

# 304E VE 304U PASLANMAZ ÇELİK ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE GERİLMELİ KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Investigation of Mechanical Properties and Stress Corrosion Behaviors of 304E and 304U Stainless Steel Alloys

Bedirhan Güraydın<sup>1</sup>, İrfan Can Dinçer<sup>1</sup>, Hamdi Ekici<sup>1</sup>, Onur Ay<sup>1</sup>, Burçin Özbay Kısasöz<sup>2</sup>, Alptekin Kısasöz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trinox Metal San. Ve Tic. A.Ş., Türkiye

<sup>2</sup>Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Kırkırelili Üniversitesi, Türkiye

## Abstract

Austenitic stainless steels especially; They are known for their high strength structures and high formability capabilities, as well as their resistance to corrosion. The most widely used AISI 304 austenitic stainless steel in the industry, 304E and 304U patented alloys containing 9% nickel by mass, suitable for deep drawing processes, showing the properties of AISI 304, have been developed with process development studies within Trinox Metal. These patented alloys provide full compatibility in deep drawing of cylindrical containers such as pots and deep drawing processes of angular containers such as sinks.

In this study, the stress corrosion cracking of 304E and 304U patented alloys was investigated and the material behavior and corrosion progression rates were tried to be revealed, especially in areas of use such as pressure vessels, where both mechanical stresses and corrosive effects are observed together.

## Özet

Östenitik paslanmaz çelikler özellikle; Yüksek mukavemetli yapıları ve yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin yanı sıra korozyona karşı dirençleri ile tanınırlar. Endüstride en yaygın kullanılan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, kütlece %9 nikel içeren, derin çekme işlemlerine uygun, AISI 304 özelliklerini gösteren 304E ve 304U patentli alaşımlar Trinox Metal bünyesinde proses geliştirme çalışmaları ile geliştirilmiştir. Bu patentli alaşımlar tencere gibi silindirik kapların derin çekmesinde ve lavabo gibi köşeli kapların derin çekme işlemlerinde tam uyumluluk sağlar.

Bu çalışmada, 304E ve 304U patentli alaşımların gerilmeli korozyon davranışları araştırılmış ve özellikle hem mekanik gerilmelerin hem de korozif etkilerin bir arada görüldüğü basınçlı kaplar gibi kullanım alanlarında malzeme davranışı ve korozyon ilerleme hızları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

## 1. Giriş

Östenitik paslanmaz çelikler bileşiminde %12-25 Cr ve %8-25 Ni içeren ve paslanmaz çelik ailesinin en yaygın kullanım alanına sahip üçlü Fe-Cr-Ni alaşımlardır. Bu alaşımların yapıları oda sıcaklığında ve kullanım koşullarında östenitik (YMK) yapıda kaldığı için östenitik olarak adlandırılır. Nikel elementi kuvvetli bir östenit yapıcı olduğundan, bu çeliklerde katılma sırasında ortaya çıkan östenit oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bile farklı bir faza dönüşmeden yapısını korur. Soğuma esnasında östenit-ferrit dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler su verme yolu ile sertleştirilemezler. Aynı zamanda bu çelikler deformasyon sonucu oluşan martenzit yapıda bulunmadığı sürece manyetik özellik taşımazlar. Östenitik paslanmaz çelikler özellikle oksitleyici veya redükleme ortamlarında iyi korozyon direncine sahiptir. Östenitik paslanmaz çelikler, karbonlu çeliklerden daha yüksek termal genleşme katsayısına daha düşük termal iletkenlik katsayısına, daha yüksek elektrik direncine ve daha düşük ergime noktasına sahiptirler[1,2,3]

Gerilmeli korozyon çatlağı, bir stresin ve reaktif bir ortamın eş zamanlı etkisinden dolayı çatlakların oluşması ve büyümesi olarak tanımlanır. Gerilmeli korozyon çatlağı, mekanik stres ve korozyon/oksidasyon reaksiyonlarının birleşik ve sinerjik etkilerinin bir sonucudur. Malzemelerin türü, güç bindirme tipleri ve ortam türleri, başlama ve yayılma dahil olmak üzere gerilmeli korozyonu çatlağının oluşumunu etkiler[4,5].

