



Galvanizli düşük karbonlu EREGLI 1312 çeliğinin akış gerilmesi ve kırılma gerinmesi davranışı

Flow stress and fracture strain behavior of galvanized low carbon EREGLI 1312 steel

Ahmet Çetkin^{1*}

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
acetkin@aku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.02.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 21.12.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 20.12.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.07023
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Gerilme, deformasyon hızı ve sıcaklığın, akış gerilmesi ve oluşabilecek hasar üzerindeki birleşik etkileri altında malzemelerin davranışının modellenmesi, özellikle metal şekillendirme, patlama, talaş kaldırma vb. simülasyonlardaki gereklilikleri nedeni ile son derece önemlidir. Analizde istenilen malzemenin kullanılabilmesi için ihtiyaç duyulacak model parametrelerinin önceden var olması gerekir. Her malzemeye ait parametreler olmadığı gibi, elde edilmesi de maliyetli ve uzun süreli çabaları gerektirir. Bu modeller içinde simülasyon programlarında en çok tercih edilenlerden biri Johnson Cook (JC) akış gerilmesi ve hasar modellerine ait parametrelerdir. Bu çalışmanın amacı, düşük karbonlu EREGLI 1312 çeliğinin, basit çekme testleri ve düşük gerilme oranı referansında mekanik davranışını tanımlayan JC parametrelerini, testlerin simülasyonları yardımıyla daha ekonomik olarak elde etmektir. Malzememizin akış gerilmesi ve hasar davranışını tahmin etmek için JC tarafından önerilen hasar modeli kullanılmış, model parametrelerini belirlemek için plakalardan kesilen düz ve çentikli altı farklı tipte numunelere, oda sıcaklığında ve değişik hızlar altında çekme testi uygulanmıştır. Eğri uydurma ve regresyon işlemleri, bu amaçla yazılan programla otomatik olarak uygulanmış, simüle edilen testler ile çekme testleri eşleştirilerek parametrelerin hesabı için gereken veriler kolaylıkla elde edilmiştir. Elde edilen parametrelerin tüm deformasyon hızları için oda sıcaklığındaki malzeme davranışını oldukça yakın tahmin edebildiği hesaplanmıştır. Test sonuçlarına oranla, kopma gerçekleşene kadar olan gerilme-gerinme değişimi sürecini ortalama %3.63 oranında küçük bir hatayla simüle edebilmektedir. Bu çalışmada EREGLI 1312 çeliği için tahmin edilen JC akış gerilmesi ve hasar modeli parametrelerinin, metal bükme, sıvama benzeri simülasyonlarında güvenle kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: JC modeli, Akış gerilmesi parametreleri, Düşük karbonlu çelik, Hasar gerinmesi, Eğri uydurma, Gerilme üç-eksenliliği.

Abstract

Modeling the behavior of materials under the combined effects of stress, deformation rate and temperature on the flow stress and damage that may occur is extremely important, especially because of the requirements in simulations such as metal forming, blast, chip removal, etc. In order to use the desired material in the analysis, the model parameters that will be needed must exist in advance. Not every material does not have parameters, and obtaining them requires costly and long-term efforts. Among these models, one of the most preferred ones in simulation programs are the parameters of Johnson Cook (JC) flow stress and damage models. The aim of this study is to economically obtain the JC parameters describing the mechanical behavior of low carbon EREGLI 1312 steel in simple tensile tests and low stress ratio reference with the help of simulations of the tests. The damage model proposed by JC was used to predict the flow stress and damage behavior of our material. In order to determine the model parameters, tensile tests were applied to six different types of notched and unnotched specimens cut from plates at room temperature and under different speeds. Curve fitting and regression procedures were performed automatically with the program written for this purpose, and the data required for the calculation of the parameters were easily obtained by matching the simulated tests with the tensile tests. It was calculated that the parameters obtained can predict the material behavior at room temperature very closely for all strain rates. Compared to the test results, it can simulate the process of stress-strain variation until rupture with a small error of 3.63% on average. In this research, the JC flow stress and damage model parameters estimated for EREGLI 1312 steel were found to be safely used in simulations such as metal bending and deep drawing.

Keywords: JC model, Flow stress parameters, Low carbon steel, Failure strain, Curve fitting, Stress triaxiality.

1 Giriş

Metal şekillendirme sürecinde, plastik deformasyonun hasarla sonuçlanma mekanizmasının anlaşılması özellikle üretime yönelik çalışmalarda karşılaşılabileceğimiz çoğu problemi aşmada ne kadar önemli olacağı aşikârdır. Simüle edilecek endüstriyel uygulamalarla hem tasarımların mühendisine hem de üretim mühendisine birçok veri kazandırılabilir. Ancak yapılacak simülasyonun gerçekçiliği ve geçerliliği, modelin, malzemenin, problemi oluşturan fiziksel olayın doğru bir şekilde sonlu elemanlar tabanlı bu programlara aktarılması ile sağlanabilir. Bu programlar tüm verilerin tek tek girilmesi yerine malzemelerin davranışlarının matematiksel bir yapıda modellendiği bazı parametrik katsayıların girişlerini kolaylaştırarak, kullandığı verilerin kendi açısından kolayca

hesaplanmasını ister. Elektriksel, manyetik, ısı, mekanik vb. özelliklerin diğer parametrelerle değişimlerini tanımlayan bu katsayılar, köpük, metal plaka, beton vb. malzemelerin belirlenen çok çeşitli deney sonuçlarından elde edilir. Metal malzemelerin elastik ve plastik bölgede mekanik davranışları ve kopması, plastisite teorisine göre uygulanan şekil değiştirme miktarına, şekil değiştirme hızına ve sıcaklığına bağlı olarak değişir. Artan şekil değiştirme hızıyla malzeme pekleşir, artan sıcaklıkla da yumuşar. Malzemenin bu gibi değişen durumlarda davranışının belirlenebilmesi için çok sayıda şekil değiştirme hızında ve çok farklı sıcaklıklarda testlerinin yapılması gerekmektedir.

Simülasyon programlarında en çok kullanılan akış gerilmesi ve sünek hasar parametreleri, Johnson Cook'un parametreleridir [1],[2]. Akış gerilmesi ve hasar parametrelerinin elde

*Yazışılan yazar/Corresponding author

edilmesinde, bahsi geçen parametrelere çok daha ihtiyaç duyan balistikle ilgili çalışmalarda kullanılan ve yüksek şekil değiştirme koşullarına cevap verebilecek testlerden en önemlisi Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) testidir. Geleneksel çekme test cihazı nadiren 10s⁻¹'nin üzerine çıkabilmektedir. Bu yüzden yüksek deformasyon hızları için daha kapsamlı test düzenekleri geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak SHBÇ metodu dışında, Genleşen Yüzük metodu, Ağırlık Düşürmeli Çarpışma Testi ve Taylor Darbe testi örnek gösterilebilir. Her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. SHBÇ metodu bu testlerin arasında bir adım öne çıkmakta beraber, 200-10⁴s⁻¹ gerilme oranları arasındaki testler için de en ideal yöntemdir (Tablo 1). SHBÇ metodunun fiziksel mekanizması çubuklarda dalga yayılımı teorisine dayanmaktadır. Farklı test hızlarda bir deformasyon söz konusu olduğunda ise farklı testler teknikleri önerilmiştir [3].

Tablo 1. Farklı gerinim oranı rejimlerinde test yöntemleri [3]

Table 1. Test methods in different strain rate regimes [3].

Gerinim Oranı (s ⁻¹)	Deney Yöntemi
0.1-500	Düşme Testleri
200-10 ⁴	Split Hopkinson Basınç Çubuğu
10 ³ -10 ⁴	Taylor Darbe Testi
>10 ⁵	Gaz Tabancası

Murugesan M ve diğ. [4], orta karbonlu AISI-1045 çeliğinin 650-950°C deformasyon sıcaklıkları aralığında ve 0.05-1.0s⁻¹ gerinim oranlarında akış gerilmesi davranışını karakterize etmek için bir akış gerilmesi modeli formüle ettiler. Yedi farklı tipte dairesel numune kullanarak elde ettiği parametreler, doğrusal olmayan programlama çözücüsü (fmincon) ile deneysel veriler ile tahmin edilen veriler arasındaki ortalama mutlak bağıl hatayı en aza indirmek için iç nokta algoritmasıyla birlikte kullanarak optimize etti. Bu algoritmayı kullanmanın ana nedeni, amaçın yalnızca bağıl kısıtlamaların varlığında bir amaç fonksiyonunun minimumunu bulmak olmasıdır. Optimizasyon problemi, fonksiyon değeri, minimum tahmin hatasını, %17.62 ile 29 başarılı iterasyondan sonra çözdü.

Wang ve diğ. [5], AA7075'in çeşitli deformasyon sıcaklıklarında (77-298K) ve gerinme oranlarda (10⁻⁴-10⁻²s⁻¹) kriyojenik tek eksenli gerilme davranışlarını ve kriyojenik bir ortamda deformasyon sıcaklığının ve gerinim hızının AA7075'in reolojik yasası üzerindeki etkileri incelenmiştir. AA7075'in gerçek gerilim-gerinim eğrisi kullanılarak bir gerinim dengeleme katsayısı içeren değiştirilmiş bir S-Johnson-Cook yapı modeli geliştirildi ve bunun deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde eşleştiği bulundu. Çalışma ayrıca kırılma morfolojisi ve mikro yapısını inceleyerek kriyojenik ortamın AA7075'in mekanik özellikleri üzerindeki etkisini de analiz etti. Ayrıca modifiye S-Johnson-Cook yapı modelinin kriyojenik ortamda AA6060 ve AA2060-T4 alaşımlarına da %0.8'den daha az hata oranı ile uygulanabileceği gözlemlendi.

Eklemeli imalat teknikleri, otomobil sektöründe çarpışma sırasında enerji emici olarak kullanılan hafif bileşenlerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Katkı maddesiyle üretilmiş bileşenlerin dayanıklılığını ve akış gerilmesi davranışını ölçmek için bir ilk adım olarak katkı maddesi AlSi10Mg alaşım malzemesinin gerinim bağımlılığını tahmin etmek önemlidir. Bu bağlamda, Nalla ve diğ. [6], baskı yönüne göre 0°, 45° ve 90°'de AlSi10Mg baskılı numuneden ASTM E8M-04 standardına göre köpek kemiği şeklindeki numuneler kullanarak hem hazır hem de ısıtılmış işlem görmüş numuneleri inceledi ve hem de gerilme-gerinim eğrilerini çizdi. Deneysel gözlemlerle iyi bir uyum sağlayan çekme testi numunesini

simüle etmek için JC yaklaşımına dayalı bir kurucu model kullandı. Deneysel sonuçlara dayanarak, AlSi10Mg alaşımı için JC akış gerilmesi modeli sabitlerini elde etti.

