 46: 1251-1261, 2008.
- [7] Qiao, H., Pan, J., Chen, Y., Pan J., Behaviour of stub columns with initial crack defects under axial compression, Thin-Walled Structures, Volume 163, 107736, 2021.
- [8] Moen, C., D., Schafer, B., W., Experiments On Cold-Formed Steel Columns With Holes, Thin-Walled Structures, Volume 46, Issue 10, Pages 1164-1182, 2008.
- [9] Ifayefunmi, O., Buckling behavior of axially compressed cylindrical shells: Comparison of theoretical and experimental data, Thin-Walled Structures 98: 558-564, 2016.

- [10] Kulatunga, M., P., Macdonald, M., Rhodes, J., Harrison, D., K., Load capacity of cold-formed column members of lipped channel cross-section with perforations subjected to compression loading – Part I: FE simulation and test results, *Thin-Walled Structures*, Volume 80, Pages 1-12, 2014.
- [11] Lee, S. E., Sahin, S., Rigo, P., Park, P. M., Paik, J. K., Ultimate strength of cylindrical shells with cutouts”, *Ultimate strength of cylindrical shells with cutouts, Ships and Offshore Structures*, 12:sup1, S153-S173, DOI:10.1080/17445302.2016.1271592, 2017.
- [12] Feng, R., Mou, X., Chen, A., Ma, Y., Tests of aluminium alloy CHS columns with circular openings, *Thin-Walled Structures* 109: 113-131, 2016.
- [13] Sangeetha, P., Revathi, S., M., Sudhakar, V., Swarnavarshini, D., Sweatha, S., Behaviour of cold-formed steel hollow beam with perforation under flexural loading, *Materialstoday:Proceedings*, Volume 38, Part 5, Pages 3103-3109, 2021.
- [14] Mon, T., Y., Selvam, J., Buckling Behaviors of Cold-Formed Steel Built-Up Columns under Axial Compression Tests: Review Paper, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Volume 10 Issue 1, May 2021.
- [15] Yao, X., Li, X., Yanli Guo, Y., Elastic Buckling Behavior of Thin Plate with Circle Holes under Axial Compression, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 283, 012021, 2019.
- [16] Ifayefunmi, O., Plastic Buckling of Axially Compressed Cylinders, Correlation between Theory and Experiments, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)* Vol.9, Issue 2, 569-578, Apr 2019.
- [17] Singh, T., G., Chan, T., Effect of access openings on the buckling performance of square hollow section module stub columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 177, 106438, 2021.
- [18] Xiang, Y., Zhou, X., Shi, Y., Xu, L., Xu, Y., Experimental investigation and finite element analysis of cold-formed steel channel columns with complex edge stiffeners, *Thin Walled Structures*, Volume 152, 106769, 2020.
- [19] Fereidoon, A., Kolasangiani, K., Akbarpour, A., Shariati, M., Study on buckling of steel cylindrical shells with an elliptical cutout under combined loading, *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, Vol. 3, No.1, pp. 13-25, Autumn, 2013.