Gerilmeli korozyon çatlağı (GKÇ), malzemelerin, ortamların ve mekaniğin birleşik ve sinerjik etkilerinin bir sonucudur. GKÇ'ndeki bireysel süreçler izole değil, birbirleriyle ilişkilidir. Kayma oksidasyonu, oksidasyon penetrasyonu, stres-gerilme ile geliştirilmiş katı hal oksidasyonu, hidrojen ile ilgili mekanizma ve alaşımsızlaştırma mekanizması gibi çeşitli GKÇ mekanizmaları ve kontrol parametreleri geliştirilmektedir. GKÇ alt süreçlerini ve kontrol parametrelerini ölçmek için deneysel yaklaşımlar, analitik yaklaşımlar ve sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmektedir. GKÇ sistemleri için malzeme/ortam/yükleme koşullarının kombinasyonlarına bağlı olarak, geçici oksidasyon farklı kinetik yasalar doğrultusunda gerçekleşebilir ve çatlak ucu oksidasyonunun gelişmesi, fiziksel bozunma durumu, fiziksel-kimyasal bozunma durumu veya her ikisi ile gerçekleştirilebilir. Karmaşık GKÇ sistemleri için elementel mekanizma ve sinerjik etkiler ile ilgili olarak, sistematik çalışmalar yapılmıştır ve özellikle temel mekanizmalara dayalı çok ölçekli modelleme olmak üzere daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır[6,7,8,9,10,11,12].

Bu çalışmada ise müşteri istekleri doğrultusunda üretim, spesifik kalite beklentileri, derin çekme prosesleri sonrasında yüksek yüzey kalitesi ve tek seferde daha fazla derin çekilebilirlik gibi beklentileri karşılamak için Trinox Metal firması tarafından geliştirilmiş olan 304E ve 304U olarak patentlenmiş alaşımların stres korozyon çatlağına karşı davranışları incelenmiştir. Bu davranışlar incelenirken; kullanım alanlarından dolayı maruz kaldıkları kimyasal ve mekanik koşullardan dolayı yüksek değerlerde stres uygulanması için numuneler bir çok farklı kademede yüksek eğmeye maruz bırakılmıştır.

## 2. Deneysel Çalışmalar

Çalışmada kullanılan paslanmaz çelik alaşımları Çizelge 1'de verildiği gibi isimlendirilmiştir.

Farklı ısıtma süresi ve sertleşme kabiliyetinin malzeme özelliklerine olan etkisini araştırmak için AISI-304, AISI-304L, 304E ve 304U alaşımlarının kimyasal analizleri yapılmış ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Alaşımların numaralandırılması.

Alaşım	AISI 304-1	AISI 304-2	AISI 304L	304E	304U
Alaşım No	1	2	3	4	5

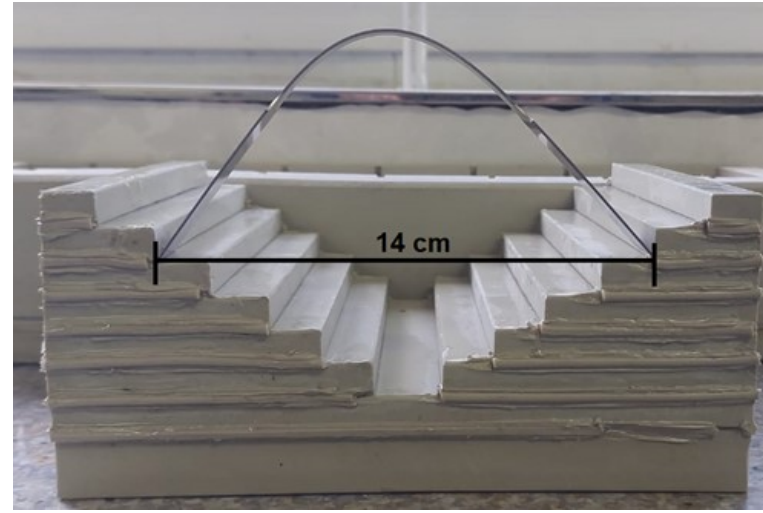
Çizelge 2. Numunelerin kimyasal bileşimleri (%ağ.)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
1	0,041	0,4	1,02	0,031	0,005	18,25	8,05	0,03	0,06	0,048
2	0,043	0,42	1,03	0,027	0,004	18,08	8,02	0,04	0,05	0,047
3	0,027	0,4	1,44	0,029	0,001	18,1	8,05	0,03	0,02	0,066
4	0,024	0,41	1,36	0,034	0,002	18,12	8,05	0,04	0,03	0,06
5	0,041	0,39	1,05	0,032	0,002	18,2	8,03	0,03	0,05	0,057

