



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**304L KALİTE PASLANMAZ ÇELİK PROFİLLERİN EĞİLME ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARININ FARKLI YÜKLEME KOŞULLARINDA DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TUĞÇE ÜNER

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2025

10728124

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

**304L KALİTE PASLANMAZ ÇELİK PROFİLLERİN EĞİLME ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARININ FARKLI YÜKLEME KOŞULLARINDA DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TUĞÇE ÜNER

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2025

10728124

BEYAN

“304L Kalite Paslanmaz Çelik Profillerin Eğilme Altındaki Davranışlarının Farklı Yükleme Koşullarında Deneysel ve Sayısal 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.

Tuğçe Üner

../../2025

İmza:

ÖN SÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak bana her konuda destek olup, yol gösteren, beni her koşulda motive eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Emre Esener'e katkı ve emeklerinden dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması ve tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri esirgemeyip, her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Tuğçe Üner

.../.../2025

ÖZET

304L KALİTE PASLANMAZ ÇELİK PROFİLLERİN EĞİLME ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ FARKLI YÜKLEME KOŞULLARINDA DENEYSSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Bu çalışmada, 304 L kalite paslanmaz çeliğin üç nokta ve dört nokta eğme yüklemesi altında davranışı deneysel ve numerik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, endüstriyel uygulamalarda ve literatürde sıklıkla kullanılan dairesel ve kare kesitli geometriye sahip 304 L kalite paslanmaz çelik profiller incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, 140 mm, 160 mm ve 180 mm destek mesafesi aralığında ve 5 mm zımba yarı çaplarında üç nokta ve dört nokta eğme testleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucu olarak, destek mesafesi arttıkça malzemenin eğilmesi için gerekli olan kuvvetin azaldığı tespit edilmiştir.

Çalışmanın ikinci adımında, Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve şekillendirilmiş numune formları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucu olarak, deforme olmuş numune geometrilerinin birbirleriyle uyumlu olduğu tespit edilmekle birlikte sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel eğrilerden daha düşük çıktıkları gözlemlenmiştir. Daha hassas simülasyon sonuçları için gelecekteki çalışmalarda gelişmiş plastisite modellerinin kullanımı tavsiye edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnce Cidarlı Yapılar, Üç Nokta Eğme, Dört Nokta Eğme, Sonlu Elemanlar Analizi, Paslanmaz Çelik, Plastisite Modelleri, Hill-48, Barlat-89.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF 304L STAINLESS PROFILE BEHAVIORS UNDER BENDING TEST WITH DIFFERENT LOADING CONDITIONS

In this study, the behavior of 304 L grade stainless steel under three-point and four-point bending loads was investigated both experimentally and numerically. For this purpose, 304L grade stainless steel profiles with circular and square cross-sectional geometries, which are commonly used in industrial applications and frequently encountered in the literature, were examined.

Within the scope of the study, three-point and four-point bending tests were experimentally conducted using support spans of 140 mm, 160 mm, and 180 mm, and a punch radius of 5 mm. As a result of the experimental studies, it was determined that the force required to bend the material decreased as the support span increased.

In the second stage of the study, finite element analyses were performed using the Hill-48 and Barlat-89 plasticity models. The force-displacement curves and the deformed specimen shapes obtained from the finite element analyses were compared with the experimental results. As a result of this comparison, it was observed that the deformed specimen geometries were consistent with each other while force-displacement curves of finite element analyses predicted less force values than experimental results. In the future studies, it is recommended that advanced plasticity models can be used.

Keywords: Thin-Walled Structures, Three Point Bending, Four Point Bending, Finite Element Analysis, Stainles Steel, Plasticity Models, Hill-48, Barlat-89.

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.....	6
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	12
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI	19
4.1. Deneysel Çalışmalar	19
4.2. Sonlu Elemanlar Analizleri	26
5. DEĞERLENDİRME.....	41
KAYNAKÇA	42

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Plastisite modelleri.....	17
Tablo 4.1. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri	27
Tablo 4.2. 304 L kalite paslanmaz malzemenin mekanik özellikleri.....	27

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. İnce cidarlı taşıyıcı elamanların kullanımı.....	1
Şekil 1.2. Üç nokta eğme testi ve deforme olmuş numune.....	2
Şekil 2.1. Açık profiller.....	6
Şekil 2.2. Kapalı profiller.....	6
Şekil 2.3. Kutu profiller.....	7
Şekil 2.4. Dikişsiz ve dikişli boru imalatı.....	8
Şekil 2.5. Yükleme tipleri.....	9
Şekil 2.6. Üç nokta ve dört nokta eğme deney düzeneği	10
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar analizi yapılan çizel aleti.....	13
Şekil 3.2. Örnek ağ yapısı.....	15
Şekil 3.3. Akış diyagramı.....	16
Şekil 4.1. a) Üç nokta eğme b) dört nokta eğme deney düzeneği	19
Şekil 4.2. Numune ölçüleri	20
Şekil 4.3. Üç nokta test düzeneğinde deforme olmamış numuneler	20
Şekil 4.4. Dört nokta test düzeneğinde deforme olmamış numuneler	21
Şekil 4.5. Üç nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş daire kesitli numuneler.....	21
Şekil 4.6. Üç nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş kare kesitli numuneler.....	22
Şekil 4.7. Dört nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş daire kesitli numuneler.....	22
Şekil 4.8. Dört nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş kare kesitli numuneler.....	22
Şekil 4.9. Üç nokta eğme deney sonucunda elde edilen daire profil kuvvet-deplasman eğrileri.....	23

Şekil 4.10. Üç nokta eğme deney sonucunda elde edilen daire kare kuvvet-deplasman eğrileri.....	23
Şekil 4.11. Dört nokta eğme deney sonucunda elde edilen daire profil kuvvet-deplasman eğrileri.....	24
Şekil 4.12. Dört nokta eğme deney sonucunda elde edilen kare profil kuvvet-deplasman eğrileri.....	24
Şekil 4.13. Farklı kesit geometrilerine göre üç nokta eğme deneyi kuvvet uzama eğrileri.....	25
Şekil 4.14. Farklı kesit geometrilerine göre dört nokta eğme deneyi kuvvet uzama eğrileri.....	25
Şekil 4.15. Daire profil sonlu elemanlar modeli.....	26
Şekil 4.16. Kare profil sonlu elemanlar modeli.....	26
Şekil 4.17. S140 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	28
Şekil 4.18. S160 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	28
Şekil 4.19. S180 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	29
Şekil 4.20. S140 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	29
Şekil 4.21. S160 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	30
Şekil 4.22. S180 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	30
Şekil 4.23. S140 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	31
Şekil 4.24. S160 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	31
Şekil 4.25. S180 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	32
Şekil 4.26. S140 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin	

deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	32
Şekil 4.27. S160 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	33
Şekil 4.28. S180 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması	33
Şekil 4.29. S140 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması...	34
Şekil 4.30. S160 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması...	34
Şekil 4.31. S180 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması...	35
Şekil 4.32. S140 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması...	35
Şekil 4.33. S160 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması...	36
Şekil 4.34. S180 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması...	36
Şekil 4.35. S140 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması...	37
Şekil 4.36. S160 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması...	37
Şekil 4.37. S180 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması...	38
Şekil 4.38. S140 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması...	38
Şekil 4.39. S160 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması...	39
Şekil 4.40. S180 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması...	39

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic- Karbon Fiber Takviyeli Plastik

CP: Complex Phase – Karmaşık Fazlı

DP: Dual Phase – Çift Fazlı

ERW: Electric Resistance Welding- Elektrik Direnç Kaynağı

Mm: Milimetre

N: Newton

St37: Yapı Çeliği

σ : Akma Gerilmesi Değeri

σ_0 : Hadde yönünde ki akma gerilmesi değeri

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

σ_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki 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

r: Anizotropi Katsayısı

r_0 : Hadde yönünde ki anizotropi değeri

r_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki anizotropi değeri

r_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi değeri

F, G, H ve N: Anizotropi parametrelerine bağlı katsayılar

a, c, h, k1, k2, p : Barlat-89 plastisite modeline bağlı katsayılar

S: Destek Aralığı

Θ : Daire Profil Çap Değeri

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörü başta olmak üzere, makine sanayisinde yaygın olarak kullanılan ince cidarlı elemanlar, tren, inşaat, havacılık, açık deniz yapıları ve askeri teçhizatlar gibi birçok alanda önemli bir yere sahiptir. Bu elemanlar, düşük maliyet, yüksek mukavemet, sertlik, hafiflik, yüksek yük taşıma verimliliği, çarpışma güvenliği ve enerji absorbe edebilme kapasitesi gibi özellikleri sayesinde, enerji emici yapısal bileşenler olarak tercih edilmektedir (Zhang vd., 2015, s. 45).



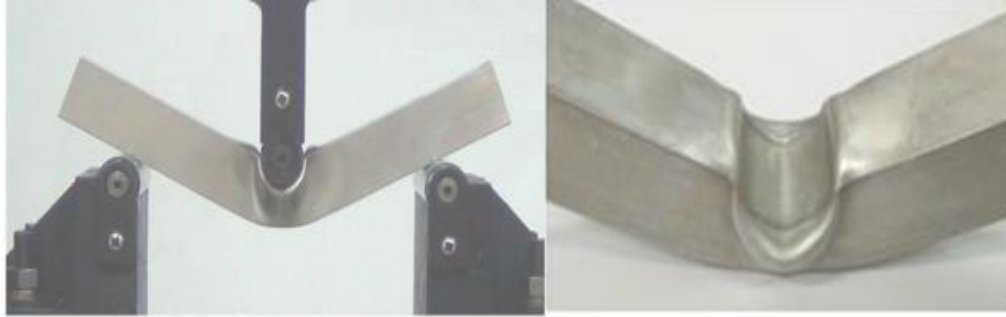
Şekil 1.1. İnce cidarlı taşıyıcı elemanların kullanımı (Eroğlu, 2019)

İnce cidarlı elemanların enerji absorbe etme verimliliği ve çarpışma dirençlerinin araştırılması, çeşitli mühendislik disiplinlerinde önemli bir konu olmuştur. Bu tür analizler, genellikle analitik (Mo'tamedi vd., 2018, s. 560), sayısal (Yin vd., 2015, s. 2; Qi vd., 2016, s. 24), deneysel (Li vd., 2013, s. 1059; Hilditch vd., 2009, s. 2317; Duarte vd., 2014, s. 49) ve tasarım optimizasyonu (Zhang vd., 2018, s. 637; Zhang vd., 2016a, s. 113; Sun vd., 2015, s. 131) gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Farklı kesit geometrileri, dolgu maddesi ilavesi, çok hücreli kesitler, değişken cidar kalınlığı ve malzeme konfigürasyonları gibi parametrelerin ince cidarlı elemanların performansı üzerindeki etkisi yoğun şekilde araştırılmaktadır. Bu tür parametrelerin optimize edilmesi, bu elemanların enerji emme kapasitelerini artırmak ve çarpışma dayanımlarını geliştirmek amacıyla yapılmaktadır (Zhang vd., 2018, s. 637).

İnce cidarlı elemanlar, özellikle taşıyıcı yapılar ve çarpışma kritik parçalarda sıklıkla eğilme yüklemesine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, bu elemanların eğilme altındaki davranışları, mühendislik tasarımları ve güvenlik analizleri açısından kritik öneme sahiptir.

İnce cidarlı elemanların eğilme davranışı üzerine yapılan ilk çalışmalar, 1983 yılına kadar uzanmaktadır. Kecman, ince duvarlı dikdörtgen kesitli tüplerin eğme tepkisini tahmin etmek için teorik bir model önermiştir. Bu model, daha sonra Kim ve Reid (2001) tarafından

geliştirilmiş ve dikdörtgen ince duvarlı yapıların eğilme momenti için teorik tahmin formülleri elde edilmiştir. Ancak, bu teoriler gerçek çarpışma koşullarını tam olarak yansıtamamaktadır. Gerçek dünyadaki çarpışma olaylarında, saf eğilme deplasmanı nadiren gözlemlenmektedir, bu nedenle bu teoriler pratikte sınırlı kalmaktadır. Bu durum, daha karmaşık test yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Özellikle üç nokta eğilme ve dört nokta eğilme testleri, değişken eğilme momentleri ve kesme kuvvetlerinin etkilerini daha iyi değerlendirebilmek için sıklıkla kullanılmaktadır (Huang ve Zhang, 2018, s. 461). İnce cidarlı yapıların eğilme davranışını incelemek amacıyla yapılan bu testler, mühendislik tasarımlarına büyük katkılar sağlamaktadır.



Şekil 1.2. Üç nokta eğme testi ve deforme olmuş numune (Huang ve Zhang, 2019, s.232)

Elyaf takviyeli kompozit borular üzerinde yapılan çalışmalarda, dört nokta eğilme testi kullanılarak bu yapıların eğilme dayanımı incelenmiştir. Bu testlerde, boğumla güçlendirilmiş kompozit yapıların, boğumsuz yapılarına göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Görücü, 2011).

Ayrıca, St37 çeliğinden üretilmiş üç farklı kesitli (boru, kare, dikdörtgen) profilin eğilme davranışları üzerine yapılan çalışmalarda, artan destek aralıklarında profillerin kuvvet-uzama verilerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada en yüksek enerji absorpsiyon değerine ulaşan profilin, 100 mm destek aralığına sahip kare kesit profil olduğu görülmüştür (Ünlü, 2022). Bu bulgular, profil geometrisinin eğilme davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Çeşitli malzeme türlerinin ve optimizasyon çalışmalarının ince cidarlı elemanların eğilme davranışı üzerindeki etkisi de önemli bir araştırma konusudur. Örneğin, karbon fiber takviyeli plastik kompozitler (CFRP) ile yapılan üç nokta eğilme testleri, optimize edilmiş CFRP tampon kirişlerinin, yüksek mukavemetli çelik tampon kirişlerine kıyasla %51,7'ye kadar daha hafif olmasına rağmen çarpışma dayanıklılığı gereksinimlerini karşılayabildiğini göstermiştir (Zhu vd., 2017, s. 368). Bu bulgular, ince cidarlı elemanların eğilme

davranışlarının geliştirilmesi, çarpışma dayanımının artırılması ve enerji absorbe etme verimliliğinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan çalışmaların önemini vurgulamaktadır.

Dolgu maddesi ilavesi, çok hücreli yapılar, farklı malzeme konfigürasyonları ve geometrik optimizasyon gibi faktörlerin bu elemanların performansını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Zhang vd., 2018, s. 637).

Düşük maliyetli ve hafif yapılar isteyen uygulamalarda ince cidarlı elemanlar önemli bir çözüm sunduğundan dolayı, bu elemanların eğilme davranışları ve performansı üzerine yapılan bu araştırmalar, ince cidarlı elemanların tasarım optimizasyonu, dayanıklılık ve enerji emme kapasitesinin artırılması için kritik önem taşımaktadır.

Çeşitli optimizasyon teknikleri ince cidarlı elemanların eğilme davranışlarını geliştirmek adına sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir. (Zhang vd.,2016b). İnce cidarlı yapıların enerjyi daha verimli bir şekilde emmesi için yapısal optimizasyon tekniklerini kullanarak, daha hafif ancak aynı oranda yüksek dayanımlı profiller tasarlanmıştır. Yapısal optimizasyon ile malzeme dağılımı ve profil geometrileri iyileştirilerek, çarpışma güvenliği sağlanırken, enerji emme kapasitesi artırılmaktadır. Bunun yanı sıra, çok hücreli yapılar da ince cidarlı elemanların eğilme davranışını iyileştiren bir diğer yöntem olarak öne çıkmaktadır. Dört hücreli profillerin eğilme dayanımını arttırmak amacıyla yapılan deneysel çalışmalar, bu tür yapıların enerji emme kapasitesinin geleneksel tek hücreli yapılarla karşılaştırıldığında daha yüksek olduğunu göstermektedir (Zhang vd., 2018, s. 637). Ayrıca, bu tür yapılar, çarpışma anındaki deformasyonları daha homojen hale getirerek yapının stabilitesini artırmaktadır. Enerji absorbe etme kapasitesi üzerine yapılan çalışmalar, özellikle otomotiv sektörü gibi uygulamalarda, ince cidarlı elemanların çarpışma güvenliği açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Araçların çarpışma güvenliği testlerinde, ince cidarlı elemanlar, çarpışma sırasında enerji absorbe ederek araç içindeki yolcuların zarar görme riskini azaltmaktadır. Otomotiv sektöründe kullanılan ince cidarlı çelik profillerin, çarpışma testlerinde yüksek enerji emme kapasitelerine sahip olduğunu ve bu kapasitelerin, profillerin geometrisi ve malzeme özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir (Li vd.,2013).

İnce cidarlı elemanların yüksek mukavemet ve çarpışma güvenliği sağlarken aynı zamanda yük taşıma verimliliğini koruması gerektiğinden, eğilme davranışının doğru bir şekilde modellenmesi ve anlaşılması önem kazanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda, bu tür yapıların performansını tahmin etmek ve değerlendirmek için güçlü bir araç olarak ön plana çıkmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, ince cidarlı elemanların elastik ve plastik davranışlarını, malzeme modellerini ve geometrik değişikliklerini simüle etme kapasitesine

sahip olduğundan dolayı eğilme testlerinin ve çarpışma senaryolarının analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Örnek olarak yapılan çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, ince cidarlı çelik profillerin eğilme altındaki mekanik davranışlarını detaylı bir şekilde modellemiş ve deneysel verilerle doğrulamıştır. Bu yöntemi ile yapılan analizlerin, deneysel testlerle uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiş, bu da modellemenin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmıştır (Yin vd. 2015).

