

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BERKİTME LEVHALARININ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN
YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

Gökhan DOĞAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BERKİTME LEVHALARININ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN
YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

Gökhan DOĞAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2021

ANTALYA

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

**BERKİTME LEVHALARININ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN
YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

Gökhan DOĞAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
tarafından 2012.01.0102.015 Nolu proje ile desteklenmiştir.**

OCAK 2021

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BERKİTME LEVHALARININ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN
YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Gökhan DOĞAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez .../.../20... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ferhat ERDAL (Danışman)

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Doç. Dr. Erkan DOĞAN

ÖZET

BERKİTME LEVHALARININ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Gökhan DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Ocak 2021; 76 sayfa

Dairesel boşluklu çelik petek kirişler başlangıçlarından beri etkin bir çelik yapı modeli olarak artan bir ilgiye sahip olmuşlardır. Bu kirişlerin en önemli özelliği, aynı profil kesitine sahip normal formdaki çelik kirişlere oranla yükseklik, atalet momenti ve kesit katsayısını artırmaktadır. Dairesel boşluklu petek kirişler geniş açıklıkları kolay geçebilmek için çatı ve döşeme kirişleri olarak da kullanılır. Eğimli çatı tasarımında da ağırlık ve maliyet düşürülmesiyle ideal sonuçlar vermektedirler. Önerilen çalışmada dairesel boşluklu petek kirişlerin optimum boyutlandırılması, yük altında taşıma kapasitelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Berkitme levhalarının bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerine etkisi de tez kapsamında incelenmiştir. Tez araştırmasının ilk aşaması dairesel boşluklu petek kirişlerin harmoni arama ve parçacık sürü teknikleri kullanılarak optimum boyutlandırılmasına odaklanmıştır. Bu yöntemler IPN kesitleri arasında uygun profili seçerek yönetmelikte tanımlanan tasarım sınırlamalarını sağlarlar ve sistemin ağırlığı minimuma indirgerler. Çalışmanın ikinci aşaması olan deneysel süreçte ise; ilk kısımda optimizasyonu yapılan 8 adet IPN kesit dairesel boşluklu petek kirişin hidrolik güç üniteli basınç silindiri altında dayanımları test edilmiştir. Boşluk çevrelerine yerleştirilen yatay, düşey ve dairesel güçlendirici berkitme levhalarının yerel burkulma ve moment-kesme aktarımı değerlendirmelerine bağlı olarak gövde açıklıklı çelik kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerine etkisi de detaylı olarak incelenmiştir. Son olarak deneyleri yapılan dairesel boşluklu petek kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve doğrusal olmayan davranışları deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle kıyaslanarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında güçlendirilmiş kirişlerin pratik uygulamalarda kullanılabilirliği ve optimizasyon yöntemlerinin yapısal tasarımda yaygın kullanılması amaçlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Dairesel boşluklu petek kirişler, Harmoni arama, Kirişlerin göçme durumları, Parçacık sürü, Sonlu elemanlar yöntemi, Yapı optimizasyonu

JÜRİ: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Doç. Dr. Erkan DOĞAN

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE STIFFENERS ON THE LOAD BEARING CAPACITIES OF CELLULAR BEAMS WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

Gökhan DOĞAN

MSc / PhD Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

January 2021; 76 pages

Cellular beams have gained increasing interest as an effective steel construction model since their inception. The most important feature of these beams is that they increase the height, moment of inertia and cross-section coefficient compared to normal form steel beams with the same profile section. Cellular beams are also used as roof and floor beams to easily cross wide openings. They also give ideal results in sloping roof design by reducing weight and cost. In the proposed study, optimum dimensioning of cellular beams, determination of their carrying capacity under load and their comparative analysis with finite element method were made. The effect of the reinforcing plates on the load-bearing capacity of these beams was also examined within the scope of the thesis. The first phase of the thesis research focused on optimum sizing of cellular beams using harmony search and particle swarm techniques. These methods provide the design limitations defined in the regulation by choosing the appropriate profile among the IPN sections and minimize the weight of the system. In the experimental process, which is the second stage of the study; In the first part, the strength of 8 IPN cross-section cellular beams under pressure cylinder with hydraulic power unit was tested. Depending on the local buckling and moment-shear transfer evaluations of the horizontal, vertical and circular stiffeners plates placed around the cavities, the effect of the body span steel beams on the final load-carrying capacity was also examined in detail. Finally, the load-carrying capacity and nonlinear behavior of the experimental cellular beams were compared with the finite element method using the data obtained from the experimental studies. In light of the results obtained, it is aimed to use steel beams in practical applications and to use optimization methods widely in structural design.

KEYWORDS: Cellular beams, harmony search, failure modes of beams, particle swarm, finite element method, structure optimization,

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Assoc. Prof. Dr. Erkan DOĞAN

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında literatürde kısıtlı bulunan 8 adet IPN kesitli dairesel boşluklu çelik kirişin normal formda ve güçlendirilmiş halleri ile deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda kirişlerin karşılaştırılmalı analizleri yapılarak yük altında kapasiteleri ve davranışları incelenmiştir.

Çalışmada deneysel süreç Akdeniz üniversitesi yapı laboratuvarında yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle kirişlerin doğrusal olmayan analizleri ABAQUS programı kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kirişlerin ekonomik olarak boyutlandırılması ve tasarımlarda kullanılması, çeşitli mühendislik uygulamalarında geniş yer bulması ve güçlendirilmiş kirişlerin ülkemizdeki çeşitli uygulamalarda kullanılmasının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır.

Bu tezin hazırlanmasında her konuda bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, çok değerli hocam, danışmanım Doç. Dr. Ferhat ERDAL'a sonsuz saygılarımı sunar ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez kapsamında vermiş olduğu önerilerden dolayı Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK hocama teşekkür ederim.

Yaşantım boyu hiçbir konuda benden desteklerini esirgemeyen ve bu günlere gelmemde üzerimde çok büyük emekleri olan, sevgili annem Şahinaz DOĞAN'a ve babam Ekrem DOĞAN'a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	iv
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Literatür Araştırması	3
2.2. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Avantajları.....	11
2.3. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Uygulama Alanları	13
2.4. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Göçme Durumları.....	14
2.4.1. İkincil eğilme (Secunder-vierendeel Bending)	14
2.4.2. Gövde burkulması (Web-post buckling).....	15
2.4.3. Yanal burkulma (Lateral buckling).....	15
2.4.4. Kaynak bölgesinden kopma (Rupture of the welded joint)	16
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Kirişlerin Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler	17
3.1.1. Harmoni arama yöntemi.....	17
3.1.2. Partikül küme optimizasyon yöntemi	19
3.2. Dairesel Boşluklu Kirişlerin Geometrik Özellikleri	21
3.3. Davranış Sınırlayıcılar	21
3.3.1. Maksimum moment kapasitesi.....	22
3.3.2. Kirişin kesme kuvveti kapasitesi.....	22
3.3.3. Vierendeel (Sekonder) eğilme kapasitesi.....	23
3.4. Dairesel Boşluklu Kirişlerin Optimizasyonu	24
3.4.1. 4 metre açıklıklı kirişin optimizasyonu	24
3.4.2. 5-metre açıklıklı kirişin optimizasyonu	28
3.5. Kirişlerin Deney Öncesi Hazırlıkları	29
3.5.1. DBP kirişlerin elde edilmesi	29

3.5.2.	Kirişlerin test edilmesi	29
3.6.	Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi.....	31
3.6.1.	Abaqus/Cae 6.14-1 eleman tipleri.....	31
3.6.2.	Ağ ve eleman tipinin belirlenmesi	33
3.6.3.	Malzeme özelliklerin girilmesi	38
3.6.4.	Sınır koşulları ve serbestlikler.....	39
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
4.1.	Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Testleri (tekil yükleme).....	41
4.1.1.	IPN_DBPK_200 Berkitmesiz kiriş testi	43
4.1.2.	IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli kiriş testi.....	45
4.1.3.	IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli kiriş testi	46
4.1.4.	IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli kiriş testi	47
4.1.5.	IPN_DBPK_240 Berkitmesiz kiriş testi	50
4.1.6.	IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli kiriş testi.....	52
4.1.7.	IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kiriş testi	54
4.1.8.	IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli kiriş testi	56
4.2.	Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi.....	59
4.2.1.	IPN_DBPK_200 Berkitmesiz SEA.....	59
4.2.2.	IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli SEA	60
4.2.3.	IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli SEA	62
4.2.4.	IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli SEA	63
4.2.5.	IPN_DBPK_240 Berkitmesiz SEA.....	65
4.2.6.	IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli SEA	66
4.2.7.	IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli SEA	68
4.2.8.	IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli SEA	69
5.	SONUÇLAR.....	71
6.	KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ		

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Berkitme Levhalarının Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Yük Taşıma Kapasitelerine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

25.01/2021

Gökhan DOĞAN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Alan
I	: Atalet momenti
σ	: Gerilme
σ_y	: Akma gerilmesi
E	: Elastisite modülü
P_y	: Akma kapasitesi
H	: Harmoni
μ	: Partikül sayısı
I^i	: Harmoni vektörü
N_d	: Tasarım değişkeni
I'	: Yeni harmoni matrisi
r_i	: Rastgele bir sayı
i	: Matris sütunu
hmcr	: Harmoni hafıza gözönünde bulundurma oranı
par	: Derece uygunluğu
N_{cyc}	: Harmoni döngü maksimum sayısı
P	: Partikül
I	: Tasarım vektörü
v	: Hız vektörü
Δt	: Zaman aralığı
k	: İterasyon adımı
b_f	: Kiriş başlık genişliği

- t_w : Kiriş gövde kalınlığı
- t_f : Kiriş başlık kalınlığı
- H_s : Kiriş yüksekliği
- D_0 : Kiriş boşluk çapı
- e : Boşluklar arası mesafe
- S : İki boşluk merkezi arası mesafe
- P_V : Maksimum kesme kuvveti kapasitesi
- V_{maxsup} : Mesnetteki kesme kuvveti
- f_u : Maksimum çelik çekme kapasitesi
- r : 0-1 arasında herhangi bir sayı
- P_{vh} : Yanal kesme kuvveti kapasitesi
- V_{Hmax} : Kiriş gövde bölgesinde yanal kesme kuvveti
- hms : Harmoni hafıza matrisi
- L : Kiriş boyu
- F_u : Kiriş kapasite değeri
- M_u : Maksimum moment kapasitesi
- M_p : Tasarım momenti

Bu tez kapsamında kullanılan ondalık işareti nokta (.) olarak seçilmiştir.

Kısaltmalar

SAISC : Güney Afrika Çelik Yapı Enstitüsü

CNC : Bilgisayar Nümerik Kontrol

BS : British Standarttı

HA : Harmoni Arama

PK : Partikül Küme

DPBK : Dairesel Boşluklu Petek Kiriş

LVDT : Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler

SEA : Sonlu Eleman Analizi

MTA : Maden Tetkik Arama

YSA : Yapay Sinir Ağı

ML : Makine Öğrenimi

ANFIS: Nüro-bulanık Sistem

RCSA : Gerçek Kodlu Benzetimli Tava

CA : Kültürel Algoritma

SFLA : Karışık Kurbağa Sıçrama Algoritması

R : Korelasyon Katsayısı

RMSE : Kök Ortalama Kare Hatası

MAE : Ortalama Mutlak Hata

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Huo ve D’Mello (2013) Kompozit yüzeysel dairesel zemin kirişinin (a) profilli çelik zemin kaplaması ve; (b) prekast zemin üniteleri (ASD Westok Limited'in izniyle) ile uygulamaları.	4
Şekil 2.2. Sonvk, Van Impe, ve Belis (2014) (a) Üretim süreci; (b) Altıgen kesitli elemanın kaynak yapılması işlemi; (c) Dairesel kesitli elemanların geometrisinin kesilmesi.....	4
Şekil 2.3. Kloos (2017) Yapının sınır koşulları ve yük durumu (ABAQUS).....	6
Şekil 2.4. Zaher vd. (2018) Deney düzeneği ve yanal destekler.....	6
Şekil 2.5. Zaher vd. (2018) (a) Sınır koşulları ve yanal destekler; (b) Sonlu eleman ağ yapısı	7
Şekil 2.6. Kloos ve Walls (2019) Üç çeşit yangın durumu ve yüksek sıcaklıkla karşılaşılan yapısal öge diyagramı (ABAQUS)	8
Şekil 2.7. Marx ve Walls (2019) Deney kurulumu.....	8
Şekil 2.8. Ferreira ve Martins (2020) Sonlu eleman modeli.....	9
Şekil 2.9. (a) Kesim işlemi; (b) Kaynakla birleştirme işlemi.....	12
Şekil 2.10. Kirişin kesim ve kaynaklama sonucu boy değişimi	12
Şekil 2.11. Kat yükseklik farkı (Verweij 2010).	13
Şekil 2.12. (a) Hayes Garden Alışveriş Merkezi, Birleşik Krallık; (b) Rai Tren İstasyonu, Amsterdam; (c) Katlı Otopark, Cambridge; (d) Atrium Hotel, Bodrum.....	14
Şekil 2.13. Kirişte oluşan plastik mafsallık (Durif, Bouchaïr, and Vassart 2013).....	14
Şekil 2.14. Gövde burkulması (Grilo, Fakury, and de Souza Veríssimo 2018)	15
Şekil 2.15. Yanal burkulma durumu (Nseir et al. 2012).....	15
Şekil 2.16. Kaynak bölgesinde kopma (Kuchta and Maślak 2015).....	16
Şekil 3.1. Dairesel boşluklu petek kirişin geometri ve notasyonları	21
Şekil 3.2. Dairesel boşluklu petek kirişin gövde t-kesiti	23
Şekil 3.3. Olander eğimli kiriş yaklaşımı	24
Şekil 3.4. Yük altında 4-metre açıklıklı kiriş	25

Şekil 3.5. 4-m açıklıklı kiriş için tasarım geçmiş grafiği	27
Şekil 3.6. 5-metre açıklıklı çelik ub kesitli kiriş	28
Şekil 3.7. Dairesel gözenekli petek kirişin profil kesiti	29
Şekil 3.8. (a) Kirişin kesim işlemi; (b) Kaynakla birleştirme işlemi	29
Şekil 3.9. Dairesel boşluklu petek kirişin yükleme çerçevesindeki gösterimi.....	30
Şekil 3.10. Berkitme levhalı kirişin yükleme çerçevesindeki gösterimi.....	30
Şekil 3.11. Dairesel boşluklu petek kirişlerde LVDT ve gerinim ölçerlerin konumları	31
Şekil 3.12. Abaqus'te eleman tiplerinin isimlendirme düzeni (Simulia Abaqus 6.1 Benchmark Guide; 28.1.1 Solid (continuum) elements; 2014).....	32
Şekil 3.13. Farklı ağ büyüklüklerine karşılık eşdeğer gerilmeler	33
Şekil 3.14. (a) IPN_200_Berkitmesiz elemanın katı modelinin oluşturulması; (b) IPN_200_Berkitmesiz elemanın gövde ve başlık kesim gösterimi	34
Şekil 3.15. (a) Hex ağ tipinde gövde elemanı (C3D8I); (b) Hex ağ tipinde başlık elemanı (C3D8I).....	34
Şekil 3.16. (a) Tetrahedron ağ tipinde gövde elemanı (C3D10); (b) Tetrahedron ağ tipinde başlık elemanı (C3D10)	35
Şekil 3.17. C3D8R elemanın hex ağ tipinde SEA deformasyon sonucu	35
Şekil 3.18. C3D8I elemanın hex ağ tipinde SEA deformasyon sonucu	36
Şekil 3.19. C3D10 elemanın tetrahedron ağ tipinde SEA deformasyon sonucu	36
Şekil 3.20. C3D8I elemanın hex dominant ağ tipinde SEA deformasyon sonucu	37
Şekil 3.21. C3D8I elemanın sweep ağ tipinde SEA deformasyon sonucu	37
Şekil 3.22. Ağ tiplerinin ve elemanların kıyaslanması	38
Şekil 3.23. (a) Malzeme yoğunluğunun tayini; (b) Elastisite modülü ve Possion oranının tayini; (c) Akma dayanımı-Plastik gerinim	39
Şekil 3.24. IPN_DBPK_200_Berkitmesiz tekil yükleme durumu.....	39
Şekil 3.25. IPN_DBPK_200_Berkitmesiz serbestliklerin atanması	40

Şekil 4.1. Yükleme çerçevesinde dairesel boşluklu petek kiriş	42
Şekil 4.2. Test ekipmanlarının yükleme çerçevesinde gösterimi.....	42
Şekil 4.3. IPN_DBPK_200 Berkitmesiz tekil yük altında yük-deplasman grafiği.....	43
Şekil 4.4. IPN_DBPK_200 Berkitmesiz kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	44
Şekil 4.5. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	45
Şekil 4.6. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği	46
Şekil 4.7. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	46
Şekil 4.8. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği	47
Şekil 4.9. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	48
Şekil 4.10. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği	49
Şekil 4.11. IPN_DBPK_200 Kesitli kiriş için tasarım geçmiş grafiği.....	50
Şekil 4.12. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz tekil yük altında yük-deplasman grafiği.....	51
Şekil 4.13. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	52
Şekil 4.14. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	53
Şekil 4.15. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği	54
Şekil 4.16. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	55
Şekil 4.17. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği	56
Şekil 4.18. IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri.....	57

Şekil 4.19. IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli tekil yük altındayük-deplasman grafiği	58
Şekil 4.20. IPN_DBPK_240 Kesitli giriş için tasarım geçmiş grafiği.....	59
Şekil 4.21. IPN_DPBK_200 Berkitmesiz tekil yük altında Test-SEA eğrisi	60
Şekil 4.22. IPN_DBPK_200 Berkitmesiz SEA analiz sonucu	60
Şekil 4.23. IPN_DPBK_200 Yatay berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi	61
Şekil 4.24. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli SEA analiz sonucu.....	62
Şekil 4.25. IPN_DPBK_200 Dairesel berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi.....	63
Şekil 4.26. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli SEA analiz sonucu.....	63
Şekil 4.27. IPN_DPBK_200 Düşey berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi.....	64
Şekil 4.28. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli SEA analiz sonucu	65
Şekil 4.29. IPN_DPBK_240 Berkitmesiz tekil yük altında Test-SEA eğrisi	66
Şekil 4.30. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz SEA analiz sonucu	66
Şekil 4.31. IPN_DPBK_240 Yatay berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi	67
Şekil 4.32. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli SEA analiz sonucu.....	68
Şekil 4.33. IPN_DPBK_240 Dairesel berkitmeli tekil yük altında test-SEA eğrisi.....	69
Şekil 4.34. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli SEA analiz sonucu	69
Şekil 4.35. IPN_DPBK_240 Düşey berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi.....	70
Şekil 4.36. IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli SEA analiz sonucu	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Partikül Küme ve Harmoni Arama yöntemlerinin ilk matrisleri	25
Çizelge 3.2. PK ve HA yöntemlerinin 32 iterasyon sonrasında uygun değerleri	26
Çizelge 3.3. PK ve HA yöntemlerinin 780 iterasyon sonrasında uygun değerleri	26
Çizelge 3.4. 4-m açıklıklı kiriş için bulunan sonuçların kıyaslanması	27
Çizelge 3.5. 5-metre açıklıklı dairesel gözenekli petek kirişin optimum boyutları	28
Çizelge 3.6. Eleman ile mesh tiplerine karşılık gelen düğüm ve eleman sayıları	33
Çizelge 3.7. Malzeme dayanım değerleri	38
Çizelge 4.1. DBPK (dairesele boşluklu petek kiriş) deney adetleri	41
Çizelge 4.2. DBPK (dairesele boşluklu petek kiriş) deney adetleri	41
Çizelge 4.3. IPN_DBPK_200 Kesitli profilin geometrik özellikleri	44
Çizelge 4.4. IPN_DBPK_200 Kesitli kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ve göçme durumları	49
Çizelge 4.5. IPN_DBPK_240 Kesitli profilin geometrik özellikleri	51
Çizelge 4.6. IPN_DBPK_240 Kesitli kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ve göçme durumları	58

1. GİRİŞ

Yüksek dayanımları ve büyük açıklıklarda tasarım hafifliğine bağlı olarak daha az deprem yüklerine maruz kalmalarından dolayı çelik taşıyıcı sistemler betonarme taşıyıcı sisteme sahip yapılara oranla daha fazla tercih edilmektedir. Malzeme özelliği olarak incelendiği zaman ise basınç ve çekme dayanımlarının yüksek ve birbirine eşit düzeylerde olması, çekme dayanımı düşük yapı malzemeleriyle yapılması mümkün olmayan sistemlere yapılabilirlik kazandırmaktadır. Çelik taşıyıcı sistemli yapılar, özellikle mühendislik alanında ileri düzeyde olan ülkelerin yapı sektöründe geniş alanlar bulmalarına karşın, ülkemizde malzemenin temin edilmesinin yüksek maliyet oluşturmamasından dolayı betonarme yapılara nazaran daha az uygulama alanına sahiptir. Şüphesiz, çelik yapıların daha az maliyet oluşturacak şekilde boyutlandırılarak inşa edilebilmesi, sismik performansları oldukça yüksek olmalarından dolayı, ülkemiz gibi aktif deprem riski olan bölgelerde kullanımının artırılmasına katkı sağlayacak ve böylece depremlerden sonra oluşacak hasarlar en az seviyeye düşürecektir.

Gövde açıklıklı çelik kirişler tasarımları bakımından gelişmiş sistemler olmasından dolayı özellikle mukavemet, boyut, yükseklik ve boşlukların konumu için diğer kirişlere göre daha fazla elastiklik sağlamaktadır. Bu kirişlerin üretiminin asıl amacı; mevcut kirişin derinliğini, atalet momentini ve kesit katsayısını arttırmaktır. Artan atalet momenti ve kesit katsayısı kirişin dayanımının ve rijitliğinin artmasını sağlar. Bu kirişler ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlamaları nedeniyle alış-veriş merkezleri, spor salonları, ofis binaları ve otoparklar gibi ara kolonların istenmediği büyük açıklı alanların kapatılmasında uygun çözüm sağlamaktadırlar.

Bu tez kapsamında, dairesel boşluklu çelik kirişlere berkitme levhası eklenmiş ve eklenmemiş olarak yapı optimizasyonu yöntemleri ile en ekonomik olarak tasarlanabilmeleri, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, dairesel boşluklara sahip gövde açıklıklı çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemleri formüle edilerek elde edilen ayrık değişkenli optimizasyon probleminin çözümü, geliştirilmiş olan harmoni arama ve parçacık sürü meta bulgusal optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilmiştir (Lee ve Geem 2004, Perez ve Behdinan 2007). Bu kirişlerin optimum tasarımları kapsamında, NPI profil kesitleri, kiriş geometrisi ve boşluklar arası mesafe ile ilgili detaylar tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Bu sistemlerin tasarım kriterleri için BS (British Standart) şartnamesinde öngörülen hükümler esas alınmıştır (BS-5950, 1990). Çalışmanın ikinci aşaması olan deneysel süreçte; ilk kısımda optimizasyonu yapılan çelik IPN kesit gövde açıklıklı kirişlerin tekil yük altındaki dayanımları hidrolik güç ünitesi basınç silindrine sahip yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. Gövde açıklıklı kirişler tekil yüke maruz kaldıklarında I-kesitli profilin gövde kısmının kesmedeki zayıflığı verimliliklerini azaltır. Araştırmanın üçüncü aşamasında boşluk çevrelerine yerleştirilecek olan güçlendirici berkitme levhalarının yerel burkulma ve moment-kesme aktarımı değerlendirmelerine bağlı olarak optimizasyonu yapılan gövde açıklıklı çelik kirişlere etkisi incelenmiştir.

Araştırmanın dördüncü aşamasında kirişlerin taşıyabilecekleri kritik yükü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanması ve sonuçların deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile karşılaştırılarak elde edilen datalarla optimizasyonu yapılan güçlendirilmiş petek kirişlerin uygulamalarda kullanılmasının incelenmesi amaçlanmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Literatür Araştırması

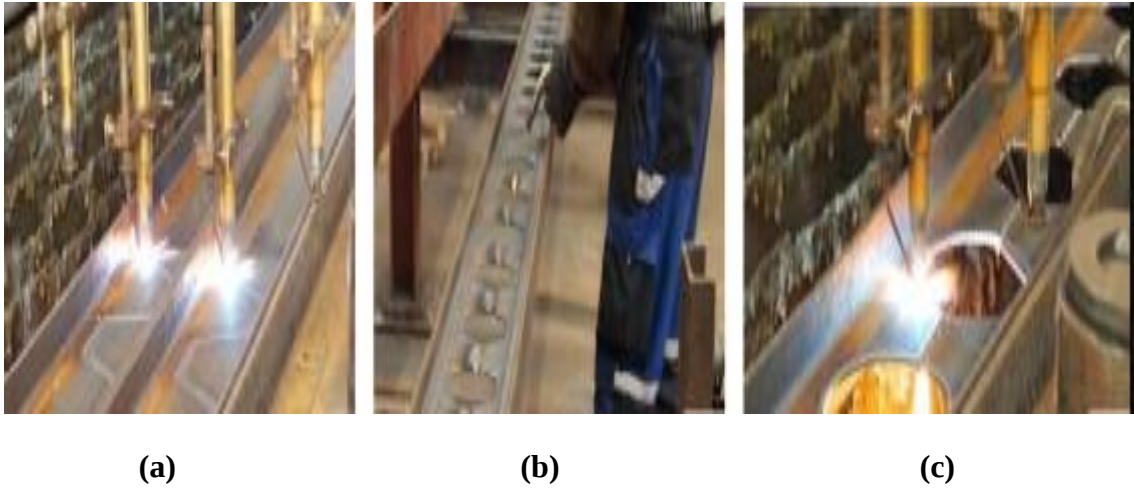
Gövde yüksekliği arttırılmış kirişler ilk olarak altıgen boşluklu (petek) kiriş uygulamaları ile II. dünya savaşı zamanında çelik yapıların maliyetini azaltma amacıyla yapı mühendisleri tarafından dayanıklılıkları gözlemlendikten sonra dikkate alınmaya başlanmıştır. I kesitli profilden yapılmış bir kirişte herhangi bir malzeme takviyesine gerek duyulmadan elde edilen rijitlik ve atalet momenti artışı ve bunun yanı sıra kirişin geometrisinde meydana gelen değişikliğin ortaya çıkardığı görsellik tasarımcıların ilgisini çekmiştir. Çelik altıgen boşluklu kirişlerle ilgili olarak literatürde hatırı sayılır ölçüde çalışma yapılmıştır. Altifillisch'in tekil yükleme altındaki kirişlerin plastik ve elastik bölgelerdeki davranışlarını, dayanımlarını ve göçme durumlarını inceleyen küçük çaplı araştırması bu alanda yapılan ilk çalışma olarak kaydedilmiştir (1957). Sonraları, Shelbourne yedi farklı petek kiriş numunesi için bir deney programı tasarlamıştır. Araştırmacı, bu deney testleriyle değişik yük kombinasyonları altında çelik petek kirişlerde oluşacak moment ve kesme kuvveti etkileşimlerini araştırmayı amaçlamıştır (1966). Takibinde, Husain ve Speirs farklı yüklemeler altındaki çelik petek kirişlerin kaynak bölgelerinde oluşacak akmaları ve kopmaları incelemek amacıyla testler yapmıştır (1971). Gövde yüksekliği arttırılmış kirişlerin en büyük handikabı olan yanal burkulma, uzun açıklıklarda ve yetersiz yanal destek durumunda kirişin üst flaşında oluşur. Kiriş kesitinin ilk haline oranla daha derin ve narin oluşunun bu göçme durumunun meydana gelmesine katkıda bulunduğu Nethercot ve Kerdal tarafından tespit edilmiştir (1982). Son olarak, Redwood ve Zaarour petek boşluklu kirişlerin gövde kısımlarında oluşacak burkulmaları araştırma amacıyla on dört adet çelik I-kesitli petek kiriş üzerinde yükleme testleri yapmıştır. Kirişlerin nihai gövde burkulma yükleri aynı zamanda sonlu elemanlar analizi ile hesaplanarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır (1996).

Çelik altıgen boşluklu gövdesi yükseltilmiş kirişler, literatürde geleneksel ve modern yöntemlerle çalışılmış bir yapı tipi olmasına karşın, dairesel boşluklu kirişler üzerine sınırlı sayıda teorik ve deneysel yayın mevcuttur. Bu kirişler ilk olarak Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü (SCI) denetimi altında Bradford üniversitesi laboratuvarlarında R.M. Lawson tarafından, kirişlerin yapısal bütünlüğünü ve tasarım kriterlerini doğrulamak amacıyla tam ölçekli testlerde kullanılmışlardır. Yapılan deneylerde kirişlerin uygulanan yük altında gövde burkulmasından göçtükleri gözlemlenmiştir (1988). Yapılarda kullanılan çelik dairesel boşluklu basit kirişlerin BS (British Standart) 5950 şartnamesine göre tasarımı J.K. Ward tarafından sunulmuştur (1990). Bu kirişlerin parametrik çalışmadan türetilen eğilme, yerel ve gövde dayanımı modları detaylı bir sonlu elemanlar analizi ile desteklenmiştir. Dairesel gövde boşluklu çelik kirişler ile ilgili son zamanlardaki en kapsamlı çalışmayı Hoffman ve araştırma ekibi yapmıştır. Bu çalışmalarda ilk olarak dairesel boşluklu kirişlere genel bir bakış yapılmış ve daha sonra da gövde boşlukları çevresindeki gerilme dağılımları incelenmiştir. Ayrıca, bu kirişlerin servis yükleri altındaki doğrusal elastik ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar burkulma analizi sonuçları deney sonuçlarıyla mukayese edilmiş ve bu çalışma esas alınarak kirişlerin AISC-ASD (American Institute of Steel Construction, Allowable Stress Design) şartnamesine girmesi için başvuruda bulunulmuştur (2012). Bu çalışmayı takiben Huo ve D'Mello tarafından kompozit yüzey dairesel döşeme kirişlerinde kesme dayanımı ve davranışını belirlemek amacıyla 24 adet itme (push-over) testi yapılmıştır (2013).



Şekil 2.1. Huo ve D'Mello (2013) Kompozit yüzeysel dairesel zemin kirişinin **(a)** profilli çelik zemin kaplaması ve; **(b)** prekast zemin üniteleri (ASD Westok Limited'in izniyle) ile uygulamaları

Sonrasında Sonck, Van Impe, ve Belis (2014) sıcak haddelenmiş I-kesitli elemanların genel burkulma dayanımı, artık gerilmelerin oluşmasından olumsuz etkilendiği tezini ortaya koymuşlardır. Dairesel ve altıgen kesitli petek kirişlerin üretimi sırasında sıcaklık etkilerin, sıcak haddelenmiş ana bölümlerde var olan mevcut gerilmeleri etkilemesi beklenmektedir, ancak ne seviyede etkilendiği henüz bilinmemektedir. Yazarlar tarafından yapılan çalışmada dairesel ve altıgen kesitli petek kiriş elemanlardaki artık gerilmelerin deneysel araştırılması yapılmış ve üretim sürecinin burkulma dayanımına etkisi başlıkta mevcut olan gerilmeleri artırdığı savunulmuştur.