Alaşımlar 20 merdaneli soğuk hadde makinesi ile 3 mm kalınlıktan 1 mm kalınlığa (%66,6) deforme edilmiştir. Soğuk haddelenen rulolar fırında sırasıyla 94, 82, 74, 79 ve 94 saniye kalacak şekilde 1100°C'de tavllanmış ve ardından asit tanklarından geçirilmiştir. Çözelti tavlama aşaması tamamlanan rulolar temperlenmek üzere skin pass hattına alınmıştır.

Üretilen numuneler ASTM G39-99 standardına göre gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi amacıyla Şekil 1'deki test düzeneğine kullanılarak gerilmeli korozyon deneyi uygulanmıştır.

Ağırlıkça %3,5 NaCl ve %1 HCl saf su ile karıştırılmıştır. Hazırlanan çözelti 80°C'ye ısıtılmış ve GKÇ deneyi 20 saat süresince uygulanmıştır. Test sonrasında, numune inceleme işlemleri öncesinde numuneler kurutulmuştur.



Şekil 1. Gerilmeli korozyon düzeneği.

Üretilen ve gerilmeli korozyon deneyi uygulanan numunelerin mikroyapı özelliklerini belirlemek amacıyla ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri uygulanmıştır.

## 3. Sonuçlar ve Tartışma

Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin, öncelikle sertleştirme kabiliyeti incelenmiştir. Sertleştirme kabiliyeti östenitik paslanmaz çeliklerin içerdiği ferrit oranını gösteren bir parametre olup, nikel eşdeğeri ve krom eşdeğeri verilerinin kullanılmasıyla Eşitlik 3'e göre hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 3'te verilmiştir[13].

Nikel Eşdeğeri = Ni% + 0,5\*Mn% + 30°C% (1)

Krom Eşdeğeri = Cr% + Mo% + 1,5\*Si% + 0,5\*Nb% (2)

Sertleşme Kabiliyeti = (3)

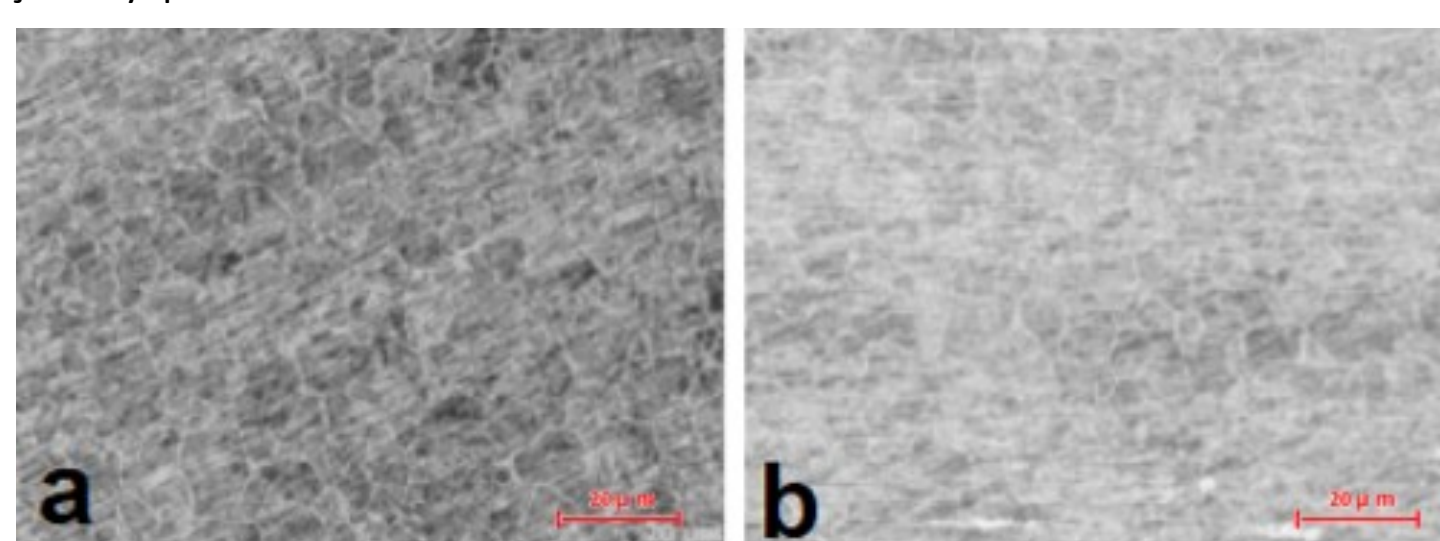
Çizelge 3. Numunelerin Sertleşme Kabiliyetleri

