OTEKON'14

7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi

26 – 27 Mayıs 2014, BURSA

YOLCU KOLTUKLARININ SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİNDE, ELASTİK PLASTİK MALZEME MODELİ İLE JOHNSON COOK MALZEME MODELİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE TEST SONUÇLARI İLE DOĞRULANMASI

Zafer S.Özcan[a], K.Furkan Sökmen[a],Aykut Güner[a], Uğur Akbaba[a], Murat Yazıcı[b*]

a . Assan Hanil Otomotiv Sanayi Ve Ticaret A.Ş, ULUTEK, Nilüfer/Bursa/Türkiye

b. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Nilüfer/Bursa/Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yönteminde, geleneksel yolcu koltuğu analizlerinde kullanılan elasto – plastik malzeme modeli ve populer Johnson Cook malzeme modeli karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analizler Altair® RADIOSS® Sonlu Elemanlar yazılımında gerçekleştirilmiştir. Modellemeye bu iki malzeme modelinin hasar kriterleri de uygulanmıştır. Bunlardan ilki, yoğun olarak kullanılan ve en çok bilinen hasar kriterlerinden maksimum plastik şekil değiştirme kriteridir. İkincisi ise, kümülatif hasar kriterine dayalı olan Johnson Cook hasar kriteridir. Yolcu koltuğu ayağının üretiminde kullanılan St37-2 (S235JR) çelik malzeme için Çekme,Basma ve Burulma testleri yapılarak, mühendislik gerilme-gerinim davranışları elde edilmiştir. Daha sonra bu eğriler gerçek gerilme-gerinim eğrilerine dönüştürülmüştür. Bu eğrilerden yararlanılarak seçilen malzeme modellerinin gerektirdiği malzeme sabitleri ve hasar modeli limit değerleri hesaplanmıştır. Deneysel olarak bulunan elde edilen ve bu veriler ile hesaplanan malzeme bilgileri kullanılarak, ECE R-14 test şartlarında analizler gerçekleştirilmiş ve yolcu koltuğu ayağının hasar davranışları bulunmuştur. Ayrıca deneysel olarak doğrulama çalışmaları hidrolik test düzeneği ile ECE R-14 test şartnamesine uygun olarak statik yükler altında gerçekleştirilmiş ve ayağın hasar şekilleri deneysel olarak elde edilmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda Elasto-plastik modeli ve maksimum plastik şekil değiştirme hasar kriteri ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, deneysel sonuçlar ile daha yüksek bir uyum gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sonlu Elemanlar Analizi, Malzeme Modeli, Hasar Modeli, ECE R-14 regülasyonu, yolcu koltuğu

Passenger Seat Leg Analysis with Tabulated Elasto-Plastic and Johnson Cook Material Laws and Correlation with Real Test Result

ABSTRACT

In the present study, elastic – plastic material model and Johnson Cook material model was investigated comparatively which were used in the traditional passenger seat finite element modeling and moreover experimental correlation study was performed. Altair® RADIOSS® finite element software was utilized. Additionally, failure criteria for max plastic strain damage criteria is mostly known and used material model by industry , secondly, Johnson Cook failure criteria which is derived from cumulative damage law was applied. For St37-2 (S235JR) steel material tension, compression, torsion real tests were performed and engineering stress – strain curves were obtained.By using these curves, true stress - strain curves were calculated for both material model and max. failure criteria limit values were found. Analysis models were prepared by using these datas which were obtained with experimental test. Under ECE R-14 regulation, passenger seat leg failure behaviour was observed in virtual analysis. Additionally, concentrated force was applied to seat structure via hydrolic cylinder test machine in accordance to ECE R-14 and failure behaviour was observed in the real test condition. In conclusion, elastic – plastic material model and max. plastic strain failure criteria was given better correlation with experimental tests.

Keywords: Finite Element Analysis, Material Model, Damage Model, ECE R -14 Regulation, Passenger seat

* Sorumlu yazar.

1.GİRİŞ

Civata bağlantıları endüstrinin hemen her alanında kullanımı nedeniyle, çok uzun yıllardır bilim adamları tarafından incelenmekte ve geliştirilmektedir [1,2,3,4,5]. Kara, hava ve deniz taşıtlarında ise başlangıçtan günümüze iki veya daha fazla parçanın birleştirilmesinde en çok yararlanılan yöntemlerden biridir[6]. Yapılan bilimsel çalışmaların çokluğu ve endüstriyel uygulama tecrübesine rağmen civata bağlantılarının güvenirliği hala taşıt endüstrisinde temel problem kaynaklarından bir tanesidir. Örneğin Mazda 3 ve Mazda 5 serisi araçlarında 2008 yılında yaşanan geri çağırmalar civata bağlantısı kaynaklı bir problem nedeniyle gerçekleşmiştir [6]. Otomotiv sektöründe büyük kayıplar yaşatan bu tür problelerin önüne geçebilmek için sertifikasyon testleri geliştirilmektedir.