Priest ve diğ. [7], orijinal JC modeli tarafından yakalanmayan, C45 ferritik-perlitik çelikte östenit dönüşüm sıcaklığının (723°C) altındaki doğrusal olmayan termal yumuşama davranışını yakalamak için yeni bir değiştirilmiş JC modeli geliştirildi. Çalışmada bu davranıştan sorumlu fiziksel mekanizmaları da incelemiştir. Model, 20°C'den 720°C'ye kadar deneysel yarı statik ve yüksek gerinim oranlı eksenel simetrik sıkıştırma testiyle geliştirildi ve 3B sonlu eleman delme simülasyonlarına uygulandı. Çalışmada orijinal JC modeline göre bulunan iyileştirme, deneysel olarak ölçülen tork ve itme kuvveti ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Ti-6Al-4V alaşımı, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, düşük yoğunluğu ve mükemmel yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle günümüzde hem araştırmalarda hem de ticari endüstrilerde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Bu alaşımın çeşitli deformasyon koşullarındaki davranışını anlamak, malzemeyi zorlu simülasyon uygulamalarına uydurmak için çok önemlidir. Deb ve diğ. [8], çalışmalarında, α+β çift fazlı Ti-6Al-4V alaşımının mekanik davranışı, 25°C ila 200°C sıcaklık aralığında ve 10⁻³-10⁴s⁻¹ aralığındaki gerinme oranlarında incelenmiştir. Çekme testleri, yarı statik deformasyon aralığı için tek eksenli çekme test cihazı ve dinamik deformasyon aralığı için Split-Hopkinson bar test cihazı kullanılarak yapıldı. Çalışılan deformasyon parametreleri aralığı için yapısal modeller geliştirilmiştir. JC modeli, çeşitli sayısal analiz yazılımlarında yaygın olarak kullanılan modellerden biri olduğundan, alaşım için değiştirilmiş bir JC modeli geliştirilmiştir. Ayrıca Ti-6Al-4V alaşımı için çeşitli deformasyon koşullarında akış gerilmesinin tahmini için bir yapay sinir ağı (YSA) çerçevesi geliştirme girişiminde bulunulmuştur. Çalışma, AI tabanlı YSA tekniğinin, geleneksel JC modeline kıyasla akış gerilmesini hesaplamada daha verimli olduğunu ortaya koydu.

Makine yapısının termal deformasyonu, özellikle hassas makinelerin mekanik doğruluğunu azaltan önemli bir hata kaynağıdır. Takım tezgâhlarının termo-elastik deformasyonları hem iç hem de dış ısı kaynaklarından kaynaklanır ve iş parçasında geometrik hatalarla sonuçlanır. Termal etkiler, toplam hatanın %75'ine kadarı olduğu söylenebilir. Hassas makineler daha yüksek hassasiyet ve üretkenlik standartlarını karşılamalıdır. Mohan ve diğ. [9], Ti-6Al-4V takım mimarisi üzerine yaptıkları çalışmalarında hatayı azaltmak için JC dinamik hasar modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan JC malzeme denklemi, literatürden elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. Mevcut çalışmadan termal hatanın 16µm içinde tutulabilir olduğu görülmüştür.

Kobalt-Krom-Molibden (CoCrMo) alaşımları sayısal modellendiğinde, taşlama, tornalama ve mikro frezeleme gibi işleme süreçlerinin hızlı ve ekonomik bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olabilir. Sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanarak sayısal bir model geliştirmek için, iş parçası malzemesinin hem yarı statik hem de dinamik yükleme koşullarının yanı sıra yüksek sıcaklıklarda doğru sonuçlar veren temel bir modelini de uygulamak gerekir. O'Toole ve diğ. [10], JC parametrelerini deneysel olarak belirlendi ve SEM kullanılarak doğrulandı. Bu model, işleme ve yüksek hızlı darbe ve benzeri yüksek gerinim oranlı uygulamalara uygun olması nedeniyle benimsenmiştir. Çalışmalarında ISO 5832-4 CoCrMo kayma sıkıştırma numunesi deneylerinin yarı statik mekanik testi, gerinim etkisini ve termal yumuşama etkisini belirlemek

için oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda (213°C ve 416°C) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, malzemenin gerinim oranı etkisini belirlemek için yüksek gerinme oranlarında (1000-3000s⁻¹) bir SHBÇ cihazı kullanılarak oda sıcaklığında dinamik mekanik testler gerçekleştirdiler. Ardından, kayma sıkıştırma numunesinin yarı statik ve dinamik mekanik testini simüle etmek ve CoCrMo için belirlenen deneysel JC parametrelerini doğrulamak için JC plastisite modeli kullanılarak Abaqus CAE'de bir sonlu elemanlar modelini başarıyla oluşturdular. Belirlenen JC parametreleri daha sonra SEM sayısal modelini kullanarak optimize etmişlerdir.

Chao ve diğ. [11], çalışmalarında hacimce %25 ve hacimce %55 B4C/2024Al kompozitlerinin dinamik sıkıştırma testleri, çok çeşitli gerinim oranları (1000-5000s⁻¹) ve sıcaklıkta (298-723K) gerçekleştirmişlerdir. Gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrileri, kompozitlerin plastik deformasyon sırasında bariz bir gerinim yumuşamasına sahip olduğunu göstermektedir. Burada oluşan hasar, gerinim yumuşamasının da ana nedenidir. Gerilme yumuşatma terimini içeren değiştirilmiş bir JC modeli çalışmada önerildi. Akış gerilmesini tahmin etmek için klasik ve değiştirilmiş JC modelinin doğruluğu üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Sonuçlar, değiştirilmiş JC modelinin hacimce %25 ve hacimce %55 B4C/2024Al kompozitlerinin akış gerilmesini daha doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

Bir çalışmada Wang ve diğ. [12], ısı enerjisi ile distorsiyonel şekil değiştirme enerjisi arasındaki bir eşdeğerlik çerçevesinde yeni bir sıcaklık terimi getirerek klasik JC modelini sunmaya odaklanmıştır. Böylece, geliştirilmiş JC modeli, geniş bir deformasyon hızı ve sıcaklık aralığında mekanik davranışı etkili bir şekilde tahmin edebilir hale getirilmiştir. Kurucu model parametre tanımlaması ve optimizasyonu için, değişken sıcaklıklar ve gerinme oranlarına sahip deneysel veri setleri kullanılarak, Latin hiperküp örnekleme yöntemi, Spearman sıra korelasyon analizi ve gelişmiş bir genetik algoritma ile birleştirilmiş çok amaçlı bir yaklaşım çalışmada uygulandı. Sonuçta, çeşitli karmaşık koşullar altında birkaç metalik malzemenin stres-gerinim tepkileri önerilen model tarafından yeniden üretilebilmiştir. Sıcaklık referans sıcaklığından düşük olmasına rağmen tahmin ve deney sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu çalışmada gösterilmiştir. Önerdikleri değiştirilmiş JC modeli, sıcaklık referans sıcaklığından düşük olduğunda kullanılabilir. Model, ısı enerjisi ile distorsiyonel şekil değiştirme enerjisi arasındaki eşdeğerliğe dayanan yeni bir sıcaklık terimine sahiptir. Gerinim oranı, sıcaklık, gerinim etkilerinin birleştirme etkilerini göz önünde bulundurarak, kurucu model parametrelerini belirlemek için çok amaçlı bir parametre tanımlama ve optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Korelasyon indeksi ve ortalama bağıl hata analizi, tahmin edilen veriler ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

Shrot ve diğ. [13], JC malzeme parametrelerinin ters tanımlaması için Levenberg-Marquardt arama algoritmasını kullanan bir yöntem önerdi. İşleme süreci için idealleştirilmiş bir FE modeli geliştirmek için bir dizi JC parametresi kullanıldı. İşlem sırasında talaş morfolojisine ve kesme kuvvetine bakılarak JC parametrelerini tahmin etmek için ters tanımlama yöntemini kullandılar. Model parametrelerini ters yöntemlerle yeniden tanımlamanın mümkün olduğu sonucuna vardılar.

Gambirasio ve diğ. [14], üç gerçek malzemenin akış gerilmesi tahmini için bölünmüş JC adlı yeni bir dayanıklılık modelini sundular. Bölünmüş JC modelinin plastik malzeme tanımında

çok daha gelişmiş bir tutarlılık sağladığını ve malzeme davranışını tahmin etme yeteneğinin orijinal JC modeline göre oldukça iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Bobbili ve diğ. [15], AA7017 alüminyum alaşımı için çeşitli sıcaklıklarda bölünmüş SHBÇ deneylerinden üretilen yüksek gerinme oranlarında malzemenin davranışını tahmin etmek için bir yapay sinir ağı yapı modeli ve JC modeli kullandı. YSA modelinin tahminlerinin tüm deformasyon hızı ve sıcaklıklar için JC modeline göre deneysel verilerle daha tutarlı olduğu görülmüştür.

Hasar modelleri, özellikle yüksek deformasyon hızlarında sayısal simülasyon malzemeleri arızasında temel unsurlardır. Ancak Gurson-Tvergaard-Needleman ve JC modelleri gibi birkaç simülasyonda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bu modeller, numunedeki boşluk gelişiminin dikkate alınması gereken deneyle normal olarak belirlenecek bir dizi sabit içerir. Bu genellikle zor bir iş ve sonuçlar her zaman şüphelidir. Majzoobia ve diğ. [16], araştırmalarında, JC malzemesi ve hasar modelinin sabitlerinin tanımlanması için birleşik bir deneysel, sayısal ve optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Deneyler, Instron gibi standart test cihazları ve "Flying Wedge" gibi yüksek hızlı aparatlar kullanılarak düşük ila yüksek gerinim hızı rejimlerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneylerle aynı numune geometrileri ve aparat kullanılarak testi simüle etmişlerdir. Deneylerden elde edilen numunelerin deforme olmuş şekilleri ile sayısal simülasyonlardan tahmin edilenler arasındaki farklar, optimizasyon amacıyla amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Optimum sabitlerini genel algoritma kullanılarak elde ettiler. JC malzeme ve hasar modeli parametrelerinin tahmin edildiği, deneysel çalışma ile tahminleri arasında iyi bir uyumun gözlemlendiği sonucuna vardılar.

Tipik zırh çeliği malzemesinin büyük gerilimler, yüksek deformasyon hızları ve yüksek sıcaklıklar altındaki davranışının, çarpma gibi çeşitli dinamik yükleme türlerine tepkisini analiz etmek ve güvenilir bir şekilde tahmin etmek için araştırılması gerekir. Banerjee ve diğ. [17], çeşitli dinamik yükleme koşullarına tepkisini analiz etmek ve tahmin etmek için zırh çeliği malzemesinin tipik davranışını araştırdı. Johnson ve Cook tarafından önerilen akış gerilmesi ve hasar modelinin parametrelerini tipik bir zırh çeliği malzemesi için dört tip tek eksenli çekme deneyinden deneysel olarak belirlenmiştir. JC hasar modelinde bazı modifikasyonlar önerilmiş ve ABAQUS platformunda sırasıyla dinamik gerinme oranı (10⁻¹s⁻¹), yüksek üç-eksenlilik ve yüksek sıcaklık altında zırh çeliği numuneleri üzerinde üç farklı çekme testinin sonlu elemanlar tekniği simülasyonu yapılmış ve sonuçlarını deneysel verilerle doğrulamışlardır. Orta derecede yüksek gerinim oranlı zırh çeliği numunesi üzerindeki Charpy darbe testi, JC malzeme ve aynı malzeme parametrelerine sahip hasar modelleri kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında makul bir uyum sağlanmıştır.

