



304L PASLANMAZ DAİRESEL KESİTLİ PROFİLİN ÜÇ NOKTA VE DÖRT NOKTA EĞME YÜKLEMESİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NUMERİK OLARAK İNCELENMESİ
Tuğçe ÜNER¹ / Devran DEMİR² ve Emre ESENER³

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği, uner.tugce12@gmail.com, 0009-0004-9024-0805

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği, devran.dmr41@gmail.com,
0000-0002-3650-2374

³Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği, emre.esener@bilecik.edu.tr,
0000-0001-5854-4834

Özet

Bu çalışmada, 304L 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 kesitli geometriye sahip 304L kalite paslanmaz çeliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 140 mm, 160 mm ve 180 mm destek mesafesi aralığında ve 5 mm zimba 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, kuvvet-deplasman eğrilerinin ve deforme olmuş numune geometrilerinin birbirleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Üç nokta eğme, Dört nokta eğme, Sonlu elemanlar analizi, İnce cidarlı yapılar

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF 304L STAINLESS STEEL CIRCULAR SECTION PROFILE UNDER THREE-POINT AND FOUR-POINT BENDING LOADING

Abstract

In this study, the deformation behavior of 304L stainless steel profile structure under three-point and four-point bending load was investigated experimentally and numerically. In this purpose, a circular cross-section sample, which is frequently used in literature and industrial applications, was examined. Within the scope of the study, three-point and four-point bending tests were carried out using with 140 mm, 160 mm and 180 mm span distances and 5mm punch radius has been obtained experimentally. As a result of the experimental studies, it has been determined that the force required for bending of the material is less when the distances between the spans increase. In the second step of the study, finite element analyzes were performed using Hill-48 and Barlat-89 plasticity models, and force-elongation curves were compared with the

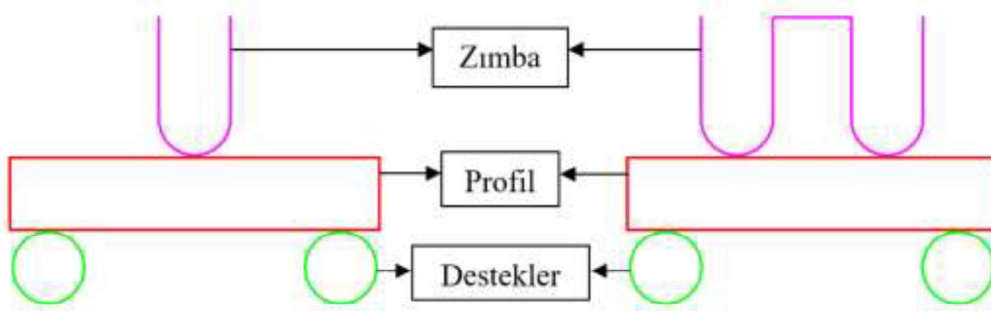
2. INTERNATIONAL ŞİRVANŞAHLAR SCIENTIFIC RESEARCHES AND INNOVATION CONGRESS, 23-24 MAY-Azerbaijan
<https://www.wosconkongreleri.com/>

experimental results. As a result of the comparisons, it was determined that the force-elongation curves and deformed shapes were compatible with the experimental results.

Keywords: Three-point Bending, Four-point Bending, Finite Element Analyses, Thin-walled structures

1. GİRİŞ

Modern dünyanın eğilimi, yapıların yalnızca dayanımlı olmasını değil aynı zamanda hafif olması yönündedir. Bu kapsamda, ince cidarlı yapılar yüksek enerji absorpsiyonu ve dayanımı gibi özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilen elemanlardır. İnce cidarlı elemanların göstermiş olduğu dayanım ve enerji absorbe edebilme kapasiteleri gibi özelliklerinden dolayı taşıyıcı ve çarpışma kritik parçalarda yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. İnce cidarlı elemanlar kullanıldıkları taşıyıcı yapı ve çarpışma kritik parçalarda genellikle eğilme yüklemesine maruz kalmaktadır (Zhang&Fu, 2023; Halis&Altın, 2024). Bu elemanların eğilme davranışını incelemek amacıyla genellikle üç nokta ve dört nokta eğme testleri gerçekleştirilmektedir. Üç nokta eğme düzeneğinde numune iki uç desteği üzerinde konumlandırılır ve yük tek bir merkezi noktadan uygulanarak malzemede yüksek bir gerilme konsantrasyonu oluşturur, dört nokta eğme düzeneğinde ise yük, numunenin ortasından eşit uzaklıktaki iki nokta arasında paylaşılır ve desteklerin yarattığı kuvvetler arasında sabit bir moment bölgesi meydana gelerek daha homojen bir gerilme dağılımı sağlar (Hein&Brancheriau, 2018). Şekil 1’de üç nokta eğme ve dört nokta eğme deneylerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Üç Nokta ve Dört Nokta Eğme Deneyinin Şematik Gösterimi

