



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**S235 ÇELİK PROFİLLERİNDE EĞİLME DAVRANIŞININ FARKLI ZIMBA
GEOMETRİLERİYLE DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MELİKE NUR BERBEROĞLU

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2026

10808455

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**S235 ÇELİK PROFİLLERİNDE EĞİLME DAVRANIŞININ FARKLI ZIMBA
GEOMETRİLERİYLE DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MELİKE NUR BERBEROĞLU

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2026

10808455

BEYAN

“S235 Çelik Profillerinde Eğilme Davranışının Farklı Zimba Geometrileriyle Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Melike Nur Berberoğlu

../../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Tez çalışmam, akademik bir gerekliliğin ötesinde, araştırma ve keşif dolu bir sürecin somut yansımasıdır. Deneysel çalışmaların ve nümerik analizlerin birbiriyle bütünleştiği bu süreçte, mühendislik bilgimi pekiştirirken, aynı zamanda karşılaştığım zorlukların üstesinden gelme becerimi de kuvvetlendirmemi sağladı.

Süreç boyunca bana bilimsel ve manevi olarak yön veren, özverisi ile desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Emre Esener'e en derin şükranlarımı sunuyorum. Akademik bilgisi, titiz yaklaşımı ve sabırlı rehberliği, bu çalışmanın en temel dayanağı olmuştur.

Tez yazım sürecinin zorlu anlarında bile inancımı taze tutan, güven verip her zaman destek olan eşim Alp Kağan Berberoğlu ve eğitim hayatım boyunca sevgisi ve anlayışını benden hiç eksik etmeyen, başarmak istiyorum dediğimde tüm olanaklarını bana sunan babam Osman Koçak, annem Nuray Koçak, ablam Burcu Er ve abim Hasan Er'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine ve maddi-manevi destekleriyle önemli katkılarda bulunan, çalışmakta olduğum kurum Visan Vinç ve Hareket Sistemleri'ne teşekkür ederim. Sağlanan imkânlar ile birlikte teorik bilgileri pratiğe dönüştürmemi mümkün kıldı.

Bu çalışmanın, gelecekte bu alanda yapılacak araştırmalara ışık tutması ve çelik yapı tasarımı pratiklerine fayda sağlaması dileğiyle.

Melike Nur BERBEROĞLU

2026

ÖZET

Yüksek mukavemet-ağırlık oranları ve üstün enerji sönümleme karakteristikleri, ince cidarlı elemanları otomotiv ve savunma sanayii gibi yapısal güvenliğin ve ağırlık optimizasyonunun öncelikli olduğu sektörlerde temel bileşenler haline getirmiştir. Bu parçaların operasyonel performansını belirleyen en kritik faktör, genellikle maruz kaldıkları kompleks eğilme yüklemeleri altındaki yapısal kararlılıklarıdır. Bu gereksinimler doğrultusunda, süneklik ve rijitlik dengesiyle öne çıkan S235 (St-37) yapı çeliği, endüstriyel tasarımlarda stratejik bir malzeme olarak tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, ince cidarlı S235 yapı çeliği profillerin elastik ve plastik deformasyon sınırlarını belirlemek amacıyla Üç Nokta Eğme Testi (3-PBT) yöntem olarak seçilmiş; bu yükleme altındaki mekanik davranışlar farklı süreç parametreleri dikkate alınarak deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kare kesitli profiller için üç farklı zımba geometrisi temel değişken olarak belirlenmiş olup, sabit destek aralığında bu parametrelerin eğilme direnci ve deformasyon karakteristiği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Malzemenin anizotropik davranışını ve gerçek çalışma koşulları altındaki limit durumlarını doğru tahmin edebilmek amacıyla nümerik modellemelerde Hill-48 plastisite yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılarak, kullanılan malzeme modelinin S235 profillerin taşıma kapasitesini ve geri esneme (springback) davranışlarını tahmin etme performansı ortaya konmuştur. Bu bütüncül yaklaşım, ince cidarlı çelik elemanların yapısal güvenlik sınırlarının ve enerji absorpsiyonu kapasitelerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: S235 çeliği, 3-nokta eğme, zımba geometrisi, Hill-48, sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

High strength-to-weight ratios and superior energy absorption characteristics have made thin-walled elements fundamental structural components in sectors where structural safety and weight optimization are prioritized, such as the automotive and defense industries. The most critical factor determining the operational performance of these components is their structural stability under complex bending loads, to which they are frequently subjected. In line with these requirements, S235 (St-37) structural steel, which stands out with its balance of ductility and rigidity, is preferred as a strategic material in industrial designs.

Within the scope of this study, the Three-Point Bending Test (3-PBT) was selected as the methodology to determine the elastic and plastic deformation limits of thin-walled S235 structural steel profiles. The mechanical behaviors under this loading condition were investigated experimentally and numerically, considering various process parameters. For the square cross-section profiles, three different punch geometries were defined as the primary variables, and the effects of these parameters on the bending resistance and deformation characteristics of the material were analyzed at a constant support span.

To accurately predict the anisotropic behavior of the material and its limit states under real operating conditions, the Hill-48 plasticity approach was employed in numerical modeling. By comparing the experimental data with the finite element analysis results, the performance of the implemented material model in predicting the load-bearing capacity and springback behavior of S235 profiles was demonstrated. This holistic approach contributes to a more precise determination of the structural safety limits and energy absorption capacities of thin-walled steel elements.

Keywords: S235 steel, Profiles, 3-point bending, punch geometry, Hill-48, finite element analyses

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. PROFİL YAPILARI VE EĞİLME KAVRAMI	10
2.1.Kapalı Profillerin Tercih Edilme Nedenleri	11
2.2. Dikişsiz Profiller	13
2.1.1. Sıcak İşlem Yöntemleri	13
2.1.2. Soğuk İşlem Yöntemleri.....	14
2.3. Dikişli Profiller	15
2.4. Dikişli ve Dikişsiz Boru İmalat Prosedürlerinin Karşılaştırmalı İncelemesi	17
2.5. Eğilme Kavramı.....	19
3. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ	22
3.1.Hill-48 Plastisite Modeli.....	26
3.1.1. Plastisite Model Parametrelerinin Tespiti.....	27
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI	29
4.1.Eğme Testi Metodu	29
4.2. Test Numularının Hazırlanma Süreci	29
4.3. Test Düzenegi ve Yükleme Parametreleri.....	31
4.4. Zimba Geometrisi ve Parametrik Çeşitlilik.....	31
4.5. Deney Koşullarına Dair Teknik Kısıtlamalar	33
4.6. Deneysel Çalışmalar	33
4.7. Sonlu Elemanlar Analizleri	40
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	50
KAYNAKÇA	54

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. S235 çeliğinin kimyasal bileşimi	1
Tablo 1.2. S235 çeliğinin kimyasal bileşimi	4
Tablo 1.3. S235 çeliğinin mekanik özellikleri.....	4
Tablo 1.4. S235 çeliğinin malzeme standardı.....	4
Tablo 4.1. S235 çeliğinin mekanik özellikleri.....	42

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Gerilme-şekil değiştirme grafiği	2
Şekil 1.2. Mühendislikte kullanılan S235 taşıyıcı elemanlar	4
Şekil 1.3. Profil ve üretildikleri kalıp tipleri	5
Şekil 1.4. Şematik üç nokta eğme test düzeneği	8
Şekil 2.1. Geometrik açıdan farklılık gösteren profil kesitleri	10
Şekil 2.2. Açık tip profil kesitleri (IPE, HEA, UPN)	11
Şekil 2.3. Kapalı tip profil kesitleri (Dikdörtgen, Kare, Daire)	11
Şekil 2.4. Vinç sektöründe profil ve boru kullanımı	12
Şekil 2.5. Direkt ekstrüzyon -- İndirekt ekstrüzyon	14
Şekil 2.6. Soğuk çekme boru	15
Şekil 2.7. Dikişli ve dikişsiz imalat tanımı	15
Şekil 2.8. Dikişli profil imalat şeması	16
Şekil 2.9. Yükleme tipleri	20
Şekil 2.10. Üç nokta ve dört nokta eğme deney düzeneği	21
Şekil 3.1. Modelde düğüm noktası ve eleman gösterimi	22
Şekil 3.2. Çarpışma analiz sonucu	23
Şekil 3.3. Tek boyutlu elemanlar	24
Şekil 3.4. İki boyutlu elemanlar	24
Şekil 3.5. Üç boyutlu elemanlar	25
Şekil 3.6. Sonlu elemanlar akış diyagramı	25
Şekil 4.1. Numuneye ait ölçüler	29
Şekil 4.2. Numune görüntüleri	30
Şekil 4.3. Numune hazırlığında kullanılan testere	30
Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan Shimadzu marka universal test cihazı	31
Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan farklı radüslere sahip (R5, R10, R15) zımba geometrileri ..	32

Şekil 4.6. Deneylerde kullanılan farklı radüslere sahip (R5, R10, R15) zımba geometrileri ..	32
Şekil 4.7. Kare kesitli profilin R5 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – üst görünüm.....	34
Şekil 4.8. Kare kesitli profilin R5 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – yan görünüm	34
Şekil 4.9. Kare kesitli profilin R10 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – üst görünüm....	35
Şekil 4.10. Kare kesitli profilin R10 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – yan görünüm.	35
Şekil 4.11. Kare kesitli profilin R15 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – üst görünüm..	36
Şekil 4.12. Kare kesitli profilin R15 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – yan görünüm.	36
Şekil 4.13. Kare kesitli profilin 4 nokta eğme deneyinde deforme olamamış hali – üst görünüm	37
Şekil 4.14. Kare kesitli profilin 4 nokta eğme deneyinde deforme olamamış hali – ön görünüm	37
Şekil 4.15. R5 zımba yarıçapı için elde edilen kuvvet-uzama grafiği	38
Şekil 4.16. R10 zımba yarıçapı için elde edilen kuvvet-uzama grafiği	38
Şekil 4.17. R15 zımba yarıçapı için elde edilen kuvvet-uzama grafiği	39
Şekil 4.18. Dört nokta eğme deneyi ile elde edilen kuvvet-uzama grafiği	39
Şekil 4.19. 200 mm destek aralığında kare kesit profilin kuvvet-uzama karşılaştırması.....	40
Şekil 4.20. Üç nokta eğme deneyi sonlu elemanlar modeli	41
Şekil 4.21. Dört nokta eğme deneyi sonlu elemanlar modeli	41
Şekil 4.22. Kare kesit profilin sonlu elemanlar modeli.....	42
Şekil 4.23. 200 mm destek aralığında zımba çapı R5 kare kesitli profilin 3 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	43
Şekil 4.24. 200 mm destek aralığında zımba çapı R10 kare kesitli profilin 3 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	43
Şekil 4.25. 200 mm destek aralığında zımba çapı R15 kare kesitli profilin 3 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	44
Şekil 4.26. 200 mm destek aralığında kare kesitli profilin 4 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği	45
Şekil 4.27. Kare kesit profilin üç nokta eğme testinde S200 mesnet aralığı ve R5 zımba yarıçapı ile birlikte deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması	46

Şekil 4.28. Kare kesit profilin üç nokta eğme testinde S200 mesnet aralığı ve R10 zımba yarıçapı ile birlikte deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması	47
Şekil 4.29. Kare kesit profilin üç nokta eğme testinde S200 mesnet aralığı ve R15 zımba yarıçapı ile birlikte deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması	48
Şekil 4.30. Kare kesit profilin dört nokta eğme testinde S200 mesnet aralığında sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.....	49

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

3-PBT: Three-Point Bending Test

4-PBT: Four-Point Bending Test

C: Karbon

CHS: Circular Hollow Sections

δ: Düşey Yer Değiştirme

E: Elastik modül

f(σ_{ij}): Akma fonksiyonunu temsil eder

F: Kuvvet

Fe: Demir

HAZ: Isıdan Etkilenen Bölge

HSS: Hollow Structural Sections

I: Atalet Momenti

L: Açıklık Mesafesi

M: Eğilme Momenti

Mn: Manganez

Mpa: Megapaskal

N: Azot

NDT: Tahribatsız Muayene

P: Fosfor

r: Anizotropi Katsayısı

r₀: Hadde yönünde ki anizotropi değeri

r₄₅: Hadde yönüne 45 derecedeki anizotropi değeri

r₉₀: Hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi değeri

RHS: Rectangular Hollow Sections

S: Kükürt

SEA: Sonlu Elemanlar Analizi

SHS: Square Hollow Sections

σ : Akma Gerilmesi Değeri

σ_a : Akma Dayanımı

σ_0 : Hadde yönünde ki akma gerilmesi değeri

σ_{12} : Çift Eksenli Akma Gerilmesi Değeri

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal Gerilmeler

$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$: Kayma Akma Gerilmeleri

σ_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki akma gerilmesi değeri

σ_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki akma gerilmesi değeri

σ_{ij} : Gerilme tensörü

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin mekanik davranışlarının anlaşılması, güvenilir ve verimli tasarımlar için kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek mukavemet, süneklik ve iyi şekillendirilebilirlik gibi özelliklere sahip metaller, temel taşıyıcı elemanlardan hassas makine parçalarına kadar geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2020; Ashby, 2011). Mühendislik ve tasarım dendiğinde akla gelen ilk yapıtaşlarından olan çelik; dayanıklılığı, düşük maliyeti ve yüksek şekillendirilebilirliği ile insanlık tarihinde kritik roller oynamıştır (Smil, 2016; Kalpakjian & Schmid, 2014).

Çelikler, ana bileşenleri demir ve karbon olan alaşımlardır; bu temel karışıma eklenen diğer elementler ve uygulanan özel işlemler, çeliğe sayısız farklı kimlik kazandırır (Honeycombe & Bhadeshia, 1995; Callister & Rethwisch, 2020). Her ne kadar karbon oranı genellikle %1'i geçmese de çeliğin mekanik gücü büyük ölçüde bu ana elementin miktarına bağlıdır. (Callister and Rethwisch, 2014:94). Alaşımdaki mevcut karbon miktarı da çeliğin sınıflandırılmasında önemli bir etkindir. Ana metali demir olan çelik, demire kıyasen işlenebilir ve mukavemetlidir (Onaran, 2006). Bu özellikleri sayesinde üstünlük barındıran çelik, demire göre daha hafif kalmaktadır. Çeşitli yönden sunmuş olduğu avantajlar sayesinde yapısal ve ana taşıyıcı olarak yüksek katlı binalarda ve köprü inşalarında, makinelerde ve mukavemet gerektiren araçların parçalarında, demiryolları ve araçlarının altyapılarında vb. kullanım alanlarını saymakla bitiremeyecek kadar kapsamlı projelerde ana bileşen olarak görev almaktadır (Uslu ve İnanoğlu,2023:2).

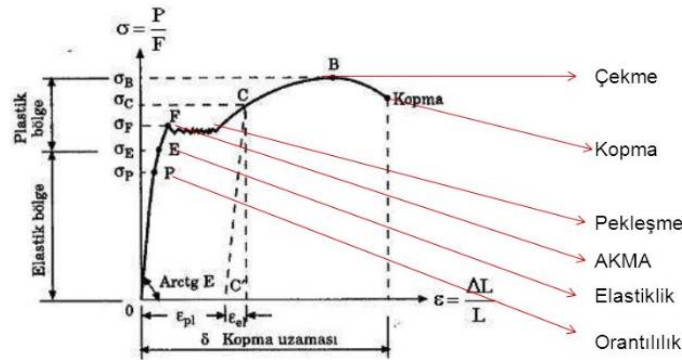
Çeliğin zengin çeşitliliği, kimyasal yapısındaki farklılıklardan doğar. Bu yapı, malzemeyi iki ana başlık altında toplar: demir-karbon alaşımlarından oluşan karbon (alaşımsız) çelikleri ve ek elementlerle güçlendirilen alaşımlı çelikler. Her iki kategori de kendi içinde özel alt gruplar barındırır. S235 çeliğine ait kimyasal bileşimler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. S235 çeliğinin kimyasal bileşimi (Callister and Rethwisch, 2014:94).

Ana Grup	Alt Sınıflandırma Kriteri	Alt Çelik Grubu
Alaşımsız Çelikler	Karbon Miktarı	Düşük Karbonlu Çelikler
		Orta Karbonlu Çelikler
		Yüksek Karbonlu Çelikler
Alaşımlı Çelikler	Toplam Alaşım Miktarı	Düşük Alaşımlı Çelikler
		Yüksek Alaşımlı Çelikler

Deneylerde kullanılacak olan S235 çeliğinin en çarpıcı özelliği, en fazla %0,20 oranında karbon içeriğine sahip olmasıdır (Ashby, 1986). Genellikle hafif çelik olarak bilinen yapısal çelikler, oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Yapısal çelik, homojen ve izotropik yapısı ile dikkat çeken, sıkı kalite kontrol süreçlerinden geçerek üretilen oldukça güvenilir bir malzemedir. Bu üstün özelliklerinin bir sonucu olarak, yüksek mukavemet/öz ağırlık oranına sahiptir. Bu durum, taşıdığı faydalı yüke oranla kendi ağırlığının minimum düzeyde kalmasını sağlar (Ünver, 2003:5).

Bir çeliğin yapısal performansı; malzemenin plastik deformasyona başladığı akma sınırı, kopmadan önce dayanabileceği en yüksek gerilme olan çekme mukavemeti ve yüzey direncini temsil eden sertlik gibi temel parametrelerle ölçülür (Onaran, 2006; Güler, 2014). Bu değerler, malzemenin eksenel çekme deneyine maruz bırakılmasıyla kesin olarak saptanır. Çeliklerin mekanik davranışını ve özelliklerini tanımlamak için, standart bir çekme deneyi ile oluşturulan gerilme-şekil değiştirme grafiğinden yararlanılır (Dikmen, 2022:39). Şekil 1.1’ de gösterilen bu grafik, malzemenin yüke karşı tepkisini görsel olarak sergileyen temel bir araçtır.



Şekil 1.1. Gerilme-şekil değiştirme grafiği (URL-1).

Çekme deneyi sırasında, çelik numuneye sürekli artan bir çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvetin etkisiyle meydana gelen boy değişimi hassas bir şekilde ölçülür. Bu verilerle, malzemenin gerilme-birim deformasyon ilişkisini gösteren grafik oluşturulur. Bu grafiğin analizi, yapısal çeliğin iki temel mekanik özelliği olan akma gerilmesi ve çekme dayanımını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Özellikle sünek yapı çeliklerinde akma sınırı gerilme-şekil değiştirme diyagramında belirgin bir plato olarak gözlemlenirken, yüksek mukavemetli çeliklerde bu belirginlik kaybolmaktadır. Bu tür malzemelerde akma gerilmesi; %0,2'lik (0.002 mm/mm) kalıcı plastik deformasyon noktasından, elastik bölgeye paralel çizilen doğrunun eğriyi kestiği nokta esas alınarak tayin edilir (Kayalı vd., 1986).

Yapısal çelikler, üstün mekanik nitelikleri ve yüksek tercih oranlarıyla inşaat projeleri başta olmak üzere birçok sektörün temel taşıdır. Endüstride en yaygın kullanılan yapısal çelik sınıfları S235, S275 ve S355 olarak öne çıkmaktadır. Avrupa standardı EN 10025-2'ye göre tanımlanan bu sınıflardan S235, ismini minimum akma dayanımı olan 235 MPa (N/mm²) değerinden alır; buradaki 'S' harfi malzemenin yapısal (Structural) kullanımını ifade eder (Güleryüz, 2014; TS EN 10025-2, 2019). Birimi Megapaskal'dır (MPa).

S235 kalitesi, geniş kullanım yelpazesi ve maliyet etkinliği nedeniyle endüstriyel tesislerde en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Standart olarak sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen bu çelik, mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini artırmak amacıyla soğuk çekme işlemine tabi tutulabilir. Bu ikincil işlem, pekleşme mekanizması sayesinde malzemenin dayanımını ve boyutsal hassasiyetini iyileştirerek konstrüksiyonlarda daha yüksek performans sergilemesine olanak tanır (Anık, 1991; Dikmen, 2022). Düşük karbon içeriği sayesinde kazandığı üstün kaynaklanabilirlik ve form verilebilirlik özellikleri; bu çeliği otomotivden köprü projelerine, boru üretiminden makine imalatına kadar kritik alanlarda vazgeçilmez kılmıştır (Akay, 2021).