Chen ve diğ. [18], yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımı AA6082-T6 için farklı gerinim oranlarında ve üç-eksenliliklerde akış gerilmesi ve hasar davranışını araştırmayı amaçlamışlardır. Dinamik çarpma kırılma özelliğini daha fazla araştırmak için iki grup Charpy darbe testi gerçekleştirdiler. Sonlu elemanlar analizine dayalı bir dizi çekme testi ve sayısal simülasyon uygulamışlar, 0.0001-3400s⁻¹ arasında değişen çeşitli gerinme oranları altında pürüzsüz numuneler üzerindeki deneysel veriler elde ederek, malzemenin genel olarak deformasyon hızlarına karşı oldukça duyarsız olduğunu

göstermişlerdir. Çalışmada, JC hasar modelinin kalibrasyonu için sayısal simülasyonlardan elde edilen ortalama gerilme üç-eksenliliği ve testteki eşdeğer plastik şekil değiştirme değerlerini kullanmışlardır. Kalibre edilmiş JC hasar modeli, yaygın olarak elde edilen JC hasar modelinden daha yüksek doğruluk sergilediğini göstermişlerdir.

Çeliklerin JC parametreleri araştırmalarında Murugesan ve diğ. [19] orta karbonlu mikro alaşımlı bir çelikte çalışırken, Buchely ve diğ. [20], SAE 1018 ve SAE 1045, yapısal çelikler (ASTM A572-60, ASTM A690 ve ASTM A992), iki V-modifiye 1535/45 kalitesi ve bir otomotiv AHSS kalitesi dâhil olmak üzere sekiz farklı çelik için ve $0.001s^{-1}$ ile $20s^{-1}$ gerinim oranlarında ve $900^{\circ}C$ ile $1200^{\circ}C$ arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çekme testlerinden elde etmiştir. Vedantam ve diğ. [21], otomotiv çelikleri olan hafif ve çift fazlı DP590'yi, 10^{-3} - $1800s^{-1}$ arasında değişen çeşitli gerinme hızlarında, bölünmüş Hopkinson çubuğu teknikleri kullanılarak oda sıcaklığında elde ederken, Md Shahanur ve diğ. [22], yüksek manganlı östenitik bir çelik olan %11 ve %14 Mn-çelik alaşımları için, Yadav ve diğ. [23], 6 mm kalınlığındaki yumuşak çelik levhalar kullanarak çeliğin kaynak işlemi sırasında değişen malzeme davranışı için, bir yapısal çelik olan E250 kalitesi çeliğini Gopinath ve diğ. [24] ise $0.0003s^{-1}$ gerinme hızını çekme testinde, 3000 - $8000s^{-1}$ hızını da SHBÇ testlerinde kullanarak, 30 - $800^{\circ}C$ sıcaklık aralığında elde etmiştir.

Akbari ve diğ. [25] tipik bir zırh çeliği malzemesi için JC parametrelerini çalışırken, Zejian ve diğ. [26] ise zırhlı helikopter tank deniz araçlarında özellikle kaynaklanabilirliği için tercih edilen 603 zırh çeliğinin davranışını, 0.001 - $4500s^{-1}$ gerinme hızında elde etmiştir. Özellikle ince plakaların kullandığı, sünek ve az karbonlu çeliklerin JC parametreleri ile ilgili bir çalışma yoktur. Otomotiv sanayiinde yüksek şekillendirilebilir özellikleri nedeniyle çokça tercih edilen ve simülasyonda gerekebilecek bu tip bir malzemenin JC malzeme ve hasar modeli parametrelerine büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmamızın ana amaçlarından biri de bu eksikliği gidermektir.

1.1 Akış gerilmesi modelleri

Akış gerilmesi, malzemeyi plastik olarak deforme etmeye devam etmek için gerekli gerilme değerini tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Sürekli ortam mekaniğinde belirli bir malzeme için bu değer sıcaklık, gerinme ve gerinme oranına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\bar{\sigma} = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (1)$$

Fenomenolojik plastik akış gerilmesi modelleri, yüksek deformasyon hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda metallerin büyük deformasyonlarının simülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür birkaç tanınmış model mevcuttur ve herhangi bir modelin eldeki belirli probleme uygulanabilirliğini belirlemek zordur. Plastik akış gerilmesi modelleri ve ilgili özgül ısı, kesme modülü, erime sıcaklığı ve durum model denklemi, karmaşık deformasyon fenomenlerinin alt ölçekli modelleridir. Herhangi bir modelin tüm alt ölçeği fiziğini mümkün olan tüm koşullar altında yakalayabilmesini beklemek mantıksızdır. Bu nedenle, ilgilendiren rejime en uygun olan modeli seçmek gerekebilir [27].

Akış gerilmesini hesaplamak için kullanılabilecek en tanınmış, sıcaklığa ve gerilim oranına bağlı modeli bazı modeller:

1. Johnson-Cook modeli,
2. Steinberg-Cochran-Guinan-Lund modeli,

3. Zerilli-Armstrong modeli,
4. Mekanik Eşik Gerilme modeli,
5. Preston-Tonks-Wallace modeli.

olarak verilebilir. JC modeli tamamen ampiriktir ve yukarıda saydığımız beş modellerden en tanınmış olanı ve en yaygın olarak kullanılanıdır.

1.2 Hasar kriterleri

Hasar değişkeni D , ilk olarak Kachanov [28] tarafından mikro kusurların etkili olduğu yüzey yoğunluğu bakımından mikro çatlaklar nedeni ile olduğu düşünülen katılık ve bütünlük kaybını tanımlamak üzere sunulmuştur. Bu konseptte dayanarak, Rabotnov [29] efektif gerilme ve hasar değişkeni ile ilişkili olarak:

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1 - D_1} \quad (2)$$

biçiminde tanımlamıştır. Gerinme davranışının sadece efektif gerilme ile değiştiği varsayan Lemaitre'e [30], göre doğrusal elastik gerinme ϵ_e ;

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_D}{E} = \frac{\sigma}{(1 - D_1)E} \quad (3)$$

Bu varsayımlarla, sürekli ortam mekaniğinden farklı olan elastik hasar mekaniği kanunu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_{ij} = (1 - D_1)(\lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk}^e + 2\mu \epsilon_{ij}^e) \quad (4)$$

Burada; λ, μ Lamé sabitleri, δ_{ij} Kronecker operatörü ve ϵ_{ij}^e elastik gerinmedir. Akma fonksiyonu genelleştirilmiş olarak;

$$F = \sigma_{eq}(1 - D_1)(\sigma_y + R_a) \quad (5)$$

Burada; σ_{eq} eşdeğer gerilme, σ_y , başlangıçta akma gerilmesidir. R_a ise izotropik sertleşme skaler değişkeni olarak verilir.

Hasar gerilmesi enerji salım hızı $\dot{\gamma}$ ile gerilme ve şekil değiştirme durumu ve son olarak hasar mekaniği için kilit nokta olan hasar gelişim yasası arasındaki ilişkiyi elde etmek için termodinamik potansiyel ve yayılma potansiyeli tanımlanmıştır. Termodinamik potansiyelde iki ayrı kısım yani elastik ve plastik bölgeler olduğu ve neredeyse tüm literatürde $(1 - D_1)$ lineer olduğu varsayılmıştır. Hasar gerinme enerjisi serbest bırakma oranı y ;

$$y = -\frac{\sigma_{eq}}{2E} \left[\frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 + 2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

olarak verilir. Burada E , Young modülü, ν Poisson oranı ve σ_m ise ortalama gerilmeyi tanımlamaktadır.

Geçmişte, basit çatlak kriterleri önerilmiştir. Bu kriterler sağlam bir temele sahip değildir ve gözlem, deneyim ve basit matematiksel bir yapıya dayanır [32]. Bu ampirik kriterler sınırlı bir dizi gerilme durumu üzerinde doğrulanmıştır. Aşağı verilen skaler fonksiyon kritik bir C değerine ulaştığında kırılmanın yapıdaki bir materyal noktasında meydana geldiği varsayılmaktadır.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g(\sigma_{ij}) d\bar{\epsilon} = C \quad (7)$$

Burada; g , genellikle gerilme tensörünün bileşenlerinin bir fonksiyonu olan bir ağırlık fonksiyonudur, ε eşdeğer gerinmedir. $\bar{\varepsilon}_f$ kırılmaya eşdeğer gerinme ve C , bir kalibrasyon sabitidir. Genellikle bu işlev "hasar göstergesi" olarak adlandırılır [33].

Hasar göstergesi olarak en basiti eşdeğer gerilme kriteridir;

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_f \quad (8)$$

g değeri bire eşit olduğunda, Denklem (8)'in sınırlayıcı bir durumu için geçerlidir.

Gerilme üç eksenliliğinin sünek çatlak oluşumunda anahtar rol oynadığı gerçeğine dayanan bir basit bir kıstas literatürde ortaya çıkmıştır.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} d\bar{\varepsilon} = C_H \quad (9)$$

Burada; C_H bir malzeme sabitidir. Malzeme sabitlerinin integrasyonla birleştirilmesi ve iki veya daha fazla malzeme sabitinin varlığı, bu kriterlerin kalibrasyon prosedürünü zorlaştırır. Buna örnek olarak JC kriteri verilebilir;

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{1}{C_{JC1} + C_{JC2} e^{C_{JC3} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)}} d\bar{\varepsilon} = 1 \quad (10)$$

Burada; C_{JC1} , C_{JC2} , C_{JC3} bir malzeme sabitleridir.

1.3 Johnson Cook akış gerilmesi ve sünek hasar modeli

Gerilme ve gerinme arasındaki metalik malzeme ilişkileri deformasyon, gerinme oranı ve sıcaklık koşulları altında JC modeli ile açıklanabilir. Birçok araştırmacı tarafından malzemelerin akış gerilmesi davranışını tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [34]-[39]. Akış gerilmesi modeli şu şekilde ifade edilir;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) \right) (1 - T^{*m}) \quad (11)$$

Burada; σ eşdeğer gerilme ve ε eşdeğer plastik gerinmedir. Malzeme sabitleri A , B , n , C ve m harfleri ile tanımlıdır. A , referans koşullar altında malzemenin akma gerilimi, B pekleşme sabiti, n pekleşme katsayısı, C gerinme oranının gerilme güçlendirme katsayısı ve m ise termal yumuşatma katsayısıdır [40].