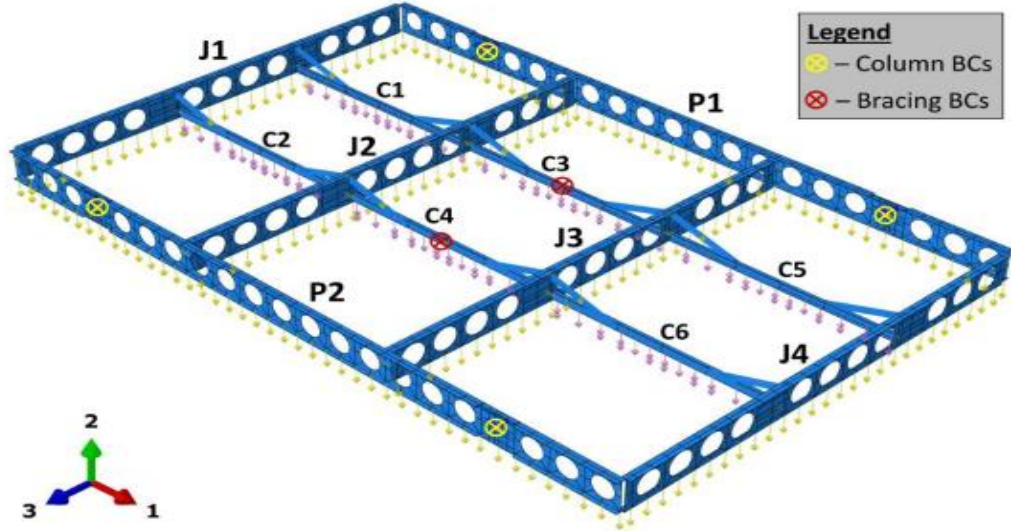
Şekil 2.2. Sonvk, Van Impe, ve Belis (2014) **(a)** Üretim süreci; **(b)** Altıgen kesitli elemanın kaynak yapılması işlemi; **(c)** Dairesel kesitli elemanların geometrisinin kesilmesi

Sonck ve Belis (2015) yaptıkları bir diğer çalışmada dairesel kesitli petek kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımı üzerine yaptıkları çalışmada eşit aralıklı dairesel göz açıklığına sahip kirişlerin üretimi sırasında oluşan artık gerilmelerin göz ardı edildiğini öne sürmüşlerdir. Yazar bu çalışmada dairesel kesitli petek kirişlerin yanal-burulma davranışını deneysel verilere dayalı olarak doğrulanan sayısal bir model kullanarak incelemiştir. Modelde, değiştirilmiş artık gerilme modelinin etkisi hesaba katarak parametrik bir sonuç elde etmiştir. Parametrik çalışmanın sonuçlarını kullanarak, bir ön tasarım yaklaşımı önermiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan ulaşılan sonuçlar, ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sonuçlarla doğrulamaya çalışılmıştır.

Xiangrong, Xing ve Xinwei (2016) ise dairesel boşluklu petek kirişlerde kapasite ve stabilite dayanımının, kirişin mekanik özelliklerine etki eden boşluk çapı, kiriş boyu ve kiriş yükseklik boyunu değişken alarak dairesel boşluklu petek kirişlerin tasarımında basitleştirilmiş formülleri esas alarak çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada parametrik veriler için sonlu eleman yazılımı ABAQUS ile 165 farklı model kurarak dairesel boşluklu petek kirişlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışma da ayrıca değişken olarak ele alınan parametreler için bazı değerler önermişlerdir. Çalışma sonucunda kiriş açıklığı ve boşluk çapı dairesel boşluklu petek kirişlerin dayanım ve stabilite kapasitesini etkileyen en önemli faktör olduğunu ileri sürmüşlerdir.

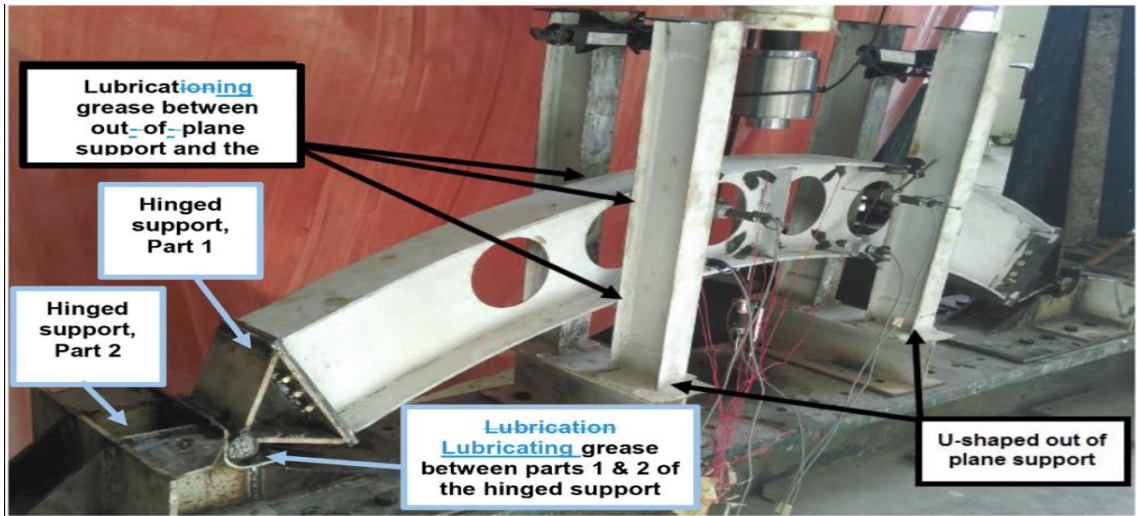
Kloos (2017), Güney Afrika Çelik Yapı Enstitüsü (SAISC), tarafından iki ile on katlı ofis yapıların inşası için özel olarak tasarlanmış yeni bir dairesel boşluklu petek kiriş modeli geliştirmiştir. Araştırmacı bu çalışmada geliştirilen yeni tip kiriş yapısının yangın sırasında yapısal davranışını incelemek üzere 18 adet kiriş elemanı ve 9 adet yapı modeli kullanarak incelemiştir. Çalışmanın sonlu eleman analizleri için ABAQUS yazılımını kullanmıştır. Araştırmacı üç farklı sıcaklık-zaman yangın tipini dikkate alarak; (a) yangına dayanıklı döşemenin göçmediği standart yangın tipi, (b) daha yüksek sıcaklarda döşemenin göçtüğü yangın tipi, (c) parametrik bir ateş kullanarak yapısal davranışları incelemiştir. Araştırmacı çalışmanın sonucunda ilk olarak, çelik bağlantıların yapıldığı bölgelerde ihmal edilecek seviyede moment azaltması yapılarak bulon deliklerinde sıcaklığın etkisi ile oluşacak genleşmeye izin verecek şekilde tasarlanmalı, ikincisi döşeme sisteminde hesaplarda elde edilen deplasman değerlerini oluşmasını

sağlayacak şekilde tasarlanması durumunda tüm sistem korunur ve oluşabilecek yapısal göçme ihtimalini önemli ölçüde azaltacağını ileri sürmüştür.

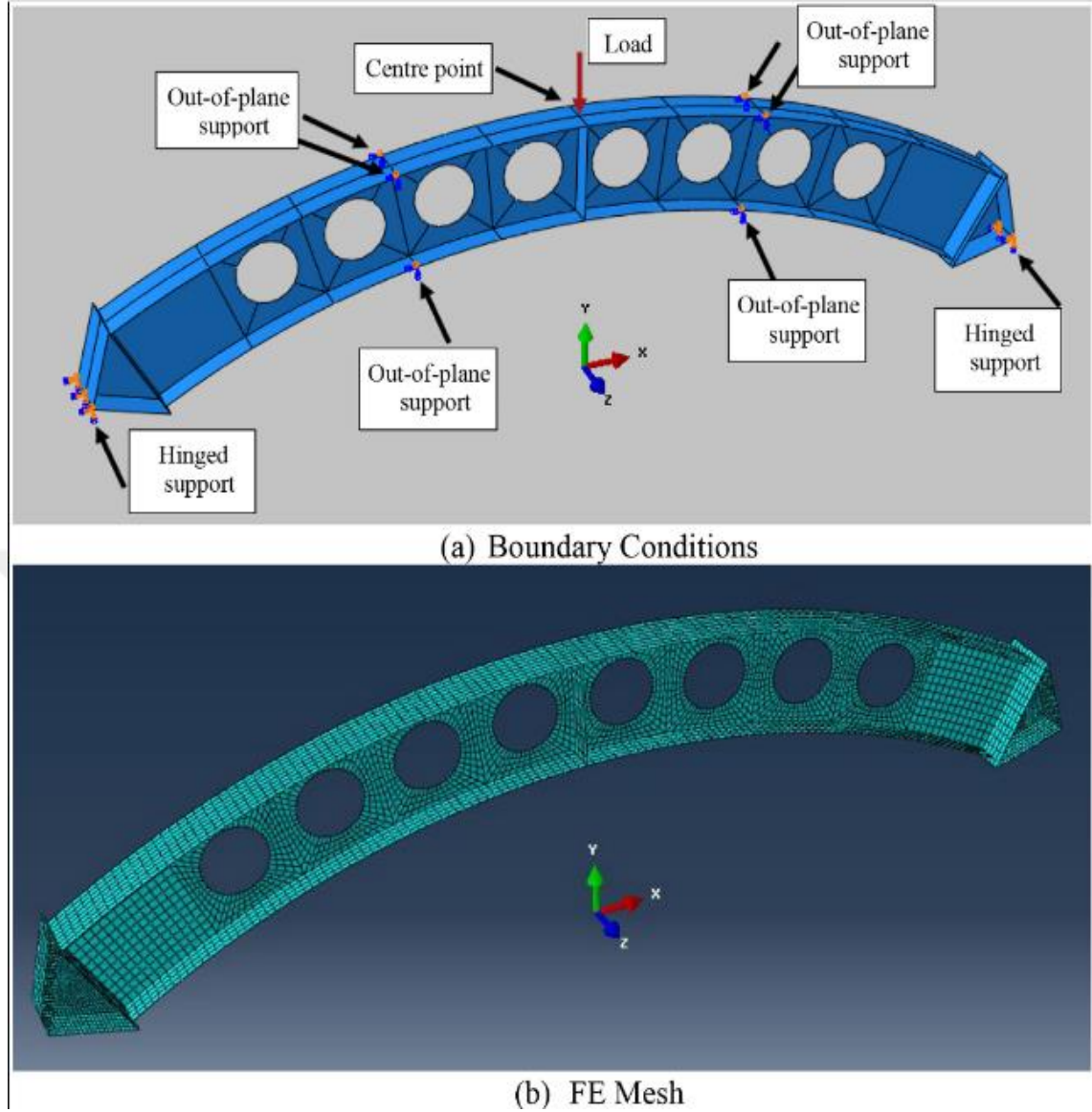


Şekil 2.3. Kloos (2017) Yapının sınır koşulları ve yük durumu (ABAQUS)

Yakın zamanda Zaher vd. (2018) dairesel boşluklu petek kirişlerin kemer tiplerinin yapısal davranışı üzerine yaptıkları çalışmada, dört adet dairesel boşluklu kemer kirişinin deneysel çalışması yapılarak deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler sonlu eleman analizleri yapılarak deneysel sonuçlar ile doğrulamaya çalışmışlardır. Araştırmacı ve ekibi yaptıkları çalışma sonucunda dairesel boşluklu kemer kirişlerinde, eğrilik yarıçaplarının ve eğim açılarının yapısal davranışa etkisini incelemişler ve hata modları ile anahtar parametreleri elde etmişlerdir.

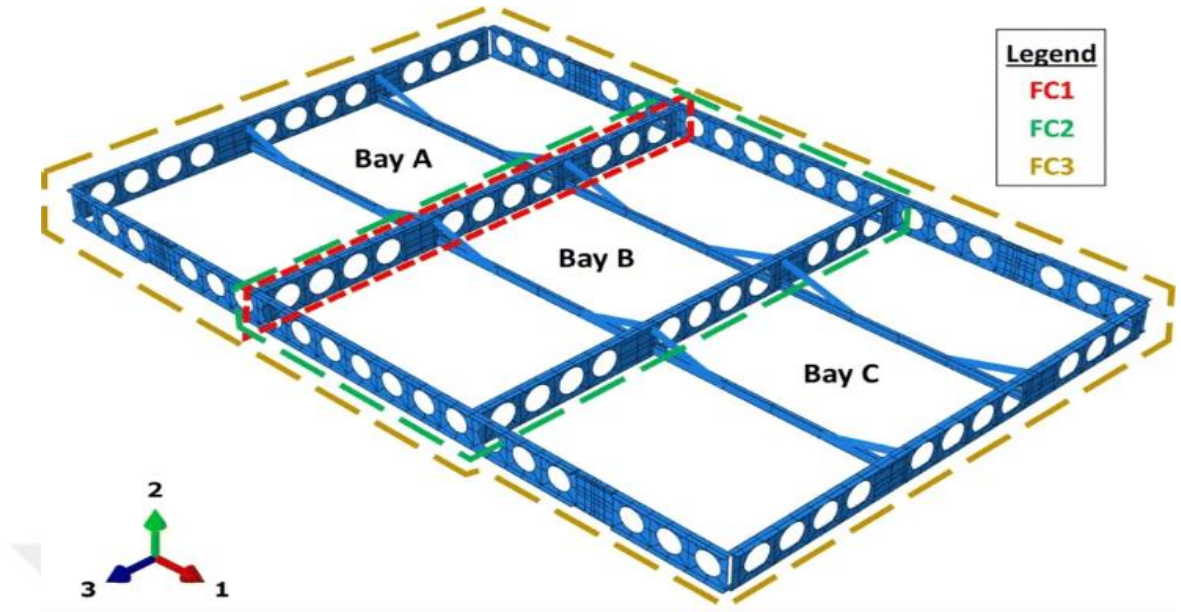


Şekil 2.4. Zaher vd. (2018) Deney düzeneği ve yanal destekler



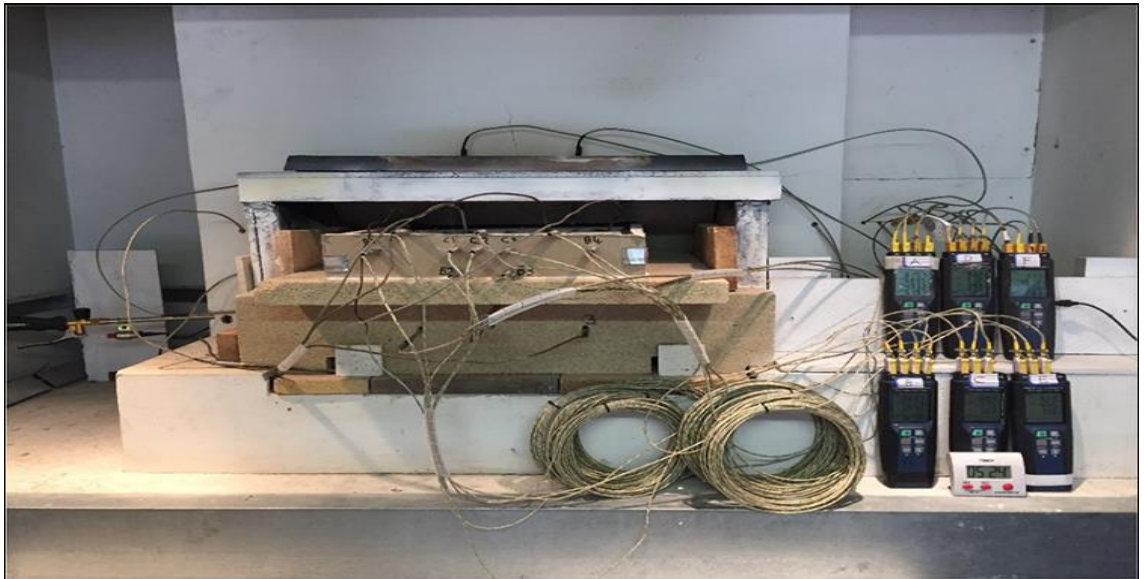
Şekil 2.5. Zaher vd. (2018) **(a)** Sınır koşulları ve yanal destekler; **(b)** Sonlu eleman ağ yapısı

Aradan geçen iki yıl ile birlikte Kloos ve Walls (2019), Güney Afrika Çelik Yapı Enstitüsü (SAISC), tarafından iki ile on katlı ofis yapıların inşası için özel olarak tasarlanmış yeni bir dairesel boşluklu petek kiriş modeli geliştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmasında yeni geliştirilen dairesel boşluklu petek kirişin normal yangın koşullarında ve parametrik yangın koşullarında yapısal davranışını incelemek üzere birçok doğrusal olmayan sonlu eleman modeli kullanarak parametrik çalışma yapmışlardır.



Şekil 2.6. Kloos ve Walls (2019) Üç çeşit yangın durumu ve yüksek sıcaklıkla karşılaşan yapısal öge diyagramı (ABAQUS)

Marx ve Walls (2019), Güney Afrika Çelik Yapı Enstitüsü (SAISC), tarafından iki ile on katlı ofis yapıların inşası için özel olarak tasarlanmış yeni bir dairesel boşluklu petek kiriş modeli geliştirdi. Geliştirilen yeni tip kiriş elemanın kompozit olmayan dairesel boşluklu petek kirişli döşeme sisteminin yangın durumunda yapısal davranışını incelemek üzere deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar deneysel çalışmalar sonucunda elde ettiği verileri desteklemek için ayrıca sonlu elemanlar analizleri (ABAQUS) ile parametrik çalışma yapmışlardır.



Şekil 2.7. Marx ve Walls (2019) Deney kurulumu

Ferreira ve Martins (2020), dairesel boşluklu petek kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımını yük ve dayanım katsayılarına göre tasarımı (LRFD) dikkate alarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmada kiriş elemanları tek tip yükleme, iki noktadan yükleme ve yayılı yükleme yükleri altında incelemişler. Bu çalışmalarını desteklemek için sonlu eleman analizleri ile ayrıca parametrik çalışma yapmışlardır.



Şekil 2.8. Ferreira ve Martins (2020) Sonlu eleman modeli

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda minimum ağırlık için yapı elemanlarının optimum boyutlandırılması yapılmadan sabit parametreler alınarak nihai yük taşıma kapasiteleri ve göçme durumları incelenmiştir. Mehmet Polat Saka, Ferhat Erdal ve Erkan Doğan'ın yayınlamış oldukları "*Optimum Design of Cellular Beams Using Harmony Search and Particle Swarm Optimizers*" isimli çalışma yapı optimizasyonu literatüründe gövde yüksekliği artırılmış yapıların optimum boyutlandırılması ile ilgili ilk çalışma olarak ön plana çıkmaktadır (2011).

Son dönemlere kadar yapı optimizasyonu da dahil olmak üzere çeşitli mühendislik optimizasyonu uygulamalarında matematiksel programlama ve optimumluk kriteri yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktaydı (Hestenes 1969, Venkayya vd 1973). Ancak bu metotların tasarım değişkenlerini sürekli kabul etmesi esasına dayanan türeve bağlı matematiksel çözüm algoritmaları, metotların büyük yapı sistemlerine uygulanmasını güçleştirmelerinin yanı sıra belirlenmiş hazır kesitlere göre boyutlandırma gerektiren yapıların tasarımları için ideal neticeler vermemekteydi. 1990'li yılların başında Goldberg tarafından formüle edilen genetik algoritmalar mühendislik optimizasyonunda karşılaşılan bu sorunların üstesinden gelebilecek bir metot olarak ortaya çıkmıştır (1989). Doğada gerçekleşen kavramların simüle edilmesi ilkesine bağlı olarak işleyen bu algıya dayalı stokastik teknikler gerek ayrık çözüm üretebilmesi nedeniyle gerekse başlangıç noktasına bakılmaksızın global optimuma yakın çözümler yakalayabilmesi sayesinde tüm disiplinlerde olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de ilgiyle karşılanmıştır (Hasancebi ve Erbatur 1988, Pezeshk ve Camp 2002). Genetik algoritmalar yöntemiyle kazanılan bu başarı araştırmacıları, benzetimli tavlama (Kirkpatrick vd 1983), tabu arama (Glover 1989), karınca koloni (Dorigo ve Stützle 2004) ve evrimsel stratejiler (Coello

2002) gibi diğer stokastik metotları irdelemeye yönlendirmiştir. Buna ilave olarak, bu tez kapsamında yer alan harmoni arama (Lee ve Geem 2004) ve parçacık sürü (Perez ve Behdinan 2007) metotları son zamanlarda geliştirilen değişik nitelikli stokastik optimizasyon metotları içinde yer almıştır. Genetik algoritmaların yaygın popülaritesine karşın, harmoni arama ve parçacık sürü teknikleri ile gerçekleştirdiği çalışmalarda çözüm hızı ve optimum çözüme yakınsamadaki becerileri açısından genetik algoritmalara kıyasla daha etkin olabileceğini gözlemlenmiştir (Erdal ve Saka 2009, Doğan ve Saka 2012).

Optimizasyonla ilgili çalışmalar araştırmacılar tarafından yeni yöntemlerin geliştirilmesi için araştırmacıların ilgisini çekmeye devam etmiştir. Bu bağlamda dairesel boşluklu petek kirişlerin optimum boyutlandırılmalarının karşılaştırılması için harmoni arama yöntemi önerilmiştir (Erdal 2015).

Sonrasında optimum olarak boyutlandırılmış dairesel boşluk gövde yüksekliği arttırılmış kirişlerin gövdelerinin berkitme levhaların plastik şekil değiştirmelerde davranışa etkisini algıya dayalı yöntemlerden biri olan av arama tekniği kullanarak incelemiştir (Erdal 2016).

Bu çalışmayla eş zamanda gelişmiş ateş böceği algoritmasını kullanarak çelik çerçevelerin tasarım optimizasyonunu Yük Ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarımı (LRFD), Amerikan Çelik Şartnamesini (AISC) göz önünde bulundurarak yapmıştır (Carbas 2016).

Önceki çalışmalardaki başarılar dikkate alınarak sinüs eğrisi boşluklara sahip yeni nesil çelik kirişlerin optimum tasarımı için ateş böceği optimizasyon yöntemi kullanarak minimum ağırlık tasarımı elde edilmesi amaçlamıştır. Kullanılan bu yöntemde sinüzoidal açıklı kirişlerin altıgen ve dairesel boşluklu kirişlerin optimum tasarım sonuçlarında da kullanılabileceği görülmüştür (Erdal 2017).

Dairesel boşluklu petek kirişlerin düzlemsel analizi için ağ içermeyen birim daire yöntemi önerilmiştir. Araştırmacı bu çalışmada dairesel boşluklu petek kirişlerin ağ yapısında yerel düzlem dışı burkulmayı değerlendirmek için kiriş üzerine etki edene yüklerden oluşan gerilme dağılımları doğru ve verimli tahmin etmeyi amaçlamıştır (Abidin, Izzuddin ve Lancaster 2017).

Dairesel boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış kirişlerin gelişen teknoloji ile birlikte mukavemet, boyut ve ağırlık bakımından çelik endüstrisinde önemli bir kullanım alanı bulunmaktadır. Dolayısıyla araştırmacılar bu kirişlerin optimum tasarım algoritmaları oluşturmak için çalışma konusu olarak ele almaktadırlar. Abambres vd. (2018) yaptıkları çalışmada I-kesitli dairesel boşluklu petek kirişlerin kritik burkulma yükünü hassas bir şekilde tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir formül önermeyi amaçlamıştır. Çalışmasını desteklemek için YSA tasarımında kullanılan 3645 noktalı veri seti ABAQUS programında yapılan kapsamlı bir parametrik sonlu eleman analizinden elde etmiştir. YSA girdi olarak bağımsız değişkenler; kiriş uzunluğu, daire çapı, ağ büyüklüğü, kesit yüksekliği, ağ kalınlığı, başlık kalınlığı, başlık genişliği ve açıklık kenarı ile destekler arası mesafe olarak belirlemiştir. Araştırmacı önerdiği modelin, etkili bir tasarım aracı olduğunu ileri sürmektedir. 3645 veri noktası arasındaki maksimum ve ortalama bağıl hata sırasıyla %3.7 ve %0.4 olarak bulmuşlardır.

I-kesitli dairesel boşluklu çelik kirişlerin kritik burkulma yükünü tahmin etmek için yapılan bir diğer çalışmada, Ly vd. (2019) üç hibrit makine öğrenimi (ML) algoritması, yani uyarlanabilir nöro-bulanık sistemi (ANFIS) ile meta-sezgisel optimizasyon tekniklerinin bir kombinasyonu olan ANFIS-RCSA, ANFIS-CA, ANFIS-SFLA geliştirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar I-kesitli dairesel boşluklu petek kirişlerin kritik burkulma yükünü tahmin etmek için sırasıyla gerçek kodlu benzetilmiş tava (RCSA), kültürel algoritma (CA) ve karışık kurbağa sıçrama algoritması (SFLA) kullanarak, daha önce literatürde çalışılmış I-kesitli dairesel boşluklu petek kirişlerin mevcut burkulma testleri verileri kullanarak modelleme için veri seti oluşturmak için kullanmıştır. Geliştirilen üç hibrit ML modelinin değerlendirilmesi için korelasyon katsayısı (R), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) olmak üzere üç kalite değerlendirme kriteri kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar, üç hibrit ML modelinin de dairesel boşluklu petek kirişlerin burkulma yükünü tahmin etme konusunda güçlü bir yeteneğe sahip olduğunu, ancak ANFIS-SFLA ($R = 0.960$, $RMSE = 0.040$ ve $MAE = 0.017$) ile karşılaştırıldığında en iyi etkinliği gösterdiğini ileri sürmektedirler.

Son olarak Khan vd. (2020) yangın sırasında sınırlandırılmış kompozit dairesel boşluklu kirişlerin analizi hibrit simülasyon yaklaşımı kullanarak incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında bir yangın sırasında kompozit dairesel boşluklu kirişlerin davranışını incelemek üzere yapmışlardır. Araştırmacı çalışmasında OpenSEES, ABAQUS ve OpenFresco yazılımının bir kombinasyonunu kullanarak hibrit simülasyon tipi sayısal bir yaklaşım benimsenmiştir. Yapılan çalışmanın doğruluğu için araştırmacı mevcut yangın deneyleri verileri kullanarak doğrulamıştır ve deneylerde elde edilen sıcaklık değerleri sayısal modellerinde uygulamışlardır.

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında meta-bulgusal yöntemlerin dairesel boşluklu petek kirişlerin optimum tasarımına adapte edilmesi ve diğer yöntemlerle performanslarının kıyaslanması amaçlanmıştır. Deneysel kısımda düşey, yatay ve dairesel berkitmelerin bu kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerine etkisi gözlemlenmiştir. Yapı laboratuvarında yapılan testlerin doğruluğunu test etmek amacıyla tüm elemanlar ABAQUS sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir.

2.2. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Avantajları

I-kesite sahip çelik profillerin gövde eksenine boyunca birbirine karşılık gelecek şekilde iki yarım daire halinde CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrolü) ile kesilerek elde edilen alt ve üst T kesitlerin yana kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi neticesinde dairesel boşluklu petek kirişler meydana gelirler (Knowless 1985) (Şekil 2.9). CNC kesim işlemi ile kirişin gövde bölgesinde oluşacak boşluklar rahatça yapılır.

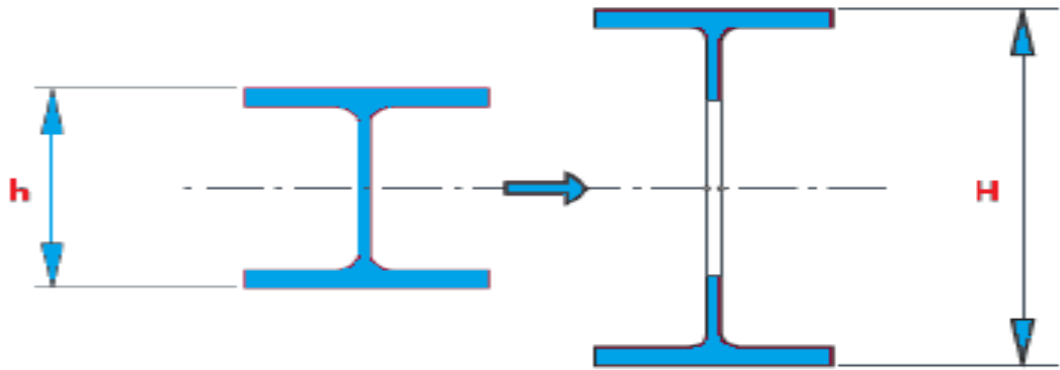


(a)

(b)

Şekil 2.9. (a) Kesim işlemi; (b) Kaynakla birleştirme işlemi

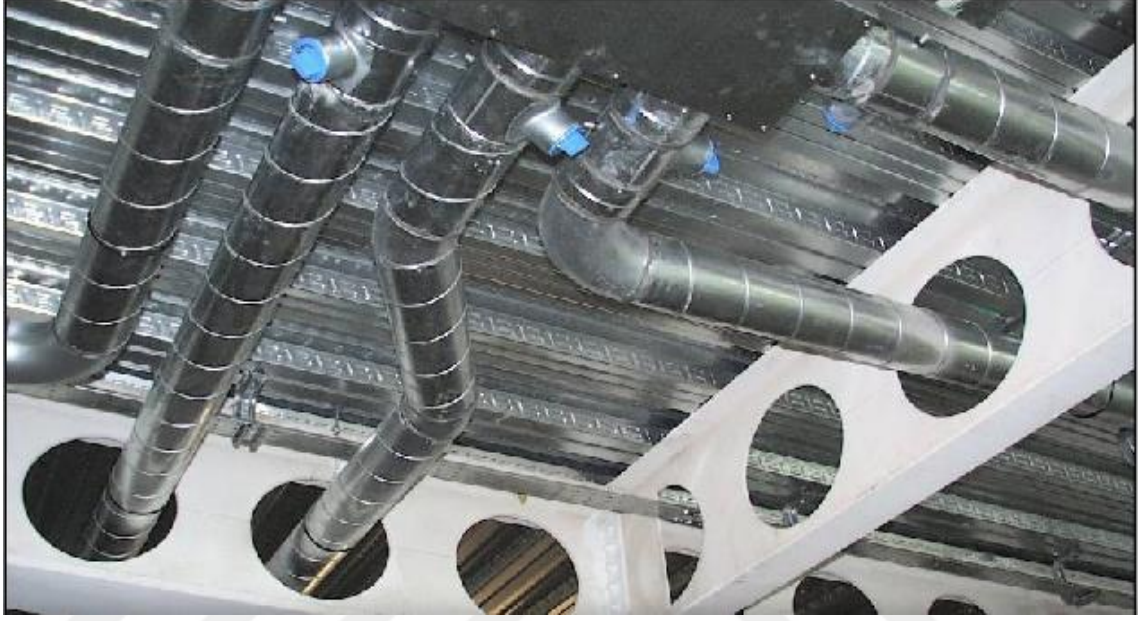
Kesim, ayrıştırma ve kaynaklama aşamalarının amacı çelik profilin atalet momentini ve kesit katsayısını arttırarak kirişin ilk haline oranla rijitliğini ve dayanımını arttırmaktır. Bu işlemlerin sonrasında kirişin yüksekliği, kesit katsayısı ve atalet momenti ilk haline oranla artarken ağırlığı ise ilk duruma göre azalır (Şekil 2.10).

**Şekil 2.10. Kirişin kesim ve kaynaklama sonucu boy değişimi**

Sınırlı kat yükseklikleri yapılar için önemli problemlerden biri olarak görülmektedir. Maliyet nedeniyle ortaya çıkan bu durumlarda taşıyıcı sistem elemanlarının kesit özelliklerine göre optimizasyonu ehemmiyet kazanmaktadır. Bu gibi durumları göz önünde bulundurduğumuzda dairesel boşluklu çelik kirişlerin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- Eğilme rijitlikleri artar.
- Kesit katsayısı ve buna bağlı olarak atalet momentleri artar.
- Kesim ve yeniden kaynaklama işlemi sonucunda profil ağırlığı azalır, buna bağlı olarak kiriş boyu artar.
- Gövde bölgesinde oluşan boşluklardan elektrik ve mekanik tesisatların kolayca geçilmesini olanak sağlar.
- Kat yüksekliğinden kazanç sağlar.