Bu nedenle, ince cidarlı elemanların çarpışma güvenliği ve enerji emme verimliliği konularındaki araştırmalar, sadece teorik modelleme ile değil, aynı zamanda deneysel testler ve nümerik simülasyonlarla desteklenerek daha geniş kapsamlı hale getirilmiştir. Bu yöntemlerin bir arada kullanılması, mühendislik uygulamalarında daha verimli ve güvenli tasarımlar yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Paslanmaz çelik profiller, özellikle yüksek mukavemet ve korozyon direnci nedeniyle son yıllarda yapısal mühendislik uygulamalarında önemli bir yer edinmiştir. Hem deneysel hem de nümerik yöntemlerle paslanmaz çeliğin eğilme altındaki performansı değerlendirilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, paslanmaz çelik profillerin geleneksel karbon çeliğine göre daha belirgin elastik sonrası deformasyon gösterdiği ve bu nedenle tasarım aşamasında farklı gerilme-gerinim modelleri kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, paslanmaz çeliğin doğrusal olmayan davranışının sonlu elemanlar analizlerinde dikkate alınmasının, deneysel sonuçlarla daha uyumlu çıktılar elde edilmesini sağladığı belirtilmiştir (Gardner, 2005). Ayrıca, farklı tiplerde paslanmaz çelik kutu kesitlerin eğilme altındaki davranışını incelemiş, deneysel olarak elde ettikleri yük-deformasyon eğrilerini nümerik analizlerle karşılaştırmıştır. Çalışmada, kullanılan gerilme-gerinim modellerinin doğruluğunun, simülasyon sonuçlarını doğrudan etkilediği görülmüştür (Afshan ve Gardner, 2013). Başka bir çalışmada, sıcak şekillendirilmiş ve soğuk şekillendirilmiş paslanmaz çelik kesitleri karşılaştırarak, üretim yönteminin mekanik dayanım üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Soğuk şekillendirme ile elde edilen profillerin daha yüksek akma dayanımına sahip olduğu, fakat sünekliklerinin nispeten azaldığı gözlemlenmiştir (Theofanous ve Gardner 2009). Eğilme testlerine tabi tutulan I ve kanal kesitli paslanmaz çelik profiller üzerinde yapılan çalışmada, yük taşıma kapasitesinin profil geometrisine ve yükleme şekline duyarlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, deneysel verilerin, nümerik modellerle yüksek doğrulukta tahmin edilebildiği sonucuna varılmıştır (Cai

ve Young 2006). Bu çalışmaların ortak noktası, deneysel ve nümerik yaklaşımların birlikte kullanılmasının, yapısal analizlerin doğruluğunu artırdığı yönündedir.

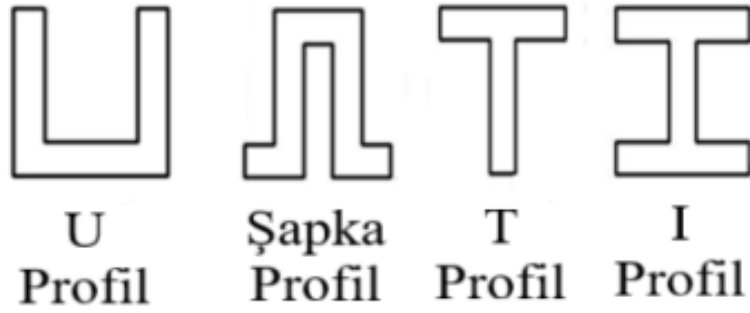
Farklı malzeme türlerinin ince cidarlı elemanlar üzerindeki etkisi de önemli bir araştırma konusu olduğundan, geleneksel çelik profillerin yanı sıra, alüminyum, tungsten karbür ve kompozit malzemeler gibi farklı malzemelerin eğilme davranışları üzerine yapılan çalışmalar, her bir malzeme türünün kendine özgü avantajlar ve sınırlamalar sunduğunu göstermektedir. Özellikle kompozit malzemeler, yüksek süneklik ve hafiflik özellikleri nedeniyle, ince cidarlı elemanlar için oldukça uygun alternatifler sunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, elastik modülü yüksek olan kompozit malzemelerin eğilme altında daha fazla enerji absorbe etme kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir (Görücü, 2011).

Sonuç olarak, ince cidarlı elemanların eğilme davranışı ve çarpışma güvenliği üzerine yapılan araştırmalar, bu tür yapıların tasarımında önemli bir yol haritası sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, daha verimli malzeme kullanımı, yapısal optimizasyon, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel testlerin entegrasyonu ile ince cidarlı elemanların performanslarının daha da iyileştirilmesi beklenmektedir.

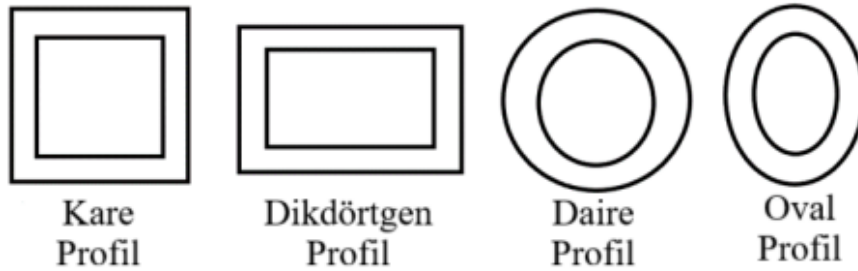
Tez çalışmasında, literatür eksiği göz önüne alındığında, paslanmaz çelik sınıfına dahil olan 304-L çelikten imal edilen ince cidarlı elemanların üç-nokta eğme ve dört nokta eğme davranışının farklı proses parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Malzeme davranışının tanımlanması adına farklı plastisite modelleri ile nümerik analizler gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. PROFİL YAPILARI

Yapı tekniğinde oldukça yaygın olarak kullanılan ince cidarlı elemanlar, levha olarak imal edilen malzemelerin haddeleme prosesi kullanılarak içi boş, yüksek dayanıma ve farklı geometrik şekillere sahip (I, T, L gibi) elemanlara dönüştürülmesiyle elde edilirler. Yapılarda kullanılan bu şekillendirilmiş metal çubuklara profil denilmektedir (Eroğlu, 2019:1). Sahip oldukları gelişmiş yük taşıma kapasiteleri nedeniyle taşıyıcı konstrüksiyon yapılarında vinç, kiriş (yatay elemanlar) ve kolon (dikey elemanlar) gibi elemanlarda tercih edilen profiller, açık ve kapalı profiller olarak ikiye ayrılmaktadır. I, H, U, T vb. profiller açık profiller olarak, kutu (kare, dikdörtgen, çokgen) ve boru profiller kapalı profiller olarak adlandırılmaktadır (Öztürk, 2008: 87).



Şekil 2.1. Açık profiller (Ünlü,2022)



Şekil 2.2. Kapalı Profiller (Ünlü,2022)

Açık profiller çoğunlukla soğuk şekillendirme veya sıcak haddeleme yöntemleriyle üretilir. Bu profillerin üretimi daha kolay ve maliyeti düşüktür, erişilebilirlik açısından bakım ve montaj kolaylığı sunarlar. Fakat burulma ve eğilme rijitlikleri düşük, dış kuvvetlere karşı daha az dayanıklıdırlar. Aynı zamanda açık kenarlar nedeniyle korozyon riski vardır (Kwon ve Bang, 2000). Açık profiller genellikle ikincil taşıyıcı sistemlerde, raf sistemlerinde, çatı kirişlerinde ve inşaat sektöründeki hafif yapılarda kullanılır (Timoshenko ve Gere, 2009).

Kapalı kesitli profiller, dairesel, kare, dikdörtgen veya özel çok hücreli gibi çeşitleriyle kapalı geometriye sahip profillerdir. Üretimlerinde genellikle boru çekme, haddeleme ve kaynaklı şekillendirme (ERW) yöntemleri kullanılır. Kapalı profiller, yapısal uygulamalarda burulma ve basınç dayanımı açısından önemli avantajlar sunar. Daha homojen yük dağılımına sahiptirler, çarpışma kutuları gibi enerji emici uygulamalarda yüksek performans gösterirler.

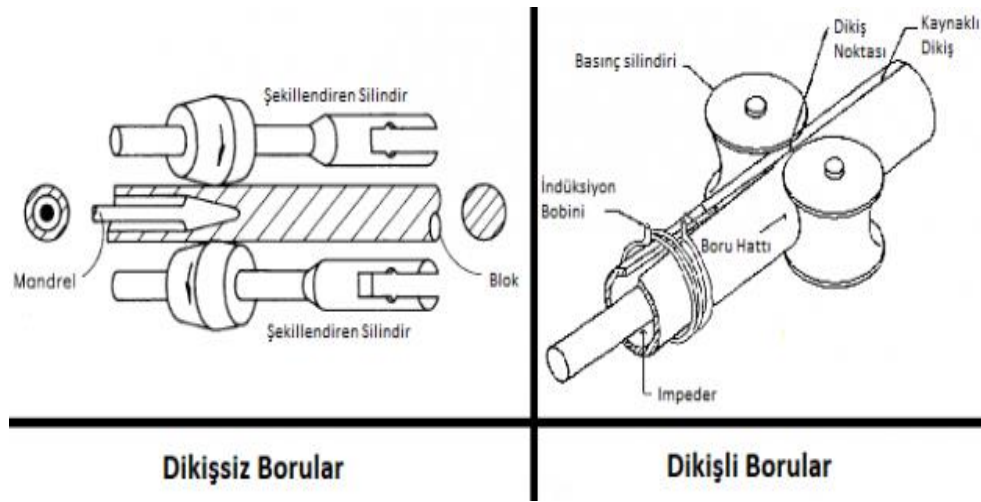


Şekil 2.3. Kapalı profiller (Ertu Paslanmaz,2025)

Kapalı kesitli profiller, yapısal anlamda kritik bölgelerde yüksek dayanım sağlarken çarpışma ve darbe koşullarında da yüksek enerji absorbe etme kabiliyetine sahiptir. Aynı zamanda korozyon/yangın gibi faktörlere gösterdikleri direnç, hafiflik, kolay ulaşılabilirlik gibi diğer etmenler kapalı profillerin yaygın kullanım nedenlerini oluşturmaktadır (Ünlü,2022). Kapalı profiller, açık profillere göre daha hafiftirler ve dış yüzey alanları daha azdır. Bu nedenle yangın ve korozyon gibi kötü koşullara karşı koruma malzemesi daha az kullanılır dolayısıyla daha ekonomiktirler (Wardener vd.,2001).

Kapalı profiller genellikle yapı tekniğinde kullanıldığından, yüksek mukavemetli olmaları beklenir bu nedenle en çok tercih edilen kapalı profil malzemesi çeliktir (Bozacı, 2007:1). Yüksek mukavemet beklenmeyen alanlarda ise çoğunlukla alüminyum malzeme tercih edilebilmektedir. Örnek olarak, otomobilin; arka süspansiyon braketleri, çamurluk kirişi, arka çerçeve rayı takviyeleri, tampon kirişleri, şasi bileşenleri, karmaşık fazlı (CP- Complex Phase) çeliklerden, tekerlek jantı, enerji yutucular (crashbox), koltuk çerçevesi, tampon, kapı panelleri, şasi, jant kapakları, kayış kasnakları gibi elemanlar çift fazlı çeliklerden (DP- Dual Phase) imal edilmektedir. (Karaçalı, 2015: 2).

Kapalı profillerin imalatı temelde dikişli ve dikişsiz imalat yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Dikişli imalat yönteminde sac parçalar istenilen formda kıvrılıp, kenarları kaynak tekniği ile birleştirilirken, dikişsiz imalat yönteminde ekstrüzyon ya da özel haddeleme yöntemi kullanılarak silindirik metal bloklardan kapalı profiller elde edilmektedir (Ünlü,2022). Dikişsiz profil imalatında kullanılan ekstrüzyon yöntemi, kütük bir metal kovan içerisine yerleştirilerek itici bir zımba yardımı ile iş parçası üzerine kuvvet uygulayarak istenilen profilin kesit geometrisine sahip kalıp içerisinden geçirilerek elde edilen bir plastik şekillendirme işlemidir (Demir, 2023).

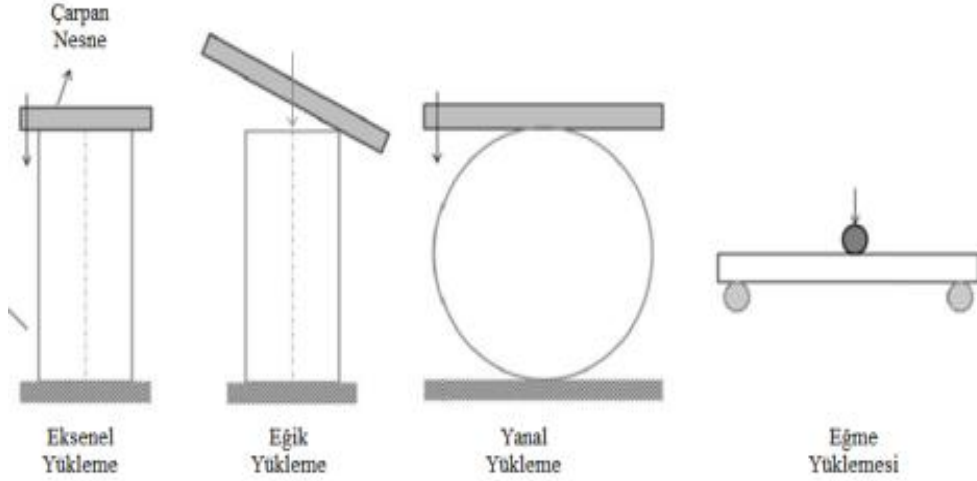


Şekil 2.4. Dikişsiz ve dikişli boru imalatı (Marmara Paslanmaz,2024)

Kapalı profiller sahip oldukları avantajlar sayesinde birçok endüstriyel sektörde kullanılmakta olup;

- Taşımacılık sektöründe otomobil, otobüs, tren, vinç, gemi imalatında,
- İnşaat sektöründe binaların dış cepheleri, çelik konstrüksiyonlar, çatı kaplama gibi destek yapılarında,
- Mobilya sektörü, beyaz eşya sektörü ve yan sanayi sektörleri gibi birçok alanda kapalı kesitli profiller tercih edilmektedir.

Kapalı profillerin yaygın kullanım alanı olan taşıyıcı konstrüksiyonlarda maruz kaldıkları yükleme tipleri, bası ve eğilme temelli bir yüklemedir. Darbe sırasında ise, eksenel, eğik, yanal ve eğilme gibi birçok farklı yükleme durumlarına maruz kalabilmektedir. İnce cidarlı elemanların yanal yüklere maruz kalmaları, elemanlarda eğilme yükleme tipinin meydana gelmesine neden olmaktadır (Günay, 2013: 24).



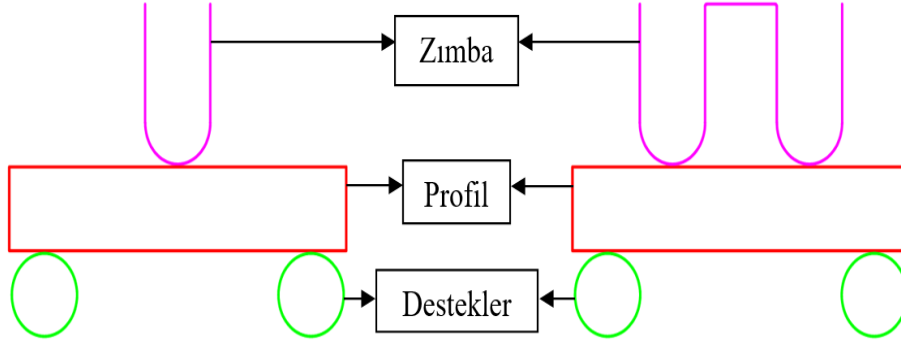
Şekil 2.5. Yükleme tipleri (Baroutaji vd., 2017: 139)

Eğilme altında ince cidarlı elemanın deformasyonu, yükleme konumunda bölgesel bir çökme ile başlamaktadır. Daha sonra yükleme konumunda enine kesitte meydana gelen azalma sebebi ile ince cidarlı elemanda global eğilme meydana gelmektedir. İnce cidarlı elemanlarda eğilme dayanımı; yüklemenin şekline, boyutuna ve konumuna göre önemli ölçüde değişmekte olup, ince cidarlı elemanın enine kesit şekli, eğilme yükü altında enerji absorbe etme karakteristiğini etkilemektedir (Baroutaji vd., 2017: 139).

Kullanılacak profillerin mekanik özelliklerinin bilinmesi ve bir yük altında nasıl davranacağını belirlenmesi önem teşkil etmektedir, bu amaçla ince cidarlı elemanların eğilme deformasyonunun tespiti için eğme testleri uygulanabilmektedir. Bu testler malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek, mukavemeti hakkında bilgi edinmek amacı ile yapılır. Eğilme halindeki bir numunenin iç yüzeye yakın bölgelerinde basma gerilmesi, dış yüzeye yakın bölgede ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Eğilme testleri genellikle, üç noktalı ve dört noktalı eğme şeklinde yapılmaktadır (Çapık&Kaya,2015).