Mekanik performans açısından bakıldığında, S235 çeliğinin nominal kalınlığı $t \leq 16$ mm olan ürünler için akma sınırı 235 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca çelik, sahip olduğu yüksek elastisite modülü (210 GPa) ile betonarme (31 GPa) ve ahşap (10 GPa) gibi malzemelere karşı büyük bir rijitlik avantajı sunar (Hibbeler, 2014). Bu yüksek rijitlik; sehim, titreşim ve stabilite gibi tasarım kriterlerinin daha az malzeme kütlesiyle çözülmesine imkân tanıyarak, yapısal tasarımlarda hem malzeme verimliliği hem de ekonomik çözümler sağlar (Ünver, 2003).

Elastikiyetin ötesinde, yapıların enerji yutma kapasitesi özellikle dinamik yükler altında kritik bir rol oynar. Betonarme yapılar tekrarlı yüklemeler karşısında sınırlı ve tek yönlü bir enerji yutma kabiliyeti sergiler. Bu kapasite, her tekrarda azalarak malzemenin bozulmasına yol açar ve nihayetinde ani, kırılğan bir göçmeye neden olabilir. Buna karşın, çelik yapılar elastik sınırları aştığında bile, yüksek süneklikleri sayesinde önemli bir deformasyon kapasitesi gösterir. Bu deformasyon süreci boyunca, yapıya etkiyen dinamik enerjiyi emerek dağıtır ve yapısal bütünlüğünü korumaya devam eder. Bu sayede, beklenenin üzerinde bir yük altında bile yapının ayakta kalması sağlanır. Bu üstün performansın temel şartı, yüklerin doğru bir şekilde dağıtılmasıdır. Dolayısıyla, kiriş-kolon birleşimlerinin yeterli moment kapasitesine sahip olması bu kritik mekanizmanın işleyebilmesi için vazgeçilmezdir (Ünver, 2003: 17,18).

Tablo 2’de deneysel çalışmalarda kullanılan S235 çeliğinin kimyasal bileşimi ifade edilirken mekanik özellikleri Tablo 3’de, malzeme standardı ise Tablo 4’de, gösterilmiştir.

Tablo 1.2. S235 çeliğinin kimyasal bileşimi (H. Çağlar, 2022).

Malzeme No	C	Mn	P	S	N	Fe
1.0254	0,17	1,4	0,035	0,04	0,0012	Kalan

Tablo 1.3. S235 çeliğinin mekanik özellikleri (H. Çağlar, 2022).

Malzeme No	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Uzama %
1.0254	350.0- 480.0	235.0	25.0

Tablo 1.4. S235 çeliğinin malzeme standardı (H. Çağlar, 2022).

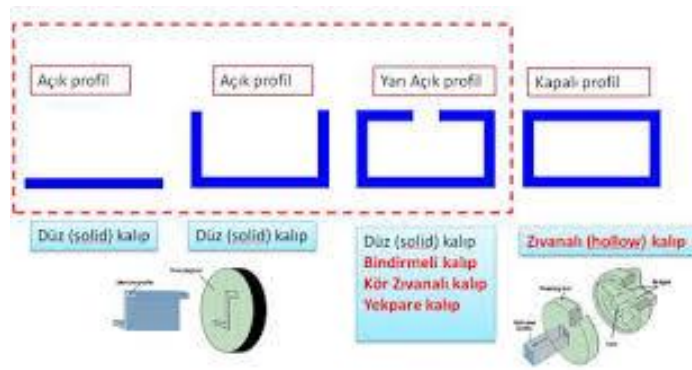
DIN	AISI/SADE/St	EN
17100	St37	S235JR

Yapı çeliği isimlendirmelerinde yer alan S235, S275 ve S355 gibi temel ifadelerin yanına eklenen semboller, malzemenin darbeli yükler altındaki kırılma direncini (tokluk) ve bu direncin hangi sıcaklık değerinde test edildiğini ifade eder. Örneğin; JR sembolü oda sıcaklığındaki (+20°C) dayanımı simgelerken; J0 ve J2 sembolleri sırasıyla 0°C ve -20°C gibi düşük sıcaklıklarda malzemenin sünekliğini koruyarak en az 27 Joule enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu garanti altına alır (TS EN 10025-2, 2006).



Şekil 1.2. Mühendislikte kullanılan S235 taşıyıcı elemanlar (URL-2).

Günümüz modern inşaat ve mühendislik projeleri, dayanıklılığı, güvenilirliği ve esnekliği bir arada sunan malzemeler üzerine kuruludur. Bu malzemelerin başında ise, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi yapısal uygulamaların temel taşı haline gelen çelik profiller yer alır. Özellikle S235 çelik profilleri, endüstriyel tesislerden büyük ölçekli ticari binalara kadar geniş bir yelpazede, projelerin iskeletini oluşturur. Bu profiller, sahip oldukları yüksek çekme mukavemeti ve kolay işlenebilirlik gibi özellikler sayesinde hem ekonomik hem de güvenli yapılar inşa etme olanağı sunar (Güleryüz, 2014; Deren vd., 2008). Ayrıca, çelik iskelet sistemleri, montajın hemen ardından tam kapasiteyle yük taşıyabilme avantajı sunar. Bu durum, projelere hız ve operasyonel esneklik kazandırır (Ünver, 2003: 5)



Şekil 1.3. Profil ve üretildikleri kalıp tipleri (Ayan, 2011).

Yapısal çelik konstrüksiyonlar da kullanılan profiller, geometrik kesit formlarına göre Şekil 1.3.’te gösterildiği gibi temel olarak açık kesitli ve kapalı kesitli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır (Deren vd., 2008). Her iki profil tipi de mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılsa da farklı mekanik davranışlar ve yapısal avantajlar sunmaktadır. Bu ayrım, bir projenin tasarım parametrelerine ve yükleme koşullarına bağlı olarak doğru malzemenin seçilmesinde kritik bir rol oynar.

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan açık kesitli profiller (I, H, U ve L profiller), malzemenin yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde şekillendirildiği sıcak haddeleme yöntemiyle üretilir (Deren vd., 2008; TS EN 10025-2, 2019). Bu yöntem, büyük kesitli yapı elemanlarının homojen bir içyapıya ve yüksek sünekliğe sahip olmasını sağlar (Onaran, 2006). Bu şekillendirilmiş metal çubuklar, modern yapılarda güvenliğin ve sağlamlığın sembolüdür (Eroğlu, 2019: 1). I, U ve L gibi açık kesitli profillerin en belirgin yapısal dezavantajı, burulmaya karşı rijitliklerinin kapalı kesitli profillere oranla oldukça düşük olmasıdır (Deren vd., 2008). Bu durum, profilin burulma momenti etkisi altında önemli oranda şekil değiştirmesine neden olur ve bu da burulma burkulması riskini beraberinde getirir. Buna karşın, açık kesitli profiller, malzemeyi ağırlık

merkezinden uzakta konumlandiran geometrileri sayesinde, eğilme kapasitesi ve atalet momenti açısından oldukça yüksek verimlilik sunarlar (Deren vd., 2008). Dolayısıyla, basit eğilme ve kesme yüklerine maruz kalan kiriş ve kolon uygulamalarında sıklıkla tercih edilirler. Ayrıca, bu profillerin üretim maliyetleri ve farklı bağlantı tiplerine uyumları, onları geniş bir kullanım yelpazesi için ekonomik bir çözüm haline getirmektedir.

Buna karşılık, kapalı kesitli profiller (dikdörtgen veya dairesel kutu profiller) yüksek burulma rijitliği ve eksenel basınç altında yerel burkulmaya karşı üstün direnç sergiler. Kapalı geometrileri sayesinde, burulma etkilerine karşı açık kesitlere kıyasla kat kat daha yüksek bir dayanım gösterirler (Wardenier vd., 2010). Bu özellikleri, onları özellikle burulma yüklerinin belirgin olduğu veya uzun kolonların kullanıldığı yüksek katlı binalarda ideal kılar. Kapalı kesitli profillerin bir diğer stratejik avantajı, içlerinin beton ile doldurularak kompozit elemanlar (CFST) oluşturulabilmesidir. Bu yöntem, çelik profilin dıştan sargılama etkisi yaratarak betonun basınç dayanımını artırmasını sağlar (Deren vd., 2008; TS EN 1994-1-1). Yapısal sistemlerde sıklıkla karşımıza çıkan kutu profil kesitli çelik elemanlar, ana taşıyıcı kolon ve kiriş olarak önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle modern yüksek katlı yapıların inşasında, içleri betonla doldurulmuş bu kompozit kolonlar, yüksek performans ve verimlilikleri nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir (Karakuş, 2022:5).

Betonarme elemanlara göre, beton dolgulu çelik kutu profiller daha yüksek performans gösterir. Çelik kesit, betonun yanal deformasyonunu kısıtlayarak dayanımı artırırken, beton çekirdek de çelik profilin yerel burkulmasını önleyerek taşıma gücünü artırır (Susantha v.d., 2001). Bu kompozit yapılar, çelik ve betonun sinerjik etkisiyle hem taşıma kapasitesini hem de yangın direncini önemli ölçüde artırır. Ancak, kapalı kesitlerin kaynaklı bağlantı detayları daha karmaşık olabilir ve imalat sonrası iç yüzeylerine erişim kısıtlıdır. Özetle, açık kesitli profiller daha çok tekil yükleme koşulları ve basit eğilme momentlerinin hâkim olduğu durumlarda avantajlıyken, kapalı kesitli profiller yüksek burulma rijitliği, yerel burkulma direnci ve kompozit sistem oluşturma kabiliyetleri nedeniyle daha karmaşık ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, yapısal sistemin gereklilikleri, ekonomik faktörler ve imalat detayları, nihai görünüş seçimini belirleyen ana parametrelerdir.

Profil yapıları, mühendislik ve mimari uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanına sahip geometrilerdir. Endüstriyel imalat ve yapısal tasarımlarda en yaygın karşılaşılan formlar ise, yüksek burulma direnci ve estetik avantajları nedeniyle kutu

profillerdir (Deren vd., 2008; Erol, 2014). İçi boş yapısal kesitler (HSS), geometrik formlarına göre; kare (SHS), dikdörtgen (RHS) ve dairesel (CHS) olmak üzere üç temel tipte sınıflandırılmaktadır (Wardenier vd., 2010). Bu ayrım, her bir profilin mekanik davranışını ve mühendislik uygulamalarındaki uygunluğunu doğrudan etkiler. Kare profiller, iki eksen etrafında simetrik atalet momentine sahip olmaları nedeniyle, çift eksenli eğilme ve eksenel yüklere karşı eşit derecede bir rijitlik sunarak kolon uygulamaları için ideal bir çözüm teşkil ederler. Dikdörtgen profiller ise güçlü ve zayıf eksenleri etrafında farklı atalet momentleri gösterirler; bu durum, onları özellikle tek eksenli eğilme momentlerinin hâkim olduğu kiriş veya çerçeve elemanları gibi uygulamalarda daha verimli kılar. Her iki kesit formu da açık kesitli profillere kıyasla üstün burulma rijitliği ve yerel burkulma direnci sergileyerek yapısal performansı artırır (Erol, 2014; Özmen vd., 2015). Dairesel kesitler ise her yönde eşit atalet momenti sağlamaları ve düşük rüzgar katsayıları nedeniyle özellikle dış mekân kule ve direk yapılarında tercih edilirler (Wardenier vd., 2010).

Yapısal profil elemanlar, mühendislik uygulamalarında genellikle saf yükleme durumlarından ziyade, eksenel kuvvet ve eğilme momentinin birlikte etkidiği 'bileşik yükleme' durumlarına maruz kalırlar. Bu etkileşim, elemanın kararlılığını (stabilitesini) ve taşıma kapasitesini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir (Salmon vd., 2009). Bu iki temel yükleme tipi arasında, basma durumunun analizi; malzemenin eksenel stabilitesi bağlamında, eğilme davranışına kıyasla deneysel ve nümerik yöntemlerle daha doğrudan ve basit bir yaklaşımla modellenebilmektedir. Buna karşılık, çelik profillerin eğilme davranışı incelendiğinde, yapısal mühendislikte en kritik konuların başında gelir. Profilin eğilme performansı, yapısal bütünlüğün ve nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kritik bir parametre olup; uygulanan yükleme tipinin karakteristiğine (statik veya dinamik), kesit geometrisine, yanal mesnetleme (destekleme) durumuna ve malzeme kalitesine bağlıdır. Bu nedenle, eğilme davranışı, nümerik ve deneysel araştırmalarda daha kapsamlı incelemeyi gerektiren bir problem alanı teşkil etmektedir.

Malzemelerin elastik ve plastik deformasyon sınırlarının tayin edilmesinde üç nokta eğme testi yaygın olarak başvuru bir yöntemdir. Literatürde bu test yöntemi; kompozit yapıların eğilme karakteristiklerinin incelenmesinden (Seyed Jafari vd., 2021; Kazemi vd., 2022; Kümmel vd., 2018; Xia vd., 2022), kaynak birleşimlerinin verimlilik analizlerine (Sudhakar ve Srinivas, 2021; Moni, 2020) ve katmanlı imalat yöntemleriyle üretilen bileşenlerin mekanik dayanımlarının ölçülmesine (Monkova vd., 2023) kadar geniş bir sahada uygulama bulmaktadır.

Üç nokta eğme testlerine yönelik teorik modellerin deneysel verilerle doğrulanması üzerine yapılan çalışmalarda, Koçar vd. (2023) geliştirdikleri yer değiştirme modelinin kırılma süreçlerini ve çatlak yayılımını tahmin etmede yüksek hassasiyet gösterdiğini raporlamışlardır. Malzemenin dinamik ve çevresel koşullar altındaki tepkilerini inceleyen Liu vd. (2023) ise, farklı yükleme hızlarının yanı sıra 30°C ile 150°C arasındaki sıcaklık değişimlerinin kırılma davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymuşlardır.

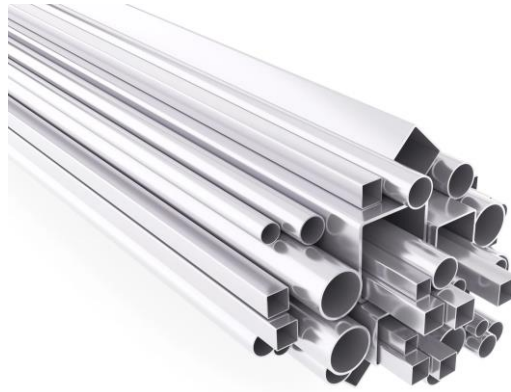
8

Şekil 1.4.'de düzeneği belirtilen Üç nokta eğme testi (3-PBT), numune hazırlama sürecinin pratikliği ve test kurulumunun hızı nedeniyle endüstriyel üretim hatlarında ve laboratuvar ortamlarında birincil kalite kontrol yöntemi olarak yaygın bir kabul görmüştür (Onaran, 2006; TS EN ISO 7438). Bu yöntem, malzemenin sünekliği ve eğilme dayanımı hakkında hızlı veri sağlayarak, üretim parametrelerinin anlık olarak doğrulanmasına imkân tanır (Anık, 1991). Buna karşın, Dört Nokta Eğme Testi (4-PBT), iki yük uygulama noktası arasında sabit bir moment ve sıfır kesme kuvveti (saf eğilme) oluşturarak malzemenin gerçek eğilme performansını daha hassas bir şekilde ölçer. Bu durum, özellikle karmaşık veya hassas yapıdaki malzemelerin test edilmesinde 4-PBT yöntemini daha güvenilir bir seçenek haline getirir (Sodhi, 2014).

Çalışmanın kapsamı, mevcut literatürde ki boşluk dikkate alınarak, S235 (St-37) çelik profillerin üç-nokta eğilme davranışının incelenmesi olarak belirlenmiştir. Yapısal çelik sınıfında yer alan St37 çeliğinden imal edilen bu elemanların davranışları, çok sayıda parametre kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle malzeme modellemesi için farklı plastisite yaklaşımları ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Nihayetinde, St37 çeliğinden üretilen çelik profillerin üç-nokta ve dört-nokta eğilme performansı, deneysel, nümerik ve parametrik açılarından bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

2. PROFİL YAPILARI VE EĞİLME KAVRAMI

Profil elemanlarının yapısal yönü, mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir yere sahiptir; bu durumun ana nedeni, sahip oldukları yüksek düzeydeki yük taşıma kapasiteleridir. Bu üstün mukavemet özellikleri sayesinde, profiller yapısal konstrüksiyonlarda kolon (dikey destek), kiriş (yatay taşıyıcı) ve vinç sistemleri gibi ağır yük taşıyan ana elemanların tasarımında öncelikli olarak tercih edilirler (McCormac ve Csernak, 2012). Bu bağlamda, profilin geometrisi ve malzemesi, yapının genel stabilitesini ve güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bununla birlikte, profillerin yapısal kullanımı sadece sabit konstrüksiyonlarla sınırlı değildir. Profiller, çarpışma enerjisini kontrollü bir şekilde sönmüleyebilme kapasiteleri sayesinde otomotiv endüstrisinde stratejik bir öneme sahiptir. Özellikle araç şasilerindeki darbe emici bölgelerde profil yapıların tercih edilmesi, bu elemanların çarpışma anında programlanmış bir biçimde deforme olarak darbe enerjisini yutma ve yolcu kabine iletilen kuvveti minimize etme yeteneğinden kaynaklanmaktadır (Jones, 2011). Profillere olan bu yaygın talep hem statik yük taşıma gereksinimlerinde hem de yüksek darbe sönmüleme uygulamalarında yoğunlaşmıştır. Bu çift yönlü ve zorlu talep, profil imalat süreçlerinde yüksek mukavemet, süneklik ve enerji absorpsiyonu gibi özellikleri bir arada sunabilen metalik malzemelerin (özellikle çelik) ağırlıklı olarak kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Tezin odak noktası, işte bu kritik elemanların davranışlarını derinlemesine incelemektir. (Ünlü, 2022: 13)



Şekil 2.1. Geometrik açıdan farklılık gösteren profil kesitleri (URL-3).

Profiller, temel olarak kesit geometrilerine ve üretildikleri malzemeye göre değişkenlik gösterirler. Şekil 2.1.'de geometrik açıdan farklılık gösteren profil kesitleri verilmiştir. Ancak mühendislik uygulamalarında, bir profilin hangi amaçla kullanılacağını belirleyen ve dolayısıyla tasarımını değiştiren birçok faktör vardır (Callister ve Rethwisch,

2020). Bu faktörlerden profilin kesit şekli (I, H, U, kare, dikdörtgen vb.) onun mekanik davranışını kökten değiştirirken, profilin malzemesi, mukavemetini, ağırlığını ve maliyetini belirler. Ayrıca üretim süreçleri (sıcak haddeleme, soğuk haddeleme ve kaynaklı (yapma) kesitler), profilin nihai özelliklerini ve yine maliyetini etkileyen durumlardan biridir (Hibbeler, 2014). Bunun yanı sıra bir mühendis, bir profili aşağıdaki gereksinimlere göre boyutlandırır ve değiştirir:

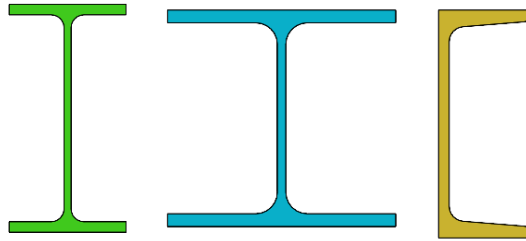
Kullanım Amacı: Profilin kolon mu (öncelik basma ve burkulma) yoksa kiriş mi (öncelik eğilme ve sehim) olacağı.

Taşıma Kapasitesi: Profile etki eden maksimum yük (kuvvet ve moment) miktarı.

Geometrik Sınırlar: Açıklık mesafesi arttıkça, eğilme rijitliği (atalet momenti) gereksinimi artar.

Deformasyon (Sehim) Sınırları: Profilin yük altında kabul edilebilir deformasyon (sehim) miktarı.