#	1	2	3	4	5
Sertleşme Kabiliyeti	59,6081	60,0267	61,7619	59,8242	61,2012

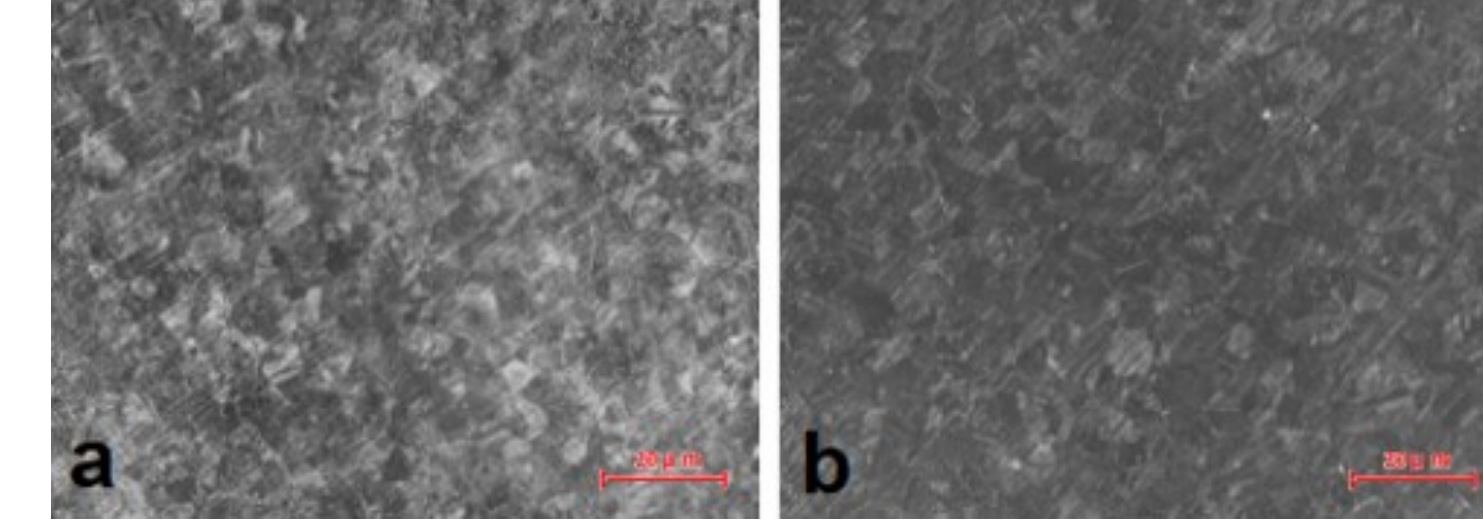
Sertleşme kabiliyeti olarak ifade edilen parametre, östenitik paslanmaz çeliklerde ısıtma işlem parametreleri ve şekillenme kabiliyeti üzerinde etkili olan önemli bir işlem parametresidir.