Eğilme testleri sayesinde, malzemenin eğme momenti, eğilme dayanımı, elastisite modülünün hesabı için numunenin deforme olduğu andaki maksimum yükünü, deney sırasında yükün uygulandığı noktada numunenin başlangıçtaki duruma göre düşey eksenindeki değişim miktarı gibi bilgilere ulaşmak mümkün olmaktadır. Üç noktalı eğmede, iki destek üzerinde duran numunenin tam ortasından dik yönde düşey yük uygulanmaktadır. Deformasyonun malzemenin orta bölgesinde ve dik yönde olması istenir. Burada numunede hem basma hem de çekme kuvvetleri meydana gelmekte ve numune deforme olana kadar eğilmektedir. Dört noktalı eğmede ise, iki desteğin üzerinde duran numuneye düşey yönde iki eşit kuvvet uygulanır ve kuvvetlerin uygulandığı noktalar genellikle destekler arası mesafenin 1/3'ü kadardır

(Çapık&Kaya,2015).Üç nokta eğme düzeneğinde yük tek bir merkezi noktadan uygulanarak malzemede yüksek bir gerilme konsantrasyonu oluştururken, dört nokta eğme düzeneğinde ise yük, numunenin ortasından eşit uzaklıktaki iki nokta arasında paylaştırıldığından, desteklerin yarattığı kuvvetler arasında sabit bir moment bölgesi meydana gelerek daha homojen bir gerilme dağılımı sağlar (Hein ve Brancheriau, 2018). Şekil 2.6’da üç nokta eğme ve dört nokta eğme deneylerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.6. Üç nokta ve dört nokta eğme deney düzeneği

Bu yapılardan yüksek dayanım ve yüksek enerji absorbe etme kabiliyeti beklenildiğinden dolayı literatürde bu iki özellik üzerinden ödün vermeden genellikle bu yapıların geliştirilmesinde gerçekleştirilen iki yöntem vardır, bunlar malzeme seçimi ve kesit geometrisidir. İnce cidarlı elemanların, literatürde malzeme üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların özellikle çelik, kompozit ve alüminyum üzerinde yapıldığı görülmüştür (Abdollah ve Hassan, 2013; More vd., 2020; Papaiya vd., 2023). Malzemenin kesit geometrisi incelendiğinde dairesel, dikdörtgen gibi kapalı kesite sahip geometrilerin sıklıkla tercih edildiği görülmüştür (Nichit ve Battu, 2017; Xie vd., 2021).

Eğilme davranışının tasarımında genellikle deneysel ve numerik çalışmalar tercih edilmektedir, numerik analizler ile birlikte tasarımın başlangıç aşamalarında deneme-yanılma sürecinde meydana gelebilecek zaman ve maliyet kayıplarının azaltılması mümkün olmaktadır. Günümüzde bu amaçla en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizidir. Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme davranışının doğru ve hassas şekilde modellenmesi tahmin hassasiyetini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Malzemede meydana gelen plastik deformasyonların modellenmesi ise malzemenin davranışını tanımlayan plastisite modelleri ile mümkün olmaktadır (Zhang vd., 2014; Esener, 2020). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde plastisite modellerinin birbirleri ile kıyaslanmasının yapıldığı az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır (Reyes vd., 2004; Zhu vd., 2012).

Yukarıda anlatılanlar ışığında, 304 L kalite paslanmaz çelik profilin literatürde eğilme yüklemesi altındaki davranışının yeteri kadar çalışılmadığı görülmüştür. Bu amaç doğrultusunda, literatürde ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen dairesel ve kare kesitli geometriye sahip 304L kalite paslanmaz çelik profillerin üç nokta ve dört nokta eğme yüklemesi altındaki davranışı incelenip, Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

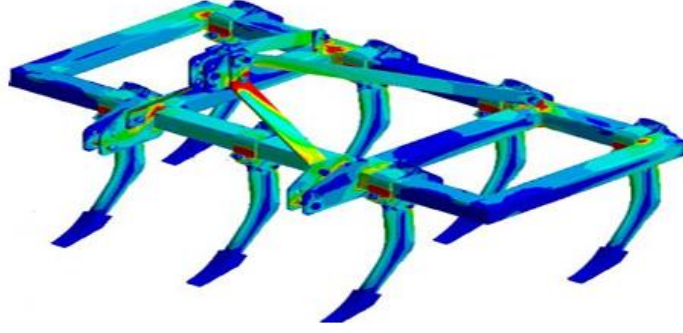
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Mühendislik uygulamaları kapsamında yapılan çalışmaların, daha iyi anlaşılması ve geliştirilmesi bakımından sonuçlarının bilinmesi gereklidir. Karmaşık ve anlaşılması güç yapısından dolayı birçok mühendislik uygulaması sonuçlarının elde edilmesi noktasında oldukça zahmetli olup, yapılacak bir işlemin hesaplamaları ve sonuçların elde edilmesi uzun sürebilmektedir. (Yıldız, 2017). Mühendislik alanındaki problemlerin sabit olmaması ve değişkenlerin çok fazla olması nedeniyle problemlerin tam olarak çözmek yerine, belli sınırlar çizilerek yaklaşık çözümler tercih edilmektedir. (Sarıkanat, 2007: 85).

Sonlu elemanlar yöntemi, sınır değer problemlerinin sonuçlarını yaklaşık olarak hesaplayan ve simüle eden bir sayısal metottur. Bu metot ile metal şekillendirme, termodinamik problemler, statik analizler, akışkan problemleri gibi farklı alanlarda hesaplamalar yapmak mümkündür. Bu analizler sonucunda, parça üzerinde oluşan deformasyon, gerilme, gerinim, sıcaklık, hız güvenlik katsayısı gibi birçok veri sayısal olarak hesaplanabilmektedir (Yıldız, 2017).

Bu yöntem ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlanmış olup, ilk kullanıcılar Boeing, Bell Aerospace ve Rolls Royce firmalarıdır (Güler ve Şen, 2015: 56). Yöntemin ana fikrini oluşturan ilk makale 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından yayınlanmış, 1960 yılında Clough ilk kez sonlu elemanlar terimini kullanmıştır (Eröz, 2004). Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, 1970'lerde olgun hale gelen yöntem günümüzde makine, elektrik, uçak, inşaat, hidrodinamik, atom gibi çeşitli mühendislik alanlarının yanı sıra, tıpta ortopedi, kalp ve damar cerrahisi, estetik cerrahi dallarında da kullanılmaktadır (Belytschko, 2007:7).

Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makine elemanının (motor blokları, pistonlar vs.) kolayca incelenebilmesi, çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak uygun tasarımın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmıştır (Öztürk, 2008). Sonlu elemanla analizi yapılan örnek bir çizel aleti Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sonlu elemanlar analizi yapılan çizel aleti (Çelik vd., 2007: 114)

Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilmesi, bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgelerin, değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimlerin incelenebilmesi, sebep sonuç ilişkisine ait problemler, sınır şartları kolayca uygulanabilmesi sonlu elemanlar yöntemini diğer nümerik yöntemlerden üstün kılan özelliklerdir (Çetin, 2007).

Sonlu elemanlar yönteminin üç temel özelliği bulunmaktadır. İlk olarak, geometrik bakımından sabit olmayan çözüm alanları sonlu elemanlar yöntemiyle basit alt kısımlara ayrılmaktadır. Ardından her kısımdaki elemanın, sürekli fonksiyonları, cebirsel polinomları lineer kombinasyonu bakımından oluşturulabileceği varsayılmaktadır. Son olarak istenilen hassasiyette sonuçların bulunabilmesi için yeterli miktarda düğüm noktalarının oluşturulması gerekmektedir (Mamalis vd., 1997: 54). Sonlu elemanlar metodu, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek, sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesi prensibine dayanır. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde farklı metotlar içinde en çok kullanılan dört temel yöntem aşağıdaki gibidir (Öztürk, 2008).

- Direkt yaklaşım: Bu yaklaşım tek boyutlu ve basit problemler için uygun olmaktadır.
- Varyasyonel yaklaşım: Bir fonksiyonelin ekstremize yani maksimum ve minimum edilmesi prensibine dayanır.
- Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı: Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamlarını minimize etme prensibine dayanır.
- Enerji dengesi yaklaşımı: Bir sisteme giren ve çıkan termal ya da mekanik enerjilerin eşitliği ilkesi ile ilgili olan bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç göstermeyip, çözüm işleminde izlenecek yolu değiştirmez.

Çözüm yöntemindeki adımlar ise;

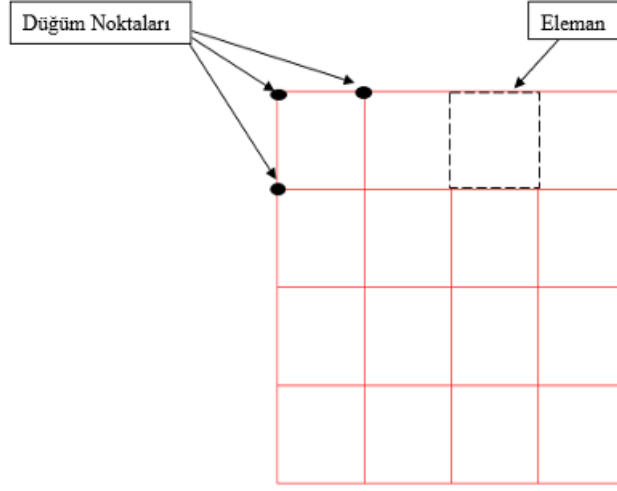
1. Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
2. Interpolasyon fonksiyonlarının seçilmesi,
3. Eleman direngenlik matrisinin teşkil edilmesi,
4. Sistem direngenlik matrisinin hesaplanması,
5. Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
6. Sınır şartlarının belirlenmesi ve
7. Sistem denklemlerinin çözümüdür (Kırlı, 2003).

Sonlu elemanlar analizini oluşturan elemanlar boyutlarına göre tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve dönel elemanlar olarak dörde ayrılır (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

- Tek Boyutlu Elemanlar: Tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılan elemanlardır.
- İki Boyutlu Elemanlar: İki boyutlu (düzlem) problemlerin çözümünde kullanılırlar ve bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır.
- Üç Boyutlu Elemanlar: Bu grupta temel eleman üçgen piramit olup, buna ek olarak, altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.
- Dönel Elemanlar: Eksensel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde kullanılan elemanlardır. Bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar (Köleoğlu, 2019).

Sonlu elemanlar analizinde sac metal şekillendirme için açık (eksplicit) ve kapalı (implicit) yöntem olmak üzere temelde 2 farklı yöntem mevcuttur. Açık yöntemler sistemin durumundan hareketle bir sonraki durumu hesaplarlarken, kapalı yöntemler sistemin hem şimdiki hem de hesaplanan bir sonraki durumunu kullanarak denklemleri çözüp sistemin durumunu hesaplamaktadır (Şen, 2015).

Sonlu elemanlar yöntemi, ilgili geometrileri daha küçük sonlu parçalara ayırarak sınır koşulları ve yükleme durumlarına göre modelleyerek çözüm yapma prensibi ile çalışmaktadır (Esener, 2015). Ayrılan her bir parçaya eleman, elemana ait köşe noktalarına düğüm noktası ve tüm bu sisteme ağ yapısı denilmektedir. Ağ yapısı elemanları Şekil 3.2.'de verilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısının oluşturulması en temel parametrelerdendir.

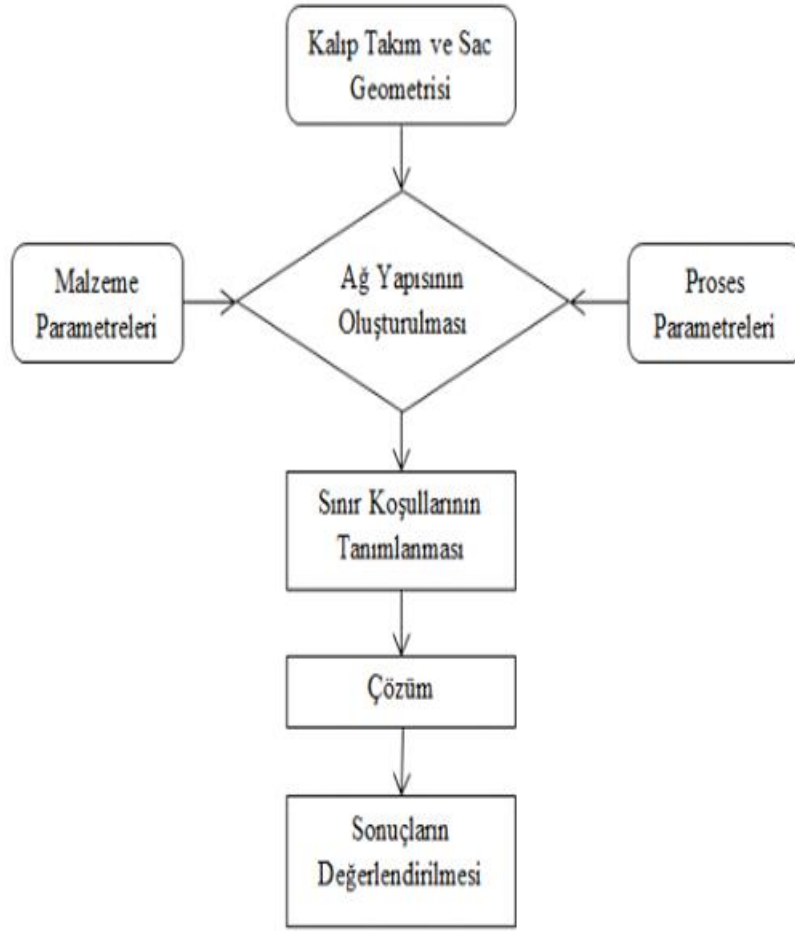


Şekil 3.2. Örnek ağ yapısı

Gerçeğe en yakın sonucu alabilmek için sonlu elemanlar analizleri yapılırken bazı adımların bilinmesi gerekmektedir. Bu adımlar;

- Problem tipinin (statik, dinamik, termodinamik) belirlenmesi,
- Bilgisayar destekli çizim programları gibi yardımcı çizim programları kullanılarak iş parçasının ve araçların şekillerinin oluşturulması,
- Sonlu eleman ağ yapısının oluşturulması,
- İş parçasına ait malzeme davranışların ve mekanik özelliklerin tanımlanması,
- Modelin hareketli ve sabit parçaları, temas yüzeylerinin, temas türlerinin sürtünme verileri gibi sınır koşullarının belirlenmesi,
- Çözümlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi olarak sıralanabilir (Yıldız, 2017).

Şekillendirme prosesinde örnek bir sonlu elemanlar akış diyagramı Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Akış diyagramı (Köleoğlu,2019)

Gerçeğe en yakın sonucu alabilmek için sonlu elemanlar analizlerinde akış diyagramında yer alan parametrelere ek olarak eleman tipinin ve boyutunun belirlenmesi ve malzeme modelinin tespiti sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir. Genellikle en etken parametrenin malzemenin plastisite modelleri olduğu görülmektedir. Farklı kabullere sahip birçok malzeme modeli bulunmaktadır. Dolayısıyla denenecek proses koşulları ve kullanılacak malzeme dikkate alınarak gerçeğe en yakın sonucu verecek malzeme modeli tercih edilmesi gerekmektedir (Esener, 2015).

Plastisite modelleri malzemelerin plastik davranışını modelleyen matematiksel ifadelerdir. Bir malzemenin genel gerilme durumu altında plastik davranışının modellenmesi için akma kriterine, akma kuralına ve pekleşme kuralına ihtiyaç vardır (Esener, 2020). Akma kriteri akmanın başlangıcını, akma kuralı gerilme ve gerinim oranı arasındaki ilişkiyi ve pekleşme de başlangıç akma gerilmesinin gelişimini ifade eder. (Slater, 1977).

Plastisite modellerini izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme- kinematik pekleşme kabulü yapan modeller olarak üç grupta incelemek mümkündür (Gürsoy ve Esener, 2019). Bu doğrultuda literatürde birçok plastisite modeli bulunmaktadır (Feng vd., 2019; Javanmardi ve Maheri, 2019; Meng vd., 2019; Zhou vd., 2019).

Sac metal malzemelerin kalınlık yönünün diğer iki yönlerine göre daha küçük olması nedeniyle sac metal proseslerinde kalınlık yönündeki gerilmeler ihmal edilebilir. Bu sayede sac metal problemleri 3 boyutlu halden 2 boyutlu hale gelerek, 2 boyutlu yüzey modelleme yapılmaktadır. Bu modelleme düzlem gerilme problemleri olarak tanımlanır ve plastisite modelleri düzlem gerilme problemleri olarak çözülür.

Hill-48, malzemeyi anizotropik olarak kabul eden ve günümüzde hala en sık kullanılan plastisite modelidir. Düzlem gerilme durumu için ise Hill 48 akma kriteri şu hali alır (Hill, 1948). Burada F, G, H, N malzemenin anizotropi parametrelerine bağlı katsayılarıdır.

$$(G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (D.1)$$

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, G = \frac{1}{1+r_{90}}, H = \frac{r_0}{1+r_{90}}, N = \frac{(r_0+r_{90})(2r_{45}+1)}{(2r_{90})(1+r_0)} \quad (D.2)$$

Burada r_0 , r_{45} ve r_{90} sırasıyla; hadde yönündeki, hadde yönüne 45 derecedeki ve hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi katsayılarını temsil etmektedir.

Anizotropik malzeme kabulü yapan bir başka model, Barlat-89 modeli Barlat ve Lian tarafından 1989 yılında geliştirilmiştir ve akma yüzeyi malzemenin anizotropik parametrelerine bağlı olarak elde edilmektedir. Düzlem gerilme problemleri için Barlat-89 modeli en genel formuyla eşitlik 3'teki gibi ifade edilmektedir (Barlat, 1989);

$$2\sigma_Y^m = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|K_2|^m \quad (D.3)$$

Burada σ_Y akma gerilmesidir. K_1 ve K_2 farklı yönlerdeki akma gerilmelerine bağlı parametrelerdir. Bu denklemde bulunan m üsteli ise malzemenin kristal kafes yapısı ilgilidir. Barlat-89 modeline göre yüzey merkezli kübik malzemeler için m değeri 8, hacim merkezli kübik malzemeler için ise m değeri 6 olarak kullanılması önerilmektedir (Harpell vd., 2000). Barlat-89 modeline ait denklemdeki K_1 ve K_2 değerleri eşitlik 4'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$K_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2}, K_2 = \left[\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (D.4)$$

a, c ve h ise anizotropi katsayılarına bağlı parametrelerdir ve deneysel olarak elde edilen anizotropi (r_0, r_{90}) değerleri kullanılarak eşitlik 5'teki gibi hesaplanmaktadır ve p parametresi optimizasyon yapılarak elde edilmektedir. Barlat-89 modeli sonlu elemanlar analizlerinde basit yapısı ve az malzeme parametresi nedeniyle sıklıkla tercih edilen modellerden biridir (Harpell vd., 2000; Liu vd., 2021).

$$a = 2 - c = 2 - 2 \sqrt{\frac{r_0}{(1+r_0)} \frac{r_{90}}{(1+r_{90})}}, h = \sqrt{\left(\frac{r_0}{1+r_0}\right) \left(\frac{(1+r_{90})}{r_{90}}\right)} \quad (D.5)$$

Nümerik analiz ile birlikte üretimde meydana gelebilecek hataların tasarım aşamasında tespit edilip telafi edilebilmesiyle deneme yanılma sürecinde meydana gelebilecek zaman ve maliyet kayıplarının azaltılmasıyla avantaj sağlamaktadır (Esener, 2015). Tahmin hassasiyetinin artması için malzeme davranışının doğru bir şekilde tanımlanması ve buna göre modellenip analiz edilmesi son derece önemlidir. Malzemenin plastik davranışını modelleyen plastisite modellerinin seçimi doğrudan sonlu elemanlar analiz sonuçlarını etkilemektedir.

