

Alüminyum Alaşımli Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması

Validation of Experimental Impact Tests on Aluminum Alloy Car Wheels using the Finite Element Method

Emrah AYRAN^{1,2}, Mahmut PEKEDİS^{1*}

¹ Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, emrah.ayran@maxionwheels.com, mahmut.pekedis@ege.edu.tr

² Maxion İnci Jant Sanayi A. Ş, Manisa, emrah.ayran@maxionwheels.com

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 26 Kasım 2019
Düzeltilme: 11 Mart 2020
Kabul: 23 Mayıs 2020

Anahtar kelimeler:

Alüminyum alaşımli jant, sonlu elemanlar yöntemi, şekil değişim hızı, Johnson-Cook malzeme modeli, darbe testi.

ÖZET

Jantlar için gerçekleştirilen sanal gerçekçi simülasyonların hassasiyeti, ağırlıklı olarak üretim sürecinde karşılaşılan değişken faktörlerin analizlere dahil edilmesine bağlıdır. Buna ek olarak, şekil değiştirme hız etkisi de simülasyon gerçekliğini etkileyen bir diğer faktördür. Burada, bu etkiyi malzeme modellerine dâhil edip daha doğru analizlerin gerçekleştirilmesini hedefliyoruz. Başlangıçta jantlardan çıkartılan çekme testi numuneleri 0.1, 1, 10, 100 ve 600 mm/dk'lık şekil değişim hızlarında test edilip elde edilen ölçümler, Johnson-Cook malzeme modelinde işlenerek malzeme katsayıları bulunmuştur. Sonra, standart olarak kullanılan malzeme katsayıları ile şekil değişim hız etkisini içeren bu katsayılar jant darbe analizlerine dâhil edip simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve her ikisinin sonucu deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Farklı şekil değiştirme hızında test edilen numunelerdeki akma ve kopma gerilmelerinin 10 mm/dk' daki hızla maksimum değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Elden edilen sonuçlardan, şekil değişim hızı etkisinin tanımlandığı simülasyonların deneysel darbe verileriyle daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, şekil değişim hızının nümerik sonuçlar üzerinde etkili olduğu ve daha gerçekçi simülasyonlar elde edilmesi için bunların bünyesel malzeme modeline katılması gerektiği çıkarımı yapılmıştır.

Doi: 10.24012/dumf.651318

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 December 2019
Revised: 11 March 2020
Accepted: 23 May 2020

Keywords:

Aluminum alloy wheels, finite element method, strain rate, Johnson-Cook material model, impact test

ABSTRACT

The sensitivity of realistic simulations carried out for car wheels are heavily dependent on whether the variable factors encountered during manufacturing are included into the analysis. Additionally, the strain rate is also one another factor that affects the reality of the simulation. Here, we aim to perform more accurate analysis by incorporating the strain rate effect into the material model. Initially, tensile test specimens that extracted from the wheels are tested at various strain rates such as 0.1, 1, 10, 100 and 600 mm/min to determine material parameters by processing the measurements in Johnson Cook material model. Then, numerical analyses are carried out for the wheels to simulate the impact test for two material models which the 1st includes the strain rate effect, while the 2nd does not. It is observed that the tensile and failure stresses have reached the maximum values for the tensile specimens tested at various strain rates. The results have shown the simulations that performed with strain rate effects are in more agreement with experimental impact data. As a result, it is concluded that the strain rate affects the numerical data which shows that it should be included in constitutive material model to obtain more realistic simulations.

