

## AISI 4140 ÇELİĞİNİN JOHNSON-COOK DAYANIM MODELİ PARAMETRELERİNİN TAYLOR ÇARPMA TESTİ İLE DOĞRULANMASI

Hakan HAFIZOĞLU<sup>1</sup>  
TÜBİTAK Savunma Sanayii  
Araştırma ve Geliştirme  
Enstitüsü, ANKARA

Hüseyin Emrah KONOKMAN<sup>2</sup>  
TÜBİTAK Savunma Sanayii  
Araştırma ve Geliştirme  
Enstitüsü, ANKARA

Ogün OĞAN<sup>3</sup>  
TÜBİTAK Savunma Sanayii  
Araştırma ve Geliştirme  
Enstitüsü, ANKARA

### ÖZET

*Bu çalışmada, havacılık endüstrisinde üstün mekanik özelliklerinden dolayı kullanılan AISI 4140 çeliğinin Johnson-Cook dayanım modeli parametrelerinin Taylor çarpma testi ve analizi ile doğrulanması yapılmıştır. Silindirik çelik numune tek aşamalı gaz silahı kullanılarak 265 m/s hıza çıkarılmış ve sert hedefe çarpıtılmıştır. Test koşulu, dayanım modeli parametreleri kullanılarak 2 boyutlu olarak Autodyn hidrokodu ile modellenmiştir. Test ve analiz sonuçları numune boyutları ve deformasyon profili açısından karşılaştırılmıştır. Test ve analiz sonuçları, AISI 4140 çeliği için hesaplanan Johnson-Cook dayanım modeli parametrelerinin malzemenin dinamik koşuldaki davranışını modelleme açısından makul sonuçlar verdiğini göstermiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** 4140 Çeliği, Johnson-Cook Dayanım Modeli, hidrokod

### GİRİŞ

Havacılık endüstrisinde kullanılan bileşenler ağır dinamik koşullara maruz kalmaktadır [Prabhu, Kulkarni ve Sharma, 2020]. Bu koşullarda istenilen performansın elde edilebilmesi için mekanik özellikleri yüksek malzemeler kullanılmalıdır. AISI 4140 çeliği yüksek sertlik, dayanım, tokluk ve iyi korozyon özelliklerine sahip olduğu için havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptir [Ulutan, Celik, Gasan ve Er, 2010, Liu, Cong, Kim vd, 2017, Prabhu, Prabhu, Sharma ve Kulkarni, 2020]. Bu çelik malzemenin dinamik koşuldaki davranışlarının incelenmesi daha iyi performans elde edilmesi için kritik öneme sahiptir. Dinamik koşuldaki metal deformasyonu ve hasarı karmaşık ve incelenmesi zor bir süreçtir [Wang ve Shi, 2013].

Malzemelerde oluşan deformasyon davranışları testlerle veya Autodyn, Ls-Dyna gibi çeşitli hidrokod yazılımları ile belirlenebilmektedir. Hidrokod yazılımlarında modellemeler yapılırken malzemenin özelliğine göre farklı dayanım modellerine ihtiyaç duyulmaktadır [Rohr, Nahme ve Thoma, 2005]. Metalik malzemeler için en çok tercih edilen ve en kullanışlı modellerin başında Johnson-Cook dayanım modeli gelmektedir [Johnson ve Cook, 1983, Rohr, Nahme, Thoma ve Anderson, 2008]. Bu dayanım modelinde malzemenin dayanımı; gerinme, gerinme hızı ve sıcaklık ile değişim göstermektedir. Johnson-Cook dayanım modeli aşağıdaki denklemle belirtilmektedir.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

Denklemden A, referans gerinme hızındaki akma dayanımını, B ve n gerinme sertleşmesine bağlı parametreleri, C, gerinme hızına bağlı parametreyi, m ise sıcaklığa bağlı parametreyi ifade etmektedir.

<sup>1</sup> Dr. Araştırmacı E-posta: hakan.hafizoglu@tubitak.gov.tr

<sup>2</sup> Dr. Araştırmacı, E-posta: emrah.konokman@tubitak.gov.tr

<sup>3</sup> Araştırmacı, E-posta: ogun.ogun@tubitak.gov.tr

Hidrokokod analizlerinin yapılabilmesi için her bir malzemenin dayanım modeli parametresinin durağan ve dinamik koşuldaki testlerle hesaplanması gerekmektedir. Hesaplanan parametrelerin doğruluğu ise dinamik koşuldaki testler ile belirlenmektedir. Bu amaçla kullanılan en basit ve etkili test yöntemi Taylor çarpma testidir [Yu, Cheng-wen, Jing, Fu-chi, 2011]. Bu testte, silindirik bir numune belirli bir hızla sert hedefe çarpıtılmakta ve deforme edilmektedir [Teng, Wierzbicki, Hiermaier ve Rohr, 2005, Martin, Shen, Thadhani, 2008, Forde, Proud, Walley, 2009]. Malzeme parametrelerinin doğrulaması Taylor çarpma testi ve analizinde elde edilen numunenin profil geometrisinin karşılaştırılması ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliği için önceki çalışmalarda hesaplanan Johnson-Cook dayanım modeli parametrelerinin Taylor çarpma testi ile doğrulaması yapılmıştır.