Çevresel Faktörler: Korozyon direnci, yangın güvenliği ve sıcaklık değişimlerinin malzeme seçimine etkisi (Deren vd., 2008).



Şekil 2.2. Açık tip profil kesitleri (IPE, HEA, UPN).



Şekil 2.3. Kapalı tip profil kesitleri (Dikdörtgen, Kare, Daire).

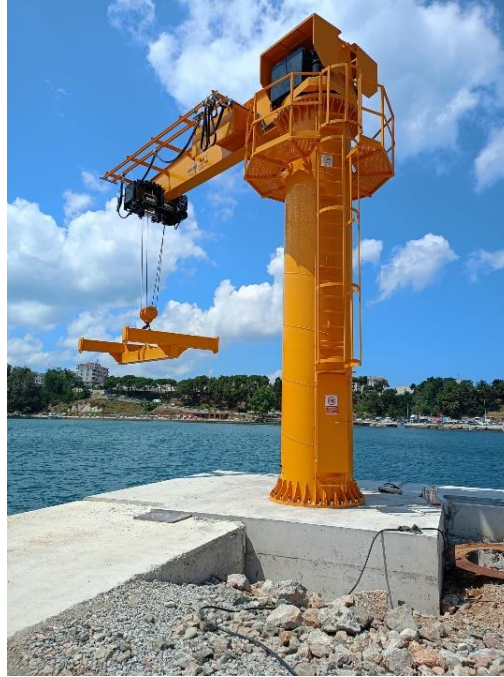
Şekil 2.2. ve 2.3.'te açık ve kapalı tip profillere ait kesitler verilmiştir.

2.1.Kapalı Profillerin Tercih Edilme Nedenleri

Kapalı profillerin en önemli teknik avantajı, burkulmaya karşı gösterdikleri üstün dirençtir. Kapalı bir kesite sahip olmaları, yük altında dört taraftan da eşit destek almalarını

sağlar (Segui, 2017). Özellikle uzun kolon veya sıkıştırmaya maruz kalan elemanlarda, açık profillere kıyasla yanal ekseninde burkulma riski minimuma iner. Bu yapısal stabilite, hem daha güvenli tasarımlara olanak tanır hem de bazı durumlarda daha az malzeme kullanarak aynı dayanımı elde etme imkânı sunar (Galambos ve Surovek, 2008; Piroğlu, 2019). Kapalı profillerin montaj ve işleme süreçlerindeki pratikliği maliyet ve zaman yönetiminde avantaj sağlar. Kaynak ve birleştirme işlemleri için ideal yüzeyler sunmaları, inşaat sahasındaki işçiliği kolaylaştırır. Ayrıca, tamamen kapalı bir kesit olmaları, iç yüzeylerinin boyanması veya korunması gereksinimini ortadan kaldırarak bakım maliyetlerini düşürür. İnşaat sektöründe: taşıyıcı yapı elemanlarında, çatı ve sundurmalarda, endüstriyel tesislerde ve ticari binalarda güvenlik merdivenleri, çalışma platformları ve korkuluk imalatında kullanılırken makine ve ekipman imalatında: makine şase ve tarım makinelerinde kullanılır. Ulaşım sektöründe: demiryolu araçlarının vagonlarında, kamyon ve tır kasalarında, treyler ve römork şaselerinde yük taşıma kapasiteleri nedeniyle kullanılırlar. Mobilya ve dekorasyon alanında reklam panoları, masa ayakları, kitaplık iskeletleri ve sandalye çerçevelerinde estetik ve sağlamlık sağlamak amacıyla da kullanılır.

Özetle, kapalı profiller, yapısal bütünlükten ödün vermeden güvenliği, tasarımı ve uygulama kolaylığını bir araya getirerek günümüzün zorlu endüstriyel ve mimari projelerinin vazgeçilmezi haline gelmiştir. Şekil 2.4'te vinç sektöründe profil kullanımına ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.4. Vinç sektöründe profil ve boru kullanımı (Visan Vinç, 2024).

Boru ve profillerin tarihi, endüstriyel devrimden bu yana gelişen, uzun ve zengin bir geçmişe sahiptir. Bugün profiller, temel üretim yöntemleri olarak adlandırılan dikişsiz ve dikişli (kaynaklı) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Her iki yöntemin de kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır ve bu, son ürünün mekanik dayanımını ve kullanım alanlarını da belirler. (Hashmi, 2006: 6).

Dikişli ve dikişsiz profiller arasındaki temel fark, üretim yöntemlerinden kaynaklanır. Bu durum, profilin taşıyabileceği yükler ve maliyet dengesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Her iki profil türü de kendi uygulama alanında etkin ve güvenilir çözümler sunar. Dolayısıyla, doğru profil seçimi için projenin gereksinimlerini iyi anlamak kritik öneme sahiptir.

2.2. Dikişsiz Profiller

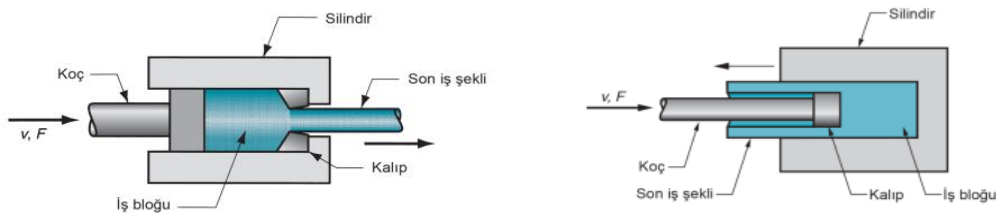
Dikişsiz profillerin imalatı, temelde tek bir metal kütüğünün işlenmesiyle gerçekleştirildiği için kaynak dikişi barındırmazlar. Bu profillerin üretimi için birkaç farklı yöntem bulunmaktadır, ancak ana prensip daima katı bir malzemeyi içi boş bir forma dönüştürmektir (Groover, 2020).

2.1.1. Sıcak İşlem Yöntemleri

Metaller ve makine mühendisliği alanında dikişsiz boru ve profil üretimi, malzemenin bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini koruyarak yüksek performanslı nihai ürünler elde etmeyi amaçlayan karmaşık bir süreç bütünüdür. Bu üretim tekniklerinin merkezinde, metallerin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde (sıcak şekillendirme) işlenmesi prensibi yer alır. Bu sıcaklıklarda metalin şekil değiştirme direnci azalırken, sünekliği önemli ölçüde artar; bu durum, masif bir kütüğün zorlanmadan içi boş bir profil formuna dönüştürülmesini sağlar. Endüstride dikişsiz boru ve profil üretiminde en sık başvurulan yöntem ise sıcak haddeleme işlemidir (Groover, 2020). Üretim süreci, dairesel kesitli katı bir çelik kütüğün (billet), fırınlarda yaklaşık 1200 °C ve üzerindeki sıcaklıklara ısıtılmasıyla başlar. Bu termal işlem, malzemenin plastik şekil verme direncinin düşürülmesini ve homojen bir yumuşama elde edilmesini sağlar. Isıtılan kütük, döner delme değirmenine (Mannesmann değirmeni) aktarılır. Burada, karşılıklı dönen konik merdaneler kütüğü hem ilerletir hem de döndürür. Bu esnada merkezde konumlandırılan sivri uçlu bir mandrel, kütüğün çekirdeğini delerek içi boş bir ön form (manşon) oluşturur. Bu aşama, borunun nihai özelliklerini belirleyen mikro yapının homojenleşmesi açısından kritiktir (Kalpakjian ve Schmid, 2014).

Delme aşamasından sonra elde edilen manşon, hedeflenen dış çap ve et kalınlığı değerlerine ulaşıncaya kadar bir dizi haddeleme operasyonuna tabi tutulur. Mannesmann haddeleme süreci gibi birbirini izleyen işlemlerle, parça boyuna uzatılırken duvar kalınlığı hassas bir şekilde inceltir. Üretim hattındaki boyutsal kararlılığı sağlamak amacıyla lazer tarayıcılar ve gelişmiş sensör teknolojileri ile gerçek zamanlı ölçüm kontrolleri gerçekleştirilir. Haddeleme işlemi tamamlanan borular, kontrollü soğutma aşamasının ardından doğrultma (düzleştirme), hassas kesim ve yüzey kusur denetimi gibi bitirme işlemleriyle nihai ürün formuna getirilir (Kalpakjian ve Schmid, 2014; Ünlü, 2022).

Sıcak haddelemeye alternatif bir diğer kritik yöntem ise ekstrüzyondur. Bu teknik, özellikle boruların yanı sıra, karmaşık kesitlere sahip profillerin üretiminde ve demir dışı metallerin (örneğin, alüminyum ve bakır alaşımları) işlenmesinde yaygın olarak kullanılır. Ekstrüzyon sürecinde, ısıtılmış billet bir kalıp haznesine yerleştirilir ve hidrolik bir pres yardımıyla kalıp içinden yüksek basınçla itilir. Kalıp, ürünün nihai dış profil şeklini belirlerken, bir mandrelin kullanımıyla iç çap oluşturulur. Ekstrüzyon, malzemenin homojen bir şekilde akmasını sağlayarak pürüzsüz yüzeyler ve sıkı toleranslar elde etmeye olanak tanır. Bu yöntem, sıcak haddelemenin aksine daha kısa ürünler üretir ve bu yüzden belirli bir uzunluktaki özel profil veya borular için idealdir. Her iki sıcak şekillendirme yöntemi de dikişsiz boru ve profillerin yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve korozyon direnci gibi zorlu endüstriyel koşullarda güvenle kullanılmasını mümkün kılar (Saha, 2000; Kalpakjian ve Schmid, 2014). Şekil 2.5'te direkt ve indirekt ekstrüzyon şemaları gösterilmiştir.

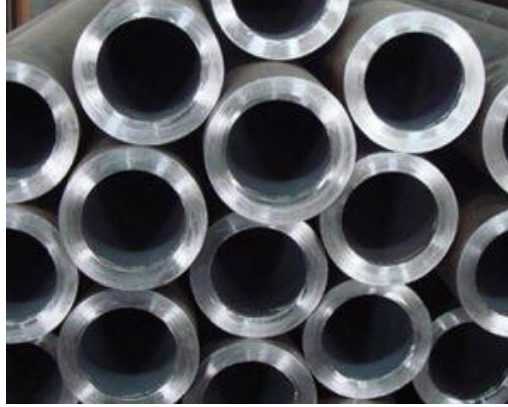


Şekil 2.5. Direkt ekstrüzyon -- İndirekt ekstrüzyon (Alüminyum Yapı Dergisi, (76), s. 248, 2017).

2.1.2. Soğuk İşlem Yöntemleri

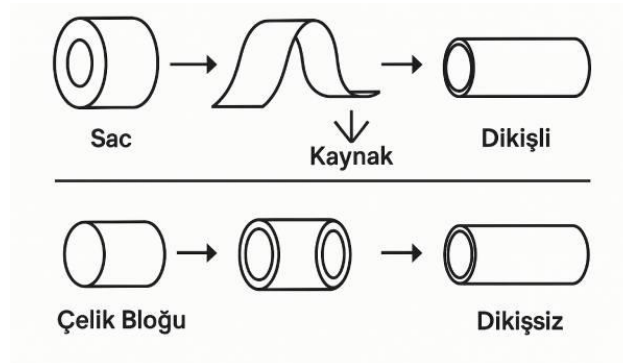
Sıcak işlemle üretilen profiller, bazı durumlarda daha hassas ölçüler ve üstün yüzey kalitesi elde etmek için soğuk çekme işlemine tabi tutulur. Bu yöntem, malzemeyi yeniden kristalleşme sıcaklığının altında işler ve soğuk haddeleme veya soğuk çekme tekniklerini içerir. Soğuk çekmede, sıcak haddelenmiş boru bir kalıptan çekilerek çapı ve duvar kalınlığı azaltılır (Anık, 2019). Bu işlem, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir ve daha sıkı

toleranslar elde edilmesini sağlar. Üretim süreci tamamlanmış soğuk çekme borulara ait örnek kesitler Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Soğuk çekme boru (URL-4).

Özetlemek gerekirse, dikişsiz profillerin imalatı temelde iki ana yöntemle gerçekleştirilir: sıcak işlem (haddeleme ve ekstrüzyon) ve soğuk işlem (çekme). Sıcak yöntemler borunun temel şeklini oluştururken, soğuk yöntemler daha yüksek hassasiyet ve üstün yüzey kalitesi sağlamak için kullanılır.



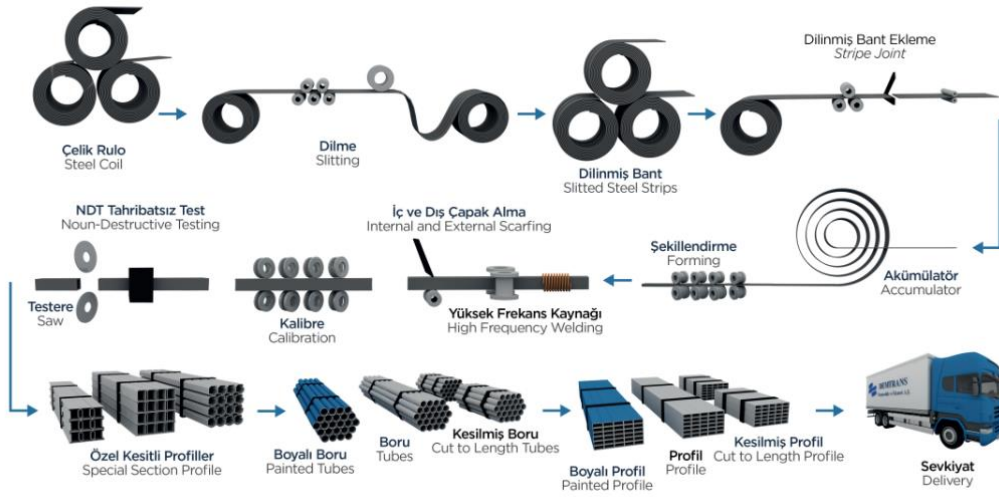
Şekil 2.7. Dikişli ve dikişsiz imalat tanımı (URL-5).

Sac levhaların kaynak edilmesiyle oluşan dikişli imalat ile çelik bloktan doğrudan üretilen dikişsiz imalat süreçleri görselde karşılaştırmalı olarak Şekil 2.7’de sunulmuştur.

2.3. Dikişli Profiller

Dikişli profiller, genellikle sac levhaların veya şeritlerin bükülerek birleştirilmesi ve kenarlarının kaynaklanmasıyla elde edilir (Anık, 2019; Kalpakjian ve Schmid, 2014). Üretim süreci nispeten daha basittir ve bu sayede maliyetler düşük tutulabilir. Dikişli profillerin en karakteristik yapısal özelliği, üretim sürecindeki birleşme hattı boyunca oluşan ve literatürde 'kaynak dikişi' olarak adlandırılan izdir. Bu dikiş, profilin iç ve dış yüzeyinde belirgin bir hat oluşturur ve genellikle üretimin hemen ardından mekanik yöntemlerle tıraşlanarak (çapak

alma) yüzey sürekliliği sağlanmaya çalışılır (Kalpakjian ve Schmid, 2014). Ancak, dikiş hattı boyunca oluşan ısı değişimleri, profilin bu bölgesinde dikişsiz yapılara oranla farklı mekanik davranışlar sergilemesine neden olabilir (Anık, 2019). Düşük basınçlı uygulamalar ve yapısal elemanlar için oldukça uygun olan dikişli profiller, mobilya iskeletlerinden otomotiv parçalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Sürekli iyileşen üretim ve test teknikleri (özellikle Tahribatsız Muayene- NDT), dikişli profillerin gelecekte daha zorlu ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda da dikişsiz profillere güçlü bir alternatif olacağını göstermektedir. Dikişli profil imalat süreci Şekil 2.8’ de görüldüğü üzere; çelik rulonun dilinmesi, yüksek frekans kaynağı ile birleştirilmesi ve kalite kontrol testlerinden geçirilmesi aşamalarını kapsamaktadır.



Şekil 2.8. Dikişli profil imalat şeması (Yücel Boru, 2025).

Şekil 2.8’ de görüldüğü gibi hazırlık aşamasında geniş metal rulo işlenmeye hazır hale getirilir. Hazırlanan rulo, boru ya da profilin nihai çapına ve duvar kalınlığına uygun olacak şekilde dilme makinesi kullanılarak uzunlamasına kesilir. Kesilen dar şerit rulo (bobin) açılır (uncoiling). Sürekli üretime devam edebilmek için, bir önceki rulonun bitiş ucu ile yeni rulonun başlangıç ucu birleştirilir (uç kaynağı). Birleştirmenin ardından şerit, hatta beslenmeden önce bir akümülatörde (stoklayıcı da) depolanır. Bu, dilme veya uç kaynağı işlemlerindeki duraklamalara rağmen hattın kesintisiz çalışmasını sağlar.

Şekillendirme ve kaynak aşamasında hazırlanan metal şerit, boru veya profil formunu kazandığı ana aşamadır. Soğuk şekillendirme aşamasında şerit, bir dizi ardışık merdane grubu içinden geçirilir. Bu merdaneler, şeridi yavaş yavaş düz halden dairesel (boru) veya kare/dikdörtgen (profil) şekline doğru soğuk olarak bükür. Ardından kaynak aşamasında

yüksek frekanslı elektrik akımı (indüksiyonla veya kontakla) kenarlara odaklanır ve malzemenin kenarlarını hızla plastikleştirerek kadar ısıtır. Hemen ardından gelen sıkıştırma merdaneleri, plastikleşen kenarları birleştirerek sürekli bir kaynak dikişi oluşturur. Bu sıkıştırma işlemi, kirleticileri ve erimiş fazla metali dışarı (çapak olarak) atar. Kaynak dikişi oluştuktan hemen sonra, içerideki ve dışarıdaki fazla çapak (kaynak fazlalığı) kesilerek temizlenir. Ardından profil, boyut ve şekil toleranslarına ulaşmak için kalibrasyon merdanelerinden geçirilir.

Son olarak kaynaklı profilin nihai mekanik özelliklerini kazandığı ve sevkiyata hazırlandığı bölüm olan bu aşamada kaynak hattının ve Isıdan Etkilenen Bölgenin (HAZ) mikro yapısal homojenliğini sağlamak için boruya kontrollü bir ısıtma işlemi (tavlama veya normalizasyon) uygulanır (Anık, 2019). Bu, sertleşmiş bölgeleri yumuşatır ve gerilmeleri giderir. Sonrasında profil kontrollü bir şekilde soğutulur ve düzleştirme (redresör) makinelerinden geçirilerek hat üzerindeki eğrilikler giderilir. Soğutma ve düzleştirme işleminin ardından profil, müşterinin talep ettiği standart boylara otomatik olarak kesilir. Kesilen her bir profil, kaynak dikişinin bütünlüğünü kontrol etmek amacıyla ultrasonik veya eddy akımı testleri gibi yöntemlerle incelenir. Son ölçüm kontrolleri yapılır ve profiller sevkiyata hazır hale getirilir. Bu süreç, yüksek hız, mükemmel ölçü hassasiyeti ve maliyet etkinliği ile büyük miktarlarda boru ve profil üretimine olanak tanır (Yücel Boru, 2025).

Geleneksel olarak, düşük basınçlı endüstriyel prosesler için dikişli boru sistemleri kullanılmaktadır. Ancak, sürekli gelişen teknoloji ve beraberindeki yüksek çalışma basınçları, dikişli boruların kaynak noktalarında meydana gelen çatlama ve kırılmalar nedeniyle yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu yapısal zafiyet, can ve mal güvenliğini tehdit etmenin yanı sıra operasyonel kayıpları da beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, teknolojik ilerlemeler, bu riskleri ortadan kaldıran daha kalın cidarlı, geniş çaplı, uzun ve tamamen dikişsiz profil üretimini olanaklı kılmıştır (Ünlü, 2022:20).