* Sorumlu yazar / Correspondence
Mahmut PEKEDİS
✉ mahmut.pekedis@ege.edu.tr

Giriş

Jant, halk arasında her ne kadar görseiliğin ön planda tutulduğu bir parça olarak yorumlansa da, aslında bu görseiliğinin yanında araçtaki en önemli emniyet parçalarından birisidir. Otomotiv endüstrisindeki en önemli konulardan birisi yakıt tüketimini azaltma çalışmalarıdır. Yakıt tüketimini azaltmak için de araçlarda daha hafif malzemeler kullanılmaya başlanmış ve ağırlık azaltma çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Ağırlığın azaltılmasının yanında güvenlikten de ödün verilmemesi gerektiğinden, otomotiv endüstrisi düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli malzemelere yönelmiştir. Alüminyum alaşımlarının hafif ve yüksek mukavemetli olmasının yanında farklı özelliklerinin de olması bu alaşımın jant endüstrisinde kullanılması birçok avantajı da beraberinde getirmiştir. Yeni bir jant tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bazı noktalar vardır. Öncelikle jantın, belirlenen araç yükünü karşılayabilecek mukavemete sahip olması gerekmektedir. Dayanıklılığın yanı sıra hafiflik de çok önemli bir koşuldur. Bu nedenle jantın yük taşımayan bölgelerine ağırlığı azaltmak için çeşitli boşaltmalar da tasarlanabilmektedir. Tüm bunların yanında jant, birlikte araca monte edilecek diğer parçalarla (bijon, porya, lastik vb.) da uyumlu olması gerekmektedir. Aynı şekilde jantın çalışma koşullarında da yeterli dayanım koşullarını sağlaması gerekir.

Hâlihazırda, jantlara ilişkin geliştirme sürecinde farklı mekanik performans testleri uygulanmaktadır [1-3]. Jantların, gerçek ortamda maruz kalabilecekleri yanal darbelere karşı dayanımları "13° darbe testi", viraj boyunca üzerlerinde oluşan kuvvetler "köşe yorulma testi" ve dönme aşamasında oluşan kuvvetler "radyal yorulma testi" ile belirlenir [1-4]. Ancak bu testler çoğu zaman maliyetli ve bazen uzun süre alabilmektedir [5, 6]. Diğer taraftan bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, daha hızlı ve gerçekçi sayısal simülasyonların gerçekleştirilmesine olanak sağlayıp son zamanlarda jant endüstrisinde de yansımaları olmuştur [6, 8]. Bu sayısal simülasyonlar da çözücü olarak yaygın olan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmaktadır. Bu yöntem

kullanılarak alüminyum alaşımlı jantlarda uygulanan 13°lik darbe testinin simülasyonları birkaç çalışmada sunulmuştur [6-8]. Yine bir başka çalışmada, 90°lik darbe testi SEY ile analiz edilip Von Mises gerilme sonuçları zamana bağlı olarak verilmiştir [5]. Diğer taraftan SEY'den elde edilen simülasyonların hassasiyeti, uygulanan analiz tipi (statik, implicit-explicit dinamik), ağ (quad, hex vb.) malzeme modeli (lineer, lineer olmayan, şekil değişim hızı vb.) ve sınır koşulları gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Özellikle darbe veya çarpışma testlerinde, şekil değişim hızı etkisinden dolayı malzemenin sergilemiş olduğu mekanik davranış değişmekte ve bunun malzeme modeline dahil edilmesi gerekir [9-11]. Ancak, bu faktörün literatürde sunulan çalışmalarda ihmal edildiği görülmüştür [5-8]. Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen şekil değişim hız parametrelerinin malzeme modeline katarak daha gerçekçi analizlerin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

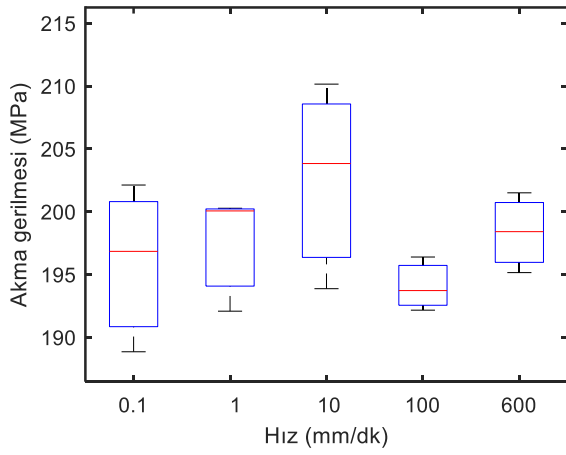
Çalışmanın akışı şu şekildedir. Önce, jantta kullanılan malzemeye ilişkin mekanik karakterizyondan bahsedilir. Sonra, deneysel ölçümlerin Johnson Cook modeli ile işlenmelerine ve malzeme katsayılarının belirlenmesine yönelik teknik açıklanır. En sonunda da simülasyon ve test sonuçları değerlendirilip birbirleriyle karşılaştırılır.