Denklem (11)'de verilen üç farklı parantez içindeki terimler akış gerilmesine, sırası ile soldan sağa doğru, gerinme sertleşmesi etkisini, gerinme oranının güçlendirme etkisini ve son olarak da sıcaklığın gerilme üzerindeki etkisini tanımlar [4]. Akış gerilmesindeki $\dot{\varepsilon}^*$ ve T^* terimleri ise,

$$\ln(\dot{\varepsilon}^*) = \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}}\right) \begin{cases} 0 & \text{for } \dot{\varepsilon}_{ref} = \dot{\varepsilon} \\ + & \text{for } \dot{\varepsilon}_{ref} > \dot{\varepsilon} \\ - & \text{for } \dot{\varepsilon}_{ref} < \dot{\varepsilon} \end{cases} \quad (12)$$

$$T^* = \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_{ref} \\ \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} & \text{for } T_{ref} \leq T \leq T_m \\ 1 & \text{for } T > T_m \end{cases} \quad (13)$$

olarak hesaplanır. Burada $\dot{\varepsilon}^*$ birimsiz gerinme-şekil değiştirme oranını, boyutsuz, T^* homolog sıcaklığını, T deformasyon sıcaklığını T_m ise metalin erime sıcaklığını tanımlamaktadır. $\dot{\varepsilon}_{ref}$, T_{ref} ise sırasıyla deneylerde referans olarak alınan şekil değiştirme oranını ve deformasyon sıcaklığını tanımlamak için kullanılmıştır.

1.4 JC akış gerilmesi malzeme sabitlerinin belirlenmesi

Akış gerilmesini tanımlayan Denklem (11)'de hem şekil değiştirme oranının malzemeyi güçlendirilmesi etkisi ve hem de termal yumuşatma etkileri ihmal edilirse,

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \quad (14)$$

elde edilir. Denklemi (14) yeniden düzenlenerek aşağıda gösterildiği gibi elde edilebilir;

$$\ln(\sigma - A) = n \ln(\varepsilon) + \ln(B) \quad (15)$$

Referans deformasyon koşullarındaki gerilme ve gerinme değerleri kullanılarak $\ln(\sigma - A)$ ve $\ln(\varepsilon)$ arasındaki doğrusal ilişkiyi birinci dereceden regresyon modeli kullanılarak n ve B değerleri yaklaşık olarak elde edilebilir.

Termal yumuşatma etkisi elimine edilirse, bu kez Denklem (11) şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) \right) \quad (16)$$

Denklem (16) yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{\sigma}{(A + B\varepsilon^n)} = \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) \right) \quad (17)$$

elde ederiz. A , B ve n değerleri daha önce lineer regresyonla bulunmuştu. Burada bulunmayan C değerini farklı test hızlarda elde ettiğimiz değerleri koyduğumuz $\frac{\sigma}{(A + B\varepsilon^n)} - 1$ ile $\ln(\dot{\varepsilon}^*)$ arasındaki eğrinin eğiminden bulmak kolay olacaktır. Şekil değiştirme oranının güçlendirilmesi etkisini Denklem (11)'den elimine edilirse, denklem bu kez aşağıda verildiği şekilde yazılabilir;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 - T^{*m}) \quad (18)$$

Denklem (18) yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{\sigma}{(A + B\varepsilon^n)} = (1 - T^{*m}) \quad (19)$$

elde edilir. A , B ve n değerleri daha önce lineer regresyonla bulunmuştu. Burada bulunmayan m değerini farklı sıcaklıklarda elde ettiğimiz değerleri kullandığımız $\ln\left(\frac{\sigma}{(A + B\varepsilon^n)} - 1\right)$ ile $\ln(T^*)$ arasındaki ilişki eğrisinin eğiminden bulunabilir.

Standart JC şekil değiştirme oranı terimi, logaritmik doğrusal bir yapıya sahiptir. Bazı araştırmacılar farklı gerinim oranı formları kullanmışlardır. Örneğin Huh ve diğ. [41] tarafından önerilen ikinci dereceden quadratik bir form kullanılarak bazı ek eğri uydurma kabiliyeti elde edilebilir:

$$(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2 \ln(\dot{\varepsilon}^*)^2) \quad (20)$$

Üç üssel form ise Allen ve diğ. [42] tarafından,

$$(\dot{\varepsilon}^*)^C \quad (21)$$

Cowper ve diğ. [43] tarafından,

$$\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{eff}^p}{C}\right)^{1/p}\right) \quad (22)$$

ve nonlinear formda,

$$\left(1 + C(\varepsilon_{eff}^p)^{n'} \ln(\dot{\varepsilon}^*)\right) \quad (23)$$

tanımlanmıştır.

JC hasar gerinmesi değerini, gerilme üç-eksenlilik oranına, gerinme oranına ve sıcaklığa bağlı olduğu hasar modelini aşağıda verildiği gibi belirledi [1],[2];

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}) (1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)) (1 + D_5 T^*) \quad (24)$$

$$\eta = \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \quad (25)$$

Burada D_{1-5} hasar modeli parametreleri, σ_m ortalama gerilmeyi, σ_{eq} eşdeğer gerilmeyi tanımlamaktadır. Bir elemanın hasarı, kümülatif bir hasar yasasına dayanarak tanımlanır ve aşağıda gösterildiği gibi doğrusal bir biçimde [4],[42];

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (26)$$

olarak verilir. Burada $\Delta \varepsilon$, eşdeğer plastik gerinim artışı ε_f mevcut gerilme, şekil değiştirme oranı ve sıcaklık koşulları altında kırılmaya eşdeğer gerinme değeridir. Kırılma oluşumu nedeniyle, deformasyon sırasında malzemenin dayanımı azalır ve hasar meydana gelip gelmediğini anlamak için yeterli gerilmenin ilişkisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_D = (1 - D)\sigma_{eq} \quad (27)$$

Denklem (27)'de σ_D hasar gerilmesi ve D hasar parametresidir. D değeri birden büyük olduğunda hasar başlar. Gerilme üç eksenliliği ve eşdeğer gerilmenin büyüklüğü, plastik davranış dikkate alınarak boyun oluşumu gerçekleşene kadar olan bölgede hasarsız numunelerden elde edilebilir [40], [44]-[49].

Hasarı oluşturan gerinmenin büyüklüğünü tanımlayan Denklem (24)'te deformasyon hızı etkisi ve termal gerileme etkileri ihmal edilirse,

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}) \quad (28)$$

elde edilir.

Referans deformasyon koşullarındaki gerilme ve gerinme değerleri kullanılarak ε_f ve η arasındaki doğrusal ilişki regresyon modeli kullanılarak, D_1, D_2, D_3 değerleri yaklaşık olarak elde edilebilir. Termal yumuşama etkisi Denklem (24)'den elimine edilirse, denklem yeni hali ile şu şekilde yazılabilir;

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}) (1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)) \quad (29)$$

Denklem (29) yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} = (1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)) \quad (30)$$

elde ederiz. D_1, D_2 ve D_3 değerleri daha önce lineer regresyonla bulunmuştur. Burada bulunmayan D_4 parametre değerini farklı sıcaklıklarda elde ettiğimiz değerler için kullandığımız $\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})}$ ile $\ln(\dot{\varepsilon}^*)$ arasındaki ilişki eğrisinin eğiminden bulunur. Bu kez şekil değiştirme oranının güçlendirilmesi etkisini Denklem (24)'den elimine edilirse, şekilde yazılabilir;

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}) (1 + D_5 T^*) \quad (31)$$

Denklem (31) yeniden düzenlendiğinde ise;

$$\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} = (1 + D_5 T^*) \quad (32)$$

elde ederiz. D_1, D_2 ve D_3 değerleri daha önce elde edilmişti, burada bulunmayan D_4 parametresi farklı sıcaklıklarda elde ettiğimiz değerlerini kullanarak $\left(\frac{\varepsilon_f}{(D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)})} - 1\right)$ ile (T^*) arasındaki ilişki eğrisinin eğiminden bulunabilir.

2 Materyal ve metod

2.1 Çekme testi ve malzeme

Çalışmamızda kullanılan EREGLİ 1312 kalite sınıfı yassı çelikler, yüksek şekillendirilebilir kabiliyeti nedeni ile otomotiv üretiminde çoğunlukla tercih edilen, sürekli sıcak daldırma ile çinko kaplanmış, soğuk şekillendirmeye uygun olan çeliklerdir ve düşük karbonlu galvanize çelikler olarak isimlendirilirler. Standardı EN 10346:2015 DX52D+Z olarak verilmektedir. Üreticisi tarafından garanti edilen kimyasal bileşimi ve bazı mekanik özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. 1200 x 2400 mm boyutunda ve 1.5 mm kalınlığında plakalar olarak alınmış, numuneler buradan su jeti yardımıyla ve tam otomatik bir makine ile plakalardan ayrılmıştır.

Tablo 2. EN 10346:2015 DX52D+Z için kimyasal içerikler [50].

Table 2. Chemical contents for EN 10346:2015 DX52D+Z [50].

Standart Karşılığı	ERDEMİR	C	Si	Mn	P	S	Ti
Standart Kalite	Kalite No	max.	max.	max.	max.	max.	max.
EN 10346	DX51D+Z	1311	0.18	0.5	1.2	0.12	0.045
EN 10346	DX52D+Z	1312	0.12	0.5	0.6	0.1	0.045
EN 10346	DX53D+Z	1313	0.12	0.5	0.6	0.1	0.045

Tablo 3. EN 10346:2015 DX52D+Z için mekanik özellikler [50].

Table 3. Mechanical properties for EN 10346:2015 DX52D+Z [50].