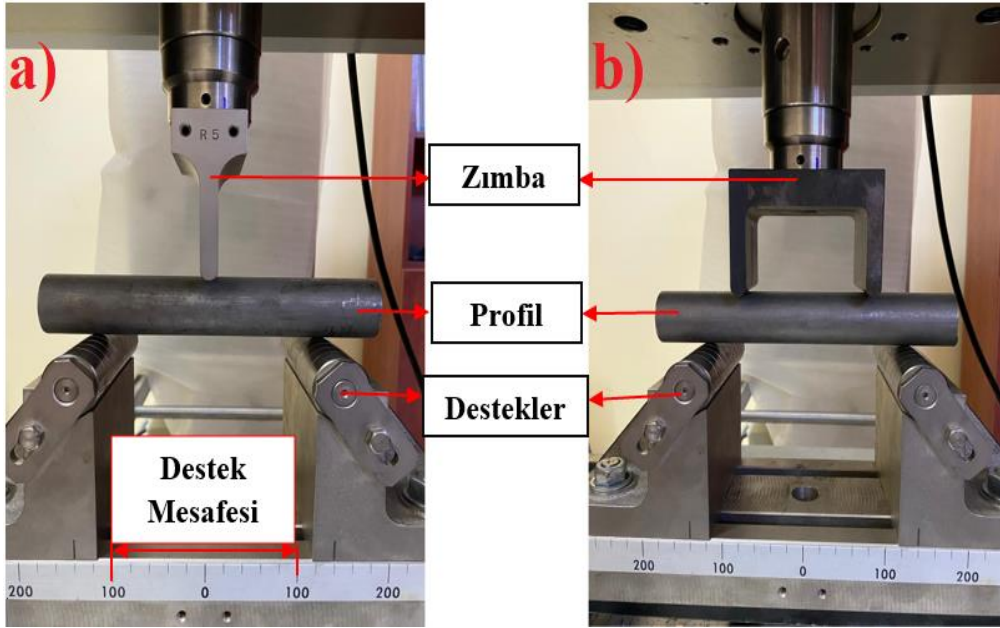
Bu tez çalışmasında, Barlat-89 ve Hill48 modelleri kullanılarak, 304 L paslanmaz çelik için gerekli olan mekanik özellikler belirlenmiş, plastisite modellerinin hassasiyetinin incelenmesi amaçlanmıştır.

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu tez çalışmasında; 304 L kalite paslanmaz çelik malzemenin üç nokta eğme ve dört nokta eğme yüklemesi altındaki davranışı farklı proses parametreleriyle incelenmiştir. Bu doğrultuda kare ve daire olmak üzere iki farklı kesit geometrisi ve üç farklı destek mesafesi proses parametreleri olarak kullanılmıştır. Tüm prosesler, Barlat-89 ve Hill-48 malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilip, malzeme modellerinin eğilme davranışının tahmin performansı incelenmiştir.

4.1. Deneysel Çalışmalar

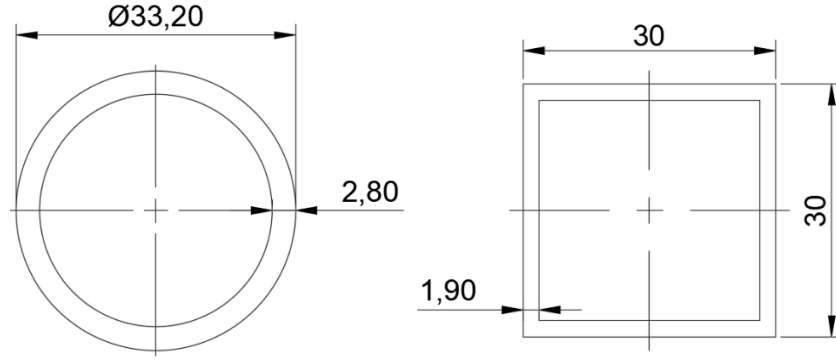
Çalışmanın ilk adımında, malzemenin eğilme davranışını belirlemek adına üç nokta ve dört nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir ve gerçekleştirilen testler sonucunda kuvvet-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Üç nokta ve dört nokta eğme deneyine ait düzenek Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. a) Üç nokta eğme b) dört nokta eğme deney düzeni

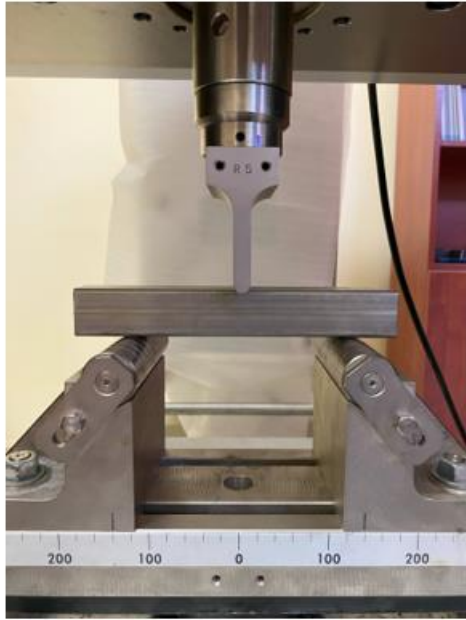
Deneylerde kullanılan zımba yarıçapı 5 mm, desteklerin yarı çapı 15 mm'dir ve deney çalışması kapsamında 140 mm, 160 mm ve 180 mm destek mesafesi kullanılmıştır. Deneyler sabit 15 mm/dakika hız ve 20 mm şekillendirme mesafesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deney numunesi olarak boru kesit profil ve kare kesit profil kullanılmış olup tüm numunelerin boyu 200 mm'dir. Çalışma kapsamında kullanılan numune geometrilerine ait ölçüler sırasıyla daire kesitli ve kare kesitli profil olarak Şekil 4.2.'de verilmiştir, tüm ölçüler mm cinsindedir.

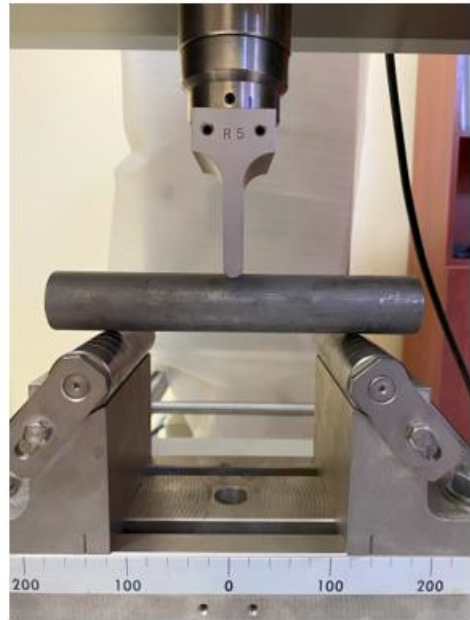


Şekil 4.2. Numune ölçüleri

Deneyler sabit boy, şekillendirme mesafesi ve şekillendirme hızında gerçekleştirilmiştir. İki farklı kesite sahip profillerin eğme testleri, üç farklı destek aralığında (S: 140 mm, 160 mm, 180 mm) incelenmiştir. Tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerin de 140 mm destek aralığı S140, 160 mm destek aralığı S160 ve 180 mm destek aralığı S180 olarak adlandırılmıştır. Deneyler her bir kesit için üç farklı destek aralığında ve her destek aralığı için ise 2 tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3.'de iki farklı kesit geometrisine sahip profillerin deforme olmamış halleri üç nokta eğme test düzeneğinde, Şekil 4.4.'de dört nokta eğme test düzeneğinde gösterilmiştir.

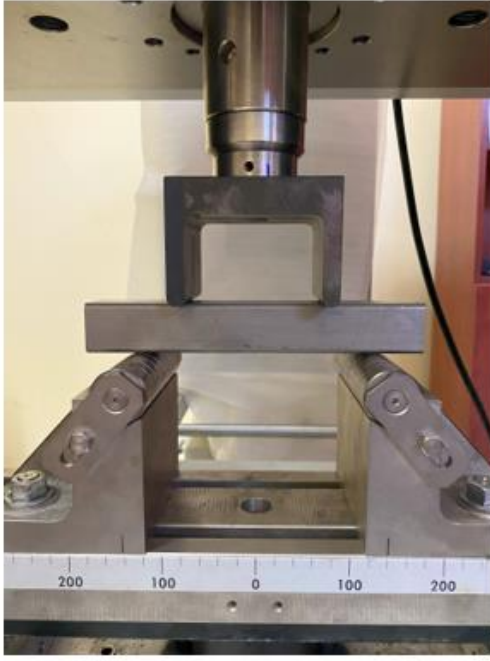


Üç Nokta Eğme Kare Profil

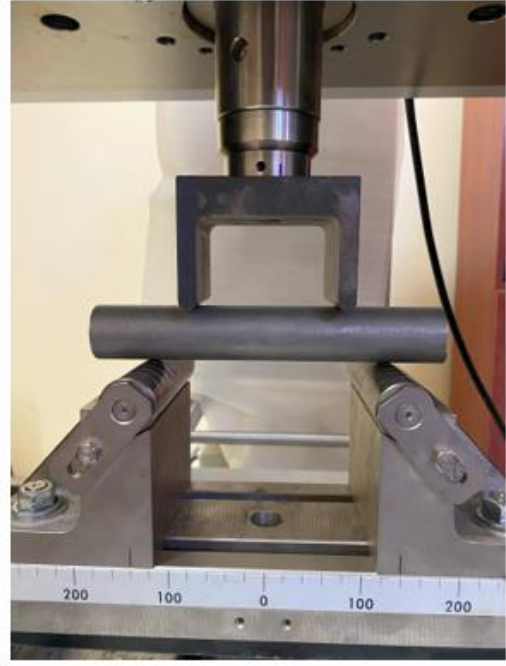


Üç Nokta Eğme Daire Profil

Şekil 4.3. Üç nokta test düzeneğinde deforme olmamış numuneler



Dört Nokta Eğme Kare Profil



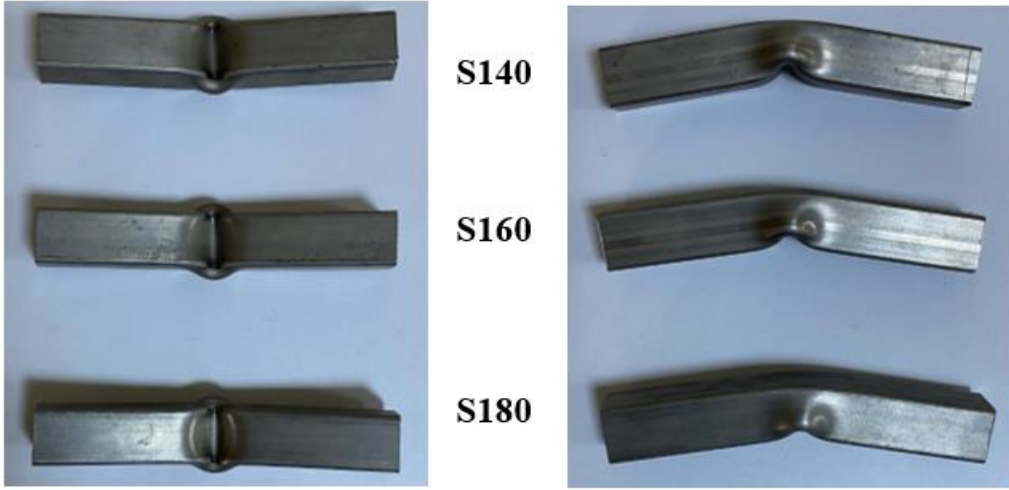
Dört Nokta Eğme Daire Profil

Şekil 4.4. Dört nokta test düzeneğinde deforme olmamış numuneler

Üç nokta ve dört nokta eğme deneyleri sonrasında her bir kesit için farklı destek aralıklarında deforme olmuş profillerin karşılaştırılmalı fotoğrafları Şekil 4.5.- 4.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Üç nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş daire kesitli numuneler



Şekil 4.6. Üç nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş kare kesitli numuneler

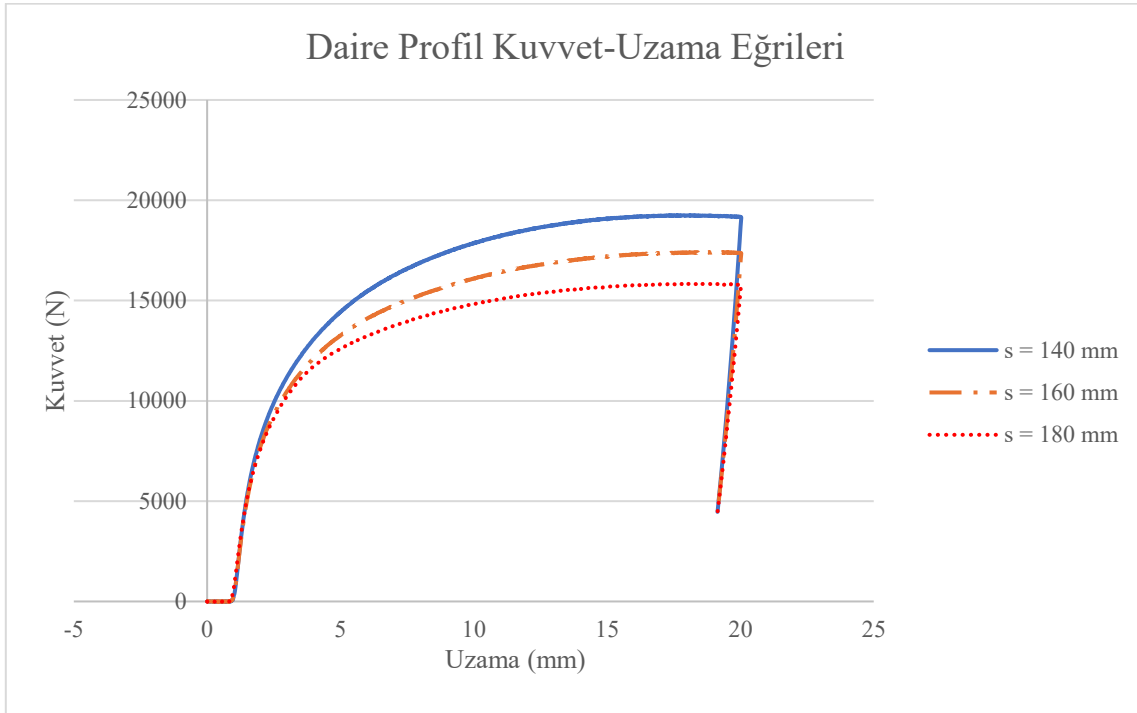


Şekil 4.7. Dört nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş daire kesitli numuneler

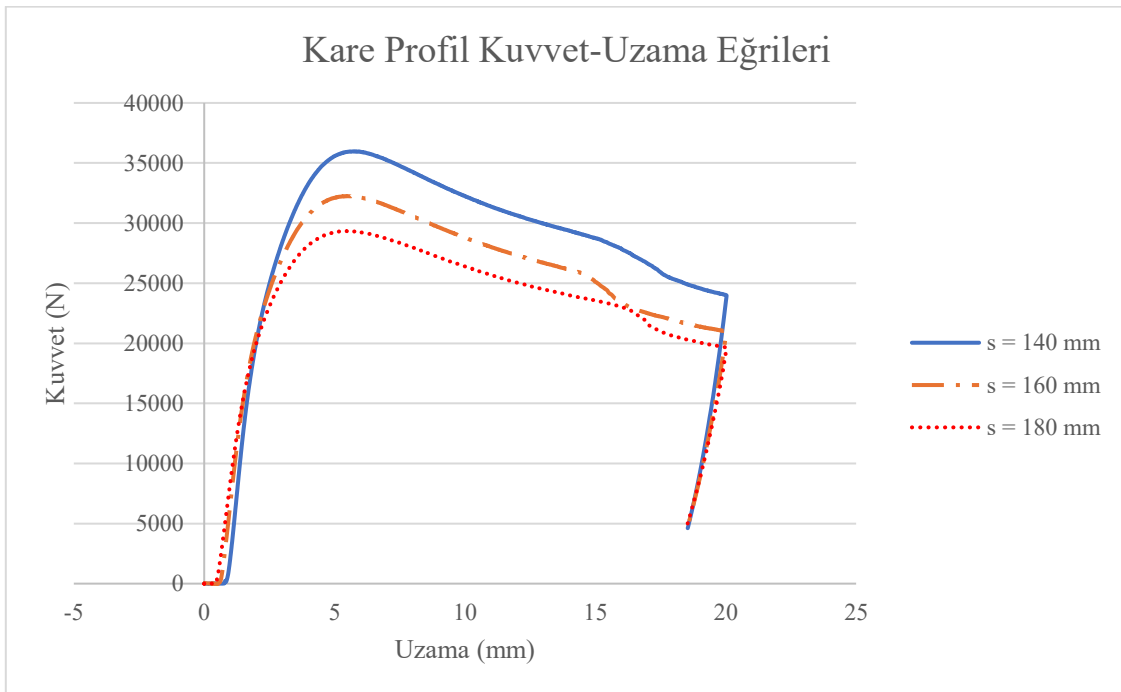


Şekil 4.8. Dört nokta test düzeneğinde farklı destek aralıklarında deforme olmuş kare kesitli numuneler