Malzemenin mekanik karakterizasyonu

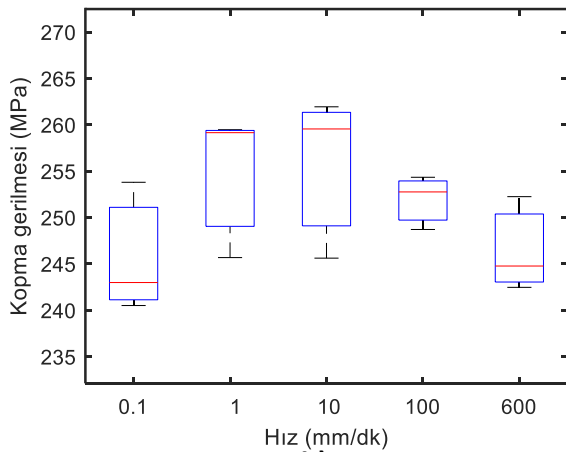
Başlangıçta, A356 alaşımlı malzemedan üretilen jantın 5 kritik feder bölgesinden (yaygın olarak hasarın oluştuğu kısımlar) 3'er numune çıkarılıp farklı hızlarda çekme testlerine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Bu numunelerin çapı 5 mm ve gauge boyu ise 33 mm'dir. Aynı şartlar altında ve sıralı olarak dökülen bu jantların, aynı çekme hızındaki test sonuçları arasında Şekil 1'de verildiği üzere az da olsa bir değişkenlik gözlenmektedir.

Tablo 1. Çekme testi sonuçları

Çekme hızı (mm/dk)	Numune no	Akma gerilmesi (MPa)	Kopma gerilmesi (MPa)	Birim şekil değişimi (%)
0.1	1	196.84	253.81	4.38
	2	202.12	243	2.27
	3	188.85	240.52	3.21
1	1	200.06	259.48	3.96
	2	192.08	245.69	3.47
	3	200.27	259.16	4.20
10	1	203.83	259.56	3.74
	2	210.15	261.95	2.88
	3	193.87	245.63	2.47
100	1	192.16	254.35	3.53
	2	196.39	252.77	2.77
	3	193.72	248.72	2.87
600	1	198.41	242.48	2.76
	2	195.15	252.26	3.59
	3	201.50	244.78	2.77



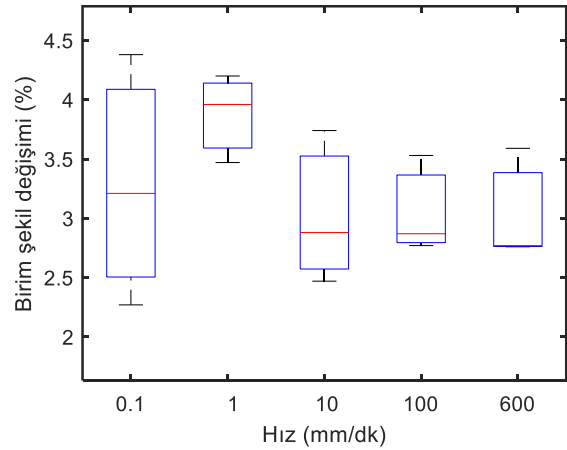
a)



b)

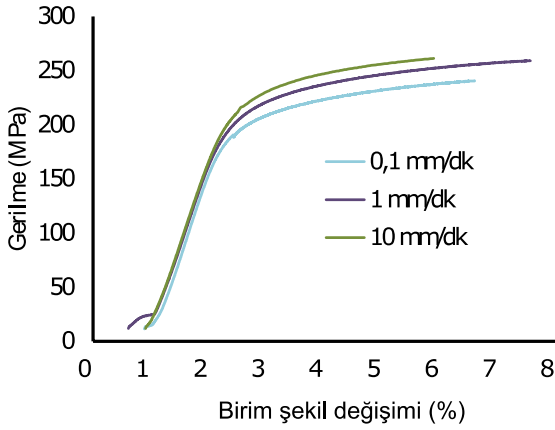
Şekil 1. Çekme hızına bağlı olarak elde edilen malzeme özelliklerinin kutu grafiğindeki dağılımları, a) Akma gerilmesi, b) Kopma gerilmesi (Kırmızı çizgi medyanı gösterir)