- Aynı atalet momente sahip normal formda I-kesitli kirişlere oranla daha hafiftirler.
- Geniş açıklıkları kolayca geçebildiklerinden dolayı pek çok uygulamada tercih edilmektedir.
- Estetik görünümünden dolayı gözle görülebilen çatı ve döşeme kirişlerinde özellikle tercih edilmektedir.



Şekil 2.11. Kat yükseklik farkı (Verweij 2010).

2.3. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Uygulama Alanları

Dairesel boşluklu petek kirişler otopark, otel, ofis binaları, alış-veriş merkezleri ve spor kompleksleri gibi ara kolonsuz geniş açıklıklı alanların kapatılmasında ağırlık ve ekonomiklik sağlamaları gibi pek çok avantajları barındırdığı için tercih edilmektedir.



(a)



(b)



(c)



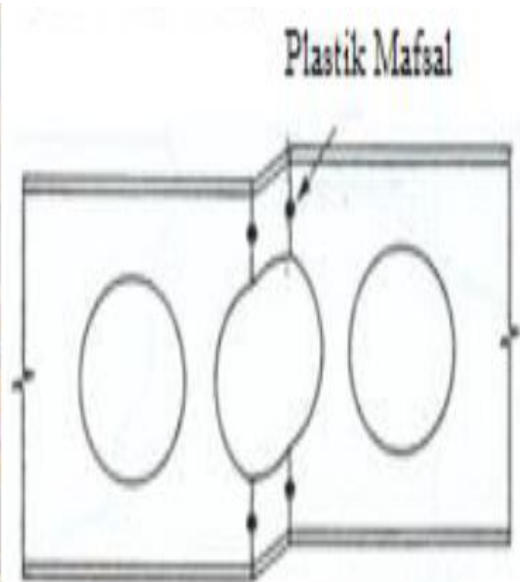
(d)

Şekil 2.12. (a) Hayes Garden Alışveriş Merkezi, Birleşik Krallık; **(b)** Rai Tren İstasyonu, Amsterdam; **(c)** Katlı Otopark, Cambridge; **(d)** Atrium Hotel, Bodrum

2.4. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Göçme Durumları

2.4.1. İkincil eğilme (Secunder-vierendeel Bending)

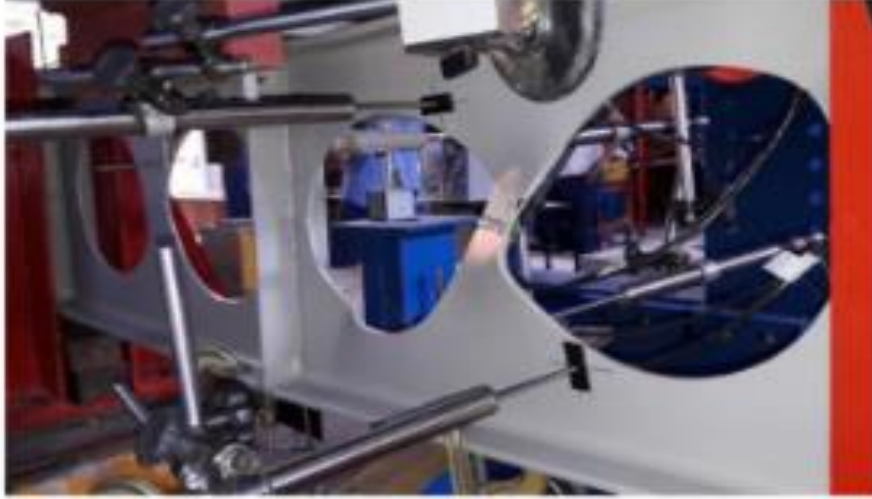
Kirişin yükleme altında genellikle oluşan momentler kirişin bulunduğu düzlemin zıt yönünde kaymalar meydana gelir. Kiriş üzerindeki momentlerden dolayı plastik mafsalların oluşmasıyla oluşan davranış biçimidir. (Chung, Liu, and Ko 2001) yaptıkları çalışmada vierendeel mekanizmasını incelemek için dairesel boşluklu petek kirişlerde düşük momentin ve yüksek momentin olduğu bölgelerde plastik mafsal oluşturarak incelemişlerdir. Daha sonra çalışmalarını sonucunda elde ettikleri verileri sonlu eleman analizleri ile desteklemişlerdir.



Şekil 2.13. Kirişte oluşan plastik mafsalları (Durif, Bouchaïr, and Vassart 2013)

2.4.2. Gövde burkulması (Web-post buckling)

Gövde burkulması, kesme kuvveti nedeniyle artan gerilmelerin neden olduğu gövdenin stabilite kaybı sonucu oluşan göçme tipidir. Bu göçme durumunu (Grilo, Fakury, and de Souza Veríssimo 2018) dairesel boşluklu petek kirişlerin gövde burkulmasını deneysel ve doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemiyle incelemişlerdir.



Şekil 2.14. Gövde burkulması (Grilo, Fakury, and de Souza Veríssimo 2018)

2.4.3. Yanal burkulma (Lateral buckling)

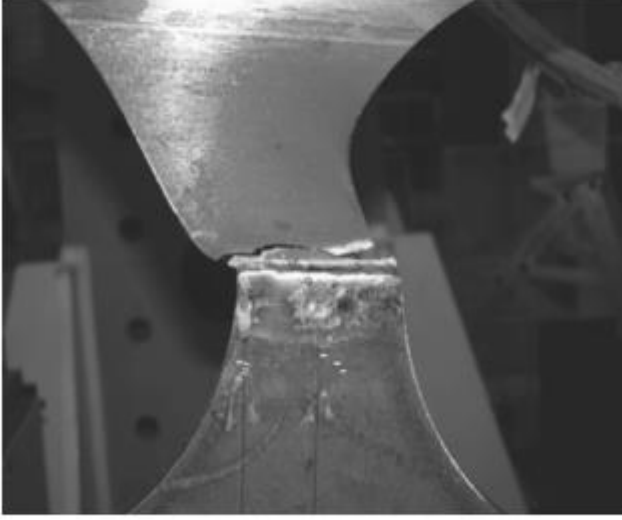
Yanal burkulma davranış durumu kirişin petek formunu elde edilmesiyle birlikte kirişin gövde yüksekliği artmış olur. Yükleme durumunda orta ve uzun açıklıklı kirişlerde bu davranış biçimi genelde gözlenir. Kiriş açıklık boyunca yeterli sayıda yan desteklerle desteklenmediğinde gövde elemanı tam kapasiteye ulaşmadan kendi ekseninin dışına doğru burkulma davranışı gözlemlenir.



Şekil 2.15. Yanal burkulma durumu (Nseir et al. 2012).

2.4.4. Kaynak bölgesinden kopma (Rupture of the welded joint)

Kiriş elemanında gözlenen göçme tipinde kiriş tipine bağlı olarak oluşturulan delikler mesafesinin yetersiz olmasına bağlı olarak kaynak uzunluğunun, kaynak kalınlığının ve kaynak kalitesine bağlı olarak oluşan göçme tipidir. (Kuchta and Maślak 2015) dairesel boşluklu petek kirişlerin dayanımını ve stabilitesini etkileyen göçme modları üzerinde bir çalışma yapmışlar.



Şekil 2.16. Kaynak bölgesinde kopma (Kuchta and Maślak 2015)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kirişlerin Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler

Tez çalışmasının ilk aşamasında aşağıda detaylı olarak belirtilen iki farklı stokastik teknik kullanılarak, dairesel boşluklu çelik petek kirişler için boyutlandırmasını yapacak olan yazılımlar geliştirilmiştir. Bu ilerlemeler sonucunda iki yöntem, harmoni arama ve partikül küme, kullanılarak adı geçen kirişlerin optimum boyutlandırılmasını içeren bilgisayar yazılımları gerçekleştirilmiştir. FORTRAN programlama dili kullanılarak Windows ortamında gerçekleştirilen bu yazılımlar ile ilgili bilgilerin yanı sıra yazılımların analitik ve tasarımsal becerileri aşağıda maddesel olarak sıralanmıştır.

- BS (British Standart) şartnamesine göre çözüm üretilebilir.
- Optimum tasarım, çelik gövde açıklıklı kirişler için şartnamelerce öngörülen şu tahkikler göz önüne alınarak gerçekleştirilebilir:
Eğilme ve eksenel gerilme
Sekonder (vierendeel) eğilme
Kiriş gövde burkulması
Narinlik oranı
Maximum deplasman
Kesme gerilmesi
- Optimum tasarım, kompozit gövde açıklıklı kirişler için ise yukarıda sıralanmış tahkiklerin yanı sıra beton gövdesinin ve kesme bağlayıcıların (saplamalar) tahkikini gerçekleştirilebilir.

3.1.1. Harmoni arama yöntemi

İlk olarak Geem ve Lee (2004) tarafından oluşturulan harmoni arama (HA) yöntemi orkestranın bir müzik parçasını çalmaya başlamadan önce, müzik aletlerinin akortlarının yapılarak orkestrada birlikte bir uyum oluşturulması konseptine dayanmaktadır. Orkestranın insanlara keyifle dinlettirdiği bir eserin çalınmasındaki müzik aletlerinin harmonisi, optimizasyon işleminin lokal optimuma yakalanmadan global optimumu bulmasına benzetilmiştir. Yapısal optimizasyon tekniklerinin önemli bir bölümü çok bilgi isteyen matematiksel algoritmalara ihtiyaç duymalarının yanı sıra başlangıç değerlerin seçimi algoritmanın global optimum değere yakınsamasını sağlamak için önemlidir. HA algoritması ise daha az matematiksel algoritmaya ihtiyaç duymakla birlikte başlangıç değerlerine ihtiyaç duymamaktadır. Bu yöntemde derece artırılarak arama yerine rastgele arama yapılır ve türevsel bilgi ihtiyacı duyulmamaktadır.

I. Harmoni hafıza armonisi oluşturulması:

İlk olarak başlangıç harmoni hafıza matrisi (H) oluşturulur. Denklem 3.1’de gösterildiği gibi matrisin büyüklüğü harmoni hafızanın büyüklüğü kadardır. H matrisi, genetik algoritmalar ve evrimsel stratejiler yöntemindeki popülasyon ile kavramsal olarak eşdeğerdir. Harmoni hafıza matrisinin büyüklüğü (μ) çözüm vektörlerin sayısı kadardır. Her bir çözüm (harmonik vektörü, I^i) tasarım değişkeninden (N_d) oluşmaktadır ve her

harmoni vektörü matrisin ayrı satırında gösterilir. Sonuç olarak, harmoni hafıza matrisi $H = \mu \times N_d$ şeklinde ifade edilir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & \dots & I_{N_d}^1 \\ I_1^2 & I_2^2 & \dots & I_{N_d}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1^\mu & I_2^\mu & \dots & I_{N_d}^\mu \end{bmatrix} \begin{matrix} \phi(\mathbf{I}^1) \\ \phi(\mathbf{I}^2) \\ \dots \\ \phi(\mathbf{I}^\mu) \end{matrix} \quad (3.1)$$

II. Harmoni arama matrisinin değerlendirilmesi:

Harmoni hafıza matrisi çözümleri analiz edildikten sonra onların amaç fonksiyon değerleri birleştirilmiş genel formül içinde hesaplanır. Değerlendirilen çözümler matris içindeki amaç fonksiyon değerlerinin artan dizisine göre sıralanır. Bu sıralama $\Phi(I^1) \leq \Phi(I^2) \leq \dots \leq \Phi(I^\mu)$ şeklindedir.

III. Yeni harmonin geliştirilmesi:

Yeni harmoni matrisi $I' = [I_1', I_2' \dots I_{N_d}']$ harmoni hafıza ya da tamamlanmış ayrık set tarafından her bir dizayn değişkeni seçilerek geliştirilir. Harmoni hafıza tarafından bir tasarım değişkeninin seçilme olasılığı algoritmanın önemli bir parametresi olan harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranı ($hmcr$) ile kontrol edilir. Bu olasılığı uygulama amacıyla her bir değişken (I_i) için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı (r_i) oluşturulur. Eğer seçilen rastgele sayı (r_i) harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranından ($hmcr$) küçük veya eşit ise değişken H harmoni matrisinin i 'inci sütunu tarafından atanan herhangi bir değer tarafından denklem 8'de gösterildiği gibi seçilir. Eğer r_i sayısı $hmcr$ parametresinden büyükse rastgele değer tamamlanmış ayrık set tarafından atanır.

$$I'_i = \begin{cases} I'_i \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^\mu\} & \text{if } r_i \leq hmcr \\ I'_i \in \{1, \dots, N_s\} & \text{if } r_i > hmcr \end{cases} \quad (3.2)$$

Eğer bir dizayn değişkeni harmoni hafıza tarafından kendi değerine ulaştırılırsa, bu değer in derece uyumluluğu (pitch-adjusted) olup olmadığı kontrol edilmelidir. Basit bir şekilde derece uyumluluğu değişkenin şimdiki değeri tarafından eklenerek veya çıkarılarak elde edilen değişkenlerin komşu değerlerden birisinin örneklemesidir. Benzer şekilde $hmcr$ parametresi de derece uyumluluğu (par), Denklem 3.3 olarak bilinen olasılık kavramı ile birlikte çalıştırılır. Eğer par tarafından etkinleştirilmemişse tasarım değişkeni farklılaşmaz.

$$I_i'' = \begin{cases} I_i' \pm 1 & \text{if } r_i \leq par \\ I_i' & \text{if } r_i > par \end{cases} \quad (3.3)$$

IV. Harmoni hafıza matrisinin güncelleştirilmesi:

Yeni harmoni vektörünün oluşturulmasından sonra onun amaç fonksiyon değeri hesaplanır. Eğer bu değer harmoni hafıza matrisinin içindeki en kötü değerden daha düşükse, Bulunan yeni değer hafıza matrisinin içine yerleştirilir ve matrisin içindeki en kötü değer matris içinden çıkartılır. Yenilenmiş harmoni hafıza matrisi amaç fonksiyonlarının değerine göre yükselerek sıralanır.

V. Sonlandırma: 3. ve 4. Adımlar algoritma döngünün maksimum sayısına (N_{cyc}) ulaşıncaya kadar tekrar edilir.

3.1.2. Partikül küme optimizasyon yöntemi

Partikül küme optimizasyonu (PK) yöntemi hayvanlarda rastlanan böcek kümelenmesi, kuş sürüleri ve balıkların toplu hareketleri gibi sosyal davranışlarını temel alır (Pezeshk ve Camp 2002). Bu davranış bütün sürü hareketini gösteren bilgi ve aynı zamanda her bir bireyin hafızasına dayalı olan sosyal gruplandırmaya dayanır. Prosedür bir amaç fonksiyonu örnek uzayı içerisinde rastgele olarak oluşturulan sürüyü meydana getiren belli miktarda partikülü ihtiva eder. Sürü içerisindeki her partikül optimum tasarım problemi için birer aday çözümdür. Partiküller örnek uzaya doğru uçuş eğilimindedirler ve bir zaman aralığı için her bir adımdaki pozisyonları, mevcut pozisyonları ve hız vektörleri ve kullanılarak güncellenir.

I. Partiküllerin oluşturulması:

Bir partikül kümesi küme boyutunu (μ) temsil eden ve önceden belirlenmiş miktarda partikülden oluşur. Her partikül ($\mathbf{P}$) iki adet bileşene sahiptir; bir yer (tasarım) $\mathbf{I}$ vektörü ve hız vektörü $\mathbf{v}$ (Denklem 3.4). Yer vektörü $\mathbf{I}$ tasarım değişkenlerinin yerlerini ihtiva ederken hız vektörü $\mathbf{v}$ 'de arama süresince bu yer vektörünün güncellenmesi için kullanılır. Sürü içindeki her bir partikül bütün ilk pozisyonlar I_i^0 ve hızlar v_i^0 Denklem 3.5 ve 3.6'ya bağlı kalacak şekilde rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I}, \mathbf{v}), \quad \mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_{N_d}] \quad , \quad \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{N_d}] \quad (3.4)$$

$$I_i^{(0)} = I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min}), \quad i = 1, \dots, N_d \quad (3.5)$$

$$v_i^{(0)} = \frac{I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min})}{\Delta t}, \quad i = 1, \dots, N_d \quad (3.6)$$

Burada r , 0 ile 1 arasında rastgele seçilmiş bir numara; Δt zaman aralığı ve $I_{\min}$ $I_{\max}$ ise sırasıyla kesit listesindeki ilk ve son çelik profilin sıra numaralarını göstermektedir.

II. Partiküllerin değerlendirilmesi:

Bütün partiküller ana denkleme bağlı kalınmak suretiyle analiz edilir ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

III. Partiküllerin en iyi değerinin ve küme içindeki en iyi partikül değerinin güncellenmesi:

Bir partikülün o ana kadarki en iyi pozisyonu partikülün en iyi değeri olarak kabul edilir ve her bir partikülün an iyi değeri $\mathbf{B}$ vektörüne kaydedilir. Bunun yanı sıra prosesin başlangıcından itibaren herhangi bir partikül tarafından elde edilmiş olan en iyi pozisyon ise en iyi global pozisyon olarak $\mathbf{G}$ vektörüne kaydedilir. Her bir $\mathbf{k}$ iterasyon adımı için partikül ve global en iyi pozisyon değerleri güncellenir.

$$\mathbf{B}^{(k)} = [B_1^{(k)}, \dots, B_i^{(k)}, \dots, B_{N_d}^{(k)}] \quad \mathbf{G}^{(k)} = [G_1^{(k)}, \dots, G_i^{(k)}, \dots, G_{N_d}^{(k)}] \quad (3.7)$$

IV. Partiküllerin hız vektörlerinin güncellenmesi:

Her partikülün hız vektörü partiküllerin mevcut pozisyonu, lokal ve global en iyi pozisyon dikkate alınarak aşağıdaki gibi güncellenir.

$$v_i^{(k+1)} = wv_i^{(k)} + c_1r_1\left(\frac{G_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t}\right) + c_2r_2\left(\frac{B_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t}\right) \quad (3.8)$$

Burada, r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında seçilen rastgele sayılar; algoritmanın keşif özelliklerini kontrol eden partikül atalet parametresi; c_1 ve c_2 ise partikülün sırasıyla kendisine ve sürüye ne kadar bağlı kalacağını gösteren güven parametreleridir.

V. Partikül pozisyon vektörünün güncellenmesi:

Daha sonra güncellenen hız vektörü kullanılarak her bir partiküle ait pozisyon vektörü güncellenir.

$$I_i^{(k+1)} = I_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \Delta t \quad (3.9)$$

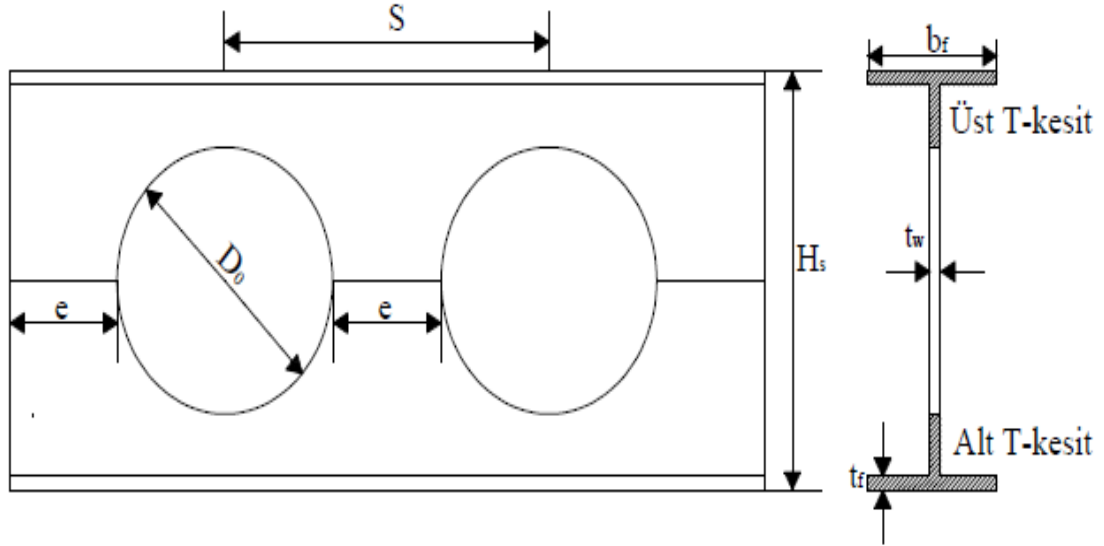
VI. Sonlandırma: İki den beşe kadar olan adımlar önceden belirlenmiş olan N_{ite} kadar iterasyon için tekrarlanır.

3.2. Dairesel Boşluklu Kirişlerin Geometrik Özellikleri

Uygulanan yük kombinasyonları altında daire sel boşluklu petek kirişlerde oluşabilecek kusurları engellemek için dikkate alınacak geometrik ve davranışsal sınırlayıcı lar “The Steel Construction Institute” Yayın No: 100 başlıklı “Design of Composite and Non-composite Cellular Beams” adlı kaynaktan alınmıştır. Boyutlandırma yöntemleri “BS5950 part 1 and 3, and BS449” şartnamelerine uygundur. Dairesel boşluklu petek kirişler için kullanılan standart profil geometrisi ve notasyonlar Şekil 3.1.’de gösterilmiştir.

$$1.25 < \frac{H_s}{D_0} < 1.75 \quad (3.10)$$

$$1.08 < S/D_0 < 1.50 \quad (3.11)$$



Şekil 3.1. Dairesel boşluklu petek kirişin geometri ve notasyonları

3.3. Davranış Sınırlayıcı lar

Petek kirişlerde oluşabilecek kusurları engellemek için bazı sınırlayıcı lar dikkate alınmalıdır. Petek kirişlerin boyutlandırılmasında kirişin alt ve üst parçalarının vierendeel eğilme kapasitesi, kirişin üst başlığında oluşabilecek bölgesel burkulma, profilin esneklik kapasitesi, kesme kapasitesi, kiriş gövdesi burkulma kapasitesi ve deplasman kısıtlayıcısı boyutlandırılma sınırlayıcı ları olarak alınmaktadır.

3.3.1. Maksimum moment kapasitesi

Elastik tasarım yönteminde; kirişlerde oluşabilecek maksimum moment aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir. Kirişin dış yüklere dayanıklı olması için uygulanan yükler altında dairesel gözenekli petek kirişte oluşacak maksimum moment değeri izin verilebilir moment değerini aşmamalıdır.

$$M_p = A_{tee} \times p_y \times h \quad (3.12)$$

$$M_u \leq M_p \quad (3.13)$$

3.3.2. Kirişin kesme kuvveti kapasitesi

Petek kirişlerin boyutlandırılmasında üç kesme kuvveti tahkiki yapılır. Bunlardan ilki; destek bölgelerindeki kesme kuvveti tahkikidir. Denklem 3.14'teki sınır koşulu; destek bölgesindeki kesme kuvveti değerinin (V_{maxsup}) kirişin maksimum kesme kuvveti kapasitesini (P_v) aşmamasını belirtir.

$$V_{maxsup} - P_v \leq 0 \quad (3.14)$$

$$P_v \leq 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{gövdedeki en küçük alan}) \quad (3.15)$$

İlk tahkike ek olarak kirişteki düşey kesme kuvveti kontrolü Denklem 3.16 ile yapılır. Kirişin boşluktan dolayı oluşan alt ve üst T-kesitlerindeki kesme kuvvetleri kapasitelerinin toplamı kirişin toplam kesme kapasitesini verir. Uygulanan yük kombinasyonundan dolayı petek kirişte oluşacak düşey yöndeki kesme kuvveti (V_{0max}); sınır değerini (P_{vy}) aşmamalıdır.

$$V_{0max} - P_{vy} \leq 0 \quad (3.16)$$

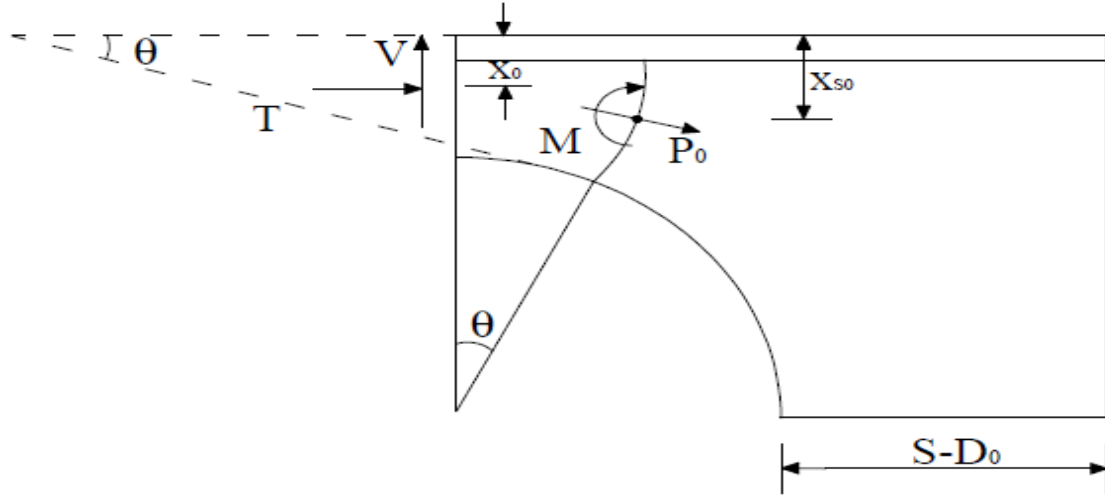
$$P_{vy} \leq 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{alt ve üst gövde alanı}) \quad (3.17)$$

Son olarak yanal kesme kuvveti kontrolü yapılır. Yanal kesme kuvveti; kirişin üst parçasındaki eksenel kuvvetlerin değişmesinden dolayı kirişin gövde kısmında meydana gelir. Kirişin gövde bölgesindeki yanal kuvvet (V_{Hmax}), yanal kesme kuvveti kapasitesinden (P_{vh}) küçük olmalıdır.

$$V_{Hmax} - P_{vh} \leq 0 \quad (3.18)$$

$$P_{vh} \leq 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{en küçük gövde alanı}) \quad (3.19)$$

Petek kirişlerde eğilme altındaki kirişin alt ve üst parçalarının esneklik kapasitesinin tahkik edilmesi gerekir. Petek kiriş kesmeye maruz kaldığı zaman, kiriş boşluğunun alt ve üst kısmındaki T-kesitleri birincil ve ikincil momentlerin yanı sıra uygulanan kesmeyi de taşımaktadır.



Şekil 3.3. Olander eğimli kiriş yaklaşımı

$$\frac{P_0}{P_u} + \frac{M}{M_p} \leq 1.0 \quad (3.23)$$

$$P_0 = T x \cos \theta - \frac{V}{2} x \sin \theta \quad (3.24)$$

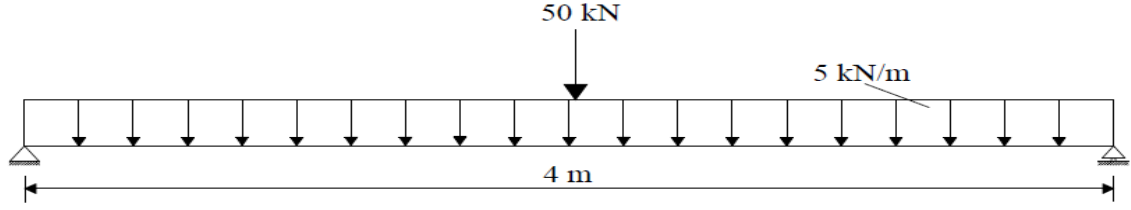
$$M = T x (x_{s0} - x_0) + \frac{V}{2} x \left(\frac{H_s}{2} - x_{s0} \right) \quad (3.25)$$

3.4. Dairesel Boşluklu Kirişlerin Optimizasyonu

Tez çalışmasının bu kısmında optimizasyon yöntemleri partikül küme ve harmoni arama yöntemlerinin farklı açıklıklarda ve farklı yüklemeler altındaki performanslarının kıyaslanması yapılmıştır. Ayrıca, adı geçen optimizasyon yöntemlerinin optimum sonucu buluncaya kadar algoritma parametrelerine ve tasarım sınırlayıcılarına bağlı olarak sonucu buluncaya kadar oluşturdukları matrisler yöntemlerin çalışma prensipleri ile beraber bu kısımda anlatılmıştır.

3.4.1. 4 metre açıklıklı kirişin optimizasyonu

Şekil 3.4'te gösterilen basit kiriş sistemi harmoni arama ve partikül küme optimizasyon yöntemlerinin tasarım algoritmaları adımlarını tanımlamak amacıyla ilk örnek olarak seçilmiştir. 4-metre açıklığında olan bu kiriş kendi ağırlığı da dahil olmak üzere 5 kN/m ölü yük ve orta noktasından tekil olarak etki eden 50 kN büyüklüğünde hareketli yük altındadır.



Şekil 3.4. Yük altında 4-metre açıklıklı kiriş

Mevcut yükler altında kiriş için izin verilebilir deplasman 12 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205 kN/mm^2 ve çelik kiriş için tasarım gerilmesi 35.5 kN/mm^2 'dir. Kirişin boyutlandırılmasında farklı Harmoni arama (HA) ve Partikül Küme (PK) yöntem parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir. Harmoni hafıza matrisi (*hms*) ve partikül sayısı (μ) her iki yöntem için eşit ve 10 olarak alınmıştır. Harmoni arama yönteminin diğer parametreleri *hmcr* ve *par* sırasıyla 0.8 ve 0.35 olarak alınmıştır. PK yönteminin tasarım parametreleri olan *c1* ve *c2* 1 olarak, *w* 2 olarak ve Δt ile *Vmax* değerleri de 2 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile PK yönteminin bulduğu ilk matris yine Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Partikül Küme ve Harmoni Arama yöntemlerinin ilk matrisleri

PK Algoritması (Başlangıç)					HA Algoritması (17 iterasyon sonra)				
Partikül No	Kesit (UB)	Boşluk Sayısı	Boşluk Çapı (mm)	Ağırlık (kg)	Sıra No	Kesit (UB)	Boşluk Sayısı	Boşluk Çapı (mm)	Ağırlık (kg)
1	356x127 x33	8	386	120.53	1	356x127 x39	10	316	144.80
2	406x140 x39	8	429	137.71	2	406x178 x60	6	412	231.48
3	406x140 x39	7	366	148.20	3	406x178 x74	7	538	255.95
4	305x102 x33	8	342	124.06	4	406x178 x74	7	396	284.50
5	406x178 x74	8	380	280.79	5	457x191 x74	7	352	287.56
6	356x171 x57	10	291	217.60	6	457x191 x98	5	581	371.18
7	305x127 x37	9	371	132.54	7	533x210 x109	6	558	398.71
8	356x171 x45	8	324	172.20	8	533x210 x122	5	560	464.99
9	406x178 x67	8	365	255.68	9	610x229 x125	6	499	476.21
10	305x127 x37	8	349	139.32	10	686x254 x140	4	590	543.51

İlk oluşturulan matristeki minimum ağırlık ve profil tablosundan $356 \times 127 \times 33$ UB kesiti ile PK yöntemi seçmiştir (Çizelge 3.1). Seçilen kesit için 8 dairesel boşluk ve 386 mm boşluk çapı üretilmiştir. Harmoni arama yöntemi ise $356 \times 127 \times 39$ UB kesitini seçmiştir. 17. iterasyondan 32. iterasyona kadar yeni bir matris oluşturamamıştır.