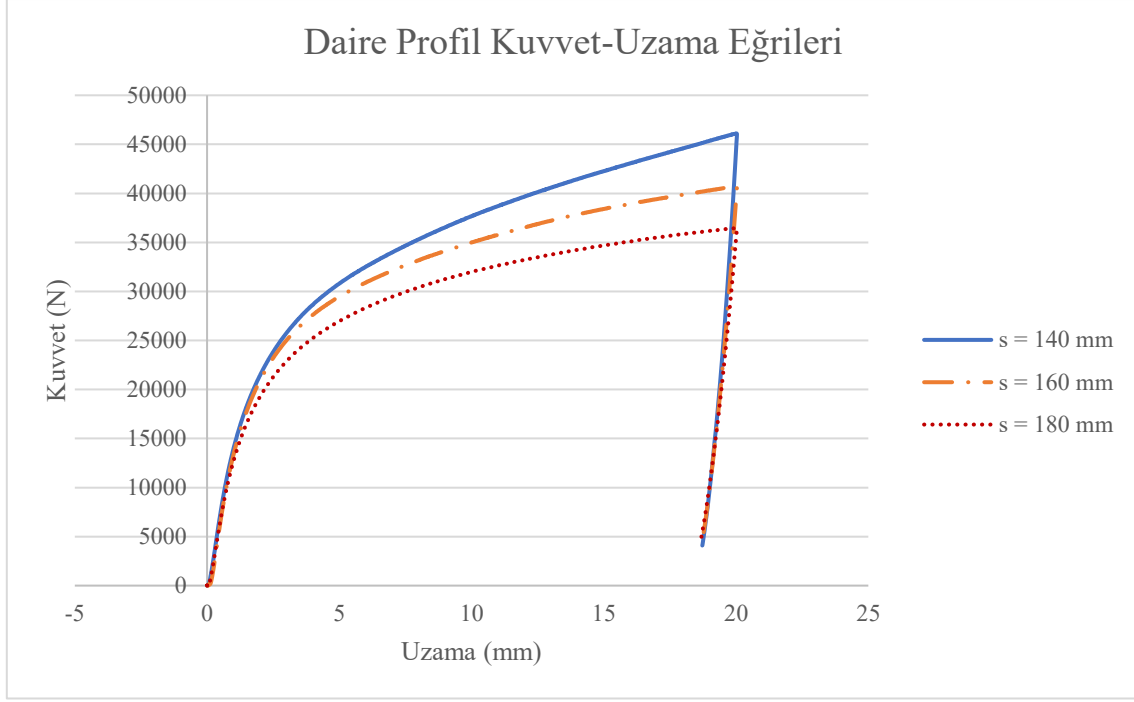
Yapılan deneyler sonucunda test cihazından kuvvet ve uzama verileri alınmıştır. Daha sonra bu veriler kullanılarak üç nokta eğme ve dört nokta eğme deneyleri sonucunda farklı destek mesafelerinde kuvvet-deplasman eğrileri elde edilmiş, Şekil 4-9.- 4.12.'de verilmiştir.



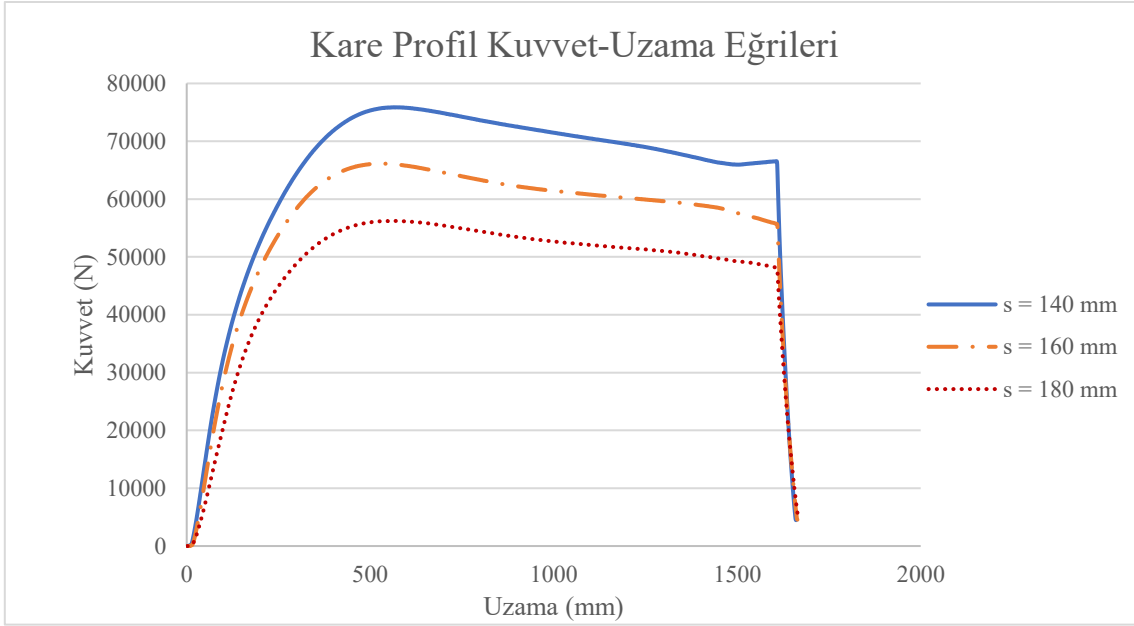
Şekil 4.9. Üç nokta eğme deney sonucunda elde edilen daire profil kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 4.10. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen kare profil kuvvet-deplasman eğrileri

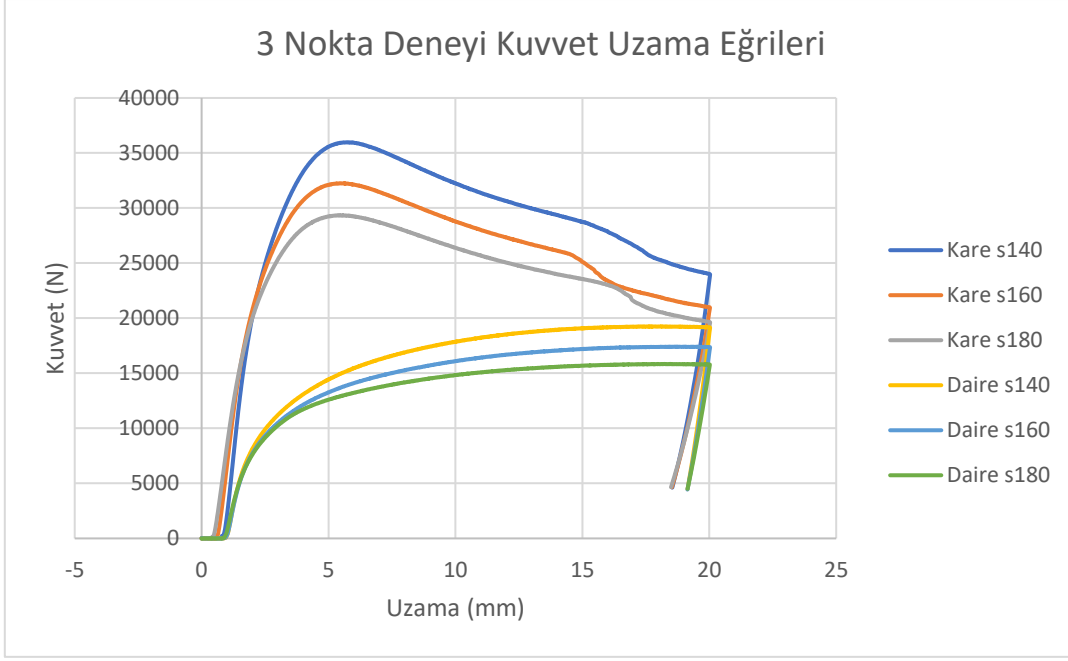


Şekil 4.11. Dört nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen daire profil kuvvet-deplasman eğrileri

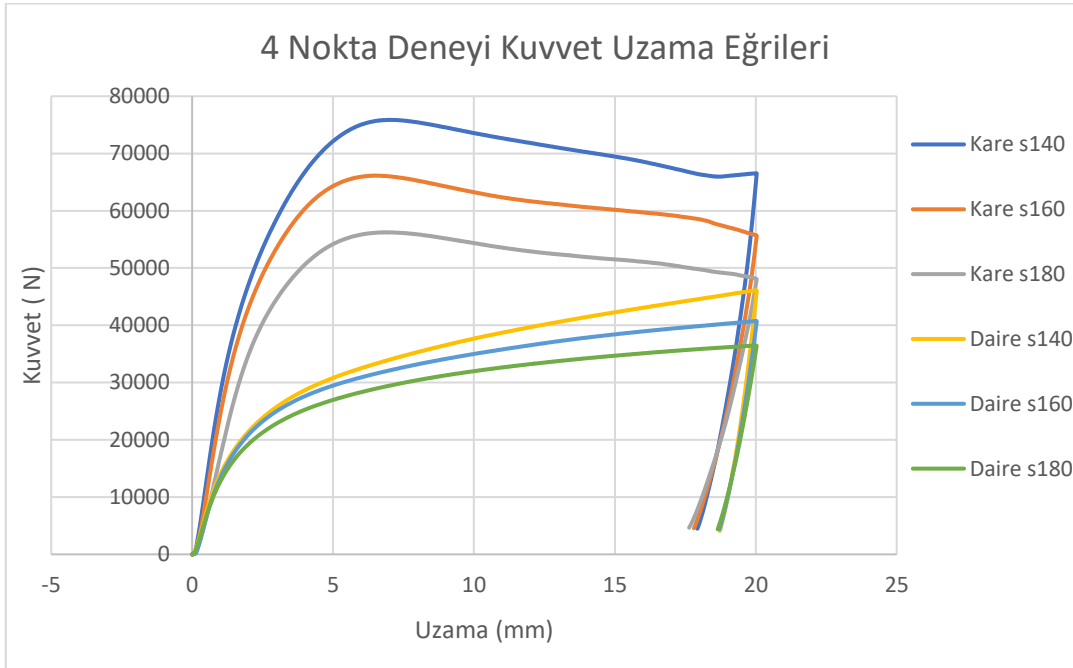


Şekil 4.12. Dört nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen kare profil kuvvet-deplasman eğrileri

Üç nokta ve dört nokta deneylerinden S140, S160 ve S180 destek aralıklarında elde edilen veriler farklı kesit geometrilerine göre Şekil 4.13. ve Şekil 4.14'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13. Farklı kesit geometrilerine göre üç nokta eğme deneyi kuvvet uzama eğrileri



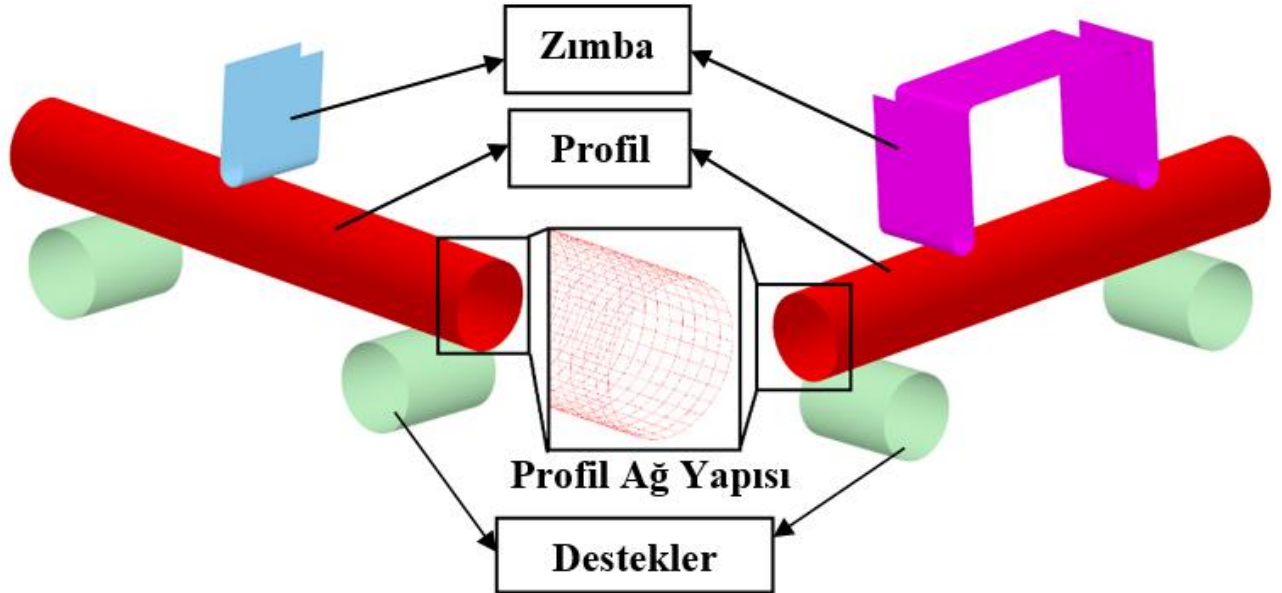
Şekil 4.14. Farklı kesit geometrilerine göre dört nokta eğme deneyi kuvvet uzama eğrileri

DeneySEL sonuçlar incelendiğinde hem üç nokta hem de dört nokta eğme için tüm kesitlerde destek mesafeleri arasındaki uzaklık arttıkça eğilme için gerekli olan kuvvetin azaldığı görülmüştür, bu etkinin momentten kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

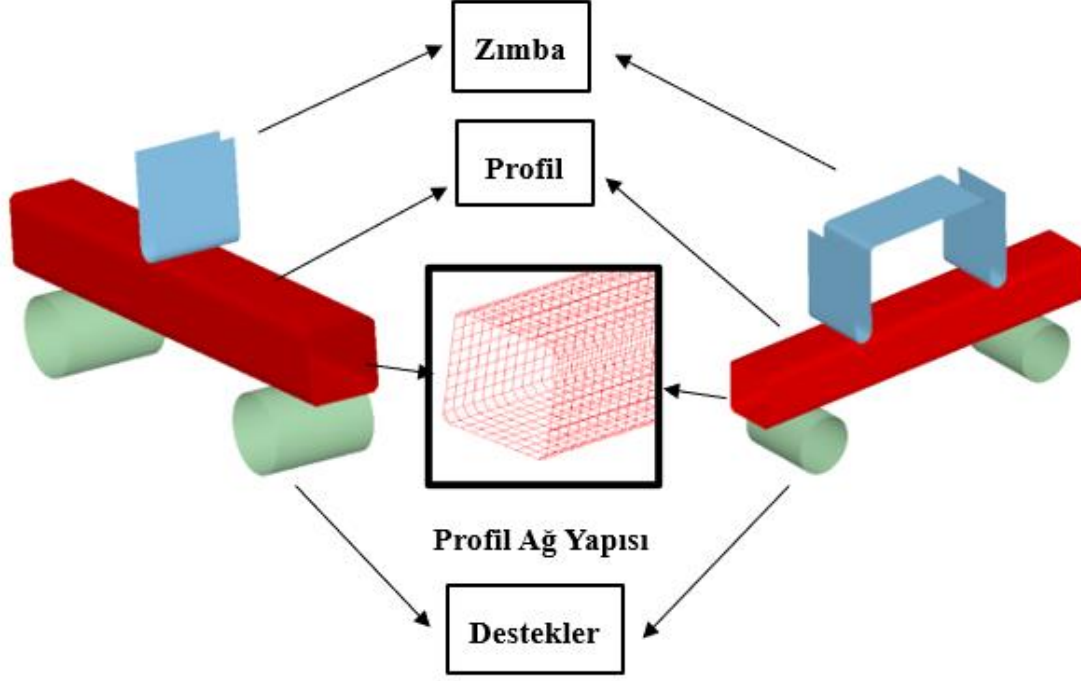
4.2. Sonlu Elemanlar Analizleri

Tez çalışmasının bu aşamasında, deneysel çalışmalar, sonlu elemanlar analizleri kullanılarak simüle edilmiştir. İlk olarak üç nokta ve dört nokta eğme prosesinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, kalıp elemanları yani, profiller, zımba ve destekler rijit olarak tasarlanmıştır. Profilin ağ yapısı kalıp elemanlarına göre daha hassas oluşturulmuştur. Malzemenin kalınlık yönündeki boyutu, boyu ve genişliğine kıyasla ihmal edilebilir durumda olduğundan dolayı problem düzlem gerilme durumu altında incelenmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan yazılım, Eta/Dynaform yazılımıdır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli dairesel kesitli profil için Şekil 4.15.'de, kare profil için Şekil 4.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Daire profil sonlu elemanlar modeli



Şekil 4.16. Kare profil sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modelinin hesaplamalarına ait parametreler ise Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri

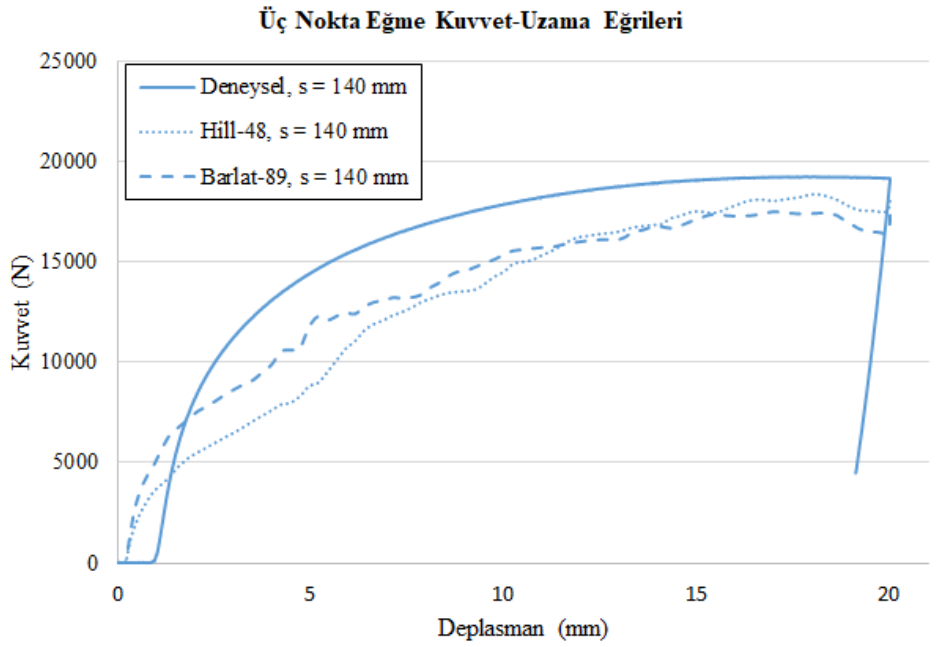
Parametre	Değer
Eleman ağ yapısı boyutu	1 mm
Eleman sayısı (Daire Profil)	2144
Eleman sayısı (Kare Profil)	2412
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Tez çalışmasında, 3. bölümde bahsedilen Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak proseslerin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinin bu plastisite modelleriyle incelenebilmesi için, tez çalışmasında kullanılan 304L kalite paslanmaz çelik profillere ait malzeme özellikleri ise Tablo 4.2.'deki gibidir.