Çok düşük uzama değerleri görülen numuneler incelendiğinde, numune çıkarılan bölgede döküm boşluğu gözlenmiş ve bu kopmayı hızlandırmıştır. Bu değişkenlik döküm yönteminden ve jant tasarımından kaynaklanmaktadır. Dökümde; dolumu ve katılaşmayı etkileyen her türlü faktör jantın mekanik özelliklerine etki etmektedir. Bu faktörler de çok fazla olduğu için bu değişkenlik belli oranda görülebilmektedir. Akma ve kopma gerilmesi açısından karşılaştırıldığında, 10 mm/dk hıza kadar artış sonrada düşüş gözlenmiştir (Şekil 1). Maksimum birim şekil değişimi ise 1 mm/dk hızında gerçekleşmiştir (Şekil 2). Gruplar içerisinde farklılıklar görülmüş ve bu amaçla medyan bölgesinde kalan numuneler seçilip malzeme modellerinde kullanılmıştır.



Şekil 2. Çekme hızına bağlı olarak elde edilen birim şekil değişim verilerinin kutu grafiğindeki dağılımları, (Kırmızı çizgi medyanı gösterir)

Seçilen numunelere ilişkin gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere çekme hızı arttıkça akma ve kopma gerilmesi artmaktadır.



Şekil 3. Farklı çekme hızlarına bağlı olarak elde edilen gerilme-şekil değişimi

Johnson Cook malzeme modeli

Bu malzeme modeli, malzemenin akma gerilmesini, pekleşme özelliklerini, şekil değiştirme, şekil değiştirme hızını ve yüksek sıcaklıktaki davranışını ifade eden bağıntıdır.

Johnson Cook modelinde gerilme açık bir formda aşağıdaki biçimde olduğu kabul edilmektedir [11]:

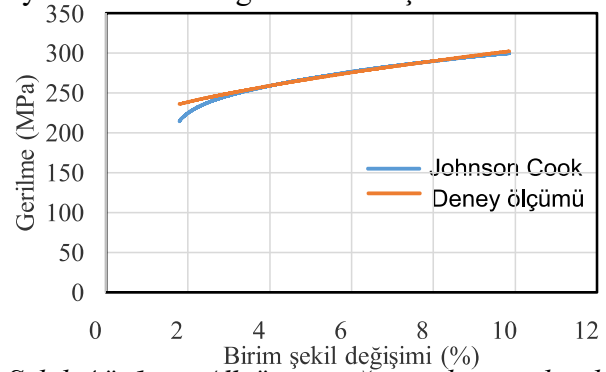
$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_n} \right) \left(1 - (\hat{T})^m \right) \quad (1)$$

Üstteki eşitlikle; a akma gerilmesi, b plastik pekleşme parametresi, n plastik pekleşme üstü, c şekil değişim hız katsayısı, $\dot{\varepsilon}$ şekil değişim hızı, $\dot{\varepsilon}_0$ referans şekil değişim hızı, T^* sıcaklık etkisi ve m ise sıcaklık üssüdür. Johnson-Cook hasar modelinde şekil değişimi ise,

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}} \right) \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_n} \right) \left(1 + D_5 (\hat{T})^m \right) \quad (2)$$

ile ifade edilip D_1 , D_2 , D_3 , D_4 ve D_5 hasar parametreleri, σ_m ortalama gerilme, σ_{vm} von-mises gerilmesi, $\dot{\varepsilon}$ şekil değişim hızı, $\dot{\varepsilon}_0$ referans şekil değişim hızı ve T^* ise sıcaklık etkisidir [11]. Sözü geçen bu D parametreleri, deneysel verilerin Denklem 2'de gösterilen denkleme uygulanıp eğri uydurma tekniğiyle belirlenir. Burada, sıcaklığın etkisi dâhil edilmediğinden $D_5 = 0$ olur.