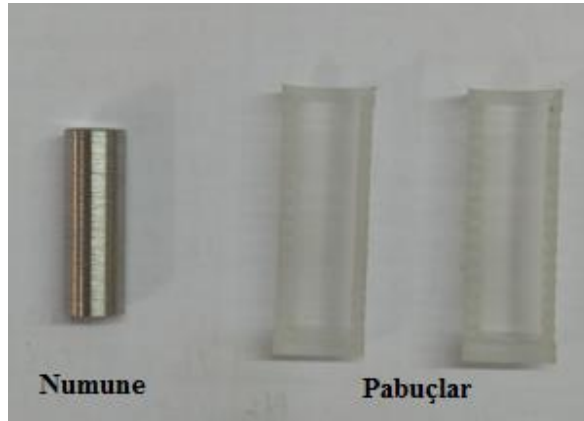
### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Oda sıcaklığında ve statik koşulda (0.001, 0.01 ve 0.1 /s) çekme testleri, Hopkinson basınç barı ile oda sıcaklığında dinamik (1000, 1500, 2200 /s) basma testleri ve yüksek sıcaklıkta (100 ve 150 °C) dinamik basma testleri sonucunda AISI 4140 çeliği malzemesinin Johnson-Cook dayanım modeli parametreleri hesaplanmıştır. Yüksek gerinim hızlarındaki ve farklı sıcaklıklardaki testler Split-Hopkinson Basınç Barı test düzeneği ile yapılmıştır. Test verilerine eğri uyurma çalışması sonucunda AISI 4140 çeliği malzemesine ait dayanım modeli parametreleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. AISI 4140 çeliğinin Johnson-Cook dayanım modeli parametreleri

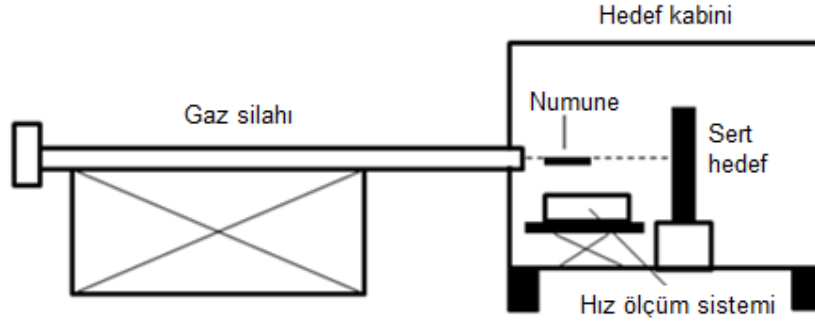
A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
405	895	0.3815	0.0159	0.763

Testler sonucunda elde edilen parametrelerin doğrulamasının yapılması gerekmektedir. Bu amaçla silindirik numunelerle çarpma testleri yapılmış ve testler sonucunda numunelerden elde edilen deformasyon ve son boyut bilgileri hesaplanan parametrelerle yapılan analizlerle karşılaştırılmış ve parametrelerin doğruluğu değerlendirilmiştir. Parametre doğrulaması için Taylor çarpma testi kullanılmıştır. Bu testte 8 mm çapta ve 24 mm boyda AISI 4140 çeliğinden üretilmiş silindirik numuneler kullanılmıştır. Numuneler polikarbonat malzemeden üretilmiş pabuçlar yardımıyla 12 mm kalibreli gaz silahından hedefe hızlandırılmıştır. Testlerde kullanılan numune ve pabuçlar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Silindirik test numunesi ve polikarbonat pabuçlar

Namlu içerisinde hızlanan numune namludan çıktıktan sonra pabuçlardan ayrılmaktadır. Ayrılma sonrası serbest uçuş yapan numune sert bir hedefe 265 m/s ile çarpıtılmış ve numunede deformasyon elde edilmiştir. Numunenin çarpma hızı uçuş hattında bulunan optik bir sistemle belirlenmiştir. Taylor çarpma test düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir.