2.4. Dikişli ve Dikişsiz Boru İmalat Prosedürlerinin Karşılaştırmalı İncelemesi

Boru seçiminde prosedürel farklılıklar, nihai ürünün operasyonel güvenliği (dikişsiz) ve ekonomik verimliliği (dikişli) dengesini belirleyen temel kriterdir. Boru üretim teknolojileri, esasen dikişli (kaynaklı) ve dikişsiz (eksiz) olmak üzere iki temel prosedüre ayrılır. Bu iki yöntem arasındaki farklar, sadece üretim maliyetlerini değil, aynı zamanda boruların nihai yapısal bütünlüğünü, basınç dayanımını ve dolayısıyla endüstriyel uygulama alanlarını da doğrudan belirler (Nayyar, 2000; Anık, 2019).

Dikişli profillerin (kaynaklı borular) endüstrideki yeri, modern elik imalat teknolojilerinin ilerlemesiyle sürekli olarak gelişmiştir. Geleneksel dikişsiz boruların yüksek basına ve agresif ortamlara dayanıklılık avantajına karşın, dikişli profiller maliyet etkinliği, yüksek üretim hızı ve ölçü çeşitliliği sayesinde birçok mühendislik uygulamasında baskın hale gelmiştir (Groover, 2020).

Boru imalatı alanında dikişli (kaynaklı) ve dikişsiz (eksiz) borular arasındaki temel ayırım, kullanılan üretim tekniklerinden kaynaklanmaktadır ve bu farklar, nihai ürünün mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynar.

Dikişli borular, rulo veya sac halindeki metalin şekillendirilerek kaynak vasıtasıyla birleştirilmesiyle elde edilir. Buna karşın, dikişsiz borular, tek parça halindeki elik kütüklerin sıcak veya soğuk çekme yöntemleriyle deforme edilerek eksiz bir şekilde imal edilmesini gerektirir. Bu prosedür farklılığı, boruların yapısal bütünlüğünü doğrudan etkiler.

Dikişli borularda üretimden kaynaklanan boyuna kaynak hattı, metalurjik açıdan Isıdan Etkilenen Bölge (HAZ) olarak tanımlanan ve ana malzemeye kıyasla farklı mekanik özellikler sergileyen bir alan oluşturur. Bu hat, yapıda potansiyel bir zayıf nokta meydana getirerek, yüksek basınç veya değişken yükler altında hata oluşma (atlak, korozyon başlangıcı vb.) riskini artırır. Bu nedenle, kritik mühendislik tasarımlarında dikişli borular için belirli bir verimlilik katsayısı uygulanarak bu mukavemet kaybı hesaba katılır (Kou, 2003; Nayyar, 2000).

Dikişsiz borular, yapısal bütünlüklerini bozan bir kaynak hattı içermedikleri için metalurjik açıdan homojen bir yapıya ve izotropik mekanik özelliklere sahiptir. Bu yapısal süreklilik, dikişsiz boruların iç basınç ve dış yükler altında gerilme yığılmalarını önleyerek üstün bir mukavemet sergilemesini sağlar. Özellikle yüksek basınçlı akışkan iletimi ve nükleer/petrol gibi kritik endüstriyel sahalarda, dikişsiz boruların sunduğu bu yüksek güvenlik marjı, onları teknik açıdan vazgeçilmez kılmaktadır (Nayyar, 2000; Callister ve Rethwisch, 2020).

Yüzey kalitesi açısından da belirgin farklar mevcuttur. Dikişli boruların iç yüzeyinde kaynak bölgesinden kaynaklanan pürüzlülük veya düzensizlikler oluşabilirken, dikişsiz borular kaynaksız olmaları nedeniyle iç ve dış yüzeylerde daha pürüzsüz ve üniform bir bitiş sağlar.

Performans ve ömür beklentisi kıyaslandığında, dikişsiz borular üstündür. Düşük basınç dayanımına sahip olan dikişli borular, özellikle yüksek basınç gerektiren sistemlerde

dezavantajlıdır. Oysa dikişsiz borular, yüksek basınçlı ve zorlu sistemlerde güvenle kullanılır. Ayrıca, kaynak hatalarına bağlı erken yıpranma riski taşıyan dikişli borulara nazaran, dikişsiz borular yorulma ve korozyona karşı daha dirençli olup, daha uzun bir hizmet ömrü sunar.

Son olarak, maliyet analizi bu iki boru türünü birbirinden ayırır. Dikişli borular, daha seri ve basit üretim süreçleri sayesinde ekonomik bir çözüm sunar. Dikişsiz boruların imalatı ise karmaşık ekipman ve daha fazla enerji gerektirdiğinden daha pahalıdır, ancak yüksek güvenlik ve dayanımın şart olduğu durumlarda bu ek maliyet kaçınılmaz bir gerekliliktir (URL-7).

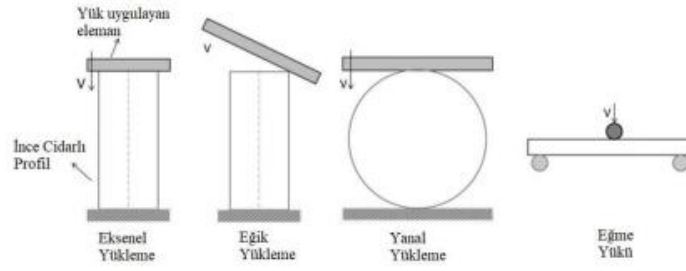
2.5. Eğilme Kavramı

Yapısal mühendislikte ve makine tasarımında eğilme, bir elemanın uzun eksenine dik doğrultuda uygulanan kuvvetler (momentler) neticesinde meydana gelen bükülme olayıdır. Bu fenomen, eleman kesitinde basma ve çekme gerilmelerinin oluşmasına ve geometrik bir deformasyon olan sehimin meydana gelmesine yol açar. Profil yapıları, 'Atalet Momenti' (I) değerini maksimize ederek bu eğilme gerilmelerine ve deformasyonlara karşı direnç göstermek üzere tasarlanmış geometrik formlardır (Beer ve Johnston, 2020; Gültekin, 2023).

İnce cidarlı elemanların eğilme altındaki davranışı, bölgesel ve global deformasyonların ardışık etkileşimiyle karakterize edilir. Yapısal deformasyon, başlangıçta yükleme noktasında bölgesel bir göçme (çökme) ile başlar. Bu yerel deformasyonu takiben, yükleme konumu etrafında meydana gelen kesit alanındaki azalma, elemanın genel rijitliğini düşürerek global eğilmenin baskın hale gelmesine neden olur (Allen ve Bulson, 1980; Rhodes, 1991).

İnce cidarlı yapıların nihai eğilme mukavemeti ve buna bağlı olarak enerji absorpsiyon (sönümleme) kapasitesi; uygulanan yükün geometrik formu, şiddeti ve uygulama noktasına göre dramatik değişimler sergiler. Yükleme koşullarındaki bu varyasyonlar, yapıda oluşan plastik mafsalları sayısını ve yerel burkulma modlarını doğrudan etkileyerek, enerjinin yapı üzerinde ne kadar efektif dağıtılacağını belirler (Jones, 2011; Lu ve Yu, 2003). Bu bağlamda, elemanın enine kesit geometrisi, eğilme yükleri altında enerjiyi ne ölçüde verimli bir şekilde sönümleyebileceğini belirleyen temel tasarım parametresidir. Genel bir yaklaşım olarak, bir profilin tasarım yüklemesi çoğunlukla eksenel, kesme, burulma ve eğilme etkilerini içeren karmaşık bir zorlanma durumuyla tanımlanmaktadır (Baroutaji vd., 2017: 139). İnce cidarlı profillerin maruz kalabileceği eksenel, eğik, yanal ve

eğme yükleme tipleri Şekil 2.9’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

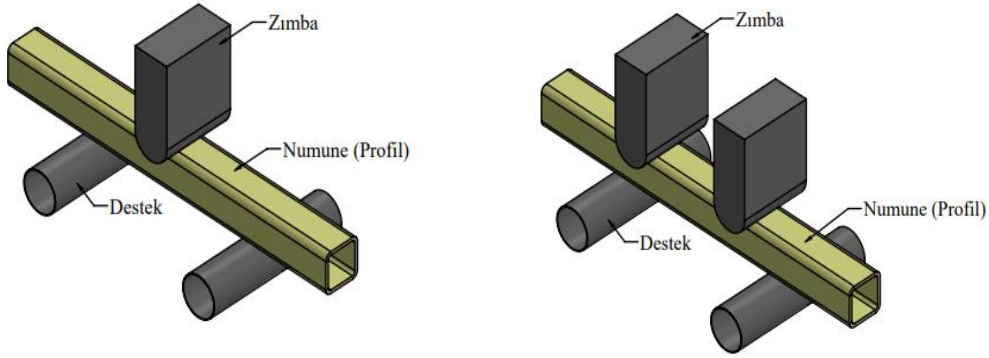


Şekil 2.9. Yükleme tipleri (Baroutaji vd., 2017: 139).

Yapısal profillerin mekanik özelliklerinin ve belirli bir yükleme altında sergileyeceği davranışın önceden belirlenmesi, tasarım açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaca hizmet etmek üzere, ince cidarlı elemanların eğilme deformasyonunu tespit etmek için çeşitli eğme testleri uygulanır. Uygulamada, bu tür eğilme deneyleri yaygın olarak iki ana konfigürasyonda gerçekleştirilir: üç noktalı eğme testi ve dört noktalı eğme testi. Yapılan bu testlerin temel amacı, malzemenin eğilme mukavemeti başta olmak üzere, ilgili mekanik karakteristikleri hakkında kapsamlı veri sağlamaktır. Eğilme zorlamasına maruz kalan bir numunenin enine kesitinde, basınç gerilmeleri nötr eksene göre iç bükey bölgede yoğunlaşırken; çekme gerilmeleri ise dış bükey yüzeye yakın bölgelerde teşekkül etmektedir (Çapık & Kaya,2015).

Üç noktalı eğme testi, malzemelerin kritik mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılan standart bir deneysel yöntemdir. Bu test, özellikle bir malzemenin elastik modülünü (E) belirlemede temel teşkil eder. Elastik modülü, birim uzama başına düşen birim gerilme miktarı olarak tanımlanan ve malzemenin elastik deformasyona karşı direncini gösteren temel bir parametredir. Söz konusu test, genellikle çubuk veya levha formundaki numunelere uygulanır. Numune, birbirine eşit mesafede yerleştirilmiş iki destek noktası üzerine serbestçe oturtulur ve tam ortasından, bu destek noktalarının karşısında yer alan üçüncü bir noktadan (yüklemeye noktası) kontrollü bir kuvvetle eğilmeye zorlanır (Beer ve ark., 2020; ASTM E290). Deney sırasında, uygulanan yük miktarı (F) ile bu yüke karşılık gelen sehim (düşey yer değiştirme, δ) miktarı hassasiyetle kaydedilir. Elde edilen yük-sehim verileri, malzemenin elastik bölgedeki davranışını analiz etmek ve böylece elastik modülünü hesaplamak için kullanılır. Üç noktalı eğme testinin ana hedefi, bir malzemenin dayanıklılığı, kırılma mukavemeti ve genel mekanik karakteristikleri hakkında güvenilir veriler toplamaktır. Bu veriler, malzemelerin yapısal tasarım, üretim süreçleri ve nihai kullanım alanlarına uygunluğunun belirlenmesinde kritik bir rol oynar (Hibbeler, 2018; İnan, 2015).

Üç noktalı eğme düzeneği, yükün tek bir merkezi noktadan uygulanması nedeniyle numune üzerinde yüksek bir gerilme konsantrasyonu oluştururken, dört noktalı eğme düzeneğinde ise yük, numunenin ortasındaki iki ayrı nokta arasında paylaşılır. Bu konfigürasyon, içteki iki yükleme noktası arasında kalan bölgede sabit bir eğilme momenti (M) alanı meydana getirerek, test edilen bölgede daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilmesini sağlar (Hein ve Brancheriau, 2018). Şekil 2.10’da detaylandırılan üç nokta ve dört nokta eğme test yöntemleri, numune üzerindeki gerilme dağılımı ve yükleme noktalarının etkisini görselleştirmektedir.

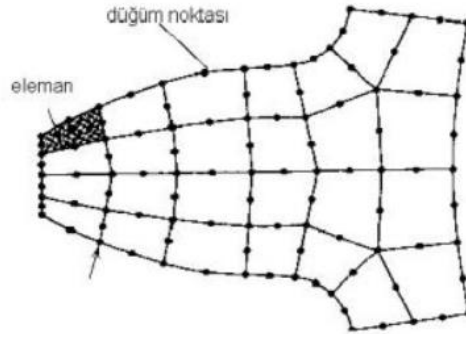


Şekil 2.10. Üç nokta ve dört nokta eğme deney düzeneği.

Mevcut literatür incelemesi, S235 çelik profillerin eğilme yüklemesi altındaki davranışının yeterli düzeyde araştırılmadığını ortaya koymaktadır. Bu eksikliği gidermek ve endüstriyel uygulamalara katkı sağlamak amacıyla bu çalışma, literatürde ve sahada yaygın olarak kullanılan kare kesitli S235 profillerin mekanik yanıtına odaklanmıştır. Bu kapsamda, profillerin üç noktalı ve dört noktalı eğme yüklemeleri altındaki deneysel davranışları incelenmiş ve bu davranışları modellemek için Hill-48 plastisite kriterinden yararlanılarak sonlu elemanlar analizleri (SEA) gerçekleştirilmiştir.

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Mühendislik alanında karşılaşılan zorlu hesaplamalar, genellikle karmaşık fiziksel sistemlerin davranışını doğru bir şekilde tahmin ve optimize etme ihtiyacından doğar. Bu hesaplamalar için geliştirilen yöntemler, temel olarak analitik çözümlerin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan nümerik (sayısal) yaklaşımlara dayanır. Bu nümerik yaklaşımlar arasında, özellikle yapısal analiz, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi gibi alanlarda, karmaşık geometri ve sınır koşullarına sahip problemlerin çözümü için en yaygın ve güçlü araçlardan biri Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yöntemidir. SEA, sürekli bir ortamı (yapıyı) sonlu sayıda küçük ve yönetilebilir alt alanlara, yani sonlu elemanlara bölerek, diferansiyel denklemlerin çözümünü bu düğüm noktalarında yaklaşık olarak bulmayı sağlar. Analizi gerçekleştirilen parçanın geometrik karmaşıklığını ve gerilme yığılmalarını doğru temsil edebilmek adına oluşturulan sonlu elemanlar ağ örgüsü Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Modelde düğüm noktası ve eleman gösterimi (Özdemir, 2009).

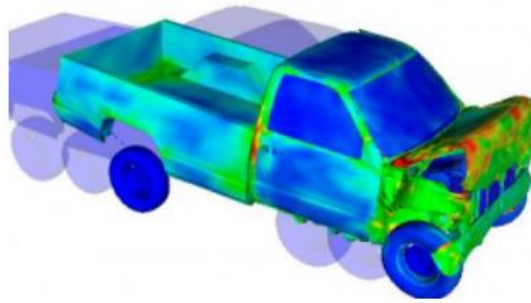
Elemanlar, sürekli geometriyi temsil eden küçük, ayırık bölgelerdir. Görselde, sol üstteki koyu gölgeli dörtgen bölge bir eleman örneğidir. Karmaşık denklemleri bu küçük ve basit elemanlar üzerinde çözerek tüm yapının davranışını hesaplar. Düğüm noktası (nod) ise elemanların köşelerinde ve kenarlarında yer alan noktalardır. Görseldeki küçük siyah noktalar, düğüm noktalarını temsil eder. Bu noktalar, elemanları birbirine bağlar ve analiz sırasında bilinmeyen değerlerin (yer değiştirme, gerilme, sıcaklık vb.) hesaplandığı temel konumlardır.

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yöntemi, ilk uygulamalarına 1950'ler döneminde, özellikle uzay mühendisliği sektöründe, kritik yapısal sorunlara yanıt arayışıyla başlamıştır. Bu metodolojiyi ilk benimseyen öncü kuruluşlar arasında Boeing, Bell Aerospace ve Rolls Royce firmaları öne çıkmaktadır. İlk kez sonlu elemanlar yöntemi, 1956 yılında uçak gövdelerinin analiz edilmesi amacı ile ortaya çıkmıştır. M. J. Turner, vd. (Turner, vd. 1956:1) tarafından yapılan çalışma da yüksek hızlı uçaklarda görülen aeroelastiklik ve dinamik analiz

sorunlarını çözmek adına hesaplamalı metot uygulamaları sunulmuştur (Ünlü, 2022:30).

1970'lere gelindiğinde bilgisayar teknolojisindeki atılımlar sayesinde kuramsal olgunluğa erişen SEA, günümüzde uygulama sahasını köklü bir biçimde genişletmiştir. Başlangıçtaki makine, elektrik, havacılık, inşaat ve hidrodinamik gibi ana mühendislik dallarının yanı sıra, atom mühendisliği gibi uzmanlık gerektiren alanlarda ve hatta ortopedi, kardiyovasküler sistem analizleri ve estetik cerrahi gibi biyomedikal disiplinlerde de vazgeçilmez bir hesaplama aracı haline gelmiştir (Güler ve Şen, 2015: 56).

Analiz programları, temel olarak bir tür bilgisayar yazılımı olup, bir deney veya mühendislik tasarımının beklenen performansını hesaplama işlevini üstlenir. Bu süreç, tasarımcı tarafından oluşturulan ilk tasarımın parametrelerinin yazılıma girdi olarak sunulmasıyla başlar. Örneğin, bir sonlu elemanlar analiz (SEA) programının ürettiği çıktı, tasarımcının mevcut tasarımına ait kritik yönlerini değerlendirmesine olanak tanır. Elde edilen bu analiz sonuçlarına dayanarak, tasarımcı iyileştirme gerektiren alanları belirler ve buna uygun değişiklikler yapma kararı alır. Bunu takiben, tasarımcı tarafından geliştirilen ikinci bir tasarım yine analiz programına girdi olarak sunulur. Bu yinelemeli süreç, yani tasarım-analiz-değerlendirme-yeniden tasarım döngüsü, tatmin edici ve belirlenen kriterlere uygun bir tasarım elde edilene kadar tekrarlanarak devam ettirilir (Brauer, 1988:22). Bu döngü, fiziksel prototipleme aşamasına geçilmeden önce tasarımlarını sanal ortamda kapsamlı bir şekilde yinelemeli olarak test etme imkânı sunar. Böylece, maliyetler önemli ölçüde minimize edilirken, sistemin güvenlik ve performans düzeyi maksimum seviyeye çıkarılmış olur. Sonlu elemanlar analizi yapılan örnek bir araç Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Çarpışma analiz sonucu (URL-6).

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yöntemi, temelindeki diferansiyel denklem çözümü mantığı nedeniyle teorik olarak elle çözülebilir bir yapıya sahiptir. Ancak, günümüz mühendislik problemlerinin sahip olduğu yüksek karmaşıklık, bu tür analitik çözümlerin pratikte çok zaman alması ve verimsiz olması sonucunu doğurur. Bu nedenle, SEA

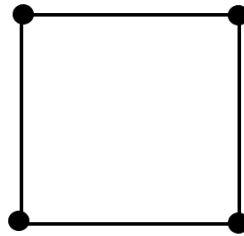
uygulamaları bilgisayar destekli yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Öncelikle probleme başlarken bir geometriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu geometri tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu olarak sonlu elemanlar analizi için tasarlanmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde eleman seçimi genellikle probleme uygulanan gerçek yükleme koşullarına ve istenilen hassasiyet seviyesine göre belirlenmektedir. Elemanın boyutunun (tek, iki veya üç boyutlu) belirlenmesi gereklidir (Logan, 2011: 9).

Tek Boyutlu Elemanlar (1D Elemanlar), genellikle çubuk (truss) ve kiriş (beam) elemanlar olmak üzere iki ana tipte incelenir. Bu eleman tipleri, analiz yazılımlarında bir çizgi (lineer eleman) ile temsil edilmelerine rağmen, hesaplamalara dâhil edilen belirli bir enine kesit alanına sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde 1D elemanlar, özellikle kafes yapılarının ve çerçeve tipi sistemlerin mekanik analiz ve modellenmesinde etkin biçimde kullanılırlar (Karahana, 2021:17). Şekil 3.3.'te tek boyutlu elemanlara ait detay verilmiştir.