Yolcu koltuklarının regülasyon testlerinden olan ECE R-14 testi,yüksek kuvvet değerleri ile gerçekleştirildiği için koltuk ana yapısında yüksek gerilim ve gerinim oluşturmaktadır.

Yolcu koltukları emniyet kemer bağlantılarını üzerlerinde taşımaları nedeniyle [7] kemerden gelecek statik ve dinamik kuvvetleri gövdeye koltuk ayakları vasıtasıyla iletirler. Koltuk ayakları ise üzerlerinde bağlantı delikleri içeren şekil verilmiş saclardan oluşmakta ve gövdeye civatalar vasıtasıyla bağlanmaktadırlar. Statik ve dinamik kuvvetler altında, koltuk anayapısında, örneğin ayaklarda , taşıyıcı profillerde ve arkalık profillerinde büyük deformasyonlar gözlenebilir. Örneğin yatay kuvvetlerin oluşturduğu en büyük moment değerlerinin etkidiği ayaklarda oluşan hasarlar ise en çok civata delikleri etrafında oluşmaktadır [8]. Bundan dolayı ECE R-14 testlerinde en çok koltuk ayakları civata bağlantı noktalarında yırtılma şeklinde hasarlar gözlemlenmektedir.

Günümüzde, artan sertifikasyon testi giderleri, Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) araçlarının kullanımını ihtiyaç haline getirmiştir [9]. Özellikle malzeme davranışını gereçeğe daha yakın temsil eden modellerin geliştirilmesi ve malzeme karakterizasyonuna yönelik çalışmalar, CAE yazılımlarından alınan sonuçların gerçeklerle uyumunu arttırmaktadır [10,8]. Uygulama mühendisleri açısından ise en önemli sorunlardan bir tanesi hangi malzeme modelinin, ele alınan probleme en uygun olduğunun tespitidir.

Bu çalışmada, Radioss yazılımında çoğunlukla kullanılan deneysel datanın tablo şeklinde girildiği elasto-plastik malzeme modeli (MAT 36) ve Johnson-cook plastik (MAT 2) malzeme modelleri statik yükleme şartları altında yolcu kolduğu ayağı hesaplamalarında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu incelemede Johnson-Cook hasar modeli de analizde kullanılarak ECE R-14 test şartnamesine uygun belirlenen yükleme ve sınır şartları altındaki hasar şekilleri sayısal olarak bulunmuştur. Yolcu koltuğu ayak malzemesi ST37-2 (S235JR) çelik malzeme olup, bu malzeme ile quasi-statik olarak çekme, basma ve burulma testleri standart numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Bu test sonuçlarından elde edilen gerilme gerinim diyagramları Radioss yazılımına tanıtılmıştır. Bunun yanısıra, gene bu eğiler kullanılarak Johnson Cook malzeme modeli katsayıları hesaplanmıştır. Bilgisayar ortamında sonlu elamanlar modeli hazırlanırken eleman boyutu optimize edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları, yolcu koltuğu ayağı analizinde kullanılan yük ve sınır şartlarında, hidrolik deney düzeneğinde teste tabi tutularak modelin doğrulanması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