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



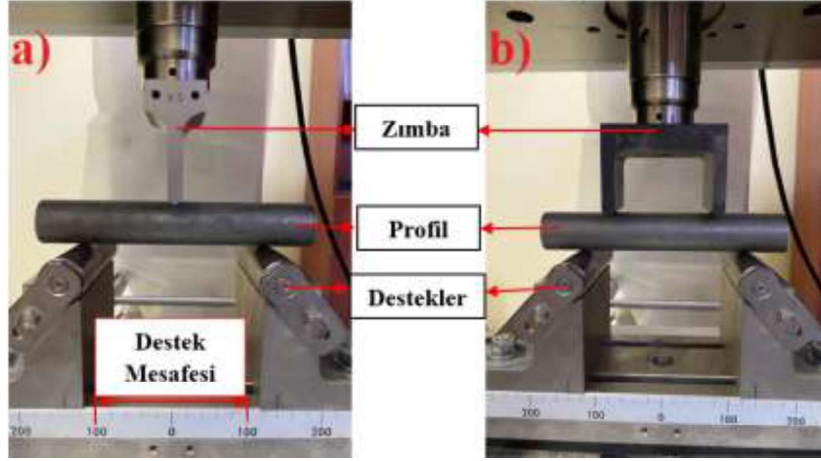
(Abdollah&Hassan, 2013; More vd., 2020; Papaiya vd., 2023). Malzemenin kesit geometrisi incelendiğinde dairesel, dikdörtgen gibi kapalı kesite sahip geometrilerin sıklıkla tercih edildiği görülmüştür (Nichit&Battu, 2017; Xie vd., 2021). Eğilme davranışının tasarımında genellikle deneysel ve numerik çalışmalar 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 modellerinin birbirleri ile kıyaslanmasının yapıldığı az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır (Reyes vd., 2004; Zhu vd., 2012).

Yukarıda anlatılanlar ışığında, 304L kalite paslanmaz çeliğinin literatürde eğilme yüklemesi altındaki davranışının yeteri kadar çalışılmadığı görülmüştür. Bu amaç doğrultusunda, çalışmanın birinci adımı olarak literatürde ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen dairesel kesitli geometriye sahip 304L kalite paslanmaz çeliğinin üç nokta ve dört nokta eğme yüklemesi altındaki davranışı, destekler arası mesafenin etkisinin de incelenmesi amacıyla destek mesafeleri 140 mm, 160 mm ve 180 mm destek aralıkları kullanılarak üç nokta ve dört nokta eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir sonraki adımında ise, Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ile şekillendirme işlemi sonucu elde edilen numuneler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. UYGULAMA ÇALIŞMASI

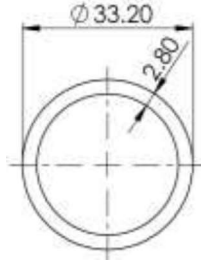
2.1. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada, dairesel kesitli numuneye sahip 304L kalite paslanmaz çeliğinin üç nokta ve dört nokta eğme yüklemesi altındaki davranışı incelenmiştir. Çalışmanın ilk adımında, 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 2’de verilmiştir.