Başlangıçta, referans şekil değişim hızı olan 1 mm/dk için ($\dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}$) hesaplama yapılmıştır. Dolayısıyla şekil değişim hızı katsayısı olan c değerinin etkisi ortadan kalkmıştır. Çekme testinden elde edilen ölçümlerin Johnson Cook malzeme modelinde eğri uydurma sonucu sonucu $a = 200.06$ MPa, $b = 414.65$ MPa ve $n = 0,604979$ şeklinde bulunmuştur. Aynı yöntem hasar modeli için uygulandığında $D_1 = (0,0396)$, $D_2 = (0,1)$ ve $D_3 = (-20)$ olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçüm ile modelden elde edilen değerler, Şekil 4'de verildiği üzere özellikle % 2.5'ten büyük şekil değişimleri için birbirleriyle uyumlu oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 4." 1 mm/dk " için eğri uydurma ile elde edilen Johnson-Cook malzeme model eğrisi ile deneysel ölçüm eğrisi

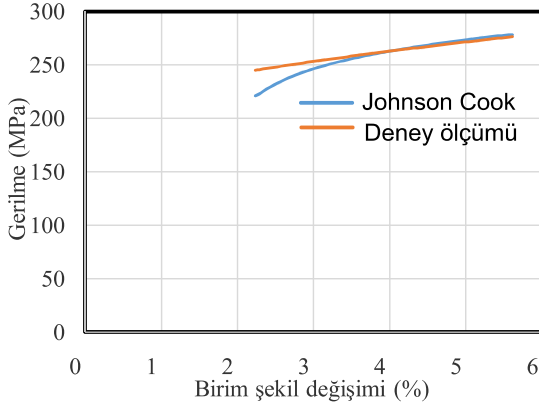
Şekil değişim hız etkisini işlemlere dahil etmek için c katsayısının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, 1 mm/dk hız ile yapılmış çekme testinin ham verilerinden elde edilen a , b ve n değerleri 10 mm/dk hız ile yapılmış bir başka testinin ham verileriyle oluşturulmuş gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme grafiğinin üzerine yerleştirilir. Bu işlemde şekil değişim hızı faktörü olan c katsayısının etkisi gözlenir. Şekil 5'de eğri yerleştirme işlemi sonucunda elde edilen yeni eğri gösterilmiştir. Aynı işlemler diğer hızlar ve hasar modeli için gerçekleştirilmiş ve nihai olarak elde edilen Johnson Cook parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Malzemenin yoğunluğu 2700 kg/m^3 ve çekme testinden hesaplanan elastisite modülü ise 77.8 GPa 'dır.

Tablo 2. Şekil değişim hızı etkisinin dikkate alınması sonucu hesaplanan malzeme modeli katsayıları

a (Pa)	b (Pa)	n	c
200060000	414659259	0,604979	0,059651

Tablo 3. Şekil değişim hızı etkisinin dikkate alınması sonucu hesaplanan malzeme hasar modeline ilişkin katsayılar

D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
0,0396	0,1	-20	0,01



Şekil 5. "10 mm/dk" için eğri uydurma ile elde edilen Johnson-Cook malzeme model eğrisi ile deneysel ölçüm eğrisi

Darbe testi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulama

Darbe testi alüminyum alaşımlı jantların, maruz kalabileceği yanal darbelere karşı dayanımlarını belirlemek için uygulanan tahribatlı bir yöntemidir. Araç yükü de göz önünde bulundurularak, jantın kırılmaya karşı yeterli direnç göstermesi gerekir. Jant, test cihazına yer eksenine ile 13 derece açı yapacak şekilde bir flanş yardımı ile bağlanır. Sonra, rijit bir plaka 230 mm yüksekten jant üzerine serbest bırakılmasıyla test tamamlanır (Şekil 6).