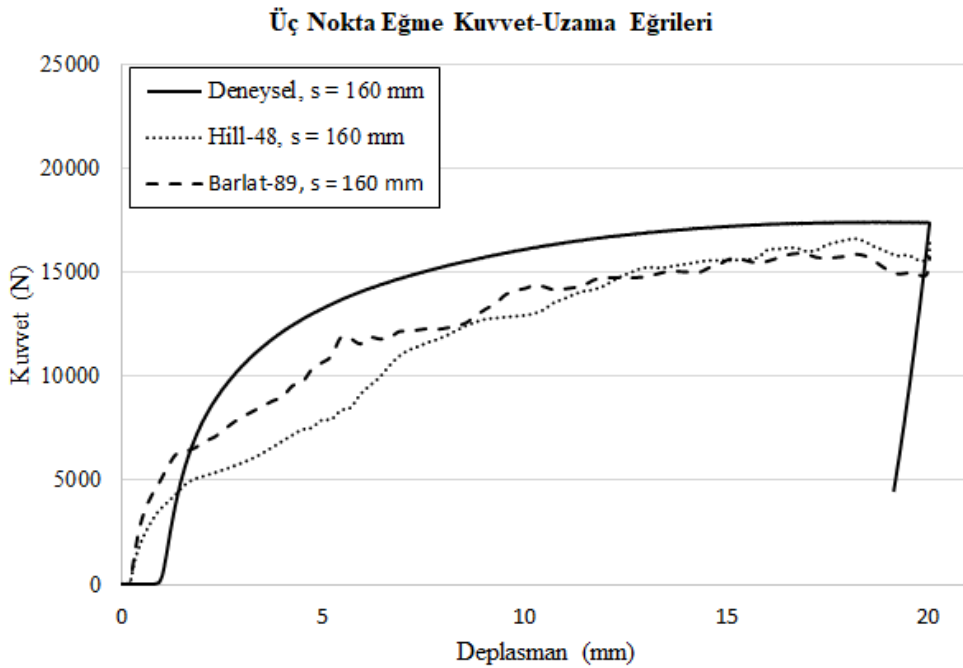
Tablo 4.2. 304L kalite paslanmaz malzemesinin mekanik özellikleri (Othmen vd., 2020)

Mekanik Özellik	Değer
Elastisite Modülü (GPa)	207
Akma Gerilmesi (MPa)	278
Mukavemet Katsayısı (MPa)	1565
Pekleşme Üsteli	0.46
r_0	0.87
r_{45}	1.16
r_{90}	0.82

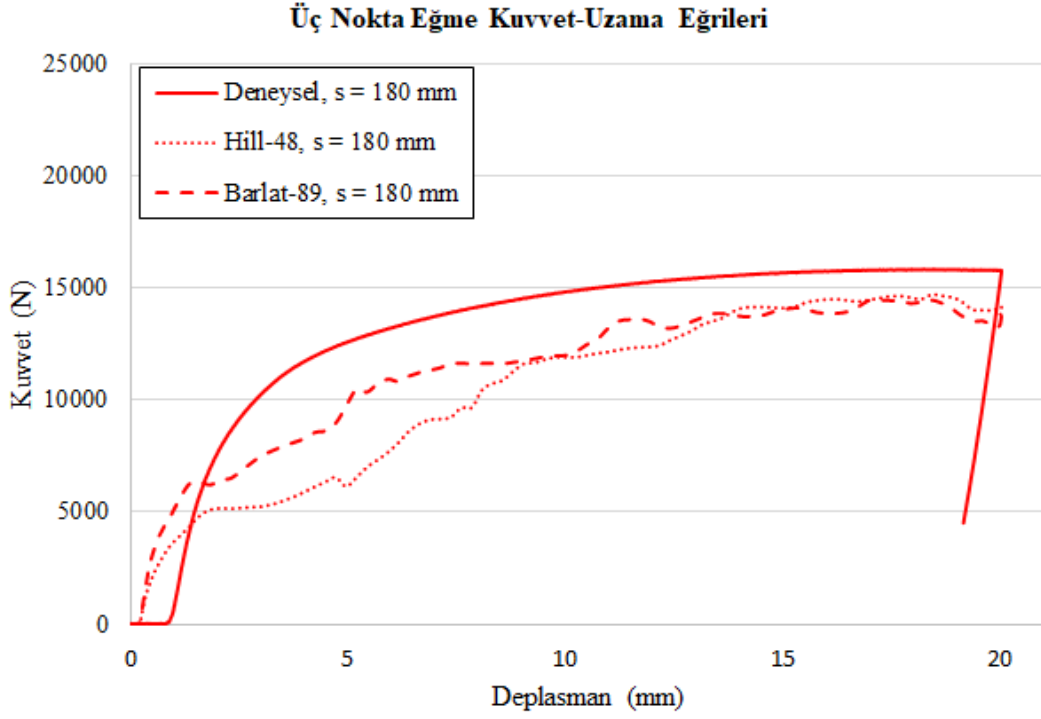
Sonlu elemanlar analizlerinden de kuvvet uzama grafikleri elde edilmiş ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Dairesel kesitli profile ait kıyaslanan veriler Şekil 4.17- 4.22’de gösterilmiştir.



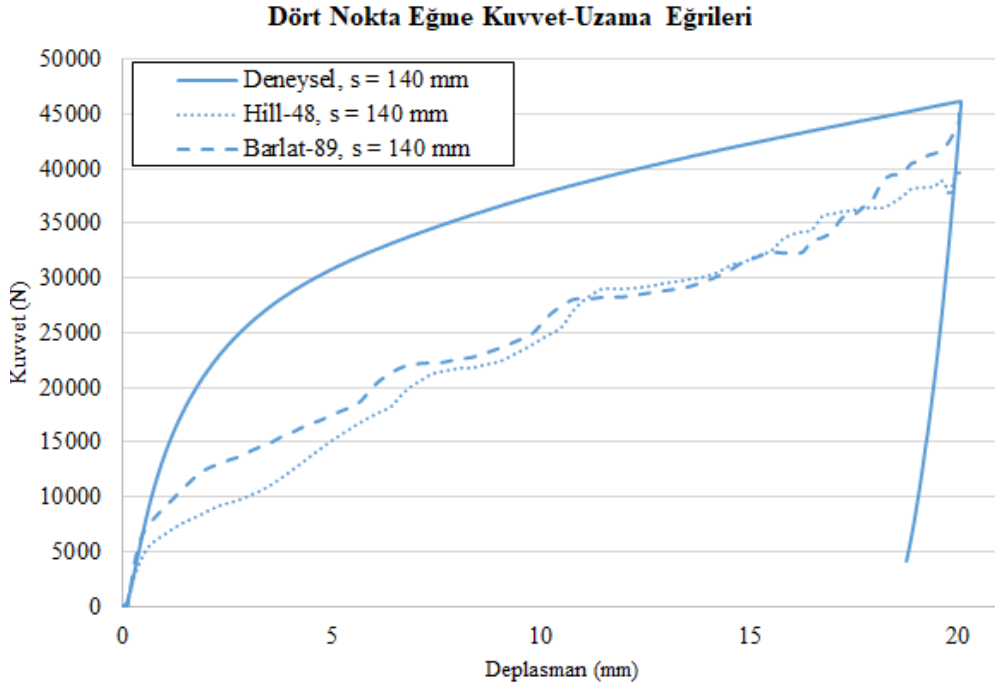
Şekil 4.17. S140 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



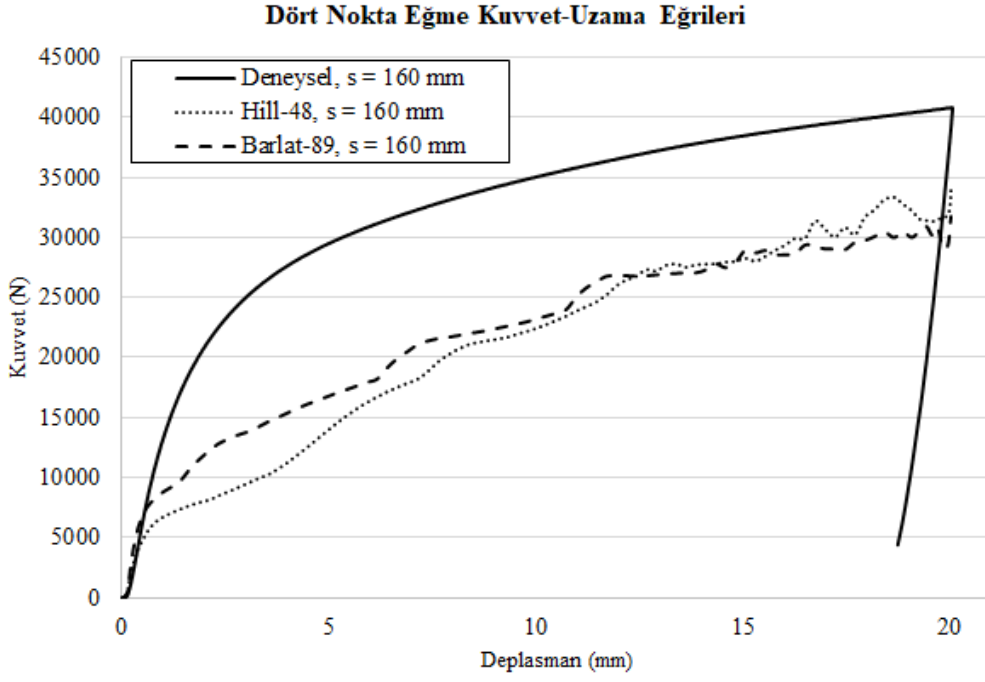
Şekil 4.18. S160 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



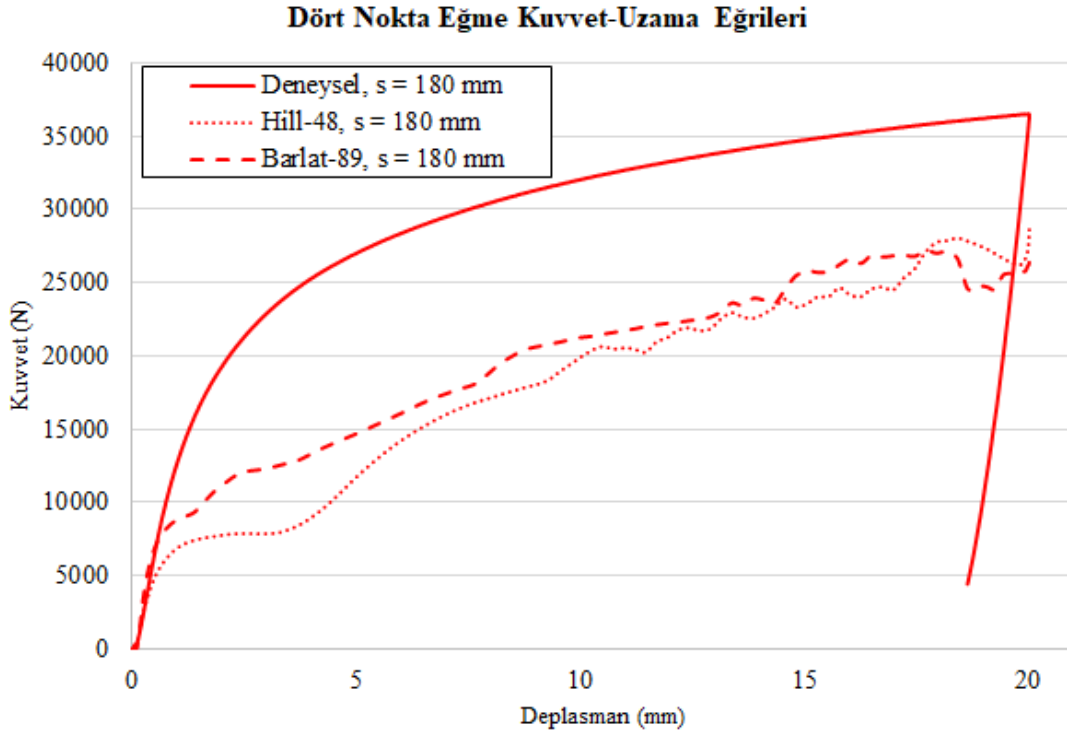
Şekil 4.19. S180 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