Çizelge 3.2. PK ve HA yöntemlerinin 32 iterasyon sonrasında uygun değerleri

PK Algoritması					HA Algoritması				
Partikül No	Kesit (UB)	Boşluk Sayısı	Boşluk Çapı (mm)	Ağırlık (kg)	Sıra No	Kesit (UB)	Boşluk Sayısı	Boşluk Çapı (mm)	Ağırlık (kg)
1	305x165 x54	9	387	195.79	1	356x127 x39	10	316	144,80
2	406x140 x39	8	429	137.71	2	356x171 x45	9	359	163.44
3	356x171 x67	9	391	243.97	3	406x178 x60	6	412	231.48
4	356x171 x67	8	342	124.06	4	406x178 x74	7	538	255.95
5	406x140 x46	9	386	166.00	5	406x178 x74	7	396	284.50
6	356x171 x57	10	291	217.60	6	457x191 x74	7	352	287.56
7	356x171 x45	9	374	163.44	7	457x191 x98	5	581	371.18
8	356x127 x33	9	359	119.66	8	533x210 x109	6	558	398.71
9	305x165 x54	9	389	195.39	9	533x210 x122	5	560	464.99
10	305x127 x37	8	349	139.32	10	610x229 x125	6	499	476.21

Çizelge 3.2’de detaylı olarak gösterildiği üzere iterasyon sayısı 32 olduğu zaman harmoni hafıza matrisi 2. Satırdaki 163.44 kg değerini bulunca yöntem bir önceki çizelgede en kötü uygun tasarım olan 543.51 kg değerindeki tasarımı çıkartıp yerine 163,44 kg bulunan tasarımı matris içine almıştır.

Çizelge 3.3. PK ve HA yöntemlerinin 780 iterasyon sonrasında uygun değerleri

PK Algoritması					HA Algoritması				
Partikül No	Kesit (UB)	Boşluk Sayısı	Boşluk Çapı (mm)	Ağırlık (kg)	Sıra No	Kesit (UB)	Boşluk Sayısı	Boşluk Çapı (mm)	Ağırlık (kg)
1	305x102 x25	9	374	86.27	1	305x102 x25	10	402	82.19
2	305x102 x25	10	365	83.19	2	305x102 x25	9	345	82.50
3	254x146 x43	10	336	157.78	3	305x102 x25	6	342	82.80
4	305x102 x25	9	351	89.10	4	305x102 x25	7	315	82.90
5	305x102 x25	10	348	85.81	5	305x102 x25	7	312	83.11
6	305x102 x25	11	334	84.15	6	305x102 x25	7	335	83.52
7	305x102 x25	11	330	84.80	7	305x102 x25	5	305	83.72
8	254x146 x37	12	303	133.65	8	305x102 x25	6	328	83.82

Çizelge 3.3.'ün devamı

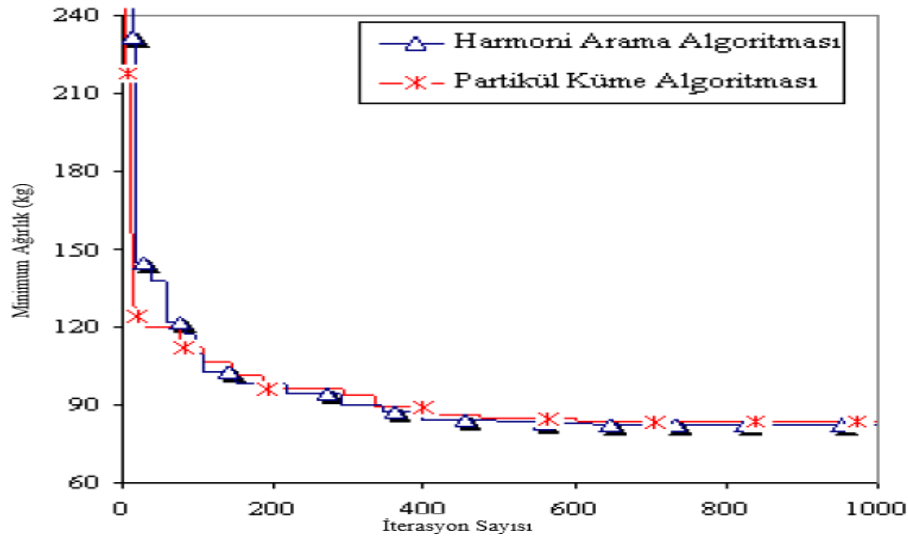
9	305x102 x25	11	333	84.32	9	305x102 x25	5	313	84.33
10	305x102 x25	10	368	82.71	10	305x102 x25	6	310	84.43

Her iki yöntemin 780 iterasyon sonucunda bulduğu optimum sonuçlar Çizelge 3.3'te verilmiştir. Bu iterasyon değerinden sonra yöntemler 5000 iterasyona kadar devam edildiğinde daha iyi bir sonuç bulamadıkları için bu iterasyonda bulunan minimum ağırlıklar optimum olarak kabul edilir.

Çizelge 3.4. 4-m açıklıklı kiriş için bulunan sonuçların kıyaslanması

Arama Yöntemi	Optimum Kesit Tasarımları (UB)	Boşluk Çapı (mm)	Boşluk Sayıları	Minimum Ağırlık (kg)
HA Algoritması	305×102×25	402	9	82.19
PK Algoritması	305×102×25	368	10	82.71

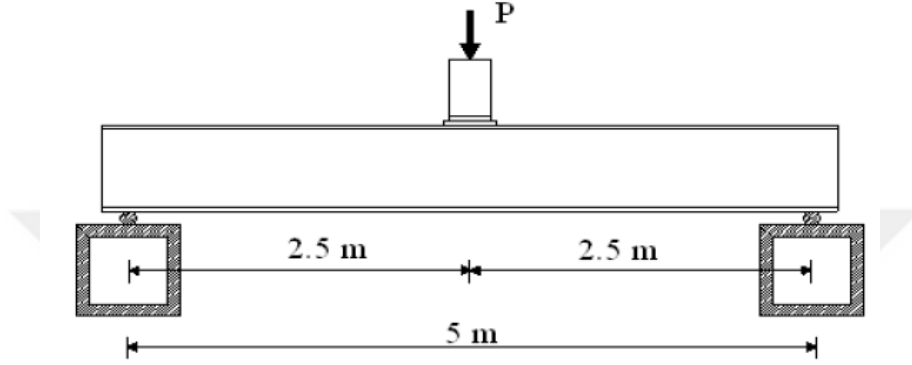
Çizelge 3.4'ten görüldüğü üzere bu kiriş için optimum tasarım ağırlığı 82.19 kg'dır. HA yöntemi optimum tasarım için 305×102×25 UB kesitli profili seçmiş ve bu kesitte 402 mm çaplı 9 dairesel boşluk olarak belirlemiştir.

**Şekil 3.5.** 4-m açıklıklı kiriş için tasarım geçmiş grafiği

Bu problem sonucunda HA yöntemi için dayanım ve geometrik sınırlayıcılarının etkin olduğu, PK yöntemi için ise sadece dayanım sınırlayıcılarının etkin olduğu görülmüştür. Her iki yöntemin optimum sonucu bulurken Şekil 3.5'teki tasarım geçmiş grafiklerine bakıldığı zaman yakınsamaların birbirine benzer olduğu fakat HA yönteminin optimum sonucu bulduğu gözlemlenmiştir.

3.4.2. 5-metre açıklıklı kirişin optimizasyonu

Şekil 3.6’da gösterilen aradaki çelik kirişin dairesel boşluklu petek kiriş yapılmasına karar verildiği varsayılıyor. Kiriş, kendi ağırlığının yanı sıra sırasıyla tam orta noktasından tekil noktasal yüke maruz kalıyor. Mesnetler arası mesafe 5m. Tekil yük altında kiriş için izin verilebilir deplasman 17 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205 kN/mm² ve çelik kiriş için tasarım gerilmesi 35.5 kN/mm²’dir. Kirişin boyutlandırılmasında farklı Harmoni arama (HA) ve Partikül Küme (PK) yöntem parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir.



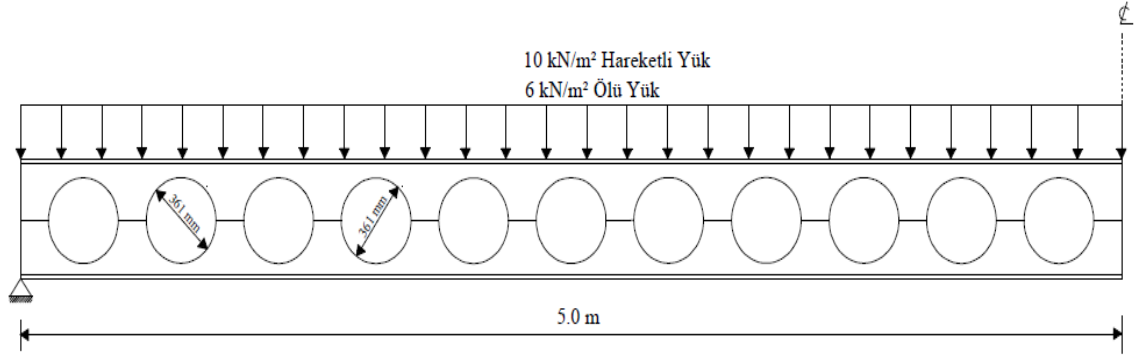
Şekil 3.6. 5-metre açıklıklı çelik ub kesitli kiriş

Optimum boyutlandırma probleminde standart çelik kesit tablosundan sıcak haddelenmiş kiriş kesit sıra numarası, dairesel boşluk çapı ve kiriş açıklığındaki toplam boşluk sayısı tasarım değişkenleri olarak alınırlar. Bu amaçla IPN-80 ile IPN-600 arasında değişen şartnamedeki standart I-kesit kiriş profillerinden, 70mm ile 600 mm arasında değişen boşluk çaplarından ve 2 ile 40 arasında değişen kirişteki toplam oluşabilecek boşluk sayısından oluşan bir tasarım havuzu hazırlanır. Tasarım sınırlayıcıları olarak deplasman kısıtlayıcısı, kiriş profilin esneklik kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi, kiriş gövdesi esneklik ve burkulma kapasitesi, kirişin alt ve üst parçalarının vierendeel eğilme kapasitesi ve kirişin üst flanşında oluşabilecek bölgesel burkulma alınmıştır. HA algoritması parametreleri kullanılarak optimum boyutlandırması yapılan dairesel boşluklu petek kirişin sonuçları Çizelge 3.5’te verilmiştir. HA algoritması bu kiriş için optimum sonucu hms, hmc_r ve par parametreleri için sırasıyla 30, 0.70 ve 0.45 değerlerini kullanarak 5000 iterasyon sonra 221.4 kg ağırlık olarak buluyor.

Çizelge 3.5. 5-metre açıklıklı dairesel boşluklu petek kirişin optimum boyutları

Optimum UB-Kesit Tasarımı	Boşluk Çapı (mm)	Toplam Boşluk Sayısı	Maksimum Gerilme Oranı	Minimum Ağırlık (kg)
305X102X25 UB	361	22	0.96	221.4

Dairesel boşluklu petek kirişin ölü ve hareketli yük kombinasyonları altında optimum geometrik özellikleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Dairesel boşluklu petek kirişin profil kesiti

3.5. Kirişlerin Deney Öncesi Hazırlıkları

3.5.1. DBP kirişlerin elde edilmesi

Çalışmanın ikinci aşamasında optimum boyutlandırılmış kirişlerin tekil yükler altında yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu amaçla stokastik yöntemler kullanılarak boyutlandırılan dairesel boşluklu IPN-200 ve IPN-240 kesitli kirişlerin dayanımlarının mukayeseleri yapılacaktır. Optimum boyutlandırması yapılan bu kirişlerin kesimleri CNC (Computer Numerical Control) yöntemi ile endüstriyel ortamda yapıp daha sonra gövde bölgeleri kaydırılarak birleşim yerlerinden kaynaklanması gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri sırasında kirişin üst gövdesinde eğilme olmaması için her iki parçayı birbirine tutturacak sabitleyiciler kullanılmıştır (Şekil 3.5).



(a)



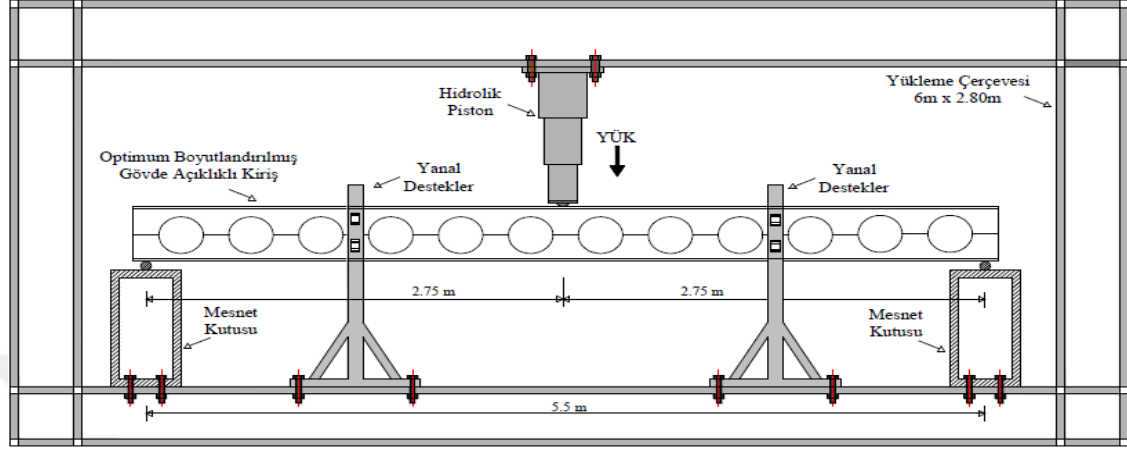
(b)

Şekil 3.8. (a) Kirişin kesim işlemi; (b) Kaynakla birleştirme işlemi

3.5.2. Kirişlerin test edilmesi

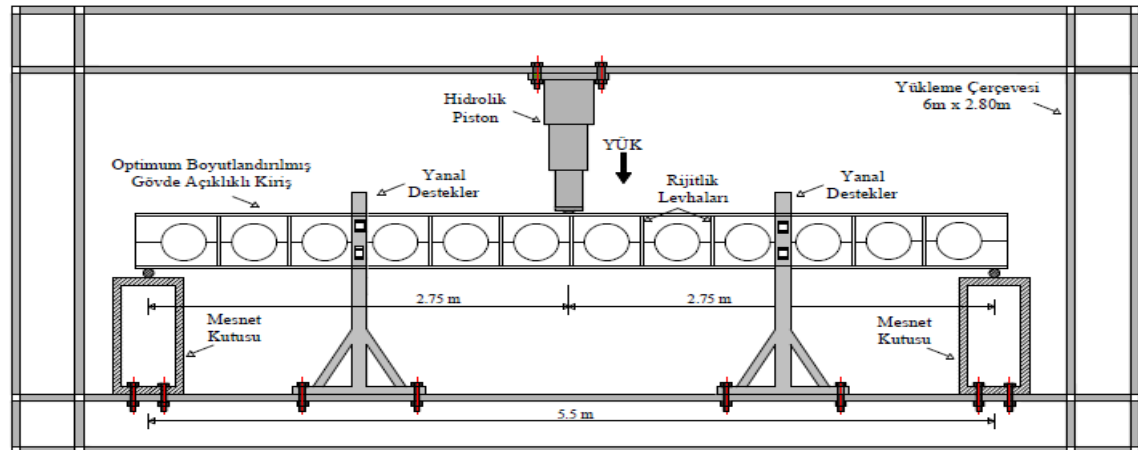
Dairesel boşluklu petek kirişler genellikle ara mesnet gerektirmeyen büyük açıklıkları geçmek için kullanıldıklarından dolayı kiriş uzunlukları 5m seçilmiştir. Bu kapsamda, IPN-200 ve IPN-240 kesitli çelik kirişler için dairesel boşluğa sahip ve

berkitme levhaları ile güçlendirilmiş kirişler de dahil olmak üzere 2 farklı I-kesitli profillerden toplamda 8 farklı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapılması planlanan yükleme çerçevesi 100 ton basınç kuvveti kapasiteli eğilme deneylerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sistemde gövde açıklıklı kirişlerin tekil yüklemeler altında davranışları incelenmiştir (Şekil 3.5).



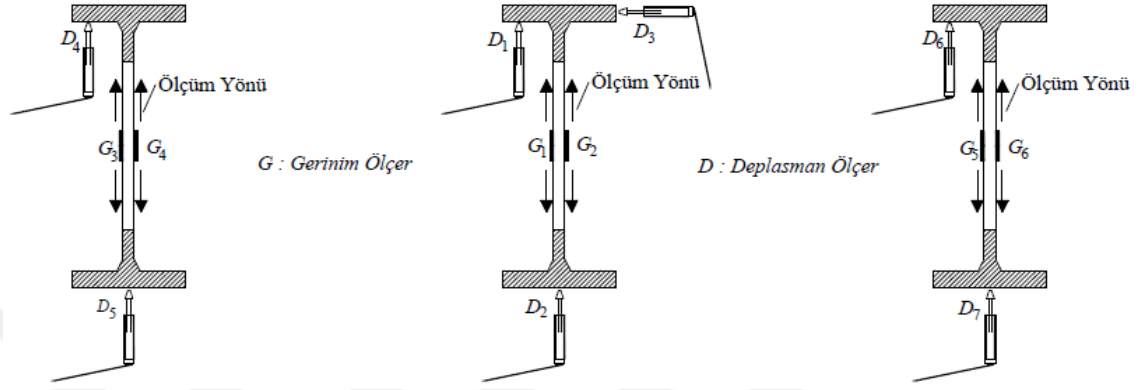
Şekil 3.9. Dairesel boşluklu petek kirişin yükleme çerçevesindeki gösterimi

Dairesel boşluklu petek kirişler 40cm x 100cm ebatlarında olan mesnet profillerin üzerine yerleştirilmiştir. Deneylere başlamadan önce yük hücreleri ile uygulanan yüklerin kalibrasyonları yapılmıştır. Gövde açıklıklı kirişler gövdesi boyunca kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda kirişin boyu buna bağlı olarak da kesit katsayısı ve atalet momenti artar. Buna karşın kirişin ilk haline oranla yanall burkulma riski daha fazladır. Yapılacak olan deneylerde yanall burkulmayı önlemek amacıyla aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere belirli aralıklarla yanall destek payandaları yerleştirilmiştir. Berkitme levhası ile güçlendirilmiş dairesel boşluklu kirişin düşey yükleme altında yükleme çerçevesindeki deney düzeneği şekilsel olarak aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.10. Berkitme levhalı kirişin yükleme çerçevesindeki gösterimi

Düşey yüklemeler sonucunda kirişlerde oluşacak sehimler açıklık boyunca (kiriş açıklığının tam ortasında ve uygulanan yük ile mesnetlerin tam ortasında) yerleştirilecek olan deplasman ölçerler (doğrusal değişken diferansiyel transformatörler - LVDT) ile ölçülecektir. Ayrıca kirişte oluşacak gerinimleri ölçmek amacıyla kiriş gövdesinin her iki tarafına gerinim pulları (strain gauges) aşağıdaki Şekil 3.6'da gösterildiği gibi dikey olarak yapıştırılacaktır.



Şekil 3.11. Dairesel boşluklu petek kirişlerde LVDT ve gerinim ölçerlerin konumları

3.6. Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi

Dairesel boşluklu petek kirişlerin yapılan testlerde elde edilen yük taşıma kapasitelerinin kıyaslanması amacıyla dairese boşluklu petek kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi Abaqus/CAE 6.14-1 ile yapılmıştır. Deneysel çalışmada yükleme çerçevesinde testleri yapılan her kiriş tipi için bulunan göçme yükleri Abaqus/CAE 6.14-1 programında kiriş modelleri simüle edilerek lineer olmayan analiz tipiyle kiriş üzerinde deplasmanların ve eşdeğer gerilmelerin yanı sıra kesme ve normal gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında sonlu eleman analizleri yöntemiyle yapılan çalışma aşağıda adım adım açıklanmıştır.

3.6.1. Abaqus/Cae 6.14-1 eleman tipleri

Dairesel kesitli petek kirişlerin analizinde deney sırasında da kullanılan yanal tutucular sayesinde olabilecek yanal deplasmanlar önlenmiştir. Deney sonuçları da gösteriyor ki; yanal deplasmanlar ihmal edilebilecek boyutlardadır ve kirişler hiçbir şekilde kalıcı yanal deformasyona maruz kalmamıştır. Katı elemanların modellenmesinde iyi bir eğilme davranışı elde etmek için kullanılacak eleman tipleri ve detayları;

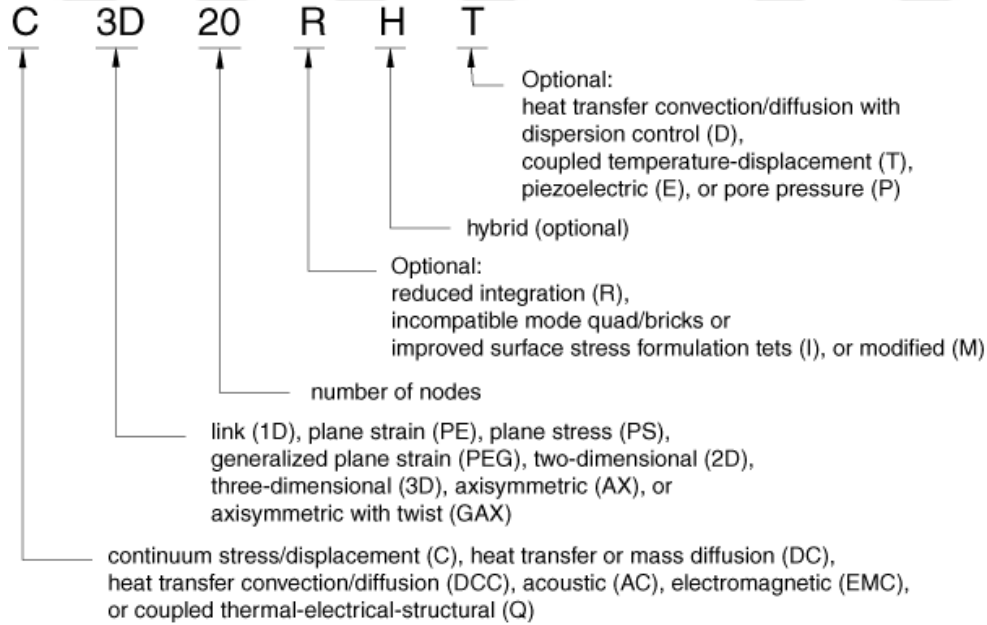
İkinci mertebeden izoparametrik elemanlar (Second-order isoparametric elements); Bu elemanlar ikinci dereceden yer değiştirme alanlarını çoğaltabilir, böylece herhangi bir kayma gerginliği olmadan saf bir bükülme tepkisi modelleme imkânı verir. Sadece Abaqus / Standard'ta mevcuttur.

Uyumsuz mod elemanları (Incompatible mode elements); Doğrusal izoparametrik elemanlara uyumsuz modların eklenmesi, makaslama kilidini ortadan kaldırır ve bu elemanların mükemmel bükülme özelliklerine sahip olmasını sağlar.

Azaltılmış entegrasyon doğrusal izoparametrik elemanlar (Reduced integration linear isoparametric elements); Eleman zorlanma enerjisinin değerlendirilmesinde azaltılmış entegrasyon kayma kilitleme fenomenini ortadan kaldırır. Bu öğeler hem Abaqus / Standard hem de Abaqus / Explicit'te mevcuttur. Genel olarak, bükülme tepkisini doğru bir şekilde modellemek için kalınlık boyunca çoklu azaltılmış entegrasyon elemanlarına ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte, Abaqus / Standard ve Abaqus / Explicit'teki gelişmiş kum saati kontrol yaklaşımı, kaba bir ağda bile iyi bükülme davranışı sağlayabilir. Gelişmiş kum saati kontrolü kullanılarak azaltılmış entegrasyon elemanları ile elde edilen doğrusal elastik malzemeler için yer değiştirme çözeltileri, her ikisi de aynı tür gerilme formülasyonuna dayandığından uyumsuz mod elemanları ile elde edilenlerle yakından eşleşir.

Devamlı kabuk elemanları (Continuum shell elements); Bu elemanlar kabuk elemanlarına benzer davranır ve bu nedenle bükme davranışının hakim olduğu ince yapıların modellenmesinde etkili bir şekilde kullanılabilir. (Simulia Abaqus 6.14 Benchmark Guide; 2.3.5 Performance of continuum and shell elements for linear analysis of bending problems, 2014)

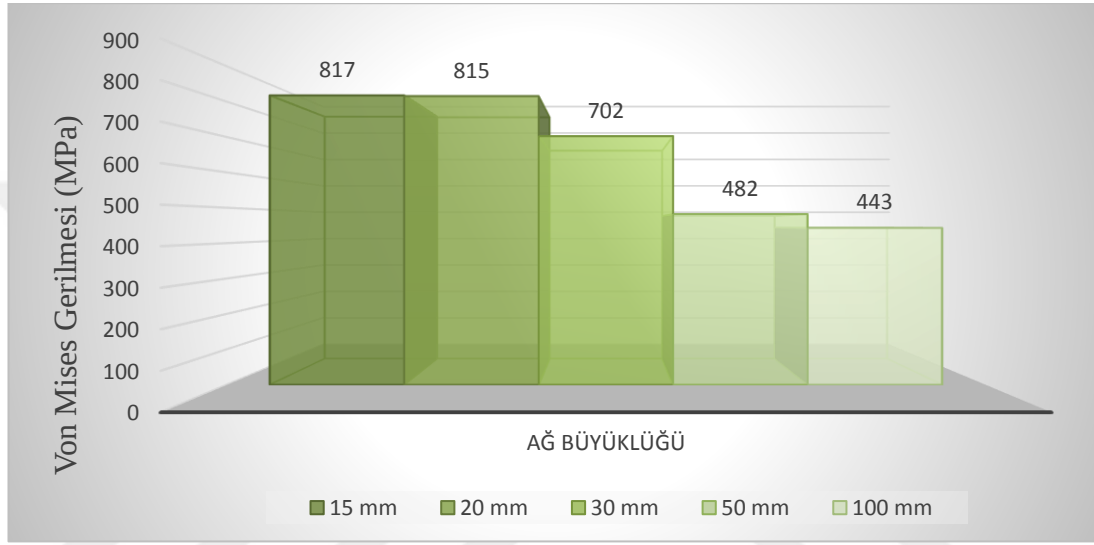
Abaqus'te eleman tiplerinin isimlendirme düzeni; Katı elemanların adlandırma kuralları, eleman boyutuna bağlıdır. Abaqus'te bir boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve eksenel simetrik katı elemanlar Şekil 3.12'ye göre sıralanır.



Şekil 3.12. Abaqus'te eleman tiplerinin isimlendirme düzeni (Simulia Abaqus 6.1 Benchmark Guide; 28.1.1 Solid (continuum) elements; 2014)

3.6.2. Ağ ve eleman tipinin belirlenmesi

Basit eğilme altında en iyi davranışı gösterecek olan C3D8I eleman tipi seçilmiştir. (Simulia Abaqus 6.14 Benchmark Guide; 2.3.5 Performance of continuum and shell elements for linear analysis of bending problems, 2014). Buna karşılık diğer elemanların davranışları da bu tez kapsamında incelenmiştir. Çizelge 3.6’da görülen eleman tiplerine göre 5 farklı ağ tipi ve IPN_240_Berkitmesiz eleman için analiz yapılmış ve test sonuçları ile kıyaslanması yapılarak yakınsamanın hangi eleman tipi ve ağ tipine karşılık geldiği incelenmiştir. Tüm analizler 15mm ve 20 mm ağ büyüklüğü olacak şekilde yapılmıştır.



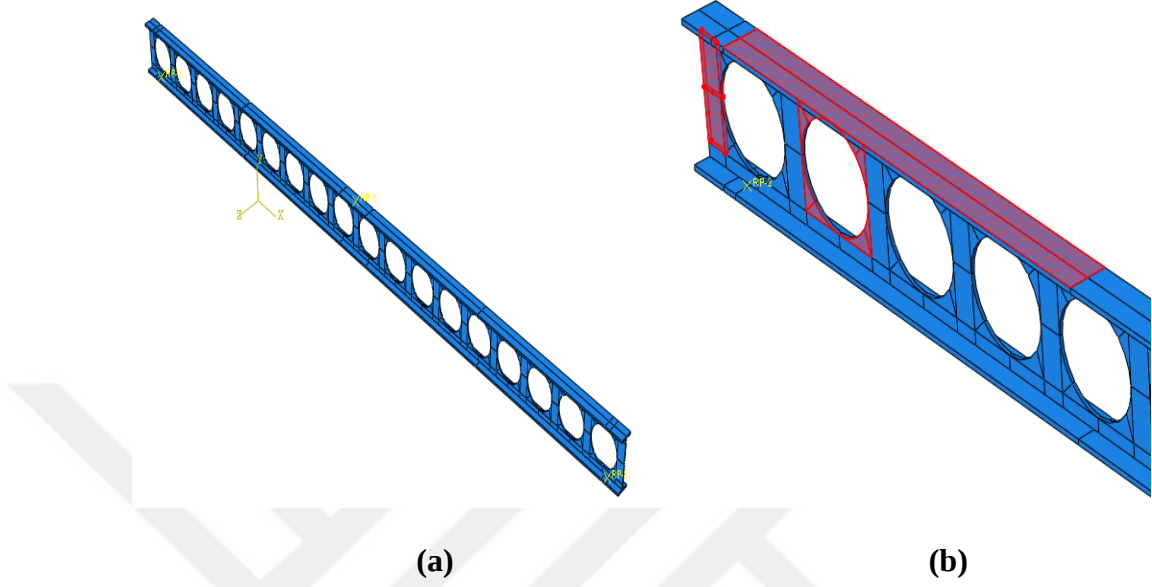
Şekil 3.13. Farklı ağ büyüklüklerine karşılık eşdeğer gerilmeler

Çizelge 3.6. Eleman ile mesh tiplerine karşılık gelen düğüm ve eleman sayıları

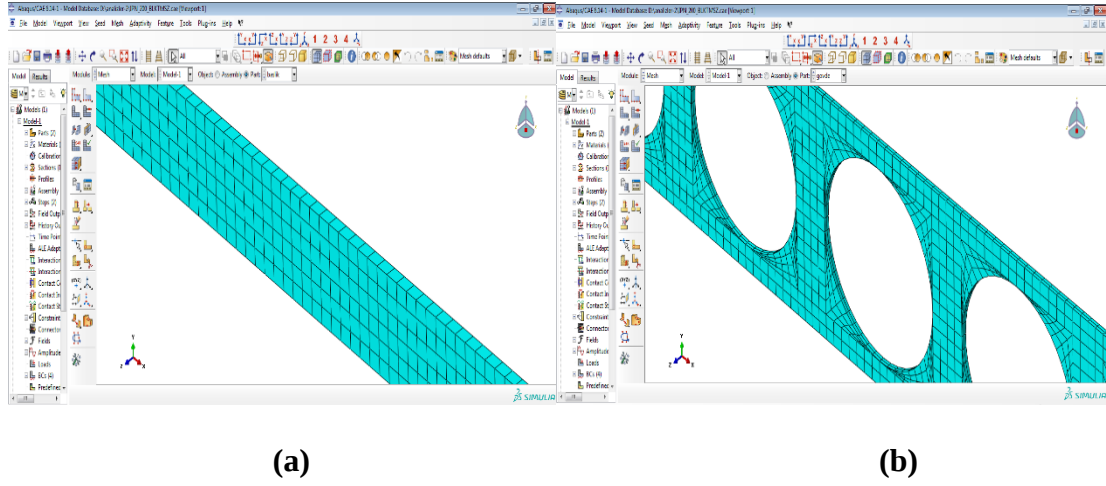
Ağ Tipi (Mesh Type)	Eleman Tipi (Element Type)	Ağ Boyutu (Mesh Size)	Düğüm Sayısı (Node)	Eleman Sayısı (Element)
Hex	C3D8I	15 mm	96615	13995
Hex	C3D8R	15 mm	26655	13995
Hex-Dominant	C3D8I	15 mm	96615	13995
Tetrahedron	C3D10	15 mm	137670	73990
Sweep	C3D8I	15 mm	56150	8059

Çizelge 3.6’da görüldüğü üzere Tetrahedron ve Sweep ağ tipi dışındaki tüm ağ tiplerine karşılık gelen düğüm sayısı ve eleman sayısı aynı çıkmıştır.