- [20] Zhao, C., Niu, J., Zhang, Q., Zhao, C., Xie, J., Buckling Behavior of a Thin-Walled Cylinder Shell With The Cutout Imperfections, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* ISSN:1537-6494 (Print) 1537-6532 (Online), 2018.
- [21] Vaz, M. A., Cyrino, J. C. R., Hernandez, I. D., Zegarra, V. D., Martinez, J. L., Liang, D. A., Experimental and numerical analyses of the ultimate compressive strength of perforated offshore tubular members, *Marine Structures* 58: 1-17, 2018.
- [22] Basmacı, G., Kırbaş, İ., Ay, M., Peker, M., Karma Taguchi ve yüzey yanıt yöntemi kullanılarak astm b574 (hastelloy c-22)'in tornalanması esnasındaki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu, *Sakarya üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 761-771, 2018.
- [23] Akkuş, H., Yaka, H., Optimization of Turning Process by Using Taguchi Method, *Sakarya University Journal of Science*, 22 (5), 1444-1448, 2018.
- [24] Yılmaz, M., Keskin, M., E., Determination of Optimal Reading Conditions by Taguchi Method, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7-1, 25-32, 2019.
- [25] Erdem, V., Belevi, M., Koçhan, C., Taguchi metodu ile plastik enjeksiyon parçalarda çarpılmanın en aza indirilmesi, *Deü Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:12, Sayı:2, sh.17, 2010.
- [26] Xu, Y., Tang, H., Chen J., Jia, Y., Liu, R., Numerical analysis of CFRP-confined concrete-filled stainless steel tubular stub columns under axial compression, *Journal of Building Engineering*, Volume 37, 102130, 2021.
- [27] Sezan, H., T., İnce cidarlı 6063-T6 Alüminyum tüpün yük taşıma kabiliyetinin artırılması, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2010.
- [28] Rouzegar, J., Assaee, H., Elahi, S. M., Asiaei, H., Axial crushing of perforated metal and composite-metal tubes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 349, 2018.
- [29] OSZVALD, K., Buckling of corroded steel angle members under compression, *Budapest University of Technology and Economics, PhD Dissertation*, 2014.

- [30] Nazari, M., Khedmati, M. R., Khalaj, A. F., A numerical investigation into ultimate strength and buckling behavior of locally corroded steel tubular members, *Latin American Journal of Solids and Structures* Vol 11 No 6, 2014.
- [31] Karagah, H., Shi, C., Dawood, M., Belarbi, A., Experimental investigation of short steel columns with localized corrosion, *Thin-Walled Structures* 87: 191-199, 2015.
- [32] Wang, H., Zhang, Z., Qian, H., Fan, F., Effect of local corrosion on the axial compression behavior of circular steel tubes, *Engineering Structures* Volume 224, 111205, 2020.
- [33] Wang, R., Guo, H., Shenoi, R., A., Experimental and numerical study of localized pitting effect on compressive behavior of tubular members, *Marine Structures*, Volume 72, 102784, 2020.
- [34] Yousefi, O., Narmashiri, K., Hedayat, A., A., Karbakhsh, A., Strengthening of corroded steel CHS columns under axial compressive loads using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 178, 106496, March 2021.
- [35] Wei, Y., Wu, Z., Wang, X., Jiang, S., Mechanical behavior of locally corroded circular steel tube under compression, *Structures*, Volume 33, Pages 776-791, October 2021.
- [36] Ghaemdoost, M., R., Narmashiri, K., Yousefi, O., Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP, *Construction and Building Materials* 126, 1002–1011, 2016.
- [37] Shaat, A., Fam, A., Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fibre reinforced polymers, *Canadian Journal of Civil Engineering* Volume 33, Number 41, 2006.
- [38] Hou, B., Lu, X., Zhu, X., Axial compression performance and failure modes of 304 stainless-steel/GFRP hybrid tubes, *Materials Research Express* , Volume 6, Number 5, 2019.
- [39] Nabati, A., Ghazijahani, T., G., CFRP-reinforced circular steel tubes with cutout under axial loading, *Journal of Constructional Steel Research* 164;105775, DOI:10.1016/j.jcsr.2019.105775, 2020.
- [40] Thirumalini, S., Shanmugapriya, Atchaya, Experimental and numerical investigation of short GFRP- reinforced steel tubular short columns, *Materialstoday:Proceedings*, Volume 43, Part 2, Pages 1938-1943, 2021.