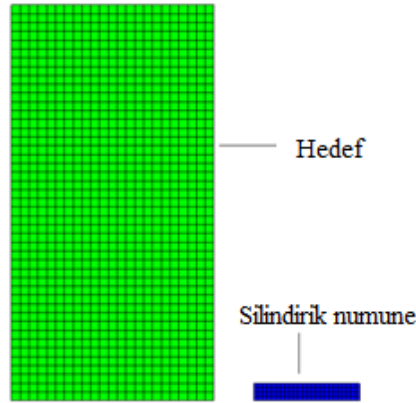


Şekil 2. Taylor çarpma test düzeneğinin şematik gösterimi

Test sonucunda deforme olan numune optik tarama cihazı kullanılarak tarama işleminden geçirilmiş ve numune geometrisi analiz ile karşılaştırılmıştır.

### SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

Sayısal modelleme çalışmaları Autodyn v16.2'de 2 boyutlu olarak aksel simetrik ve Lagrange yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Numunenin ve hedefin modellenmiş gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.

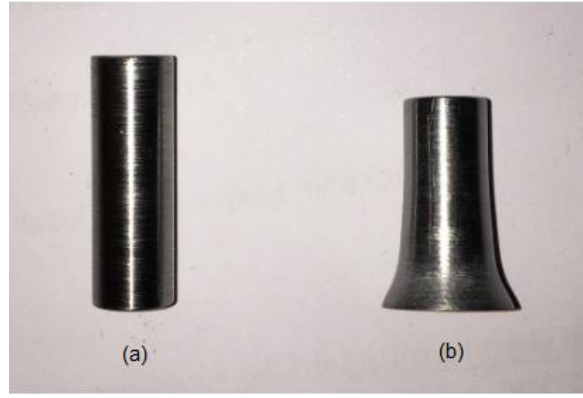


Şekil 3. Taylor çarpma testinin 2 boyutlu ve aksel simetrik modeli

Sayısal çalışmalarda, çelik numune ve hedef için Johnson-Cook dayanım modeli tanımlanmıştır. Modelleme aşamasında silindirik numune için  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  boyutunda, hedef için ise  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  boyutunda kare eleman kullanılmıştır. Numuneye  $265 \text{ m/s}$  hız tanımlanmış ve hedefe çarptırılmıştır. Modelde hedef ile numune arasında çarpma sırasında sürtünme olmadığı kabul edilmiştir.

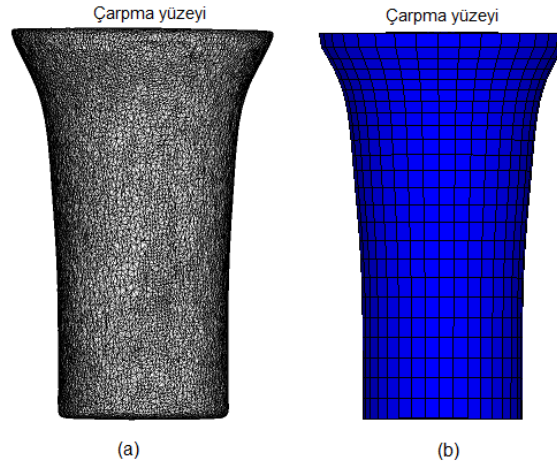
### SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Silindirik çelik numune hedefe çarptıktan sonra çarpma yüzeyinden itibaren Şekil 4'te belirtildiği üzere mantarlanma deformasyonun olduğu görülmüştür. Numunedenin çarpma yüzeyinden uzaklaştıkça mantarlanmış yüzey ve deforme olmayan kısım arasında bir geçiş bölgesi ve devamında ise deforme olmayan ve çapın ilk çapa eşit olarak kaldığı bir bölge bulunmaktadır. Numunenin çarpma yüzeyi incelendiğinde herhangi bir kırığın ve çatlağın oluşmadığı görülmüştür.



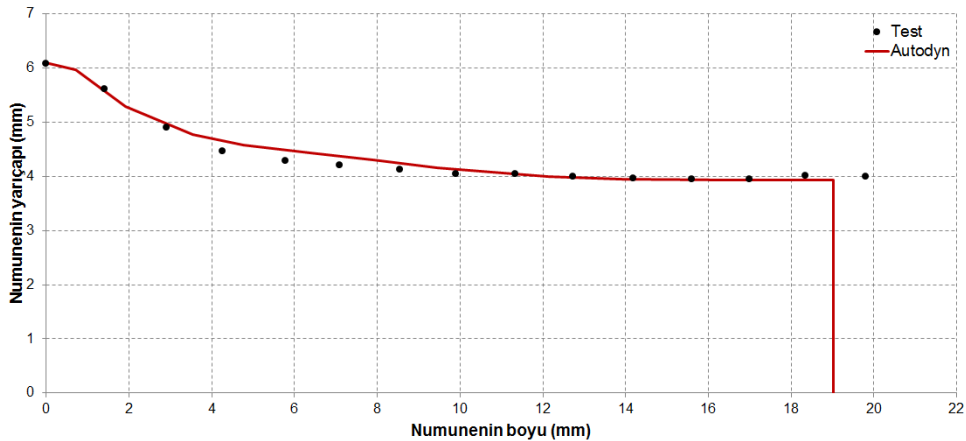
Şekil 4. Silindirik numunenin görüntüleri (a) test öncesi (b) test sonrası