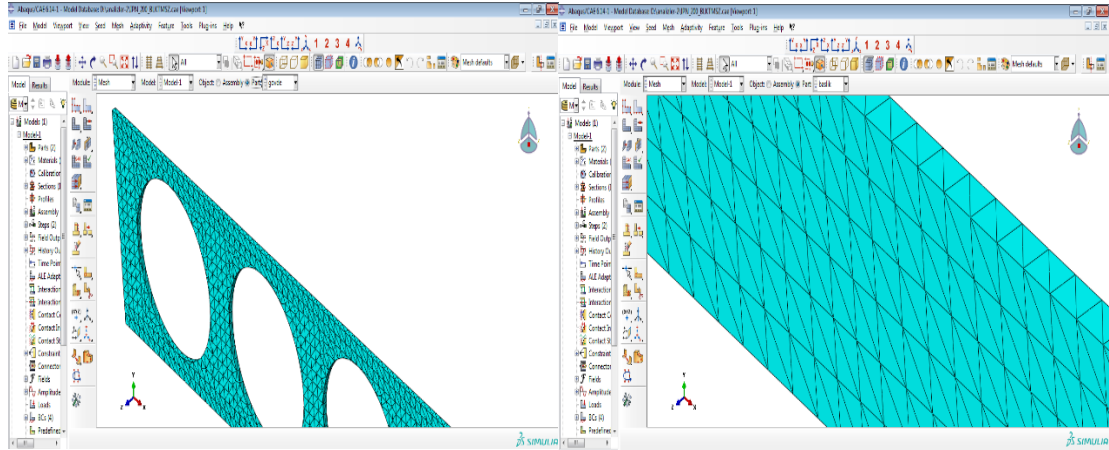
Bunun nedeni Şekil 3.14'te gösterildiği gibi gövde ve başlık elemanın simetrik biçimde kesim işleminin uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde iyi bir sonuç elde etmek için ağ yapısının eleman boyunca süreklilik arz etmesi önemli yer tutmaktadır.



Şekil 3.14. (a) IPN_200_Berkitmesiz elemanın katı modelinin oluşturulması; (b) IPN_200_Berkitmesiz elemanın gövde ve başlık kesim gösterimi



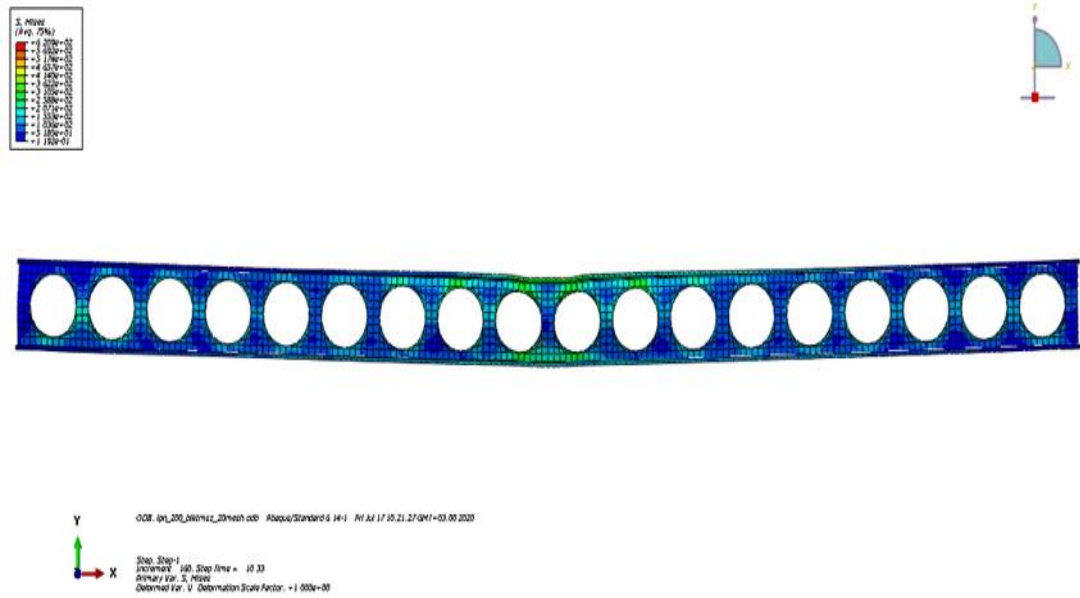
Şekil 3.15. (a) Hex ağ tipinde gövde elemanı (C3D8I); (b) Hex ağ tipinde başlık elemanı (C3D8I)



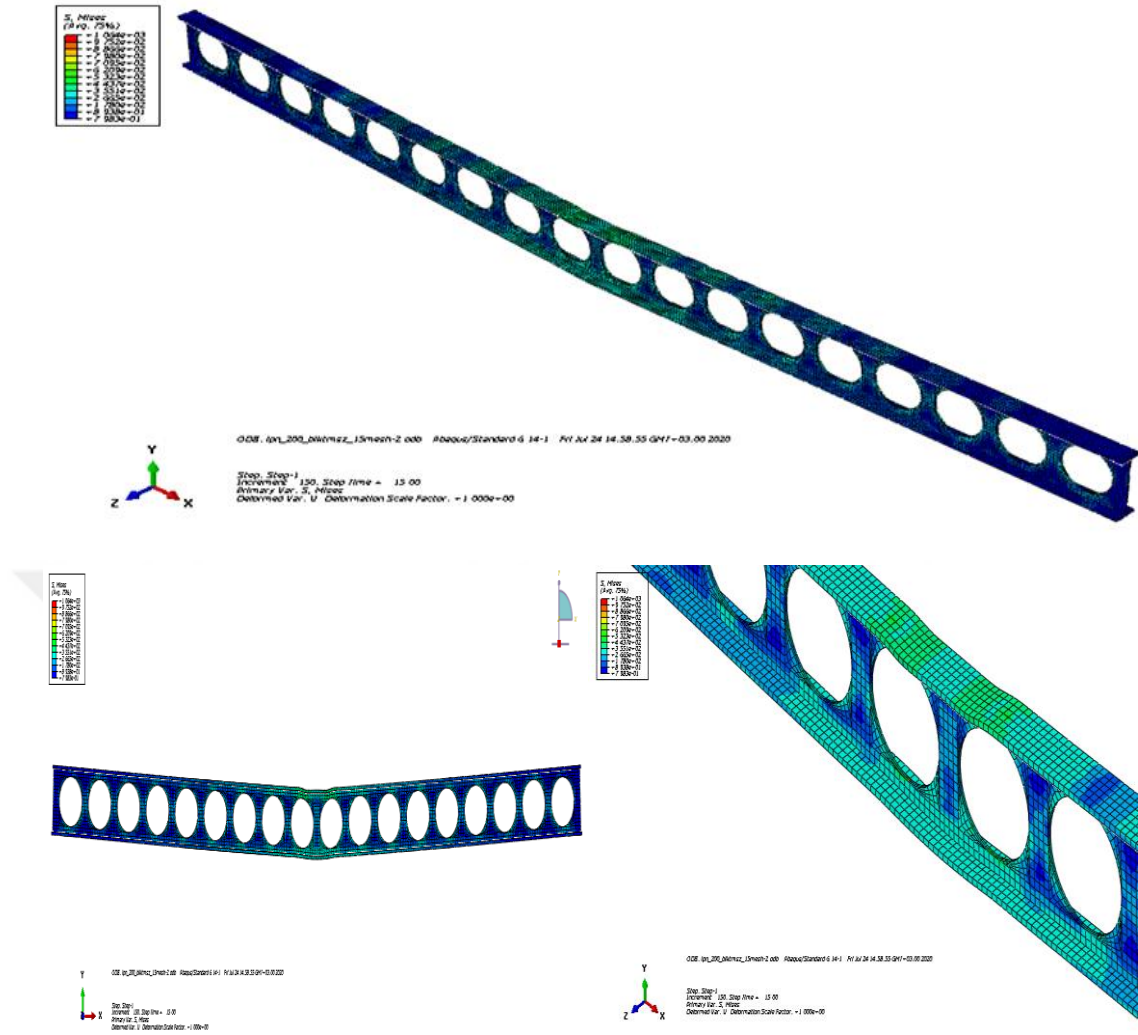
(a)

(b)

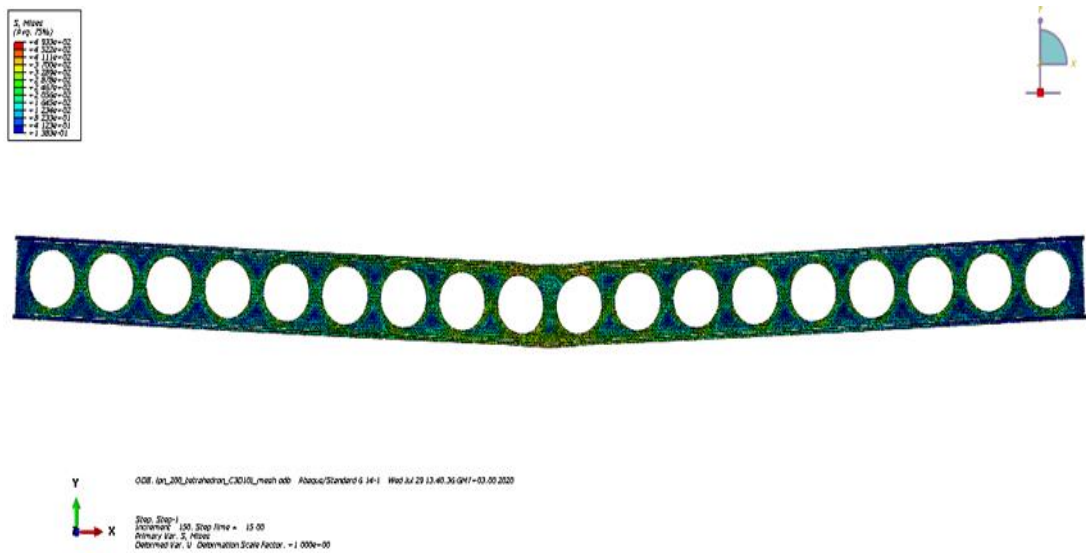
Şekil 3.16. (a) Tetrahedron ağ tipinde gövde elemanı (C3D10); (b) Tetrahedron ağ tipinde başlık elemanı (C3D10)



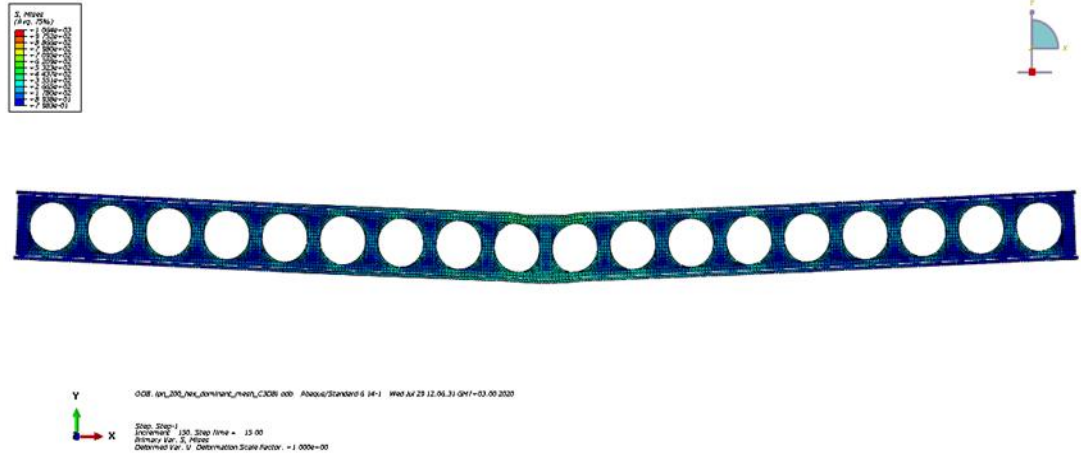
Şekil 3.17. C3D8R elemanın hex ağ tipinde SEA deformasyon sonucu



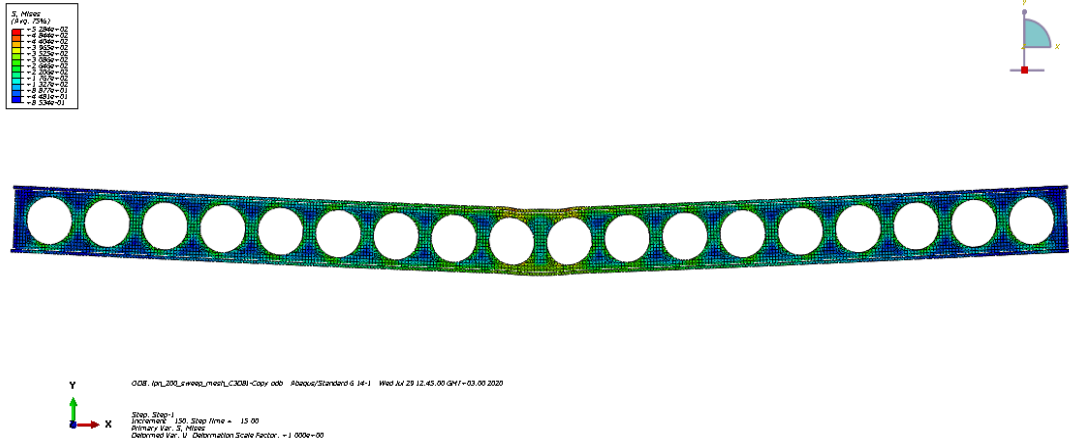
Şekil 3.18. C3D8I elemanın hex ağ tipinde SEA deformasyon sonucu



Şekil 3.19. C3D10 elemanın tetrahedron ağ tipinde SEA deformasyon sonucu

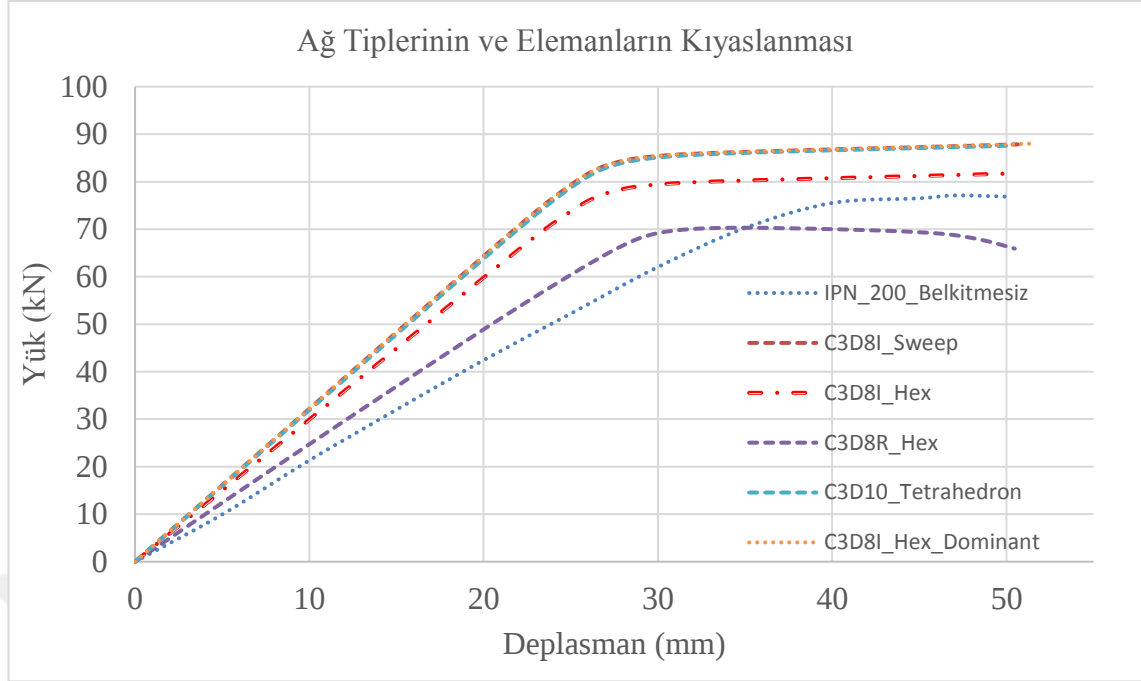


Şekil 3.20. C3D8I elemanın hex dominant ağ tipinde SEA deformasyon sonucu



Şekil 3.21. C3D8I elemanın sweep ağ tipinde SEA deformasyon sonucu

Dairesel boşluklu petek kiriş IPN_DBPK_200 Berkitmesiz elemanı üzerinde farklı eleman tiplerine ve farklı ağ tiplerine göre yapılan analiz sonuçlarında IPN_DBPK_200 berkitmesiz için deneyi yapılan elemanın sonuçları kapasite, deplasman ve deformasyon bakımından kıyaslanmıştır. C3D10 eleman tipinde Tetrahedron, Sweep ve hex_dominant ağ tipinde SEA analizi sonucunu incelediğimizde deformasyonlar bakımından yakınsama göstermiş olsa (Şekil 3.9) bile kapasite açısından olması gereken değerden daha yüksek çıktığı için bu tez kapsamında hiçbir elemanda kullanılmayacaktır. C3D8R eleman tipinde ise davranışı incelediğimizde gövde burkulması ve basit eğilme davranışlarını çok iyi simüle edilmesine rağmen kapasite olması gerekenden daha düşük çıktığından dolayı bu tez kapsamında hiçbir elemanda kullanılmayacaktır. Sonuç olarak bu tez kapsamında Abaqus 6.14-1 'de yapılan analizlerde basit eğilme altında en iyi davranışı gösteren eleman C3D8I olarak seçilmiş ve Hex ağ tipi kullanılarak bu tez kapsamında bundan sonraki tüm analizlerde bu eleman ve mesh tipi uygulanacaktır.



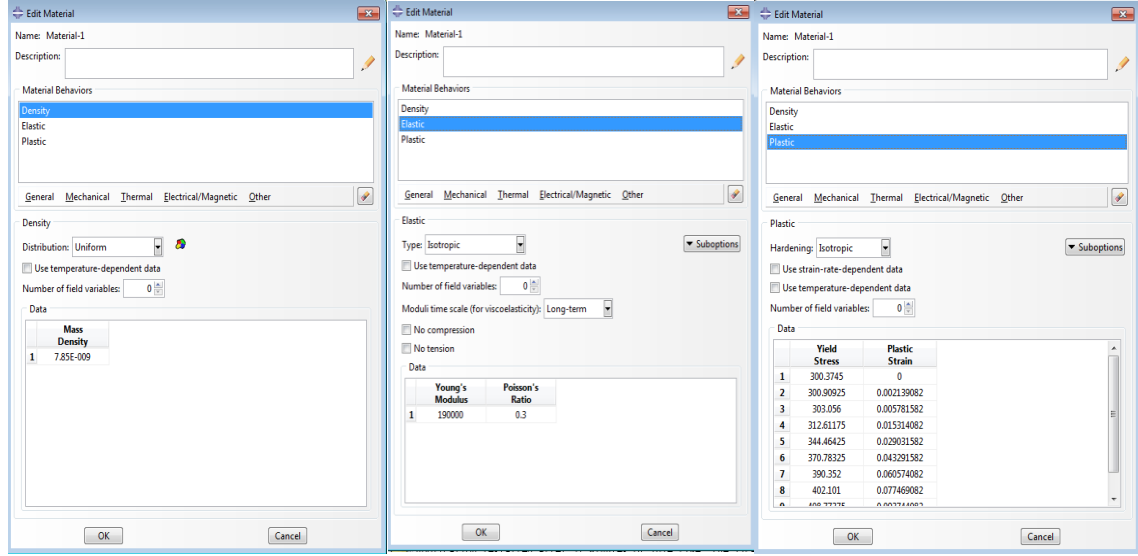
Şekil 3.22. Ağ tiplerinin ve elemanların kıyaslanması

3.6.3. Malzeme özelliklerin girilmesi

Tüm kirişlerin analizinde Çizelge 3.7’de belirtilen değerler girilmiştir. Kirişlerin gövde ve başlıkların da aynı akma değerleri tez çalışmasının 2. bölümünde yapılan kupon testleri sonuçları dikkate alınarak girilmiştir. Elastisite modülleri yine Çizelge 3.7’de belirtilen değerler girilmiştir. Poisson oranı 0.3 olarak programa tanıtılmıştır. Analiz tipi olarak lineer olmayan analiz tipi için ayrıca akma değerleri ve plastik gerinimler Şekil 3.23’te gösterildiği gibi tanıtılmıştır.

Çizelge 3.7. Malzeme dayanım değerleri

SEA	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (Mpa)	Poisson Oranı
IPN_200	300	1.9×10^5	0.3
IPN_240	235	1.9×10^5	0.3



(a)

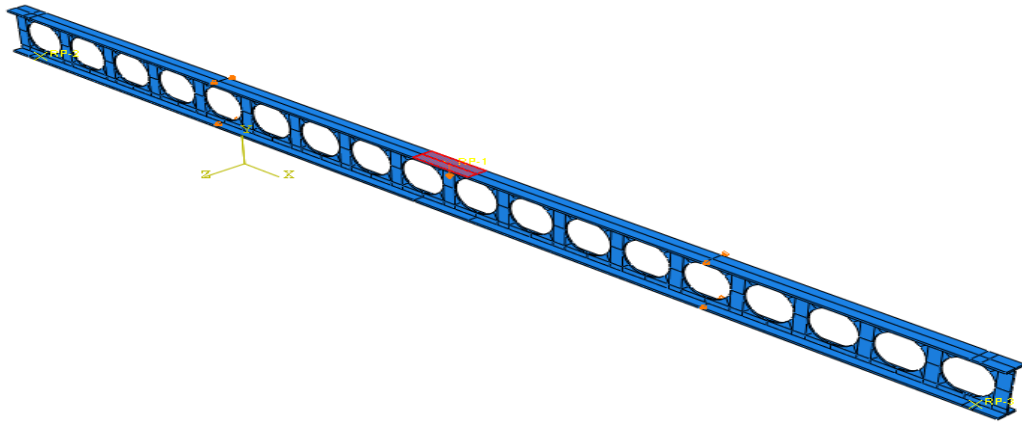
(b)

(c)

Şekil 3.23. (a) Malzeme yoğunluğunun tayini; (b) Elastisite modülü ve Possion oranının tayini; (c) Akma dayanımı-Plastik gerinim

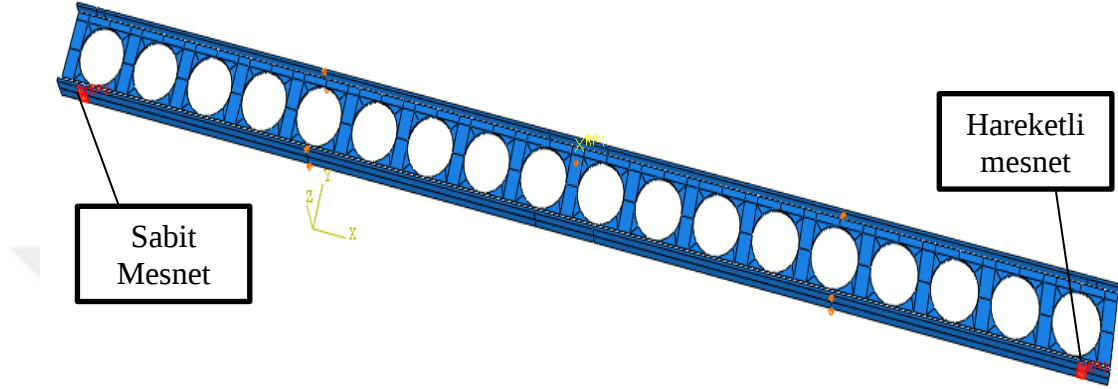
3.6.4. Sınır koşulları ve serbestlikler

Sonlu eleman yöntemiyle yapılan analizlerde tüm kirişler için yapılan testlerde yükün etki ettiği alan baz alınarak Şekil 3.11’de gösterildiği gibi uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda maksimum deplasman 52 mm olarak kirişin alt başlığının orta bölgesinde deplasman ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Buna bağlı olarak testlerden elde edilen sonuçların gerçekliğe en yakın olacak şekilde simüle edilmesi için 100 mm’lik deplasman değeri toplam 15 adım ve 150 alt adım da kirişin orta noktasına konsantre yük olarak etki ettirilmiştir. Yapılan testler sonucunda yükün etki ettiği bölgede herhangi bir deformasyona rastlanılmamıştır. Deformasyonlar genel olarak tekil yüklemenin etki ettiği alanın hemen bitiminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu çıkarıma bağlı olarak tekil yüklemenin etki ettiği alan rijit diyafram modeli gibi davranıldığı varsayılarak rijit diyafram olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.24. IPN_DBPK_200_Berkitmesiz tekil yükleme durumu

Mesnet tanımlamasında modellenen elemanın basit kiriş modeli oluşturduğundan dolayı sabit mesnet ve hareketli mesnet olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.12). Ayrıca kirişin testlerde uygulanan $L/4$ ve $3L/4$ 'lük mesafelerde yanal tutucularla başlılar tutulmuştur. Sabit mesnet ve hareketli mesnet özelliği kazandırmak için kirişin her iki ucuna 100x40 mm ebatlarında plakalar yerleştirilmiştir. Bu plakaların kullanılmasının amacı mesnet ile kiriş yüzeyinde gerekli temas yüzeyi oluşturularak mesnet bölgesinde olası bir mesnet çökmesinin oluşması engellenmiştir.



Şekil 3.25. IPN_DBPK_200_Berkitmesiz serbestliklerin atanması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Testleri (tekil yükleme)

Dairesel boşluklu petek kiriş (DBPK), tekil yükleme altında yük taşıma dayanımlarını ve göçme tiplerinin tespit edilmesi amacıyla IPN_200 4 (dört) adet ve IPN_240 4 (dört) adet eğilme testi uygulanmıştır (Çizelge 4.1; Çizelge4.2).

Testler sonucunda verilerin kıyaslanması bu bölüm kapsamında incelemiş olup elemanların yük- deformasyon değerlerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri ve göçme tipleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. DBPK (dairese boşluklu petek kiriş) deney adetleri

Deney	Yük Tipi	Gövde Durumu	Deney Adedi
IPN_200_Berkitmesiz	Tekil	Dairesel Boşluk	1
IPN_200_Yatay_Berkitmeli	Tekil	Dairesel Boşluk	1
IPN_200_Düşey_Berkitmeli	Tekil	Dairesel Boşluk	1
IPN_200_Dairesel_Berkitmeli	Tekil	Dairesel Boşluk	1

Çizelge 4.2. DBPK (dairese boşluklu petek kiriş) deney adetleri

Deney	Yük Tipi	Gövde Durumu	Deney Adedi
IPN_240_Belkitmesiz	Tekil	Dairesel Boşluk	1
IPN_240_Yatay_Berkitmeli	Tekil	Dairesel Boşluk	1
IPN_240_Düşey_Berkitmeli	Tekil	Dairesel Boşluk	1
IPN_240_Dairesel_Berkitmeli	Tekil	Dairesel Boşluk	1

Tez çalışmasının deneysel kısmında, optimizasyonu yapılan dairese boşluklu kirişler yükleme çerçevesinde test edilmiştir. Bu amaçla basit mesnetli 5 metre açıklığa sahip IPN_DBPK_200 ve IPN_DBPK_240 orijinal kesitli profiller 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston altında tam orta noktalarından tekil yüke maruz bırakılmışlardır. Test düzeneğinin ve dairese boşluklu kirişin gösterimi (Şekil 4.1) verilmiştir.



Şekil 4.1. Yükleme çerçevesinde dairesel boşluklu petek kiriş

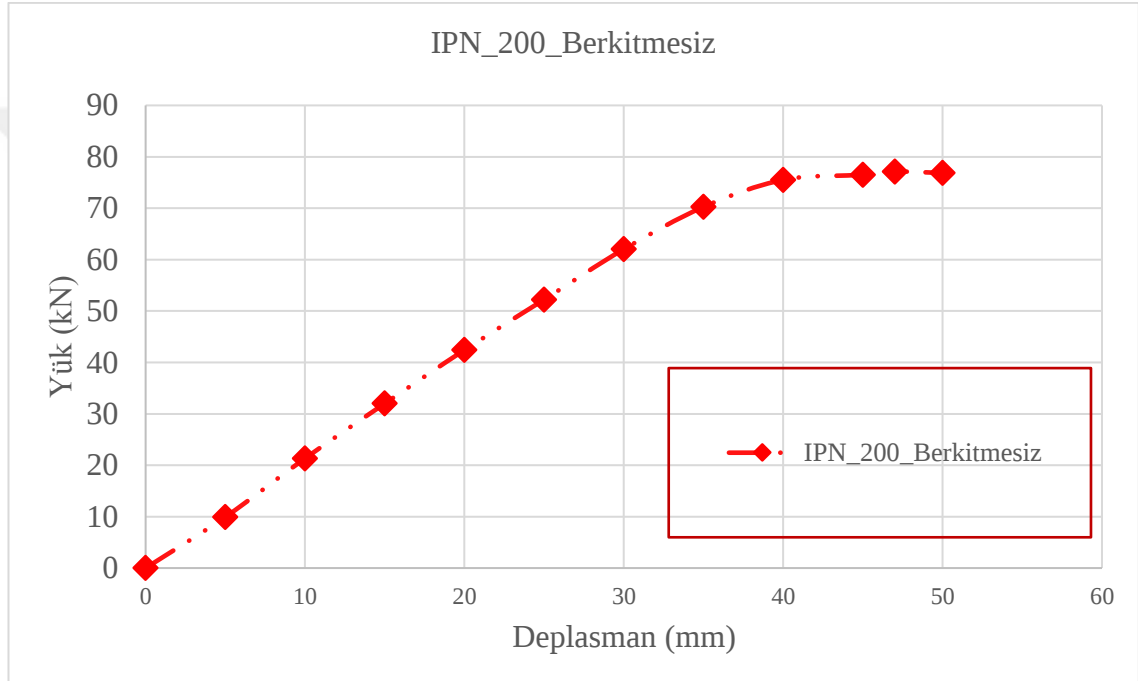
Hidrolik pistonun uç kısmına 100 ton kapasiteli yük hücresi monte edilerek yük okuma değerleri buradan alınmıştır. Tekil yük altında kirişlerde meydana gelecek deplasmanların ölçülmesi amacıyla kiriş açıklığının $\frac{1}{4}$, tam ortası ve $\frac{3}{4}$ 'lük mesafelerine deplasman ölçerler (LVDT) flanş altlarına monte edilmiştir. Ayrıca yük etkisi altında kirişlerin narin olan gövdelerindeki gerinimlerin ölçülmesi amacıyla kiriş açıklıklarının orta kısmında gövdelerinin her iki bölgesine gerinim ölçerler (strain gauges) yapıştırılmıştır. Dairesel boşluklu çelik kirişler ile yükleme öncesi test ekipmanları (Şekil 4.2) gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Test ekipmanlarının yükleme çerçevesinde gösterimi

4.1.1. IPN_DBPK_200 Berkitmesiz kiriş testi

Tez çalışmasının ilk kısmında FORTRAN programı ile optimum boyutlandırılması yapılan dairesel boşluklu basit mesnetli 5 metre açıklığa sahip IPN_DBPK_200 kirişler ikinci kısımda yükleme çerçevesinde profiller 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston altında tam orta noktalarından tekil yüke maruz bırakılarak test edilmiştir. Optimizasyon sonucunda IPN_200 kesitli kirişten elde edilen 296.2 mm yüksekliğindeki dairesel boşluklu kirişin geometrik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. IPN_DBPK_200 kirişi üzerinde yapılan ilk testte herhangi bir berkitme levhası kullanılmamıştır (Şekil 4.3; Şekil 4.4). 100 ton kapasiteli hidrolik piston kirişin tam ortasından etkidiği zaman kiriş 77.63 kN değerinde gövde burkulması göçme tipi göstermiştir.