4 ve 5 numaralı numune olarak verilen 304E ve 304U alaşımları, Trinox Metal firması tarafından patentlenmiş ve daha iyi yüzey özellikleri ile sertleşme kabiliyeti sunan alaşımlardır. 304U alaşımının sahip olduğu yüksek sertleşme kabiliyeti nedeniyle, alaşıma daha uzun bir ısıtma süresi uygulanmış, böylece daha iyi şekillenme kabiliyeti ortaya çıkmıştır.

Şekil 2 ve Şekil 3'te 304E ve 304U alaşımlarının deformasyon işlemi ve ısıtma işlemi sonrası mikroyapı görüntüleri verilmiştir. 304U alaşımının deformasyon kabiliyetinin yüksek olması nedeniyle elde edilen uzamış tane yapısı daha baskındır.



Şekil 2. a)304E Deformasyon Sonrası Mikroyapı b)304U Deformasyon Sonrası Mikroyapı (20x yakınlaştırılmış)



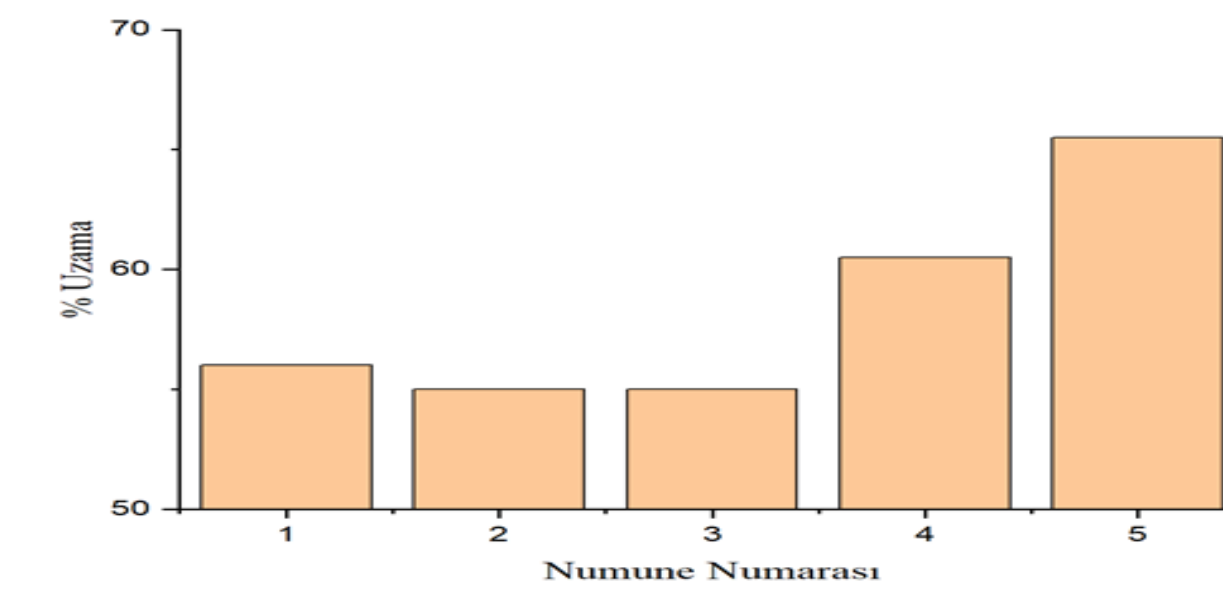
Şekil 3. a)304E Isıl İşlem Sonrası Mikroyapı b)304U Isıl İşlem Sonrası Mikroyapı (20x yakınlaştırılmış)

Çalışmada kullanılan alaşımların mekanik özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir.