Şekil 4.20. S140 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması

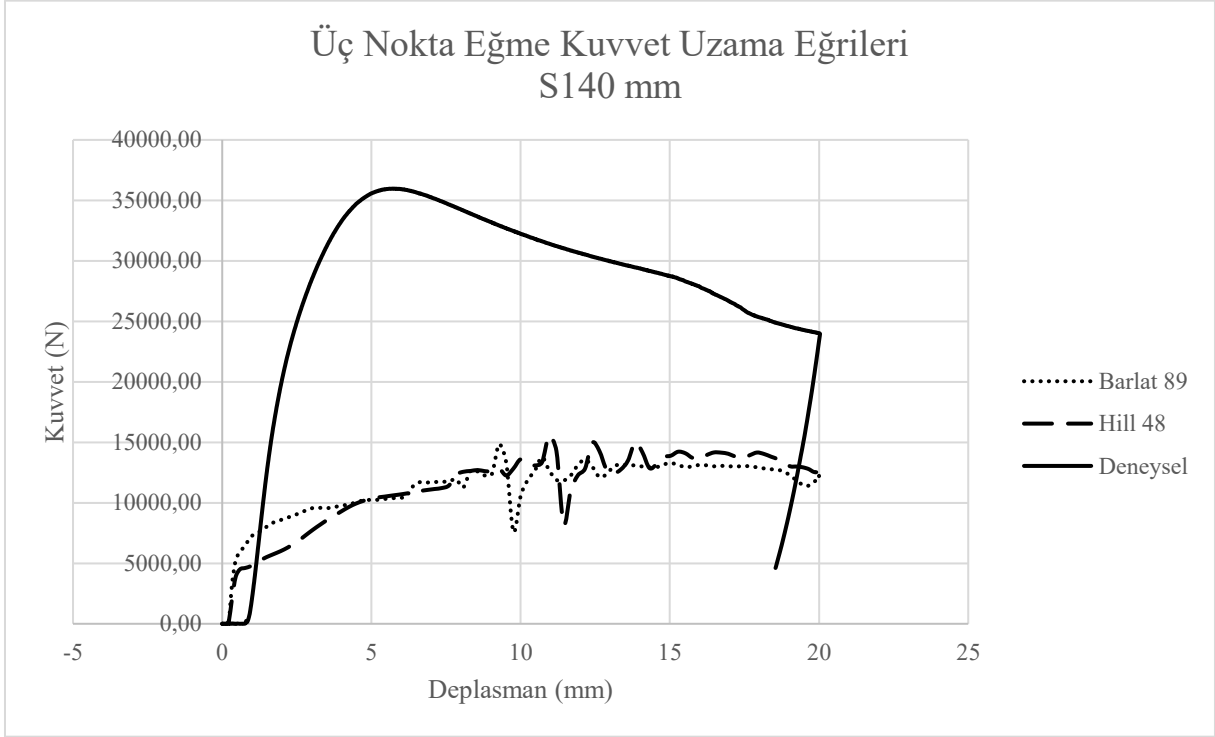


Şekil 4.21. S160 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması

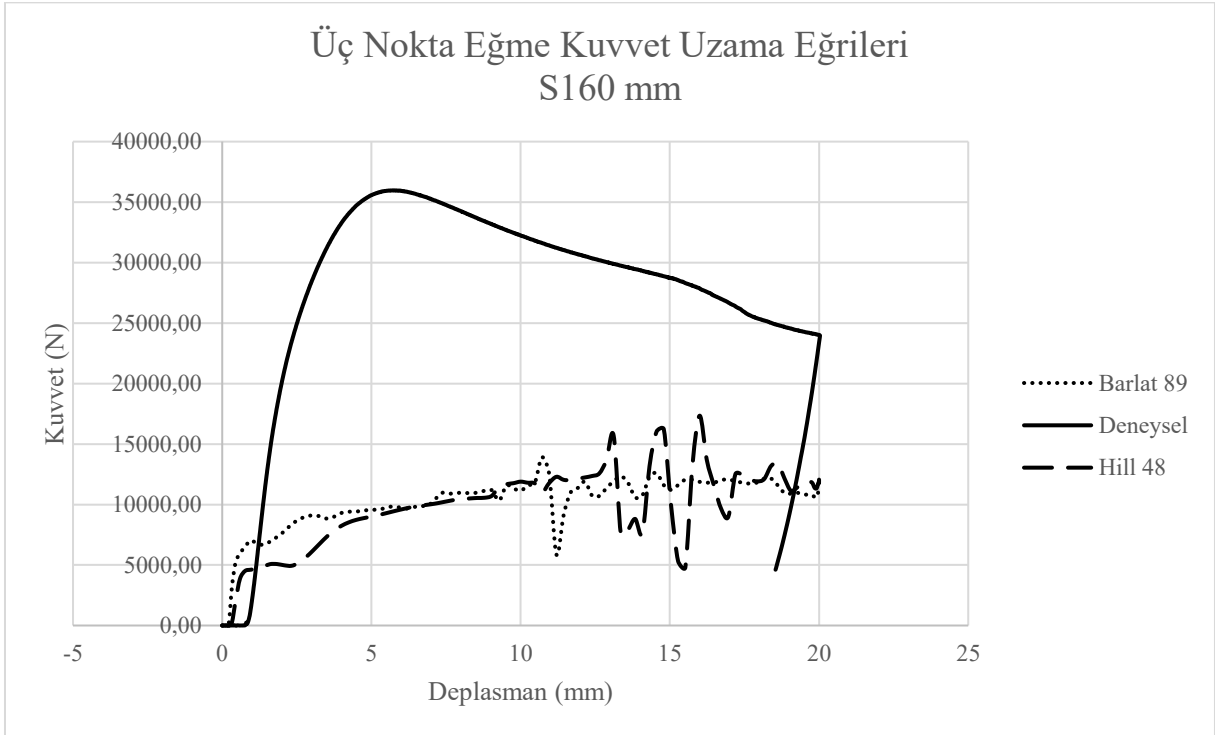


Şekil 4.22. S180 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması

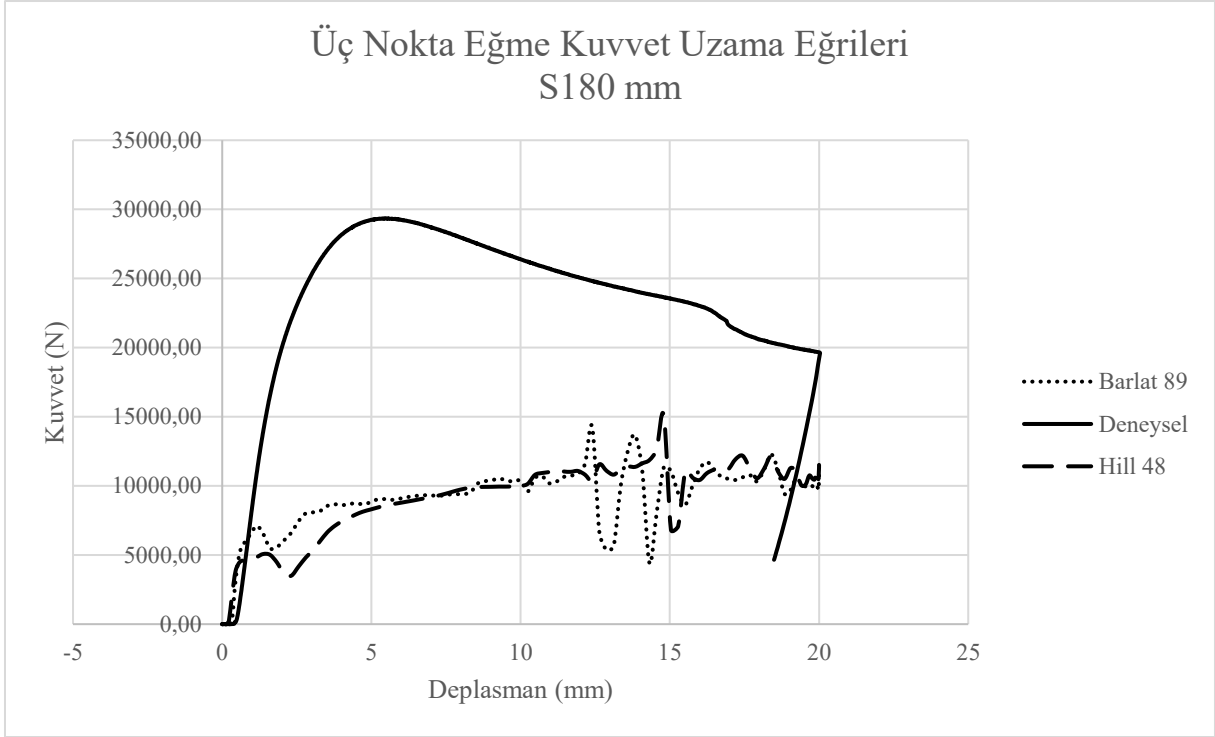
Kare kesitli profile ait kıyaslanan veriler Şekil 4.23- 4.28’de gösterilmiştir.



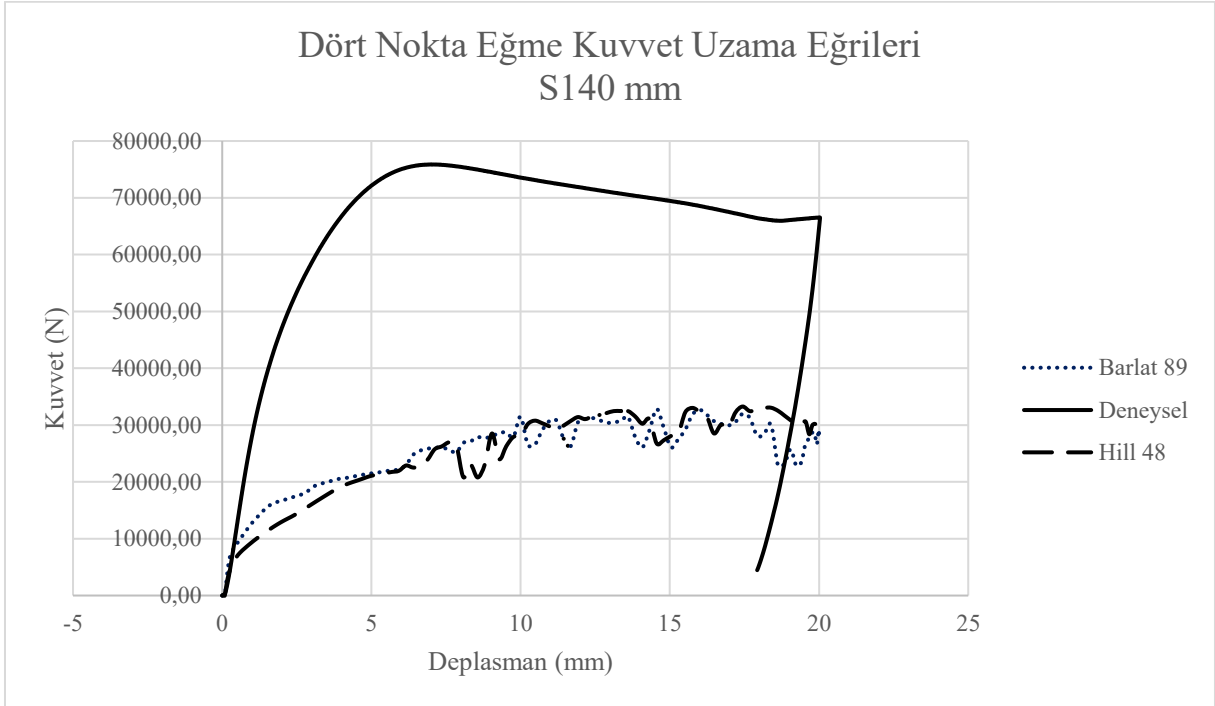
Şekil 4.23. S140 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



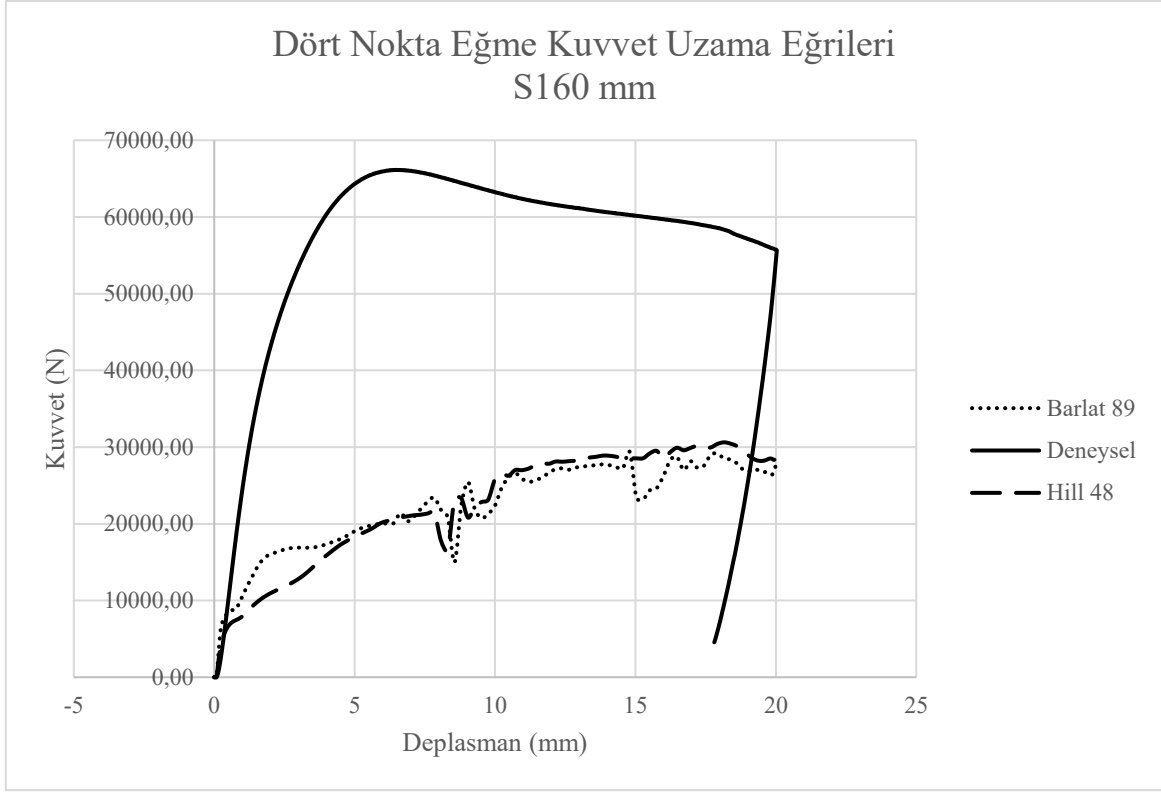
Şekil 4.24. S160 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



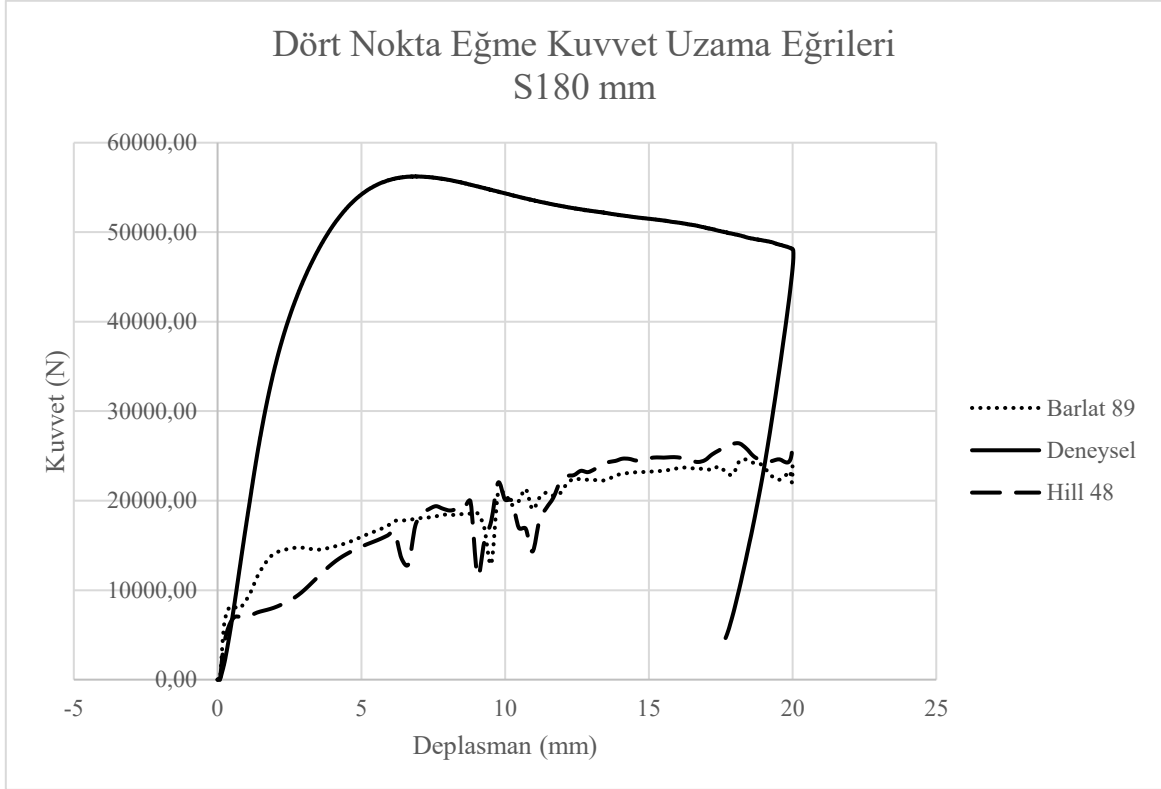
Şekil 4.25. S180 mm iken üç nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



Şekil 4.26. S140 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



Şekil 4.27. S160 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması

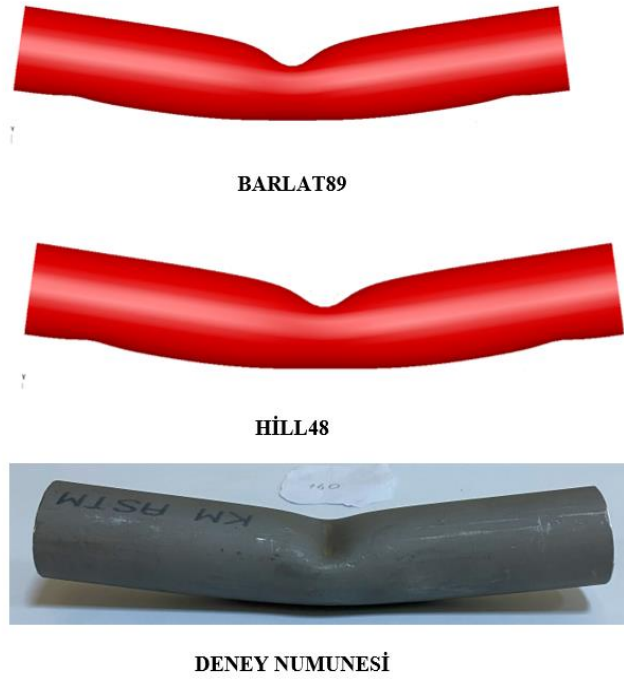


Şekil 4.28. S180 mm iken dört nokta eğme için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması

Üç nokta eğme elde edilen deforme olmuş geometrilerin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmasına veriler Şekil 4.29- 4.34’de gösterilmiştir.



Şekil 4.29. S140 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması



Şekil 4.30. S160 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması



BARLAT89



HİLL48



DENEY NUMUNESİ

Şekil 4.31. S180 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması



BARLAT89



HİLL48



DENEY NUMUNESİ

c

Şekil 4.32. S140 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması



BARLAT89



HİLL48



DENEY NUMUNESİ

Şekil 4.33. S160 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması



BARLAT89



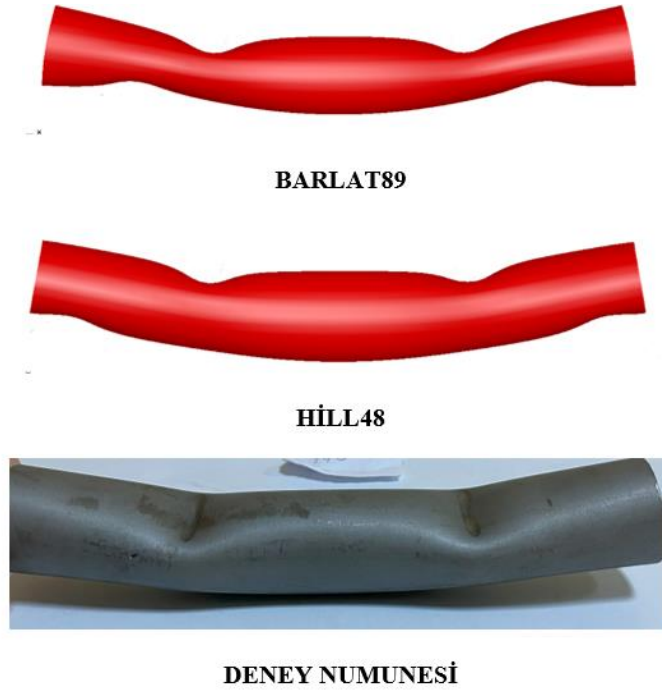
HİLL48



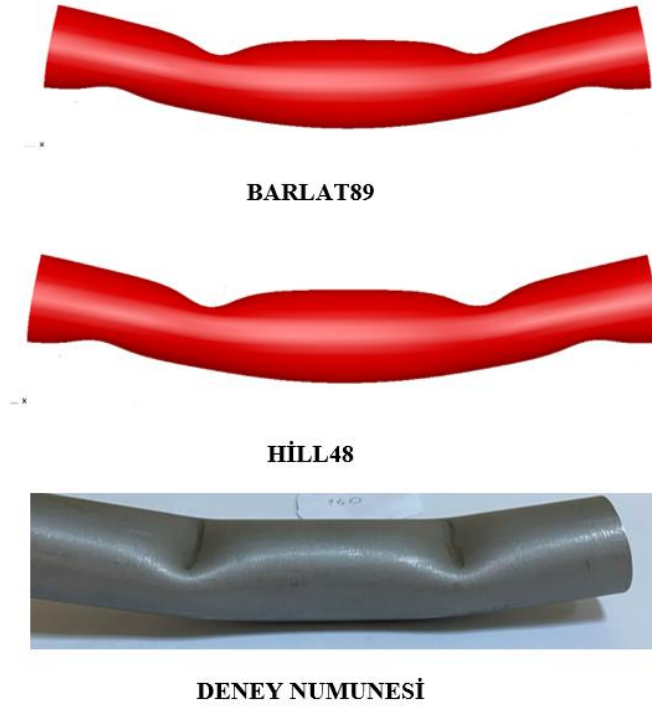
DENEY NUMUNESİ

Şekil 4.34. S180 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması

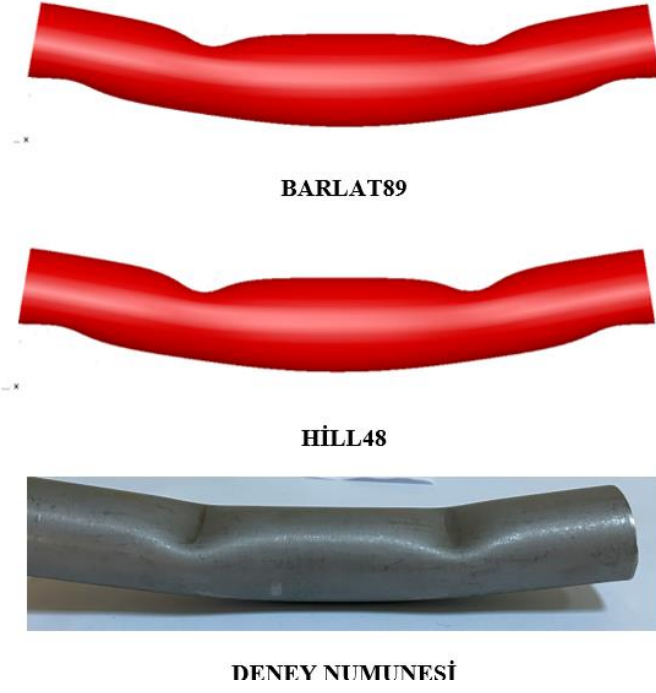
Dört nokta eğme elde edilen deforme olmuş geometrilerin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmasına veriler Şekil 4.35- 4.40'de gösterilmiştir.