Şekil 3.3. Tek boyutlu elemanlar.

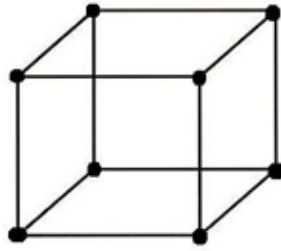
Şekil 3.4.'te verilen iki boyutlu (2D) (düzlem) problemlerinin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır (Çetin, 2007:56).



Şekil 3.4. İki boyutlu elemanlar.

Şekil 3.5.'te verilen üç boyutlu elemanlar grubunda ise temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyle

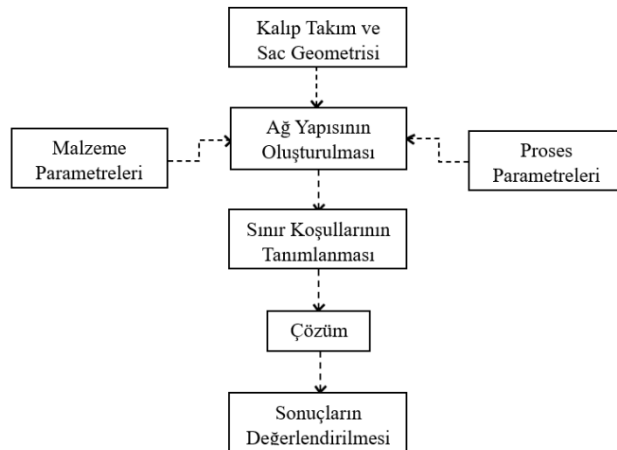
elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir (Çetin, 2007:57).



Şekil 3.5. Üç boyutlu elemanlar.

Son olarak eksenel simetriye sahip problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar, tek veya iki boyutlu elemanların simetri eksenine etrafında tam bir tur dönmesiyle oluşur. Dönel elemanlar her ne kadar sonlu elemanlar analizlerinde kullanılsa da günümüzde iki boyutlu ve üç boyutlu elemanlar daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Analizlerde kullanılan eleman tipinin yanı sıra eleman boyutu da elde edilecek sonuçların doğruluğu açısından büyük önem taşır.

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) sürecinde, seçilen eleman tipinin yanı sıra eleman boyutu (ağ yoğunluğu) da modelin doğruluğu açısından hayati öneme sahiptir. Temsili bir geometri oluşturulurken, daha küçük eleman boyutlarının seçilmesi, çözüm hassasiyetini doğrudan artırarak ince bir ağ yapısı (fine mesh) elde edilmesini sağlar. Ancak, eleman boyutlarının küçültülmesi, sistemdeki toplam düğüm noktası sayısını ve dolayısıyla hesaplama yükünü artırarak çözüm süresini belirgin şekilde uzatır. Bu nedenle, SEA modellemesinde en kritik aşamalardan biri hem makul bir çözüm süresi hem de yeterli bir doğruluk elde etmek amacıyla uygun değer eleman boyutunu belirleyen ağ yakınsama çalışmasının gerçekleştirilmesidir



Şekil 3.6. Sonlu elemanlar akış diyagramı Akış diyagramı (Köleoğlu,2019).

Sonlu elemanlar analizinde en temel parametreler sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısının oluşturulması, malzeme davranışının tanımlanması ve modellenmesi ve temas ara yüzünün belirlenmesidir. Gerçeğe en yakın sonucu alabilmek için sonlu elemanlar analizlerinde bu parametrelere ek olarak eleman tipinin ve boyutunun belirlenmesi ve malzeme modelinin tespiti sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir (Esener, 2015). Genellikle en etken parametrenin malzemenin plastisite modelleri olduğu görülmektedir. Farklı kabullere sahip birçok malzeme modeli bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı denenecek süreç koşulları ve kullanılacak malzeme dikkate alınarak gerçeğe en yakın sonucu verecek malzeme modeli tercih edilmesi gerekmektedir. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), bir dizi ardışık adımla uygulanan sayısal bir yöntemdir, akış diyagramı şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) fizibilite çalışmalarına başlamadan önce, simülasyonu yapılacak yapıya ait bir malzeme dosyası tanımlanması zorunludur. Bu dosya, malzemenin davranışını modelleyen fiziksel ve mekanik parametreleri içerir ve doğru sayısal sonuçlar için kritik öneme sahiptir.

SEA yazılımları, malzeme türüne göre farklı formatlar kullansa da kartlar genellikle çekme/akma dayanımı, elastik modül ve Poisson oranı gibi temel verileri barındırır.

Malzeme kartları aynı zamanda, malzemenin plastik davranışını modellemek için kullanılan plastisite modellerinin ara yüzü işlevini görür. Bu modellerin içeriği, malzemenin izotropik/anizotropik veya pekleşme davranışının izotropik/kinematik oluşu gibi kabullere göre değişir. Kartlara girdi olarak sunulan mekanik özellikler temel olarak tek eksenli çekme deneylerinden elde edilir; Hill48 modeli günümüzde sıkça tercih edilen plastisite modellerinden biridir.

3.1.Hill-48 Plastisite Modeli

Hill-48 Plastisite Modeli (veya yaygın adıyla Hill-48 Akma Kriteri), anizotropik malzemelerin (yani, farklı yönlerde farklı mekanik özellikler sergileyen malzemelerin) plastik deformasyon başlangıcını tahmin etmek için geliştirilmiş matematiksel bir modeldir. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ve özellikle sac metal şekillendirmede malzemelerin plastik davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir kriterdir.

1948 Hill anizotropik bir akma kriteri sunmuştur (Hill, 1948). Hill48 kriteri (Hill, 1948), Denklem 1’de ki gibi ifade edilen genel akma fonksiyonu ile tanımlanmaktadır.

$$F(\sigma_{ij}) = f(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}) \quad (D.1)$$

- $F(\sigma_{ij})$ veya $f(\sigma_{ij})$: Akma fonksiyonunu temsil eder.
- σ_{ij} : Gerilme tensörünü ifade eder.
- $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$: Normal gerilme bileşenleridir (eksenel gerilmeler).
- $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$: Kayma gerilme bileşenleridir.

Bu fonksiyonun amacı, malzemeye uygulanan gerilme bileşenlerinin (f) belirli bir kritik değere ulaştığında (plastik akmanın başlangıcı) akma kriterini sağlamaktır.

Bu fonksiyon, malzemenin gerilme bileşenlerine bağlı olarak değişen bir akma yüzeyi tanımlar. Anizotropik malzemelerde, bu fonksiyonun geometrisi doğrudan malzemenin kristal yapısı ve yönelmiş mikroyapısı ile ilişkilidir. Hill48 akma fonksiyonu Denklem 2.'de verilmiştir (Hill, 1948). Bu denklem, Hill-48 Akma Kriterinin (Plastisite Modeli) genel, üç boyutlu formudur (Kılıç, 2024:16-21).

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (D.2.)$$

Denklemden (σ) gerilme tensörünün bileşenlerini, F, G, H, anizotropik model katsayılarını ve L, M ve N ise kayma gerilmesi katsayılarını ifade etmektedir (Kılıç, 2024:16-21). Düzlem gerilme durumu altında da gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Denklem 3.'de ki ifade yazılabilmektedir (Hill, 1948).

$$\sigma_{eq}^2 = (G + H)\sigma_{11}^2 + (F + H)\sigma_{22}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + 2N\sigma_{12}^2 \quad (D.3)$$

σ_{eq} , eşdeğer gerilme değerini temsil eder. Bu değer malzemenin akma gerilmesine eşit veya ondan büyük olması, malzemede plastik deformasyonun (akmanın) başladığını gösterir.

3.1.1. Plastisite Model Parametrelerinin Tespiti

Hill-48 akma kriteri parametreleri, malzemenin anizotropik davranışını yansıtmak amacıyla, deneysel mekanik testlerden türetilen veriler üzerinden belirlenir. 3 numaralı denklemde yer alan G, H, F ve N katsayıları hem anizotropi hem de akma gerilmelerine bağlı olarak çözülebilmektedir. Denklem 4'te ki eşitliklerde deneysel olarak belirlenen anizotropi değerleri (r_0 , r_{45} ve r_{90}) kullanılarak katsayılar elde edilebilmektedir (Hill, 1948). Modelin basitliği, özellikle metal anizotropisinin tanımlanması süreçlerinde önemli bir avantaj sunarak, kriterin günümüzdeki yaygın kullanımını sürdürmesini sağlamaktadır.

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)} \quad (D.4)$$

$$G = \frac{1}{(1+r_0)} \quad (D.5)$$

$$H = \frac{r_0}{(1+r_0)} \quad (D.6)$$

$$N = \frac{r_0 + r_{90} + (1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (D.7)$$

Bu katsayılar için gerilme bazlı çözümler için D.5.' de ki denklemler kullanılmaktadır (Yu ve ark., 2021; Wang ve ark., 2013).

$$F = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \quad (D.8)$$

$$G = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \quad (D.9)$$

$$H = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \quad (D.10)$$

$$N = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2\sigma_0}{\sigma_{45}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \quad (D.11)$$

Yukarıda görüldüğü gibi bu akma kriterinin model tahminin yapılabilmesi için hadde yönüne göre üç yöndeki (0°, 45°, 90°) deneylerin yapılması yeterlidir. Bu kriterin en büyük avantajlarından birisi de budur (Khalfallah ve ark., 2015).

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

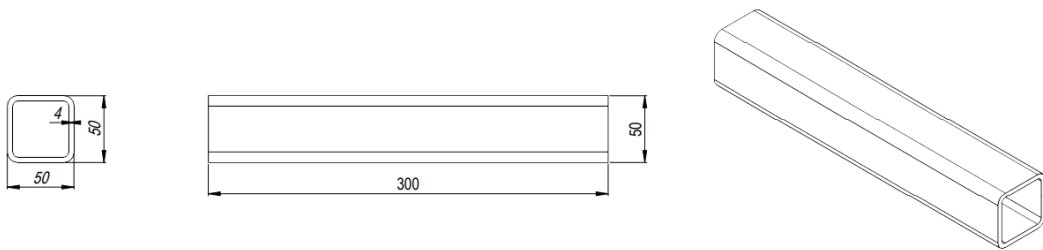
Bu bölümde, kare kesitli S235 çelik profillerin üç ve dört nokta eğme testlerindeki karakteristik özellikleri, değişen zımba geometrileri üzerinden incelenmektedir. Tüm süreçlerin Hill-48 malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) simüle edildiği bu çalışmada; malzeme modelinin tahmin kabiliyeti ve elde edilen sayısal analiz sonuçlarının tutarlılığı analiz edilmiştir.

4.1. Eğme Testi Metodu

S235 çelik profillerin eğilme yükleri altındaki elastik ve plastik davranışlarını, geri esneme karakteristiklerini ve nihai taşıma kapasitelerini belirlemek amacıyla uygulanan deneysel prosedürler detaylandırılmıştır. S235 numunelerin eğilme karakteristiklerini kapsamlı bir şekilde incelemek adına, öncelikle üç ve dört nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test süreçlerinden elde edilen kuvvet-deplasman verileri, malzemenin mukavemet performansını ve eğilme direncini analiz etmek için temel veri kaynağını oluşturmuştur.

4.2. Test Numunelerinin Hazırlanma Süreci

Deney numunesi olarak tercih edilen kare kesitli profillerin her biri 300 mm uzunluğundadır. Numune geometrisini ve tasarım ölçülerini içeren teknik çizimler Şekil 4.1’de paylaşılmış olup, aksi belirtilmedikçe tüm değerler mm cinsindendir. Şekilde 4.2’de ise numuneye ait görünümeler paylaşılmıştır.



Şekil 4.1. Numuneye ait ölçüler.



Şekil 4.2. Numune görüntüleri.

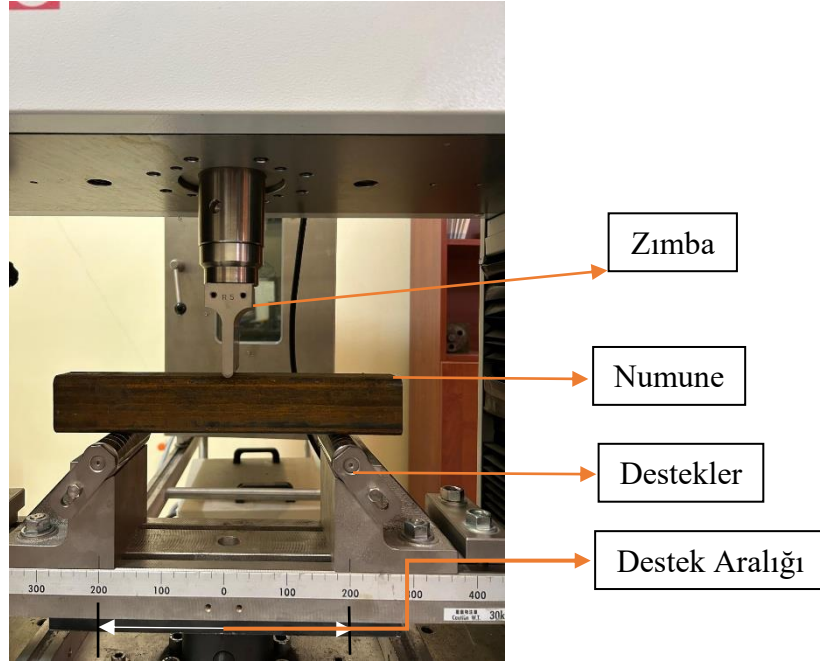
Numuneler, fabrika ortamında mekanik şerit testere kullanılarak hassas bir şekilde bizzat kestirilmiştir. Kesim işlemi sırasında aşırı ısınmayı önlemek için soğutma sıvısı kullanılmış, böylece malzemenin mikro yapısında oluşabilecek olası termal değişimlerin önüne geçilmiştir. Şekil 4.3.'te ise numune hazırlığında kullanılan testere verilmiştir.



Şekil 4.3. Numune hazırlığında kullanılan testere.

4.3. Test D zeneg  ve Yükleme Parametreleri

S235 numunelerin mekanik davranışlarını ve eğilme direncini belirlemek için gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi, şekil 4.4'te detaylandırılmıştır. Bu düzenekte numune, iki alt destek noktası üzerinde simetrik olarak konumlandırılmakta ve bir basma ucu vasıtasıyla orta noktadan tekil yüke maruz bırakılarak malzemenin deformasyon süreçleri analiz edilmektedir.



şekil 4.4. Deneylerde kullanılan Shimadzu marka  niversal test cihazı.

Malzemenin statik davranışını karakterize etmek ve geri esneme verilerini en az dinamik etkiyle elde etmek için yükleme hızı 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Shimadzu test cihazının kontrol  nitesi aracılığıyla numunelere 40 mm strok (basma derinliği) uygulanmıştır. Bu derinlik, kutu profilin hem elastik hem de ileri derecede plastik deformasyon bölgelerinin analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Deney boyunca uygulanan kuvvet (N) ve yer değiştirme (mm) verileri, Shimadzu'nun orijinal yazılımı üzerinden eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

4.4. Zimba Geometrisi ve Parametrik  eşitlilik

Deneylerin en önemli parametrelerinden biri olarak, farklı temas yüzeylerinin ve gerilme y ğılmalarının geri esneme üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç farklı zimba (punch) geometrisi kullanılmıştır. Bu kapsamda; R5, R10 ve R15 mm radüslere sahip zimbalar ile testler tekrarlanmıştır. Zimba yarıçapı küçüldükçe (R5), profilin üst flanşı ile

zımba arasındaki temas alanı daralmaktadır. Bu durum, yükleme noktasında daha yüksek bir yerel basınç yığılmasına ve dolayısıyla profilin üst cidarında daha erken başlayan bir yerel plastikleşmeye yol açar. (R15) gibi daha büyük yarıçaplarda ise yük daha geniş bir alana yayılarak yerel ezilme etkisini azaltmakta ve profilin genel eğilme davranışını ön plana çıkarmaktadır. Deneylerde kullanılan zımba geometrileri Şekil 4.5 ve 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan farklı radüslere sahip (R5, R10, R15) zımba geometrileri.



Şekil 4.6. Deneylerde kullanılan farklı radüslere sahip (R5, R10, R15) zımba geometrileri.

4.5. Deney Koşullarına Dair Teknik Kısıtlamalar

S235 kalite 50x50x4 mm kutu profiller üzerinde planlanan Dört Nokta Eğme Testleri (4-PBT) sırasında, malzemenin yüksek rijitliği ve kesit atalet momenti nedeniyle Shimadzu test cihazının maksimum yük kapasitesine ulaşılmıştır.

4-PBT düzeneğinde yükün iki ayrı noktadan paylaştırılarak uygulanması, numunenin orta açıklığında saf eğilme bölgesi oluştursa da cihazın uygulayabildiği maksimum kuvvetin numuneyi hedeflenen 40 mm strok derinliğine kadar plastik deformasyona uğratmaya yetmediği gözlemlenmiştir. Bu durum;

- S235 çelik profilin 4 mm et kalınlığı ile sunduğu yüksek eğilme direncinin,
- Ve 4-PBT konfigürasyonundaki moment kolu mesafelerinin,

mevcut cihaz kapasitesinin üzerinde bir reaksiyon kuvveti doğurmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, çalışmanın parametrik analizleri ve geri esneme (springback) değerlendirmeleri, plastik deformasyon sınırlarının tam olarak ölçülebildiği Üç Nokta Eğme Testi (3-PBT) verileri ve nümerik simülasyon sonuçları üzerinden yürütülmüştür.

4.6. Deneysel Çalışmalar

Deney prosesi sabit boy, sabit stroke, sabit destek aralığı ve sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Süreç boyunca değişken zımba yarıçaplarıdır. Zımba yarıçaplar aksi belirtilmedikçe R5, R10,R15 olarak isimlendirilmiş olup sabit destek aralığı da S200 mm olarak tanımlanmıştır. Her zımba yarıçapında deney 2 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Üç nokta eğme deneyi sonrasında her bir numune için farklı zımba yarıçaplarında deforme olmuş profillerin fotoğrafları Şekil 4.7- 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Kare kesitli profilin R5 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – üst görünüm.



Şekil 4.8. Kare kesitli profilin R5 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – yan görünüm.



Şekil 4.9. Kare kesitli profilin R10 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – üst görünüm.



Şekil 4.10. Kare kesitli profilin R10 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – yan görünüm.



Şekil 4.11. Kare kesitli profilin R15 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – üst görünüm.



Şekil 4.12. Kare kesitli profilin R15 zımba yarıçapında deforme olmuş hali – yan görünüm.

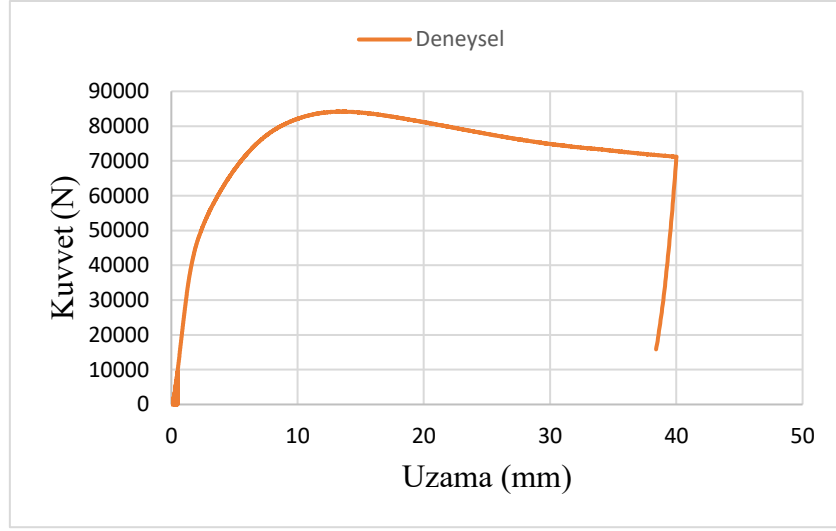


Şekil 4.13. Kare kesitli profilin 4 nokta eğme deneyinde deforme olamamış hali – üst görünüm.