2. YOLCU KOLTUĞUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

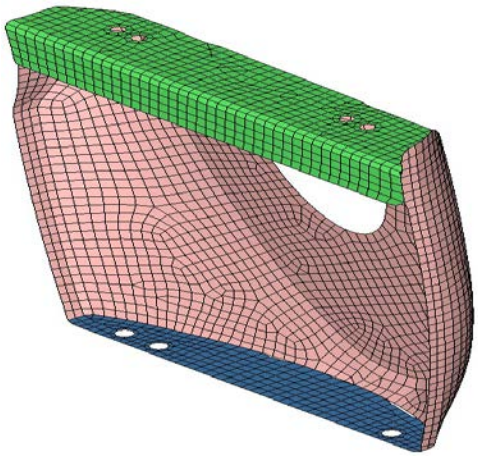
Yolcu koltuğu ayağının modellenmesinde Sonlu Elemanlar Analiz sektöründe iyi bilinen bir ön işlemci yazılım olan Altair Hypermesh yazılımı kullanılmıştır. Yazılıma yolcu koltuğu katı datası CAD model olarak alınmıştır. Bu yazılımda orta yüzey çıkarılarak model katı değil kabuk elemanlarla modellenme yoluna gidilmiştir. Elde edilen bu orta yüzeyler dörgen (4N) ve üçgen (3N) kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Ortalama eleman boyutu 6 mm olarak tutulmuştur. Hypermesh yazılımına katı model sac metal dataları alındı ve orta yüzeyin çıkarılması için gerekli geometrik değişiklikler yapıldı.Çıkartılan bu orta yüzeyler quad (4N) ve tria (3N) kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapısı oluşturuldu ve ortalama eleman büyüklüğü mesh optimizasyonu ile 6 mm civarında tutuldu. Kaynak bölgelerindeki elamanların düğüm noktaları birleştirilerek, kaynak yapısı modellendi böylece gereğinden fazla sağlamlık gösteren rigid elemanlar kullanılmamıştır.

Kabuk elemanlar için QEPH (quadrilateral elastoplastic physical hourglass control) formülasyonu seçildi. Bu formülasyon, statik ve dinamik analizlerde daha doğru sonuçlar vermektedir. Ayrıca çözüm sırasında oluşan Hourglass enerjisinden kaçınılmıştır.

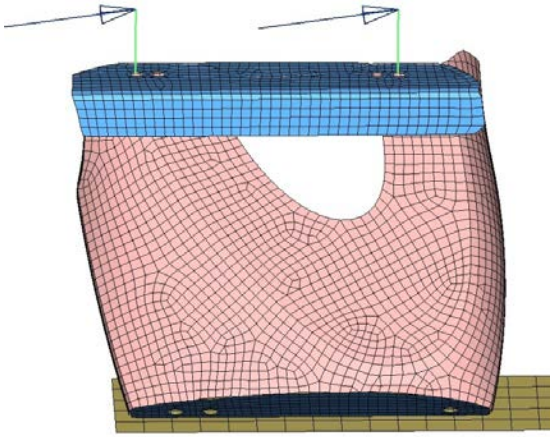
Sac metal parçaların kalınlıkları boyunca 5 integrasyon noktası atanmıştır. Bu yırtılma bölgesinin modellenmesi için de uygun bir değer olduğu görülmüştür. Bağlantı deliklerinin etrafında oluşması muhtemel gerilme yığılmalarını azaltmak için bağlantı civatası altında bulunan pullar da modellenmiştir.

Bağlantı civataları, P13 SPR BEAM elemanı olarak modellendi. Bu elemanın seçilmesinin nedeni civata için gerekli çekme, kayma ve burulma değerlerinin tanımlanma imkanının bulunmasıdır. Gerçekleştirilen

modelde yolcu koltuğu ayağında meydana gelecek hasar incelenmek istendiği için, eleman değerleri gereğinden yüksek değerler girilerek civata hasarı probleme dahil edilmemiştir. Gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar modeli Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Yolcu Koltuğu Ayak Parçalarının Kabuk Elemanlarla Modellenmesi



Şekil 2. Sonlu Elemanlar Modelinde Yük Şartları

ECE R-14 test şartnamesine uygun olarak yolcunun emniyet kemerinden gelen tekil yükler yolcu koltuğu ayağına Şekil 2'de görüldüğü gibi uygulanmıştır.

Explicit Radioss kodu gerçek test sonuçları ile daha iyi uyum için 500 ms zaman aralığında sonuçları hesaplanmıştır. Zaman aralığı yeterince büyük ve modelde sınırlı sayıda kabuk elemanlar kullanılmış olmasına rağmen, çözüm prosesine zaman aralığı adım kontrolü uygulanmıştır. Nodal zaman adımı Radioss yazılımı çalışırken aktif hale getirilmiştir. İki farklı malzeme modeli kullanılarak iki farklı hesaplama gerçekleştirilmiş ve statik yükleme şartları altında iki farklı malzeme hasar davranışı elde edilmiştir.