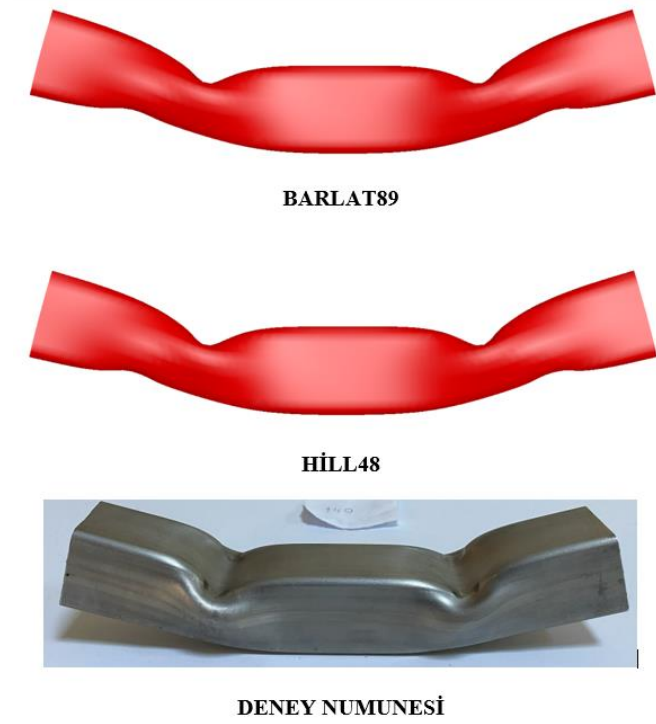
Şekil 4.35. S140 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması



Şekil 4.36. S160 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması



Şekil 4.37. S180 mesnet aralığında deforme olmuş daire kesitli profillerin karşılaştırılması



Şekil 4.38. S140 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması



BARLAT89



HİLL48



DENEY NUMUNESİ

Şekil 4.39. S160 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması



BARLAT89



HİLL48



DENEY NUMUNESİ

Şekil 4.40. S180 mesnet aralığında deforme olmuş kare kesitli profillerin karşılaştırılması

Sonlu elemanlar analizleri sonuçları incelendiğinde hem üç nokta eğme hem de dört nokta eğme için kuvvet-deplasman eğrilerinde, sonlu elemanlar yöntemi kuvvet-deplasman

eğilimini başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir. Plastisite modelleri kendi aralarında incelendiğinde neredeyse benzer sonuçları elde ettikleri görülmekle beraber Barlat-89 plastisite modelinin başlangıç eğilimini Hill-48 modeline göre hem üç nokta eğme hem de dört nokta eğme için daha başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir. Daire kesit profillerin sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde Barlat-89 ve Hill-48 plastisite modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olup, daire kesitte artan destek aralığı ile paralel olarak bu uyumun arttığı görülmüştür. Kare kesit profillerin sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde deneysel verilerden sapmalar yaşanmıştır. Deforme olmuş geometriler incelendiğinde hem Hill-48 hem de Barlat-89 modelinin deforme olmuş geometrileri üç nokta eğme ve dört nokta eğme durumu için tutarlı olarak tahmin ettiği görülmektedir.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, dairesel ve kare kesitli geometriye sahip 304L kalite paslanmaz çeliği deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, literatürde 304 L kalite paslanmaz çeliğin eğilme davranışının yeterince incelenmemiş olması nedeniyle bu malzeme seçilmiş ve plastik davranışını temsil eden plastisite modellerinin sonlu elemanlar ortamındaki performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, deneysel olarak üç nokta ve dört nokta eğme testleri 140 mm, 160 mm ve 180 mm destek mesafeleri arasında 15 mm/dakika sabit hız ve 20 mm şekillendirme mesafesi altında gerçekleştirilmiştir, gerçekleştirilen deneyler sonucunda kuvvet-deplasman eğrileri ve deforme olmuş numuneler elde edilmiştir.

Çalışmanın bir sonraki adımında, malzemenin plastik davranışını tanımlamak Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve deforme olmuş numuneler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde hem üç nokta eğme hem de dört nokta eğme testleri kapsamında artan destek mesafeleri arasında şekillendirme kuvvetinin azaldığı görülmektedir ve bunun sebebinin momentten kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Deforme olmuş numuneler açısından incelendiğinde Hill-48 ve Barlat-89 modeli hem üç nokta eğme hem de dört nokta eğme için deforme olmuş numune formlarını başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Sonlu elemanlar analizleri incelendiğinde, daire kesitli profilde üç nokta eğme ve dört nokta eğme için hem Hill-48 hem de Barlat-89 modelinin kuvvet-deplasman eğrilerini deneysel sonuçlarla eğilim açısından uyumlu bir şekilde tahmin ettiği görülmekle birlikte kuvvet değerlerinin deneysel değerlerden daha düşük tahmin edildiği görülmüştür. Ancak görece Barlat-89 modeli başlangıç eğilimini Hill-48 modeline göre hem üç nokta eğme hem de dört nokta eğme için daha başarılı şekilde tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Kare kesitte ise deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi sonuçları arasında göz ardı edilemeyecek kadar büyük farklılık göstermiştir. Eğilim olarak benzer sonuçlar görülse de kuvvet değerleri açısından sonlu elemanlar tahminleri her iki malzeme modeli için de oldukça düşük seviyede kalmıştır. İlerleyen çalışmalarda tahmin hassasiyeti için daha gelişmiş plastisite modellerinin kullanımı ile deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar arasındaki farkların azaltılabileceği öngörülmektedir. Bu durumun değerlendirilmesi için ileriki çalışmalarda katı elemanlar kullanılarak da bir değerlendirilme yapılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdollah, M. F., & Hassan, R. (2013). Preliminary design of side door impact beam for passenger cars using aluminium alloy. *Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET)*, 5(1).
- Afshan, S., & Gardner, L. (2013). The continuous strength method for structural stainless steel design. *Thin-Walled Structures*, 68, 42–49.
- Barlat, F., & Lian, K. (1989). Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, 5(1), 51–66.
- Baroutaji, A., Sajjia, M., & Olabi, A. G. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*, 118, 137–163.
- Belytschko, T., & Fish, J. (2007). *A first course in finite elements*. John Wiley & Sons.
- Cai, J., & Young, B. (2006). Experimental and numerical investigation of cold-formed stainless steel sections in combined bending and shear. *Journal of Structural Engineering*, 132(4), 535–544.
- Çapık, M., & Kaya, S. (2015). Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Deney Föyü, Trabzon.
- Çelik, H. K., Topakçı, M., Yılmaz, D., & Akıncı, İ. (2007). Çizelin yapısal ve işlevsel elemanlarında sonlu elemanlar yöntemi ile mukavemet analizi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 3(2), 111–116.
- Demir, D. (2023). Alüminyum 6060 alaşımının üç nokta eğme yüklemesi altındaki karakteristiğinin farklı proses parametreleri ile deneysel ve nümerik olarak incelenmesi (Yüksek lisans tezi), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik.
- Duarte, I., Vesenjak, M., & Krstulovic-Opara, L. (2014). Dynamic and quasi-static bending behaviour of thin-walled aluminium tubes filled with aluminium foam. *Composite Structures*, 109, 48–56.
- Eroğlu, H. E. (2019). UPE çelik konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulmasının deneysel olarak incelenmesi (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ertu Paslanmaz, *Paslanmaz çelik çeşitleri*. [Erişim:07.05.2025, <https://www.ertupaslanmaz.com.tr/hizmetlerimiz/paslanmaz-celik-cesitleri/7>]
- Esener, E. (2015). Plastik şekil verme proseslerinde form ve şekillendirme hatalarının telafi edilmesi (Doktora tezi), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Esener, E. (2020). Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 171–181.
- Feng, D. C., Ren, X. D., & Li, J. (2018). Cyclic behavior modeling of reinforced concrete shear walls based on softened damage-plasticity model. *Engineering Structures*, 166, 363–375.
- Gardner, L. (2005). The use of stainless steel in structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 45–55.
- Görücü, Ü. (2011). Elyaf takviyeli boğumla kuvvetlendirilmiş kompozit boruların sonlu elemanlar yöntemi ile geometrik optimizasyonu [Doktora tezi, Marmara Üniversitesi].
- Güler, M., & Sadri, Ş. E. N. (2015). Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56–66.
- Günay, M. G. (2013). İnce cidarlı kompozit kirişlerin statik ve dinamik analizi (Yüksek lisans tezi), Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

- Gürsoy, Ö. K. (2019). Plastisite modellerinin sac metal form lama sonlu elemanlar analizleri üzerine etkilerinin tespiti (Yüksek lisans tezi), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.
- Gürsoy, Ö. K., & Esener, E. (2019). Malzeme modellerinin sac metal sonlu elemanlar analizi tahmin performansına etkisinin değerlendirilmesi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 1–12.
- Hein, P. R. G., & Brancheriau, L. (2018). Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(3), 333–342.
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1033), 281–297.
- Hilditch, T., Atwell, D., Easton, M., & Barnett, M. (2009). Performance of wrought aluminium and magnesium alloy tubes in three-point bending. *Materials and Design*, 30, 2316–2322.
- Huang, Z., & Zhang, X. (2018). Three-point bending collapse of thin-walled rectangular beams. *International Journal of Mechanical Sciences*, 144, 461–479.
- Javanmardi, M. R., & Maheri, M. R. (2019). Extended finite element method and anisotropic damage plasticity for modelling crack propagation in concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*, 165, 1–20.
- Karaçalı, G. (2015). Soğuk haddelenmiş çift fazlı DP600 kalite çeliklerin yaşlanma davranışının incelenmesi [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Kecman, D. (1983). Bending collapse of rectangular and square section tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25(9–10), 623–636.
- Kim, T. H., & Reid, S. R. (2001). Bending collapse of thin-walled rectangular section columns. *Computers & Structures*, 79(20–21), 1897–1911.
- Kırlı, O. (2003). Derin çekme ile soğuk şekillendirmenin sonlu elemanlar metodu yardımıyla non-linear analizi (Yüksek lisans tezi), Ege Üniversitesi, İzmir.
- Köleoğlu Gürsoy, Ö. (2019). Plastisite modellerinin sac metal formlama sonlu elemanlar analizleri üzerine etkilerinin tespiti (Yüksek lisans tezi), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.
- Kwon, Y. W., & Bang, H. (2000). *The finite element method using MATLAB*. CRC Press.
- Li, Z., Zheng, Z., Yu, J., & Guo, L. (2013). Crashworthiness of foam-filled thin-walled circular tubes under dynamic bending. *Materials and Design*, 52, 1058–1064.
- Liu, H., & Liu, Y. (2021). Cross section deformation of heterogeneous rectangular welded tube in rotary draw bending considering different yield criteria. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 303–310.
- Liu, Q., Xu, X., Ma, J., Wang, J., Shi, Y., & Hui, D. (2017). Lateral crushing and bending responses of CFRP square tube filled with aluminum honeycomb. *Composites Part B*, 118, 104–115.
- Marmara Paslanmaz, (2024). *Paslanmaz boru nedir*. [Erişim: 07.05.2025, <https://marmarapaslanmaz.com/blog-detay?id=4>]
- Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., & Baldoukas, A. K. (1997). Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: Effect of material and forming characteristics Part 1. Deep-drawing of cylindrical cups. *Journal of Materials Processing Technology*, 72, 48–60.
- Meng, L., Chen, W., Yan, Y., Kitamura, T., & Feng, M. (2019). Modelling of creep and plasticity deformation considering creep damage and kinematic hardening. *Engineering Fracture Mechanics*, 218, 106582.

- Mo'tamedi, M., Zeinoddini, M., & Elchalakani, M. (2018). A closed-form analytical solution for the ratcheting response of steel tubes with wall-thinning under inelastic symmetric constant amplitude cyclic bending. *Thin-Walled Structures*, 132, 558–573.
- More, K. C., Patil, G. M., & Belkhede, A. A. (2020). Design and analysis of side door intrusion beam for automotive safety. *Thin-Walled Structures*, 153, 106788.
- Nichit, Y., & Battu, A. (2017). Development of side door intrusion beam of passenger car for maximum bending load. *International Journal of Scientific and Advanced Research and Technology*, 3(8), 1–6.
- Othmen, K. B., Haddar, N., Jegat, A., Manach, P. Y., & Elleuch, K. (2020). Ductile fracture of AISI 304L stainless steel sheet in stretching. *International Journal of Mechanical Sciences*, 172, 105404.
- Öztürk, M. (2008). Çelik taşıyıcı sistemli yapılarda taşıyıcı yapı elemanlarının farklı malzemeli yapı bileşenleri ile bağlantılarının irdelenmesi (Yüksek lisans tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Papaiya, V., Schuster, J., & Shaik, Y. P. (2023). Development of a side door composite impact beam for the automotive industry. *Open Journal of Composite Materials*, 14(1), 1–14.
- Qi, C., Sun, Y., Hu, H. T., Wang, D.-Z., Cao, G.-J., & Yang, S. (2016). On design of hybrid material double-hat thin-walled beams under lateral impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, 118, 21–35.
- Reyes, A., Hopperstad, O. S., Hanssen, A. G., & Langseth, M. (2004). Modeling of material failure in foam-based components. *International Journal of Impact Engineering*, 30(7), 805–834.
- Sarıkanat, M. (2007). Trabeküler kemiğin üç boyutlu anizotropik modellenmesi (Doktora tezi), Ege Üniversitesi, İzmir.
- Slater, R. C. (1977). *Engineering and plasticity: Theory and application to metal forming processes*. Macmillan.
- Şen, H. (2015). Levhaların bükülmesinde geri yaylanma davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Theofanous, M., & Gardner, L. (2009). Experimental and numerical study of lean duplex stainless steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 807–818.
- Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (2009). *Theory of elastic stability* (2nd ed.). Dover Publications.
- Topçu, M., & Taşgetiren, S. (1998). *Mühendisler için sonlu elemanlar metodu*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Ünlü, A. (2022). ST-37 tüp profillerinin üç nokta eğme altındaki davranışlarının deneysel ve nümerik olarak değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.
- Wardenier, J., Dutta, D., Yeomans, N., Packer, J., Bucak, Ö., & Sakae, K. (2001). (H. A. Büyüктаşkın, Çev.). *Kutu ve boru profillerden oluşan çelik konstrüksiyon yapıların imalat, çatım ve yerinde montaj esasları hakkında tasarım el kitabı*. Borusan Birleşik Boru Fabrikaları A.Ş.
- Xie, Z. Y., Zhao, Z. X., & Li, C. (2021). Bending crashworthiness of thin-walled square tubes with multi-cell and double-tube cross-sections. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35, 4815–4823.
- Yıldız, B. (2017). Derin çekme işleminde kalıp tasarımının sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu (Yüksek lisans tezi), Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Zhang, J., Wu, L., Chen, G., & Zhou, H. (2014). Bending collapse theory of thin-walled twelve right-angle section beams. *Thin-Walled Structures*, 85, 377–387.

- Zhang, J., Zhou, H., Wu, L., & Chen, G. (2015). Bending collapse theory of thin-walled twelve right-angle section beams filled with aluminum foam. *Thin-Walled Structures*, 94, 45–55.
- Zhang, X., Zhang, H., & Ren, W. (2016). Bending collapse of folded tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 117, 67–78.
- Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2016). Bending collapse of square tubes with variable thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*, 106, 107–116.
- Zhang, Y., Xu, X., Liu, S., Chen, T., & Hu, Z. (2018). Crashworthiness design for bi-graded composite circular structures. *Construction and Building Materials*, 168, 633–649.
- Zhou, R., Roy, A., & Silberschmidt, V. V. (2019). A crystal-plasticity model of extruded AM30 magnesium alloy. *Computational Materials Science*, 170, 109140.
- Zhu, G., Wang, Z., Cheng, A., & Li, G. (2017). Design optimisation of composite bumper beam with variable cross-sections for automotive vehicle. *International Journal of Crashworthiness*, 22(4), 365–376.
- Zhu, Y. X., Liu, Y. L., Yang, H., & Li, H. P. (2012). Development and application of the material constitutive model in springback prediction of cold-bending. *Materials and Design*, 42, 245–258.