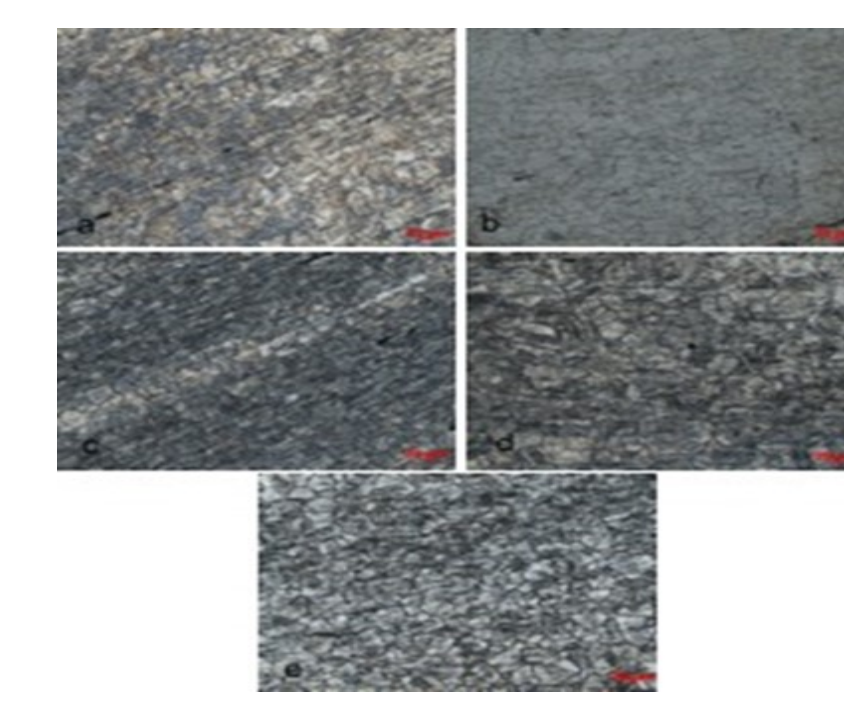
Çizelge 4. Numunelerin mekanik özellikleri.

#	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
1	725	367	56	183
2	709	359	55	175
3	676	344	55	181
4	694	351	66,5	186
5	719	366	60,5	181

Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm alaşımlara, uygulanan işlemler sonucunda ortaya çıkan mekanik özellikleri belirlemek amacıyla haddeleme yönüne dik olacak şekilde çekme testleri uygulanmış ve Çizelge 4'te verilen değerler elde edilmiştir. Söz konusu değerler incelendiğinde Trinox Metal firması tarafından geliştirilen patentli alaşımlarda geleneksel östenitik paslanmaz çelik alaşımlarına göre oldukça yüksek bir uzama değeri elde edilmiştir. 304E ve 304U alaşımları süneklik özellikleri açısından oldukça öne çıkmıştır. Uzama değerlerindeki değişim Şekil 5'te açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Mekanik testler sonucunda elde edilen uzama değerleri.



Şekil 5. Gerilmeli korozyon deneyleri sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri a) 1 numaralı numune b) 2 numaralı numune c) 3 numaralı numune d) 4 numaralı numune e) 5 numaralı numune.

Şekil 5'te gerilmeli korozyon deneyleri sonrasında numunelerden alınan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. İlgili standarda göre gerilmeli korozyon sonrası numune mikroyapı görüntülerinde bir çatlak oluşumunun tespit edilmemesi gerekmektedir. Gerilmeli korozyon deneyleri sonrasında tüm numunelerin mikroyapılarında herhangi bir çatlak oluşumu görülmemiştir. Numunelerin tamamı östenitik mikroyapıya sahiptir. Östenitik paslanmaz çelikler korozyon dayanımları oldukça yüksek olan alaşımlardır. Bu nedenle deneysel çalışmalar için seçilen alaşımların tümü gerilmeli korozyon deneyindeki saldırgan korozif ortama karşı bir direnc göstermiş ve çatlak oluşumu engellenmiştir.