3. MALZEME KARAKTERİZASYON TESTLERİ VE MODELLEME TEKNİĞİ

Yolcu koltuğu ayağında kullanılan malzeme St37-2 (S235JR) çelik olup izotropik olduğu kabul edilmiştir. St37-2 (S235JR) çelik malzeme özellikleri seçilen iki farklı malzeme modeli için Altair Radioss yazılımına MAT2 (Johnson Cook Malzeme modeli) ve MAT36 (Elastik-plastik tablosal model) malzeme modeli kartları kullanılarak tanımlanmıştır. Her iki malzeme modelinde de, çeliğe ait elastik malzeme sabitleri Elastisite modülü için 210 Gpa ve Poissons Oranı içinde 0.3 olarak alınmıştır. Malzemenin plastik ve hasar bölgelerinin tanımlanması için ise çekme, basma ve burulma malzeme karakterizasyonu testlerinden elde edilen bilgiler kullanılmıştır. Bu testlerden çıkan diyagramlar yardımıyla Johnson Cook katsayıları ve Johnson Cook hasar katsayıları olan D_1, D_2, D_3 hesaplanmıştır. MAT36 kartında ise hasar modellenmesi maksimum plastik şekil değiştirme değerinin girilmesi ile Altair Radioss® yazılımına tanımlanmıştır.

Bu çalışmanın kapsamında, yüksek şekil değiştirme oranının etkisi ve yüksek sıcaklık etkisi göz ardı edilmiştir, ve malzeme formülasyonlarından çıkarılmıştır. Bundaki temel sebep ise doğrulamada kullanılan test şartlarının statik olması, yani yüksek hızlarda olmaması ve isothermal koşullarda oda sıcaklığında gerçekleştirilmesidir.

3.1. Statik Çekme Testi

Bu testte, 3 mm kalınlığındaki çekme testi numuneleri kullanılmış olup, her çekme testi hızı 10 mm/dak olarak belirlenmiştir. Elde edilcek kuvvet (N) , deplasman (mm) eğrisindeki sapmaları engellemek için çekme testleri 3 kere tekrarlanmıştır. Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Biyomekanik ve Mukavemet Laboratuar'ında, zaman kontrollü MTS Minibionix Model 858-II Dinamik Üniversal Test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu makinelerden çıkan kuvvet (F) , deplasman (mm) eğrileri

$$\sigma_e = P / A_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_e = \delta / L_0 \quad (2)$$

Denklem 1 ve Denklem 2 ifadeleri kullanılarak Mühendislik Gerilme-gerinim eğrilerine dönüştürülmüştür. Burada σ_e mühendislik gerilmesi olup, P eksenel kuvvet ve A_0 ise ilk kesit alanı, ε_e mühendislik gerinim miktarı (mühendislik birim şekil değiştirme değeri), δ eksenel kuvvet altında meydana gelen uzama miktarı, L_0 ise cismin ilk boyudur.

Ancak çoğu mühendislik uygulamasında kabul gören bu yaklaşım yerine, eğer malzeme %5 ten daha fazla uzama değerlerine sahip ise Gerçek gerilme-gerinim eğrilerinin kullanımı gerekmektedir. Gerçek gerilme ile mühendislik gerilmesi ve gerçek gerinim ile de mühendislik gerinimi arasındaki Denklem 3 ve Denklem 4'deki bağıntılar kullanılarak bu dönüşüm gerçekleştirilmektedir [11].

$$\sigma_{tr} = \sigma_e(1+\varepsilon_e) \tag{3}$$

$$\varepsilon_{tr} = \ln(1+\varepsilon_e) \tag{4}$$

Bu ifadede σ_{tr} gerçek gerilme ve ε_{tr} ise gerçek gerinimdir. Gerçek gerilme-gerinim ifadeleri ile çekme testi sırasında test numunesinin kesit alanında oluşan azalmada hesaba katılmış olur. Ayrıca gerçek test sırasında malzemenin boyun verme noktasının hangi şekil değiştirme değerinde gerçekleştiğinin de bulunması gerekir. Malzemeden elde edilen bu gerçek gerilme gerinim eğrisi boyun verme noktasına kadar geçerlidir.

Daha sonra, bu eğriyi Altair Radioss yazılımında MAT36 malzeme kartına uygun hale getirmek için, bu gerçek gerilme gerinim eğrisinden malzemenin elastik kısmı denklem 5'de çıkarılmıştır.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tr} - \sigma_{tr} / E \tag{5}$$

3.2 Statik Basma Testi

Statik basma testlerinde kullanılan numunelerin boyutları 6 mm x 6 mm x 16 mm dikdörtgen prizma şeklinde seçilmiştir. Mühendislik Gerilme - Gerinim eğrilerinin sapmalarını azaltmak için testler üç farklı numune ile tekrarlanmıştır. Johnson Cook hasar katsayılarının hesaplanabilmesi için malzemenin basma yükleri altında maksimum basma şekil değiştirme değeri belirlenmeştir. Basma yükleri altında gerçek kopma şekil değiştirme değeri yaklaşık % 28 olarak bulunmuştur.