Şekil 2. a) Üç nokta ve b) Dört nokta eğme deneyine ait düzenek

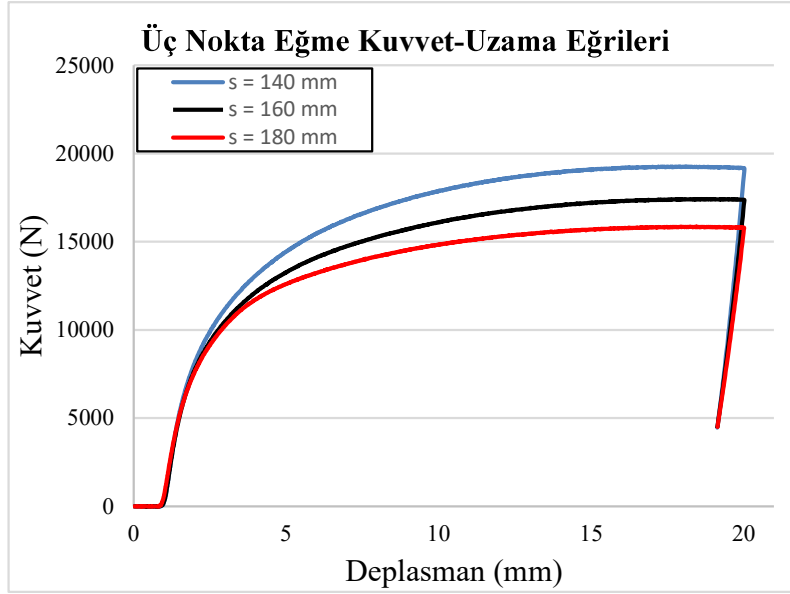
Deneylerde kullanılan desteklerin yarı çapı 15mm'dir ve deney çalışması kapsamında 140 mm, 160 mm ve 200 mm destek mesafesi kullanılmıştır. Deneyler sabit 20 mm/dak hız ve 20 mm şekillendirme mesafesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan dairesel kesitli geometrinin ölçüleri Şekil 3'te verilmiştir.



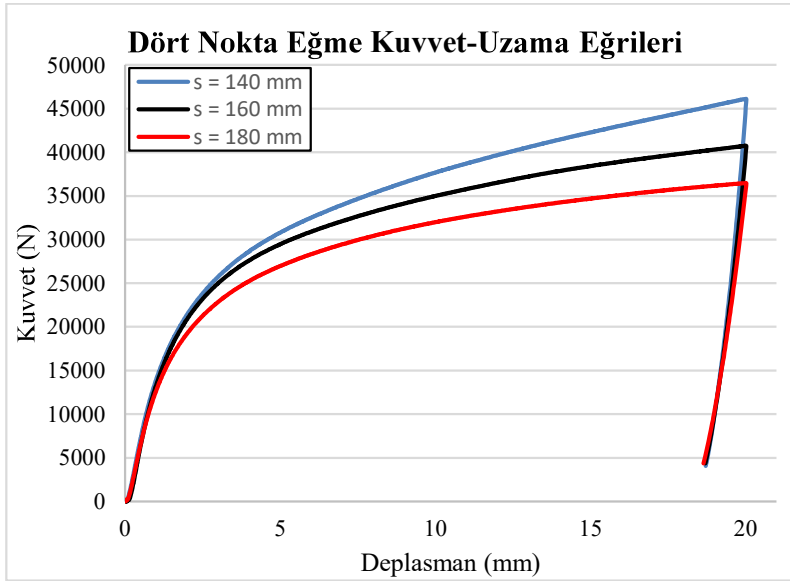
Şekil 3. Dairesel Kesitli Numune (tüm ölçüler mm cinsindedir)

2.2 Deneysel Çalışmalar

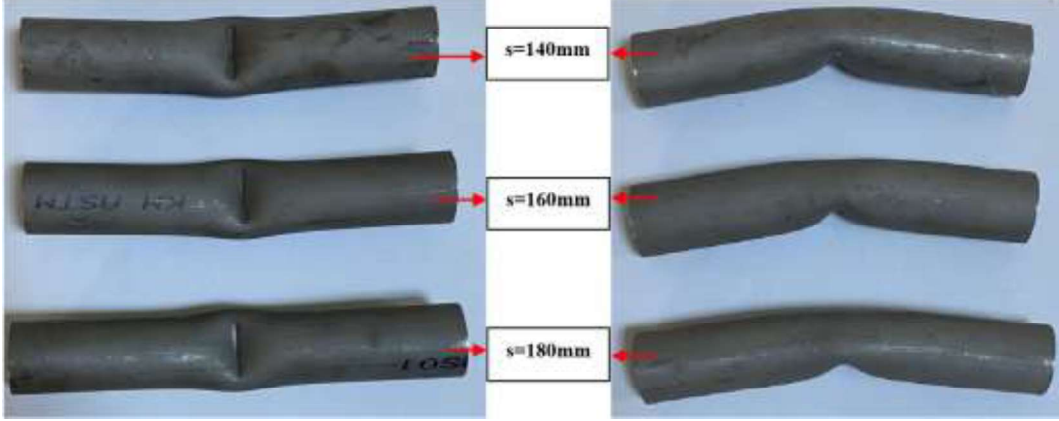
Üç nokta eğme ve dört nokta eğme deneyleri sonucunda farklı destek mesafeleri kullanılarak elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4-5'te verilmiştir. Ayrıca şekillendirilme sonucunda elde edilen deforme olmuş numuneler Şekil 6-7'de verilmiştir.



