



## KÜÇÜK ZIMBA (SMALL PUNCH) TESTİNDE ÖN TANIMLI ÇENTİK GEOMETRİSİNİN ÇELİKLERİN KIRILMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI ve ÇENTİK GEOMETRİSİNİN OPTİMİZASYONU

Murat Şakacı<sup>1</sup>, İsmail Cem Türtük<sup>2</sup>, Babür Deliktaş<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa

### ÖZET

Küçük Zimba Testi (Small Punch Testing), çok küçük boyutlara sahip numunelerin mekanik özelliklerinin, kırılma ve sünme davranışlarının belirlenmesinde uygulanır. Yük, sıcaklık ve basınç altında halihazırda çalışmakta olan parçalardan numuneler alınıp test edilmesine olanak sağladığı ve tahribatsız bir test olma özelliğine sahip olduğu için son dönemlerde oldukça popüler bir hale gelmiştir. Küçük Zimba deneyi ile numuneler üzerinden, kullanımda olan malzemelerin kırılma, sürünme davranışları, ömürleri ve mekanik özellikleri üzerine deneyler gerçekleştirilmektedir. [1]

Küçük Zimba deneylerinde yaygın olarak kullanılan numuneler çentiksiz ve düz modellerdir. Ancak çalışma ortamından kaynaklanan çatlaklar ve malzeme iç yapısındaki düzensizliklerin var oluşu, düz numuneler yerine çentikli numunelerin kullanımını gerektirir hale gelmiştir. Küçük zimba deneylerinin literatürde yer alması yakın zaman içerisinde olduğundan dolayı, an itibari ile numunelerdeki çentik etkisinin incelenmesi üzerine çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışma ile, küçük zimba deneylerinde kullanılan numuneler üzerine açılacak ön tanımlı çentiklerin geometrik boyutlarının ve numune üzerindeki yerleşimlerinin, numunelerin kırılma davranışı bazında etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Çentik geometrik parametrelerinin (çentik ucu yarıçapı, yerleşimi, açısı, derinliği...vb) kırılma davranışına olan etkileri sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

### GİRİŞ

Günümüzde malzemelerin basınç, sıcaklık, radyasyon vb etkiler altındaki kırılma, sürünme gibi mekaniksel davranışlarının tespit edilmesi adına birçok teorik ve deneysel çalışma mevcuttur. Geleneksel deneysel yöntemler tahribatlı numune yöntemiyle deneyleri gerçekleştirirken 1980'li yıllarda geliştirilen Küçük Zimba Testi (KZT) yük, sıcaklık ve basınç altında hâlihazırda çalışmakta olan parçalardan numuneler alınıp test edilmesine olanak sağladığı ve tahribatsız bir test olma özelliğine sahip olduğu için son dönemlerde oldukça popüler bir hale gelmiştir. Test temel olarak iki tutucu plaka tarafından mesnetlenen dairesel numunenin küresel şekle sahip yükleme ünitesi tarafından deformasyona maruz bırakılmasından ibarettir. Küçük Zimba Testi (Small Punch Testing), çok küçük boyutlara sahip numunelerin mekanik özelliklerinin, kırılma ve sünme davranışlarının belirlenmesinde uygulanır. Küçük Zimba deneyi ile numuneler üzerinden, kullanımda olan malzemelerin kırılma, sürünme davranışları, ömürleri ve mekanik özellikleri üzerine deneyler gerçekleştirilmektedir. [1-3]

Küçük Zimba Testi çok küçük boyutlarda gerçekleştirilen bir deney olduğundan kullanılan numunelerin hacimlerinde oldukça küçüktür. Dolayısıyla hali hazırda çalışmakta olan sistemler üzerinde test yapıp bu sistemlerin mekanik özelliklerini ve servis ömürlerini belirleme olanağına sahiptir. Test bünyesinde, çentikli ve çentiksiz olmak üzere iki numune tipi vardır. Malzemede çalışma esnasında basınç veya sıcaklık sebebiyle hasar meydana gelmiş olabilir, yâda üretimden kaynaklanan ilave malzeme katımları vb. sebepler malzeme bünyesinde çatlaklara sebep olmuş olabilir. Çalışma esnasında çatlağa ve

bu tip hatalara sahip sistemdeki çatlaklı kısım örneklenemeyeceği için, sistemden alınan numuneler üzerine bu çatlakların etkisini temsil etmek için numune üzerinde çentik açılmaktadır.

Elasto-plastik sonlu elemanları kullanarak, Manahan ve diğerleri [4] yüke karşı oluşan deplasman eğrisini modellemeyi öneren ilk yazarlardır. Daha sonralarda Mao ve diğerleri [5] Linse ve diğerleri [6] radyasyona maruz kalmış A508 tipi çelik malzemenin pekleşmesine neden olan parametrelerin tanımlanması için Küçük Zimba testini kullanarak bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Fleury ve diğerleri [7] yine Küçük Zimba testini kullanarak elde ettikleri yük-deplasman grafiklerinden yola çıkarak farklı çeliklerin iki eksenli gerilme-birim şekil değiştirme davranışlarını incelemişlerdir.

Küçük zimba deneylerinin literatürde yer alması yakın zaman içerisinde olduğundan dolayı, an itibari ile numunelerdeki çentik etkisinin incelenmesi üzerine çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma ile, küçük zimba deneylerinde kullanılan numuneler üzerine açılacak ön tanımlı çentiklerin geometrik boyutlarının ve numune üzerindeki yerleşimlerinin, numunelerin kırılma davranışı bazında etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Turba ve arkadaşları [3] tarafından P91 ferritik çelik üzerinde yapılan küçük zimba deneyleri dikkate alınarak, çatlakların parametrelerine bağlı olarak, işletme esnasında malzeme üzerinde oluşacak veya ilerleyecek çatlak için önlem alabilmek adına çatlakların karakterini belirlemek amaçlanmıştır. Bu kapsamda Gurson modeli [8] ve hasar mekaniği konseptlerini içeren bir altyapıya sahip sonlu elemanlar modeli kullanılarak, kırılma davranışına etkisi araştırılmak istenen parametreler değiştirilerek, küçük zimba testine ait simülasyonlar oluşturulmuştur.

## YÖNTEM

Küçük zımbalama testinin sayısal analizlerinde termodinamik esaslı hasar mekaniği birleşik plastisite modeli kullanıldı. Sünek kırılma mekanizması Gurson Gözenekli Plastisite modeli ile tanımlanırken kırılma mekanizması için geliştirilmiş Leckie-Hayhurst Modeli kullanıldı[9].

### Gözenekli Plastisite Modeli

Gözenekli plastisite modeli ilk olarak Gurson tarafından sünek kopmaları ve dilatasyonel akmaları modellemek için önerildi. Daha sonra bu model, Tevergard ve Needleman[10] tarafından  $q_1$ ,  $q_2$  katsayıları eklenerek hızlı boşluk birleşme ivmelenmeleri fonksiyonu  $f^*$  geliştirilmesi ile daha da iyileştirildi. Bu iyileştirilmiş hali ile Gurson plastisite potansiyeli aşağıdaki yazılabilir

$$\phi^p = \left[ \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y} \right]^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( \frac{q_2}{2\sigma_y} \text{tr}[\bar{\sigma}] \right) + [1 + [q_1 f^*]^2] = 0 \quad (1)$$

Burada  $f$ , plastik birim şekil değiştirmeye sebep olan boşluk hacim oranıdır. Dikkat edileceği gibi Gurson plastisite potansiyeli,  $\phi^p$ , bu çalışmanın amacı kapsamında, efektif gerilme konfigürasyonunda tanımlanmıştır. Tevergard and Needleman'nın boşluk büyümesi ve birleşmesi kriterleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$f^*(f) = \begin{cases} f & , f \leq f_c \\ f_c + [f_u^* - f_c] \frac{[f - f_c]}{[f_f - f_c]} & , f > f_c \end{cases} \quad (2)$$

Boşluk hacimsel oranını,  $f$ 'in gelişimi eşitliği kütle korunumu prensibi ve plastik sıkıştırılabilirlik kullanılarak elde edilir. Tamamı ile plastik akmanın olduğu durumlarda, toplanma ve gelişme adı altında iki mekanizmadan oluşur. Bu durumda boşluk hacimsel oranının gelişimi matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{f} = \dot{f}^c + \dot{f}^g \quad (3)$$

Burada çekirdeklenmenin gelişimi denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\dot{f}^c = A_N \dot{\tilde{\epsilon}}_{eq}^p; A_N = A_N(\tilde{\epsilon}_{eq}^p) = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left( - \frac{[\tilde{\epsilon}_{eq}^p - \tilde{\epsilon}_N^p]^2}{2[S_N]^2} \right) \quad (4)$$

Burada  $\tilde{\epsilon}_N^p$  ve  $S_N$  çekirdeklenmedeki ortalama plastik birim şekil değiştirmeyi ve onun standart sapmasını ifade eder. Nahshon ve Hutchinson[11] boşluk hacimsel oranını gelişimini kayma ve normal gerilmeler altındaki gelişim olmak üzere iki kısma ayırmıştır.

$$\dot{f}^g = \dot{f}_{normal}^g + \dot{f}_{layma}^g \quad (5)$$

ve

$$f_{normal}^g = [1 - f]tr[\dot{\epsilon}^p]$$

$$f_{kayma}^g = k_w f \frac{w}{\bar{\sigma}_{eq}} dev[\bar{\sigma}_{eq}] \quad (6)$$

Burada  $k_w$  kaymadan kaynaklı büyümeyi tanımlayan malzeme parametresidir ve  $0 \leq k_w \leq 3$  aralığında alınması önerilmiştir.  $w$  ise deviatorik gerilmenin bir fonksiyonudur ve  $0 \leq w \leq 3$  aralığında tanımlıdır.

### Kırılgan Çatlak Modeli:Hasar Mekaniği

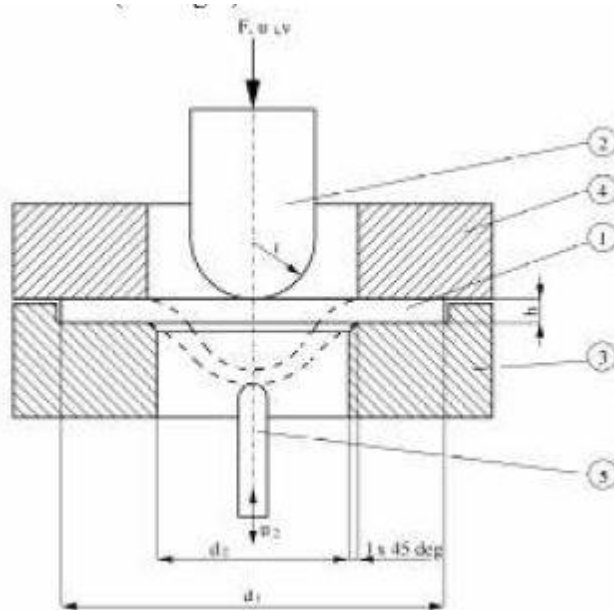
Bu çalışmada başlangıçta sünme kopmasını modellemek için geliştirilen Leckie Hayhurst modelinin modife edilmiş denklemleri kullanıldı. Bu denklemler izotropik formda gerilme değişmezleri cinsinde ifade edildi. Leckie-Hayhurst modelinin gerilme değişmezleri cinsinden potansiyelin genel formu aşağıdaki gibi verildi.

$$\varphi(\bar{\sigma}) = a\bar{\sigma}_i + bJ_1(\bar{\sigma}) + [1 - a - b]J_2(\bar{\sigma}) \quad (7)$$

Burada  $\bar{\sigma}_i$  rotasyonsal nötrale konfigürasyondaki efektif gerilme tensörünün maksimum asal gerilme bileşenidir. Bu şekilde önerilen enerji açığa çıkarma oranının iki önemli avantajı vardır. (a) gerilmeye direk bağlantısı olduğundan asal gerilmeler üzerinden kırılma çatlak modeline direk bir bağlantı sağlanır.(b) sayısal uygulaması ise kolaydır.

### Küçük Zımbalama Testi Analizleri

**Küçük zımbalama deneyi:** Küçük zımba testi , iki adet tutucu plaka , dairesel veya dikdörtgensel şeklindeki numune ve küresel uca sahip bir yükleme ünitesinden meydana gelmektedir( Şekil 1)



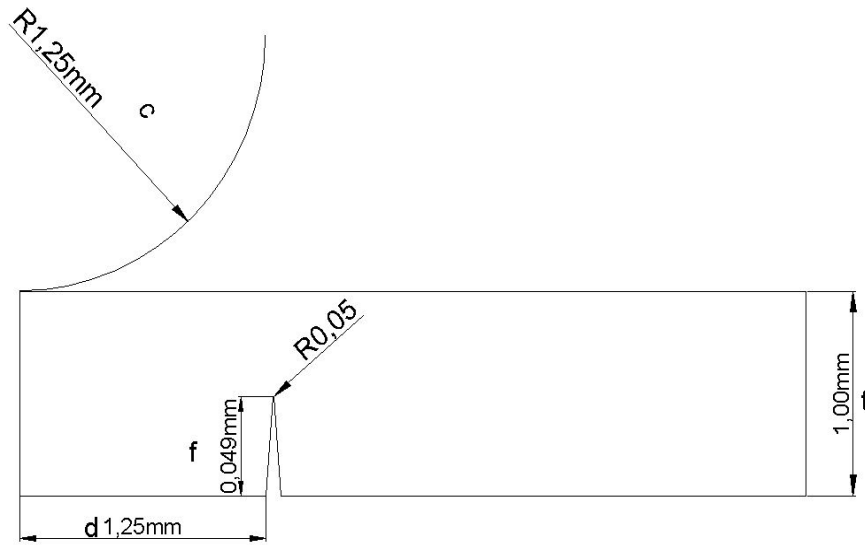
**Şekil 1:** Küçük zımbalama testinin şematik gösterimi

Çalışmada kullanılan tüm deneysel veriler ve deney düzeneğine ait parametrelerin seçiminde, Turba ve arkadaşları[3]'nin yapmış olduğu deneysel çalışmalar dikkate alınmıştır. Turba ve arkadaşları, bu çalışmaların da EDM metoduyla oluşturulmuş ön tanımlı çentiğe sahip , dairesel numune kullanmıştır. Deneyler 22 ve -196 derecede gerçekleştirilmiştir. -196 derece de ki ortamı elde edebilmek adına sıvı nitrojen kullanılmıştır . Deney gerçekleştirilmeden önce numune silisyum karbür ( SiC) kağıt ve elmas süspansiyonların desteğiyle yerleştirilmiştir.

Test deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Yükleme ünitesi (puncher) deplasman seviyesi belirlenerek numune zorlanmıştır ve yükleme ünitesi ucundan okunan değerlerle yük-deplasman ilişkileri elde edilmiştir. Numunenin orta kısmı boş olduğu için testi başlangıçta eğilmeye ve test sonlarına doğru derin çekme işlemine benzetmek mümkündür. Numune eğilmeye zorlandığı için maksimum moment

numunenin orta noktasındadır dolayısıyla açıklıkta maksimum gerilmeler oluşmuştur. Testte zımbalama etkisinden kurtulabilmek adına yükleme ünitesinin küreselliği sınırlandırılmıştır. Çok sivri bir yükleme ünitesi kullanıldığı takdirde çentik etrafında istenilen gerilme dağılımı yakalanamamıştır. Test esnasında çentik ucunda gerilme yığılması gözlemlenmiştir, burada ortam sıcaklığına bağlı olarak sünek veya gevrek çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir. Maksimum yüke eriştikten sonra %20 düşüş gerçekleşince numune kırılmış olarak nitelendirilmiştir.

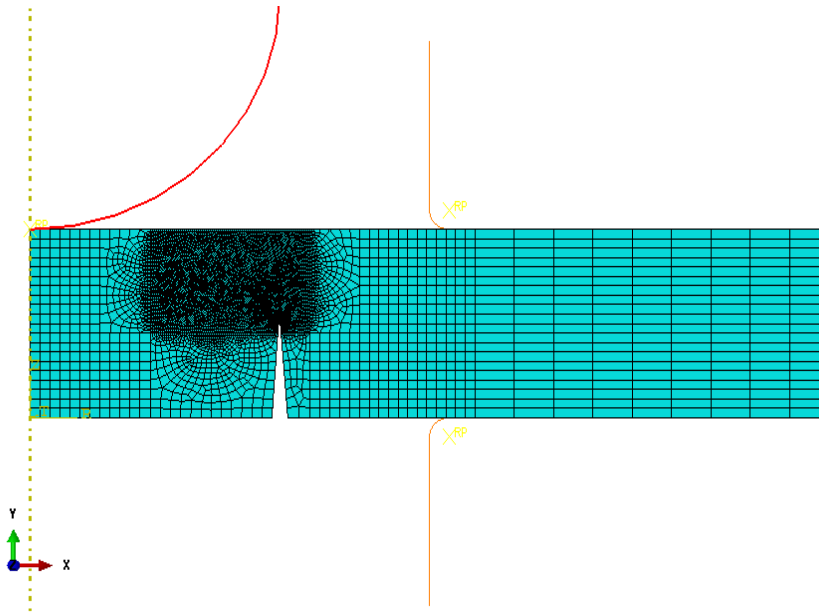
Test aparatları ve numunelerin boyutları CEN Code of practice for small punch testing'e göre ayarlanmıştır. Yükleme ünitesinin deplasmanını kaydetmek amacıyla 2 adet Lineer Değişkenli Deplasman Ölçer kullanılmış ve test 0.005 mm/s deplasman değerinde Gerçekleştirilmiştir. Çalışmada referans alınan numune 8 mm çapında ve 1 mm kalınlığındadır ve ön tanımlı çentiğe sahiptir Şekil 2' de numuneye ait bütün nominal değerler gösterilmiştir.



**Şekil 2:** Küçük zımbalama deney numunesinin geometrik özellikleri

Turba ve arkadaşlarının[3] bu çalışmada kullanılan numuneler üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalardan elde ettikleri kuvvet-deplasman eğrilerine benzer eğriler elde edebilmek için sonlu elemanlar modelinde (Şekil 3) kullanılan Türtük ve Deliktaş [12]'ün geliştirmiş olduğu malzeme ve hasar kodundaki hasar parametreleri ABAQUS Sonlu Elemanlar yazılımında oluşturulan testin simülasyonları ve deney sonuçları [3] kıyaslanarak kalibre edilmiştir. Analizlerde de bu parametreler kullanılarak 22 ve -196 C de simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

**Küçük zımbalama deneyi simülasyonu:** Sonlu elemanlar modelinde çözüm hassasiyeti için, çatlak ucunda ki bölgede ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Toplam düğüm noktası sayısı 8581 iken 8442 adet eksenel simetrik (CAX4R) eleman kullanılmıştır. Yükleme ünitesi ve tutucu plakalar rijit olarak tanımlanmıştır. numuneyi deplasmana maruz bırakmak amacıyla yükleme ünitesine, başlangıç koşulundan itibaren 0.005 mm/s hız ile yer çekimi yönünde hareket tanımlanmıştır. Tutucu plakalar ise eksenel simetrik ankastre sınır koşuluna sahiptirler.



**Şekil 3:** Küçük zımbalama deneyinin sonlu elemanlar modeli

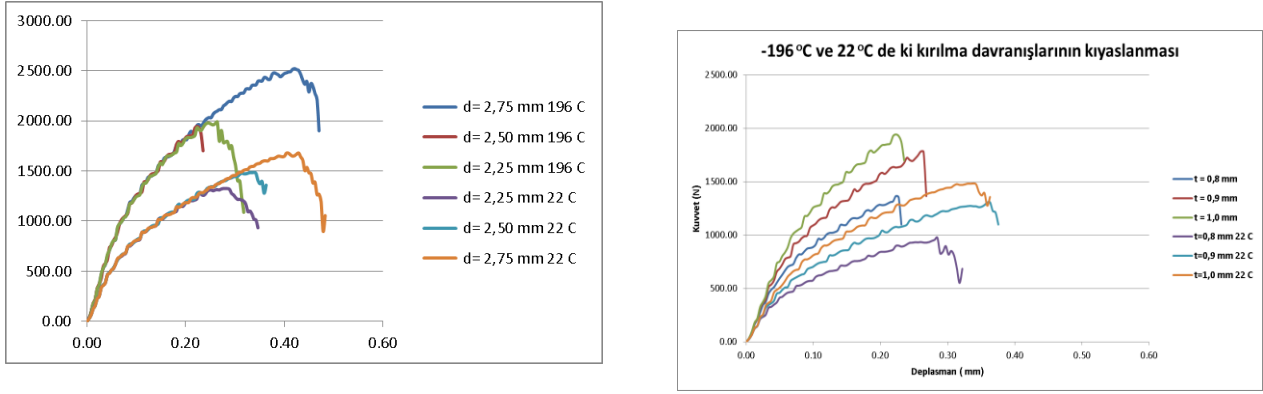
Analiz sonrasında kuvvet-deplasman ölçümlerinin alındığı nokta yükleme ünitesinin ucundaki noktadır. Dolayısıyla model oluştururken yükleme ünitesinin tam disk ile temas ettiği noktada bir referans noktası oluşturulmuştur ve analiz sonunda çıktı olarak bu noktadaki reaksiyon kuvvetleri ölçülmüştür.

Modelin kalibrasyonu sağlandıktan sonra etkisi araştırılmak üzere referans numune boyutları üzerinde, çentik konumu (d) , çentik derinliği (f) , yükleme ünitesi yarıçapı (c) , numune kalınlığı (t) ve çentik ucu yarıçapı (r) olmak üzere birçok parametre değiştirilmiştir. Her bir parametrenin simülasyon sonucunda yükleme ünitesi ucunda oluşan reaksiyon kuvvetine ve kırılma izi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numune üzerindeki çentik aksisimetrik modelde merkezden 1.25 mm ötededir. Çentik konumunun aynı yükleme ünitesi yarıçapı ve numune kalınlığı için bu değerden daha düşük ve daha yüksek değerlerde sonucun nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Minimum yükleme ünitesi yarıçapı sınırı belirlenirken, zımbalama etkisinin oluşmaması ve çentik etrafında istenilen gerilme dağılımının yakalanmasına dikkat edilmiştir. Yükleme ünitesinin maksimum sınırını belirleyen ise numuneyi sabitlemeye yarayan tutucu levhalardır. Numune kalınlığı, çentik konumu ve derinliği sabit tutularak Nominal değerden daha düşük ve daha yüksek değerler için yükleme ünitesi yarıçapının kırılma davranışına etkisi incelenmiştir.

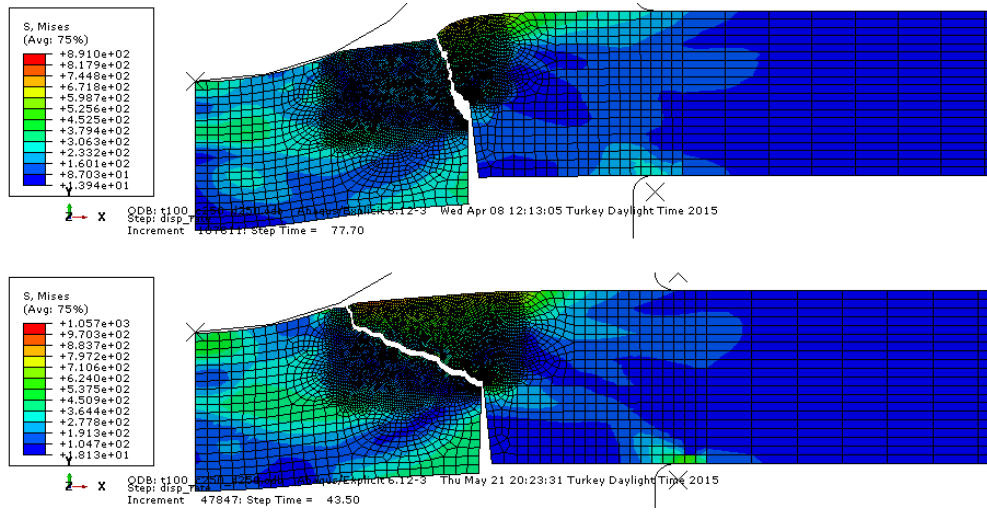
## Analiz sonuçları ve yorumlar

Mühendislik malzemelerinde hasar oluşmasında etkili olan en önemli parametrelerden biride çatlığın ne kadar derine ilerlediğidir. Bu etkiyi gözlemleyebilmek adına numune üzerinde bulunan ön tanımlı çentiğin derinlik parametresi değiştirilmiştir. Nominal olarak 0.49 mm olan değer 0.54 ve 0.44 mm olacak şekilde iki farklı benzetim oluşturulmuştur. 22 °C' de gerçekleştirilen küçük zımba testi simülasyonlarından sonra üç farklı numune kalınlığı içinde, çentiğin açıklıktan uzaklaştığı durumlarda, ölçülen reaksiyon kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi açıklıkta maksimum momentin ve dolayısıyla bu noktalarda maksimum asal gerilmelerin oluşmasıdır. Çentik bu kritik noktadan uzaklaştıkça, uç noktasındaki gerilmenin şiddeti de buna bağlı olarak azalmıştır. Buna bağlı olarak da numunenin çentik konumunun açıklıktan uzaklaşmasına bağlı olarak daha geç kırıldığı gözlemlenmiştir. (Şekil 4)



**Şekil 4:** -196 °C ve 22 °C sıcaklıklarındaki yük-deplasman eğrileri

Grafiklerden de anlaşılabileceği gibi çentik konumu parametresi, d ‘nin çatlak ilerlemesinde yani çatlakın izlediği yol üzerinde çok fazla etkili olmamıştır (Şekil 5). Üç farklı konum için ; d=2,25 mm d= 2,5 mm d=2,75 mm reaksiyon kuvvetleri sırasıyla 1325.63N , 1484.81N , 1678.59 N olarak ölçülmüştür. Simülasyonlar sonucunda aşağıdaki şekildeki (Şekil %) çatlak izlerinden de anlaşılabileceği gibi 22 °C olduğu deneylerde daha sünek davranış gözlemlenirken -196 °C ‘ lik ortamda gevrek davranış gözlemlenmiştir. Bunun sebebi düşük sıcaklıkta fiziksel manada atomlar arasındaki bağın güçlenmesi ve plastik deformasyonun gerçekleşmesi için gerekli akma gerilmesi sınırının artması sonucunda, numune içinde tanecikler arasında kalan ilave malzemelerin kırılması yada düzensizliklerin etkisiyle gevrek kırılmanın tetiklenmesidir.



**Şekil 5:** 22 °C sıcaklıktaki sünek çatlama ve -196 °C sıcaklıktaki gevrek çatlama

Simülasyonlardan sonra numune kalınlığının azalmasıyla birlikte her iki sıcaklık ortamında da ölçülen reaksiyon kuvvetlerinin düştüğü fakat kırılma anının çok değişmediği gözlemlenmiştir. Numune kalınlıkları 1.00mm, 0.9mm, 0.8mm için, diğer parametreler nominalden reaksiyon kuvvetleri 22 °C ‘ de sırasıyla 1484,81 N, 1309,13 N, 976.45 N olarak ölçülürken -196 °C’ de 1944 N, 1784.43 N, 1366.78 N ölçülmüştür. Bu kısımda numune kalınlığının artması, çentik derinliği sabit olduğu için, çatlakın ilerlemesi için aşması gereken eleman sayısını arttıracığından, çatlak daha fazla malzemeyle karşılaşacaktır. Dolayısıyla numune kalınlığı arttıkça dayanımın artmış ve bu sebeplerden oluşan gerilme de düşük çıkmıştır. Sonuç olarak kırılma anında yükleyici ucunda oluşan reaksiyon kuvvetinin daha fazla çıktığı gözlemlenmiştir.

## SONUÇLAR

Küçük zımba testi için hazırlanan simülasyonlar üzerinden, etkisi araştırılmak istenen geometrik parametreler incelenmiş ve sonuç olarak en etkili parametrenin çentiğin numune üzerindeki yerleşimi olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, numune üzerindeki moment dağılımıdır. Çatlak etrafında bulunan kuvvet (moment) değerlerinin artmasıyla, çatlakın ilerlemesinin daha tehlikeli olduğu ve sistemin dayanımının

oldukça düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulanan kuvvetin yüzey alanıyla değişiminde, kırılma davranışı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu, yükleme ünitesi üzerinden yapılan simülasyonlar aracılığıyla tespit edilmiştir. Herhangi bir sistem üzerinde uygulanan kuvvetin yüzey alanının atması, elemanlarda oluşacak olan gerilme dağılımının daha hızlı gerçekleşmesine ve dolayısıyla çatlağın daha hızlı ilerleyip, kırılmanın daha erken gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Aksi şekilde, uygulanan kuvvetin yüzey alanının oldukça küçülmesinin eleman üzerinde lokalizasyona sebep olacağı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, küçük zımba testi numunesi üzerinde bulunan ön tanımlı çentığe ve yükleme koşullarına ait geometrik parametrelerin, kırılma davranışına etkisinin araştırılması için, çentik konumu (d) , çentik derinliği (f) , numune kalınlığı (t) , yükleme ünitesi yarıçapı (c) , olmak üzere dört adet parametre seçilmiştir. Parametrelerin etkilerinin gözlemlenmesinde, işlem sırasının belirlenmesi için kısmi olarak deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Parametrelerin kırılma davranışı üzerindeki etkisinin yanısıra, birbiri arasında ki etkileşimlerinin araştırılması ve parameter sayısının artırılarak tam anlamıyla deney tasarımı yönteminin kullanılması şuanki ve gelecek planda yapılacak olan çalışmalarda yer almaktadır.

### KAYNAKLAR

- [1] Cen workshop agreement: Small punch test method for metallic materials, Tech. Rep. CWA 15627 (2006).
- [2] T. Linse, M. Kuna, J. Schuhknecht, H.-W. Viehrig, Usage of the small-punch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle ductile transition region, Engineering Fracture Mechanics 75 (2008) 3520–3533
- [3] K. Turba, B. Gulcimen, Y. Li, D. Blagoeva, P. Hhner, R. Hurst, Introduction of a new notched specimen geometry to determine fracture properties by small punch testing, Engineering Fracture Mechanics 78 (16) (2011) 2826–2833.
- [4] Manahan M., Argon A., Harling O. The development of a miniaturised disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. J. Nucl. Mater., 1981, 103-104, pp. 1545-1550.
- [5] X. Mao, J. Kameda, Small-punch technique for measurement of material degradation of irradiated ferritic alloys, Journal of Materials Science 26 (1991) 2436–2440.
- [6] T. Linse, M. Kuna, J. Schuhknecht, H.-W. Viehrig, Usage of the small-punch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle ductile transition region, Engineering Fracture Mechanics 75 (2008) 3520–3533.
- [7] ] E. Fleury, J. Ha, Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75 (9) (1998) 699–706
- [8] A. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth - part i. yield criteria and rules for porous ductile media, J.Engng Mater Tech 99 (1977) 2–15.
- [9] F. Leckie, D. Hayhurst, Constitutive equations for creep rupture, Acta Metallurgica 25 (1977) 1059–1070.
- [10] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, Acta Metallurgica 32 (1984) 157–169.
- [11] K. Nahshon, J. Hutchinson, Modification of the gurson model to shear failure, Eur. J. Mech. A/Solids 27 (2008) 1–17.
- [12] I.C. Turtuk, B.Deliktas, Coupled Porous Plasticity – Continuum damage mechanics approaches in modelling temperature driven ductile-to-brittle transition fracture in ferritic steels, International Journal of Plasticity