3.3 Statik Burulma Testi

Statik burulma testinde silindirik (25 mm boy x 10 mm çap) numuneler kullanılmıştır. Burulma testinden Johnson Cook hasar katsayılarını belirlerken ihtiyaç duyulan maksimum kayma şekil değiştirme değeri elde edilmiştir. Test sonucu, St37-2 (S235JR) çelik malzeme için maksimum kayma şekil değiştirme değeri %24 olarak belirlenmiştir.

4. MALZEME MODELLERİ

4.1 Elasto-plastik malzeme modeli (MAT36)

Altair Radioss yazılımında bu malzeme kartı, isotropic malzemeler için kullanılır ve malzemenin elastik bölgesi E, Elastisite Modülü ve Poisson's Oranı υ girilerek tanımlanır. Bunlara ek olarak ise Gerçek Plastik Gerilme– Gerinim eğrisi değerleri tablo olarak girilir. Hasar bölgesi de malzemenin hasara başladığı gerinim değeri tanımlanarak modellenmektedir. Tablo 1'de Elasto-plastik malzeme modeli (Mat36) malzeme modeli kartı tablo olarak verilmiştir.

Tablo 1. Elastik-Plastik Malzeme Modeli(MAT36) ve St37-2(S235JR) çelik malzeme için kullanılan sabitler

Yoğunluk (ρ)	$7.x10^{-6}$ kg/mm^3
Elastisite Modülü (E)	210 GPa
Poisson oranı (υ)	0.3
EPS_{max}	0.22
Gerçek Plastik Gerilme-Gerinim Eğrisi (GPa / -)	Gerilme gerinim değişimi veren deneysel grafiğin değerleri tablo olarak yazılıma girilmektedir.

4.2 Johnson-Cook Malzeme Modeli (MAT2)

Altair Radioss yazılımında ve literatürde isotropic malzemeleri modellemede en çok kullanılan yaklaşımlardan birisi Johnson-Cook Malzeme modelidir [12,13,14]. Denklem 6.'da bu yaklaşımın formülasyonu görülmektedir. Bu malzeme modelinde, parça üzerinde oluşan gerilme değerleri malzemenin akma noktasının altında ise elastik davranış gösterir. Parça üzerindeki gerilme değeri arttıp , akma noktasını geçtiği zaman malzeme modeli plastik davranış göstermeye başlar. Johnson Cook malzeme modeli hasar kriterinin

uygulanışı kolay olmasının yanısıra, bu malzeme modeli üç boyutlu (BRICK8N) ve tek boyutlu (TRUSS, BEAM) gibi elaman tipleriyle de uyumludur.

$$\sigma = \left(a + b\varepsilon_p^n\right)\left(1 + c\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left(1 - T^{*M}\right) \quad (6)$$

Yukarıdaki formülasyonda şekil değiştirme hızı etkisi ve sıcaklık değişimin etkisi eğer ortam izotermal şartlarda ise ve yükleme statik ise kolaylıkla elimine edilir. Burada σ gerçek gerilme, ε_p gerçek plastik birim şekil değiştirme (gerinim), a malzemenin akma gerilmesi, b pekleşme modülü, n pekleşme üstel katsayısıdır.

a Malzemenin akma gerilme değeri olup, çekme deneyinden elde edilir, gerçek gerilme değerine dönüştürülerek bulunur. b pekleşme modülünü ve n pekleşme üstel katsayısını hesaplamak için Denklem 7 ve Denklem 8 birlikte kullanılır.

$$n = \frac{\ln\left(\left(\sigma_1 - a\right)/\left(\sigma_2 - a\right)\right)}{\ln\left(\varepsilon_1 / \varepsilon_2\right)} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sigma_1 - a}{\left(\varepsilon_1\right)^n} \quad (8)$$

bu ifadelerin türetilmesi ile elde edilecek sonuçlar seçilen noktalara bağlıdır. İlk nokta boyun verme noktası olarak seçilebilir. Fakat b ve n eğrinin her bir diğer noktası için de elde edilmelidir. Nihayetinde bulunan tüm b ve n değerlerinin ortalaması alınır. Tablo 2'de Johnson Cook modelinde kullanılan malzeme sabitleri ve hasar limitleri St37-2 (S235JR) çelik malzeme için deneylerden hesaplanarak verilmektedir. Bu hesaplanan değerler ile çizilen gerçek gerilme-gerinim eğrisi deneysel datalardan elde edilen elasto-plastik malzeme davranışı (MAT36) ile karşılaştırmalı olarak Şekil 3'de verilmektedir.