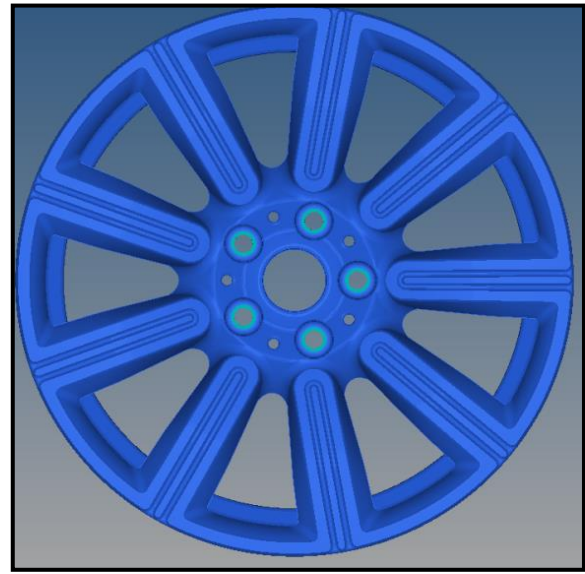


Şekil 6. Darbe testi

Jantların feder bölgeleri simetrik bir yapıdadır ancak göbek bölgesi federlere göre simetrik

değildir. Bu nedenle jant modelinde göbek bölgesi ve feder bölgesinin ağ yapısı, geometrik olarak birbirinden ayrılmış ve bu şekilde ağ hazırlanmıştır.

Jant ölçüleri 6J x 17'dir. Model üzerinde, jantın yük taşıyan bölgelerinde 1.9 mm, diğer bölgelerinde ise 2.5 - 5 mm uzunluğunda piramit (tetrahedral) elemanlar kullanılarak ağ yapısı örülmüştür. Modelin tamamı 1397198 adet üç boyutlu elemandan oluşmaktadır. Jant modeline ilişkin tüm ağ yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Jant modeline ilişkin sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar jant modeli, gerçek testteki gibi yer eksenine ile 13 derece bir açı olacak şekilde düzenlenip bijon ise yüzey ağlarından sabitlenmiştir. Jantın en üst noktasından temasa çok yakın pozisyonda rijit bir plaka tanımlanmıştır. Bu plaka gerçek testte 230 mm yükseklikten serbest düşme ile bırakılmaktadır. Ancak simülasyonda serbest düşme tanımlamak çözüm süresini gereksiz uzatacaktır. Bu nedenle simülasyonda oluşturulan rijit plaka jant modeline çok yakın bir pozisyona konumlandırılır ve ilk hız tanımlanır. İlk hız, plakanın 230 mm yükseklikten düşerek, temas noktasına geldiği andaki potansiyel enerji farkının kinetik enerjiye dönüştürmeyle hesaplanmış ve değeri 2,12 m/s'dir (Şekil 8).

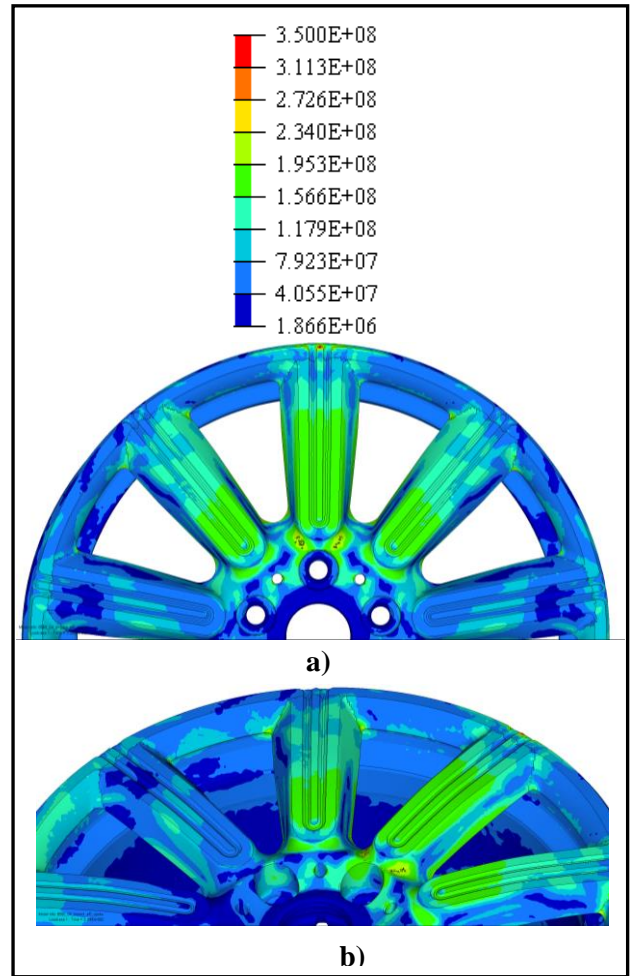
her hangi bir hasar veya çatlak gözlenmemiştir. Bu da yapılan simülasyon ile test arasında bir farklılık olduğu yorumunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle simülasyonun geliştirilmesi gerektiği düşünülmüş ve sonuca büyük etkisi olduğu düşünülen malzeme modeline şekil değişim hızı faktörü eklenerek aynı şartlar altında simülasyon tamamlanmıştır.