Şekil 4.3. IPN_DBPK_200 Berkitmesiz tekil yük altında yük-deplasman grafiği

Çizelge 4.3. IPN_DBPK_200 Kesitli Profilin Geometrik Özellikleri

Kiriş	IPN_200_I	IPN_200_II	IPN_200_III	IPN_200_IV
Tür	Berkitmesiz	Yatay Berkitme	Dairesel Berkitme	Düşey Berkitme
d_g	296.2 mm	296.2 mm	296.2 mm	296.2 mm
b_f	90 mm	90 mm	90 mm	90 mm
t_f	11.3 mm	11.3 mm	11.3 mm	11.3 mm
t_w	7.5 mm	7.5 mm	7.5 mm	7.5 mm
D_0	217 mm	217 mm	217 mm	217 mm
S	57.6 mm	57.6 mm	57.6 mm	57.6 mm
L	5000 mm	5000 mm	5000 mm	5000 mm
F_u	77.63 kN	85.48 kN	91.02 kN	92.93 kN

**Şekil 4.4.** IPN_DBPK_200 Berkitmesiz kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

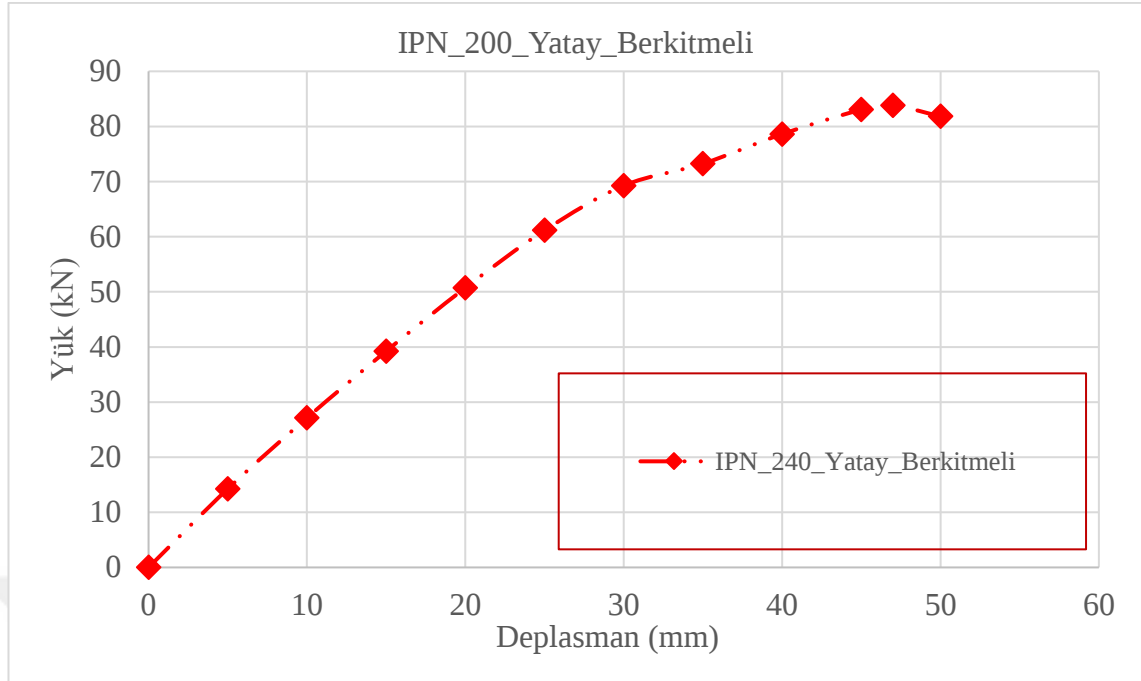
4.1.2. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli kiriş testi

IPN_DBPK_200 kirişi üzerinde yapılan ikinci testte yatay berkitme levhaları kullanılmıştır (Şekil 4.5). Yatay berkitme levhaları kirişin gövde bölgesindeki 18 adet boşluk boyunca ve bu dairesel boşlukların alt ve üst kısımlarına kaynakla monte edilmiştir. Yatay berkitme levhaların kalınlığı çelik kiriş gövde kalınlığı ile aynı kalınlıkta yani 7.5 mm olarak; uzunlukları da dairesel boşluğun çapı olan 217 mm'dir. Yatay berkitmelerin kullanım amacı gövde boşluklarının üst kısımlarında oluşacak olan plastik deformasyonları engellemektir.



Şekil 4.5. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

Kirişin gövde kısmına 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etkidiği zaman pistonu entegre edilmiş yük hücresi 83.5 kN değerini göstermiş ve kirişte gövde burkulması göçme tipi görülmüştür. Kiriş açıklığının 5 metre olmasından dolayı gövde burkulması göçme tipinin yanı sıra belirli bir yük değerinden sonra yanal burkulma etkisi de test sırasında gözlemlenmiştir. Bu yük altında kiriş orta bölgesinde oluşan deplasman 47.29 mm olarak LVDT tarafından ölçülmüştür. Aynı açıklığa sahip berkitme olmayan dairesel boşluklu çelik petek kiriş ile kıyaslandığı zaman yatay berkitmeye sahip çelik petek kiriş 7.65 kN fazla dayanıma sahip olduğu yapılan test sonucunda belirlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği

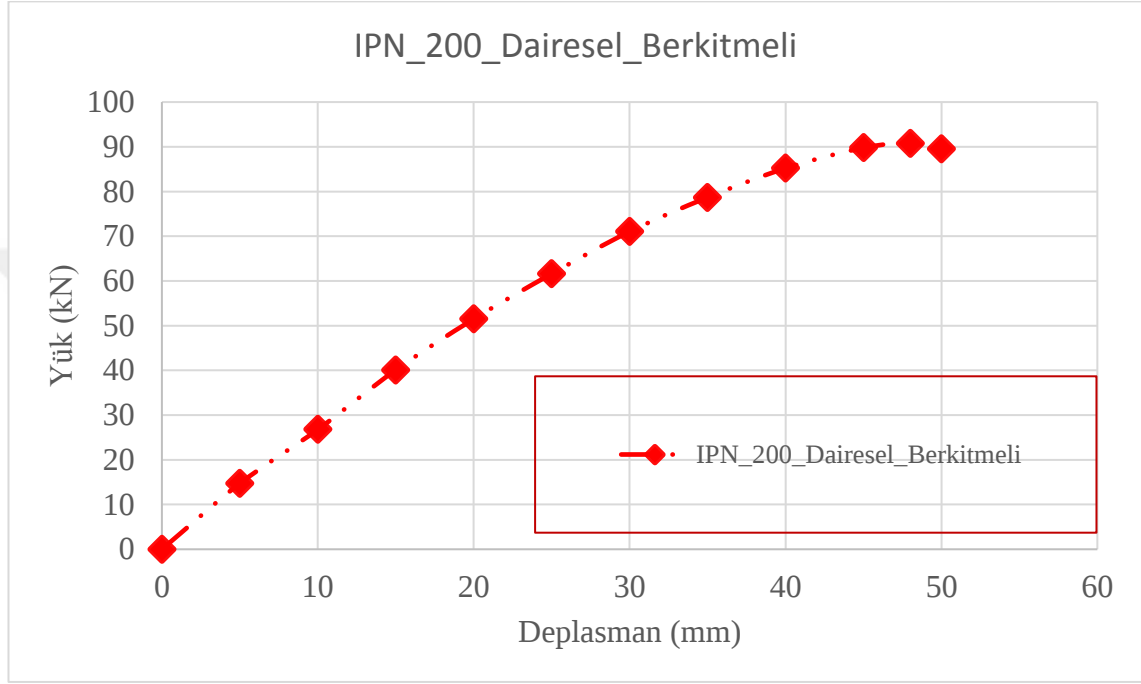
4.1.3. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli kiriş testi

IPN_DBPK_200 kirişi üzerinde yapılan üçüncü testte dairesel berkitme levhaları kullanılmıştır (Şekil 4.7). Dairesel berkitme levhaları kirişin gövde bölgesindeki 18 boşluk içine ve boşluk çapı boyunca kaynak yapılarak monte edilmiştir. Dairesel berkitme levhalarının kalınlığı çelik kiriş gövde kalınlığı ile aynı kalınlıkta yani 7.5 mm olarak; uzunlukları da dairesel boşluğun çevresi olan 1362 mm'dir. Dairesel berkitme levhalarının kullanım amacı gövde boşluk çevrelerinde meydana gelecek burkulma ve deformasyonları engellemektir.



Şekil 4.7. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

Kirişin gövde kısmına 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etki ettiği zaman kiriş 91.02 kN’de gövde burkulması göçme tipi göstermiştir. Kiriş açıklığının 5 metre olmasından dolayı gövde burkulması göçme tipinin yanı sıra belirli bir yük değerinden sonra yanıl burkulma etkisi de test sırasında gözlemlenmiştir. Bu yük altında kiriş orta bölgesinde oluşan deplasman 41.63 mm olarak LVDT tarafından ölçülmüştür. Aynı açıklığa sahip berkitme olmayan dairesel boşluklu çelik petek kiriş ile kıyaslandığı zaman dairesel berkitmeye sahip çelik petek kiriş berkitmesiz kirişe oranla 13.34 kN daha fazla dayanıma sahip olduğu yapılan test sonucunda belirlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği

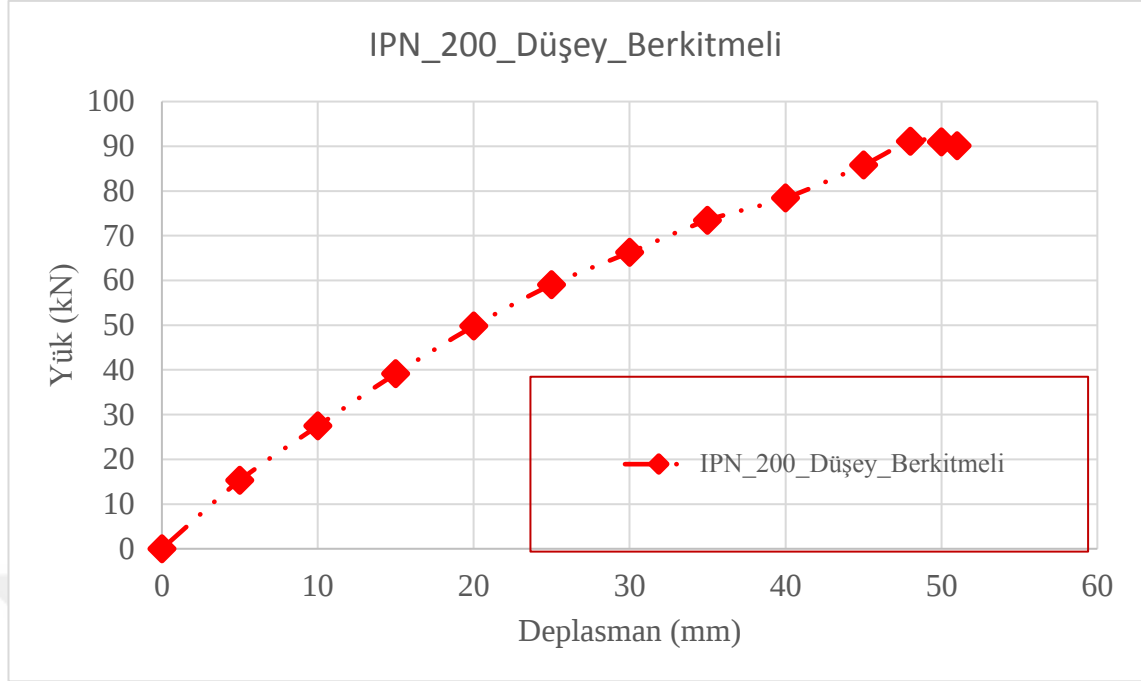
4.1.4. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli kiriş testi

IPN_DBPK_200 kirişi üzerinde yapılan dördüncü ve son testte ise düşey berkitme levhaları kullanılmıştır (Şekil 4.9). Düşey berkitme levhaları kiriş gövdesinin her iki tarafına ve bu gövde bölgesindeki 18 boşluk arasına kaynakla monte edilmiştir. Düşey berkitme levhalarının kalınlığı çelik kiriş gövde kalınlığı ile aynı kalınlıkta yani 7.5 mm olarak; uzunlukları da dairesel boşluklu kirişin alt ve üst flanşlar arası temiz mesafesi olan 273.6 mm’dir. Düşey berkitme levhalarının kullanım amacı narin olan gövde kısmındaki deformasyonları engellemektir.



Şekil 4.9. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

Kirişin gövde kısmına 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etkidiği zaman kiriş 92.93 kN’de gövde burkulması göçme tipi göstermiştir. Kiriş açıklığının 5 metre olmasından dolayı gövde burkulması göçme tipinin yanı sıra belirli bir yük değerinden sonra yanal burkulma etkisi de test sırasında gözlemlenmiştir. Bu yük altında kiriş orta bölgesinde oluşan deplasman 48.81 mm olarak LVDT tarafından ölçülmüştür. Aynı açıklığa sahip berkitme olmayan dairesel boşluklu çelik petek kiriş ile kıyaslandığı zaman düşey berkitmeye sahip çelik petek kiriş berkitmesiz kirişe göre 15.25 kN fazla dayanıma sahip olduğu yapılan test sonucunda belirlenmiştir (Şekil 4.10).



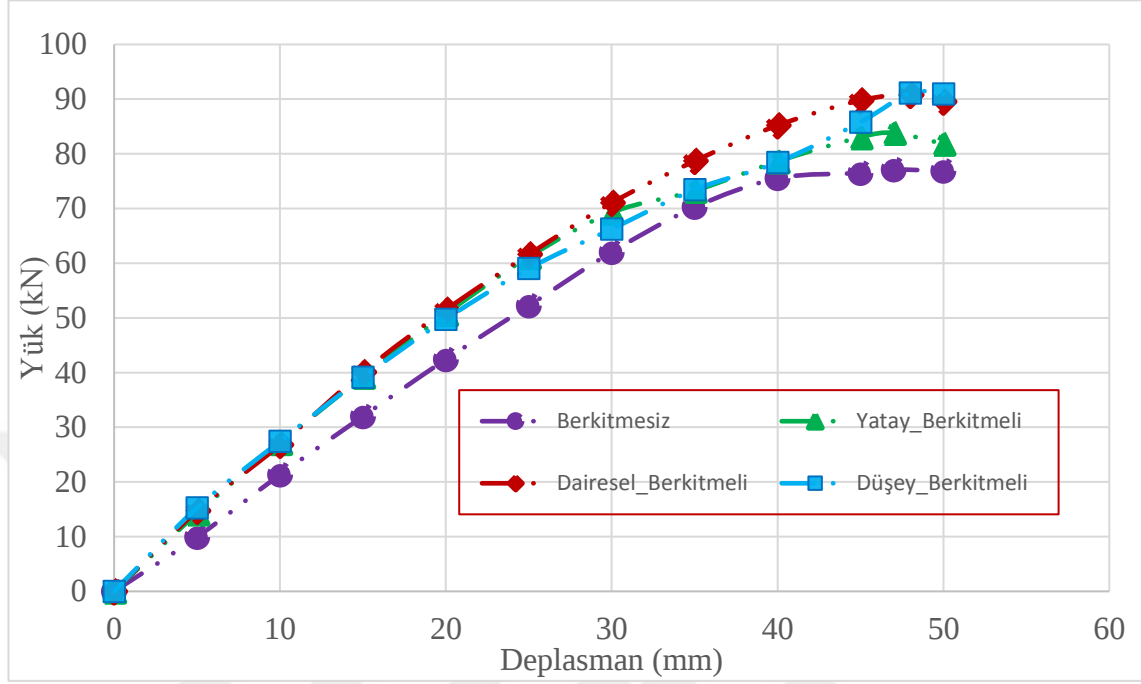
Şekil 4.10. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği

IPN_DBPK_200 kesitli dairesel boşluklu çelik kirişin berkitmesiz, yatay berkitmeli, düşey berkitmeli ve dairesel berkitmeli durumlara göre yük taşıma kapasiteleri, maksimum yükler altında kirişlerde oluşan deplasmanlar ve göçme durumları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. IPN_DBPK_200 Kesitli kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ve göçme durumları

Test Elemanı	IPN-200 Test-1	IPN-200 Test-2	IPN-200 Test-3	IPN-200 Test-4
Berkitme Türü	Berkitme Yok	Yatay Berkitme	Dairesel Berkitme	Düşey Berkitme
Maksimum Yük	77.68 kN	83.5 kN	91.02 kN	92.93 kN
Orta Deplasman	50.18 mm	47.29 mm	41.63 mm	48.81 mm
Göçme Tipi	Gövde Burkulması Yanal Burkulma	Gövde Burkulması	Gövde Burkulması	Gövde Burkulması

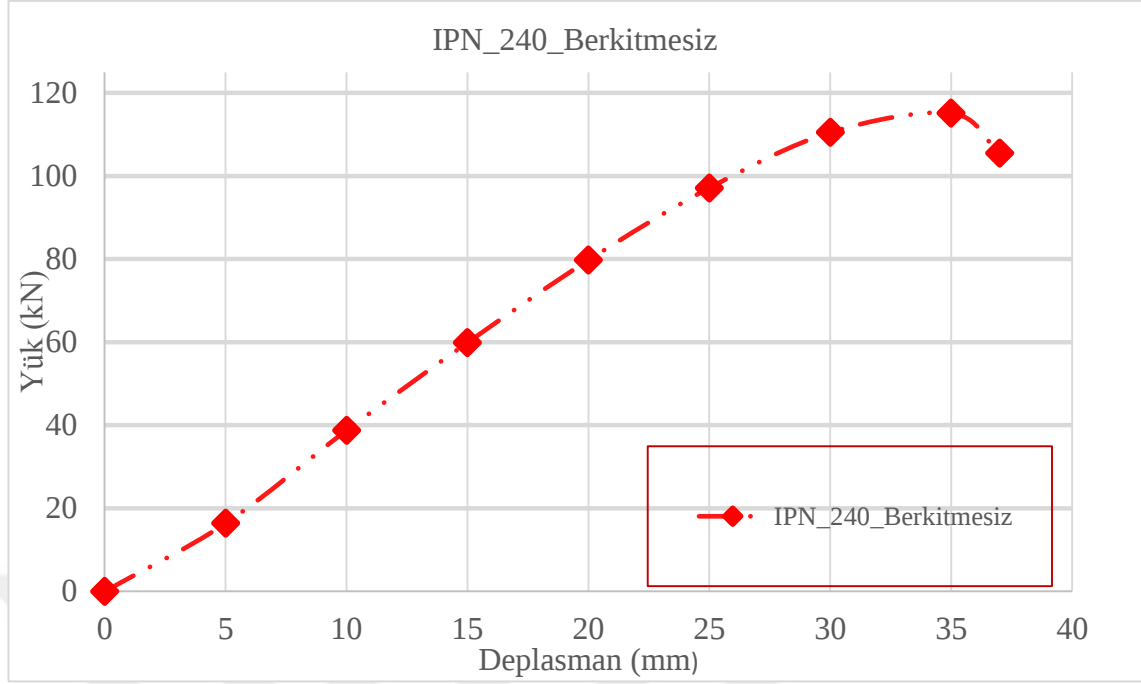
IPN_DBPK_200 kesitli dairesel boşluklu çelik kirişin berkitmesiz, yatay berkitmeli, düşey berkitmeli ve dairesel berkitmeli durumlara göre yük-deplasman eğrilerinin kıyaslanması (Şekil 4.11) gösterilmiştir.



Şekil 4.11. IPN_DBPK_200 Kesitli kiriş için tasarım geçmiş grafiği

4.1.5. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz kiriş testi

Dairesel boşluklu basit mesnetli 5 metre açıklığa sahip IPN_DBPK_240 kirişler için de yükleme çerçevesinde 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston altında orta noktalarından tekil yüke maruz bırakılarak test edilmiştir. Optimizasyon sonucunda IPN_240 kesitli kirişten elde edilen 369.8 mm yüksekliğindeki dairesel boşluklu kirişin geometrik özellikleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. IPN_DBPK_240 kirişi üzerinde yapılan ilk testte herhangi bir berkitme levhası kullanılmamıştır (Şekil 4.13). 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etkidiği zaman kiriş 115.23 kN olarak gövde burkulması göçme tipi göstermiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz tekil yük altında yük-deplasman grafiği

Çizelge 4.5. IPN_DBPK_240 Kesitli profilin geometrik özellikleri

Kiriş	IPN_240_I	IPN_240_II	IPN_240_III	IPN_240_IV
Tür	Berkitmesiz	Yatay Berkitme	Dairesel Berkitme	Düşey Berkirme
d_g	369.8 mm	369.8 mm	369.8 mm	369.8 mm
b_f	106 mm	106 mm	106 mm	106 mm
t_f	13.1 mm	13.1 mm	13.1 mm	13.1 mm
t_w	8.7 mm	8.7 mm	8.7 mm	8.7 mm
D_0	290 mm	290 mm	290 mm	290 mm
S	87.9 mm	87.9 mm	87.9 mm	87.9 mm
L	5000 mm	5000 mm	5000 mm	5000 mm
F_u	115.23 kN	131.51 kN	136.88 kN	140.85 kN



şekil 4.13. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

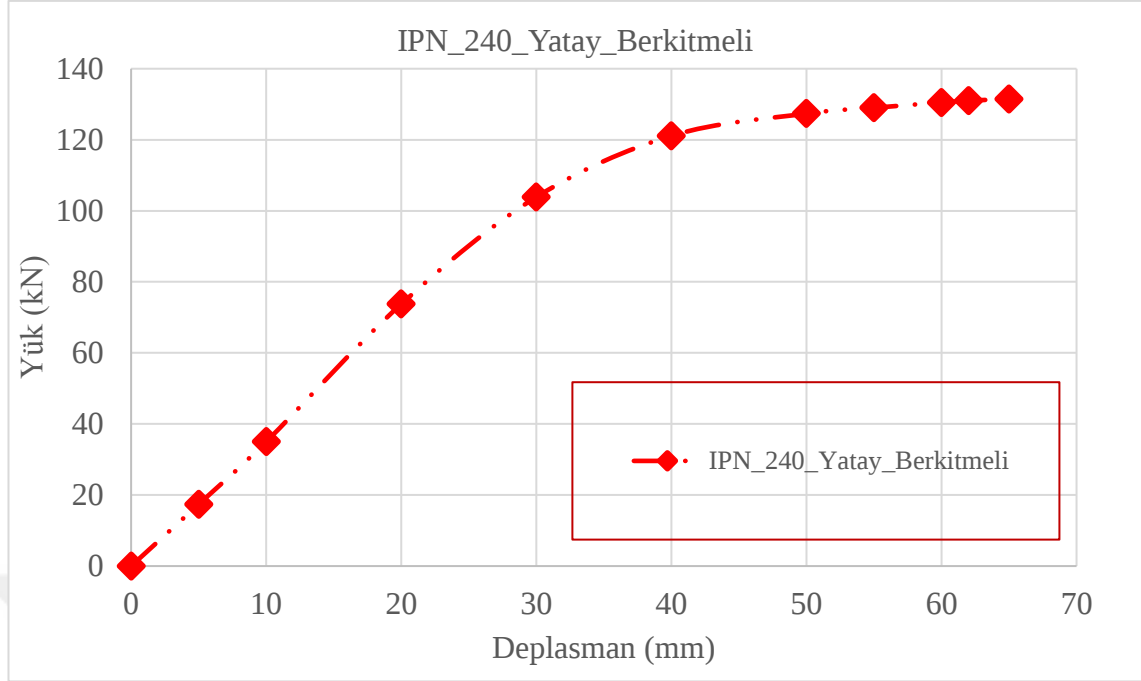
4.1.6. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli kiriş testi

IPN_DBPK_240 kirişi üzerinde yapılan ikinci testte yatay berkitme levhaları kullanılmıştır (şekil 4.14). Yatay berkitme levhaları kirişin gövde bölgesindeki 13 boşluk boyunca ve bu dairesel boşlukların alt ve üst kısımlarına kaynakla monte edilmiştir. Yatay berkitme levhaların kalınlığı elik kiriş gövde kalınlığı ile aynı kalınlıkta yani 8.7 mm olarak; uzunlukları da dairesel boşluğun çapı olan 290 mm'dir. Yatay berkitmelerin kullanım amacı gövde boşluklarının üst kısımlarında oluşacak olan plastik deformasyonları engellemektir.



Şekil 4.14. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

Kirişin gövde kısmına 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etki ettiği zaman kiriş 131.51 kN’de gövde burkulması göçme tipi göstermiştir. Kiriş açıklığının 5 metre olmasından dolayı gövde burkulması göçme tipinin yanı sıra belirli bir yük değerinden sonra yanal burkulma etkisi de test sırasında gözlemlenmiştir. Bu yük altında kiriş orta bölgesinde oluşan deplasman 58.23 mm olarak LVDT tarafından ölçülmüştür. Aynı açıklığa sahip berkitme olmayan dairesel boşluklu çelik petek kiriş ile kıyaslandığı zaman yatay berkitmeye sahip çelik petek kiriş 16.28 kN fazla dayanıma sahip olduğu yapılan test sonucunda belirlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği

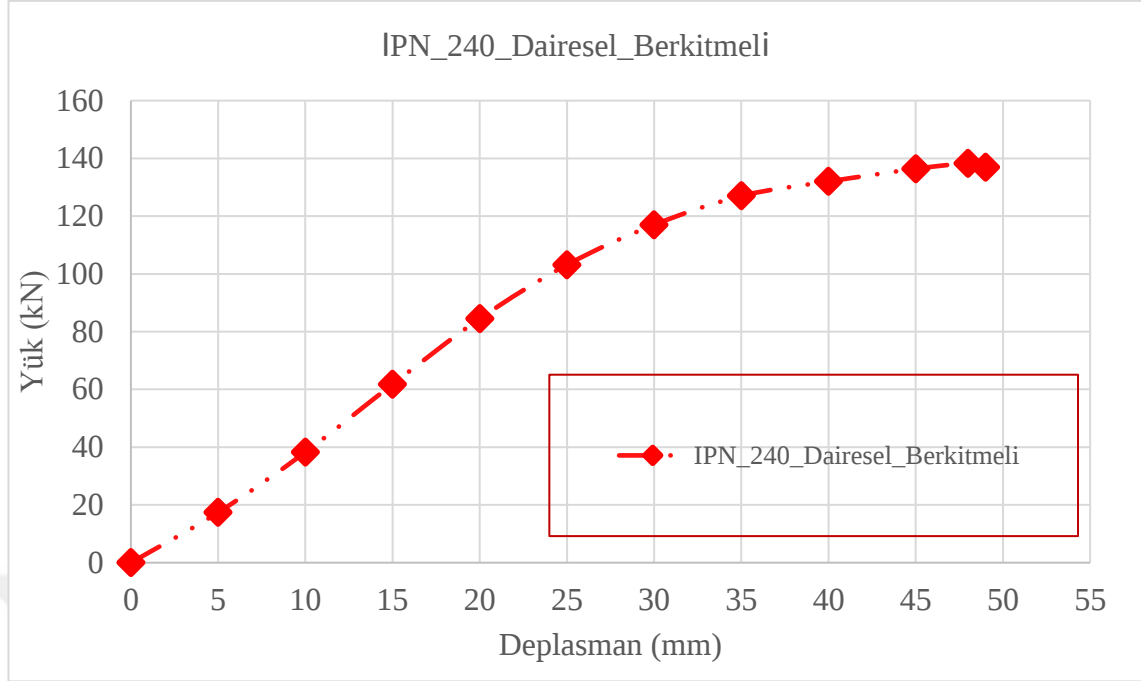
4.1.7. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kiriş testi

IPN_DBPK_240 kirişi üzerinde yapılan üçüncü testte dairesel berkitme levhaları kullanılmıştır (Şekil 4.16). Dairesel berkitme levhaları kirişin gövde bölgesindeki 13 boşluk içine ve boşluk çapı boyunca kaynak yapılarak monte edilmiştir. Dairesel berkitme levhalarının kalınlığı çelik kiriş gövde kalınlığı ile aynı kalınlıkta yani 8.7 mm olarak; uzunlukları da dairesel boşluğun çevresi olan 1821 mm'dir. Dairesel berkitme levhalarının kullanım amacı gövde boşluk çevrelerinde meydana gelecek burkulma ve deformasyonları engellemektir.



Şekil 4.16. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

Kirişin gövde kısmına 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etki ettiği zaman kiriş 136.88 kN’de gövde burkulması göçme tipi göstermiştir. Kiriş açıklığının 5 metre olmasından dolayı gövde burkulması göçme tipinin yanı sıra belirli bir yük değerinden sonra yanal burkulma etkisi de test sırasında gözlemlenmiştir. Bu yük altında kiriş orta bölgesinde oluşan deplasman 48.96 mm olarak LVDT tarafından ölçülmüştür. Aynı açıklığa sahip berkitme olmayan dairesel boşluklu çelik petek kiriş ile kıyaslandığı zaman dairesel berkitmeye sahip çelik petek kiriş 21.65 kN fazla dayanıma sahip olduğu yapılan test sonucunda belirlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği

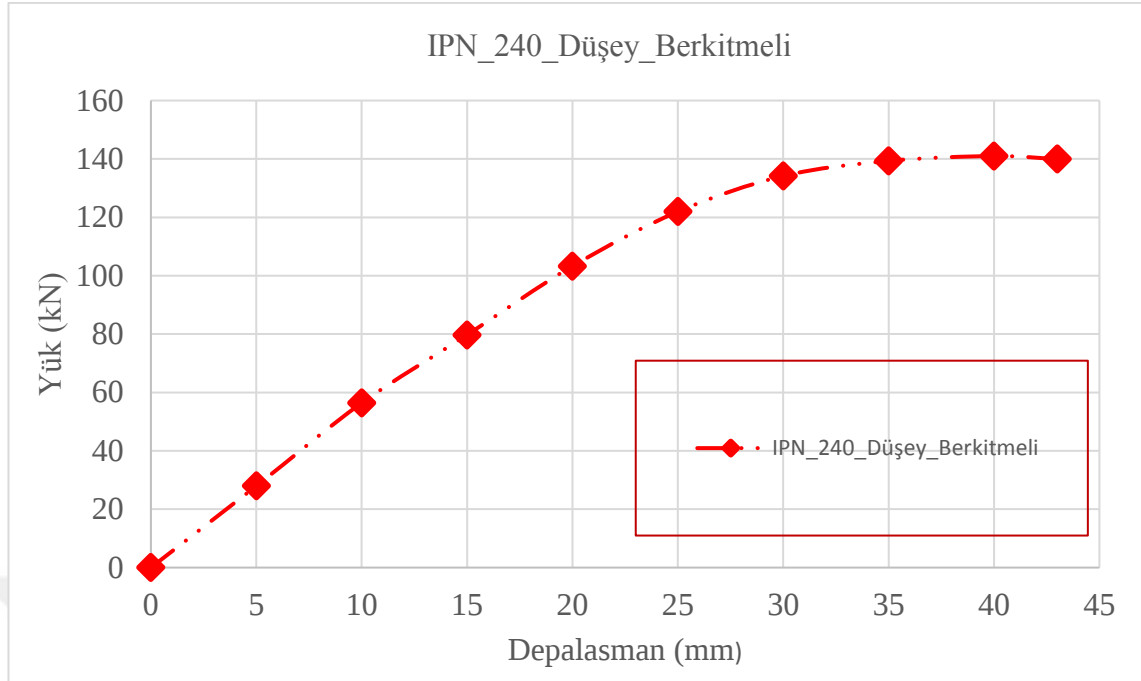
4.1.8. IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli kiriş testi

IPN_DBPK_240 kirişi üzerinde yapılan dördüncü ve son testte ise düşey berkitme levhaları kullanılmıştır (Şekil 4.18). Düşey berkitme levhaları kiriş gövdesinin her iki tarafına ve bu gövde bölgesindeki 13 boşluk arasına kaynakla monte edilmiştir. Düşey berkitme levhalarının kalınlığı çelik kiriş gövde kalınlığı ile aynı kalınlıkta yani 8.7 mm olarak; uzunlukları da dairesel boşluklu kirişin alt ve üst flanşlar arası temiz mesafesi olan 350.2 mm'dir. Düşey berkitme levhalarının kullanım amacı narin olan gövde kısmındaki deformasyonları engellemektir.