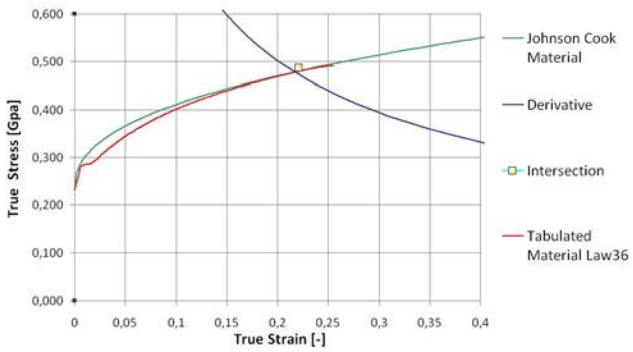
Table 2. St37-2 (S235JR) çelik malzeme için Johnson Cook malzeme sabitleri

Density (ρ)	7.85×10^{-6} kg/mm^3
Elasticity Modulus (E)	210 Gpa
Poisson's ratio (υ)	0.3
Yield Stress (a)	0.232 Gpa
Hardening Modulus (b)	0.465 Gpa
Hardening Exponent (n)	0.415

Şekil 3'den de görüleceği gibi, MAT36 ve MAT2 malzeme modellerine ait gerçek gerilme-gerinim eğrileri deneysel eğriler ile boyun verme noktasına kadar karşılaştırılabilir. Bu noktadan sonra test numunesi mühendislik gerilme değerinde ani bir düşüş meydana gelir. Bu eğrileri kullanırken eğimlerinin değişimi ile karşılaştırılması, elde edilen eğrilerin ne kadar yakınsadığını ve kararlı olduğunu kontrol etme açısından faydalı olmaktadır. Boyun verme noktası ise Denklem 9'da verildiği gibi tanımlanır.

$$\frac{\partial \sigma_{tr}}{\partial \varepsilon_{tr}} \cong \sigma_{tr} \quad (9)$$

Başka bir ifade ile, boyun verme noktasında gerçek gerilme - gerinim eğrisi ile eğim eğrisi çakışır. Şekil 3'de bu değişim görülmektedir.



Şekil 3. Test datasından elde edilen elasto-plastik malzeme modeli ile Johnson-Cook malzeme modelinin St37-2 (S235JR) çelik malzeme için karşılaştırılması.

4.3. MAT36 ve MAT2'de hasar kriterleri

MAT36 hasar kriteri için malzemenin maksimum plastik gerinim değeri ($\varepsilon_{p\,max}$) yazılıma tanımlanır. Parçada oluşan plastik birim şekil değiştirmeler $\varepsilon_{p\,max}$ değerini aşan elemanlar modelden otomatik olarak silinir.

Johnson-Cook hasar kriteri Denklem 10'da görülmektedir.

$$d = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (10)$$

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \sigma^*\right)\right]\left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 + D_5 T^*\right] \quad (11)$$

Burada,

d elemanın o andaki hasar (d=1 olduğunda hasar olur),

$\Delta\varepsilon_f$ plastik birim şekil değiştirmede yükleme esnasında meydana gelen artım,

D_1, D_2 ve D_3 ilk üç parametreyi temsil eder. Bu çalışmada birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık değişimleri olmadığı için D_4 ve D_5 denklemden elimine edilir.

σ^* ise normalize edilmiş ortalama gerilme olup,

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} \quad (12)$$

ifadesi ile verilir. Hasarı karakterize etmek için D_1, D_2 ve D_3, sırasıyla statik çekme testi, statik bası ve statik burulma testlerinden elde edilir. Ana amaç basit çekme, basit bası ve basit burulma hallerine ait çekme, basma ve burulma birim şekil değiştirme değerlerini elde edebilmektir. Her bir deney için kırılmanın görüldüğü andaki birim şekil değiştirme değerler bulunur. Bu üç deney arasında en küçük kareler yöntemi ile eğri uydurması yapılarak D_1, D_2 ve D3 parametreleri bulunur [15,16]. St37-2 çelik malzeme için hesaplanan Johnson-Cook hasar parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3 St37-2 çelik malzeme için Johnson-Cook hasar parametreleri

D_1 (Çekirdekte boşluk oluştuğu anda gerinim)	0.141474406
D_2	0.097921068
D_3	-1,045785691
D_4 (Birim şekil değiştirme hızı etkisi)	0
D_5 (Termo plastik etkiler)	0
I_{shell}	2
I_{solid}	0
$\dot{\varepsilon}_0$ (Referans birim şekil değiştirme hızı)	0