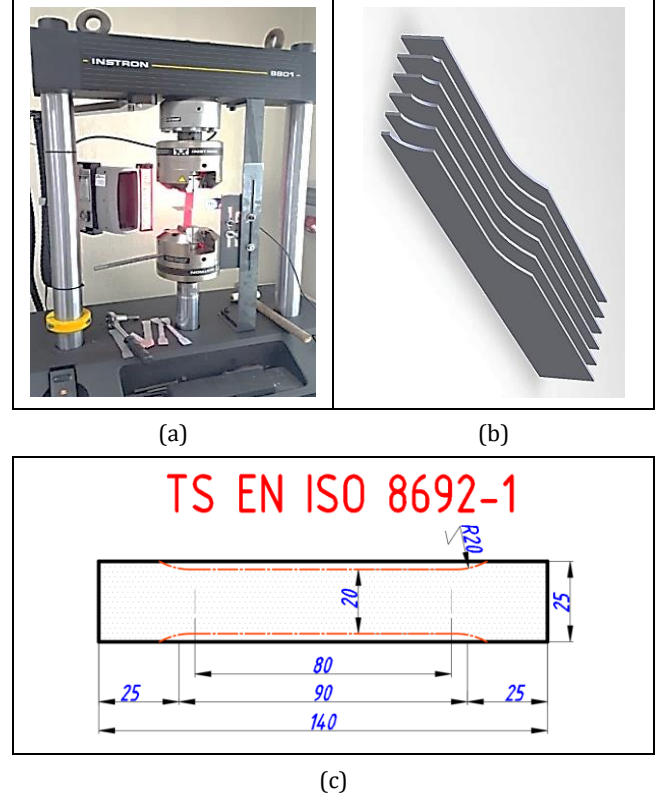
Standart Karşılığı		ERDEMİR Kalite No	Garanti Süreleri		R _e		R _m		A ₈₀
Standart	Kalite		Mekanik	Akma İzi	R _{p02} /R _a N/mm ² (kg/mm ²)	N/mm ² (kg/mm ²)	N/mm ² (kg/mm ²)	%	
			Değerler	Oluşması				min	
EN 10346	DX51D+Z	1311	1 ay	-	-	270-500	(27.6-51.0)	22	
EN 10346	DX52D+Z	1312	1 ay	-	140-300	(14.3-30.6)	270-420	(27.6-42.8)	26
EN 10346	DX53D+Z	1313	1 ay	-	140-260	(14.3-26.5)	270-380	(27.6-30.6)	30

Standart bir tek eksenli çekme deneyi, materyalin, üretim ve tasarım mühendisleri için gerekli olan neredeyse tüm temel mekanik özelliklerini sağlayabilir. Bu nedenle ürün sertifikaları akma dayanımı, maksimum dayanım, yüzde uzama veya kırılma gerilmesi gibi gereken en önemli bazı özellikleri karşılar. Gerilme parametreleri, mühendislik gerilim-gerinim hesaplamalarında orijinal kesit alanı değerleri kullanılarak belirlenir ve ölçüm uzunluğu içindeki ortalama gerilme değeri, orijinal ölçüm uzunluğu kullanılarak tanımlanır. Numune boyun vermeye başladığında, gerilmelerin ve gerinimlerin dağılımı daha karmaşık hale gelir ve bu bölgelerin belirlenmesi zorlaşır. Yüksek eksenel deformasyon seviyelerinde boyun bölgesinde var olan homojen olmayan gerilim-gerinim dağılımları sayesinde, kırılmaya kadar tüm deformasyon işlemi sırasında malzeme tepkisini doğru bir biçimde tanımlamak için numunenin geometrik boyutlarındaki anlık değişikliklerin dikkate alınması gerektiği kabul edilmiştir. Gerçek gerilme-gerçek gerinim ilişkisi ise geometrik boyutlarındaki işte bu anlık değişimi hesaplamaya katmaya dayanır.

Çekme testleri INSTRON-8801 servo-hidrolik tahrikli ve yorulma test sistemi de dahil bazı özelliklerine sahip bir universal test cihazında yapılmıştır Şekil 1(a). Cihaza ait video-ekstansiyometre çok küçük deplasman hareketlerini hassas ve doğru bir şekilde ölçebilmektedir. Standartlara uygun olarak hazırlanmış çekme test numuneleri Şekil 1(c) ölçülere uygun ve plakaların seçilmiş yerlerinde su jeti ile kesilmiş, kenarları hassas olarak temizlenmiştir.

Ölçüm, video-extensometre için numune üzerinde işaretlenmiş 50 mm. başlangıç aralığında yapılarak gerinimler elde edilmiştir. Test için 0.01, 0.1, 1 ve 10mm/s hızlar cihaza tanımlanmış, hataları mümkün olduğunca daraltmak için yaklaşık 20 adet çentikli ve çentiksiz test numunesi Şekil 1(b), her bir farklı deney için kullanılmıştır.

Örneğin Şekil 2'de 0.01mm/s çekme hızında düz numune için gerilme-gerinim test sonucu verilmiştir. Test sonucunda, akma gerilmesi 82.71MPa, çekme gerilmesi 210.57MPa ve kopma %51.83 olarak elde edilmiştir. Buradaki testlerde kullanılan 0.0002s⁻¹ gerinme oranı, referans gerinme oranı olarak kabul edilmiştir.

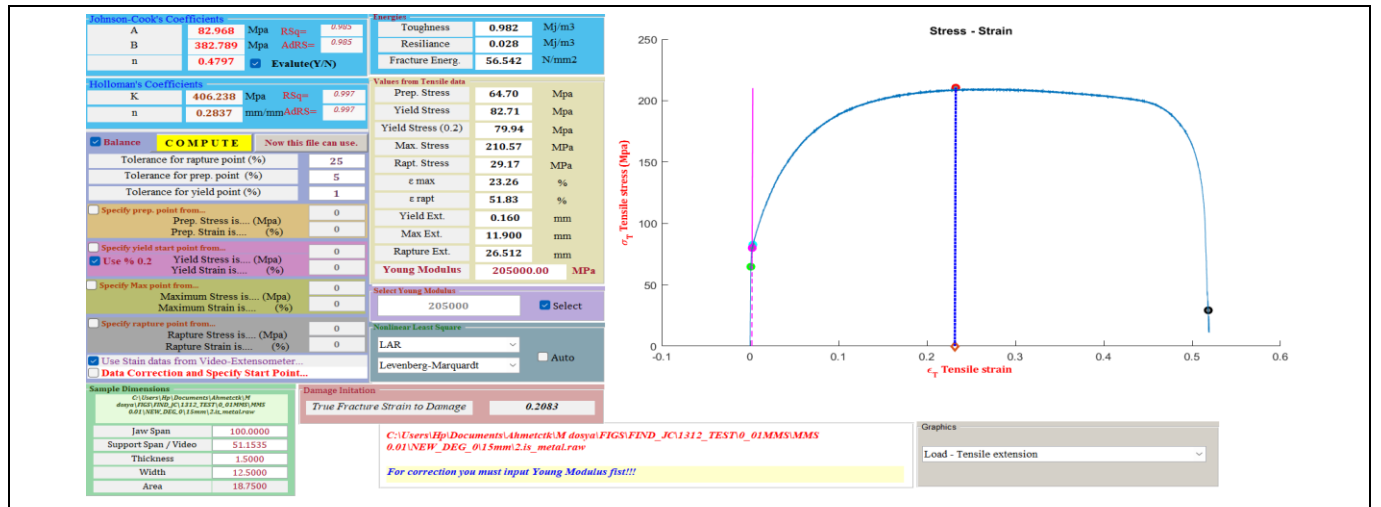


Şekil 1(a): Instron 8801 test cihazı. (b): Çentiksiz ve çentikli 3B modelleri. (c): Standart çekme numunesi.

Figure 1(a): Instron 8801. (b): Notched and unnotched 3D models. (c): Standard tensile sample.

2.2 Testin bilgisayarda simülasyonu

JC akış gerilmesi ve sünek hasar parametrelerinin hesaplanmasındaki en büyük problem, gereken bazı değerlerin çekme testi sonucunda elde edilememesidir. Ancak test simüle edildiğinde, bu tip programlarda testlerden elde edilemeyecek bazı verilerin elde edilebilmesi mümkün hale gelir. Gerçek test ile testin simülasyonu eşleştirilerek herhangi bir andaki değerin en azından yaklaşık olarak bulunması söz konusudur.

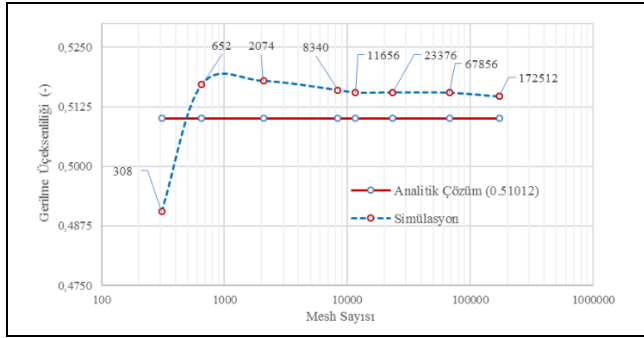


Şekil 2. 2x10⁻³s⁻¹ test oranında düz numune için gerilme-gerinim test sonucu.

Figure 2. Tensile stress-strain test result for flat specimen at 2x10⁻³s⁻¹ test rate.

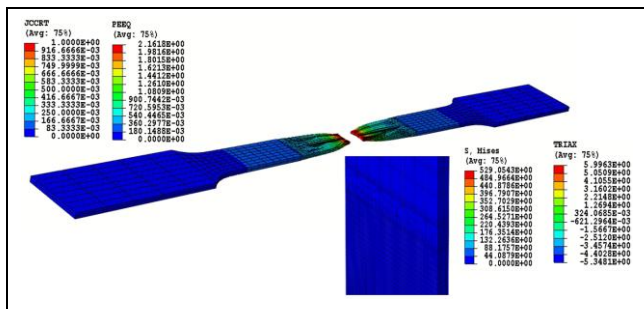
Testi basit bir yapıda simüle edebilmek testin doğruluğu ve test süresi açısından oldukça önemlidir. Benzetim ne kadar yakın ve seçilen eleman sayısı ne kadar çoksa sonlu elemanlar tekniği bize o kadar doğru sonuç verir. Ancak şu da bir gerçektir ki çok eleman sayısı ile doğruluk arasında lineer bir ilişki yoktur. Gereksiz uzun çözüm süreleri o oranda çözüm doğruluğunu garanti etmez. Bu nedenle çözüm süresini azaltmak için Şekil 1(c)'de verildiği gibi hem numunelerin simetrik yapısından yararlanılmış, hem de önceden değişik mesh sayısı ile analizler yaparak 8300 gibi makul bir mesh sayısı ile çalışılmıştır. Şekil 1(b)'de çeyrek 3B modeli verilen ve farklı çentik yapısına sahip numuneler için analizlerde seçilen mesh sayısına yakın değerler kullanılmıştır.

Şekil 3'te $w/R = 1$ oranındaki bir çentik için başlangıç gerilme üç-eksenliliğinin, kullanılan mesh sayısı ile değişimi verilmiştir. Çok sayıdaki mesh kullanımının %0.26 gibi bir küçük değişimle sonuçlandığına bakılırsa, seçtiğimiz mesh sayısının bile yüksek olduğu söylenebilir. Çözümün doğruluğu için özellikle kopmanın gerçekleşeceği ve gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerde mesh sıklaştırılmıştır. Sıklaştırılmış mesh tasarımı ve kopma bölgesindeki durumu Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Başlangıç gerilme üç eksenliliğinin kullanılan mesh sayısı ile değişimi ($w/R = 1$).

Figure 3. Variation of initial stress triaxiality with the number of used mesh ($w/R=1$).



Şekil 4. Simülasyonda kopma anında alınan bazı değerler ve düzenlenen mesh geometrisi.

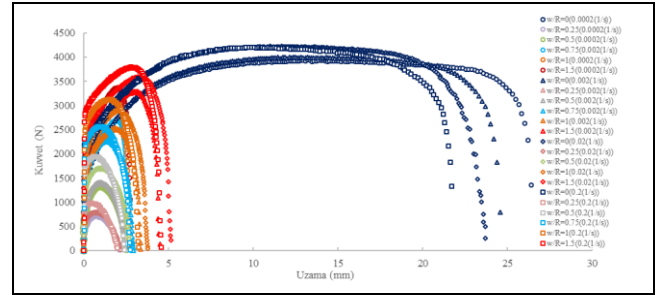
Figure 4. Some values taken at the moment of fracture in the simulation and the arranged special mesh geometry.