Şekil 4.18. IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli kirişin yükleme durumu ve göçme halleri

Kirişin gövde kısmına 100 ton kapasiteli piston kirişin tam ortasından etki ettiği zaman kiriş 140.98 kN’de gövde burkulması göçme tipi göstermiştir. Kiriş açıklığının 5 metre olmasından dolayı gövde burkulması göçme tipinin yanı sıra belirli bir yük değerinden sonra yanal burkulma etkisi de test sırasında gözlemlenmiştir. Bu yük altında kiriş orta bölgesinde oluşan deplasman 39.8 mm olarak LVDT tarafından ölçülmüştür. Aynı açıklığa sahip berkitme olmayan dairesel boşluklu çelik petek kiriş ile kıyaslandığı zaman yatay berkitmeye sahip çelik petek kiriş 25.62 kN fazla dayanıma sahip olduğu yapılan test sonucunda belirlenmiştir (Şekil 4.19).



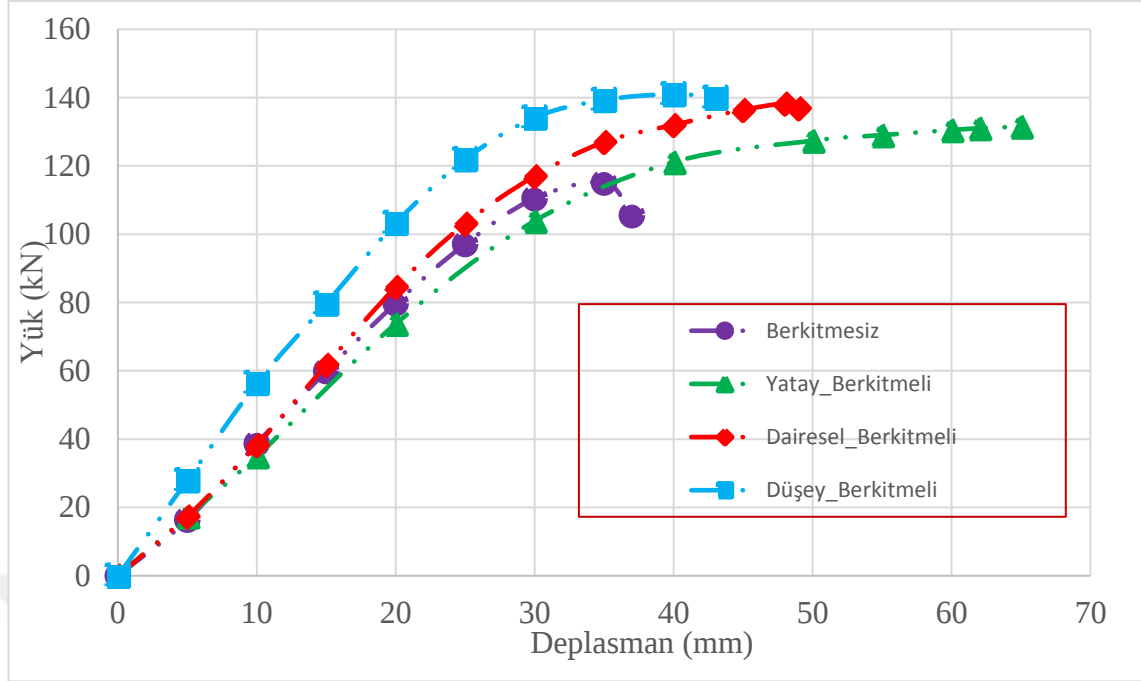
Şekil 4.19. IPN_DBPK_240 Düşey berkitmeli tekil yük altında yük-deplasman grafiği

IPN_DBPK_240 kesitli dairesel boşluklu çelik kirişin berkitmesiz, yatay berkitmeli, düşey berkitmeli ve dairesel berkitmeli durumlara göre yük taşıma kapasiteleri, maksimum yükler altında kirişlerde oluşan deplasmanlar ve göçme durumları Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. IPN_DBPK_240 Kesitli Kirişlerin Yük Taşıma Kapasiteleri ve Göçme Durumları

Test Elemanı	IPN-200 Test-1	IPN-200 Test-2	IPN-200 Test-3	IPN-200 Test-4
Berkitme Türü	Berkitme Yok	Yatay Berkitme	Dairesel Berkitme	Düşey Berkitme
Maksimum Yük	115.23 kN	131.51 kN	136.88 kN	140.98 kN
Orta Depasman	35.32 mm	58.23 mm	48.96 mm	39.81 mm
Göçme Tipi	Gövde Burkulması	Gövde Burkulması	Gövde Burkulması	Gövde Burkulması

IPN_DBPK_240 kesitli dairesel boşluklu çelik kirişin berkitmesiz, yatay berkitmeli, düşey berkitmeli ve dairesel berkitmeli durumlara göre yük-deplasman eğrilerinin kıyaslanması gösterilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. IPN_DBPK_240 Kesitli kiriş için tasarım geçmiş grafiği

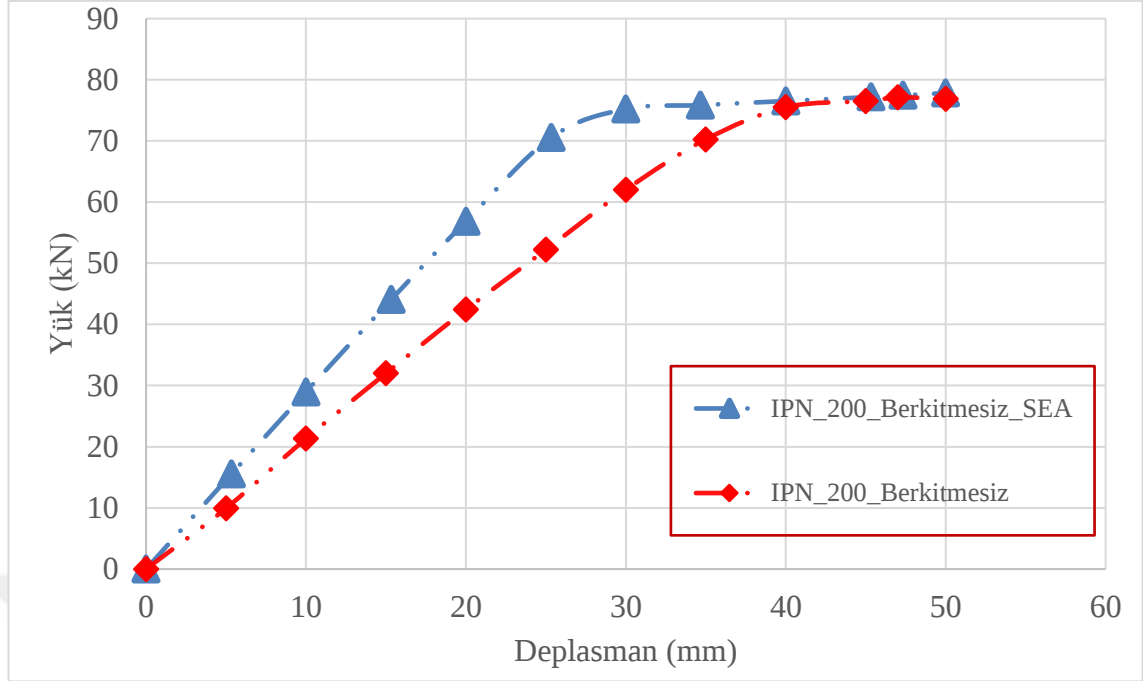
4.2. Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Dairesel boşluklu petek kirişlerin yapılan testlerde elde edilen yük taşıma kapasitelerinin kıyaslanması amacıyla daireli boşluklu petek kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi Abaqus/CAE 6.14-1 ile yapılmıştır. Deneysel çalışmada yükleme çerçevesinde testleri yapılan her kiriş tipi için bulunan göçme yükleri Abaqus/CAE 6.14-1 programında kiriş modelleri simüle edilerek lineer olmayan analiz tipiyle kiriş üzerinde deplasmanların ve eşdeğer gerilmelerin yanı sıra kesme ve normal gerilme değerleri hesaplanmıştır.

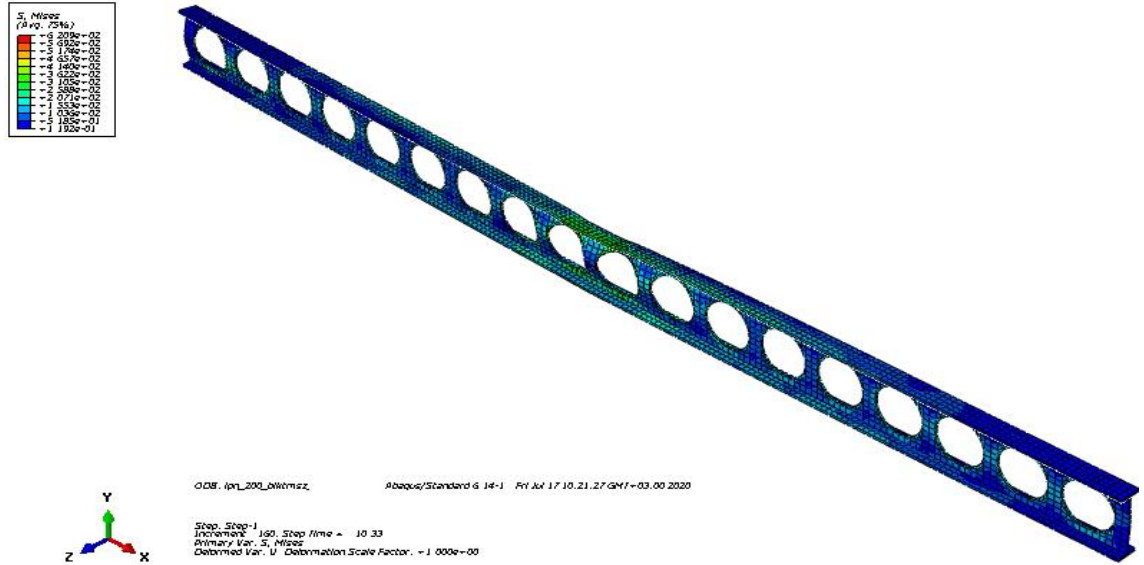
4.2.1. IPN_DBPK_200 Berkitmesiz SEA

IPN_DBPK_200 berkitmesiz kiriş elemanı için yapılan deneysel çalışma sonucunda göçme yükü yük hücresinden veri toplama sistemine aktarılan değer ile 77.68 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda uygulanan yük kirişin orta noktasına tekil olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adımda ve 150 alt adımda uygulanmıştır. Deney esnasında yükün etki ettirildiği alanın SEA analizlerinde de birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır.

Yapılan ilk test sonucunda elde edilen 50.18 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 77.68 kN olurken, SEA analizinde bu değer 50 mm deplasmana karşılık 77.83 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen değerlerin yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %0.2 hata payı ile uyumaktadır.



Şekil 4.21. IPN_DPBK_200 Berkitmesiz tekil yük altında Test-SEA eğrisi



Şekil 4.22. IPN_DPBK_200 Berkitmesiz SEA analiz sonucu

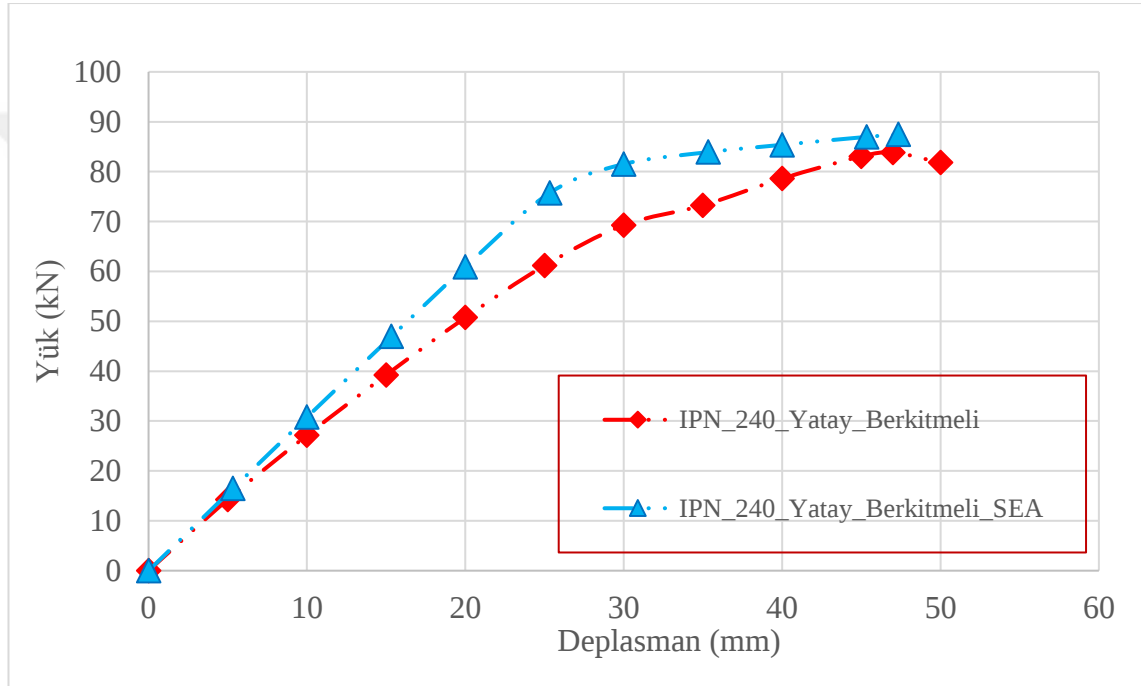
4.2.2. IPN_DPBK_200 Yatay berkitmeli SEA

IPN_DPBK_200 yatay berkitmeli eleman için yapılan deney sonucunda göçme yükü 83.5 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de

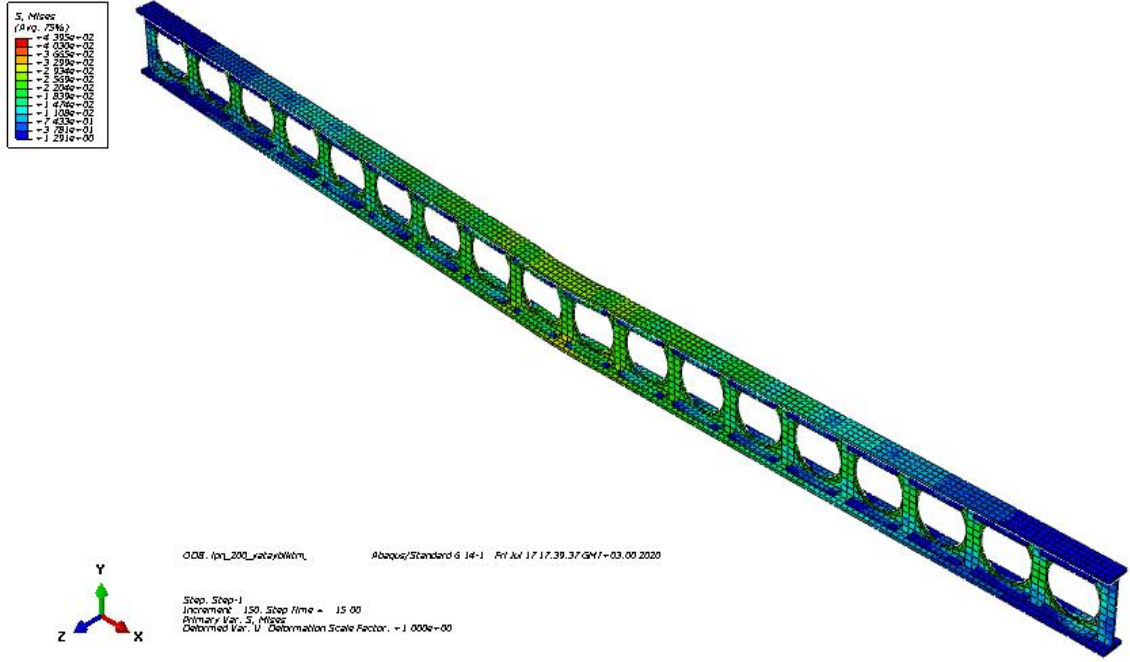
birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayırarak yapılmıştır.

IPN_DBPK_200 yatay berkitmeli kirişi ile ilgili 2. test sonucunda elde edilen 47.29 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 83.5 kN olurken, SEA analizinde bu değer 47.33 mm deplasmana karşılık 87.45 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPK_200 yatay berkitmeli kirişin analiz sonucunda elde edilen değerlerin yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %4.73 hata payı ile uyushmaktadır.



Şekil 4.23. IPN_DPBK_200 Yatay berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi



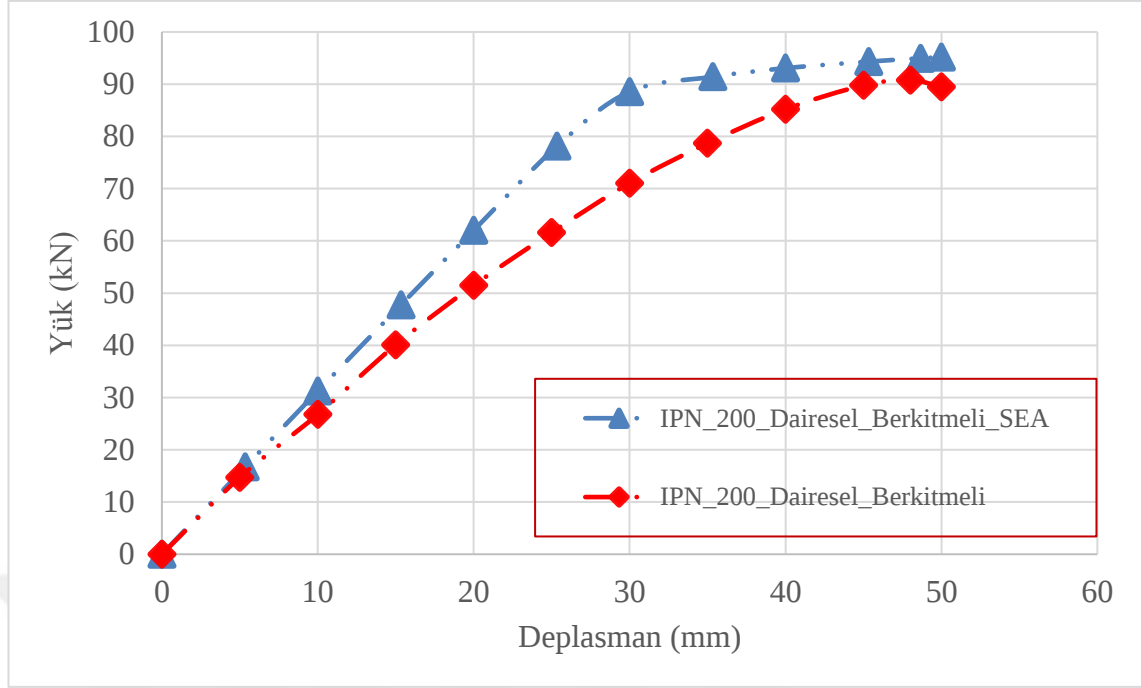
Şekil 4.24. IPN_DBPK_200 Yatay berkitmeli SEA analiz sonucu

4.2.3. IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli SEA

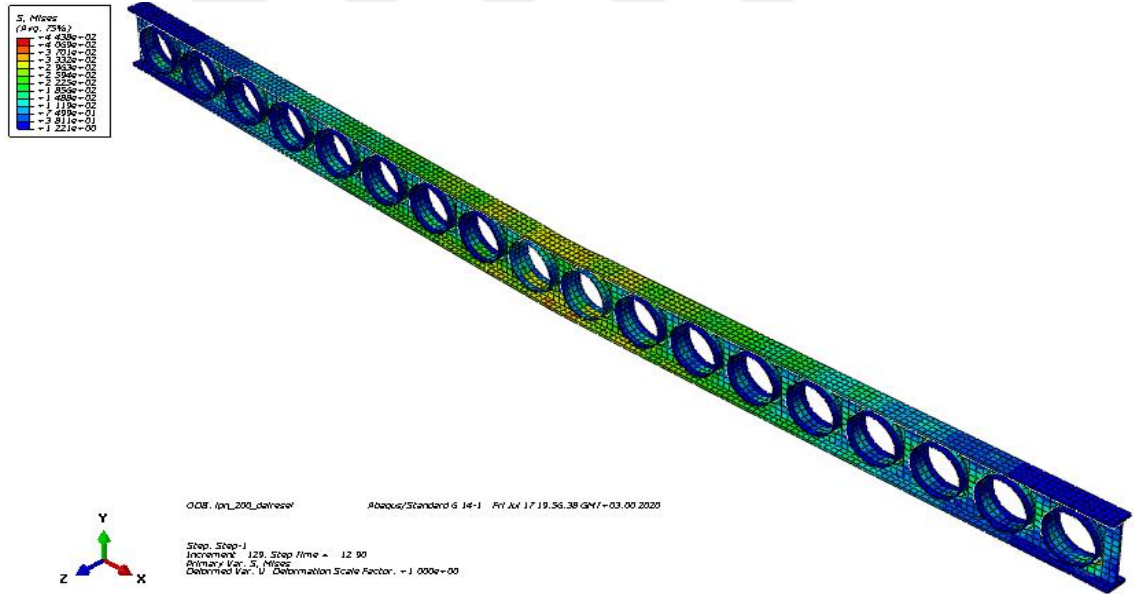
IPN_DBPK_200 Dairesel berkitmeli eleman için yapılan deney sonucunda göçme yükü 91.02 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm’lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayırarak yapılmıştır.

IPN_DBPK_200 dairesel berkitmeli kirişin deneyin sonucunda elde edilen 41.63 mm’lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 91.02 kN olurken, SEA analizinde bu değer 41.33 mm deplasmana karşılık 93.42 kN’luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPK_200 dairesel berkitmeli kirişin yapılan sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen değerlerin yük-deplasman eğrisi ile deney sonucu elde edilen yük-deplasman eğrisinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.25’te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %97.36 oranla doğrulanmaktadır.



Şekil 4.25. IPN_DPBK_200 Dairesel berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi



Şekil 4.26. IPN_DPBK_200 Dairesel berkitmeli SEA analiz sonucu

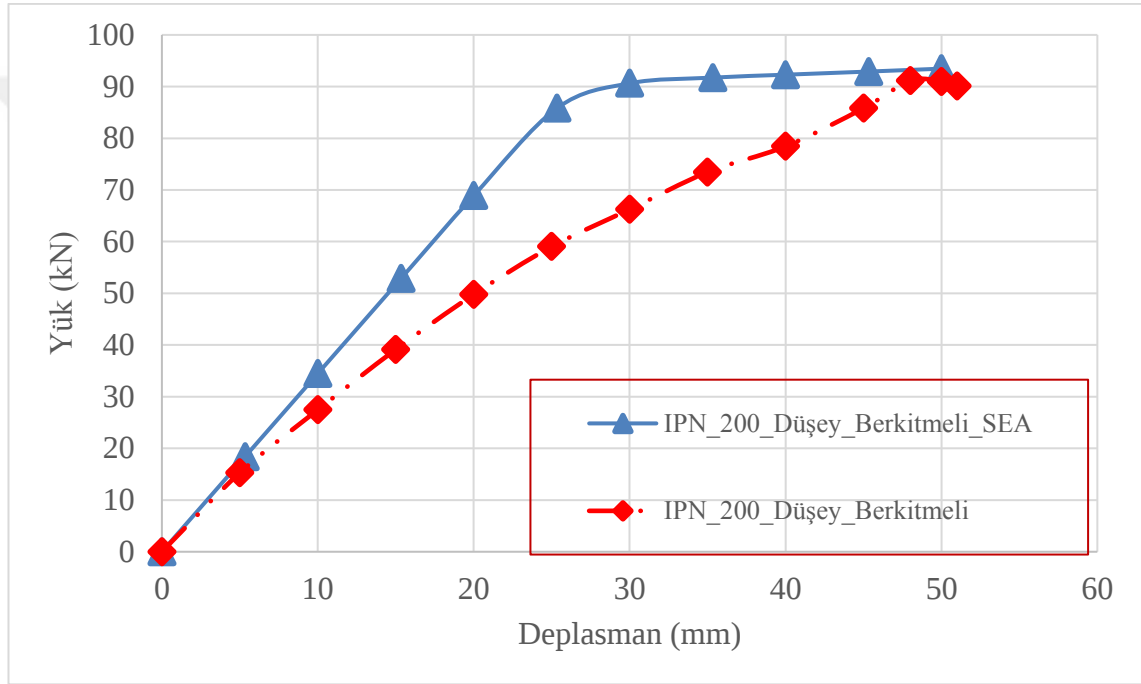
4.2.4. IPN_DPBK_200 Düşey berkitmeli SEA

IPN_DPBK_200 Düşey berkitmeli eleman için yapılan deney sonucunda göçme yükü 92.93 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de

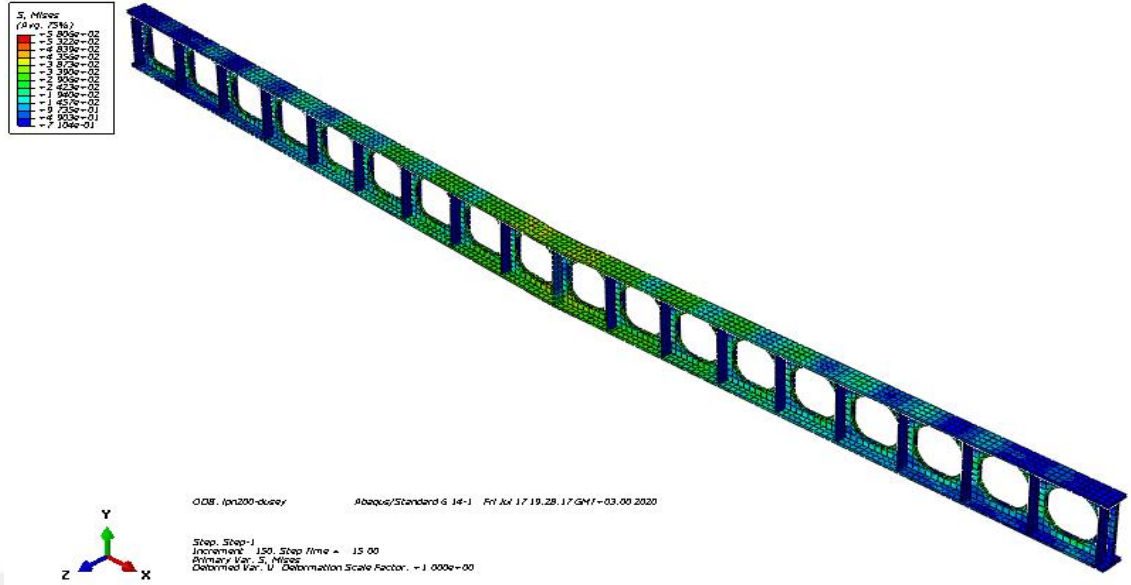
bire bir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır.

IPB_DPBK_200 düşey berkitmeli kiriş elemanın orta noktasına etki ettirilen tekil yük sonucunda kiriş orta noktasının alt başlığında elde edilen 48.81 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 92.93 kN olurken, SEA analizinde 100 ton'luk yük değeri 15 adımda 0.1 artımla uygulandığında bu değer 48.67 mm deplasmana karşılık 93.31 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPK_200 düşey berkitmeli kirişin analiz sonucunda elde edilen değerlerin yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılmalı grafiği Şekil 4.27'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %0.41 hata ile yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.27. IPN_DPBK_200 Düşey berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi



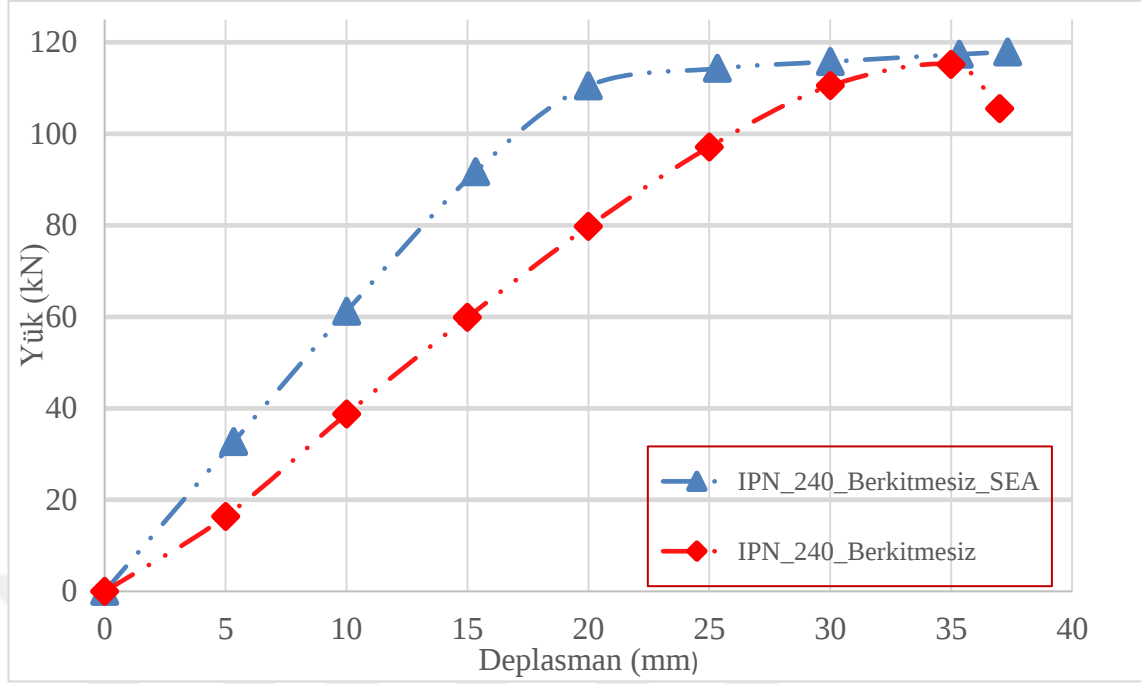
Şekil 4.28. IPN_DBPK_200 Düşey berkitmeli SEA analiz sonucu

4.2.5. IPN_DBPK_240 Berkitmesiz SEA

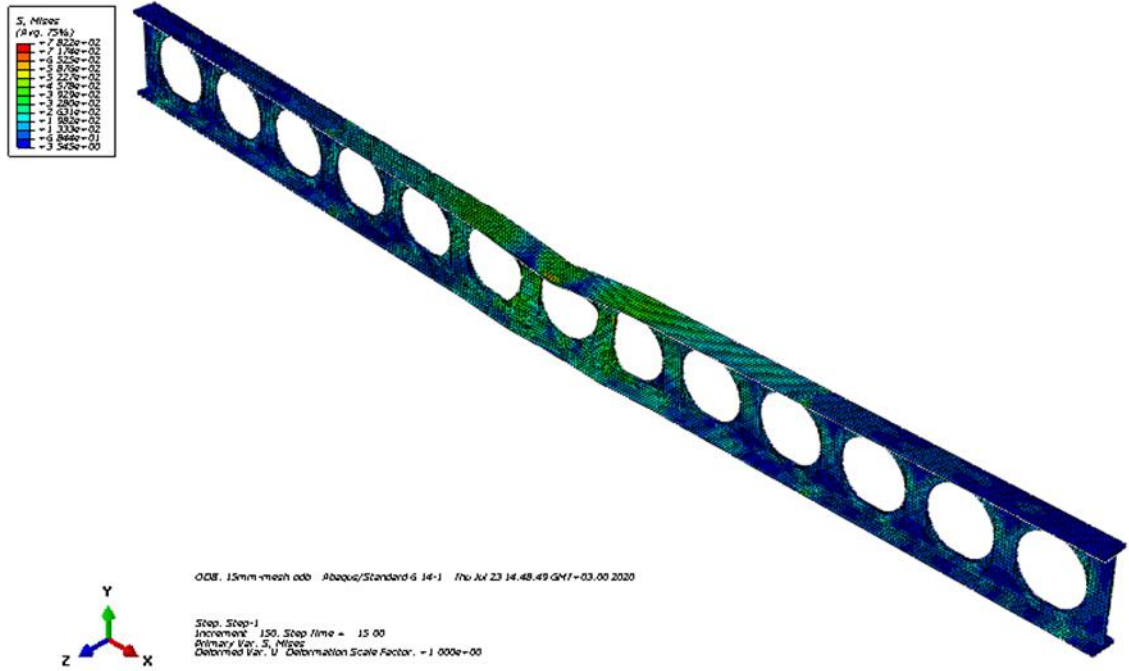
IPN_DBPK_240 Berkitmesiz eleman için yapılan deney sonucunda göçme yükü 115.23 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır.