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yolcu koltuğu ayağından elde edilen Sonlu Elemanlar Analiz sonuçlarını deneysel olarak doğrulayabilmek için, analizler ile aynı sınır ve yükleme şartlarında, hidrolik test düzeneğinde statik olarak yolcu koltuğu ayağı testleri gerçekleştirilmiştir. Ayak iki civata ile ön ve arka kısmından zemine sabitlenmiştir. Deneyi basitleştirmek ve sadece yolcu koltuğu ayağına test uygulanmıştır. Testin uygulanış şekli Şekil 4'te görülmektedir. Deneyler Assan-Anil Arge merkezinde gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinden çıktı olarak kuvvet-deplasman değişimi elde edilmiştir.



Şekil 4. Yolcu koltuğu ayağı doğrulama testi.

6. ELDE EDİLEN BULGULAR

Gerçekleştirilen analzilerde yolcu koltuğu ayağında meydana gelen gerilme, gerinim ve hasar durumları elde edilmiş, reaksiyon kuvvetleri incelenmiştir. Ayrıca deneysel olarak aynı şartlarda test edilmiş ve kuvvet deplasman değerleri elde edilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla elasto-plastik malzeme modeli ve Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak elde edilen yolcu koltuğu ayağında oluşan en büyük hasar şekli görülmekte olup, ayağın zemine ön bağlantı civatası etrafında gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7'de ise yine deneysel olarak elde edilen hasar bölgesi görülmektedir. Hasar bölgeleri karşılaştırıldığında hem sayısal analizlerden hem de deneyden aynı bölgede gerçekleştiği görülmektedir. Ancak hasar şekillerine bakıldığında Elasto-plastik hasar modelinin statik yük altında deneysel sonuç ile daha uyumlu hasar geometrisi oluşturduğu anlaşılmaktadır.

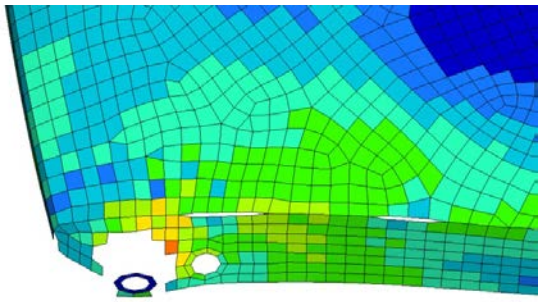


Figure 5. Elasto-plastik malzeme modeli kullanıldığında oluşan en büyük hasar bölgesi (MAT36)

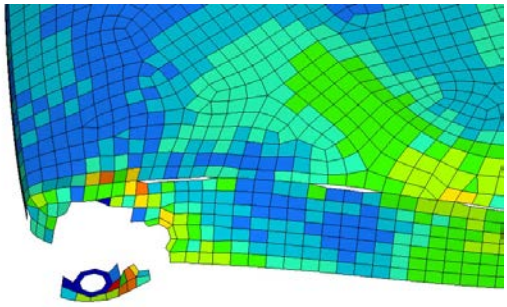


Figure 6. Johnson-Cook malzeme modelinde oluşan en büyük hasar bölgesi (MAT2)



Şekil 7. Deneyden elde edilen hasar bölgeleri ve şekli

Tablo 4'ten görüldüğü üzere uygulanan iki yükün sayısal analizlerden ve deneysel ölçümden elde edilen hasar anındaki maksimum değerleri görülmektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında hasar anında ulaşılan yükler açısından MAT36 Elasto-plastik malzeme modelinin deneysel sonuca daha yakın değerler verdiği görülmektedir.

Tablo 4. Hasar anında ulaşılan maksimum yük değerleri.

	Yük 1	Yük 2
Johnson Cook Malzeme Modeli (MAT2)	7500N	5500N
Elasto-plastik Malzeme Modeli (MAT36)	6250N	4500N
Deney	6500N	4800N

7. SONUÇ

Bu çalışmada statik yük altında ECE R-14 regülasyonuna uygun olarak yolcu koltuğu ayağı Sonlu Elemanlar Analizleri iki farklı malzeme modeli (Elasto-Plastik malzeme modeli ve Johnson-Cook malzeme modeli) ve hasar kriteri altında incelenmiştir. Aynı şartlarda fiziksel testleri gerçekelştirilmiş ve analizlerin deneysel doğruluğu karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Ayrıca St37-2 (S235JR) çelik malzeye ait malzeme karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiş ve malzeme davranışları elde edilmiştir. Johnson cook malzeme modeli sabitleri ve hasar limitleri bu testlerden elde edilmiştir.