Şekil 10. Gerçek darbe test sonuçları

Şekil değişim hızı etkisinin dahil edildiği darbe testinin simülasyon sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Bu simülasyon sonucunda hasar görünmemektedir. Sadece bir kaç elemanın, kopma gerilmesi değerinin üzerine çıkması sonucu ihmal edilebilecek düzeyde hasarlar gerçekleşmiştir. Nitekim bu hasarlar tekil gerilmelerden oluşmuştur. Bir başka deyişle, bu

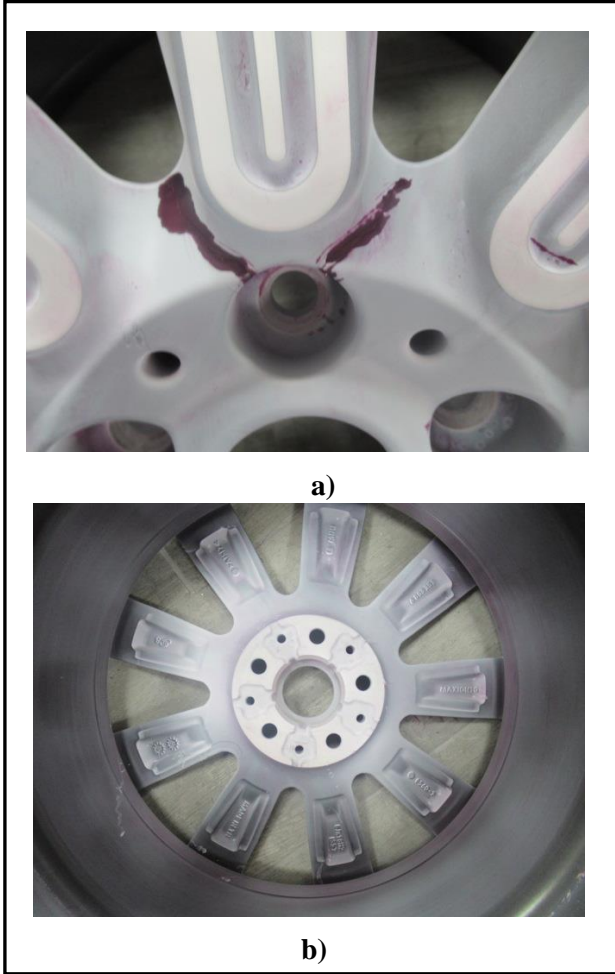
bölgede yer alan piramit elemanlar diğerlerine nazaran daha keskin köşeler barındırdığından daha yüksek gerilmeler oluşmuştur. Bunun sonucu olarak ta bu elemanlarda kısmi de olsa hasarlar tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu simülasyon sonuçları, gerçek testte de herhangi bir hasar oluşmayacağını ön görmektedir. Nitekim Şekil 11'de, şekil değişim hız etkisinin tanımlandığı analizler, tanımlanmayana göre, daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 11. Şekil değişim hızı etkisi dahil edilmiş darbe testi simülasyonu, a) Ön görünüş, b) Arka görünüş