Gerilmeli korozyon deneylerinde numunelerin maruz kaldığı gerilim değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\epsilon = 4(2E - K)t^2 - \frac{2E^2}{K^2} \left(\frac{L}{H}\right)^2 \quad (4)$$

$$(L - H)/H = (K/2E - K) - 1 \quad (5)$$

L = numune uzunluğu, H = destekler arası mesafe, t = numune kalınlığı,  $\epsilon$  = maksimum çekme dayanımı,

$$K = \int_0^L (1 - k^2 \sin^2 \zeta)^{-1/2} d\zeta \quad (6)$$

$$E = \int_0^L (1 - k^2 \sin^2 \zeta)^{1/2} d\zeta \quad (7)$$

$k = \sin \theta/2$ ,  $\theta$  = numunenin maksimum eğimi,  $\zeta$  = integral parametresi. L=19 cm, H=14 cm, t=0,9 mm,  $\theta=54^\circ$  ise

$$K = \int_0^L (1 - k^2 \sin^2 \zeta)^{-1/2} d\zeta = 96,93 \quad (8)$$

$$E = \int_0^L (1 - k^2 \sin^2 \zeta)^{1/2} d\zeta = 83,8 \quad (9)$$

$$\epsilon = 4(2E - K)t^2 - \frac{2E^2}{K^2} \left(\frac{L}{H}\right)^2 = 0,368 \quad (10)$$

$$(L - H)/H = (K/2E - K) - 1 = 0,368 \quad (11)$$

Yapılan mekanik testler sonucunda elastiklik modülü aşağıdaki formüle (Hooke Kanunu) göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (12)$$

Çizelge 5. Numunelerin elastiklik modülleri

Numune No.	1	2	3	4	5
Elastiklik Modülü (GPa)	213	204	227	225	223

Uygulanan mekanik testlerdeki verilerden elde edilen verilerden hesaplanan elastiklik modülü ve Hooke Kanunu'na uygun olarak gerilmeli korozyon çatlağı standardındaki formülünden hesaplanan gerilim ile numunelere uygulanan gerilim hesaplanmıştır.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (13)$$

Çizelge 6. Numunelere uygulanan gerilim değerleri

Numune No.	1	2	3	4	5
Uygulanan Gerilim (GPa)	78,384	75,072	83,536	82,8	82,064

## 4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada geleneksel östenitik paslanmaz çelik alaşımları ile Trinox Metal firması tarafından patentlenen 304E ve 304U alaşımlarının mekanik özellikleri ve gerilmeli korozyon davranışları araştırılmıştır.

Alaşımların gerilmeli korozyon davranışları incelendiğinde, numunelerde korozyon ortamında herhangi bir çatlak oluşumu görülmemiş ve alaşımların tamamının ilgili ortamda yeterli dirence sahip olduğu belirlenmiştir.

Mekanik özellikler açısından incelendiğinde ise patentli alaşımlar olan 304E ve 304U alaşımlarının geleneksel alaşımlara göre oldukça iyi süneklik özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Sen, M. (2010). Ası 304 Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Soğuk Şekillendirme Miktaının Korozyon Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Retrieved 25 March 2022, from <http://hdl.handle.net/11527/9161>
- [2] Dinçer, İ., Güraydın, B., Ay, O., Ekici, H., & Paçman, E. (2021). Determination of Heat Treatment Parameters of Cold Rolled AISI-304 Stainless Steel Plate by Electrical Resistance. In 9th International Advanced Technologies Symposium (pp. 14-19). 9th International Advanced Technologies Symposium. Retrieved from <http://ats9.iaacconference.com/maees/Full-text-Proceedings-Book.pdf>
- [3] Ay, O., Ekici, H., Güraydın, B., Güler, E., Daniş, S., Orman, K., & Dinçer, M. (2020). Investigation of Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel Depending on Cold Deformation Rate, Phase Quantity and Heat Treatment Processes. Journal of Mineral and Material Science, 1(5).
- [4] Nga, N., Shinohara, T., & Lien, L. (2017). Effects of Environment Factors on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Atmospheric Environments. Zaiyyo-To-Kankyo, 66(6), 209-213. doi: 10.3323/jcorr.66.209
- [5] Shoji, T., Lu, Z., & Peng, Q. (2011). Factors affecting stress corrosion cracking (SCC) and fundamental mechanistic understanding of stainless steels. Stress Corrosion Cracking, 245-272. doi: 10.1533/9780857093769.3.245
- [6] Jones, R. (2017). Stress Corrosion Cracking. Materials Park, OH: ASM International.