1) Yapılan analizlerden Altair Radioss yazılımında MAT36 kodu ile verilen çekme deneyi ile elde edilen gerçek gerilme-gerinme değerlerinin tablo şeklinde girildiği ve hasar kriteri olarak maksimum plastik şekil değiştirmenin tarif edildiği model deneyler ile daha uyumlu hasar geometrisi oluşturmuştur.

2) Uygulanan maksimum yük değerleri açısından yine MAT 36 malzeme modeli ile yapılan analizler deney sonuçları ile yüksek oranda uyumluluk göstermiştir (%96 ve %93.7).

3) Johnson Cook malzeme modeli ve hasar kriteri (MAT36) malzeme davranışını sadece basit çekme hali için değil basit çekme, basma ve burulma hallerini süperpoze ederek kapsamaktadır. Bu açıdan gerçeğe daha uygun sonuçlar vermesi beklenmektedir. Ancak malzeme sabitlerinin çokluğu ve tespiti için gerekli test ve hesaplama sayısının yüksekliği nedeniyle hata yapma ihtimali yüksektir. Bu nedenle daha fazla test veya hesaplamalar esnasında iterasyon ile malzeme sabitlerinin doğrulanması gerekir.

MAT36 malzeme modeli tanımlanması kolay, içerdiği malzeme sabiti MAT2'ye göre çok daha az ve malzeme sabitlerinin bulunması için gerekli deney sayısı düşüktür.

Özellikle statik yükleme şartları altında ve izotermal problemlerde MAT2 Elasto plastik malzeme modelinin kullanımının hem zaman hem de ekonomik açıdan avantajlı olduğu söylenebilir.

Kaynaklar

1. Mackerle J. 2003 "Finite Element analysis of fastening and joining A bibliography (1990-

2002)" International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol. 80, pp. 253-271.
2. Lee Y.H., Tan C.S., Mohammad S., Tahir M.M., Shek P.N."Review on Cold formed steel Connections"http://downloads.hindawi.com/journals/tswj/aip/951216.pdf
3. Kim T., Jeong H. and Cho T. 2011"The finite element analysis of the ultimate behavior of thin-walled carbon steel bolted connections". Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 1086-1095.
4. Ju S.H., Fan C. Y. and Wu G. H., 2004 " Three dimensional finite elements of steel bolted connections" Engineering Structures, Vol. 26, pp 403-413.
5. Wang T., Song Gangbing, Liu S. Li Y and Xiao H. 2013. " Review of Bolted Connection Monitoring" International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2013, Article ID. 871213.
6. Buchmann M. 2010" Advanced Monitoring System for Bolted Connections In Vehicle Construction" Magister Technologiae Degree Dissertion, Nelson Mandela Metropolitan University.
7. Arslan A., Kaptanoğlu M. " Bir ticari araç için ECE R-14 regülasyonuna uygun koltuk bağlantılarının geliştirilmesi" OTEKON 2010, 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 07-08 Haziran 2010, BURSA.
8. Tanlak N., Sonmez F.O. and Talay E. 2011 "Detailed and Simplified models of bolted joints under impact loading" J. Strain Analysis, Vol. 46(3). pp. 213-225.
9. Karambe M.D., Karmankar A. V., Yenarkar Y.L.2013 " Stress analysis of seat backrest of car", International Journal of Mech.Eng. and Rob. Res. Vol. 2 (4); pp. 443-448.
10. Coelho A.M.G. 2013" Rotation capacity of partial strength steel joints with three dimensional finite element approach" Computers and Structures, Vol 116, pp. 88-97.
11. Liu A.F., Mechanics and mechanisms of fracture an Introduction , ASM International, 2005, Materials Park, OH. USA. ISBN: 0-87170-802-7
12. Johnson, G.R., Cook, W.H., "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, Netherlands,1983.
13. Johnson, G.R., Cook, W.H., "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures", Engineering Fracture Mechanics, 1985.
14. Jutras,M, 2008 "Improvement of the Characterization Method of the Johnson Cook Model",Faculte Des Sciences et de Genie,Universite Laval,Quebec,.
15. Bulla, M., 2012 "Nonlinear Materials and Advanced Failure Criteria" , Altair Hyperworks User Conference, Bursa
16. Radioss Theory Manual Version 11.0,2011.

Teşekkür

Çalışmamızda bize Sonlu Elemanlar Analizleri esnasında yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen Altair Mühendislik Almanya'dan Marian Bulla 'ya teşekkür ederiz.