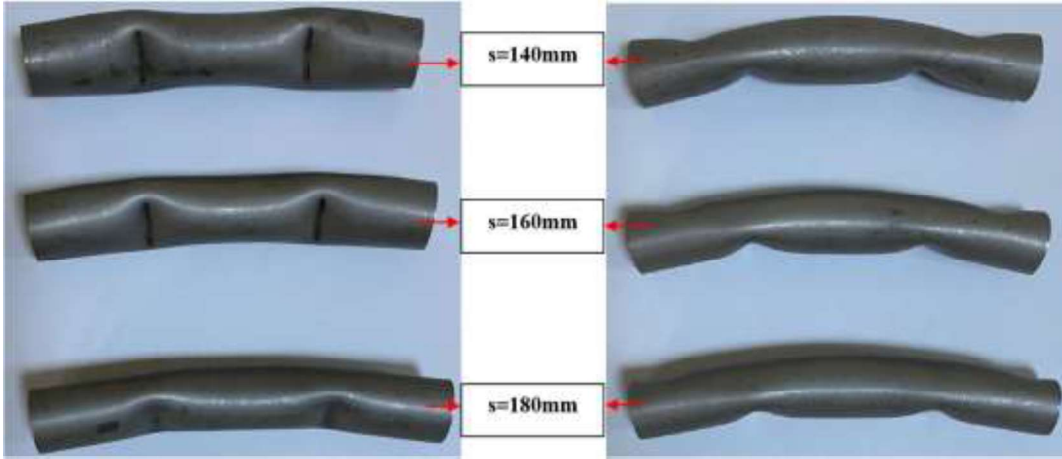
Şekil 4. Üç nokta nokta eğme sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 5. Dört nokta eğme sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 6. Üç nokta eğme sonucunda elde edilen deforme olmuş numuneler



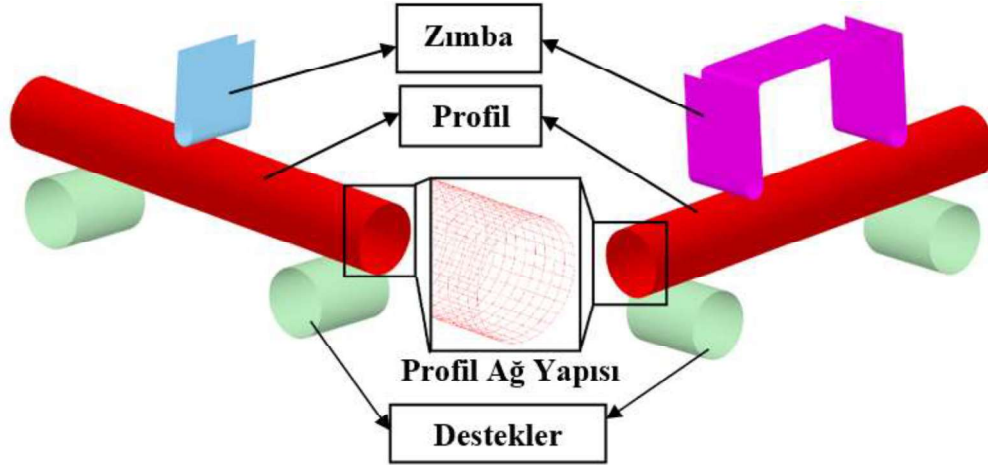
Şekil 7. Dört nokta eğme sonucunda elde edilen deforme olmuş numuneler

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

2.3 Sonlu Eleman Analizleri

Çalışmanın ikinci adımında, deneysel çalışmalar sonlu elemanlar analizleri kullanılarak simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri kapsamında Dynaform paket yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Tüm hesaplamalar profil üzerinden gerçekleştirildiğinden dolayı kalıp elemanları rijit gövde olarak oluşturulmuştur, bundan dolayı 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. Şekil 8’de sonlu eleman analizlerine ait model ve Tablo 1’de sonlu elemanların hesaplamalarına ait parametreler verilmiştir.



Şekil 8. Üç nokta eğme ve Dört nokta eğme için oluşturulan sonlu elemanlar modeli

Tablo 1. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri

Parametre	Değer
Eleman ağ yapısı boyutu	1 mm
Eleman sayısı	2144
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Malzemenin plastik davranışını modelleyebilmek adına Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılmıştır. 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.