Analiz ve test sonuçları karşılaştırıldığında numunede birbirine çok benzer deformasyon profili elde edildiği görülmüştür. Numunenin hedefe çarpma bölgesinde mantarlanma deformasyonunun olduğu gözlenmiştir. Test sonucu numunenin optik tarama görüntüsünden ve analiz sonucundan elde edilen deformasyon geometrilerinin karşılaştırması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Deforme olan numunenin görüntüsü (a) optik tarama ile elde edilen (b) analiz ile elde edilen

Testte ve analizde deforme olan numunenin yarıçap ve boy karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde numunenin çarpma yüzeyindeki yarıçap değerleri arasında gözle görülür bir farkın oluşmadığı görülmüştür. Çarpma sonrası son boy değerleri karşılaştırıldığında ise test ve analiz sonuçları arasındaki farkın % 4 olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca numunenin çarpma yüzeyinden deforme olmayan arka bölgesine doğru deformasyon profili incelendiğinde testte ve analizde benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6. Test ve analiz sonucu numunenin boyutları

## SONUÇ

Bu çalışmada, havacılık endüstrisinde üstün mekanik ve korozyon özellikleri dolayısıyla kullanım alanına sahip AISI 4140 çeliğinin Johnson-Cook dayanım modeli parametrelerinin Taylor çarpma testi ile doğrulaması yapılmıştır. Bu amaçla test ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz ve test sonucunda numunenin çap ve boy değerleri karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. AISI 4140 çeliği için hesaplanan dayanım modeli parametrelerinin malzemenin dinamik koşuldaki davranışının modellenmesinde etkili ve yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

### Kaynaklar

- Forde, L. C., Proud, W. G., Walley, S. M., 2009, *Symmetrical Taylor Impact Studies of Copper*, Proceedings of the Royal Society, 465, 769-790.
- Johnson, G.R., Cook, W.H., 1983, *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. 21. 541-547.
- Liu, Z., Cong, W., Kim, H., Ning, F., Jiang, Q., Li, T., ... Zhou, Y., 2017, *Feasibility exploration of superalloys for AISI 4140 steel repairing using laser engineered net shaping*, Procedia Manufacturing, 10, 912-922.
- Martin, M., Shen, T., Thadhani, N. N., 2008, *Instrumented anvil-on-rod impact experiments for validating constitutive strength model for simulating transient dynamic deformation response of metals*, Materials Science and Engineering A, 494, 416-424.
- Prabhu, P. R., Prabhu, D., Sharma, S., Kulkarni, S. M., 2020, *Surface properties and corrosion behavior of turn-assisted deep-cold-rolled AISI 4140 steel*. Journal of Materials Engineering and Performance, 29(9), 5871-5885.
- Prabhu, P. R., Kulkarni, S. M., Sharma, S., 2020, *Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts*, Journal of Materials Research and Technology, 9(5), 11402-11423.
- Rohr, I., Nahme, H., Thoma, K., 2005, *Material Characterization and Constitutive Modelling of Ductile High Strength Steel for a Wide Range of Strain Rates*, International Journal of Impact Engineering, 31, 401-433.
- Rohr, I., Nahme, H., Thoma, K., Anderson Jr, C.E., 2008, *Material Characterisation and Constitutive Modelling of a Tungsten-Sintered Alloy for a Wide Range of Strain Rates*, International Journal of Impact Engineering, 35, 811-819.
- Teng, X., Wierzbicki, T., Hiermaier, S., Rohr, I., 2005, *Numerical Prediction of Fracture in the Taylor Test* Int J Solids Struct, 42 (9), 2929-48.
- Ulutun, M., Celik, O. N., Gasan, H., Er, U., 2010, *Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel*, Journal of Materials Science & Technology, 26(3), 251-257.
- Wang, X., Shi, J., 2013, *Validation of Johnson-Cook Plasticity and Damage Model Using Impact Experiment*, International Journal of Impact Engineering, 60, 67-75.
- Yu, R., Cheng-wen, T., Jing, Z., Fu-chi, W., 2011, *Dynamic Fracture of Ti-6Al-4V Alloy in Taylor Impact Test*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 21, 223-235.