2.3 JC Parametrelerinin hesabı

Farklı türden veri dosyası, yazım ve veri türlerini birçok test için kullanıp ortak bir medyada değerlendirmek oldukça zahmetli, karmaşık ve uzun bir iştir. Yaptığımız programlar ile bu verilerin düzenli bir şekilde bilgisayara aktarılmasını ve çok farklı algoritmaların otomatik olarak hesaplanıp en doğru sonucu seçilmesi mümkün olmaktadır. JC akış gerilmesi parametre değerleri bir sabit başlangıç değerine sahip eğri

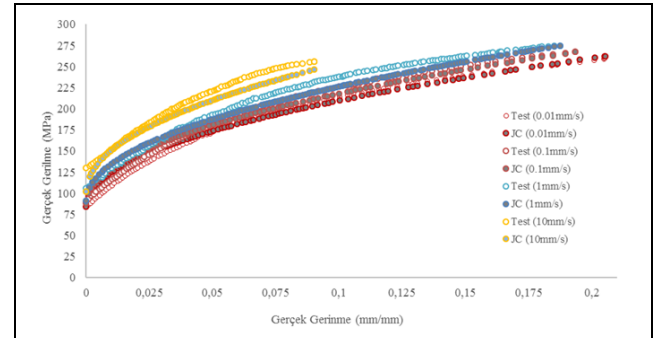
uydurma prosedürü olduğundan, zorunlu olarak Levenberg-Marquardt algoritması uygulanmıştır. Sağlam en küçük kareler uydurma yöntemi (Robust Least-Squares), en küçük mutlak artırı yapısı, artırıların toplam karesini en aza indirerek eğri uydurma, "Trust-Region" veya "Levenberg-Marquardt" algoritması seçilmesi durumunda sonuçlanan en büyük R-kare değerine göre belirlenen parametre katsayılarını seçer. Yöntem iteratif bir eğri uydurma prosedürüdür. Hesaplamalarda elde edilen R-kare değeri, verilerin uyum regresyon çizgisine ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir ölçüsü olarak tanımlanabilir.

Aynı zamanda belirleme katsayısı veya çoklu regresyon için çoklu belirleme katsayısı olarak da tanımlanır. Genel olarak, R-kare ne kadar yüksekse, seçilen modelin verilerinize o kadar iyi uyduğu söylenebilir [42]. 0.8952 olarak bulunan R-kare değeri oldukça yakınsak bir katsayı seçildiğini göstermektedir. Model formu olarak eğri uydurma işlemlerinde istediğimiz denklem formlarına uygun biçimdeki JC parametreleri için "a Two-Term Power Series Model" ve Holloman parametreleri için "a Single - Term Power Series Model" kullanılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda bulunan farklı gerinme oranı koşullarındaki parametre katsayıları, Tablo 4'te JC akış gerilmesi ve Holloman pekleşme parametreleri ile beraber verilmiştir. Farklı w/R oranında çentik yapıları ve farklı hızlar için ortalama değere sahip testler için kuvvet-uzama eğrileri Şekil 5'te, Şekil 6'da ise JC akış gerilmesi katsayıları ile ortalama test sonucu değerleri her bir test hızı için verilmiştir.



Şekil 5. Farklı w/R oranında çentik yapıları ve farklı gerinme oranları için ortalama değere sahip testler için kuvvet-uzama eğrileri.

Figure 5. Force-extension curves for tests with different w/R ratio notch structures and average values for different strain rate.



Şekil 6. EREGLI 1312 için JC akış gerilmesi katsayıları ile ortalama test sonucu değerleri.

Figure 6. Average test result values with JC flow stress coefficients for EREGLI 1312.

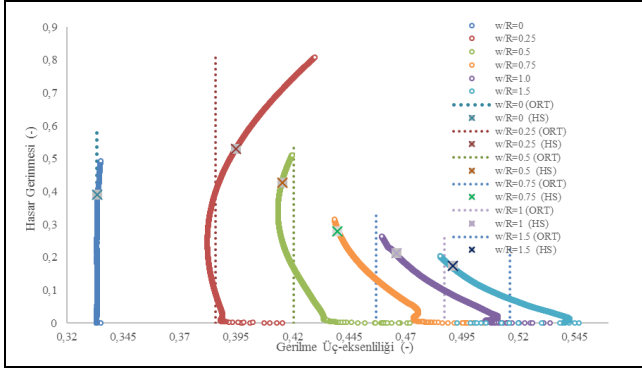
Tablo 4. Farklı gerinme oranı koşullarında JC akış gerilmesi ve Holloman pekleşme parametreleri.

Table 4. JC flow stress and Holloman hardening parameters under different strain rate conditions.

		A	B	n	C	D**	n**
Gerinme Oranı	0.0002*	82.968	372.789	0.4797		406.238	0.2837
(s ⁻¹)	0.002	82.196	401.472	0.4879		420.117	0.2920
	0.02	106.839	408.731	0.5227	0.0191	427.061	0.2651
	0.2	121.763	473.878	0.6359		443.474	0.2783

Verilen parametre katsayıları için çizilen gerçek gerilme-gerçek gerinme eğrilerinin test sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmüştür.

JC sünek hasar parametresinde eşdeğer hasar gerinmesi, gerilme üç-eksenliliğine bağlı olarak verilir. Denklem (24)'te verildiği gibi σ_{eq} eşdeğer gerilmesi hasarın varlığını tanımlayan en önemli kriterdir. Analitik olarak test başlangıç anına ait üç-eksenlilik değeri kolaylıkla hesaplanabilir. Tabiidir ki üç-eksenlilik değeri çekme testi süresince değişir ve değer, çentik yarıçapı R ile çentik boyun genişliği w arasındaki orana bağlıdır. Şekil 7'de test sürecinde farklı w/R oranı için gerilme üç-eksenliliğinin değişimleri verilmiştir.



Şekil 7. Farklı w/R oranları için test sürecinde gerilme üç-eksenliliğinin değişimi

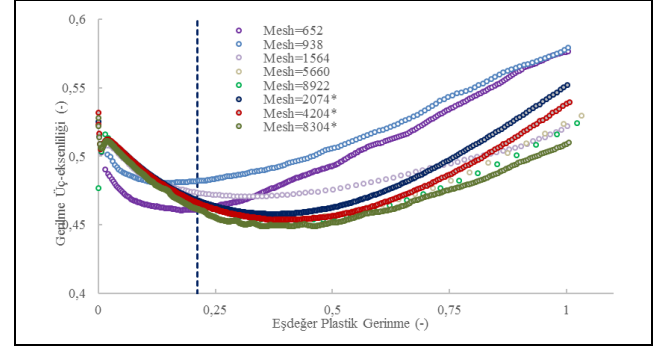
Figure 7. Curves of change of stress triaxiality during the test process for different w/R ratio.

Hasarın oluştuğu gerinme ve bu ana kadar olan kadar değişimin ortalaması, her bir farklı çentik çapı çizilen şekilde işaretlenmiştir. Başlangıç gerilme üç-eksenliliği değerinin bulunması mümkün iken bu değer süreci içindeki değişiminin analitik bir çözümü yoktur. Zaten JC hasar parametreleri de araştırmacılar tarafından başlangıç anı için verilmiştir. Ancak yaptığımız analizin bir çıktısı olarak kullanabileceğimiz, hem ortalama gerilme üç-eksenliliği değeri hem de kırılma anında gerilme üç-eksenliliği değerlerini kullanarak bu noktalar için de hasar parametreleri elde edilmiştir.

Çözüm için öncelikle mesh sayısının yeterli olup olamayacağını belirlemek için önce basit yapıda bir mesh geometrisi ile daha sonra da çözüm bölgesinde yoğunlaşan eleman yapısına sahip mesh geometrisi kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 8'de $w/R=1$ oranı için farklı mesh sayısı ve mesh yapılarında eşdeğer gerilme değeri ile gerilme üç-eksenliliğinin değişimi verilmiştir.

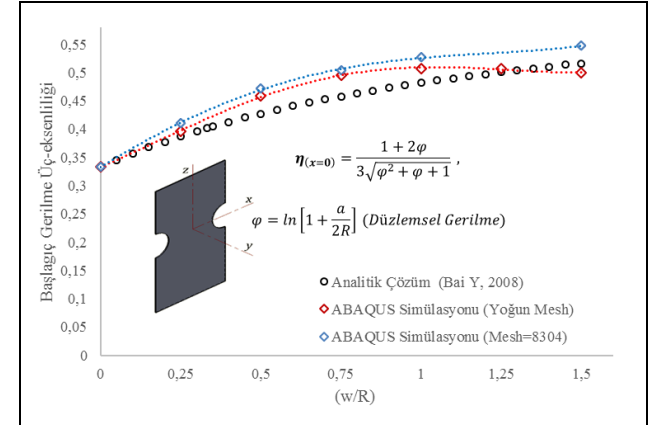
Akış gerilmesi parametrelerinin elde edilmesinde olduğu gibi burada da yaklaşık 8300 eleman sayısının makul bir çözüm ürettiği görülmektedir. Hasar oluşmadan önce ve başlangıçta seçilen eleman sayısının çözüm sonucunu %0.02 değiştirdiği için bu mesh seçiminin yeterli olduğu söylenebilir. Farklı gerilme durumları söz konusu olduğunda, gerilme üç-eksenliliği hesabı için farklı analitik çözümler önerilmiştir [38]. Düzlemsel

gerilme için analitik çözüm değerleri Şekil 9'da seçilen referans koşullarında farklı w/R oranları için gerilme üç-eksenliliğinin değişimine bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 8. $w/R=1$ oranı için farklı mesh sayısı ve mesh yapılarında eşdeğer gerilme değeri ile gerilme üç-eksenliliğinin değişimi.

Figure 8. Relationship between equivalent strain and stress triaxiality for different mesh number and mesh geometries for $w/R = 1$ ratio.



Şekil 9. Referans koşullarında w/R oranı ile gerilme üç-eksenliliği ilişkisi.

Figure 9. Relationship between w/R ratio and stress triaxiality at reference conditions.

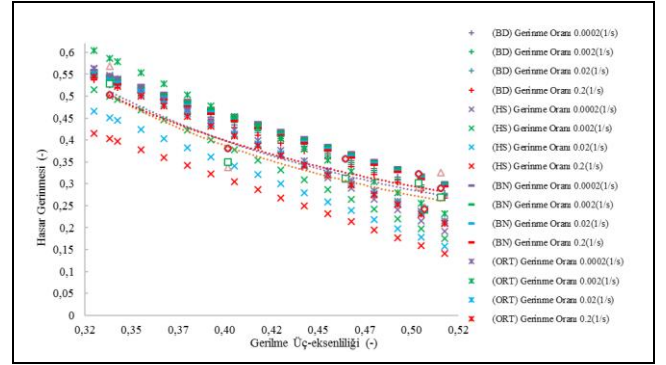
Ancak, simülasyonlarda da bu başlangıç durumu için bir çözüm değeri elde edilebilir. Şekilde hem analitik çözüm hem de simülasyon sonuçları beraber verilmiştir. Başlangıç anına ait çözümler hem kullandığımız makul mesh sayısı için hem de yoğun mesh sayısı için hesaplanmıştır. Çözümler arasında fark olduğu, yoğun mesh kullanıldığında w/R oranı büyüdükçe yakınsamanın arttığı, her iki mesh yoğunluğunda da çözümlerin birbirlerine kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar verdiği görülebilir. Çalışmamızda parametre hesaplarında başlangıç üç-eksenlilik değerleri için yoğun mesh çözümleri kullanılmıştır.