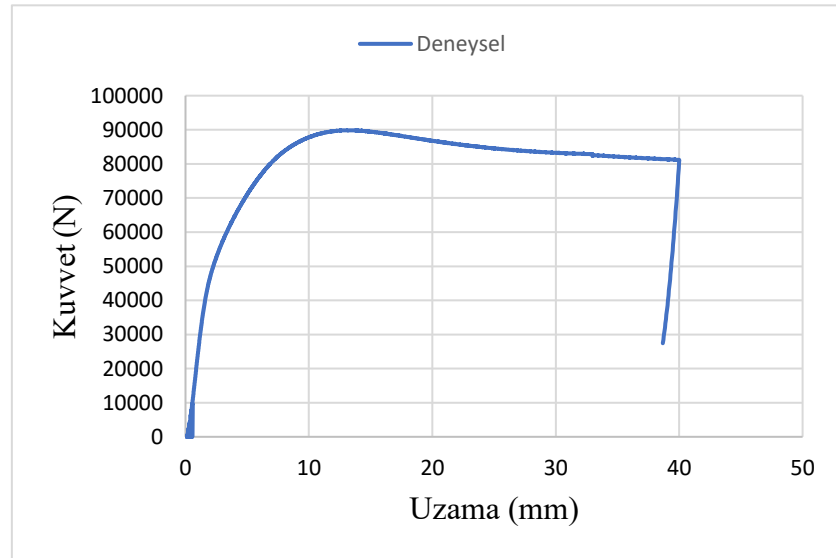


Şekil 4.14. Kare kesitli profilin 4 nokta eğme deneyinde deforme olamamış hali – ön görünüm.

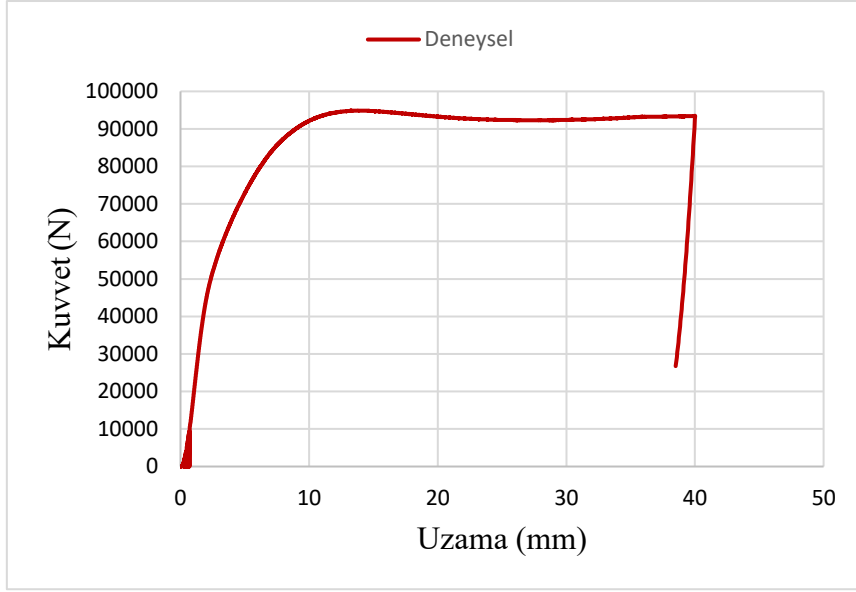
Üç nokta eğme deneyleri süresince, test cihazı üzerinde yer alan yük hücresi (load cell) aracılığıyla kuvvet değerleri, deplasman sensörler vasıtasıyla da uzama miktarları eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu ham veriler işlenerek, malzemenin üç nokta eğme yüklemesi altındaki mekanik davranışını temsil eden kuvvet-deplasman grafikleri türetilmiştir. Farklı parametrelere göre hazırlanan bu grafikler Şekil 4.15 ile Şekil 4.19 arasında sunulmaktadır.



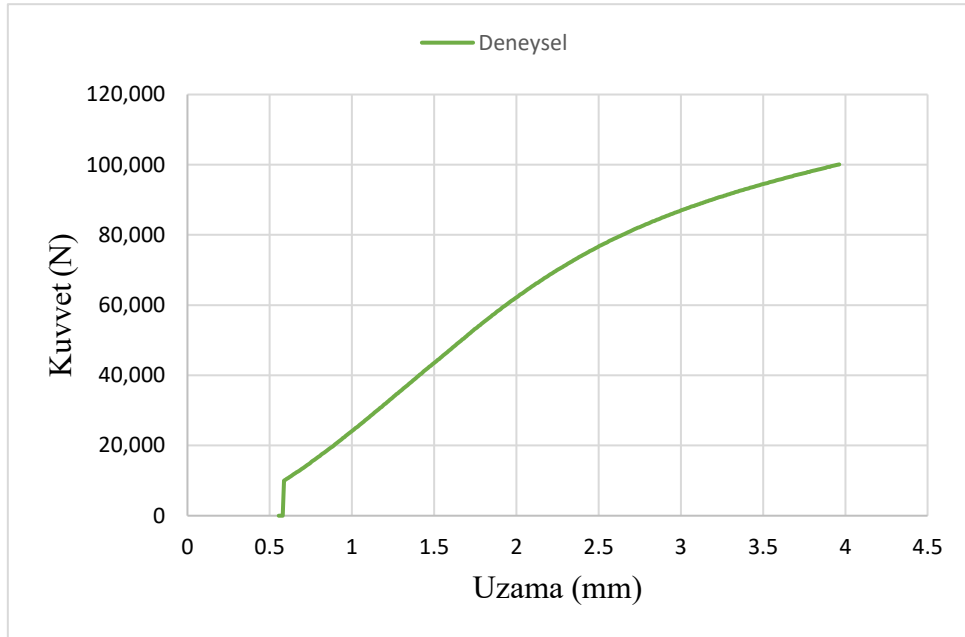
Şekil 4.15. R5 zımba yarıçapı için elde edilen kuvvet-uzama grafiği.



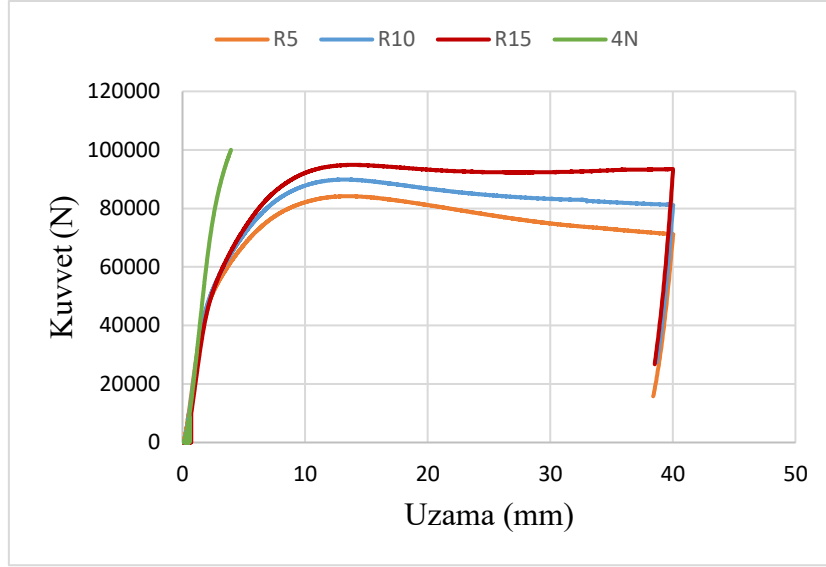
Şekil 4.16. R10 zımba yarıçapı için elde edilen kuvvet-uzama grafiği.



Şekil 4.17. R15 zımba yarıçapı için elde edilen kuvvet-uzama grafiği.



Şekil 4.18. Dört nokta eğme deneyi ile elde edilen kuvvet-uzama grafiği.



Şekil 4.19. 200 mm destek aralığında kare kesit profilin kuvvet-uzama karşılaştırması.

St37 (S235) kare kutu profiller üzerinde gerçekleştirilen üç ve dört nokta eğme testleri, malzemenin yapısal tepkisinin yükleme konfigürasyonu ve zımba geometrisi ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

Dört nokta eğme düzeneği, yükü iki ayrı noktadan dağıtarak numunede daha stabil bir moment dağılımı sağlamış ve üç nokta eğmeye oranla daha yüksek bir başlangıç rijitliği sergilemiştir. Bu durum, profilin deformasyon direncini daha kararlı bir seviyeye taşımıştır.

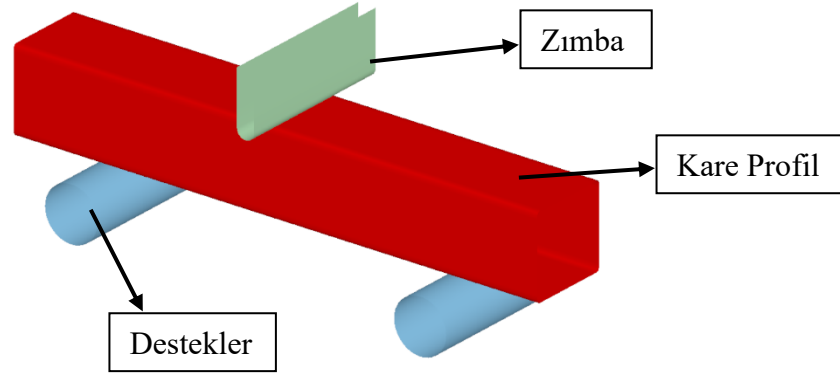
Deney sonuçları, zımba yarıçapı arttıkça (R5 → R10) profilin taşıma kapasitesinin de paralel olarak arttığını kanıtlamaktadır.

S235 profiller, temas geometrisine karşı aşırı duyarlıdır. Geniş temas yüzeyleri (R15), malzemenin mekanik limitlerini verimli kullanarak enerji sönümleme kapasitesini maksimize ederken; dar temaslar (R5), yapısal bütünlüğü bozan erken hasar mekanizmalarına yol açmaktadır. Bu sonuçlar hem imalat süreçlerinde hem de yapısal tasarımlarda temas geometrisinin optimizasyonunun kritik önemini vurgulamaktadır.

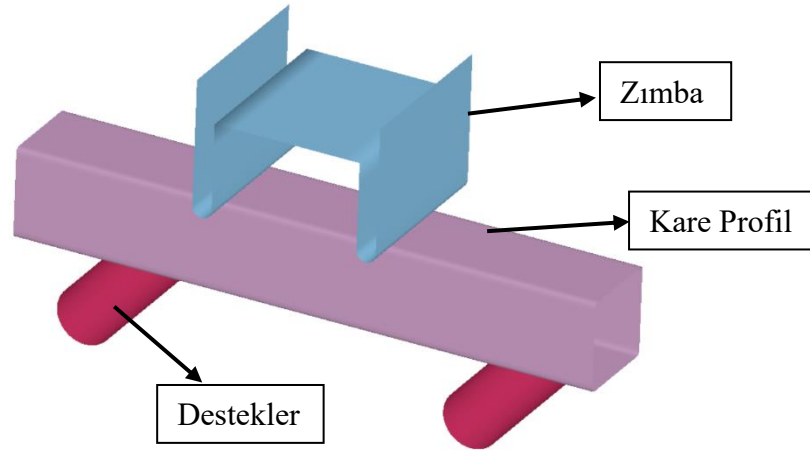
4.7. Sonlu Elemanlar Analizleri

DeneySEL çalışmaları sayısal ortamda doğrulamak amacıyla üç ve dört nokta eğme süreçlerinin sonlu elemanlar modelleri kurgulanmıştır. Bu modellerde profil ile temas eden zımba ve destekler rijit elemanlar olarak tasarlanırken, asıl deformasyonun beklendiği profil üzerinde daha rafine bir ağ örgüsü tercih edilmiştir. Numune geometrisinin ince cidarlı yapısı, problemin düzlem gerilme durumu altında incelenmesine olanak tanıyarak teorik yaklaşımla uyumlu bir analiz zemini oluşturmuştur.

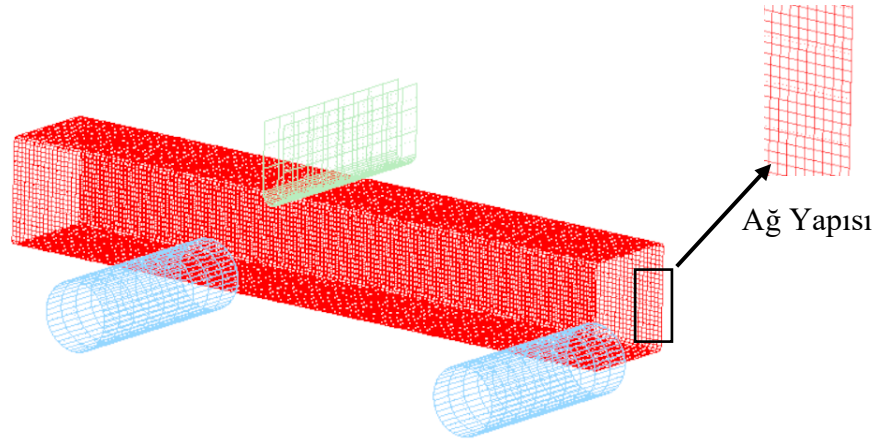
Analizler, Dynaform 5.9.3 paket programı kullanılarak yürütülmüştür. Kalıp elemanlarının rijit, profil numunelerinin ise deforme olabilir kabuk eleman yapısında modellendiği bu çalışmada; genel test düzeneği Şekil 4.20 ve 4.21’de gösterilmiştir. Kare formundaki kesit geometrinin sonlu eleman modelleri ise Şekil 4.22’de verilmektedir.



Şekil 4.20 Üç nokta eğme deneyi sonlu elemanlar modeli.



Şekil 4.21 Dört nokta eğme deneyi sonlu elemanlar modeli.



Şekil 4.22. Kare kesit profilin sonlu elemanlar modeli.

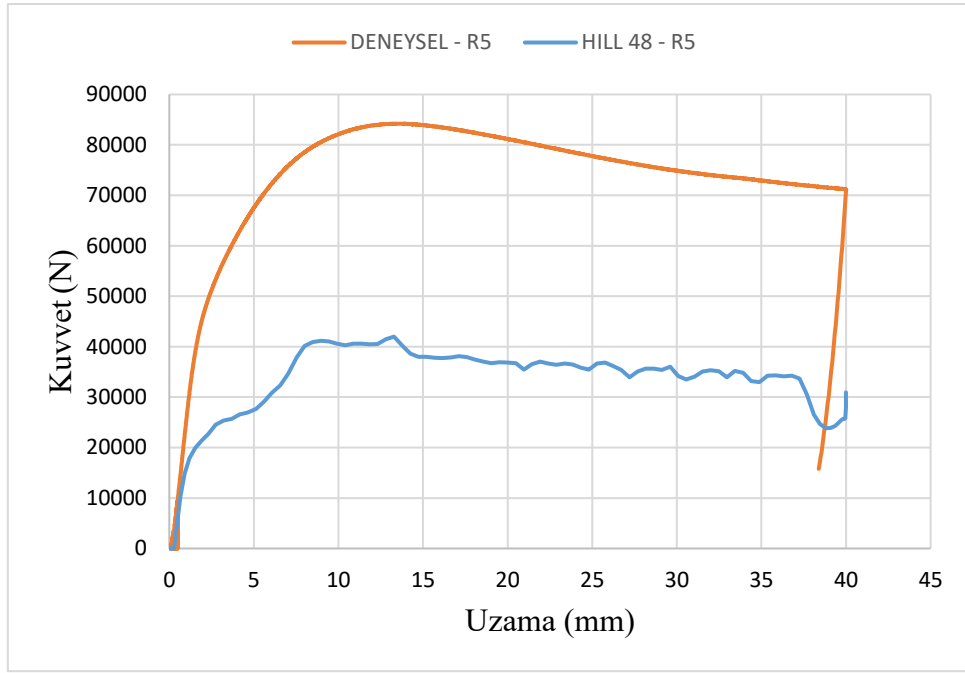
Bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizleri Hill-48 plastisite modeliyle yürütülmüştür. Analizde temel alınan S235 çelik profillerin mekanik özellikleri Tablo 4.1.'de yer almaktadır.

Tablo 4.1. S235 çeliğinin mekanik özellikleri (Esener, E. (2020)).

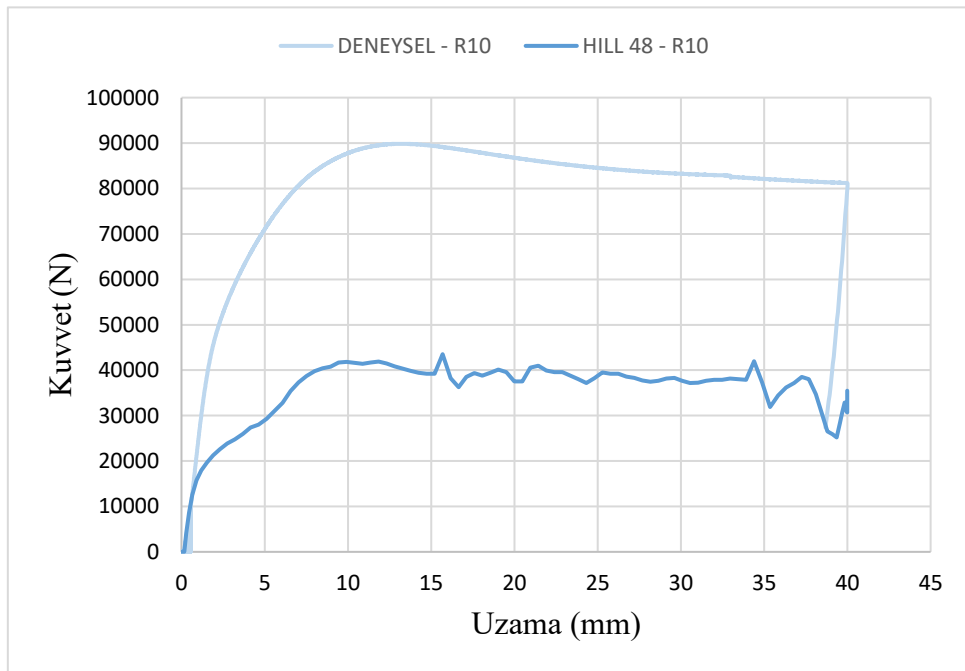
Mekanik Özellik	Değer
Akma Gerilmesi	240 MPa
Pekleşme Modülü	517 MPa
Elastisite Modülü	200 GPa
Pekleşme Üssü	0.23
r_{ort}	0.83

Sonlu elemanlar analizlerinden de kuvvet yer değiştirme grafikleri elde edilmiş ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Kare kesitli profile ait kıyaslanan veriler Şekil 4.23.- 4.26. arasında gösterilmiştir.

Şekil 4.23.'te sunulan kuvvet- uzama grafiği incelendiğinde; 200 mm mesnet açıklığında ve R5 zımba yarıçapı altında test edilen kare kesitli profilin karakteristik mekanik cevabı görülmektedir. HILL48 anizotropik malzeme modeli ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre, numunenin yaklaşık 10 mm sehim miktarına kadar lineer elastik davranış sergilediği, bu eşikten sonra ise plastik deformasyon evresine geçiş yaparak 40-42 kN bandında stabilize olan bir yük taşıma kapasitesi sunduğu tespit edilmiştir. Bu süreçte gözlemlenen kararlı plastik plato, malzemenin enerji sönümleme performansının sürekliliğini doğrulamaktadır.