Şekil değişim hızı etkisinin göz ardı edildiği, darbe testi simülasyonunda görülen, yüksek gerilme bölgesinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla tekrar bir gerçek darbe testi yapılmıştır. Bu yapılan darbe testinde, jantta bir çatlak hasarı oluşturmak ve bu bölgeyi doğrulamak için normal taşıması gerektiği ağırlıktan 80 kg daha yüksek bir ağırlık ile test gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 12'de

gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, jantın bijon ve feder birleşim bölgesinde hasar oluşmuştur. Ancak, jantın arkasında bir çatlak hasarı tespit edilmemiştir. Bu test sonuçlarında tespit edilen çatlak, Şekil 9'da görünen hasar ile aynı bölgede oluşmaktadır. Bu da jantın yüksek gerilme bölgesinin doğru tespit edildiği çıkarımının yapılmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 12. Yüksek yük ile yapılan gerçek darbe testi, a) Ön görünüş, b) Arka görünüş

Bu çalışmada darbe testi simülasyonu iki farklı malzeme ve hasar modeli ile yapılmıştır. Bu iki malzeme ve hasar modeli arasındaki tek fark, şekil değişim hız etkisini tanımlayan parametrelerdir. Şekil değişim hızı etkisinin tanımlandığı simülasyon sonuçlarının gerçek test sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle, şekil değiştirme hızı parametresinin dâhil edildiği sonlu elemanlar

tekniginden daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede tasarım aşamasında daha doğru sonuçlar elde edilip, belki de daha hafif jantların tasarlanması mümkün olacaktır. Otomotiv endüstrisinde, daha doğru simülasyonlar ile birlikte daha hafif jantların tasarlanabilmesi, dolaylı yoldan yakıt tüketimini azaltmaya da fayda sağlayabilecektir. Sonuç olarak, hafif ticari araçlar için jant üretiminde kritik bir test olan sayısal darbe testinde şekil değiştirme hız parametresinin eklenmesiyle, ilerleyen çalışmalarda tekrarlı deneysel testler uygulamadan direkt nümerik yöntem ile jantın mekanik davranışları tespit edilebilecektir.

Kaynaklar

- [1] Society of Automotive Engineers J175. (2001). Wheels-Impact Test Procedures-Road Vehicles. SAE International Inc, Warrendale, PA, USA.
- [2] Society of Automotive Engineers, (2016). J175-201603, Wheels - Lateral Impact Test Procedure - Road Vehicles, SAE International Inc, Warrendale, PA, USA.
- [3] Ayran, E., (2019). Alüminyum Alaşımli Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- [4] Şirin, U., (2017). Alüminyum Alaşımli Otomobil Jantının Dinamik Testinin Modellenmesi ve Doğrulama Yaklaşımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- [5] Yang, L., Yang, H., Tan, H., Hu, P., Cheng, X., Lu J., (2018). Impact test simulation and structural optimization of aluminum alloy A356.2 wheel hub, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1074, 012068.
- [6] Yuan X., Zhang L., Chen X., Du B., Li B., Fan L., Pan Y., (2012). Numerical simulation of aluminum alloy wheel 13° impact test based on Abaqus, *Applied Mechanics and Materials* Vols, Trans Tech Publications, Switzerland, 1191-1196.
- [7] Bandral S., Singh., (2018). Impact analysis of car alloy wheel rim using finite element analysis, *International Journal of Engineering Engineering Research & Technology*, RDMEI Conf. Proc., 1-4.
- [8] Chang, C.L., Yang, S.H., (2009). Simulation of wheel impact test using finite element method, *Engineering Failure Analysis*, **16**, 1711-1719.
- [9] Chen, Y., Clausen, A.H., Hopperstad, O.S., Langseth, M., (2009). Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates, *International Journal of Solids and Structures*, **46**, 3825-35.
- [10] Altenhof, W., Ames, W., (2002). Strain rate effects for aluminum and magnesium alloys in finite element simulations of steering wheel armature impact tests, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, **25**, 1149-1156.
- [11] Johnson, G.R., Cook, W.H., (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, **21(1)**, 31-48.
- [12] Radioss Theory Manual, (2017), Large displacement finite element analysis, Altair Engineering.