Bilindiği gibi gerilme üç eksenliliği ve eşdeğer gerilme değerleri, boyun oluşumuna kadar plastik davranış dikkate alınarak hasara uğramamış numuneden elde edilebilir [44]-[48]. Ancak bu değerin çekme testinden elde edilmesi mümkün değildir. Sonlu elemanlar tekniği kullanan bir analiz programı ile yaptığımız tek eksenli çekme testi simülasyonu, pratikte uyguladığımız testlerimizi eşleştirerek herhangi bir anda gerilme üç-eksenliliği değeri elde edilebilir. Sadece başlangıç anına ait olan değil bu değerin test süresinde değişimini de elde edilebilmek mümkündür. Gerilme üç-eksenliliği değeri analitik olarak testin ilk başlangıç anı için numune geometrisinden hesaplanmaktadır. Bao [44] ve Bai ve diğ. [45], önceki bazı çalışmalarında simülasyonlar ile analitik çözümün arasında ortaya çıkan farkları dairesel numuneler için düzeltilmeye çalışmışlardır. Simülasyon çözümüyle gerilme üç-eksenliliği değerinin tüm test süresince ortalaması ve kırılma anındaki değeri bulunabileceğinden, bu değişimin parametrelerin doğruluğuna etkisi de gözlemlenebilir.

Tablo 5'te her bir test hızında JC sünek hasar parametreleri, hem başlangıç anında analitik ve analizden bulunan, hem kırılma anında hem de başlangıçtan kırılma anına kadar olan değerlerin ortalaması verilmiştir. Katsayılar çok farklı gibi gözükse de aslında benzerdir ve yakın bir değişimi ifade etmektedirler. Gerilme üç-eksenliliği ile hasar gerinmesinin değişimini üssel bir ifade ile tanımlayan JC hasar parametreleri hem başlangıç anında analitik ve analizden bulunan, hem kırılma anında hem de başlangıçtan kırılma anına kadar olan değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmış ve Şekil 10'da bu değişimin eğrileri verilmiştir.

Değişimlerin her bir seçilen çekme test hızı için Tablo 5'te de verilen parametreler için temel bir form olarak birbirlerine benzediği ve hızdaki farklılaşma ile de uyumlu olduğu görülebilir. Testlerden aldığımız değerleri kalibre etmek için kopma sonrası kopma bölgesinde boyut değişimi optik cihazlarla hassas olarak ölçüldü. Başlangıçta ölçülen dikdörtgensel geometriye sahip form, kopma sonrasında karmaşık bir geometri ile sonlanır.

Test sonucu değişen bu alanlardan bulduğumuz kopma gerinmesi değerleri de Şekil 10'da ayrıntılarıyla yer almaktadır. Optik olarak ölçerek hesapladığımız değişimin JC parametreleri ile de uyumlu olduğu da görüldü.



Şekil 10. Gerilme üç-eksenliliği ile hasar gerinmesinin ilişkisi.

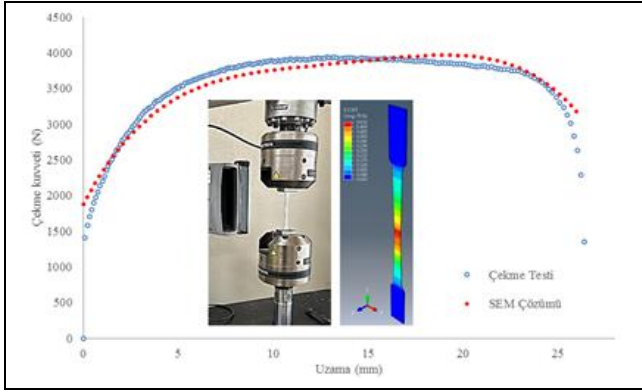
Figure 10. Relationship between stress triaxiality and fracture strain.

Bu çalışmada seçtiğimiz malzemenin özellikle JC parametrelerini bulmaya çalışmamızın ana nedeni en çok tanınan bazı sonlu elemanlar tekniği kullanan analiz programlarında, tercih edilen bu malzeme davranış tanımlama modellerinin temel seçeneklerinden biri ve basit bir tanımı olduğu içindir. Hatta çoğu analiz programlarında hasar kriteri seçimlerinde JC tek seçenek olarak yer alır. Bu çalışmada hesapladığımız parametrelerin gerek akış gerilmesini tanımlama gerekse hasarın olduğu gerinmeyi tanımlamada başarısı yine bu programlarda testin denenmesi ile anlaşılabilir. Ancak tabiidir ki farklı deformasyon hızı ve ortam sıcaklıklarında malzemenin matematiksel bir modelle kullanarak davranışını tanımlamak, problemlerimizi aşmada kullandığımız bir çözüm yaklaşımıdır. Keza bu modellerde ortaya konan parametrik ilişkileri regresyon ve eğri uydurma prosedürleri de yaklaşık çözümdür. Sonuçta malzeme modelini kullandığımız sonlu elemanlar tekniği de bir matematiksel yaklaşımdır. Bu teknikte modelin doğruluğu, eleman yapısı ve sayısı, sınır şartlarının doğru biçimde girilmesi, kütle katsayısı gibi seçeneklerin çözümde etkisi olduğu da aşikardır. Bu kadar çok yaklaşım çözümünü bir araya getirdiğimizde gerçek test ile arasında doğal olarak fark olacaktır. Ancak çekme testi ile JC parametreleri ile hız amacıyla makul seviyelerde seçilmiş analiz parametreleriyle test simülasyonun çözümünün oldukça yakın olduğu görülmüştür (Şekil 11).

Tablo 5. Farklı gerilme üç-eksenliliği seçim noktaları için JC sünek hasar parametreleri.

Table 5. JC ductile failure parameters for different stress triaxiality selection points for evaluation.

	Test Hızı (mm/s)	D_1	D_2	D_3	D_4
Başlangıç Durumu (BD)	0.01*	-11.1088	12.1688	-0.1295	
	0.1	-12.3052	13.5567	-0.1482	
	1	-12.1859	13.2297	-0.1146	-0.0126
	10	-12.4450	13.5249	-0.1236	
Hasar (HS)	0.01*	-11.0711	12.3118	-0.1738	
	0.1	-9.9284	11.4090	-0.2408	
	1	-10.8303	11.9670	-0.1531	-0.0879
	10	-10.9151	12.1537	-0.1796	
Başlama Noktası (BN)	0.01*	-12.9116	13.9268	-0.1023	
	0.1	-13.9942	15.1817	-0.1170	
	1	-3.6663	5.3418	-0.5903	-0.01
	10	-4.6909	6.7610	-0.6264	
Ortalama (ORT)	0.01*	-10.7972	11.9867	-0.1654	
	0.1	-11.1097	12.4829	-0.1939	
	1	-11.6643	12.8230	-0.1459	0.0739
	10	-11.2883	12.4298	-0.1634	



Şekil 11. Uygulanan test ile JC parametreleri kullanılan SEM çözümünün karşılaştırılması.

Figure 11. Comparison of the applied test and the SEM solution using JC parameters.

Burada mesh, C3D8R eleman tipinde seçilerek modelin merkezinde yoğunlaşan hegzagonal yapıdaki bir geometride oluşturulmuştur. Hızlı bir çözüm amacıyla yaklaşık 8600 eleman sayısı kullanılmıştır. Çözümde kütle skalası 10^5 alınmış, çift sayısal hassasiyetli analiz tipi kullanılmıştır. Çok fazla sayıda eleman kullanıldığında ve daha çok kütle tesirine yer verildiğinde çözümün daha da yakınsaması beklenmelidir.

3 Sonuçlar

Bu çalışmada otomotiv sanayiinde kolay şekillendirilebilirliği nedeni ile tercih edilen ve EREGLI 1312 (EN 10346:2015 DX52D+Z) olarak anılan galvanize saclar için JC akış gerilmesi ve sünek hasar parametreleri elde edilmiştir. Bu çelikler nisbeten orta bir dayanıma ve yüksek bir süneklığe sahiptirler. Standartlara uygun olarak kesilen numunelere 293K ortam sıcaklığında ve 0.01mm/s test hızındaki ($0.0002s^{-1}$ gerinme oranı) referanslar koşullar altında değişik hızlarda çekme testleri uygulanmıştır. Hem çekme testinden hem de çekme testinden elde edilemediği için test benzetiminden elde edilen veriler, eğri uydurma ve regresyon prosedürlerine uygun olarak değerlendirilerek parametre katsayıları hesaplanmıştır. Yaptığımız çalışmada elde sonuçlar aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

- ✓ Malzemenin D_4 için 0.074 ve ortalama C için 0.019 katsayıları, sırasıyla JC akış gerilmesine ve hasar gerilmesine uygulama hızının etkisini tanımlamaktadır. Gerek malzemenin deformasyon hızına karşı gerekse de hasar gerilmesine karşı olan duyarlılığının oldukça az olduğu anlaşılmaktadır,
- ✓ Optik ölçüm ve elde edilen parametrelerle kurgulanan test simülasyonu ile yapılan doğrulama bize katsayıların gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Test sonuçlarına oranla, kopma gerçekleşene kadar olan gerinme-gerilme değişimi farkları küçükten büyük test hızlarına göre sırasıyla, %4.40-4.10-3.24-3.93 olarak elde edilmiştir,
- ✓ Bulunan parametreler, tüm test sürecini ve tüm hızlar için analizde değerlendirildiğinde, ortalama %3.63 oranında küçük bir hatayla simüle edebilmektedir. Daha yoğun bir mesh oluşturulup daha az kütle oranı da uygulanıldığı $0.0002-0.2s^{-1}$ gerinme oranı aralığında ve oda

sıcaklığındaki simülasyonlarda çok daha başarı ile kullanılabileceği öngörülmektedir.