- [41] Shokrgozar, H., R., Akrami, V., Ma'af, T., J., Shahbazi, N., The effect of different retrofitting techniques on the axial load carrying capacity of damaged cylindrical shells, Structures, Volume 31, Pages 590-601, 2021.
- [42] Ghazijahani, T.G., Jiao, H., Holloway, D., Structural behavior of shells with different cutouts under compression: An experimental study", Journal of Constructional Steel Research 105:129-137, DOI:10.1016/j.jcsr.2014.10.020, 2015.
- [43] Teng, J., G., Hu, Y., M., Behaviour of FRP- jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression, Construction and Building.
- [44] Ye, J., Hajirasouliha, I., Becque, J., Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns, Thin-Walled Structures 125: 245-258, 2018.
- [45] Cerit, M., E., Şehirler arası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [46] Layus, P., Underwater welding for Arctic offshore structures and shipbuilding, Conference Proceeding of The Annual Conference of Young Scientists and Specialists "New materials and technologies" KMUS-2013 (CRISM "Prometey")At: Saint-Petersburg, Russia, 2013.
- [47] Cottrel, A., H., The Mechanical Properties of Matter, John Wiley and Sons, Inc., New York, p.289, 1964.
- [48] Fekete, G., Varga, L., The effect of the width to length ratios of corrosion defects on the burst pressures of transmissions pipelines. Engineering Failure Analysis 21: 21-30, 2012.
- [49] Ifayefunmi O., Blachut, J., The Effect Of Shape, Thickness And Boundary Imperfections On Plastic Buckling Of Cones, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2011-49055, ASME, vol.2, NY, USA, DOI: 10.1115/OMAE2011-49055, 2011.
- [50] Pençe, E., Eğitim amaçlı ansys paket programının tanıtılması, ansys öğretimi ve uygulama örnekleri, Mezuniyet Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitim Bölümü, 2007.
- [51] Kayar, H., Çift Taraflı Konik ve Alüminyum Malzemeden Oluşmuş Ezilme Kutusu Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 2019.

- [52] Ls-Dyna, Keyword user's manual Volume I, Version 971, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California, p.1478., 2007.
- [53] Stelzmann, U., Die grosse Elementbibliothek in LS-DYNA-Wann nimmt man was?, ANSYS Conference & 28th CADFEM Users., 2010.
- [54] Nabati, A., Ghazijahani, T., G., CFRP-reinforced circular steel tubes with cutout under axial loading, Journal of Constructional Steel Research 164;105775, DOI:10.1016/j.jcsr.2019.105775, 2020.
- [55] Bari, M. A Finite Element Study Of Shell And Solid Element Performance İn Crash-Box Simulations, Thesis, University West, Sweden, p.6., 2015.
- [56] Zor, M., Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler, Dokuz Eylül Üniversitesi, Kompozit Malzeme Mekaniği, Ders notları, 2018.
- [57] Feyzullahoğlu, E., İlhan, R., Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf lar ve Dolgu Maddeleri, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, Vol:6, No:2, (355-381), 2019.
- [58] Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Genişletilmiş 2. Baskı, Seçkin Yayınları, Ankara, 63-65, 2006.
- [59] Ross, P., J., Taguchi techniques for quality engineering, McGraw – Hill International book company, ISBN 0-07-114663-6, 1-73., 1996.
- [60] Taylan, D., Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [61] Krishnaiah, K., Shahabudeen, P., Applied design of experiments and Taguchi methods, PHI Learning Pvt. Ltd., Delhi, India, 2012.
- [62] Tonta, Y., Varyans Analizi (ANOVA), Kovaryans Analizi (ANCOVA), Faktöriyel ANOVA, Çoklu Varyans Analizi (MANOVA), Hacettepe Üniversitesi, Bilgi ve Belge Yönetimi Bölümü, <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~tonta/courses/fall2007/sb5002/sb5002-10varyans-analizi.pdf>, Erişim Tarihi:06.02.2021
- [63] Asilturk, I., Akkus, H., Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, Measurement, vol. 44, pp.1697-1704., 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğrul BÖLÜKBAŞI

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Doktora	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Gebze Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	2012
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	2009
Lise	Gebze Anadolu Lisesi	2005

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2009-Halen	Gebze Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü	Makine Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER

1. A buckling behavior of elliptic perforated steel CHS columns exposed to axial compression load, <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255908>

HOBİLER

Bağlama çalmak, trekking