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

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

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);

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



Burada σ_Y akma gerilmesidir. K_1 ve K_2 farklı yönlerdeki akma gerilmelerine bağlı parametrelerdir. Bu denklemden 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 denklemden K_1 ve K_2 değerleri eşitlik 4'teki gibi hesaplanmaktadır.

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

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).

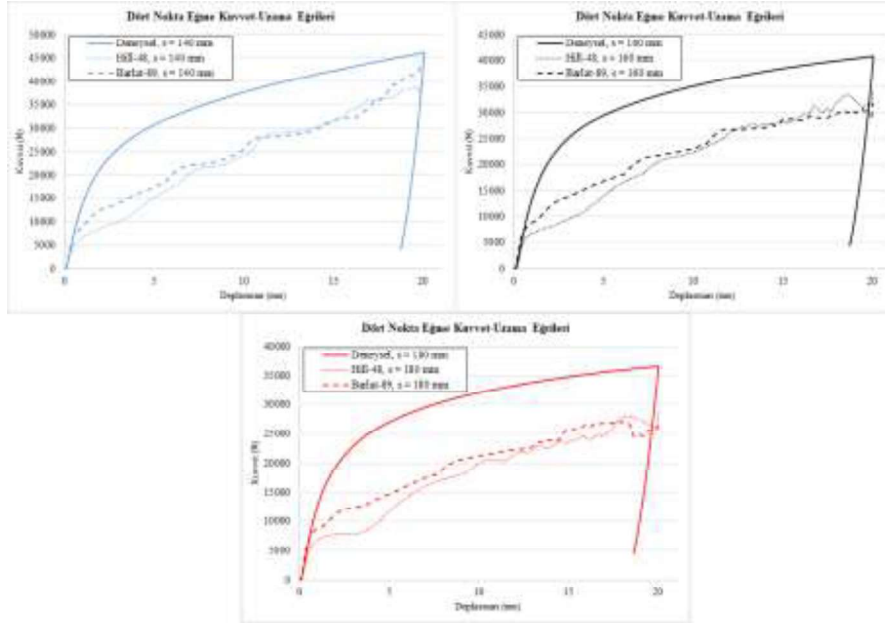
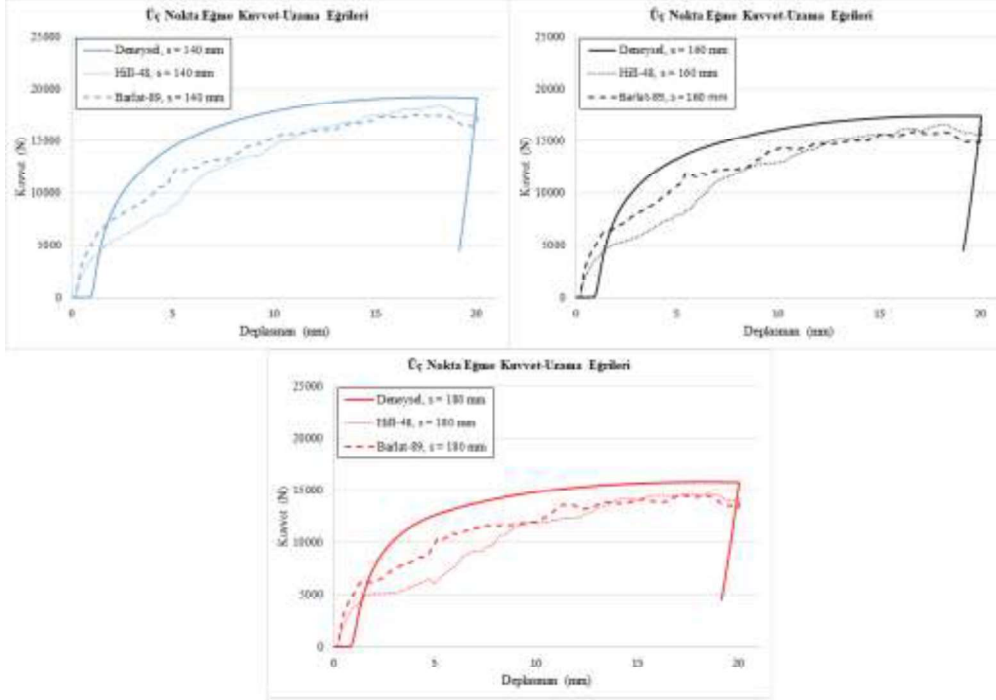
$$a = 2 - c = 2 - 2 \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \frac{r_{90}}{1+r_{90}}}, h = \sqrt{\left(\frac{r_0}{1+r_0} \right) \left(\frac{1+r_{90}}{r_{90}} \right)} \quad (5)$$