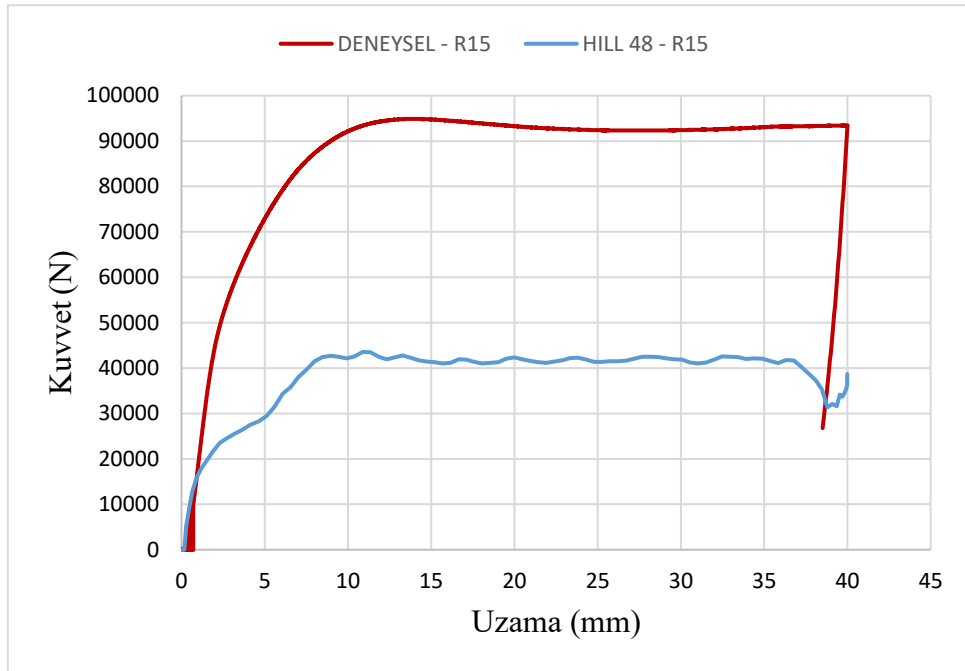


Şekil 4.23. 200 mm destek aralığında zımba çapı R5 kare kesitli profilin 3 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-uzama grafiği.



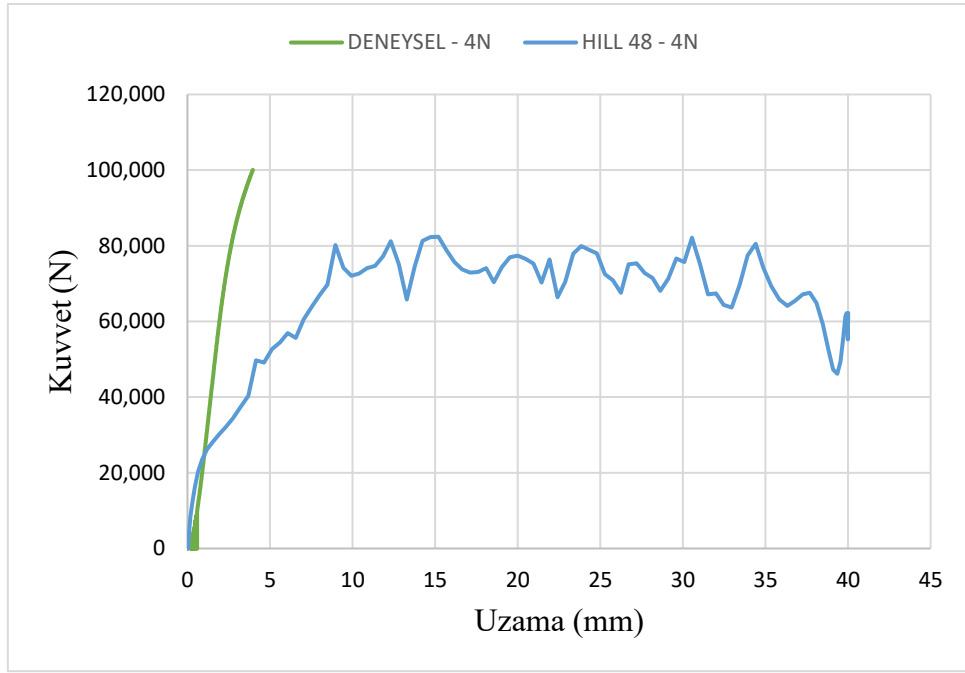
Şekil 4.24. 200 mm destek aralığında zımba çapı R10 kare kesitli profilin 3 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 4.24. 200 mm mesnet açıklığı ve R10 zımba yarıçapı altında teste tabi tutulan kare kesitli profilin HILL48 malzeme modeliyle simüle edilen kuvvet-uzama karakteristiğini göstermektedir. Grafik detaylıca incelendiğinde; numunenin lineer elastik bölgeyi takiben yaklaşık 10 mm sehim değerinde akma sınırına ulaştığı ve plastik bölge boyunca 40-42 kN bandında kararlı bir yük taşıma kapasitesi sergilediği görülmektedir. R5 zımba geometrisiyle kıyaslandığında, zımba yarıçapındaki artışın temas alanını genişleterek yerel gerilme yığılmalarını stabilize ettiği ve plastik plato bölgesinde daha kontrollü bir enerji sönmleme rejimi sağladığı gözlemlenmiştir.



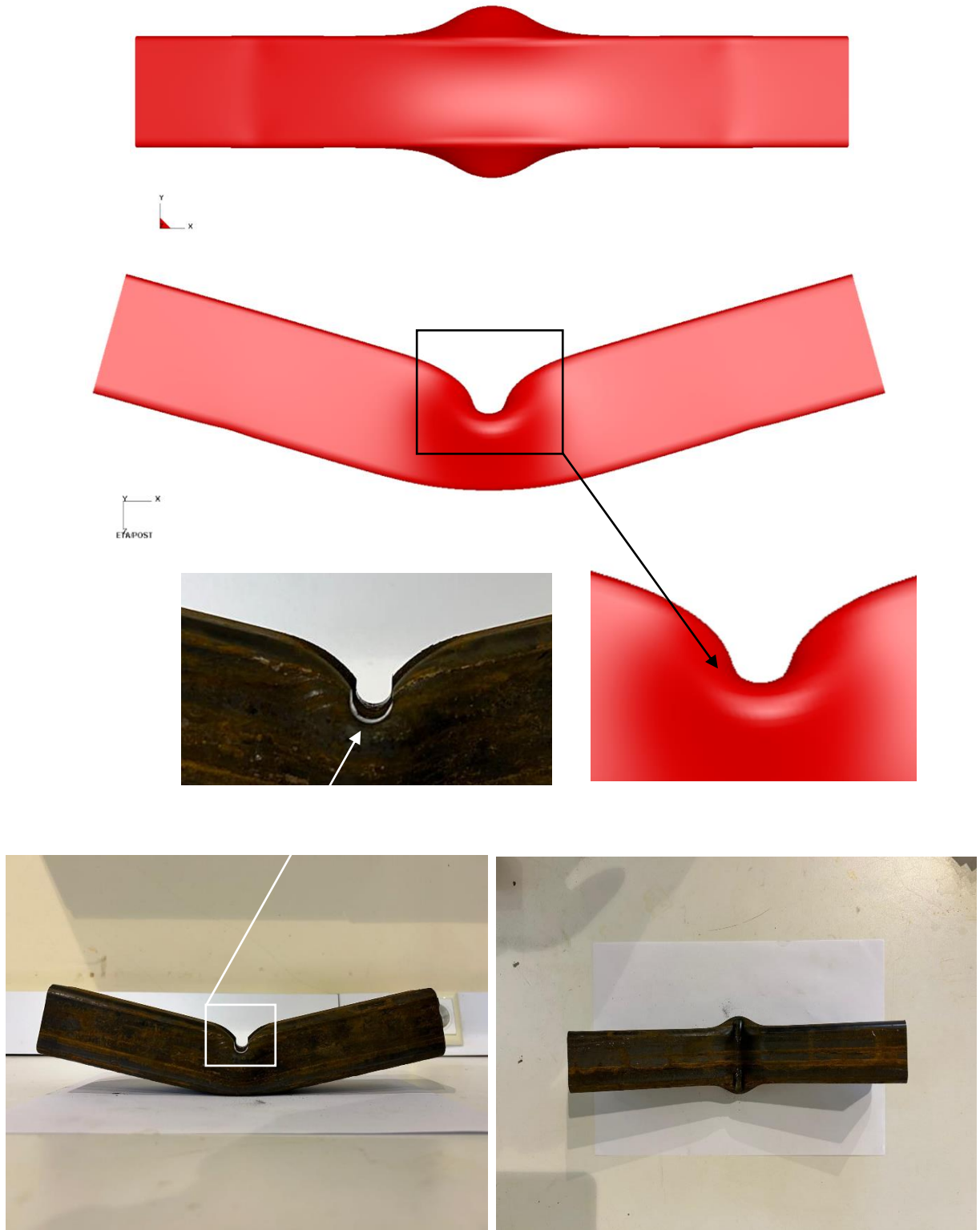
Şekil 4.25. 200 mm destek aralığında zımba çapı R15 kare kesitli profilin 3 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 4.25. 200 mm mesnet açıklığı ve R15 zımba yarıçapı kullanılarak kare kesitli profil üzerinde gerçekleştirilen 3 nokta eğme testinin HILL48 malzeme modeli tabanlı simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Kuvvet-uzama eğrisi incelendiğinde, numunenin yaklaşık 10 mm sehim miktarına kadar lineer elastik bir direnç sergilediği, ardından plastik deformasyon evresine geçerek 40-44 kN aralığında doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir. R5 ve R10 zımba geometrileriyle kıyaslandığında, R15 zımbasının sağladığı geniş temas yüzeyi sayesinde, plastik plato bölgesindeki kuvvet dalgalanmalarının daha sönümlü bir karakter sergilediği ve enerji emilim sürecinin daha kararlı bir rejimde ilerlediği tespit edilmiştir.

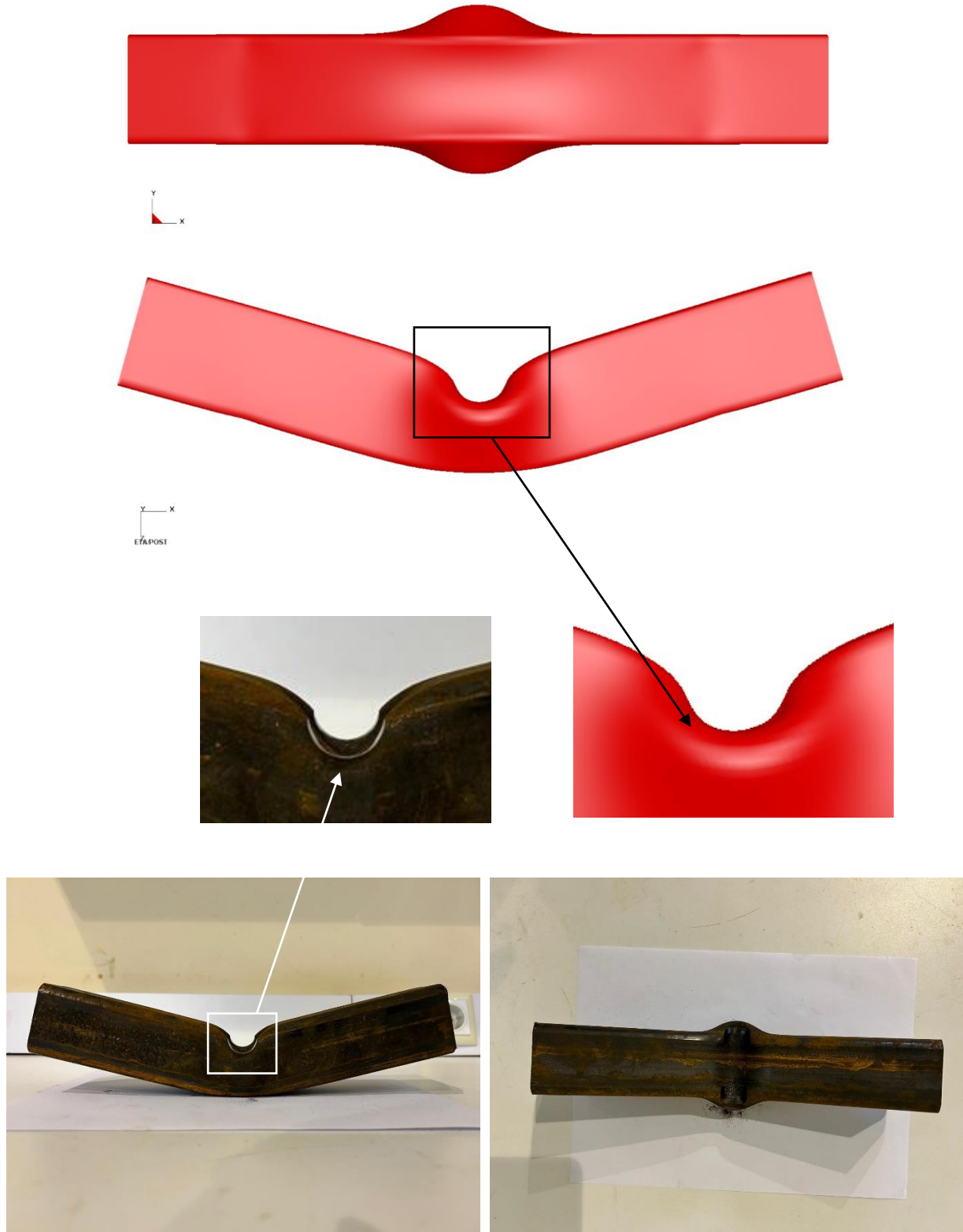


Şekil 4.26. 200 mm destek aralığında kare kesitli profilin 4 nokta eğme testinde HILL48 malzeme modeli kullanılarak elde edilen kuvvet-uzama grafiği.

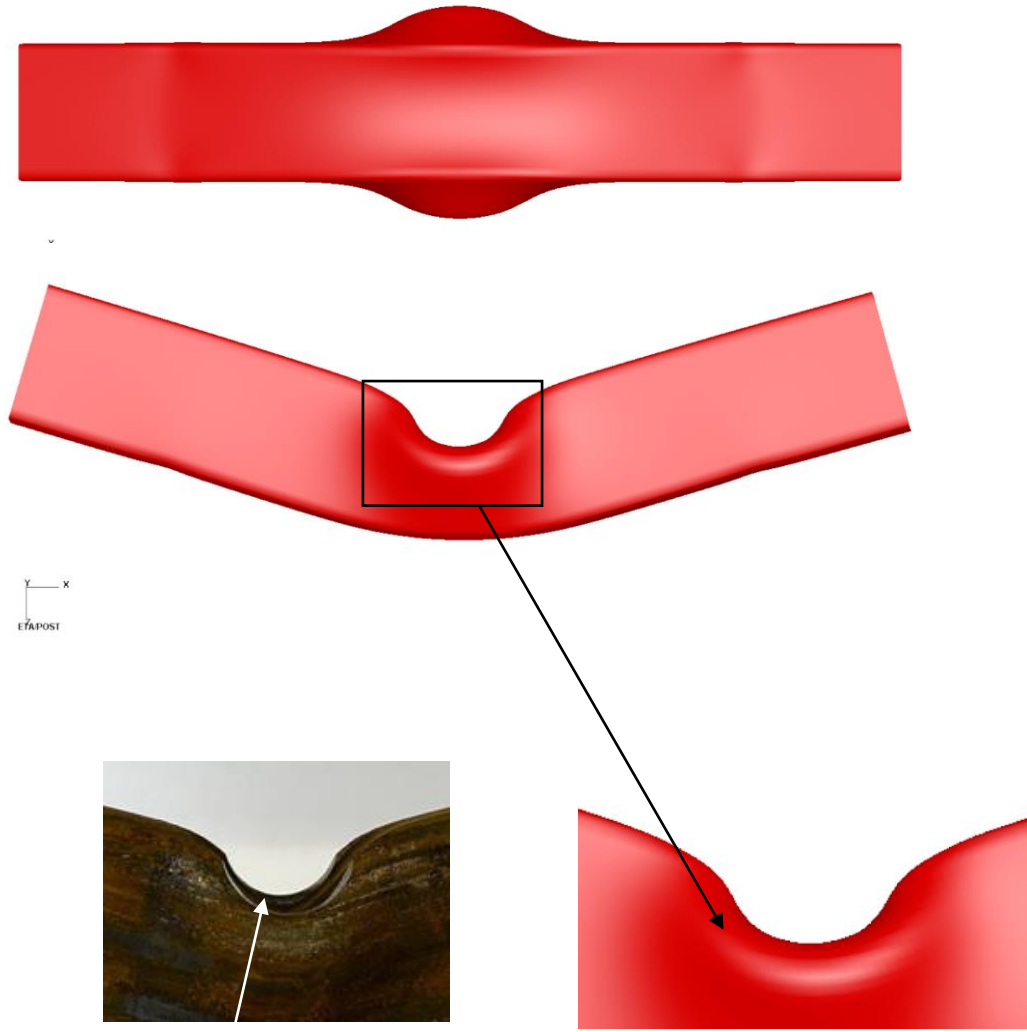
Şekil 4.26. 200 mm mesnet açıklığı ve R15 zımba yarıçapı altında, kare kesitli profilin 4 nokta eğme konfigürasyonundaki HILL48 malzeme modeli tabanlı mekanik cevabını sunmaktadır. 4 nokta eğme testinin doğası gereği, iki zımba arasında oluşan sabit moment bölgesi, profilin deformasyon karakteristiğini doğrudan etkilemiştir. Grafik incelendiğinde; numunenin yaklaşık 10 mm sehim değerine kadar elastik davranış sergilediği, ardından akma sınırını aşarak 75-82 kN aralığında yüksek bir yük taşıma kapasitesine ulaştığı gözlemlenmiştir. 3 nokta eğme sonuçları ile kıyaslandığında, 4 nokta eğme konfigürasyonunda kuvvet değerlerinin yaklaşık iki katına çıkması ve plastik plato bölgesinde daha belirgin salınımlar görülmesi; yükün iki ayrı noktadan iletilmesiyle oluşan kompleks gerilme dağılımının ve eş zamanlı yerel burkulmaların bir sonucudur.



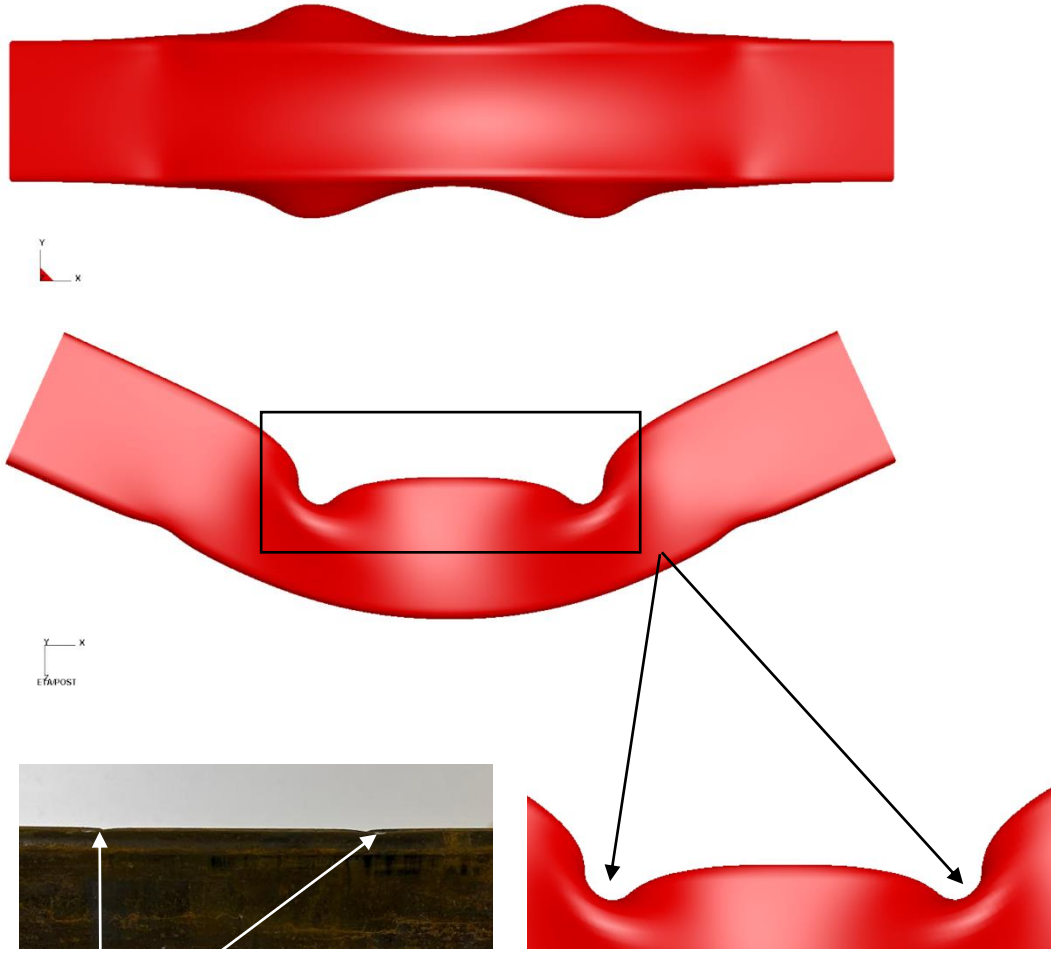
Şekil 4.27. Kare kesit profilin üç nokta eğme testinde S200 mesnet aralığı ve R5 zımba yarıçapı ile birlikte deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.