4 Conclusions

In this study, JC flow stress and ductile damage parameters were obtained for galvanized steel sheets referred to as EREGLI 1312 (EN 10346:2015 DX52D+Z), which are preferred in the automotive industry due to their easy formability. These steels have a relatively medium strength and high ductility. Tensile tests were performed on specimens cut in accordance with the standards at different speeds under reference conditions at an ambient temperature of 293K and a test speed of 0.01 m/s (strain rate of $0.0002s^{-1}$). The data obtained from both the tensile test and the test simulation, which could not be obtained from the tensile test, were evaluated in accordance with the curve fitting and regression procedures and the parameter coefficients were calculated. The results obtained in our study can be expressed as follows:

- ✓ The coefficients 0.074 for D_4 and 0.019 for average C describe the effect of the application speed on the JC flow stress and fracture strain. It is understood that the sensitivity of the material to both the deformation rate and the damage strain is quite small,
- ✓ The verification by optical measurement and test simulation with the obtained parameters shows that the coefficients are very close to the reality. According to the test results, the strain-stress variation differences until rupture were obtained as 4.40-4.10-3.24-3.93% for small to large test speeds, respectively,
- ✓ When the parameters found are evaluated in the analysis for the whole test process and for all test speeds, it can simulate the whole test process with a small error of 3.63% on average. It is predicted that it can be used much more successfully in simulations in the $0.0002-0.2s^{-1}$ strain rate range and at room temperature, where a denser mesh is created and a lower mass scale is applied.

5 Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (18.KARİYER.233) Afyonkarahisar, Türkiye tarafından desteklenmiştir.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen bu çalışmasının bütün aşamalarında gerekli olan tüm çalışmalar makalenin yazarı Ahmet Çetkin tarafından gerçekleştirilmiştir.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

8 Kaynaklar

- [1] Johnson GR, Cook WH. "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*, The Hague, Netherlands, 19-21 April, 1983.

- [2] Johnson GR, Cook WH. "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures". *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48, 1985.
- [3] Nemat-Nasser S. "Introduction to high strain rate testing". *Asm Handbook*, 8, 427-428, 2000.
- [4] Murugesan M, Lee S, Kim D, Kang YH, Kim N. "A comparative study of ductile damage models approaches for joint strength prediction in hot shear joining process". *Procedia Engineering*, 207, 1689-1694, 2017.
- [5] Wang Y, Xing J, Zhou Y, Kong C, Yu H. "Tensile properties and a modified s-Johnson-Cook model for constitutive relationship of AA7075 sheets at cryogenic temperatures". *Journal of Alloys and Compounds*, 942, 169044, 2023.
- [6] Nalla MM. "Evaluation of Johnson-Cook constitutive material model parameters for additively manufactured AlSi10Mg alloy test specimens". *Materials Today: Proceedings*, 72(4), 2044-2048, 2023.
- [7] Priest J, Ghadbeigi H, Ayvar-Soberanis S, Liljehrn A, Way M. "A modified Johnson-Cook constitutive model for improved thermal softening prediction of machining simulations in C45 steel". *Procedia CIRP*, 108, 106-111, 2022.
- [8] Deb S, Muraleedharan A, Immanuel RJ, Panigrahi SK, Racineux G, Marya S. "Establishing flow stress behaviour of Ti-6Al-4V alloy and development of constitutive models using Johnson-Cook method and artificial neural network for quasi-static and dynamic loading". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 119, 103338, 2022.
- [9] Mohan N, Veerabhadrapa K, Basavaraja JS, Suhas BG, Kumar RS. "Thermal analysis on Ti-6AL-4V tool architecture using Johnson-Cook material model". *Global Transitions Proceedings*, 3(2), 432-437, 2022.
- [10] O'Toole L, Haridas R S, Mishra R S, Fang F. "Determination of Johnson-Cook plasticity model parameters for CoCrMo alloy". *Materials Today Communications*, 34, 105128, 2023.
- [11] Chao ZL, Jiang LT, Chen GQ, Zhang Q, Zhang NB, Zhao QQ, Pang BJ, Wu GH. "A modified Johnson-Cook model with damage degradation for B4Cp/Al composites". *Composite Structures*, 282, 115029, 2022.
- [12] Wang Y, Zeng X, Chen H, Yang X, Wang F, Zeng L. "Modified Johnson-Cook constitutive model of metallic materials under a wide range of temperatures and strain rates". *Results in Physics*, 27, 104498, 2021.
- [13] Shrot A, Bäker M. "Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations". *Computational Materials Science*, 52, 298-304, 2012.
- [14] Gambirasio L, Rizzi E. "An enhanced Johnson-Cook strength model for splitting strain rate and temperature effects on lower yield stress and plastic flow". *Computational Materials Science*, 113, 231-265, 2016.
- [15] Bobbili R, Ramakrishna B, Madhu V, Gogia AK. "Prediction of flow stress of 7017 aluminium alloy under high strain rate compression at elevated temperatures". *Defence Technology*, 11, 93-98, 2015.
- [16] Majzoobia GH, Dehghan FR. "Determination of the constants of damage models". *Procedia Engineering*, 10, 764-773, 2011.
- [17] Banerjee A, Dhar S, Acharyya S, Datta D, Nayak N. "Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel". *Computational Materials Science*, A 640, 200-209, 2015.
- [18] Chen X, Peng Y, Peng S, Yao S, Chen C, Xu P. "Flow and fracture behavior of aluminum alloy 6082-T6 at different tensile strain rates and triaxialities". *Plos One*, 12(7), 1-28, 2017.
- [19] Murugesan M, Jung DW. "Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications". *Materials*, 12(4), 609, 2019.
- [20] Buchely M, Ganguly S, Aken D, O'Malley R, Lekakh S, Chandrashekhara K. "Experimental development of Johnson-Cook strength model for different carbon steel grades and application for single pass hot rolling". *Steel Research International*, 91(7), 1900670, 2020.
- [21] Vedantam K, Bajaj D, Brar NS, Hill, S. "Johnson - Cook strength models for mild and DP 590 steels". *AIP Conference Proceedings*, 845(1), 775-778, 2006.
- [22] Md Shahanur H, Dennis De P, Richard C, Cheng Y. "Johnson-Cook model parameters determination for 11% and 14% Mn-Steel". *Materials Science and Engineering: B*, 283(2), 115788, 2022.
- [23] Sandeep Y, Sorabh S, Yogeshwar J, Ravindra KS. "Determination of Johnson-Cook material model for weldment of mild steel". *Materials Today: Proceedings*, 28(3), 1801-1808, 2020.
- [24] Gopinath, K, Narayanamurthy V, Khaderi SN. "Determination of parameters for Johnson-Cook dynamic constitutive and damage models for E250 structural steel and experimental validations". *Journal of Material Engineering and Perform*, 33, 10940-10960, 2024.
- [25] Akbari Z, Mirzadeh H, Cabrera J. "A simple constitutive model for predicting flow stress of medium carbon microalloyed steel during hot deformation". *Materials and Design*, 77, 126-131, 2015.
- [26] Zejian X, Fenglei H. "Plastic behavior and constitutive modeling of armor steel over wide temperature and strain rate ranges". *Acta Mechanica Sinica*, 25(6), 598-608, 2012.
- [27] Banerjee B. "An Evaluation of Plastic Flow Stress Models for the Simulation of High-Temperature and High-Strain-Rate Deformation of Metal". Department of Mechanical Engineering, University of Utah, USA, Technical Report, 2019.
- [28] Kachanov LM. "Time of the rupture process under creep conditions". *Izvestiia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk*, 8, 26-31, 1958.
- [29] Rabotnov YN. *Creep Problems of Structural Members*. 7th ed. Amsterdam, Holland, North-Holland Publishing Company, 1969.
- [30] Lemaitre J. "Evaluation of dissipation and damage in metals submitted to dynamic loading". In *Proceedings ICM*, Kyoto, Japan, 15-20 August, 1971.
- [31] Lemaitre J. "A continuous damage mechanics model for ductile fracture". *Journal of Engineering Materials and Technology*, 107, 83-89, 1985.

- [32] Bao Y. Prediction of Ductile Crack Formation in Uncracked Bodies. PhD Thesis, Impact and Crashworthiness Lab, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 2003.
- [33] Fischer F, Kolednik D0, Shan GX, Rammerstorfer FG. "A note on calibration of ductile failure damage indicators". *International Journal of Fracture*, 73, 345-357, 1995.
- [34] Abbasi-Bani A, Zarei-Hanzaki A, Pishbin MH, Haghdadi N. "A comparative study on the capability of Johnson-Cook and Arrhenius-type constitutive equations to describe the flow behavior of Mg-6Al-1Zn alloy". *Mechanical Materials*, 71, 52-61, 2014.
- [35] He A, Xie G, Zhang H, Wang X. "A comparative study on Johnson-Cook, modified Johnson-Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel". *Material Design*, 52, 677-685, 2013.
- [36] Maheshwari AK. "Prediction of flow stress for hot deformation processing". *Compututer Materials Science*, 69, 350-358, 2013.
- [37] Zhan H, Wang G, Kent D, Dargusch M. "Constitutive modelling of the flow behaviour of a beta titanium alloy at high strain rates and elevated temperatures using the Johnson-Cook and modified Zerilli-Armstrong models". *Materials Science and Engineering, A*, 612, 71-79, 2014.
- [38] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri AK. "A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr-1Mo steel". *Computer Materials Science*, 47, 568-576, 2009.
- [39] Cao Y, Di HS, Misra RDK, Zhang J. "Hot deformation behavior of alloy 800 H at intermediate temperatures: Constitutive models and microstructure analysis". *Journal of Material Engineering and Performance*, 23, 4298-4308, 2014.
- [40] Huh H, Kang WJ. "Crash-worthiness assessment of thin-walled structures with the high-strength steel sheet". *International Journal of Vehicle Design*, 30(1/2), 1-21, 2002.
- [41] Allen DJ, Rule WK, Jones SE. "Optimizing material strength constants numerically extracted from taylor impact data". *Experimental Mechanics*, 37, 333-337, 1997.
- [42] Cowper GR, Symonds PS. "Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams". Brown University, Providence, Rhode Island, USA, Applied Mathematics Report, TR-C11-28, 1958.
- [43] Buzyurkina AE, Gladkyb IL, Krausa EI. "Determination and verification of Johnson-Cook model parameters at high-speed deformation of titanium alloys". *Aerospace Science and Technology*, 45, 121-127, 2015.
- [44] Bao Y. "Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality, stress and strain ratios". *Engineering Fracture Mechanics*, 72, 505-522, 2005.
- [45] Bai Y, Wierzbicki T. "A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence". *International Journal of Plasticity*, 24, 1071-1096, 2008.
- [46] Mirone G, Corallo D. "A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and Lode angle on ductile failure and hardening". *International Journal of Plasticity*, 26, 348-371, 2010.
- [47] Brunig M, Chyra O, Albrecht D, Driemeier L, Alves M. "A ductile damage criterion at various stress triaxialities". *International Journal of Plasticity*, 24, 1731-1755, 2008.
- [48] Cao TS, Gachet JM, Montmitonnet P, Bouchard PO. "A Lode-dependent enhanced Lemaitre model for ductile fracture prediction at low stress triaxiality". *Engineering Fracture Mechanics*, 124-125, 80-96, 2014.
- [49] Çetkin A. "Estimate of the flow stress and damage model parameter coefficients from tensile test with the help of code". *Journal of Materials and Mechatronics: A* 2, 99-111, 2021.
- [50] Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları TAŞ. "Erdemir Ürün Kataloğu". https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun_Katalogu-2017-1269.pdf (12.02.2023).