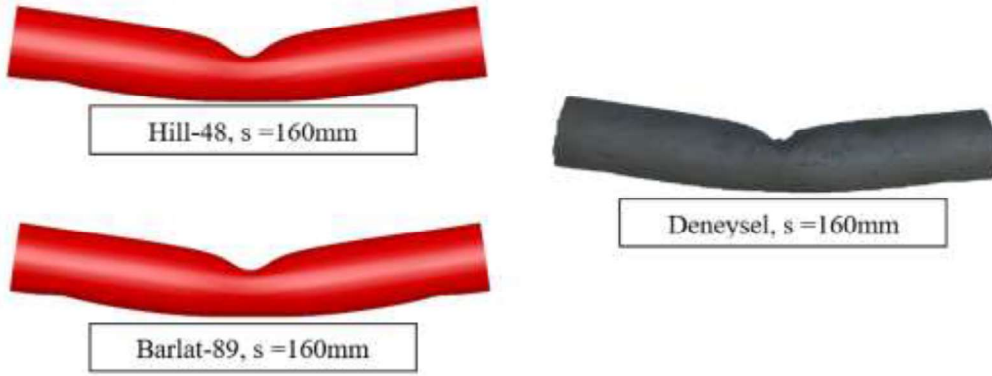
Yukarıda anlatılanların ışığında 304L kalite paslanmaz çelik malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 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

Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak Şekil 9-10'da verilmiştir. Deforme olmuş numuneler deneysel olarak incelendiğinde artan mesnet aralıkları ile birlikte malzeme formunda desteklere temas edilen noktalarda bir ezilme olduğu gözlemlenmiştir, dolayısıyla sonlu elemanlar analizlerinde deforme olan numuneler için sadece 160 mm destek aralığında ki numuneler deneysel olarak incelenmiş olup sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 11-12'de verilmiştir.





Şekil 11. Üç nokta eğme için elde edilen deforme olmuş geometrilerin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması



Şekil 12. Dört nokta eğme için elde edilen deforme olmuş geometrilerin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile 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. 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.



3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, dairesel kesitli geometriye sahip 304L kalite paslanmaz çeliği deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, literatürde eğilme davranışı 304L kalite paslanmaz çeliği üzerinde yeterli olarak incelenmemesi nedeniyle seçilmiş olup ve malzemenin plastik davranışını temsil eden plastisite modellerinin sonlu elemanlar ortamında performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, deneysel olarak üç nokta ve dört nokta eğme testleri 140 mm, 160 mm ve 180 mm destek mesafeleri arasında 20 mm/dak 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. Sonlu elemanlar analizleri incelendiğinde, üç nokta eğme ve dört nokta eğme için hem Hill-48 hem de Barlat-89 modelinin kuvvet-deplasman eğrisinin eğilimini başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir, ancak Barlat-89 modeli başlangıç eğilimini Hill-48 modeline göre hem üç nokta eğme hem de dört nokta eğme için daha başarılı şekilde tahmin ettiği görülmektedir. Eğilim açısından başarılı tahminler gerçekleştirilse de kuvvet değerlerinin sonlu elemanlar analizlerinde genel olarak daha düşük tahmin edildiği gözlemlenmiştir. Bu durumun değerlendirilmesi için ileriki çalışmalarda katı elemanlar kullanılarak da bir değerlendirilme yapılması gerektiği 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.



KAYNAKLAR

- 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).
- 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.
- Esener, E. (2020). Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 171-181.
- Halis, S., & Altın, M. (2024). Numerical investigation of energy absorption performance in thin-walled structure under three-point bending test. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 8(1), 159-166.
- Harpell, E. T., Worswick, M. J., Finn, M., Jain, M., & Martin, P. (2000). Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1-3), 131-141.
- 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.
- 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.
- 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. *Int J Sci Adv Res Technol*, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, X., & Fu, X. (2023). New theoretical models for the bending moment of thin-walled beams under three-point bending. *Applied Mathematical Modelling*, 121, 21-42.
- 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 & Design*, 42, 245-258.