Şekil 4.28. Kare kesit profilin üç nokta eğme testinde S200 mesnet aralığı ve R10 zımba yarıçapı ile birlikte deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.



Şekil 4.29. Kare kesit profilin üç nokta eğme testinde S200 mesnet aralığı ve R15 zımba yarıçapı ile birlikte deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.



Şekil 4.30. Kare kesit profilin dört nokta eğme testinde S200 mesnet aralığında deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasına ait temel amaç, S235 kalite kare kesitli çelik profillerin üç ve dört nokta eğme testleri altındaki mekanik davranışlarını farklı zımba geometrileri (R5, R10, R15) kullanarak deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle incelemektir.

S235 (St37) çelik profillerin eğilme karakteristiklerini belirlemek amacıyla seçilen yöntem üç nokta eğme testi (3-PBT)'dir. Deneyler, sabit deformasyon hızında ve 40 mm toplam strok değerinde, sonuçların tekrarlanabilirliğini doğrulamak adına her parametre için ikişer kez gerçekleştirilmiştir. Test cihazından elde edilen verilerle, profillerin mekanik davranışını temsil eden kuvvet-uzama grafikleri oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler, LS-DYNA/Dynaform yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Malzemelerin plastik deformasyon davranışını doğru yansıtmak adına Hill-48 malzeme modeli seçilmiş, ardından deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Elde edilen deneysel veriler incelendiğinde, S235 (St37) yapı çeliğinin literatürle uyumlu şekilde tipik bir sünek malzeme davranışı sergilediği görülmüştür. Üç nokta eğme testlerinde tüm numuneler, elastik deformasyon bölgesinde homojen ve birbirine yakın bir eğilim ortaya koymuştur. Ancak, dört nokta eğme düzeneğinde yükün iki simetrik noktadan uygulanması, profil kesiti üzerinde saf eğilme alanı yaratarak sistemin deformasyon direncini belirgin ölçüde yükseltmiştir. S235 kalitedeki 50x50x4 mm kutu profillerin sahip olduğu bu yüksek malzeme rijitliği ve kesit atalet momenti, dört nokta eğme geometrisinin sağladığı kararlı başlangıç tepkisiyle birleştiğinde, numunelerin dış kuvvetlere karşı aşırı bir yapısal mukavemet göstermesini sağlamıştır. Profillerin sergilediği bu yüksek taşıma kapasitesi nedeniyle test esnasında Shimadzu test cihazı maksimum yük limitine ulaşılmış ve test bu sınır koşulda sonlandırılmıştır. Bu durum, seçilen kesit geometrisi ve et kalınlığının, dört noktalı yükleme kombinasyonu altında gösterdiği yüksek rijitlik ve eğilme mukavemetini net bir şekilde doğrulamaktadır.

Zımba radyusunun R5'ten R15'e doğru artırılması, numunelerin maksimum yük taşıma kapasitelerinde sırasıyla 85 kN, 90 kN ve 95 kN olacak şekilde belirgin bir artış ortaya koymuştur. Bu durum, artan zımba yarıçapının temas yüzey alanını genişleterek profil üst cidarındaki yerel stres konsantrasyonlarını sönmemesi ve erken yerel burkulma hasarlarını engellemesi ile açıklanmaktadır.

Plastik deformasyon bölgesi incelendiğinde; R5 zımbada tepe noktasından sonra

belirgin bir yük düşüşü yaşanırken, R15 zımbada yükün deformasyon boyunca kararlı bir plato çizdiği ve mukavemetini yüksek uzama miktarlarında dahi koruduğu gözlemlenmiştir. R15 geometrisinde, yükün daha geniş bir alana yayılması sayesinde profil kesiti stabilizasyonunu kaybetmemiş ve plastik katlanma mekanizmalarına karşı daha yüksek bir direnç sergilemiştir. Tüm numunelerde ~40 mm uzama seviyesinde gözlemlenen ani yük boşalması karakteristiği, malzemenin makroskobik bir kırılmaya uğramasından ziyade, sistemin ve Shimadzu test cihazının maksimum güvenli yük limitlerine ulaşılması sebebiyle testlerin bu sınır koşulunda kararlılıkla sonlandırıldığını doğrulamaktadır.

Hill48 anizotropik malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar simülasyonlarında, 200 mm destek açıklığındaki kutu profillerin eğilme davranışları zımba geometrisi ve test yöntemi bazında analiz edilmiştir. Üç nokta eğme testleri özelinde R5 (Şekil 4.23), R10 (Şekil 4.24) ve R15 (Şekil 4.25) zımba yarıçapları karşılaştırıldığında; zımba radiusunun büyümesiyle tepe kuvvetinin 42 kN'dan 44 kN seviyesine yükseldiği ve plastik bölgedeki kararsız dalgalanmaların sönümlenerek R15 geometrisinde sabit bir platoya dönüştüğü görülmektedir. Bu durum, genişleyen zımba temas yüzeyinin yerel gerilme yığılmalarını dağıtarak anizotropik akma kriterlerinin yerel bölgelerde erken kararsızlıklara yol açmasını engellemesiyle açıklanmaktadır.

3 nokta ve 4 nokta eğme (Şekil 4.26) düzenekleri kıyaslandığında ise sistem mekaniğinde radikal bir değişim gözlenmiştir. Dört nokta eğme düzeneğinde, yükün iki noktadan homojen dağılımı sayesinde profilin deformasyon direnci iki katına çıkarak tepe kuvveti ~83 kN seviyesine ulaşmıştır. Ancak 4 nokta eğme eğrisinin plastik bölgesinde gözlenen keskin testere dişi formundaki salınımlar, iki zımba arasında oluşan saf eğilme alanında profil üst cidarının ardışık ve çoklu lokal burkulma mekanizmalarına maruz kaldığını doğrulamaktadır. Hill48 modelinin doğrultuya bağlı pekleşme ve akma hassasiyeti, bu karmaşık plastik katlanma süreçlerini anlık yük değişimleri halinde başarıyla karakterize etmiştir.

Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, aynı mesnet açıklığı (200 mm), 4 nokta eğme testinde ulaşılan maksimum kuvvet değerinin 3 nokta eğme testine oranla yaklaşık %90-95 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, 4 nokta eğme düzeneğinde yükün iki ayrı basma noktasından aktarılması ve numunenin orta açıklığında oluşan sabit moment bölgesinin kesit dayanımını daha geniş bir alana yayılmasıyla açıklanmaktadır.

Ayrıca, 4 nokta eğme grafiklerinde gözlemlenen yüksek frekanslı kuvvet salınımları, iki zımba altındaki yerel cidarların eş zamanlı burkulma etkileşiminden kaynaklanmaktadır.

Her iki test yöntemi de HILL48 malzeme modelinin anizotropik davranışını tutarlı bir şekilde yansıtmış olup, enerji yutma kapasitesi bakımından 4 nokta eğme yönteminin, yapısal esneklik ve darbe emiş gücü açısından daha üstün bir performans sergilediği görülmüştür.

S235 kutu profiller üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar (Şekil 4.15 - 4.17) ile Hill48 anizotropik malzeme modeli kullanılarak yürütülen sonlu elemanlar analizleri (Şekil 4.23- 4.26) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen grafiklerin eğri karakteristiği incelendiğinde, başlangıç elastik rijitliğini, elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş aşamalarını ve pekleşme eğilimini deneysel eğrilerle yüksek bir uyumla yakaladığı görülmüştür. Hem deneysel hem de nümerik modellerde maksimum kuvvete benzer deformasyon miktarlarına ulaşılması, HILL48 malzeme modelinin anizotropik plastik akma kriterinin kararlılığını doğrulamaktadır. Ancak, sınır şartları ve geometrik parametrelerin birebir aynı tanımlandığı tam parça modellerinde; deneysel maksimum yük taşıma kapasiteleri 84.000 N – 95.000 N bandında ölçülürken, nümerik analizlerden elde edilen ham kuvvet verileri 42.000 N – 44.000 N seviyesinde kalmıştır. Nümerik sonuçların, deneysel tepe yüklerinin tam olarak yarısına (%50) tekabül etmesi, simülasyon çıktılarının analiz edilmesi aşamasındaki veri okuma referansından kaynaklanmaktadır. Statik denge prensipleri gereği, üst zımbanın (punch) uyguladığı toplam dikey yük alt mesnetler tarafından eşit paylaşılmakta ve her bir mesnete yükün yarısı ($F_{\text{Toplam}}/2$) binmektedir. Nümerik model çıktılarında, toplam zımba kuvveti yerine tek bir alt mesnedin reaksiyon kuvvetinin grafiklendirilmesi bu genlik farkına yol açmıştır. Sonuç olarak, mesnetler üzerindeki bu simetrik reaksiyon dengesi (x2 katsayısı) dikkate alındığında, sayısal modelin nihai yük taşıma kapasitesini deneysel verilerle yüksek bir doğrulukla yakaladığı elde edilmiştir.

Ayrıca gerçek deneylerden elde ettiğimiz grafikler ile bilgisayar simülasyonundan aldığımız grafikler arasındaki en net görsel fark, plastik eğilme aşamasındaki çizgi yapısında ortaya çıkmıştır. Gerçek laboratuvar testlerinde elde ettiğimiz grafikler gayet pürüzsüz ve düzgün bir hat izlerken, bilgisayar simülasyonunda ki çizgilerde 'testere dişi' gibi inişli çıkışlı dalgalanmalar görülmüştür. Deney anında profil homojen bir şekilde ezilirken, bilgisayar programı malzemenin yönsel özelliklerini en ince detayına kadar hesaplar. Bükülme esnasında profil cidarlarında oluşan anlık katlanmaları, mikro düzeydeki ezilmeleri ve temasları program adeta bir büyüteç gibi yakalar ve grafikte de bunları küçük iniş çıkışlar olarak karşımıza çıkarmaktadır.

Sonuçlar özetlendiğinde; yükleme yönteminin (üç/dört nokta) profilin toplam taşıma kapasitesi üzerinde radikal ve baskın bir etkisinin olduğu, zımba yarıçapının ise maksimum kuvveti artırmaktan ziyade plastik bölgedeki deformasyon kararlılığını koruma yönünde baskın bir rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Sayısal modelin deneysel verilerle yüksek tutarlılıkta doğrulanması, sonlu elemanlar yönteminin yapısal analizlerdeki güçlü potansiyelini doğrulamaktadır. Tasarım aşamasında kalıp, işçilik ve zaman gibi kaynak israflarına yol açan deneme-yanılma süreçlerini devre dışı bırakan bu yöntem, hafifletme ve mukavemet odaklı gelecek çalışmalar için de güvenilir ve sürdürülebilir bir alt yapı sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Allen, H. G., & Bulson, P. S. (1980). *Background to Buckling*. McGraw-Hill.
- Anık, S. (1991). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Birsen Yayınevi.
- Anık, S. (2019). *İmal Usulleri (Güncellenmiş Yeni Baskı)*. Birsen Yayınevi.
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4. bs.). Butterworth-Heinemann.
- ASTM International. (2021). *ASTM E290: Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*. ASTM International.
- Ayan, S. M. (2011). Alüminyum Ekstrüzyon Profil Tasarım Prensipleri ve Ürün Tasarım İyileştirme Tavsiyeleri. *Alüminyum Yapı Dergisi*, (76), 32-45, Mart-Nisan.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2020). *Mechanics of Materials* (8. bs.). McGraw-Hill Education.
- Beigpour, M., Beigpour, M., & Mirzaei, M. (2021). Experimental and numerical investigation of the bending behavior of sandwich panels with a corrugated core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(7), 2845-2868.
- Birro, G., Marson, S., & Baldan, A. (2021). Surface damage and adhesive strength analysis in structural bonding through three-point bending. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 108, 102872.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10. bs.). John Wiley & Sons.
- Çapık, M., & Kaya, M. (2015). İnce cidarlı dairesel boşluklu kesitlerin eğilme davranışı üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 545-552.
- Deren, H., Erdoğan, B., & Piroğlu, F. (2008). *Çelik Yapılar*. Çağlayan Kitabevi.
- Erol, H. (2014). *Çelik Yapılar: Eleman Tasarımı*. Birsen Yayınevi.
- Esener, E. (2018). Farklı malzeme modellerinin sac metal şekillendirme analizlerindeki etkisinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Galambos, T. V., & Surovek, A. E. (2008). *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*. John Wiley & Sons.
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (7. bs.). Wiley.
- Güleryüz, M. (2014). *Malzeme Bilgisi ve Seçimi*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Hashmi, S. (Ed.). (2014). *Comprehensive Materials Processing* (Cilt 1-13). Elsevier. (Not: Kitabın basım yılı orijinal olarak 2014'tür).
- Hibbeler, R. C. (2014). *Malzeme Mekaniği* (G. Ayaydın & İ. Gayıpov, Çev.). Pearson Education.
- Hibbeler, R. C. (2018). *Statics and Mechanics of Materials* (5. bs.). Pearson.
- Honeycombe, R. W. K., & Bhadeshia, H. K. D. H. (1995). *Steels: Microstructure and Properties* (2. bs.). Edward Arnold.
- İnan, M. (2015). *Cisimlerin Mukavemeti*. İTÜ Vakfı Yayınları.
- Jeong, H., Park, S., & Kim, J. (2024). Crack propagation analysis in brittle materials using advanced three-point bending setups. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 130, 104291.
- Jones, N. (2011). *Structural Impact* (2. bs.). Cambridge University Press.
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7. bs.). Pearson Education.
- Kazemi, M. E., Shanmugam, L., & Yang, J. (2022). Flexural properties of fiber-reinforced polymer composites: A review. *Composite Structures*, 292, 115664.

- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy* (2. bs.). Wiley-Interscience.
- Kožar, I., Toric, N., & Rukavina, T. (2023). Verification of a displacement model for the three-point bending test in material science. *Engineering Fracture Mechanics*, 284, 109245.
- Kümmel, D., Gorr, D., & Schmauder, S. (2018). Bending properties and failure mechanisms of carbon fiber reinforced plastics. *Materials Science and Engineering: A*, 724, 219-228.
- Liu, G., vd. (2017). Investigation on springback of titanium alloy tubes in cold rotary draw bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Liu, Y., Wang, J., & Zhang, X. (2023). Effect of loading rate and temperature on the fracture behavior of engineering materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1532-1545.
- Lu, G., & Yu, T. (2003). *Energy Absorption of Structures and Materials*. Woodhead Publishing.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Structural Steel Design* (5. bs.). Pearson.
- Mohammadtabar, M., Bakhshi-Jooybari, M., & Hosseinipour, S. J. (2021). Experimental and numerical study on the effect of process parameters on springback in U-bending of high strength steels. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1625-1636.
- Moni, S. (2020). Assessment of weld efficiency in structural steel using destructive testing methods. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 8(2), 44-49.
- Monkova, K., Monka, P., & Živčák, J. (2023). Mechanical properties of 3D printed parts produced by FDM technology under flexural loading. *Materials*, 16(3), 1124.
- Nayyar, M. L. (2000). *Piping Handbook* (7. bs.). McGraw-Hill.
- Onaran, K. (2006). *Malzeme Bilimi*. Bilim Teknik Yayınevi.
- Piroğlu, F. (2019). *Çelik Yapılar: Tasarım ve Uygulama*. Birsen Yayınevi.
- Ren, Z., Yu, H., & Chen, J. (2023). Numerical simulation and experimental study of crack path in inhomogeneous materials. *International Journal of Solids and Structures*, 268, 112180.
- Saha, P. K. (2000). *Aluminum Extrusion Technology*. ASM International.
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). *Steel Structures: Design and Behavior* (5. bs.). Pearson Prentice Hall.
- Sarkar, J., Lawrence, K., & Soni, N. (2001). A study of springback in the bending of aluminum alloy sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 114(1), 39-46.
- Segui, W. T. (2017). *Steel Design* (6. bs.). Cengage Learning.
- Sert, A., Korkmaz, M. E., & Günay, M. (2017). Sac metal şekillendirmede geri esneme miktarına etki eden parametrelerin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(3), 189-201.
- Seyed Jafari, S. S., Javaheri, V., & Behnamghader, A. (2021). Flexural behavior of hybrid composite laminates under three-point bending. *Journal of Composite Materials*, 55(14), 1935-1948.
- Smil, V. (2016). *Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World*. Butterworth-Heinemann.
- Sodhi, P. S. (2014). *Experimental Methods in Structural Mechanics*. CRC Press.
- Sudhakar, K., & Srinivas, K. (2021). Evaluation of welding parameters on the flexural strength of butt-welded joints. *Materials Today: Proceedings*, 46, 742-747.
- Toros, S., Ozturk, F., & Kılıç, S. (2011). Effect of anisotropy on springback in sheet metal bending. *International Journal of Material Forming*, 4(4), 371-381.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2006). TS EN 10025-2: Sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinden mamul ürünler - Bölüm 2: Alaşımsız yapı çeliklerinin teknik teslim şartları. TSE, Ankara.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2019). TS EN 10025-2: Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri - Bölüm 2: Alaşımsız yapı çelikleri için teknik teslim şartları. TSE, Ankara.

- Türk Standardları Enstitüsü. (2007). TS EN 1994-1-1 (Eurocode 4): Çelik ve Beton Karma Yapıların Tasarımı. TSE, Ankara. (Not: "t.y." yerine standart yayın yılı eklenmiştir).
- Türk Standardları Enstitüsü. (2021). TS EN ISO 7438: Metalik malzemeler - Eğme deneyi. TSE, Ankara. (Not: En güncel revizyon yılı eklenmiştir).
- Ünlü, A. (2022). Profil yapıların eğilme ve geri esneme davranışlarının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Ünlü, B. (2022). İmal Usulleri. Ekin Basım Yayın Dağıtım.
- Václavík, V., Sucharda, J., & Kubzová, M. (2024). Monitoring of material deformation behavior under quasi-static loading. Structures, 59, 105712.
- Wardenier, J., Packer, J. A., Zhao, X. L., & van der Vegte, G. J. (2010). Hollow Sections in Structural Applications. CIDECT.
- Xia, C., Garcia, R., & Shi, S. Q. (2022). Analysis of bending properties of bio-composites using three-point bending tests. Industrial Crops and Products, 178, 114620.
- Yücel Boru ve Profil Endüstrisi A.Ş. (2025). Üretim Teknolojileri ve Süreç Akış Şemaları. Yücel Boru Yayınları, Gebze/Kocaeli.
- Zhang, Z., Li, S., & Wang, H. (2018). Investigation on the springback of Q235 carbon steel in air bending process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(5), 2135-2144.
- URL-1: <https://insapedia.com/gerilme-sekil-degistirme-iliskisi/> (08.09.2025)
- URL-2: <https://www.megcelik.com/celik-konstruksiyon/> (16.09.2025)
- URL-3: <https://www.interwall.com.tr/profil-nedir-cesitleri-nelerdir> (18.09.2025)
- URL-4: <https://ugurlucelikboru.com/urunlerimiz/dikisli-celik-borular/soguk-cekme-borular-dikisli-celik-cekme-borular-celik-cekme-borular.html/> (19.09.2025)
- URL-5: <https://tr.steelorbis.com/pazaryeri/celik-hakkinda/dikisli-ve-dikissiz-boru-nedir-1393590.htm> (01.10.2025)
- URL-6: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/09/sonlu-elemanlar-metodu/> (15.10.2025)