IPN_DBPK_240 berkitmesiz kiriş elemanın deney sonucunda elde edilen 35.23 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 115.23 kN olurken, SEA analizinde bu değer 35.33 mm deplasmana karşılık 117.39 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPK_240 berkitmesiz kirişin analiz sonucunda elde edilen değerlerin yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %1.87 hata payı ile uyumaktadır.



Şekil 4.29. IPN_DPBK_240 Berkitmesiz tekil yük altında Test-SEA eğrisi



Şekil 4.30. IPN_DPBK_240 Berkitmesiz SEA analiz sonucu

4.2.6. IPN_DPBK_240 Yatay berkitmeli SEA

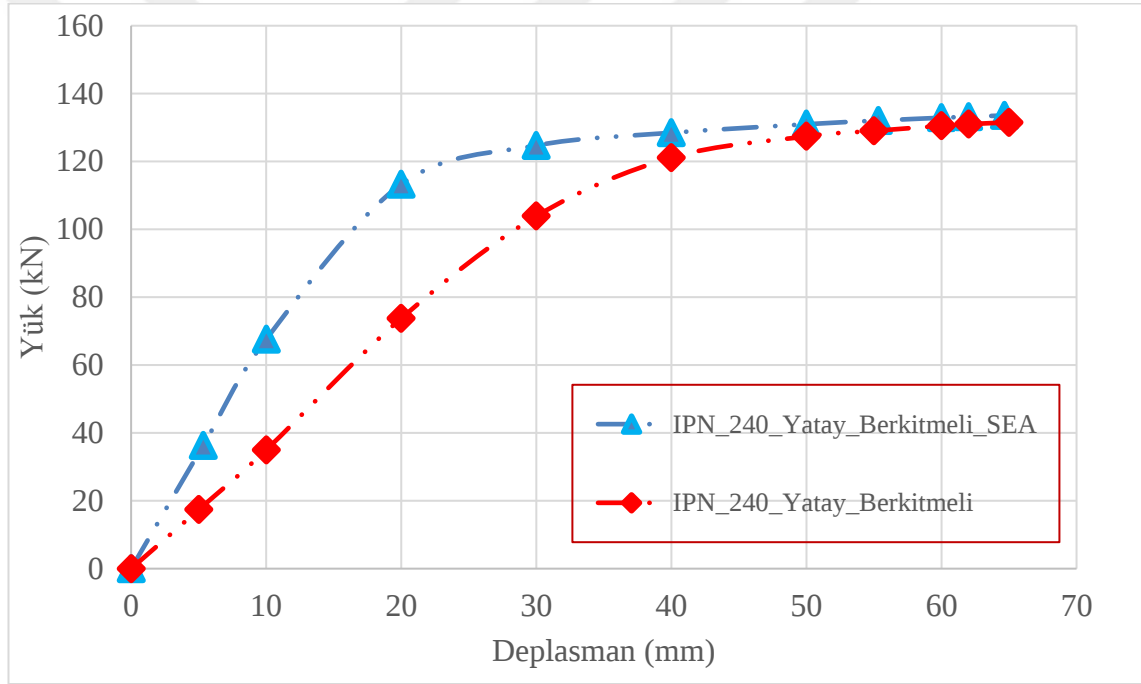
IPN_DPBK_240 Yatay berkitmeli kiriş elemanı için yapılan deney sonucunda göçme yükü 131.51 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen

deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150

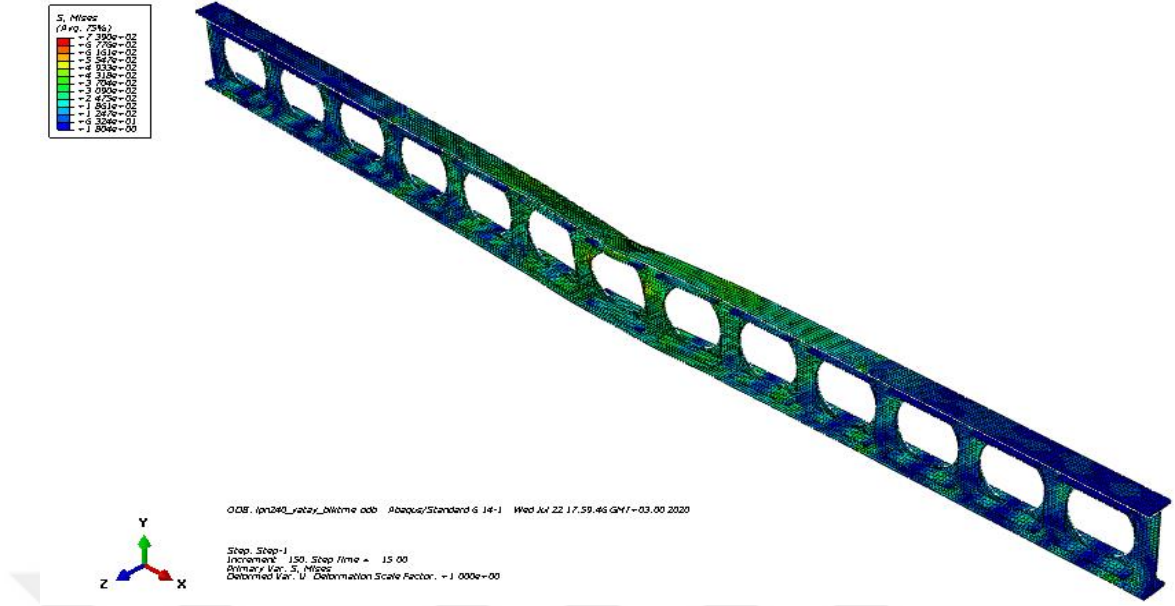
alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır.

IPN_DBPK_240 yatay berkitmeli kirişin test sonucunda elde edilen 58.23 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 131.51 kN olurken, SEA analizinde bu değer 58.67 mm deplasmana karşılık 132.65 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPK_240 yatay berkitmeli kirişin analiz sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %0.87 hata payı ile uyushmaktadır.



Şekil 4.31. IPN_DPBK_240 Yatay berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi



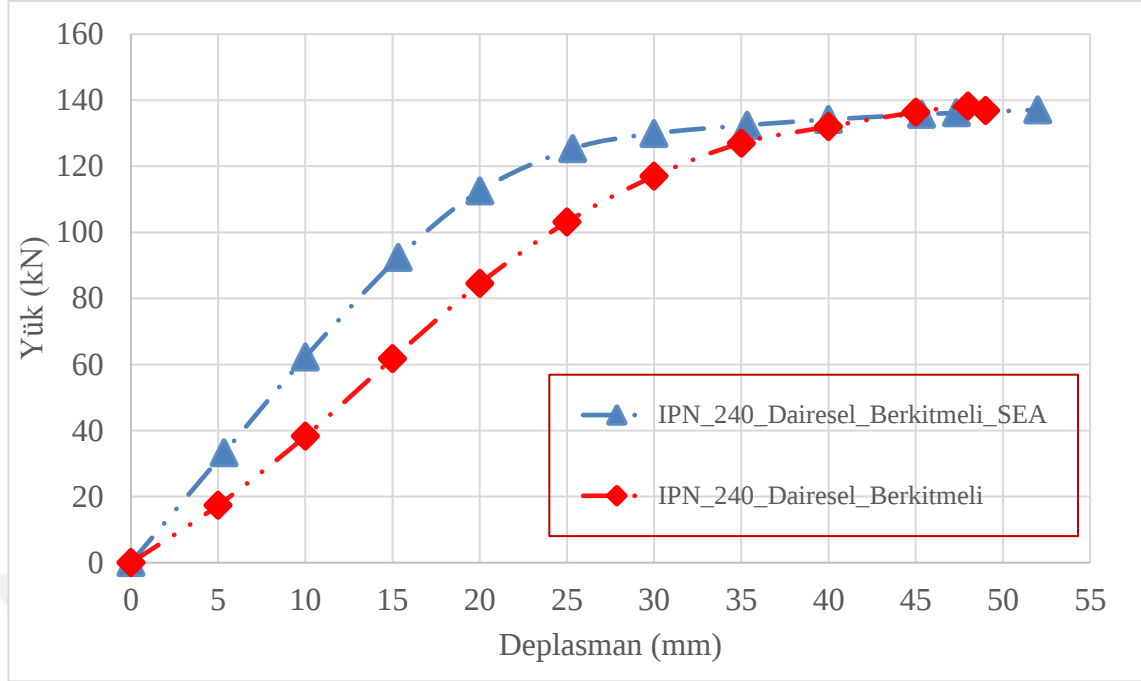
Şekil 4.32. IPN_DBPK_240 Yatay berkitmeli SEA analiz sonucu

4.2.7. IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli SEA

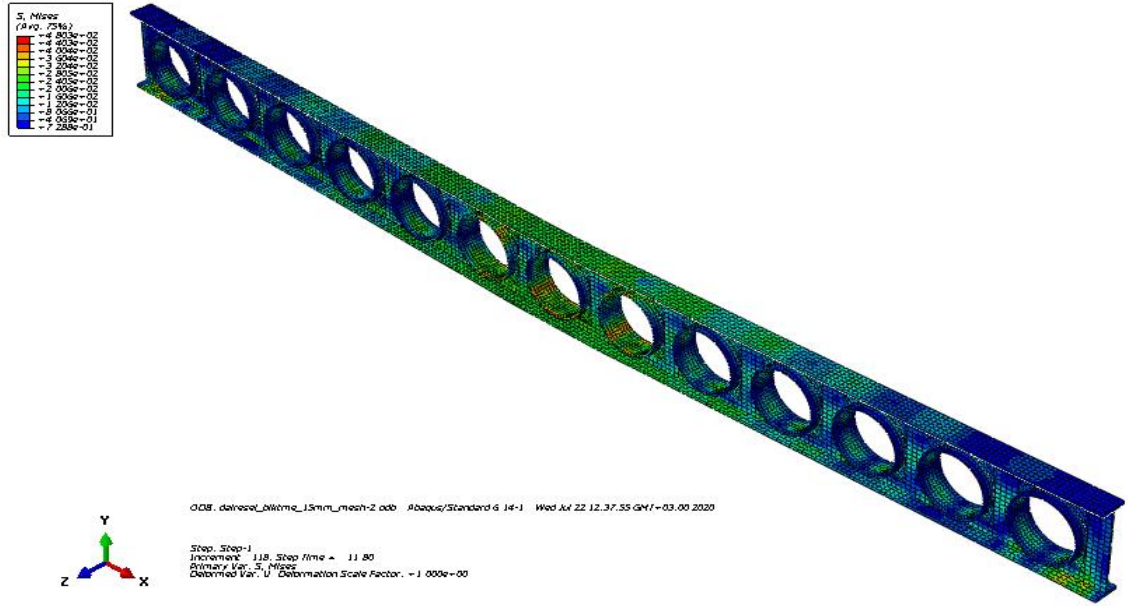
IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kiriş elemanı için yapılan deney sonucunda göçme yükü 136.88 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır.

IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kirişin deney sonucunda elde edilen 48.96 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 136.88 kN olurken, SEA analizinde bu değer 48.67 mm deplasmana karşılık 136.46 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPK_240 Dairesel berkitmeli kirişin analiz sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %0.31 hata payı ile uyumaktadır.



Şekil 4.33. IPN_DPBK_240 Dairesel berkitmeli tekil yük altında test-SEA eğrisi



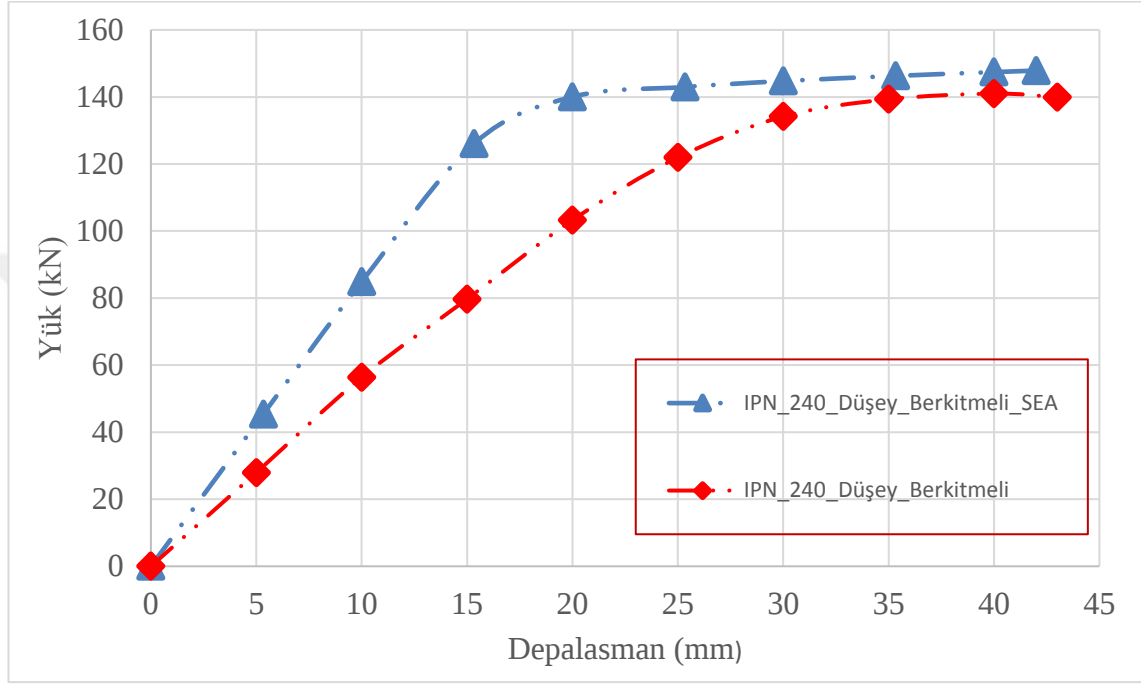
Şekil 4.34. IPN_DPBK_240 Dairesel berkitmeli SEA analiz sonucu

4.2.8. IPN_DPBK_240 Düşey berkitmeli SEA

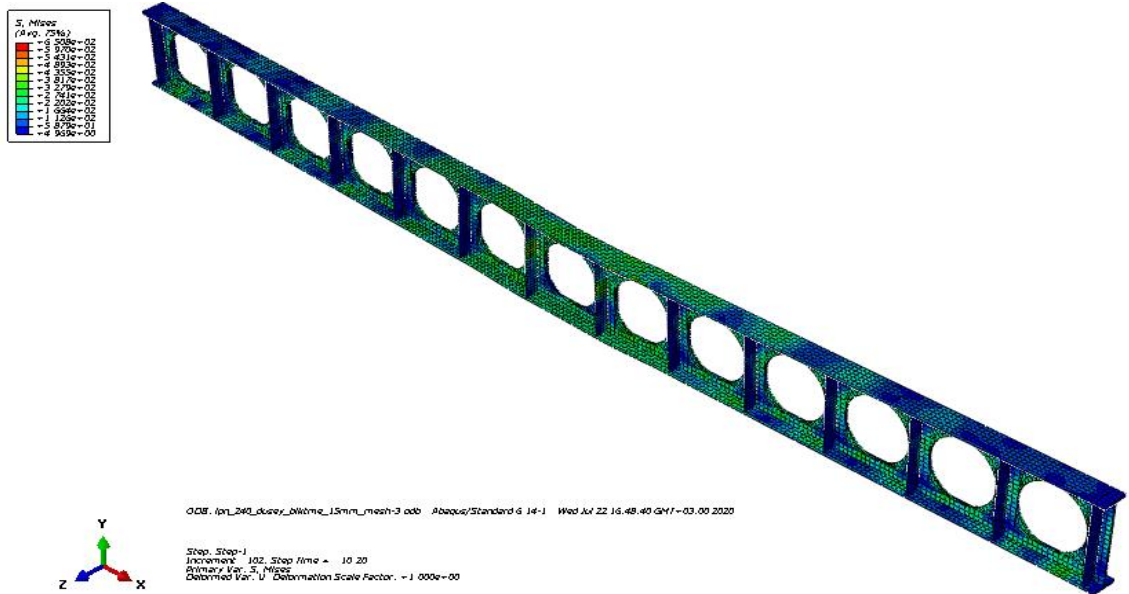
IPN_DPBK_240 Düşey berkitmeli eleman için yapılan deney sonucunda göçme yükü 140.98 kN olarak ölçülmüştür. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de bire bir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak

hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen 39.81 mm'lik deplasmana karşılık elde edilen kapasite değeri 140.98 kN olurken, SEA analizinde bu değer 40 mm deplasmana karşılık 147.42 kN'luk kapasite değeri elde edilmiştir.

IPN_DBPBK_240 Düşey berkitmeli kirişin analiz sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile SEA analizi sonucu elde edilen verilerin sonuçları %4.57 hata payı ile uyuşmaktadır.



Şekil 4.35. IPN_DBPBK_240 Düşey berkitmeli tekil yük altında Test-SEA eğrisi



Şekil 4.36. IPN_DBPBK_240 Düşey berkitmeli SEA analiz sonucu

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında dairesel boşluklu çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemi; profil kesiti, boşluk çapı ve açıklık boyunca toplam boşluk sayısı gibi tasarım değişkenleri kullanılarak geometrik ve davranışsal sınırlayıcıları altında çözülmüştür. Tasarım probleminin minimum ağırlığının bulunmasında yapısal optimizasyon yöntemlerinden harmoni arama algoritması ve partikül küme yöntemleri kıyaslama amacıyla kullanılmıştır. Tasarım örnekleri, her iki yöntemin de bu boyuttaki yapıların optimum boyutlandırılmasında etkili ve hızlı bir şekilde minimum ağırlığı elde edebileceğini göstermiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşaması olan deneysel süreçte ise ilk kısımda optimum boyutlandırılması yapılan IPN_200 ve IPN_240 kesitli çelik dairesel boşluklu kirişlerin yükleme çerçevesinde 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston ile tekil yük uygulanarak yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Dairesel boşluklu çelik kirişlerde gövdesi boyunca kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda kirişin boyu buna bağlı olarak da kesit katsayısı ve atalet momenti artmasına karşın kirişin ilk haline oranla yanal burkulma riski daha fazladır. Bu durumdan dolayı IPN_200 ve IPN_240 kesitli çelik dairesel boşluklu kirişler üzerinde yapılan deneylerde yanal burkulmayı önlemek amacıyla belirli aralıklarla yanal destek payandaları yerleştirilerek kiriş dayanımları hesaplanmıştır. IPN_200 ve IPN_240 çelik dairesel boşluklu kirişlerin güçlendirme levhaları kullanılmadan yapılan dayanım testlerinden sonra aynı kirişler yatay, düşey ve dairesel berkitme levhaları ile güçlendirilerek dairesel boşluklu kirişlerin düşey yükleme altında dayanımlarının arttığı açıkça gözlemlenmiştir. IPN_200 kirişi üzerinde yapılan testlerde yatay berkitme kullanıldığı zaman kiriş dayanımında %7.49 oranında; dairesel berkitme kullanıldığı zaman kiriş dayanımında %17.17 oranında; düşey berkitme kullanıldığı zaman ise kiriş dayanımında %19.63 oranında bir artış görülmüştür. IPN_240 kirişi üzerinde yapılan testlere bakıldığı zaman yatay berkitme kullanıldığı zaman kiriş dayanımında %14.12 oranında; dairesel berkitme kullanıldığı zaman kiriş dayanımında %18.78 oranında; düşey berkitme kullanıldığı zaman ise kiriş dayanımında %22.35 oranında bir artış görülmüştür. Sonuçlara bakıldığı zaman kullanılan berkitme levhaları arasında boşluklar arasına düşey yönde kaynaklanan berkitme levhalarının diğer güçlendirme levhalarına oranla kiriş yük taşıma kapasitesinde daha fazla dayanım artışını sağladığı açıkça gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının son bölümünde sonlu eleman analizi ile kirişlerin taşıma gücü ve kritik yük değerleri ABAQUS programı kullanılarak belirlenmiştir. Deneyin uygulanmasına baktığımızda yük kirişin orta noktasına tekil yük olarak etki ettirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen deplasman değerleri de göz önünde bulundurularak 100 mm'lik deplasman değeri 15 adım da ve 150 alt adım da etki ettirilmiştir. Deney esnasında yükün etkidiği alan SEA analizlerinde de birebir aynı olmasına dikkat edilmiştir. Analizler 15 mm ağ büyüklüğü ve ağ tipi olarak hex tipinde parçalara ayrılarak yapılmıştır. Analiz sonuçların deneysel sonuçlarla kıyasladığımızda; IPN_200 dairesel boşluklu petek kiriş için berkitmesiz kirişin analiz sonucu % 0.2 hata payı ile deneysel sonuçları doğrulamaktadır. Ayrıca yatay berkitmeli, dairesel berkitmeli ve düşey berkitmeli analiz sonuçları sırasıyla; % 4.73, % 2.64 ve % 0.41 hata payı ile deneysel verilerin sonucunu doğrulamaktadır.

IPN_240 dairesel boşluklu petek kirişlerin deneysel sonuçları sonlu elemanlar analizi sonucu ile kıyasladığımızda berkitmesiz kirişte analiz sonucu % 1.87 hata payı ile deneysel verileri doğrulamaktadır. Ayrıca yatay berkitmeli, dairesel berkitmeli ve düşey berkitmeli analiz sonuçları sırasıyla; % 0.87, % 0.31 ve % 4.87 hata payı ile deneysel verilerin sonucunu doğrulamaktadır.



6. KAYNAKLAR

- Abambres, M., K. Rajana, K. D. Tsavdaridis, and T. P. Ribeiro. 2018. 'Neural Network-Based Formula for the Buckling Load Prediction of I-Section Cellular Steel Beams', *Computers*, 8: 26.
- Abidin, A. R. Z., B. A. Izzuddin, and F. Lancaster. 2017. 'A meshfree unit-cell method for effective planar analysis of cellular beams', *Computers & Structures*, 182: 368-91.
- Abaqus (2007) Standard User's Manual, ABAQUS CAE Manual, Version 6.14-1.
- Altifillisch, MD, BR Cooke, and AA %J Welding Research Toprac. 1957. 'An investigation of open web expanded beams', 22.
- Carbas, Serdar. 2016. 'Design optimization of steel frames using an enhanced firefly algorithm', *Engineering Optimization*, 48: 2007-25.
- Chung, KF, TCH Liu, and ACH %J Journal of Constructional Steel Research Ko. 2001. 'Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings', 57: 467-90.
- Coello, Carlos A Coello %J Computer methods in applied mechanics, and engineering. 2002. 'Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art', 191: 1245-87.
- Design Guide 2x: 2002. Design of Castellated and Cellular Beams, AISC, American Institutes of Steel Construction.
- Dogan, Erkan, and Aybike Ozyuksel Ciftcioglu. 2020. 'Weight optimization of steel frames with cellular beams through improved hunting search algorithm', *Advances in Structural Engineering*, 23: 1024-37.
- Doğan, Ea, and Mehmet Polat %J Advances in Engineering Software Saka. 2012. 'Optimum design of unbraced steel frames to LRFD–AISC using particle swarm optimization', 46: 27-34.
- Dorigo, M, and T Stützle. 2004. 'Ant colony optimization. Massachusetts: A Bradford Book. Massachusetts Institute of Technology'.
- Durif, Sebastien, AbdelHamid Bouchaïr, and Olivier %J Periodica Polytechnica Civil Engineering Vassart. 2013. 'Validation of an analytical model for curved and tapered cellular beams at normal and fire conditions', 57: 83-95.
- Erdal, F. 2017. 'A firefly algorithm for optimum design of new-generation beams', *Engineering Optimization*, 49: 915-31.

- Erdal, Ferhat. 2007. 'Optimum design of grillage systems using harmony search algorithm', MSc thesis, Engineering Sciences Department, Middle East Technical University.
- Erdal, Ferhat. 2015. 'The comparative analysis of optimal designed web expanded beams via improved harmony search method', *Structural Engineering and Mechanics*, 54: 665.
- Erdal, Ferhat. 2016. 'Effect of stiffeners on failure analyses of optimally designed perforated steel beams', *Steel and Composite Structures*, 22: 183-201.
- Erdal, Ferhat, Erkan Doğan, and Mehmet Polat %J Journal of Constructional Steel Research Saka. 2011. 'Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers', 67: 237-47.
- Ferreira, F. P. V., and C. H. Martins. 2020. 'LRFD for Lateral-Torsional Buckling Resistance of Cellular Beams', *International Journal of Civil Engineering*, 18: 303-23.
- Glover, Fred %J ORSA Journal on computing. 1990. 'Tabu search—part II', 2: 4-32.
- Goldberg, David E %J Optimization, and MachineLearning. 1989. 'Genetic algorithms in search'.
- Grilo, Lucas Figueiredo, Ricardo Hallal Fakury, and Gustavo %J Journal of Constructional Steel Research de Souza Veríssimo. 2018. 'Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams', 148: 525-41.
- Hasançebi, Oğuzhan, Fuat %J Computers Erbatır, and Structures. 2000. 'Evaluation of crossover techniques in genetic algorithm based optimum structural design', 78: 435-48.
- Hestenes, Magnus R %J Journal of optimization theory, and applications. 1969. 'Multiplier and gradient methods', 4: 303-20.
- Hieu, Nguyen Tran, and Vu Anh Tuan. 2018. 'Weight optimization of composite cellular beam based on the differential evolution algorithm', *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 12: 28-38.
- Huo, B. Y., and C. A. D'Mello. 2013. 'Push-out tests and analytical study of shear transfer mechanisms in composite shallow cellular floor beams', *Journal of Constructional Steel Research*, 88: 191-205.
- Husain, MU, and WG %J Acier-Stahl-Steel Speirs. 1971. 'Failure of castellated beams due to rupture of welded joints', 36: 34-40.
- Kerdal, D, and DA %J Journal of constructional steel research Nethercot. 1984. 'Failure modes for castellated beams', 4: 295-315.

- Khan, M. A., K. A. Cashell, and A. S. Usmani. 2020. 'Analysis of Restrained Composite Perforated Beams during Fire Using a Hybrid Simulation Approach', *Journal of Structural Engineering*, 146: 15.
- Kirkpatrick, Scott, C Daniel Gelatt, and Mario P %J science Vecchi. 1983. 'Optimization by simulated annealing', 220: 671-80.
- Kloos, M, and RS Walls. 2019. 'Finite element modelling of the structural behaviour of a novel cellular beam non-composite steel structure in fire', *International Journal of Steel Structures*, 19: 1367-80.
- Kloos, Michael. 2017. 'An investigation into the structural behaviour of a novel cellular beam structure in fire', Stellenbosch: Stellenbosch University.
- KNOWLESS, P.R. 1985. Design of Cellular Beams. The Steel Construction Institute.
- Kuchta, Krzysztof, and Mariusz %J Czasopismo Inżynierii Ładowej Maślak, Środowiska i Architektury. 2015. 'Failure modes determining the resistance and the stability of steel cellular beams', 62: 263-80.
- Lawson, RM. 1987. *Design for openings in the webs of composite beams* (CIRIA).
- Lee, Kang Seok, Zong Woo %J Computers Geem, and structures. 2004. 'A new structural optimization method based on the harmony search algorithm', 82: 781-98.
- Ly, H. B., T. T. Le, L. M. Le, V. Q. Tran, V. M. Le, H. L. T. Vu, Q. H. Nguyen, and B. T. Pham. 2019. 'Development of Hybrid Machine Learning Models for Predicting the Critical Buckling Load of I-Shaped Cellular Beams', *Applied Sciences-Basel*, 9: 21.
- Marx, Hendrig, and Richard Walls. 2019. 'Thermal behaviour of a novel non-composite cellular beam floor system in fire', *Journal of structural fire engineering*.
- Nseir, Joanna, Moussa Lo, Delphine Sonck, Hugues Somja, Olivier Vassart, and Nicolas Boissonnade. 2012. "Lateral torsional buckling of cellular steel beams." In *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*, 18-21.
- Panedpojaman, Pattamad, Worathep Sae-Long, and Tanan Chub-uppakarn. 2016. 'Cellular beam design for resistance to inelastic lateral-torsional buckling', *Thin-Walled Structures*, 99: 182-94.
- Perez, RE I, K %J Computers Behdinan, and Structures. 2007. 'Particle swarm approach for structural design optimization', 85: 1579-88.
- Pezeshk, Shahram, and Charles V %J Recent advances in optimal structural design Camp. 2002. 'State of the art on the use of genetic algorithms in design of steel structures': 55-80.

- Sherbourne, AN. 1966. "The plastic behavior of castellated beams." In *Proc. 2nd Commonwealth Welding Conference*, 1-5. Institute of Welding London.
- Sonck, D., and J. Belis. 2015. 'Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams', *Journal of Constructional Steel Research*, 105: 119-28.
- Sonck, D., R. Van Impe, and J. Belis. 2014. 'Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members', *Construction and Building Materials*, 54: 512-19.
- Venkayya, VB. 1973. "Application of optimality criteria approaches to automated design of large practical structures, AGARD-CPP-123." In *Second Symposium on Structural Optimization*.
- Verweij, JG. 2010. 'Cellular beam-columns in portal frame structures'.
- Ward, JK. 1990. *Design of composite and non-composite cellular beams* (Steel Construction Institute Ascot, UK).
- Xiangrong, Chen, Chen Xing, and Wang Xinwei. 2016. 'Simplified calculation method of cellular beam with enhanced compression flange', *Building Structure*: 14.
- Zaarour, Walid, and Richard %J Journal of structural engineering Redwood. 1996. 'Web buckling in thin webbed castellated beams', 122: 860-66.
- Zaher, OF, NM Yossef, MH El-Boghdadi, and MA Dabaon. 2018. 'Structural behaviour of arched steel beams with cellular openings', *Journal of Constructional Steel Research*, 148: 756-67.

ÖZGEÇMİŞ



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2018-2021	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2014-2018	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya