

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**T4 ve T6 ISIL İŞLEMLİ 6061 ALÜMİNYUM LEVHANIN İKİ EKSENLİ
GERİLMELER ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Egemen UZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Lisansüstü Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

ŞUBAT 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**T4 ve T6 ISIL İŞLEMLİ 6061 ALÜMİNYUM LEVHANIN İKİ EKSENLİ
GERİLMELER ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Egemen UZ
(503181306)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

ŞUBAT 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503181306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Egemen UZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “T4 ve T6 ISIL İŞLEMLİ 6061 ALÜMİNYUM LEVHANIN İKİ EKSENLİ GERİLMELER ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Murat TABANLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Umut KARAGÜZEL
Işık Üniversitesi

Teslim Tarihi : 10 Şubat 2022
Savunma Tarihi : 16 Şubat 2022



ÖNSÖZ

Danışmanım Prof. Dr. Şafak Yılmaz’a desteği, paylaştıkları ve zaman ayırdığı için teşekkür ederim. Kendisinin yönlendirmesi ve teşviği sayesinde bu zorlu araştırmayı tamamlayabildim.

Bu çalışmanın ilgili alanlarda araştırma yapacaklara ve konu hakkında bilgi sahibi olmak isteyenlere yardımcı olmasını temenni ederim.

Şubat 2022

Egemen UZ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xii
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxii
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 6061 Al Alaşımı: Mikroyapı ve Deformasyon	3
2.2 GTN Hasar Modeli	5
3. DENEY ÇALIŞMALARI	9
3.1 Malzeme	9
3.2 Boşluk Hacim Oranı Ölçümleri	9
3.3 Beneklerin Ölçülmesi	10
3.4 Ölçüm Sonuçları	10
3.5 Ölçüm Değerleri	12
3.6 Ölçüm Değerlerin Grafik Üzerinde Gösterilmesi	17
3.7 Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	22
4. DENEY SONUÇLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRULANMASI	29
4.1 GTN Hasar Modeli	29
4.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Modellenmesi	30
4.3 Derin Çekmenin Simülasyonu	30
4.4 Simülasyon Sonuçları	32
4.4.1 T6 – Y200 sonuçlarının karşılaştırılması	32
4.4.2 T6 – Y100 sonuçlarının karşılaştırılması	34
4.4.3 T6 – Y75 sonuçlarının karşılaştırılması	36
4.4.4 T6 – Y25 sonuçlarının karşılaştırılması	38
4.4.5 T4 – Y200 sonuçlarının karşılaştırılması	40
4.4.1 T4 – Y100 sonuçlarının karşılaştırılması	42
4.4.2 T4 – Y75 sonuçlarının karşılaştırılması	44
4.4.3 T4 – Y25 sonuçlarının karşılaştırılması	46
5. SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	57



KISALTMALAR

GTN	: Gurson-Tvergaard-Needleman
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
DCPD	: Doğru Akım Potansiyel Düşüşü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
BHO	: Boşluk Hacim Oranı



SEMBOLLER

f	: Boşluk hacim oranı
ϵ_w, ϵ_t	: Genişlikteki ve kalınlıktaki genleme
f_0, f_c, f_f	: Başlangıçtaki, boşlukların birleşmesi anındaki, kritik ve kırılma anındaki boşluk hacim oranı
f^*	: Eşdeğer boşluk hacim oranı
q_1, q_2, q_3	: GTN model parametreleri
$\sigma_m, \sigma_e, \sigma_Y$	: Metal matriste hidrostatik, eşdeğer Mises ve akma gerilmesi
S_N	: Boşluk çekirdeklenme dağılımının standart sapması
ϵ_N	: Çekirdeklenme genlemesi
σ	: Eşdeğer Mises gerilmesi
K	: Malzemenin mukavemet katsayısı
n	: Malzemenin genleme sertleşme katsayısı
ϵ	: Eşdeğer plastik genlemesi
$\bar{\epsilon}$	: Efektif / Eşdeğer genleme
ϵ_1	: Boyuna yönde genleme
ϵ_w	: Enine yönde genleme
ϵ_t	: Kalınlık yönünde genleme
ϵ_m	: Metal matriste eşdeğer plastik genleme
σ_r	: Kopma gerilmesi
v	: Boşluk hacim oranı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Literatürdeki GTN model parametreleri.....	7
Çizelge 3.1 : 6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	9
Çizelge 3.2 : T6 – Y200 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	13
Çizelge 3.3 : T6 – Y100 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	13
Çizelge 3.4 : T6 – Y75 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	14
Çizelge 3.5 : T6 – Y25 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	14
Çizelge 3.6 : T4 – Y200 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	15
Çizelge 3.7 : T4 – Y100 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	15
Çizelge 3.8 : T4 – Y75 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	16
Çizelge 3.9 : T4 – Y25 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.....	16
Çizelge 4.1 : 6061 Al alaşımının GTN model parametreleri.....	32



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Çekilmiş numunelerin parçalar kesildikten sonraki durumu.....	9
Şekil 3.2 : Beneklerin boyutlarını ölçebilmek için kullanılan el mikroskobu.	10
Şekil 3.3 : T6 – Y200 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	17
Şekil 3.4 : T6 – Y100 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	17
Şekil 3.5 : T6 – Y75 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	18
Şekil 3.6 : T6 – Y25 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	18
Şekil 3.7 : T6 ısıtıl işlemi görmüş bütün numunelerin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	19
Şekil 3.8 : T4 – Y200 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	19
Şekil 3.9 : T4 – Y100 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	20
Şekil 3.10 : T4 – Y75 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	20
Şekil 3.11 : T4 – Y25 numunesinin numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.....	21
Şekil 3.12 : T4 ısıtıl işlemi görmüş bütün numunelerin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi.	21
Şekil 3.13 : Tek eksenli çekilmiş T6 ve T4 numunelerinden alınan parçaların boşluk hacim oranı ve eşdeğer plastik genleme grafiği.	22
Şekil 3.14 : T6 – Y200 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	22
Şekil 3.15 : T6 – Y100 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	23
Şekil 3.16 : T6 – Y75 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	23
Şekil 3.17 : T6 – Y25 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	23
Şekil 3.18 : T4 – Y200 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	24

Şekil 3.19 : T4 – Y100 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	24
Şekil 3.20 : T4 – Y75 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	24
Şekil 3.21 : T4 – Y25 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.....	25
Şekil 3.22 : T6 ısıtılmalı çekilmiş levhaların boşluk hacim oranı ve genleme değerleri.....	26
Şekil 3.23 : T4 ısıtılmalı çekilmiş levhaların boşluk hacim oranı ve genleme değerleri.....	27
Şekil 3.24 : T6 & T4 ısıtılmalı çekilmiş levhaların boşluk hacim oranı ve genleme değerleri.....	28
Şekil 4.1 : Modelin sınır koşulları.	31
Şekil 4.2 : T6 – Y200 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	32
Şekil 4.3 : T6 – Y200 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	32
Şekil 4.4 : T6 – Y200 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	33
Şekil 4.5 : T6 – Y200 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.	33
Şekil 4.6 : T6 – Y100 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	34
Şekil 4.7 : T6 – Y100 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	34
Şekil 4.8 : T6 – Y100 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	35
Şekil 4.9 : T6 – Y100 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.	35
Şekil 4.10 : T6 – Y75 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	36
Şekil 4.11 : T6 – Y75 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	36
Şekil 4.12 : T6 – Y75 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	37
Şekil 4.13 : T6 – Y75 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.	37
Şekil 4.14 : T6 – Y25 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	38
Şekil 4.15 : T6 – Y25 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	38
Şekil 4.16 : T6 – Y25 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	39
Şekil 4.17 : T6 – Y25 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.	39
Şekil 4.18 : T4 – Y200 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	40
Şekil 4.19 : T4 – Y200 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	40
Şekil 4.20 : T4 – Y200 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	41
Şekil 4.21 : T4 – Y200 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.	41
Şekil 4.22 : T4 – Y100 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	42
Şekil 4.23 : T4 – Y100 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	42
Şekil 4.24 : T4 – Y100 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	43
Şekil 4.25 : T4 – Y100 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.	43
Şekil 4.26 : T4 – Y75 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.	44
Şekil 4.27 : T4 – Y75 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.	44
Şekil 4.28 : T4 – Y75 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.	45

Şekil 4.29 : T4 – Y75 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.....	45
Şekil 4.30 : T4 – Y25 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.....	46
Şekil 4.31 : T4 – Y25 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.....	46
Şekil 4.32 : T4 – Y25 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.....	47
Şekil 4.33 : T4 – Y25 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.....	47





T4 ve T6 ISIL İŞLEMLİ 6061 ALÜMİNYUM LEVHANIN İKİ EKSENLİ GERİLMELER ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Sanayileşmede rekabetin giderek artması ve eş zamanlı olarak çevreyle ilgili yükselen duyarlılıkla birlikte ürünlerin hafifletilmesi tasarımı kaçınılmaz beklentilerden biri olmuştur. Geçmişten bu yana hafifliklerinden dolayı uçak-uzay endüstrisinde tercih edilmekte olan alüminyum alaşımları özellikle son yıllarda otomotiv endüstrisi tarafından da yüksek özgül dayanım, alışılmış imalat tekniklerine uygunluk ve korozyon direnci gibi özelliklerinden ötürü yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle 5xxx ve 6xxx serisi alüminyum alaşımları korozyona dayanıklılığıyla dikkat çekmektedir. Tasarımcılar malzemeden yüksek dayanım bekleyen imalat için öncelik şekillendirilebilirlik yani sünekliktir. Bu tez çalışmasında T6 (çözeltiliye alınıp, suni yaşlandırılmış) ve T4 (doğal yaşlandırma) ısıt işlemleri görmüş alüminyum alaşımlarının şekillendirme performansı incelenmiştir.

T6 ve T4 ısıt işlemleri 6061 alüminyum alaşımının tek eksenli ve iki eksenli çekme deneylerindeki, düzenli ve düzensiz uzama bölgelerinin davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Metal malzemenin deformasyon davranışı, çekme yüküne maruz bırakıldığında, düzgün uzama alanı dahilinde Holloman pekleşme modeli denklemiyle uyumlu ama boyun verme sırasındaki genleme değerinin pekleşme üsteline sayı değeri olarak eşit olmadığı ve kopma sırasında gerçek gerilme değerinin Holloman modeliyle uyuşmadığı hatta daha az olduğu biliniyor. Bunun sebebi artan genleme değişiminden ileri gelen, malzeme dahilinde boşluk teşekkül etmesidir.

Sünek malzemelerin kırılma mekanizması çalışmaları Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) hasar modeli çoğu kez kullanılmaktadır. Daha önce literatürde yayınlanmış dokuz adet GTN hasar modeli parametresinden üçü haricinde kalan altı adet parametre tek eksenli çekme metoduyla deneysel olarak elde edilmişti. Bu tez çalışmasındaysa, iki eksenli çekme durumuyla tek eksenli durumunun ne kadar yaklaştığı incelenmektedir. Çalışma kapsamında şekil değişimiyle ortaya çıkan boşluk oranını tayin etmek amacıyla boyun vermiş ve düzgün uzamış çekme testi numunesi kesitlerinde yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. İlave eden elde edilen parametre değerlerinin doğruluğunu kontrol edebilmek için çekme testini simülasyonla tatbik edebilecek bir sonlu elemanlar modeli de ortaya konmuştur. Oluşturulan bu modelde malzemenin elastik bölgedeki özellikleri için literatürden faydalanılırken plastik bölgedeki özelliklerse uygulanan çekme testlerinden elde edilmiştir. Son adımda deneysel yolla elde edilen GTN hasar modeli parametre değerleri sonlu elemanlar uygulaması için veri olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonları sayesinde ampirik olarak elde edilen GTN model parametreleri doğrulanmıştır.



INVESTIGATION OF DEFORMATION OF T4 & T6 HEAT TREATED 6061 ALUMINUM PLATE UNDER BIAXIAL STRESS

SUMMARY

With the increasing competition in industrialization and environmental awareness, the lightening of products has been one of the inevitable expectations in design. Aluminum alloys which have been preferred in the aerospace industry for a long time due to their lightness from the past have been used intensively by the automotive industry in recent years. The auto industry uses aluminum for the vehicle frame and body, electrical wiring, wheels, lamps, paint, transmission, air conditioner condenser and pipes, engine parts (pistons, radiator, cylinder head) and magnets (for speedometers, tachometers and air bags).

Using aluminum for automobile manufacture instead of steel gives a number of benefits. On average, aluminum is 10% to 40% lighter than steel depending on the product. Vehicles made from aluminum have better acceleration, better braking and better handling. The rigidity of aluminum provides drivers with more immediate and precise control. The malleability of aluminum allows designers to engineer vehicle shapes optimized for maximum performance. Aluminum can absorb twice as much energy in a crash than the equivalent weight of steel. Aluminum can be used to increase the size and energy absorption capacity of a vehicle's front and back crumple zones, enhancing safety without increasing weight. Vehicles made from lighter aluminum require shorter stopping distances, helping to prevent collisions. Vehicles with aluminum components can be 24 percent lighter than those with steel components. This saves 0.7 gallons of fuel per 100 miles, a saving of 15 percent in fuel consumption over steel vehicles. Similar fuel savings are made when aluminum is used in hybrids, diesels and electric vehicles. Aluminum reacts with the oxygen in the air to form a microscopically thin layer of oxide. This layer is only 4 nanometres thick but provides excellent protection against corrosion. It even repairs itself if damaged. Especially the 5xxx and 6xxx series aluminum alloys attract attention due to its various characteristics. The 5xxx series profiles as one of the common use aluminum alloys which have Mg in 3-5%. It also call Al-Mg aluminum alloy. The chracteristic is low density, high tensile strength and high elongation. Its weight is lower than other alloy in the same area. Therefore, it is widely use consumer electronics, aviation, and the normal industry. The widely use in 5xxx series alloy is 5052, 5005, 5083, 5A05. The other one of best materials of industry is 6xxx series alüminum alloy. The main chemical composition of it is the Mg and Si. Therefore, we call it Al-Mg-Si alüminum alloy. 6xxx series with its good plasticity and corrosion resistance characteristic become the most widely application alloy such as power lines, automotive, aircraft/spacecraft componenents and etc.. The widely use in 6xxx series alloy is 6005, 6063, 6061, 6060. While designers expect high strength from the material, formability is the priority for manufacturing. In this thesis, the forming performance of T6 (in solution and artificially aged) and T4 (natural aging) heat-treated aluminum alloys is investigated.

The behavior of regular and irregular elongation zones in uniaxial and multiaxial tensile tests of T6 and T4 heat-treated 6061 aluminum alloy has been investigated comparatively. It is known that the deformation behavior of the material is in accordance with the Holloman strain model equation in the region of uniform extension, but the unit strain value at the necking moment is not numerically equal to the hardening exponent and the actual stress value at fracture is lower than the Holloman model. The reason for this is the formation of voids in the material resulting from increased unit deformation.

The Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) damage model is frequently used in the fracture mechanics studies of ductile materials. Gurson suggested a model for void-related damage in porous domains including voids. After that, Tveergaard and Needleman made contributions to the original theory of porous metal plasticity. Therefore, the damage model of Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) has been broadly used for the estimation of deformation and fracture behavior of metals.

To estimate ductile damage in metals, researchers have conducted diverse studies via the GTN model. GTN damage model takes into account the void evolution in the course of the plastic deformation. Scholars have specified the phases of the void evolution through computed tomography (CT) or in-situ X-ray laminography. Cao and colleagues defined the ductile damage of high carbon steel by X-ray microtomography besides mechanical tests. They stated that the void density which characterizes void size increased exponentially with the effective plastic strain and the void nucleation process. Furthermore Yuenyong and coworkers applied a practical approach to establish the void nucleation related GTN model parameters: Direct current potential drop (DCPD). Void density has been correlated by them with the change in the resistance of the inspected zone.

Al-Mg-Si alloys have a broad range of utilization area including aerospace, aircraft and automotive industries as a result of their high strength/weight ratio, good corrosion resistance, formability, weldability, medium strength and low cost. For this reason, GTN model of Al alloys were investigated by the researchers, and they have identified GTN model parameters numerically for diverse manufacturing applications of aluminum alloys. In terms of tensile testing, microstructural analysis and simulations have revealed the GTN model parameters to compare the experimental outcomes with the finite element solver.

Moreover, Abbasi et al. utilized an artificial neural network and tensile testing results to identify the GTN model parameters. However, there are some researches that have experimentally obtained GTN model parameters of metals. Wcislik reported that quantitative image analysis and the final fracture scanning electron microscopy (SEM) photograph could be used to establish the final void volume fraction. He et al. also suggested to identify GTN model parameters of 5052-0 Al alloy by tensile tests and SEM micrographs. However, their experimental methodologies are not practical since they suggested digital image processing to get the final void volume fraction using fractographs. In addition, the standard deviation of the void nucleation distribution is based on values from literature.

Researchers obtained GTN model parameters for diverse metallic materials in the literature. Except for three of the nine GTN damage model parameters previously given from the literature; the remaining six coefficients were experimentally obtained by uniaxial tensile tests. In this thesis, it is examined how close the uniaxial case is in the multiaxial case. In order to determine the void ratio developed by deformation

within the scope of the thesis study, density measurements were made in the sections of the tensile test specimen, which were properly elongated and necked. In addition, a finite element model was created to simulate the tensile test to check the accuracy of the parameters found. In this model, the properties of the material in the elastic region are taken from the literature. The properties in the plastic region were obtained from the tensile tests carried out. In the last stage, the experimentally obtained GTN damage model parameters were entered into the finite element software as data. The experimentally obtained GTN model parameters were verified by finite element simulations. For deformation applications, there are two kinds of finite element solver algorithms: explicit and implicit techniques. For the implicit one, the stress and strain at the integration points are revised by iteratively solving a set of nonlinear equations. However, for the explicit type, the stress and the strain at the integration points are updated by using known stress and strain states; therefore, iterative solving is reduced. A commercially available finite element solver, Abaqus, was used to develop the simulations of tests and a finite element model (FEM) model with the dimensions the test specimens that were consumed in the experiments were prepared. With this thesis, on the one hand, the findings that will fill the relevant gaps in the scientific and technical literature, and on the other hand, the outputs for the determination of the heat treatment parameters that will enable the efficient use of this method in the industry have been obtained. The results of the study are expected to contribute to the rapidly developing automotive and aerospace industries in our country and in the world, and to the entire manufacturing world where aluminum alloy plates (by cold forming) are used intensively.



1. GİRİŞ

Yakıt ekonomisi ve CO₂ emisyonları ile ilgili düzenlemeler üreticileri ağırlık düşürmeye zorlamaktadır. Hafifliğe yönelik artan talep, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci nedeniyle alüminyum alaşımlarının çok çeşitli alanlarda kullanılmasına yol açmıştır [1]. Tasarım mühendisleri ve araştırmacılar tarafından; kompozitler, polimerler, magnezyum ve alüminyum alaşımları gibi çeliğin yerini alabilecek alternatif malzemeler araştırma konusudur. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, daha yüksek özgül dayanımları (mukavemet/ağırlık), korozyon direnci ve hurda değeri (geri dönüştürülebilirlikleri) nedeniyle otomobil ve uçak yapılarında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları arasından yaşlandırmayla veya çöktürülerek sertleşebilenler yüksek mukavemet özellik kazanır. Çökelme işlemi, alaşımın mukavemetini ve sünekliğini veya başka bir deyişle şekillendirilebilirliğini etkiler. Al-Mg-Si alaşımları; orta/yüksek mukavemet, iyi şekillendirilebilirlik, korozyon direnci, kaynak edilebilirlik ve düşük maliyete sahip oldukları için havacılık ve otomotiv endüstrisinde tercih edilen çökelme ile sertleştirilmiş Al alaşımlarıdır [2]. Çökelme sertleşmesinden sonra alaşımın şekillendirilebilirliği azalır ancak yüksek mukavemete sahip olur [3]. 6061 Al alaşımı, en yaygın olarak kullanılan Al-Mg-Si alaşımlarından biridir.

Genellikle metal şekillendirme olarak adlandırılan metallerin plastik deformasyonu son derece teknolojik öneme sahiptir. Metal şekillendirme; dövme, ekstrüzyon, tel çekme, haddeleme ve sac metal şekillendirme işlemlerinin iyi bilinen yöntemlerini içerir. Sac metal şekillendirme, endüstriyel üretimin her sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır ve otomotiv, uçak, ev aletleri, gıda endüstrileri için yüksek mukavemet, iyi yüzey ve doğru toleranslar sağlar. İmalat işlemlerinin karmaşıklığı sac metallerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için çeşitli yöntemlerin araştırılmasına önayak olmuştur [4,5].

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Metal malzemenin deformasyon davranışı, çekme yüküne maruz bırakıldığında, düzgün uzama alanı dahilinde Holloman pekleşme modeli denklemiyle uyumlu ama boyun verme sırasındaki genleme değerinin pekleşme üsteline sayı değeri olarak eşit olmadığı ve kopma sırasındaki gerçek gerilme değerinin Holloman modeliyle uyuşmadığı hatta daha az olduğu biliniyor. Bunun sebebi artan genleme değişiminden ileri gelen, malzeme dahilinde boşluk teşekkül etmesidir.

Literatürde ve endüstride çelik saclar için bilgi ve deneyim oldukça fazladır. Öte yandan alüminyum alaşımlarının kullanımını kısıtlayan alüminyum alaşımlı levhaların şekillendirilebilirliği hakkında da sınırlı bilgi vardır. Alüminyum alaşımlı levhaların şekillendirilebilirliği daha yaygın olarak kullanılabilmesi için derinlemesine anlaşılmalıdır. Sac metal şekillendirmenin karmaşık mekanizması şekillendirme işlemleri sırasında ortaya çıkabilecek hataların tahminini engelleyebilir. 6061 Al alaşımı çökeltme sertleştirme işlemi nedeniyle daha karmaşık şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptir. Isıl işlemler 6061 Al alaşımının deformasyon davranışını oldukça değiştirmektedir ve alaşımın yaşlanma süresine ilişkin mekanik özelliklerini tanımlamak metal şekillendirme işleminin sonucunu tahmin etmek için esastır.

Bu tezin amacı; daha önce tek eksenli olarak çekilmiş, T6 ve T4 ısıl işlemi görmüş alüminyum sacların genleme - boşluk oluşumu ilişkisiyle, iki eksenli gerilmeyle çekilmiş alüminyum sacların genleme - boşluk oluşumu ilişkisinin karşılaştırmalı incelenmesidir.

Çalışma kapsamında şekil değişimiyle ortaya çıkan boşluk oranını tayin etmek maksadıyla boyun vermiş ve düzgün uzamış çekme testi numunelerinin kesitlerinde yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Ayrıca bulunan değerlerin doğruluğunu kontrol edebilmek için çekme testinin tatbik edilebileceği bir sonlu elemanlar modeli de oluşturulmuştur. Bu amaçla ampirik olarak tayin edilen GTN hasar modeli parametreleri sonlu elemanlar uygulamasına veri olarak girilmiştir. Deneyler vasıtasıyla elde edilen GTN model parametreleri sonlu elemanlar metoduyla simülasyonlar üzerinden de teyit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 6061 Al Alaşımı: Mikroyapı ve Deformasyon

Alüminyum alaşımları yüksek özgül dayanımları (mukavemet/ağırlık) ile havacılık, uçak ve otomotiv endüstrileri için geniş bir uygulama yelpazesi oluşturmaktadır. Miller ve çalışma arkadaşları alüminyum ve çelik arasındaki bariz ve önemli bir farkın 5xxx ve 6xxx alüminyum malzemelerin olağanüstü çıplak metal korozyon dayanımı olduğunu belirledi. Çeliğin; kabul edilebilir bir korozyon direnci elde etmek için çinko, nikel, sert krom ve diğer bileşenleri içeren bir kaplamaya sahip olması gerekirken bu kaplama alüminyum için gerekli değildir [6]. Tasarım mühendisleri genellikle tasarım gereği malzemelerde yüksek mukavemet talep ederken imalat mühendisleri metal şekillendirme uygulamaları için çoğunlukla yüksek sünekliği tercih eder. Bu sebeple yaşlandırmayla veya çökeltilmeyle sertleştirilebilir alüminyum alaşımları mühendislik uygulamaları için kullanışlıdır. Mühendisler alüminyum alaşımının süneklik ve mukavemet özellikleri, yaşlandırma sertleşmesi işlemiyle kontrol ederler. Bununla birlikte yaşlandırma işlemi sırasında yapılan çökelme, şekillendirme sonrası sürekli yaşlanma durumunda parça şeklinin bozulmasına neden olabilir.

Çökelme sertleştirme, yaşlandırmayla sertleştirilebilir alaşımların mukavemetini geliştirmek için kullanılan bir ısıtma işlemidir [7]. Mekanik ve imalat mühendisleri; orta seviyede mukavemet, iyi korozyon direnci, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve düşük maliyete sahip olmaları dolayısıyla ekstrüde ürünlerde ve otomotiv gövde saclarında Al-Mg-Si alaşımlarını tercih ederler [2]. 6061 alüminyum alaşımı en yaygın olarak kullanılan Al-Mg-Si alaşımlarından biridir ve T6 ile yaşlandırma koşulunda yüksek mukavemete sahip olduğundan tasarımda yaygın olarak tercih edilir [8]. T6 yaşlandırma işleminde, su verme işleminden sonra 10-20 saat boyunca 160-180 °C'de suni yaşlandırma ile en yüksek mukavemet elde edilir [10].

Buna karşılık mühendisler şekillendirme işlemleri gibi sünekliğin gerekli olduğu uygulamalarda doğal yaşı temper durumu olan 6061-T4'ü de tercih edebilirler. T4 doğal yaşlandırma durumu üç adımda elde edilir; ilk olarak 527°C'de çözeltiye alma

işlemi gerçekleştirilir, ikinci olarak çözeltiye alma ısı işleminden hemen sonra su verme uygulanır. Son olarak da alaşımlar en az iki gün oda sıcaklığında kalır [9].

Birçok araştırmacı çökelme işlemi sıralamasındaki karmaşık mekanizmayı geçmişten günümüze incelemektedir [11-17]. Maisonette ve çalışma arkadaşları 6061 Al alaşım numunelerinin mikro yapısındaki mekanik özelliklerinin değişimlerini inceledi. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile gözlemleyerek çökeltilerin β' fazlarına dönüştüğünü ortaya çıkardılar [18]. Öztürk ve çalışma arkadaşları 6061 Al alaşımının mekanik özellikleri (kuvvet ve sertlik) üzerindeki yaşlanma süresinin etkisini boyapışırma işlemine dayalı olarak araştırdı [19]. Ek olarak, Xu ve meslektaşları su verme sıcaklığının çökelme davranışı üzerindeki etkisini araştırdı. Su verme sıcaklığının çökelme davranışı ve çökelme ile güçlendirilmiş Al-Mg-Si-Cu 6061 alaşımının sertliği üzerindeki etkisi; yapay yaşlandırma işlemi sırasında sertlik testi, çökelti mikroyapı gözlemi ve gerçek zamanlı elektrik direnci izleme yoluyla araştırıldı [20].

İmalat uygulamalarında malzemeler genellikle basma gerilmesi altında şekillendirilir. Literatürde verilen mekanik davranış verileri uygulanması çok pratik olduğu için esas olarak tek eksenli çekme testleri ile belirlenir. Metallerin çekme testinde gerilme durumları, boyun verme başlayana kadar tek eksenli gerilme özelliklerine sahiptir. Tek eksenli çekme testinde boyun verme veya başka bir deyişle genlemedeki yerel kararsızlık, metallerin gerçek gerilme – gerçek genleme (birim uzama) davranışını belirleyen ana faktördür. Plastik deformasyona dayalı üretim süreçlerinde veya sonlu eleman yöntemi simülasyonlarında, malzemenin boyun vermenin ötesindeki, kırılmaya kadar olan gerçek gerilme – gerçek genleme (birim uzama) davranışı hayati önem taşır. Bu nedenle metal şekillendirme mühendisliği için boyun vermenin ötesindeki uzamaları dikkate alabilen hesaplamalar gereklidir. Boyun vermenin başlamasından sonra tek eksenli gerilme durumu çok eksenli gerilme durumuna dönüşür. Bununla birlikte tek eksenli çekme testi, boyun verme genlemesinin ötesinde gerilme – genleme (birim uzama) verilerinin elde edilmesine hala fırsat sunabilir. Literatürde 6061 Al alaşımlarının boyun verme bölgesi ötesindeki mekanik davranışı hakkında az sayıda çalışma bulunmaktadır [21].

2.2 GTN Hasar Modeli

Yaygın olarak bilindiği gibi sünek kırılma; gözenekli malzemelerdeki boşlukların çekirdeklenmesinin, büyümesinin ve birleşmesinin mekanik bir tepkisidir. Malzemede şekil değişimi öncesi bulunan boşluklara ilk veya orijinal boşluklar denir. Plastik şekil verme sırasında inklüzyonlardan ve/veya ikinci faz çökeltilerinden yeni boşluklar oluşabilmektedir [22]. Bu nedenle metaller deformasyona dayalı imalat işlemlerinden sonra boşluklar içerir. İlk boşluklar ve deformasyon esnasında çekirdeklenen boşluklar plastik deformasyonla büyüyerek iç yapıyı boşluklu hale getirir. Parçanın deformasyonuna devam edilirse elbette son olarak boşluklar birleşir ve sünek kırılma ile sonuçlanır [23].

Gurson, boşluklar dahil gözenekli ortamlarda boşlukla ilgili hasar için bir model önermiştir [24]. Daha sonra Tvergaard ve Needleman, orijinal gözenekli metallerin plastisite teorisine katkıda bulundular [25,26]. Bu nedenle Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) hasar modeli, metallerin deformasyon ve kırılma davranışlarının tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metallerin sünek kırılmasını tahmin etmek için bilim adamları GTN modeli [27-30] aracılığıyla çeşitli çalışmalar yürütmüşler. GTN hasar modeli plastik deformasyon sırasında boşluk gelişimini dikkate alıyor. Araştırmacılar in-situ X-ışını laminografisi veya bilgisayarlı tomografi (BT) aracılığıyla boşluğun evriminin aşamalarını tanımladılar [31-33]. Cao ve meslektaşları mekanik testlere ek olarak yüksek karbonlu çeliğin sünek hasarını X-ışını mikrotomografisi ile tanımladılar [34]. Boşluk çekirdeklenme sürecini ve boşluk boyutunu karakterize eden boşluk yoğunluğunun eşdeğer plastik genleme ile katlanarak arttığını bildirdiler. Yuenyong ve çalışma arkadaşları boşluk çekirdeklenmesiyle ilgili GTN model parametrelerini belirlemek için pratik bir yaklaşım gerçekleştirdi: Doğru akım potansiyel düşüşü (DCPD). Boşluk yoğunluğunu incelenen bölgenin direncindeki değişimle ilişkilendirdiler [35].

Al-Mg-Si alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, şekillendirilebilirlik, kaynak edilebilirlik, orta mukavemet ve düşük maliyeti nedeniyle havacılık, uçak ve otomotiv endüstrileri dahil geniş bir kullanım alanına sahiptir [2]. Bu nedenle Al alaşımlarının GTN modeli, araştırmacılar tarafından incelenmiştir ve alüminyum alaşımlarının çeşitli imalat uygulamaları için sayısal olarak GTN model parametrelerini tanımlamışlardır [36-39]. Mikroyapısal analiz ve çekme testi

simülasyonları, deneysel sonuçları sonlu eleman çözücü ile karşılaştırmak için GTN model parametrelerini ortaya çıkarmıştır [40,41].

Ayrıca Abbasi ve çalışma arkadaşları GTN model parametrelerini belirlemek için bir yapay sinir ağı ve çekme testi sonuçları kullanmıştır [42]. Ancak metallerin GTN model parametrelerini deneysel olarak elde eden az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Weislik, nihai boşluk hacim oranını belirlemek için son kırılma anının taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafının ve kantitatif görüntü analizinin kullanılabileceğini belirtti [43]. O ve çalışma arkadaşları 5052-0 Al alaşımının GTN model parametrelerinin çekme testleri ve SEM mikrografları yoluyla belirlenmesini önermiştir ama deneysel metodları pratik değildir, çünkü fraktograflar kullanarak nihai boşluk hacim oranını elde etmek için dijital görüntü işlemeyi önermişlerdir. Ayrıca boşluk çekirdeklenme dağılımının standart sapması da literatürdeki değerlere dayanmaktaydı [44]. Literatürde araştırmacılar çeşitli metalik malzemeler için GTN model parametreleri elde etmişler ve bu parametreler önceki çalışmalara da dayalı olarak her parametrenin aralığı ve metodu gösterilip tablo haline getirilmiştir (Çizelge 2.1). Çalışmaların çoğu için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile hesaplamalı yakınsama gerçekleştirilmiş ve sonuçları çekme testi ile karşılaştırılmıştır. Bazı araştırmacılar literatürde verilen GTN parametrelerini kullanarak sünek hasarı tahmin etmeye çalışmışlardır [21].

Çizelge 2.1 : Literatürdeki GTN model parametreleri.

Material	Method	q_1	q_2	q_3	f_0	f_c	f_f	f_N	ϵ_N	S_N	Ref.
IF-Steel	FEM, Tensile Tests and Deep Drawing	1.5	1	2.25	0.0002	0.0134	0.0216	0.0106	0.1	0.1	[56]
Monolithic Blank	FEM and Deep drawing	-	-	-	0.005	0.02	0.05	0.01	0.08	0.06	[57]
BR1500HS	FEM, Tensile Tests and Literature	1.5	1	2.25	0.005	0.2324	0.3071	0.04	0.3	0.1	[58]
22MnB5	FEM, Tensile Tests and Literature,	1.5	1	2.25	0.002	0.05	0.13	0.0155	0.3	0.1	[59]
3Cr1MoV	FEM and Tensile Tests	0.608	0.562	0.369	0	0.240	0.261	0.179	0.124	0.083	[60]
S235JR Steel	Calculation and SEM	1.5	1	2.25	0.0017	0.06	0.667	0.04	0.3	0.05	[61]
DC06 Steel	FEM and Tensile Tests	1.5	1	2.25	0.001	0.04	0.06	0.004	0.3	0.1	[62]
DP 600 Steel	Literature, Tensile Tests and SEM	1.5	1	2.25	0.0008	0.028	0.09	0.02	0.2	0.1	[63]
DP780	FEM and Tensile Test	1.5	1	2.25	0.003	0.013	0.207	0.018	0.102	0.206	[64]
SUS304 Sheet	FEM and SEM	1.5	1	2.25	0.002	0.11	0.156	0.032	0.54	0.09	[65]
SS304	SEM and DCPD	1.5	1	2.25	0.00183	0.0135	0.2628	0.0056	0.3	0.1	[43]
SS304LN	FEM and Literature	1.5	1	2.25	0.00001	0.11	0.25	0.006	0.3	0.1	[66]
Pure Ti	SEM, Tensile Testing, Literature	1.5	1	2.25	0.00138	0.2593	0.3025	0.017	0.3	0.1	[67]
AZ61 Mg alloy	FEM and Tensile Tests	1.5	1	2.25	-	0.18	0.2	0.078	0.2	0.0064	[68]
AA2024-T351	FEM and Literature	1.2	1	-	0.1	0.25	0.5	-	-	-	[69]
AA2219-T6	FEM and Tensile Testing	1.5	1.25	2.25	0.00328	0.011	0.015	0.01	0.12	0.3	[70]
AA5A02	FEM	1.5	1	2.25	0.001	0.02	0.0363	0.0242	0.1	0.1	[71]
AA5A06	FEM and Tensile Tests	1.5	1	2.25	0.0012	0.034	0.042	0.032	0.25	0.08	[72]
AA5182-O	FEM, Tensile Tests and Literature,	1.5	1	2.25	0.01	0.021	0.04	0.001	0.3	0.1	[73]
AA6016-T4	FEM and Literature	1.5	1	2.25	0.00035	0.05	0.15	0.05	0.3	0.1	[74]
AA6061-T6	Literature	1.5	1.0	2.25	0.000125	0.013	0.04	0.0008	0.3	0.1	[75]
AA6061-T6	FEM and Tensile Tests	1.321	2.582	-	0.0016	0.087	0.140	0.052	0.115	0.054	[76]



3. DENEY ÇALIŞMALARI

3.1 Malzeme

Bu çalışmada aşağıda gösterilen kimyasal bileşime sahip ticari standart 6061 alüminyum alaşımı kullanılmıştır (Çizelge 3.1). 2 mm kalınlığa sahip 4 adet T6 yaşlandırmasına maruz bırakılmış alüminyum levhalar ile 1 mm kalınlığında 4 adet T4 yaşlandırması uygulanmış levhalar kullanılmıştır.

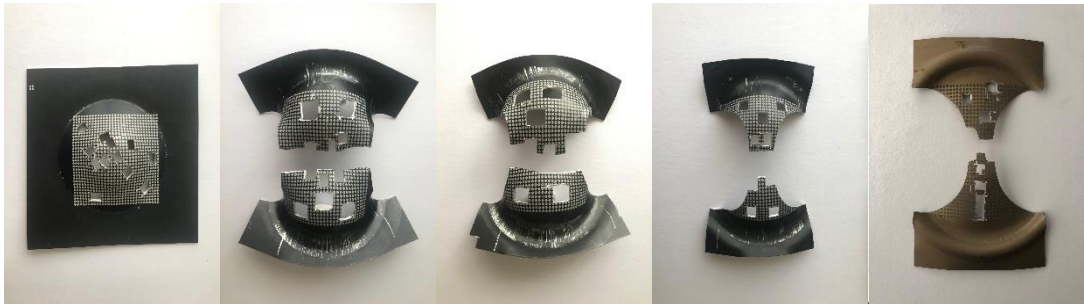
Çizelge 3.1 : 6061 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.

Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Zn	Ti	Al
0.9	0.62	0.33	0.28	0.17	0.06	0.02	0.02	Rest

Kullanılan levhalar hazır olarak, Yıldız (2019) “Investigation of the effect of heat treatments on the formability of the 6061 Al alloy” doktora tezi çalışması için çekilmiş numunelerden alınmıştır. Çekme testi detaylarına ilgili doktora tezinden ulaşılabilir.

3.2 Boşluk Hacim Oranı Ölçümleri

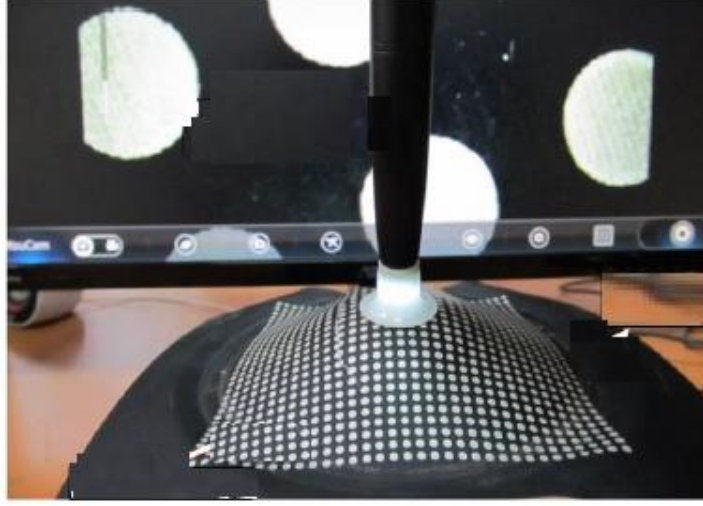
Çekilmiş numunelerin boşluk hacmi oranını elde etmek için yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler yoğunluk ölçüm kitine sahip bir Precisa XB 220A analitik terazisi ile gerçekleştirilmiştir. Çekme numunelerinin boyunlu bölgelerinden hassas bir kesici kullanılarak küçük parçalar elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Çekilmiş numunelerin parçalar kesildikten sonraki durumu.

3.3 Beneklerin Ölçülmesi

Bir el mikroskobu vasıtasıyla 50 kat büyütülerek yakalanan deforme olmuş beneklerin fotoğrafları aşağıdaki gibi görülmektedir. ImageJ programı kullanılarak maksimum ve minimum benek boyutları ölçüldü. Sonuçlar piksel olarak çıktı ve ardından milimetreye dönüştürüldü (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Beneklerin boyutlarını ölçebilmek için kullanılan el mikroskobu.

3.4 Ölçüm Sonuçları

Gözenekli çekme numunelerinin deforme olmuş metal matrisindeki genleşme-sertleşme mekanizması, çekme numunelerinin boyun verme sonrası gözenekli kesitlerinde gelişen süreksizlik nedeniyle zayıflamayı tolere edemez. Bu varsayımı açıklığa kavuşturmak için ortalama matris genleşme ve karşılık gelen eşdeğer matris gerilmesi hesaplanabilir ve beklenen metal matris akma gerilmesiyle karşılaştırılabilir. Karşılaştırma için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır. Boşluklar dahil olmak üzere alanın ilgili boyuna şekil değiştirmeleri, hem düzgün genleşme ve hem de boyunlu bölge için çekme test numunelerinin genişlik ve kalınlık ölçümü ile belirlenebilir çünkü boşluk gelişmeleri hacimde bir artışa neden olur.

$$\ln\left(\frac{1}{1-f}\right) = \varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'e göre metal matristeki genleşme seviyeleri, beklendiği gibi, çekme numunesinin genel genleşmesine göre gelişen boşluklarla birlikte artar. Eşdeğer genleşme değeri ilgili bölgenin bozulmasına dayanır ve bu nedenle ilgili alanın devam

eden bozulmasından dolayı hacim artışı olmaz. Bu sebeple ilgili bölgedeki eşdeğer genleme denklem 3.2’de gösterildiği gibi ifade edilir [45].

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9} * [(\varepsilon_1 - \varepsilon_w)^2 + (\varepsilon_w - \varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_t - \varepsilon_1)^2]} \quad (3.2)$$

$\bar{\varepsilon}$: Eşdeğer genleme

ε_1 : Boyuna yönde genleme

ε_w : Enine yönde genleme

ε_t : Kalınlık yönünde genleme

Boşluklar; hacim artışına yani her yönde ekstra genleme artışına neden olduğundan, Denklem 3.2 küresel boşluklar içeren alanlar için de hala geçerlidir. Bu nedenle metal matrisin ilgili bölgedeki eşdeğer genlemesi kopmuş numunelerin genişlik ve kalınlık ölçümleriyle belirlenebilir. Çünkü gözenek içeren boyun vermiş bölgede metalin pekleşmesi hala devam etmektedir. Eşdeğer kırılma genlemesine karşılık gelen beklenen akma mukavemeti, boyun vermiş bölgedeki gözenekli alanın matrisi için denklem 3.3 (Holloman denklemi) ile elde edilebilir. K mukavemet katsayısı ve n malzemenin pekleşme üstelidir [46].

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (3.3)$$

Boşluklar ve Holloman denklemi dahil olmak üzere metal matristeki eşdeğer genleme kullanılarak matrisin ilgili mukavemeti tahmin edilebilir. Alüminyum alaşım matrisinin mukavemeti Holloman formülü kullanılarak denklem 3.4’deki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{\sigma}_m = K(\varepsilon_m)^n \quad (3.4)$$

$\bar{\sigma}_m$ Holloman denklemiyle hesaplanan metal matrisindeki eşdeğer gerilme, K mukavemet katsayısı ve ε_m malzemedeki boşluklar dahil homojen olmayan alanın metal matrisindeki eşdeğer genlemedir.

Ayrıca belli birim kalınlık değeri için rastgele dağılmış boşlukların hacim oranı, alan boşluk oranına eşit olarak kabul edilebileceği unutulmamalıdır.

$$f = A_{boşluk} / A_{numune} \quad (3.5)$$

$A_{boşluk}$ numunenin kesitindeki boşlukların izdüşüm alanı, A_{numune} numunenin kesit alanıdır.

Benzer şekilde yürütülen çekme testleri boşluklar da dahil olmak üzere kesit alanındaki ortalama gerilmeyi belirler ve metal matristeki ortalama gerilme düşük hacimli oranlı boşluklar için aşağıdaki denklemle tahmin edilebilir [47].

$$\bar{\sigma}_A = \sigma_R / (1 - f) \quad (3.6)$$

$\bar{\sigma}_A$ metal matristeki ortalama gerilme, σ_R deneysel olarak belirlenen kopma gerilmesi ve f kırılma bölgesindeki boşluk hacim oranıdır.

Boşluklu bölgenin metal matrisindeki ortalama gerilme seviyesi kırılma anındaki boşluk hacim oranına bağlı olarak denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır.

3.5 Ölçüm Değerleri

T6 ısıtıl işlemi görmüş numune üzerinden kesilen her bir parçanın yoğunluk ölçümü yapıldıktan sonra yoğunluk değerleri d_{ort} adıyla gösterilerek bu değerler yardımıyla boşluk hacim oranları hesaplanmıştır. Kesilmiş her parçanın üzerindeki başlangıçta 2.5 mm çapında olan beneklerin maksimum ve minimum boyları ölçüldü ve ortalama değerleri alınarak sırasıyla a_{ort} ve b_{ort} olarak gösterilmektedir. Bunlar üzerinden ε_1 , ε_2 ve ε_3 değerleri hesaplanarak $\varepsilon_{eşdeğer}$ elde edilmiştir (Çizelge 3.2). Numunelerin başlangıç yoğunluğu 2.7062 gr/cm^3 olarak bulunmuştur.

$$\varepsilon_1 = \ln(a_{ort}/2.5) \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(b_{ort}/2.5) \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{eşdeğer} = \sqrt{\frac{2}{9} * [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (3.10)$$

$$Boşluk \text{ Hacim Oranı} = 1 - (d_{ort}/2.7062) \quad (3.11)$$

Çizelge 3.2 : T6 – Y200 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

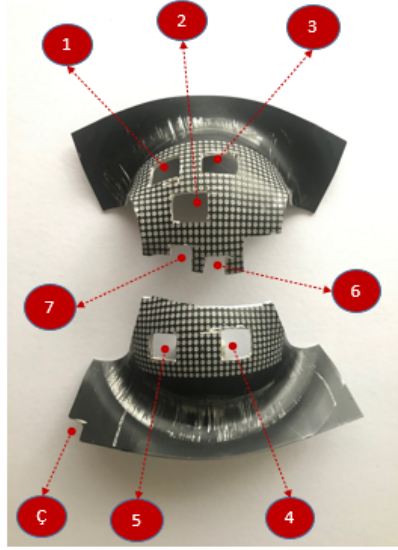
parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε _{ayd} değeri	boşluk hacim oranı
1	2.6974	2.6160	2.5440	0.0454	0.0174	-0.0628	0.065	0.325%
2	2.6989	2.6325	2.5300	0.0516	0.0119	-0.0636	0.068	0.268%
3	2.6902	2.7065	2.5640	0.0794	0.0253	-0.1046	0.109	0.591%
4	2.6920	2.5870	2.5330	0.0342	0.0131	-0.0473	0.049	0.526%
5	2.6915	2.6325	2.5243	0.0516	0.0097	-0.0613	0.066	0.543%
6	2.6860	2.8886	2.4967	0.1445	-0.0013	-0.1431	0.166	0.745%
7	2.6808	2.8183	2.6049	0.1198	0.0411	-0.1609	0.167	0.940%
8	2.6803	2.7490	2.6510	0.0949	0.0586	-0.1536	0.155	0.959%
9	2.6797	2.7970	2.5885	0.1123	0.0348	-0.1470	0.154	0.979%
10	2.6765	2.8886	2.4967	0.1445	-0.0013	-0.1431	0.166	1.097%
11	2.6780	2.8667	2.6357	0.1369	0.0528	-0.1897	0.196	1.042%

Çizelge 3.3 : T6 – Y100 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε _{ayd} değeri	boşluk hacim oranı
1	2.6983	2.7005	2.4025	0.0771	-0.0398	-0.0374	0.077	0.292%
2	2.7010	2.6837	2.5318	0.0709	0.0127	-0.0835	0.090	0.191%
3	2.7059	2.6713	2.4043	0.0663	-0.0390	-0.0273	0.067	0.011%
4	2.7003	2.6922	2.4490	0.0741	-0.0206	-0.0534	0.076	0.219%
5	2.7032	2.7250	2.4563	0.0862	-0.0176	-0.0686	0.091	0.110%
6	2.6944	2.7920	2.4370	0.1105	-0.0255	-0.0849	0.116	0.436%
7	2.6950	2.8010	2.3810	0.1137	-0.0488	-0.0649	0.114	0.413%
8	2.6985	2.8092	2.4256	0.1166	-0.0302	-0.0864	0.121	0.286%
9	2.6953	2.7305	2.4025	0.0882	-0.0398	-0.0484	0.088	0.402%
10	2.6959	2.7555	2.4025	0.0973	-0.0398	-0.0575	0.098	0.380%
11	2.6976	2.7105	2.4025	0.0808	-0.0398	-0.0411	0.081	0.319%

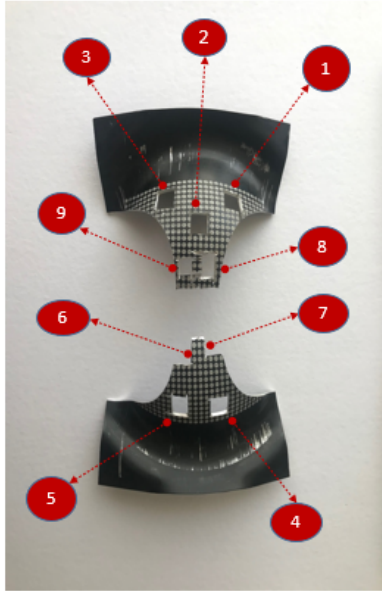
Çizelge 3.4 : T6 – Y75 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε _{ayd}	boşluk hacim oranı
1	2.7044	2.6290	2.4800	0.0503	-0.0080	-0.0423	0.054	0.068%
2	2.7033	2.7435	2.4379	0.0929	-0.0251	-0.0678	0.096	0.108%
3	2.7020	2.6777	2.5782	0.0687	0.0308	-0.0994	0.102	0.156%
4	2.6995	2.7305	2.5569	0.0882	0.0225	-0.1107	0.117	0.248%
5	2.7020	2.6777	2.5782	0.0687	0.0308	-0.0994	0.102	0.156%
Çekilmemiş	2.7062							
6	2.6974	2.8587	2.4940	0.1341	-0.0024	-0.1317	0.153	0.325%
7	2.6979	2.7885	2.5385	0.1092	0.0153	-0.1245	0.136	0.307%
8	2.6766							1.095%
9	2.6860							0.747%



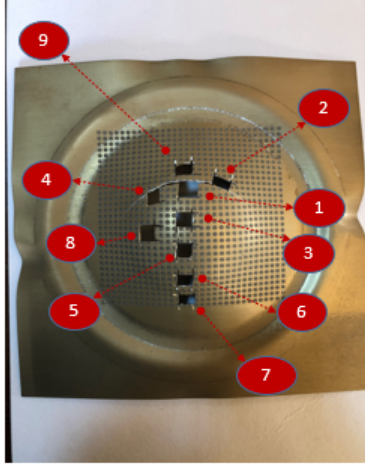
Çizelge 3.5 : T6 – Y25 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε _{ayd}	boşluk hacim oranı
1	2.6914	2.6547	2.4943	0.0600	-0.0023	-0.0578	0.068	0.547%
2	2.6855	2.6045	2.5305	0.0409	0.0121	-0.0531	0.056	0.767%
3	2.6925	2.6480	2.4852	0.0575	-0.0060	-0.0516	0.063	0.506%
4	2.6901	2.6530	2.5055	0.0594	0.0022	-0.0616	0.070	0.596%
5	2.6932	2.6350	2.5033	0.0526	0.0013	-0.0539	0.062	0.479%
6	2.6845	2.9120	2.3700	0.1525	-0.0534	-0.0991	0.155	0.801%
7	2.6808	2.8875	2.4300	0.1441	-0.0284	-0.1157	0.153	0.939%
8	2.6859	2.6760	2.4892	0.0680	-0.0043	-0.0637	0.076	0.751%
9	2.6896	2.6180	2.4300	0.0461	-0.0284	-0.0177	0.047	0.613%



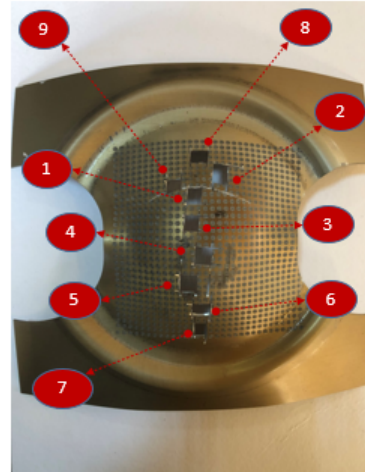
Çizelge 3.6 : T4 – Y200 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε _{ayd}	boşluk hacim oranı
1	2.6784	3.0573	2.5210	0.2012	0.0084	-0.2096	0.237	1.027%
2	2.6803	2.9550	2.5280	0.1672	0.0111	-0.1783	0.200	0.955%
3	2.6891	2.7460	2.5530	0.0939	0.0210	-0.1148	0.122	0.630%
4	2.6799	3.0060	2.5210	0.1843	0.0084	-0.1927	0.218	0.973%
5	2.6912	2.6040	2.5350	0.0408	0.0139	-0.0547	0.057	0.554%
6	2.6863	2.8860	2.5500	0.1436	0.0198	-0.1634	0.178	0.737%
7	2.6892	2.6550	2.4820	0.0602	-0.0072	-0.0529	0.066	0.629%
8	2.6891	2.7610	2.5530	0.0993	0.0210	-0.1203	0.129	0.630%
9	2.6860	2.8910	2.5500	0.1453	0.0198	-0.1651	0.180	0.748%
10								
11								



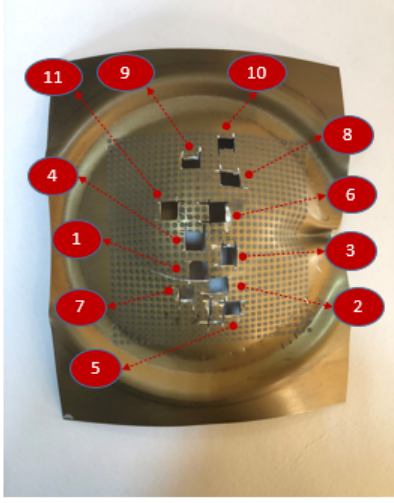
Çizelge 3.7 : T4 – Y100 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε _{ayd}	boşluk hacim oranı
1	2.6809	3.0090	2.4470	0.1853	-0.0214	-0.1639	0.203	0.936%
2	2.6803	2.9130	2.4320	0.1529	-0.0276	-0.1253	0.163	0.957%
3	2.6992	2.6750	2.4470	0.0677	-0.0214	-0.0462	0.069	0.259%
4	2.6992	2.6327	2.4803	0.0517	-0.0079	-0.0438	0.056	0.259%
5	2.6867	2.8835	2.4585	0.1427	-0.0167	-0.1260	0.156	0.719%
6	2.6866	2.6340	2.4175	0.0522	-0.0336	-0.0187	0.053	0.725%
7	2.7051	2.5480	2.4070	0.0190	-0.0379	0.0189	0.038	0.040%
8	2.6851	2.5850	2.4035	0.0334	-0.0394	0.0059	0.042	0.781%
9	2.6865	3.0090	2.4470	0.1853	-0.0214	-0.1639	0.203	0.728%
10								
11								



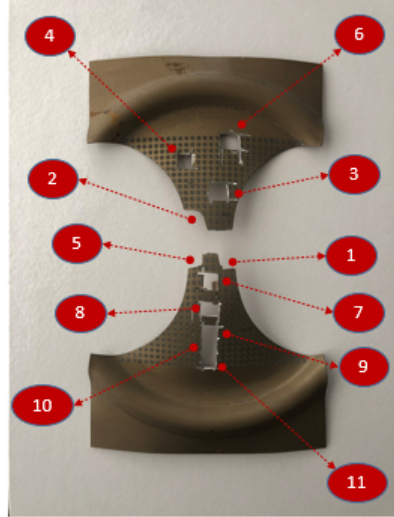
Çizelge 3.8 : T4 – Y75 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{ayd}	boşluk hacim oranı
1	2.6605	3.1570	2.4010	0.2333	-0.0404	-0.1929	0.249	1.687%
2	2.6474	3.2340	2.4000	0.2574	-0.0408	-0.2166	0.277	2.173%
3	2.6772	2.6660	2.4580	0.0643	-0.0169	-0.0473	0.067	1.070%
4	2.6733	2.6020	2.4945	0.0400	-0.0022	-0.0378	0.045	1.217%
5	2.6809	2.6140	2.3930	0.0446	-0.0437	-0.0008	0.051	0.934%
6	2.6733	2.5965	2.4730	0.0379	-0.0109	-0.0270	0.039	1.217%
7	2.6809	2.7360	2.4300	0.0902	-0.0284	-0.0618	0.092	0.934%
8	2.6605	2.8890	2.4570	0.1446	-0.0173	-0.1273	0.158	1.687%
9	2.6631	2.6920	2.4250	0.0740	-0.0305	-0.0435	0.074	1.594%
10	2.6809	2.5680	2.4110	0.0268	-0.0362	0.0094	0.038	0.934%
11	2.6772	2.6400	2.5350	0.0545	0.0139	-0.0684	0.072	1.070%



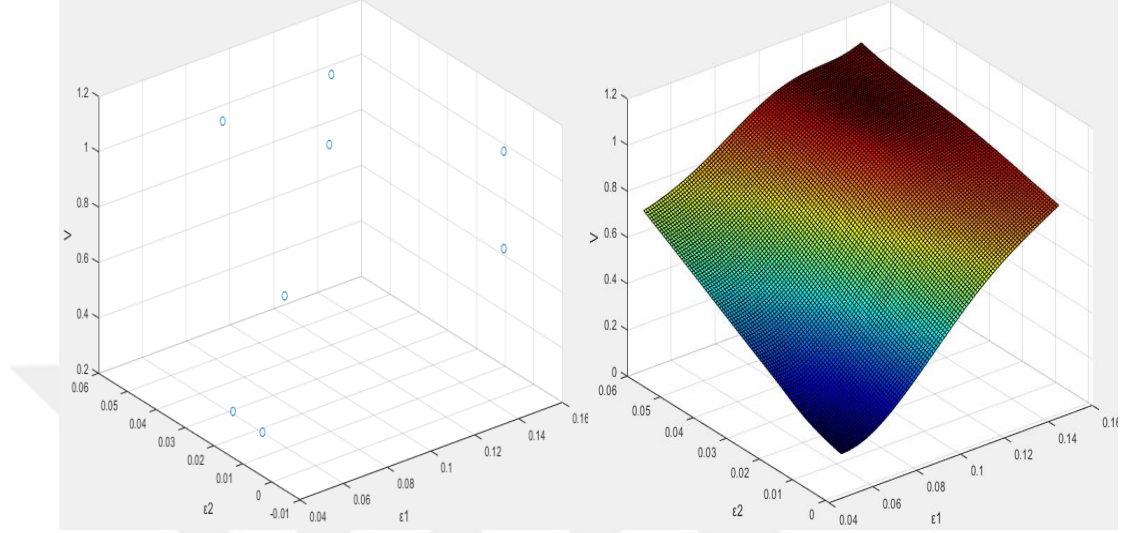
Çizelge 3.9 : T4 – Y25 numunesinden kesilen parçaların ölçüm değerleri.

parça no	d _{ort}	a _{ort}	b _{ort}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{ayd}	boşluk hacim oranı
1	2.6425	3.0845	2.3360	0.2101	-0.0679	-0.1422	0.214	2.353%
2	2.6400	3.1380	2.3670	0.2273	-0.0547	-0.1726	0.237	2.448%
3	2.6598	2.8185	2.3430	0.1199	-0.0649	-0.0551	0.120	1.713%
4	2.6616	2.5470	2.4820	0.0186	-0.0072	-0.0114	0.019	1.649%
5	2.6056	3.7220	2.0030	0.3980	-0.2216	-0.1763	0.399	3.718%
6	2.6702	2.5005	2.4280	0.0002	-0.0292	0.0290	0.034	1.329%
7	2.6492	2.8685	2.3930	0.1375	-0.0437	-0.0938	0.140	2.105%
8	2.6628	2.8620	2.3930	0.1352	-0.0437	-0.0915	0.138	1.603%
9	2.6596	2.6100	2.4800	0.0431	-0.0080	-0.0350	0.046	1.722%
10	2.6806	2.5010	2.4280	0.0004	-0.0292	0.0288	0.034	0.946%
11	2.6824	2.4950	2.4450	-0.0020	-0.0222	0.0242	0.027	0.881%

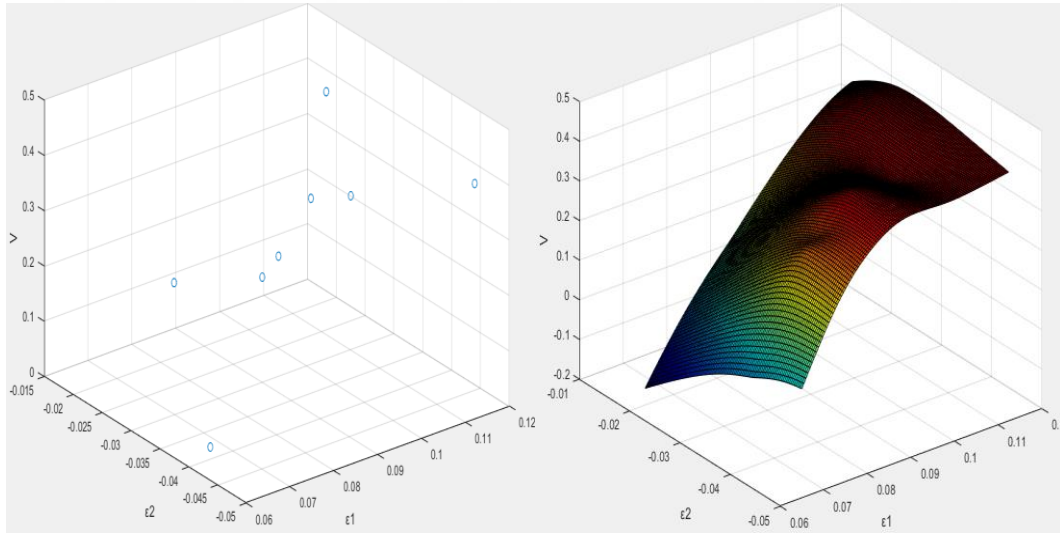


3.6 Ölçülen değerlerin grafik üzerinde gösterilmesi

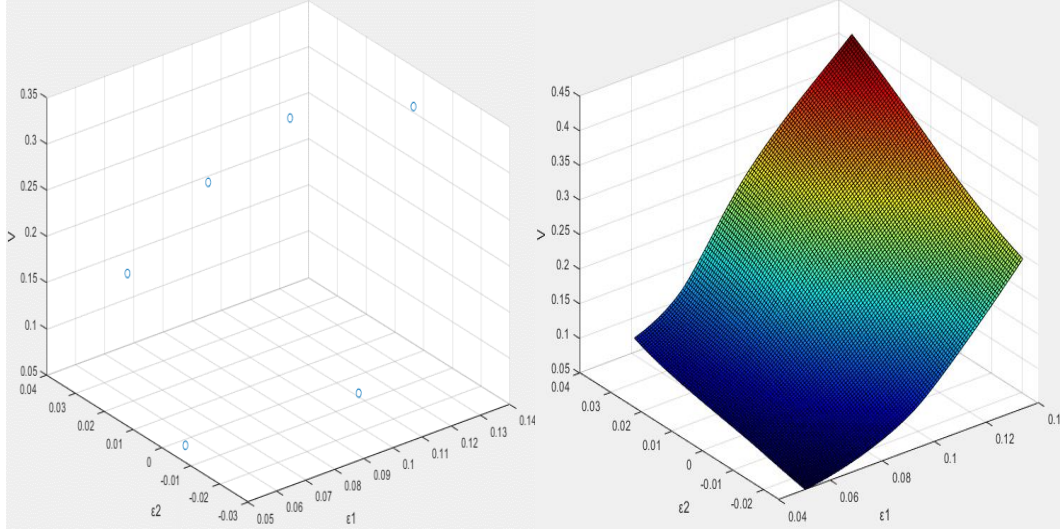
Grafikler Matlab yazılımında biharmonic interpolasyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.



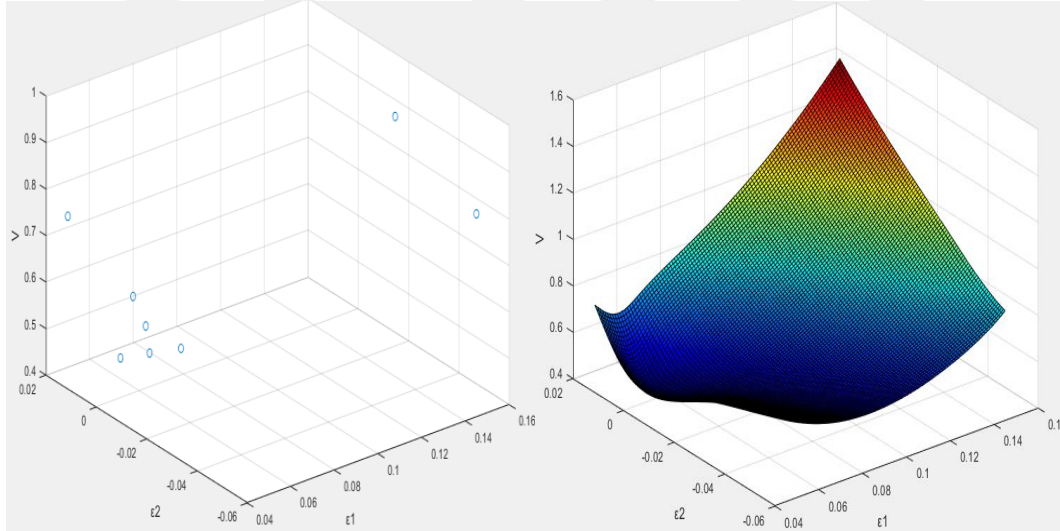
Şekil 3.3 : T6 – Y200 numunesinin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



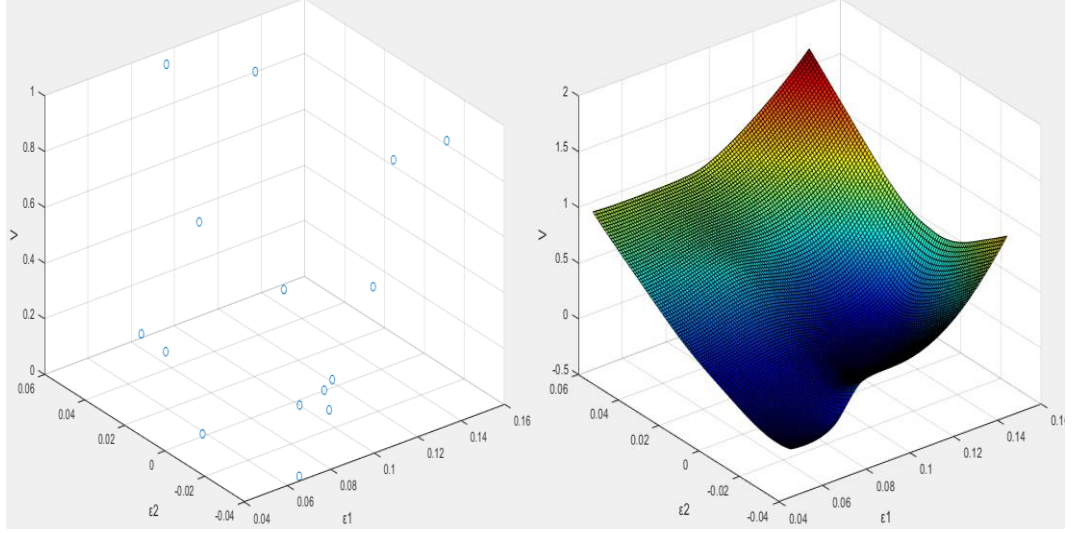
Şekil 3.4 : T6 – Y100 numunesinin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



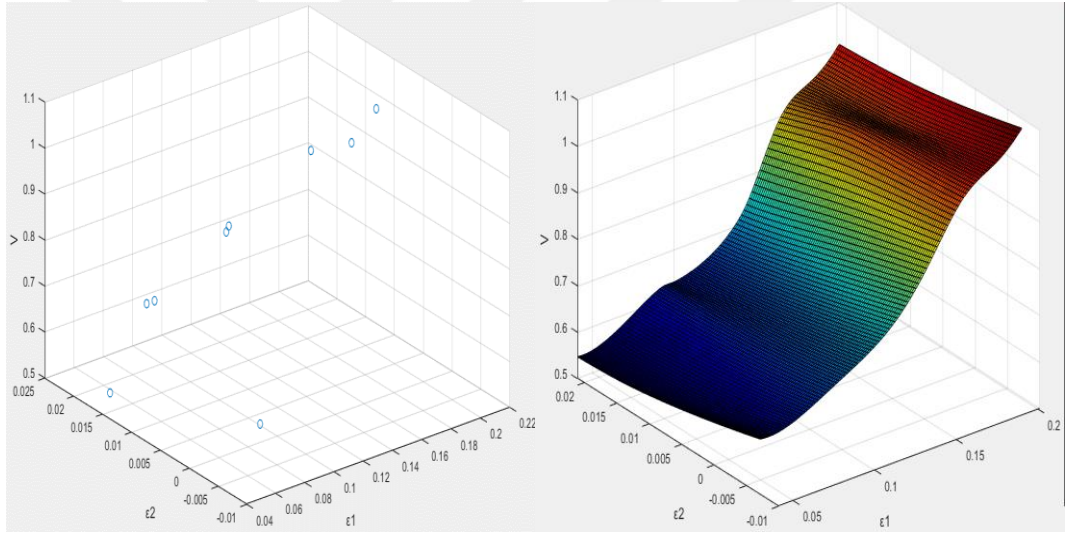
Şekil 3.5 : T6 – Y75 numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



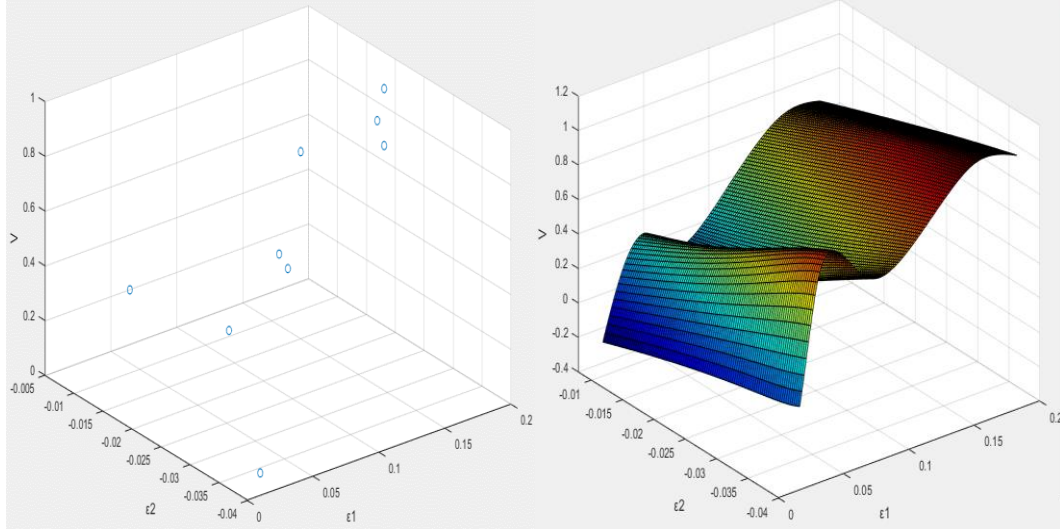
Şekil 3.6 : T6 – Y25 numunesinin ε_1 , ε_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



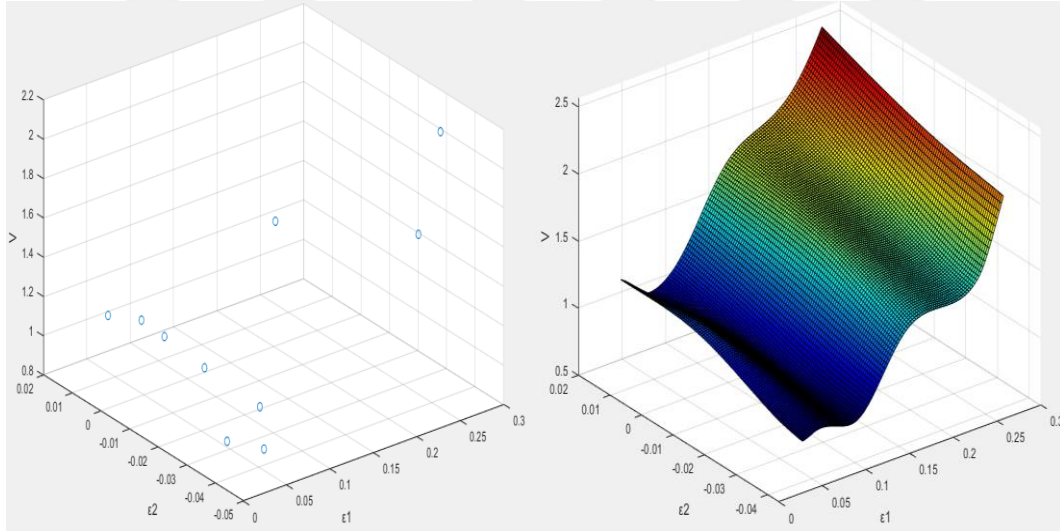
Şekil 3.7 : T6 ısıt işlemleri görmüş bütün numunelerin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



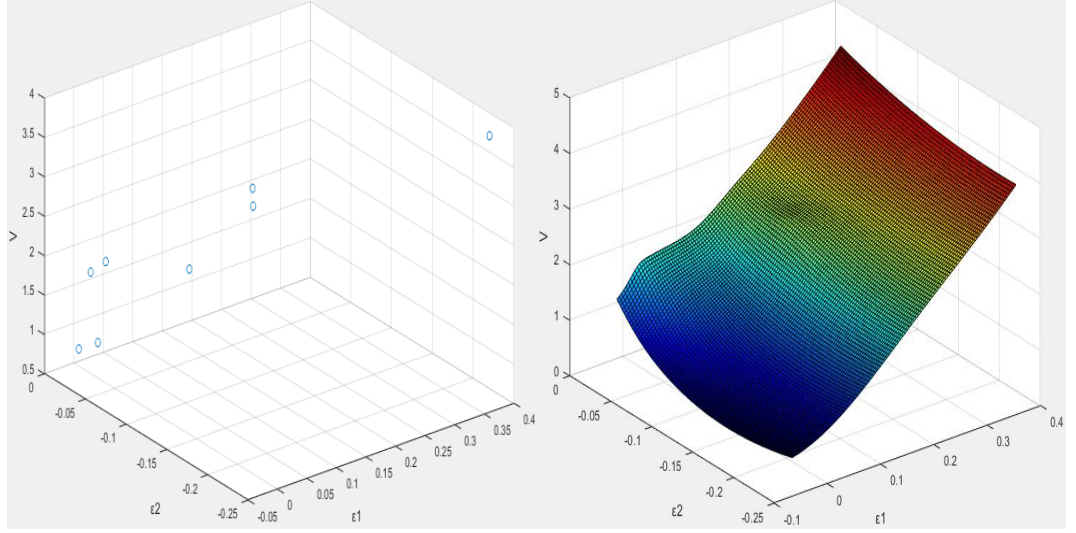
Şekil 3.8 : T4 – Y200 numunesinin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



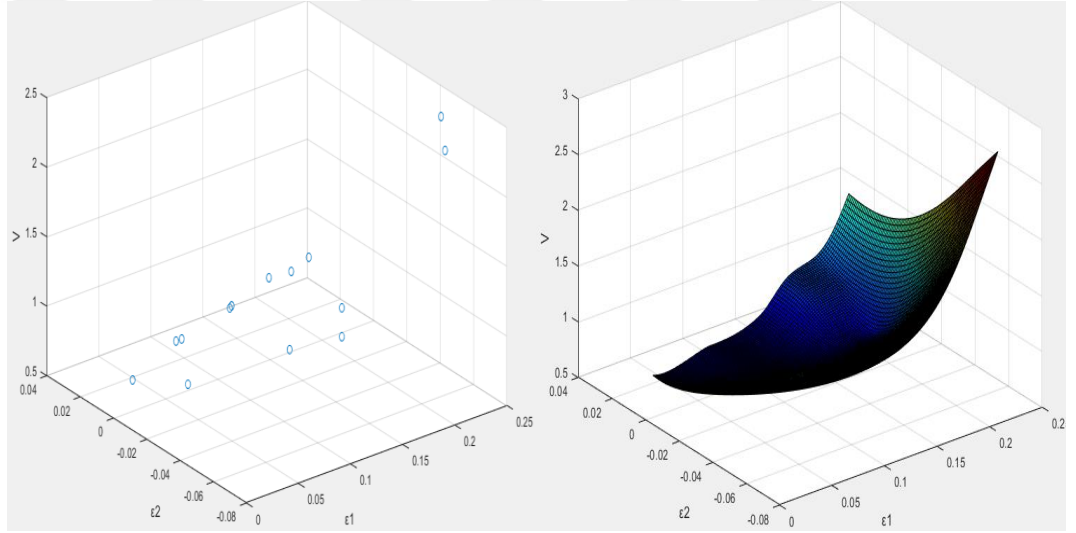
Şekil 3.9 : T4 – Y100 numunesinin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



Şekil 3.10 : T4 – Y75 numunesinin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



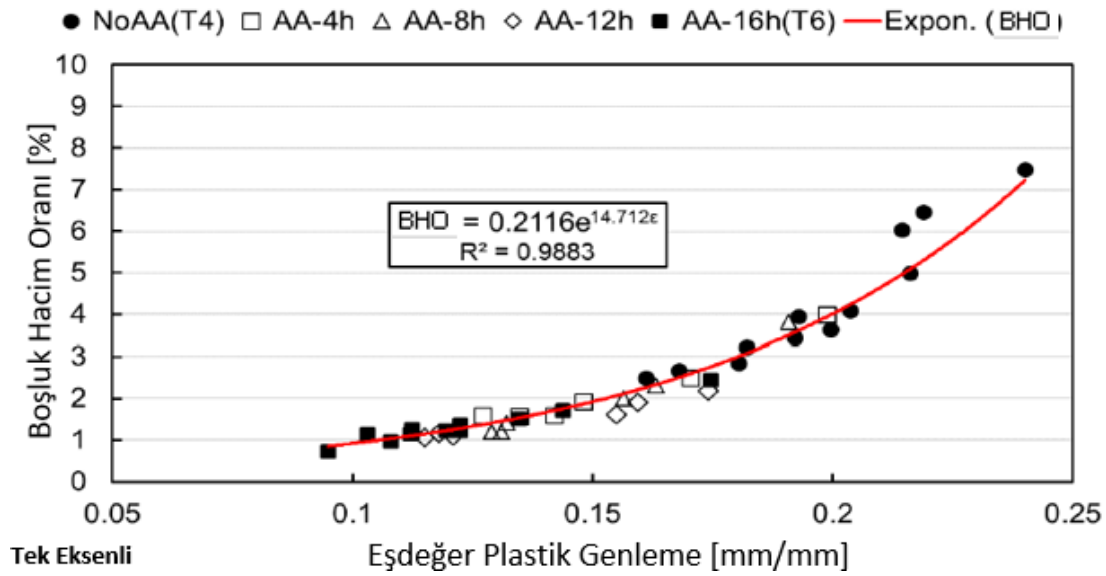
Şekil 3.11 : T4 – Y25 numunesinin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi



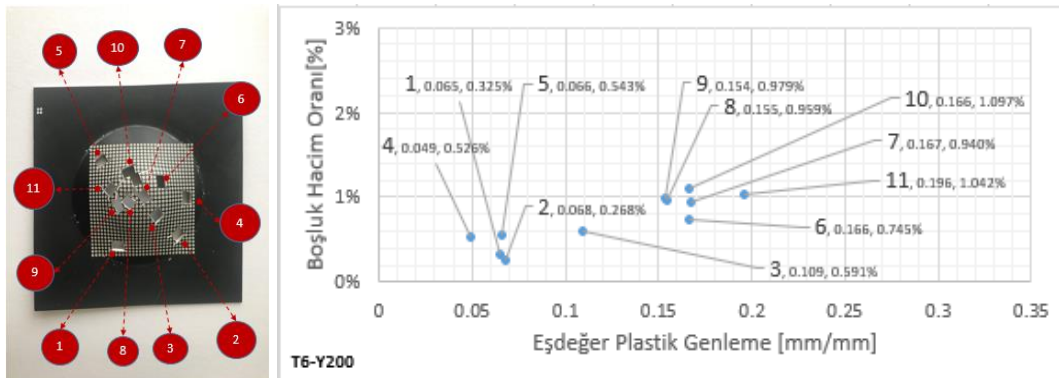
Şekil 3.12 : T4 ısııl işlemi görmüş bütün numunelerin ϵ_1 , ϵ_2 ve v (boşluk hacim oranı) değerlerinin üç boyutlu grafik üzerinde gösterilmesi

3.7 Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

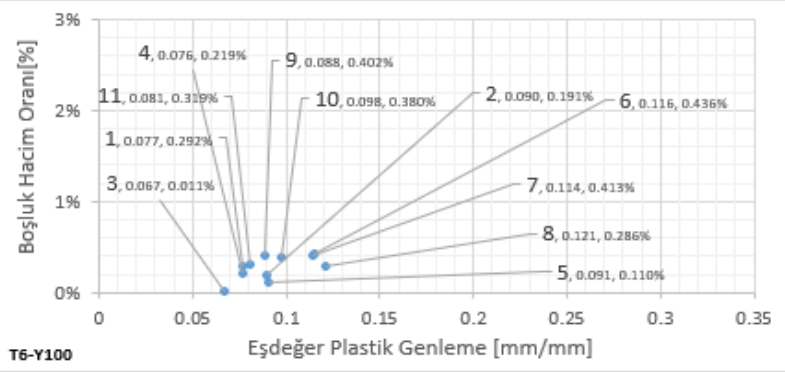
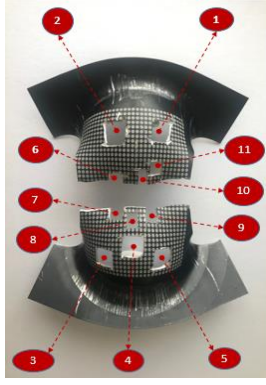
Tek eksenli ve iki eksenli çekme verilerini gösteren sonuçlar sırasıyla verilmiştir (Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Çizelge 3.20). Genlemenin değerlerinin benzerlik gösterdiği bölgelerde; T6 ısıtıl işlemi görmüş ve tek eksenli çekilmiş numunelerin boşluk hacim oranları %1 - %1,5 arasında değişirken iki eksenli çekilmiş numunelerde aynı oran %1'in altında; T4 ısıtıl işlemi görmüş ve tek eksenli çekilmiş numunelerin boşluk hacim oranları %2.5 - %4 arasında değişirken iki eksenli numunelerde aynı oran %1 - %2.5 arasında değişmektedir (Çizelge 3.10).



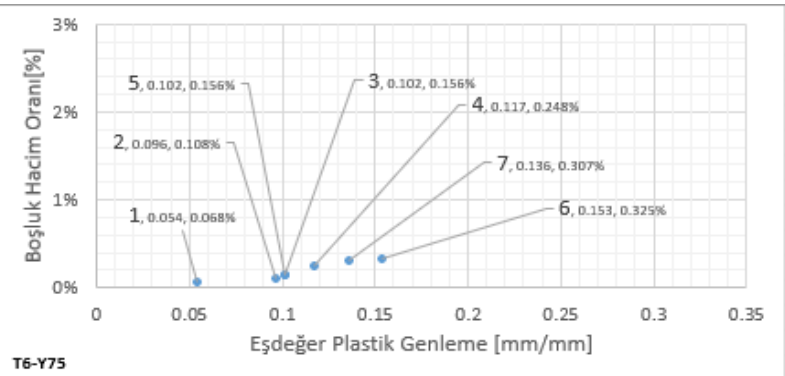
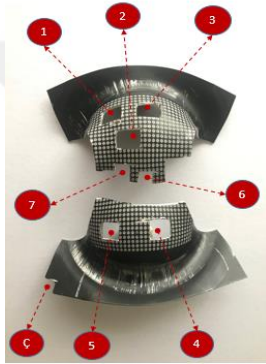
Şekil 3.13 : Tek eksenli çekilmiş T6 ve T4 numunelerinden alınan parçaların boşluk hacim oranı ve eşdeğer plastik genleme grafiği [21].



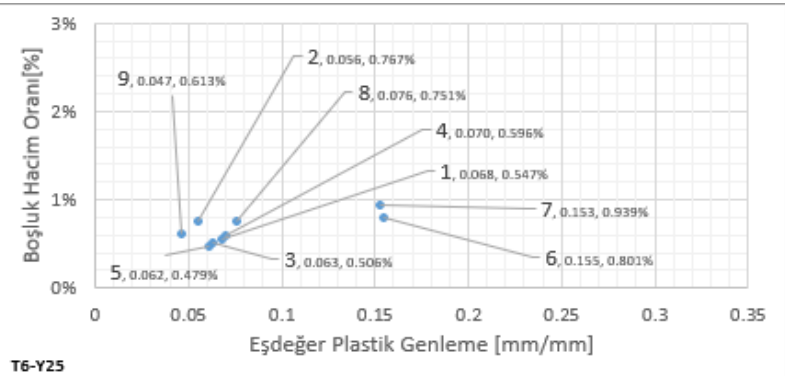
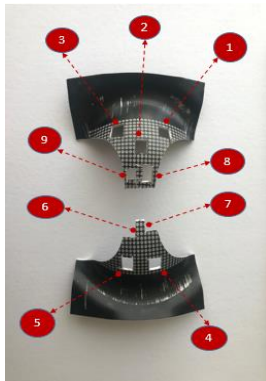
Şekil 3.14 : T6-Y200 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.



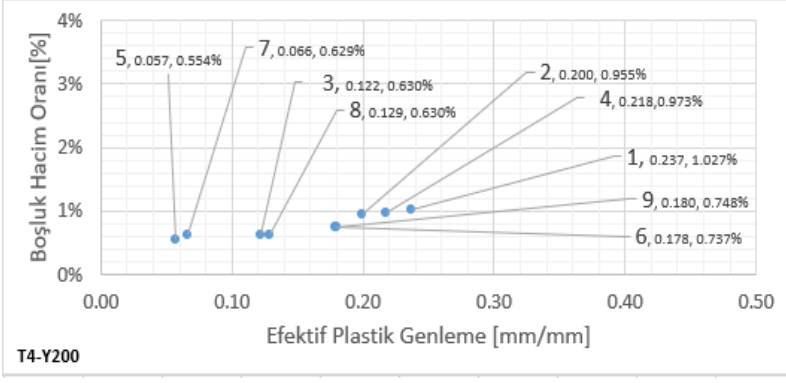
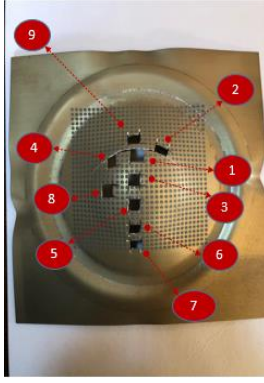
Şekil 3.15 : T6-Y100 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.



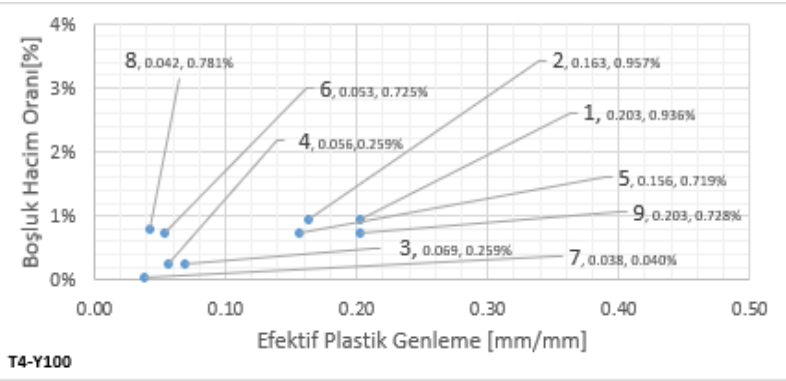
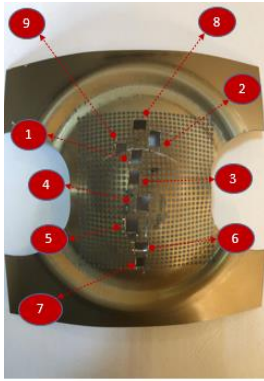
Şekil 3.16 : T6-Y75 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.



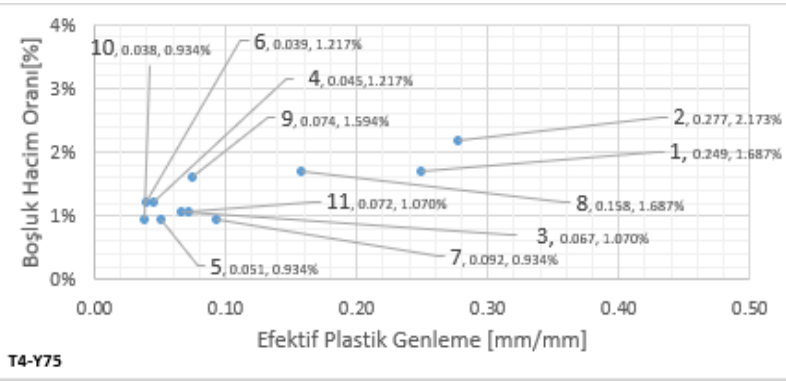
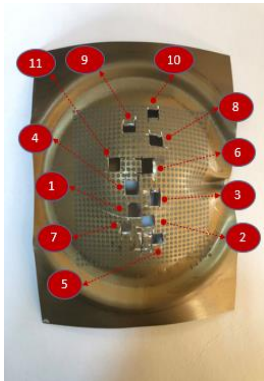
Şekil 3.17 : T6-Y25 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.



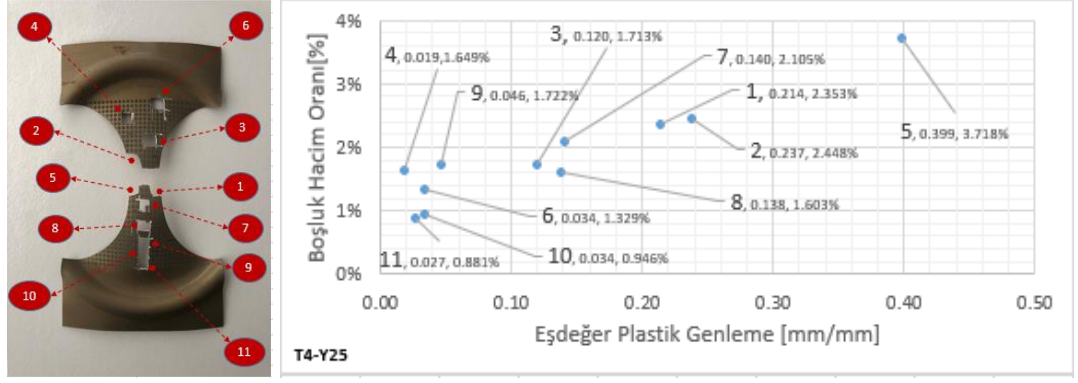
Şekil 3.18 : T4-Y200 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.



Şekil 3.19 : T4-Y100 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.

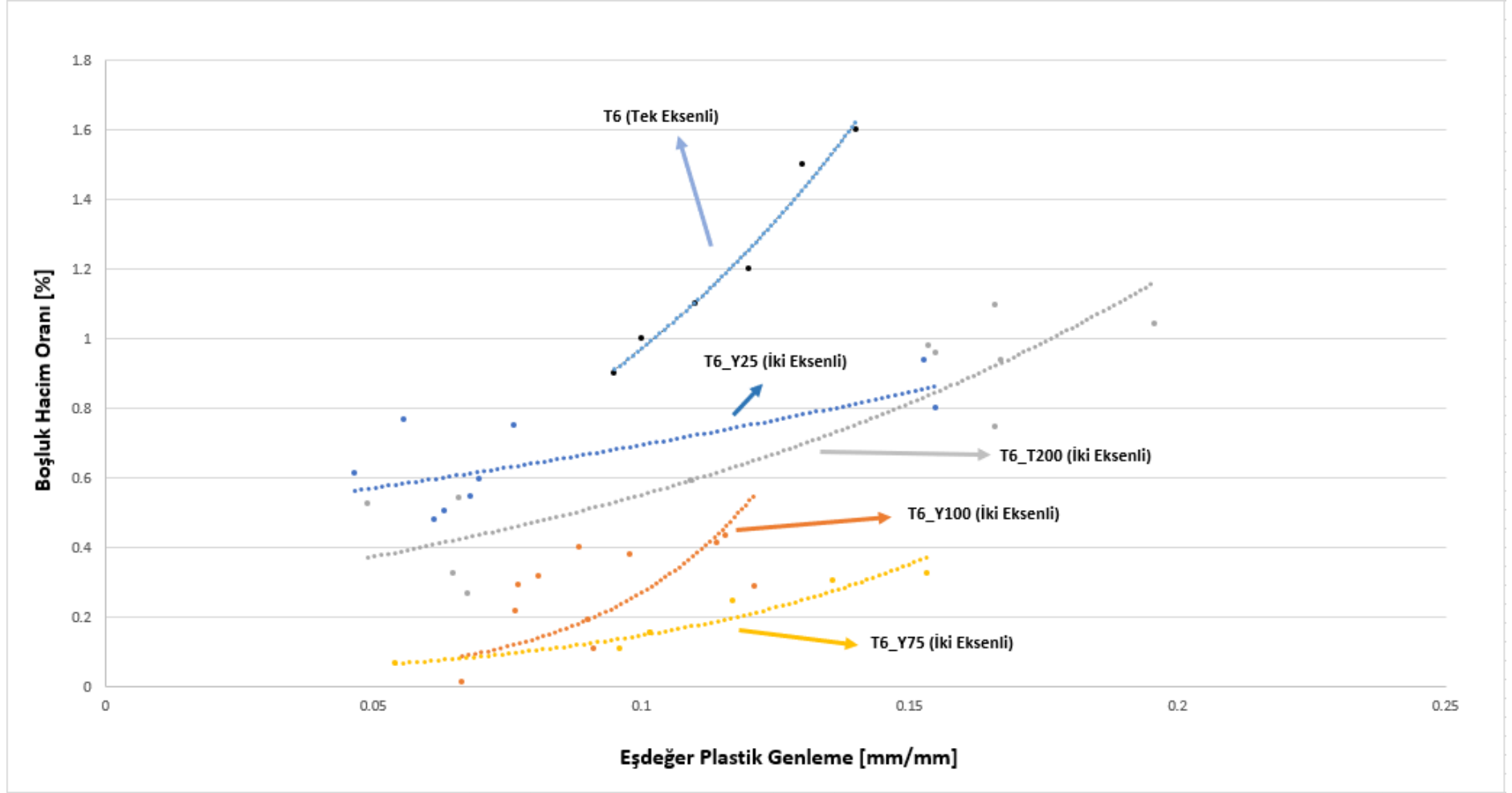


Şekil 3.20 : T4-Y75 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.

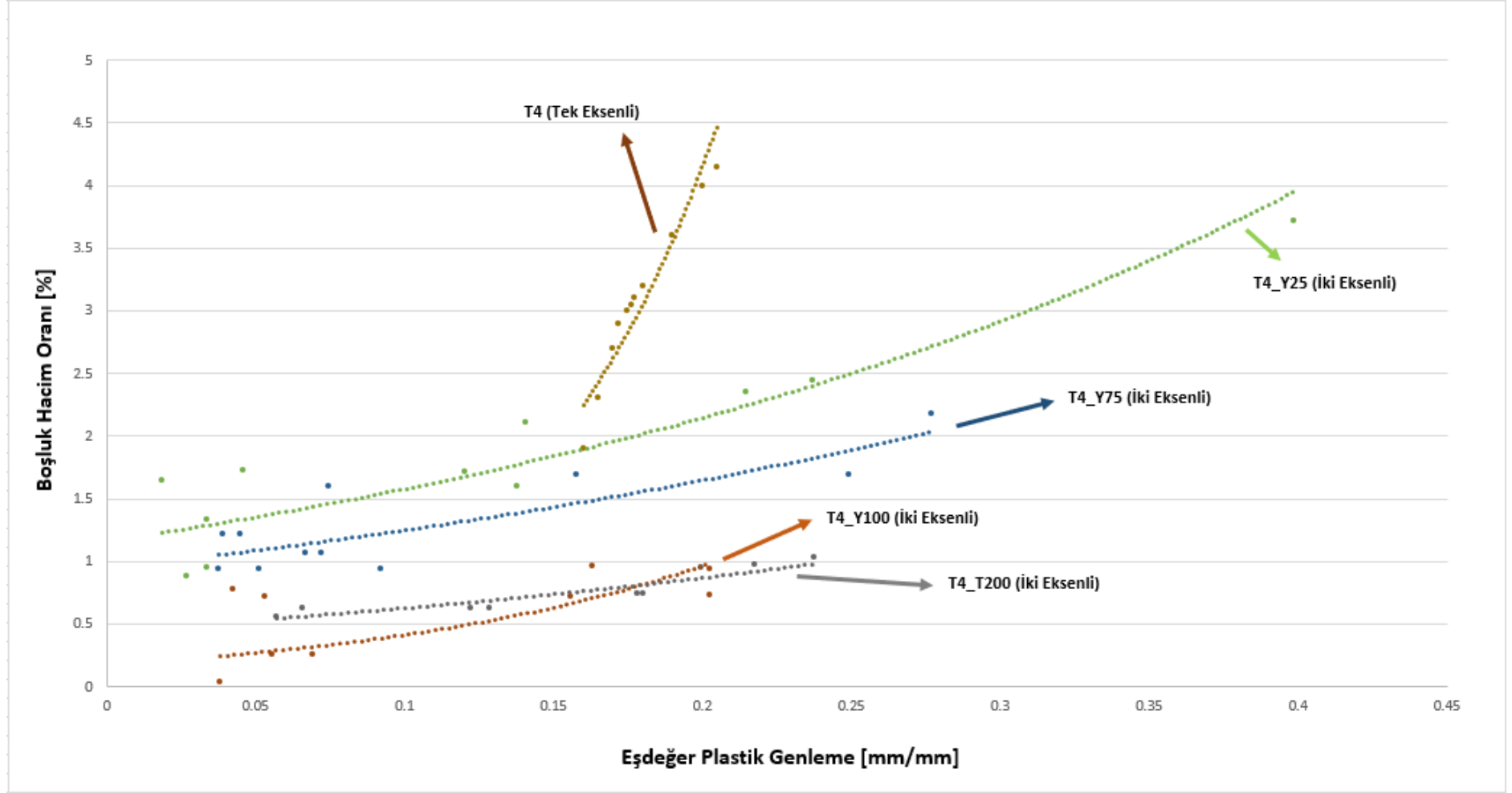


Şekil 3.21 : T4-Y25 için iki eksenli germe halinde, boşluklu numunelerin matrisinin eşdeğer plastik genlemesine bağlı olarak boşluk hacim oranının değişimi.

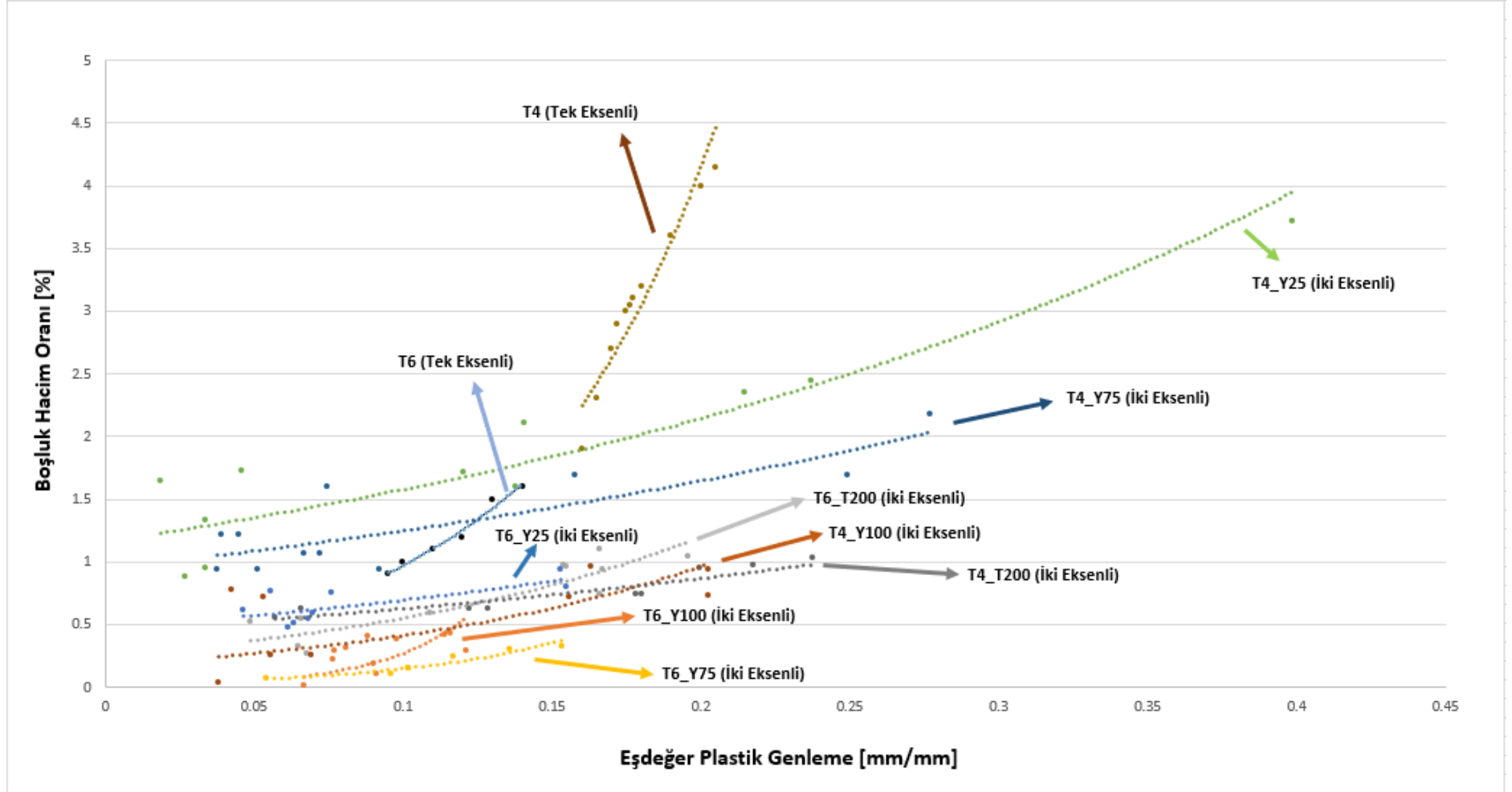
Şekil 3.22: T6 ısıtılmış çekilmiş levhaların boşluk hacim oranı ve genleme değerleri.



Şekil 3.23: T4 ısıtılmış çekilmiş levhaların boşluk hacim oranı ve genleme değerleri.



Şekil 3.24: T6 ve T4 ısıtılmış çekilmiş levhaların boşluk hacim oranı ve genleme değerleri.



4. DENEY SONUÇLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRULANMASI

4.1 GTN Hasar Modeli

Gurson, gözenekli malzemeler için küresel boşlukları dikkate alarak boşlukla ilgili hasar için bir mikromekanik model önerdi [24]. Tvergaard daha sonra modelde bazı değişiklikler önerdi [25]. Plastik deformasyondan önce malzemenin boşluk hacim oranı f_0 'a eşit olarak kabul edildi. Tvergaard ve Needleman boşluk hacim oranlarının birleşmesinin dikkate alınması gerektiğini ileri sürdü. Eşdeğer boşluk hacmi için f yerine f^* kullanılır ve $f^* = 0$ malzemenin sıfır gözenekliliğe sahip olduğunu yani tamamen yoğun olduğunu gösterir. Buna karşılık $f^* = 1$ ise malzemenin yük taşıma kapasitesinin olmadığını yani tamamen boş olduğunu ifade eder [48]. Değişim fonksiyonu denklem 4.1'de gösterilmiştir [49].

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{1/q_1 - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (4.1)$$

Burada f_c ve f_f sırasıyla kritik boşluk hacim oranını ve hasar durumundaki boşluk hacim oranını temsil eder. Yerel deformasyondan sonra $f \geq f_c$ olduğunda boşluklar birleşme gösterir. Böylece boşluklu malzemenin süreklilik modeli aşağıdaki gibi ortaya çıkar [49].

$$\Phi(f^*, \sigma_m) = (\sigma_e / \sigma_Y)^2 + 2q_1 f^* \cosh(3q_2 \sigma_m / 2\sigma_Y) - 1 - q_3 f^{*2} \quad (4.2)$$

Burada σ_e Mises eşdeğer gerilmesi ve σ_Y matris malzemesindeki gerçek mikroskobik gerilme durumunu temsil eden akma gerilmesidir. σ_m hidrostatik ortalama gerilmeyi ifade eder. GTN modeli gözenekliliği dikkate alarak sünek malzemelerdeki kırılmayı tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

GTN denklemini kurmak için q_1 , q_2 , q_3 , f_N , S_N , ε_N , f_0 , f_c , f_f olmak üzere toplam dokuz farklı parametre belirlenmelidir. Çoğu çalışmada denklem katsayıları Tvergaard'ın önerisine göre $q_1=1,5$, $q_2=1$ ve $q_3=q_1^2=2.25$ olarak sabitlemiştir [25].

4.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Modellenmesi

Deformasyon simülasyonları için iki tür sonlu eleman çözücü algoritması vardır; açık (explicit) ve kapalı (implicit) yöntemler. Doğrusal olmayan problemlerin adımlara bölünerek çözülmesinde kapalı (implicit) yöntem kullanıldığından, düğüm noktalarındaki gerilme ve genleme değerlerine, her bir çözüm adımında bir dizi doğrusal olmayan denklemlerin yinelemeli olarak çözülmesiyle yakınsanır. Bu sayede daha büyük çözüm adımlarıyla hesap yapılabilir. Bunun aksine açık (explicit) yöntemde düğüm noktalarındaki gerilme ve genleme değerlerine, baştan bilinen durumlar kullanılarak ulaşılır ve bu sebeple daha küçük adımlarla çözüm yapılırsa da her bir adımda çözümü yinelemek gerekmez veya sayısı çok azalır [21].

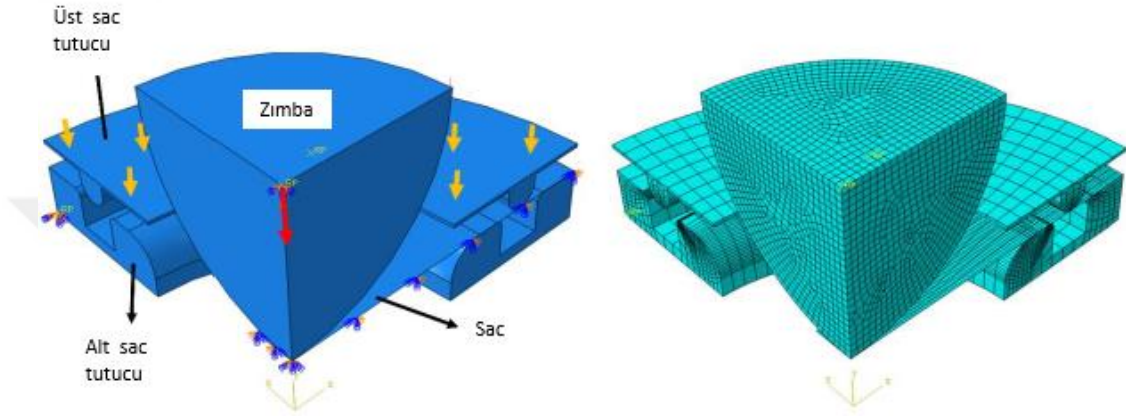
Testlerin simülasyonları için Abaqus sonlu eleman çözücüsü ve deneylerde kullanılan test numunelerinin boyutlarıyla bir sonlu elemanlar modeli (FEM) kullanılmıştır. Modelde girdi olarak 2.69×10^{-9} ton/mm³ alüminyum yoğunluğu, 68900 N/mm² Young modülü, 0.33'lük Poisson oranı parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca eleman örüsü duyarlılığına dikkat edilerek uygun bir sonlu eleman boyutu seçilmiştir. Hesaplama süresini azaltmak için S4R indirgenmiş entegrasyon kabuk elemanı seçilmiştir. Bu çalışmada incelenen 6061 Al alaşımı önemli anizotropik davranış sergilemediği için sac metal izotropik olarak modellenmiştir.

4.3 Derin Çekmenin Simülasyonu

Derin çekmeyi simüle etmek için sac tutucu, zımba ve deforme olabilen sac metal, takım boyutları dahil olmak üzere gerçek test koşullarına göre modellenmiştir. Deformasyon süreci takım ve numune geometrisinin doğası gereği simetrik olduğundan hesaplama süresini azaltmak için düzeneğin sadece dörtte biri simüle edilerek sonuçlar elde edilmiştir.

Üst sac tutucu, alt sac tutucu ve zımba gibi alt rijit gövdeler bir referans noktasına bağlanarak “ayrık rijit” olarak modellenmiştir (Şekil 4.3). Alt sac tutucuysa herhangi bir yönde hareketine veya dönüşüne izin verilmeyecek şekilde sabit olarak

modellenmiştir. Bununla birlikte üst sac tutucu ve zımba yalnızca “Y” yönünde hareket edebilecek şekilde ayarlanmıştır. Üst sac tutucuya takılan yayların yük-deplasman eğrisi, zımba hareketiyle birlikte üst sac tutucunun da hareket etmesine yol açan “basınçlı yük” olarak tanımlanmıştır. Zımbanın referans noktası kırılmaya kadar 90 mm/dak sabit hızla eksen boyunca hareket ettirilmiştir. Eleman sayısına duyarlılık analizlerinden sonra aşağıda görüldüğü gibi kritik bölgelerde eleman örgüsü yoğunluğu artırılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Modelin sınır koşulları.

Simülasyonlarda literatürde verilen $q_1=1.5$, $q_2=1$, $q_3=q_1^2=2.25$ değerler kullanılırken [25] f_c ve f_f değerleri deneysel ölçümlerden, S_N , f_N , ϵ_N değerleriyse ısıtıl işlem yöntemine göre aşağıdaki çizelgeden alınmıştır [21] (Çizelge 4.1).

q_1, q_2, q_3 : GTN model parametreleri

f_0, f_c, f_f : Başlangıçtaki, boşlukların birleşmesi anındaki ve kırılma anındaki boşluk hacim oranları

S_N : Boşluk çekirdeklenme dağılımının standart sapması

ϵ_N : Çekirdeklenme genleşmesi

f_N : Çekirdeklenmiş boşluk hacim oranı

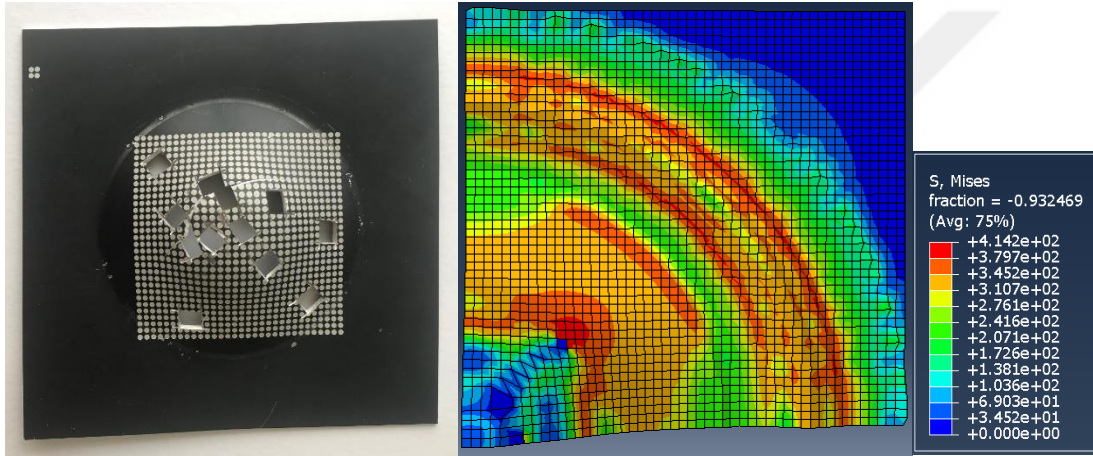
Çizelge 4.1 : 6061 Al alaşımlarının GTN model parametreleri.

	NoAA (T4)	AA-4h	AA-8h	AA-12h	AA-16h (T6)
f_N	$0.01285^{+0.0013}_{-0.0021}$	$0.01285^{+0.0013}_{-0.0021}$	$0.01285^{+0.0013}_{-0.0021}$	$0.01285^{+0.0013}_{-0.0021}$	$0.01285^{+0.0013}_{-0.0021}$
S_N	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
ϵ_N	$0.224^{+0.016}_{-0.010}$	$0.168^{+0.031}_{-0.033}$	$0.167^{+0.014}_{-0.011}$	$0.163^{+0.011}_{-0.008}$	$0.151^{+0.024}_{-0.016}$
f_0	$0.00025^{+0.0001}_{-0.0002}$	$0.00025^{+0.0001}_{-0.0002}$	$0.00025^{+0.0001}_{-0.0002}$	$0.00025^{+0.0001}_{-0.0002}$	$0.00025^{+0.0001}_{-0.0002}$
f_c	$0.03493^{+0.00421}_{-0.00292}$	$0.01755^{+0.00218}_{-0.00116}$	$0.01703^{+0.00148}_{-0.00078}$	$0.01629^{+0.00047}_{-0.00039}$	$0.01394^{+0.00199}_{-0.00209}$
f_f	$0.06294^{+0.01201}_{-0.00627}$	$0.02887^{+0.00292}_{-0.00386}$	$0.02714^{+0.00296}_{-0.00392}$	$0.02358^{+0.00255}_{-0.00383}$	$0.01886^{+0.00559}_{-0.00374}$

4.4 Simülasyon Sonuçları

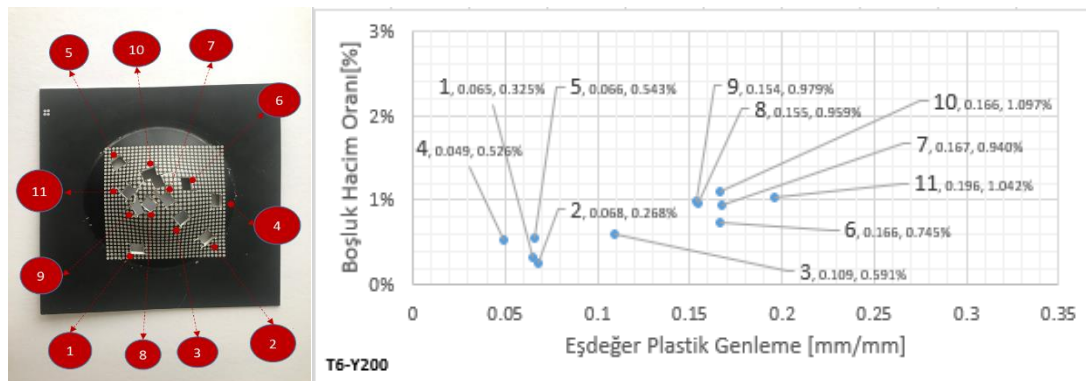
4.4.1 T6 – Y200 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.2).

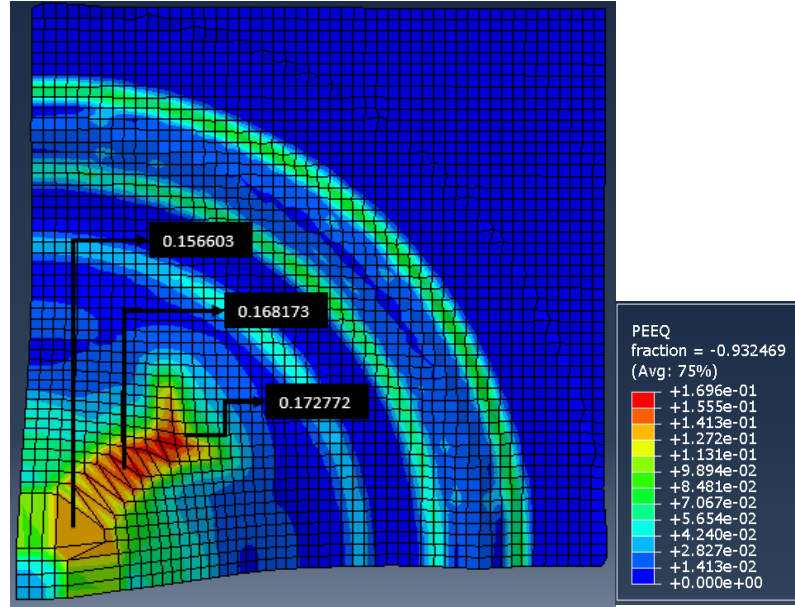


Şekil 4.2 : T6-Y200 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

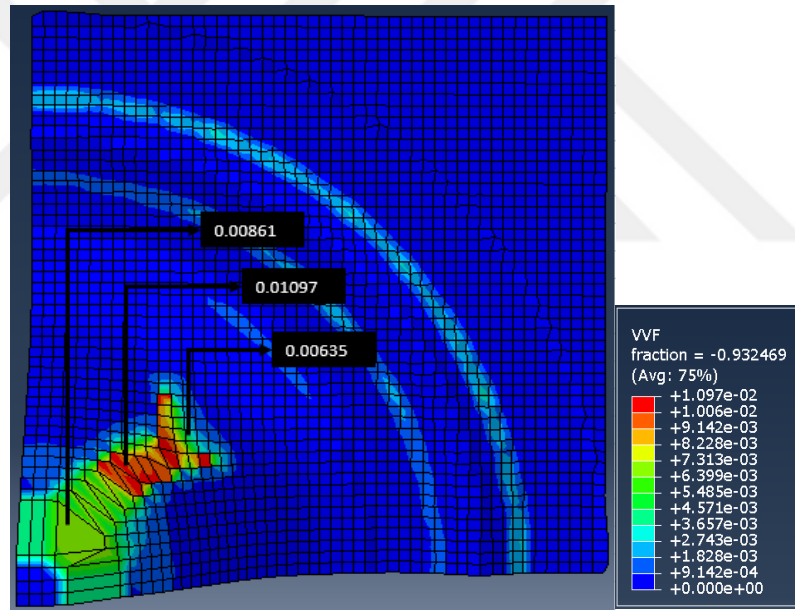
T6-Y200 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.3), (Şekil 4.4), (Şekil 4.5).



Şekil 4.3 : T6-Y200 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



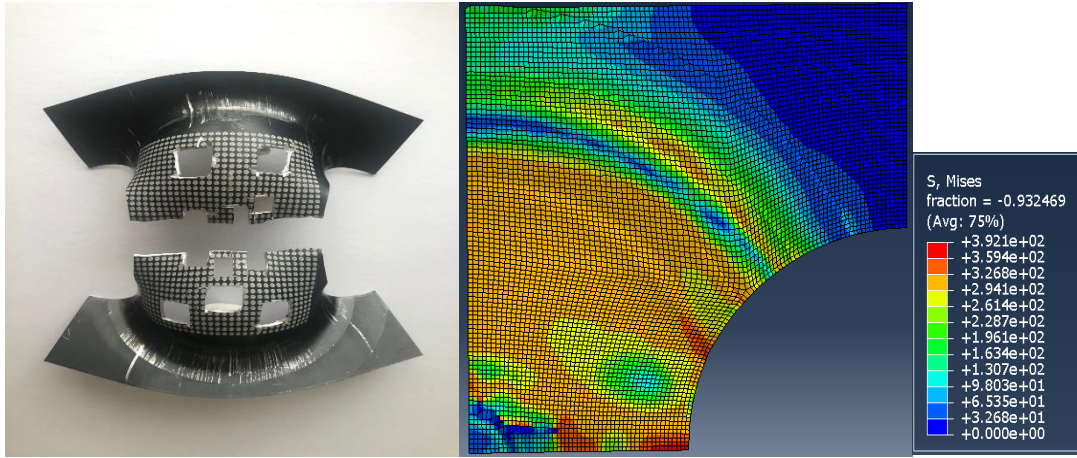
Şekil 4.4 : T6-Y200 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.5 : T6- Y200 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

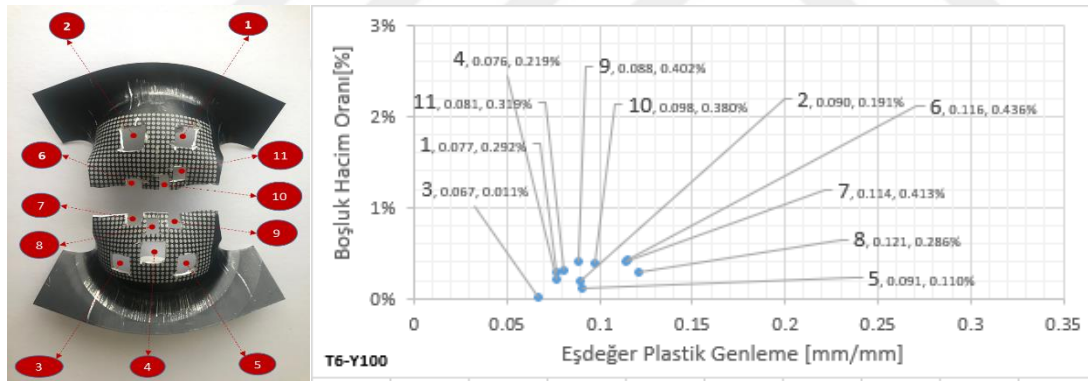
4.4.2 T6 – Y100 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.6).

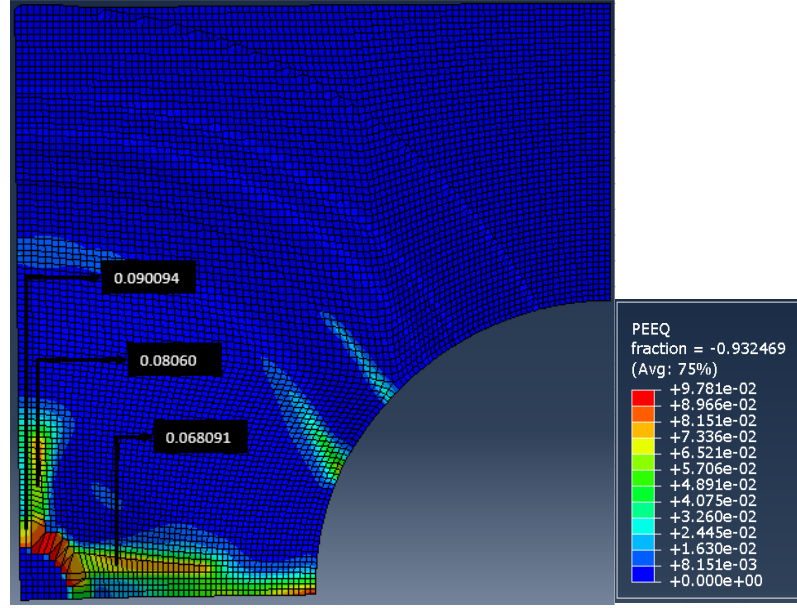


Şekil 4.6 : T6-Y100 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

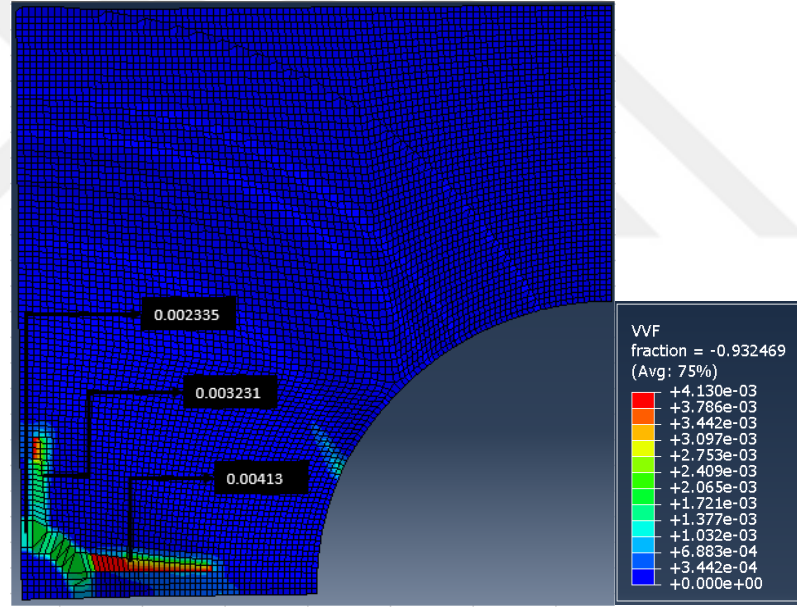
T6-Y100 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.7), (Şekil 4.8), (Şekil 4.9).



Şekil 4.7 : T6-Y100 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



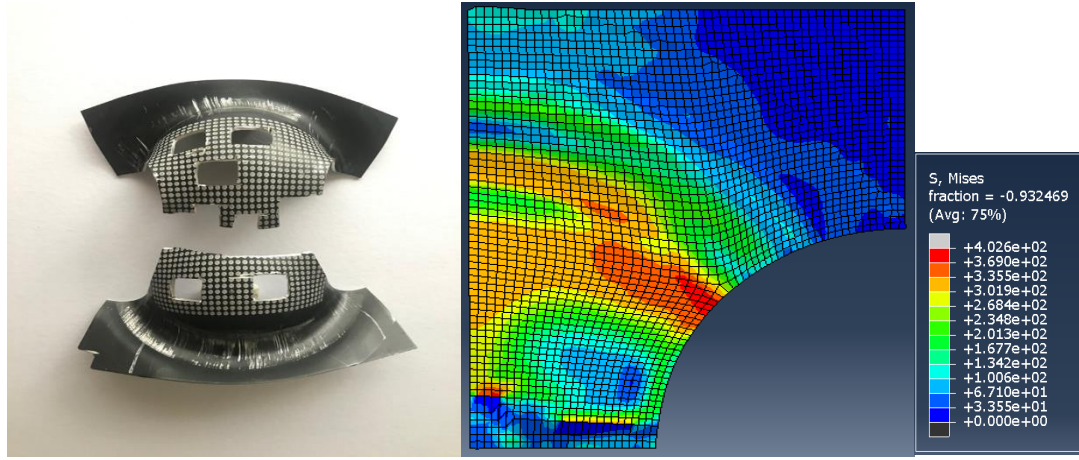
Şekil 4.8 : T6-Y100 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.9 : T6- Y100 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

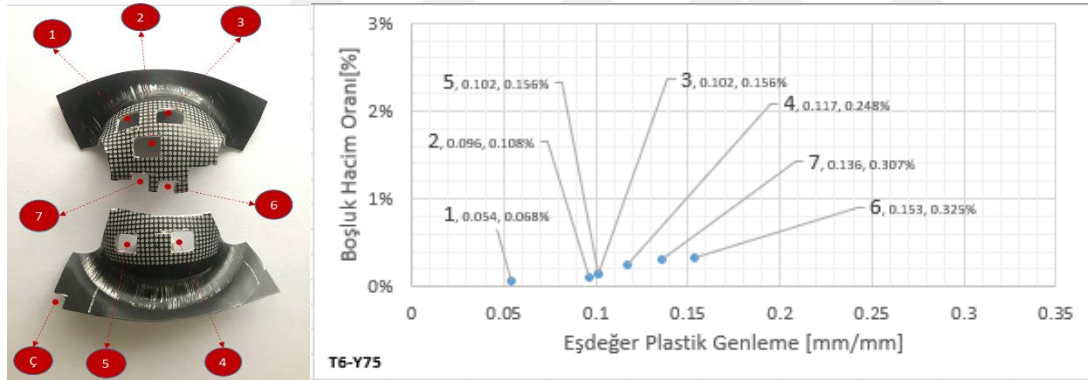
4.4.3 T6 – Y75 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.10).

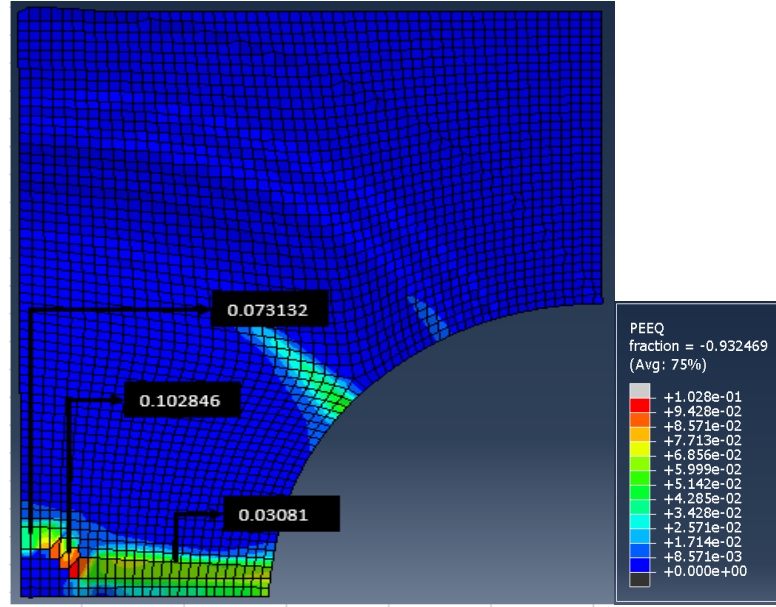


Şekil 4.10 : T6-Y75 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

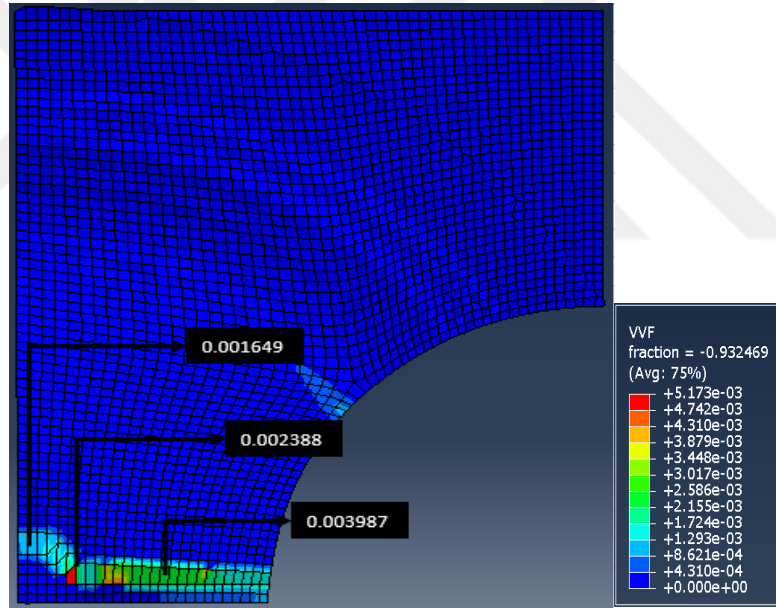
T6-Y75 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.11), (Şekil 4.12), (Şekil 4.13).



Şekil 4.11 : T6-Y75 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



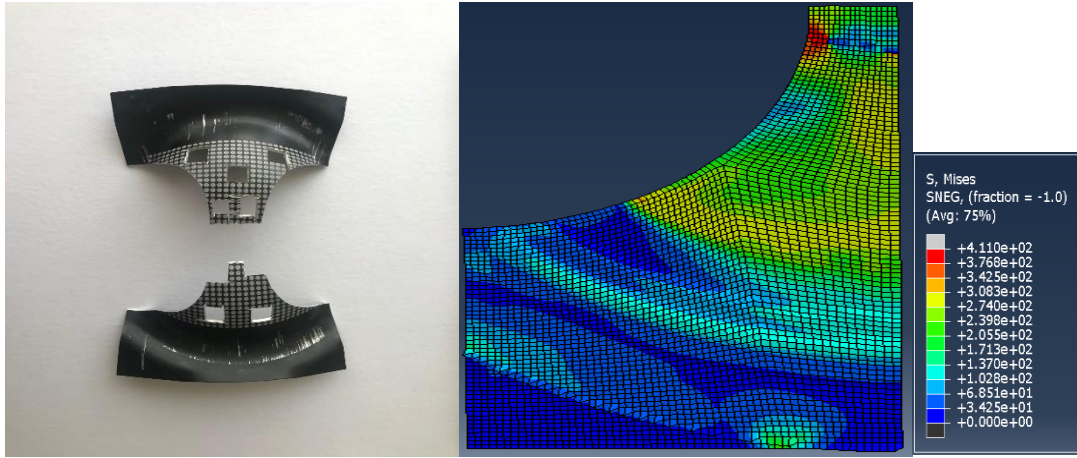
Şekil 4.12 : T6-Y75 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.13 : T6- Y75 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

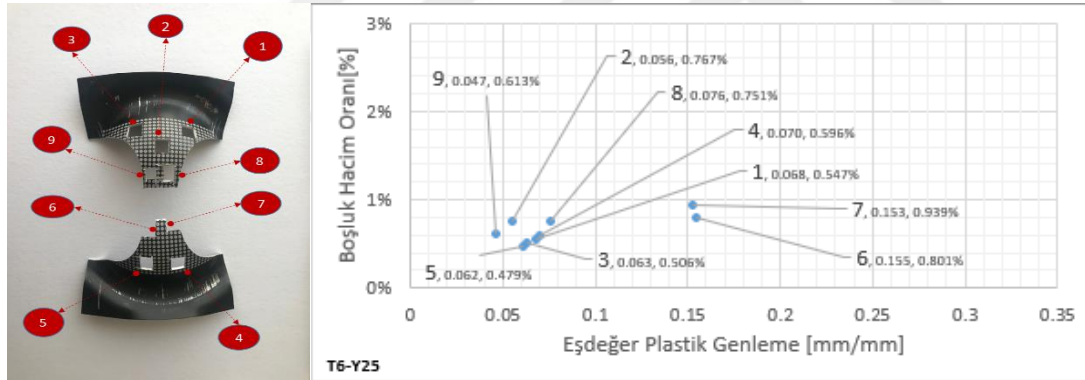
4.4.4 T6 – Y25 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.14).

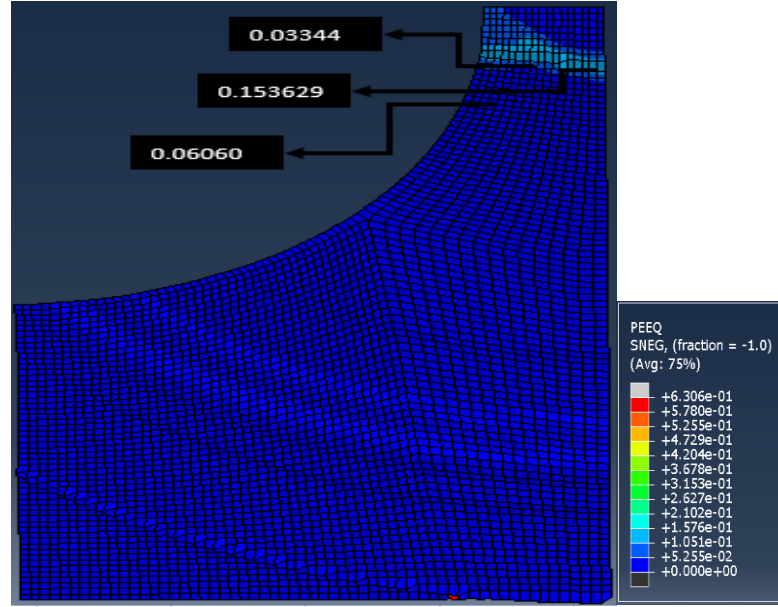


Şekil 4.14 : T6-Y25 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

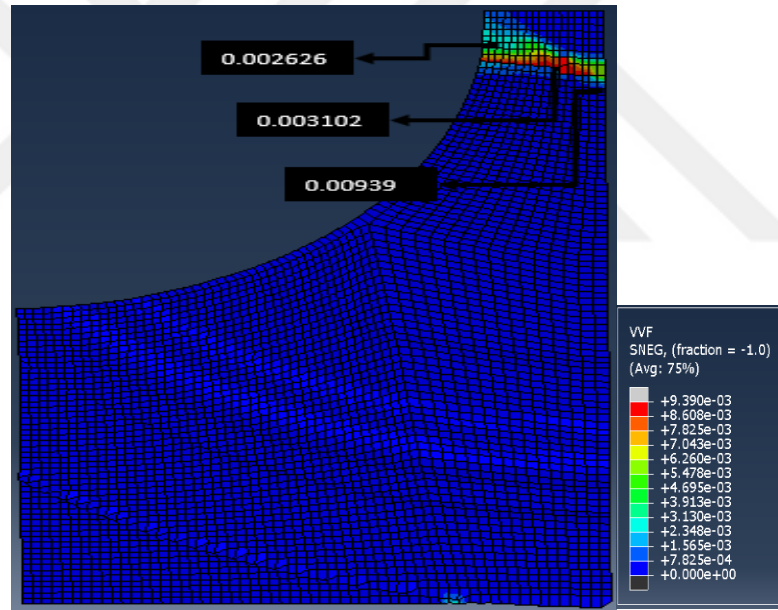
T6-Y25 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.15), (Şekil 4.16), (Şekil 4.17).



Şekil 4.15 : T6-Y25 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



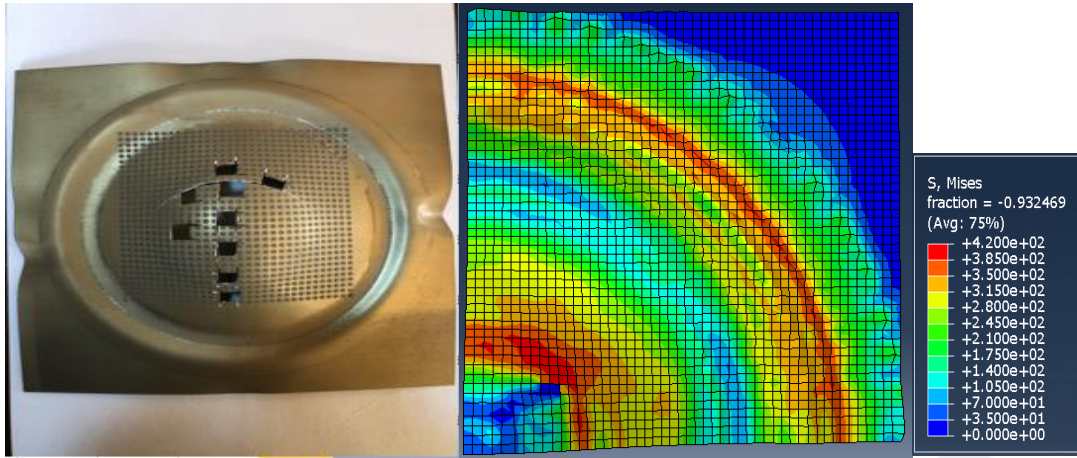
Şekil 4.16 : T6-Y25 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.17 : T6- Y25 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

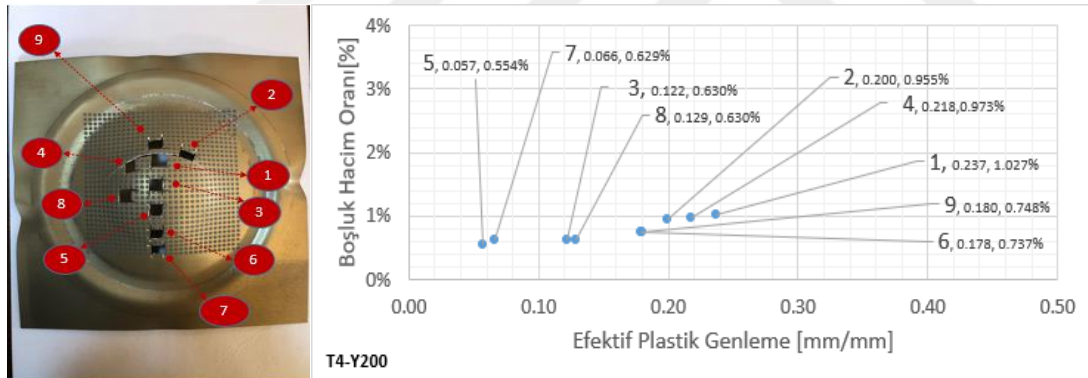
4.4.5 T4 – Y200 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.18).

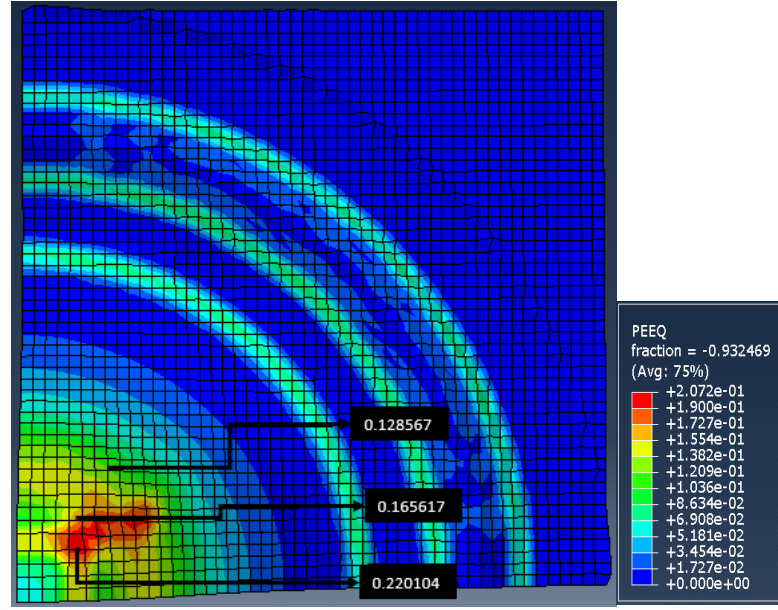


Şekil 4.18 :T4-Y200 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

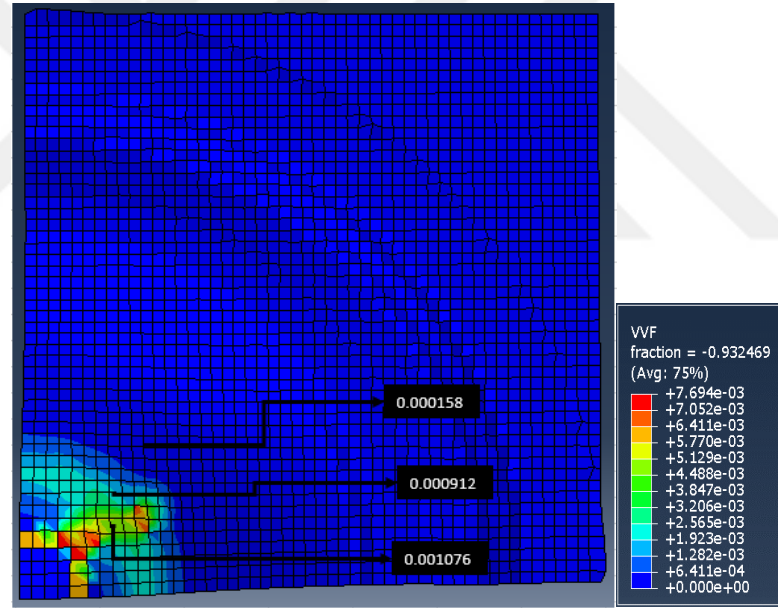
T4-Y200 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.19), (Şekil 4.20), (Şekil 4.21).



Şekil 4.19 : T4-Y200 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



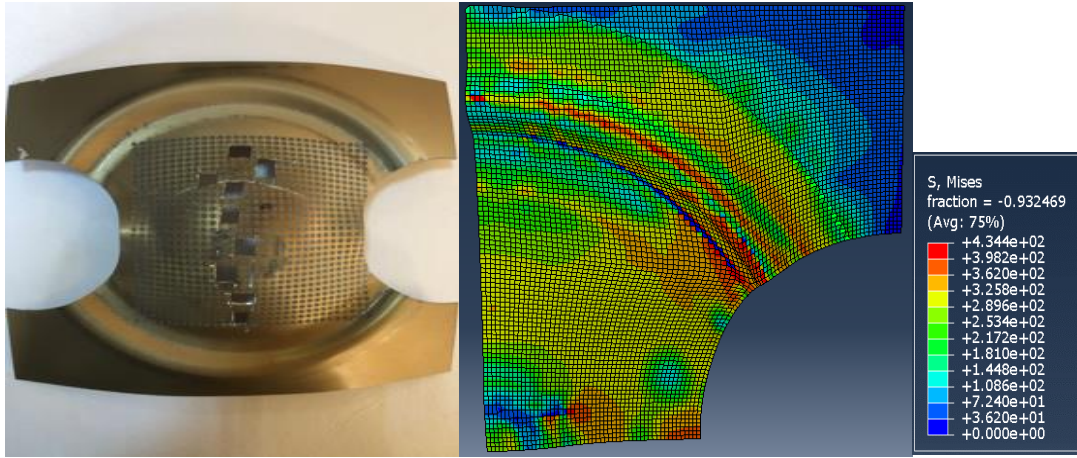
Şekil 4.20 : T4-Y200 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.21 : T4-Y200 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

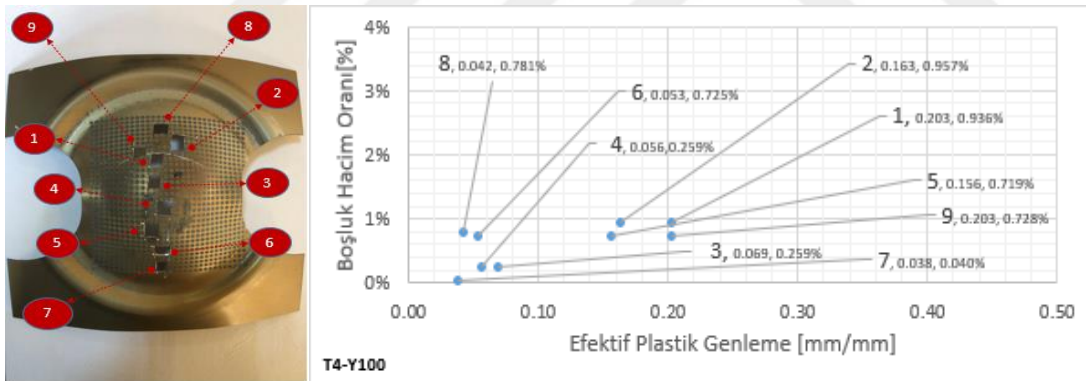
4.4.6 T4 – Y100 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.22).

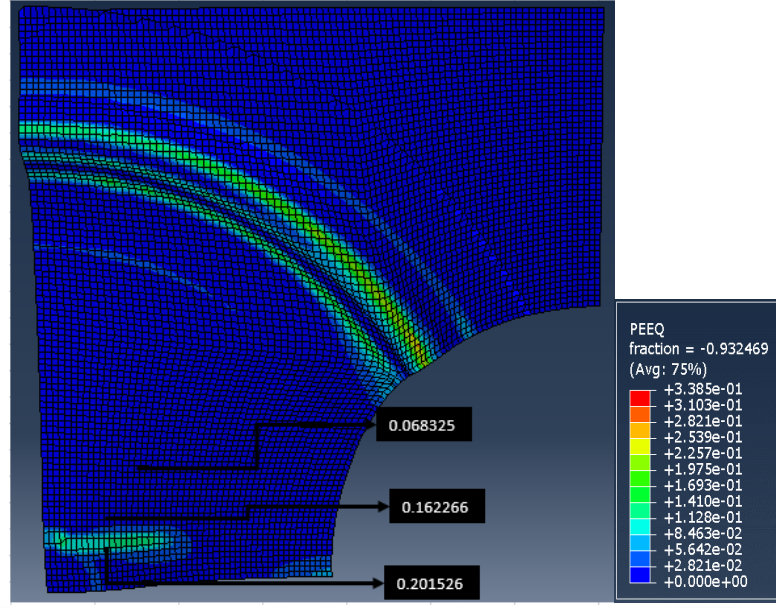


Şekil 4.22 :T4-Y100 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

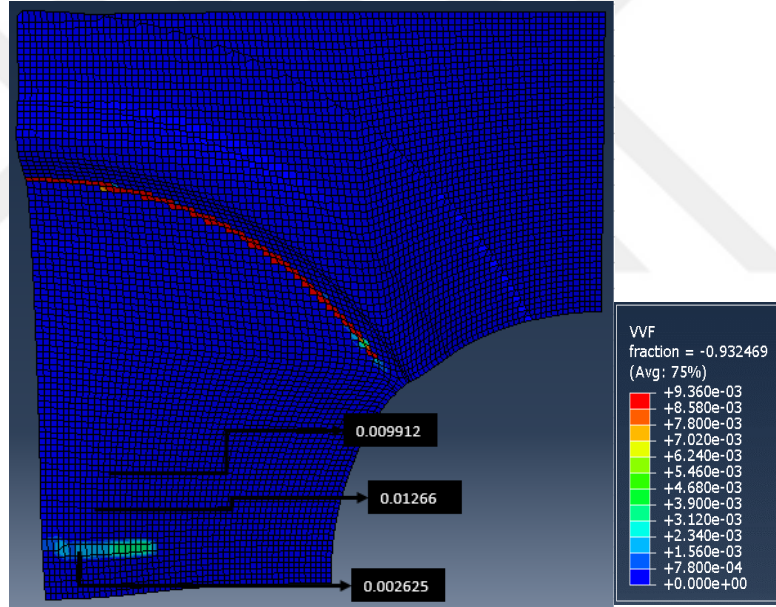
T4-Y100 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.23), (Şekil 4.24), (Şekil 4.25).



Şekil 4.23 : T4-Y100 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



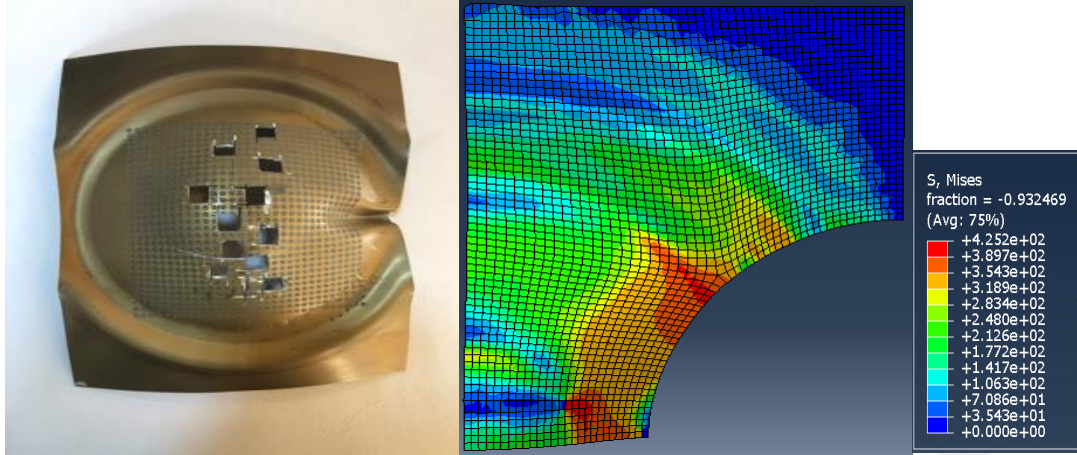
Şekil 4.24 : T4-Y100 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.25 : T4-Y100 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

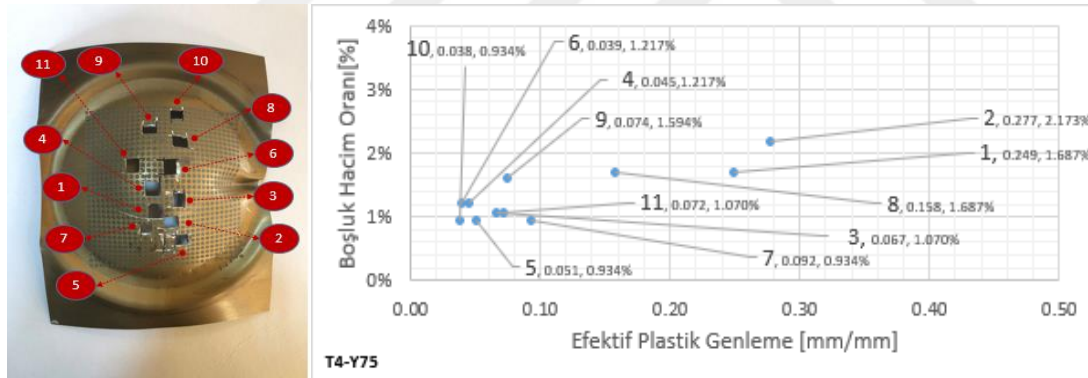
4.4.7 T4 – Y75 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.26).

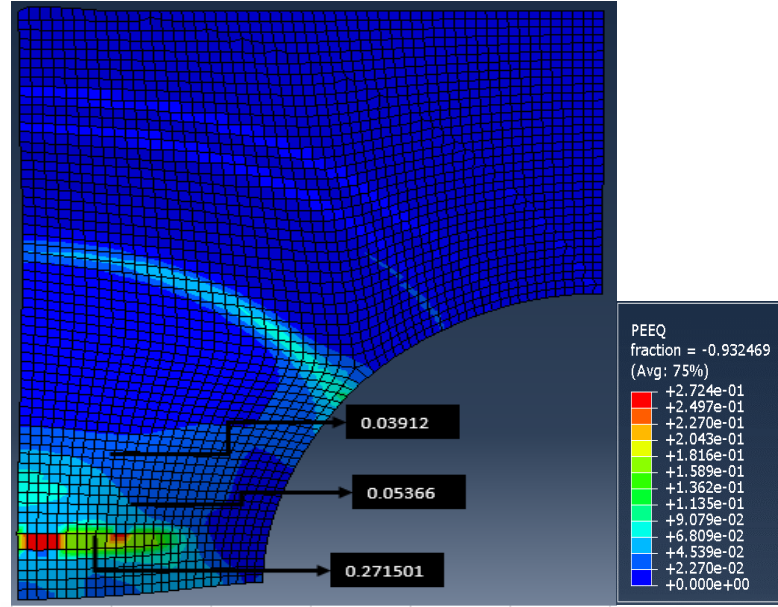


Şekil 4.26 :T4-Y75 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

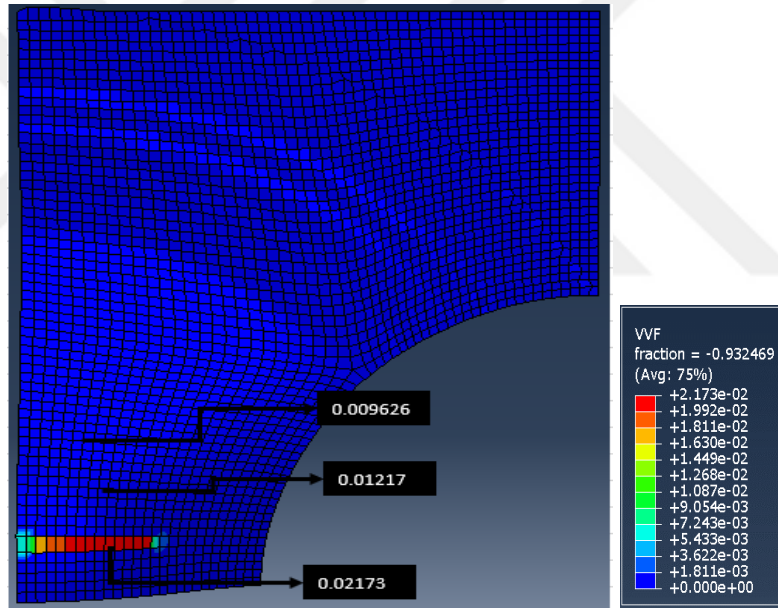
T4-Y75 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.27), (Şekil 4.28), (Şekil 4.29).



Şekil 4.27 : T4-Y75 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



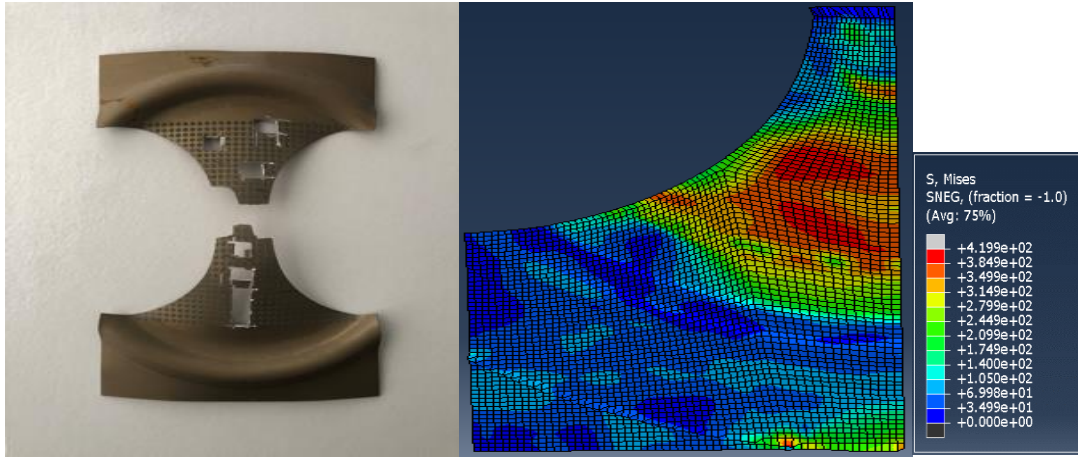
Şekil 4.28 : T4-Y75 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.29 : T4-Y75 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.

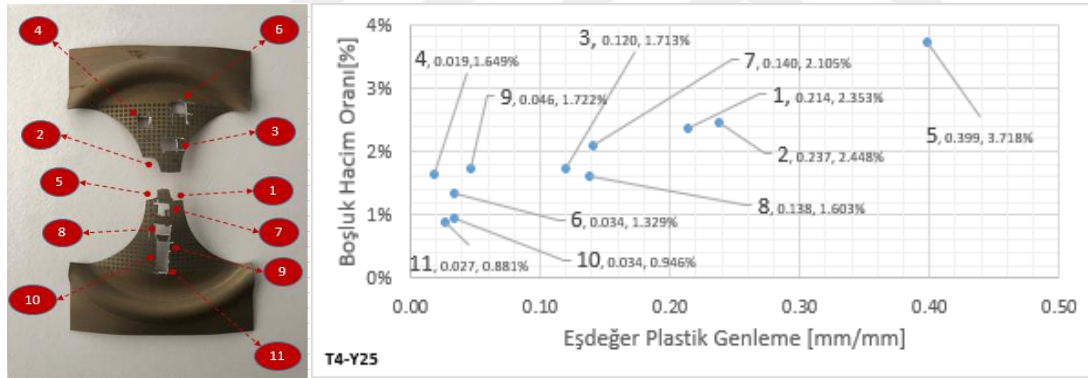
4.4.8 T4 – Y25 sonuçlarının karşılaştırılması

Yırtılmanın başladığı bölge simülasyonda da benzer yerde görünmektedir (Şekil 4.30).

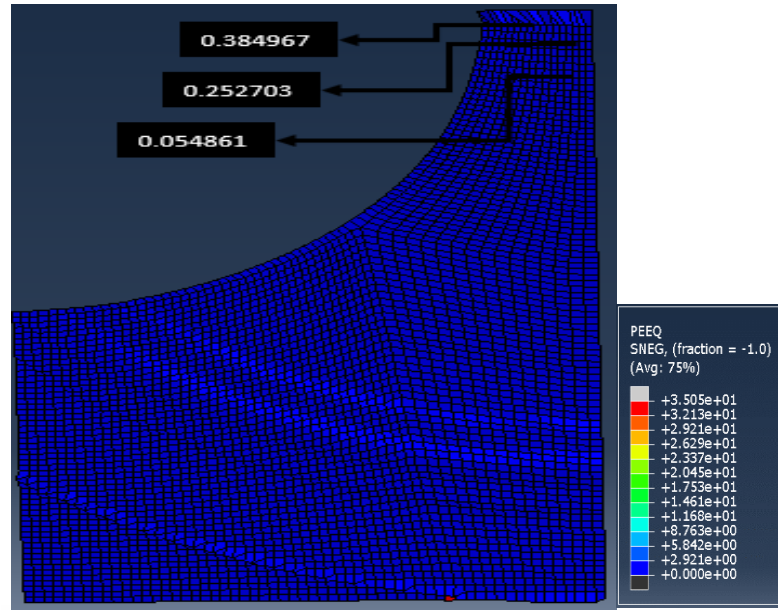


Şekil 4.30 :T4-Y25 numunesinin fiziksel ve sanal ortamdaki gerilme hali.

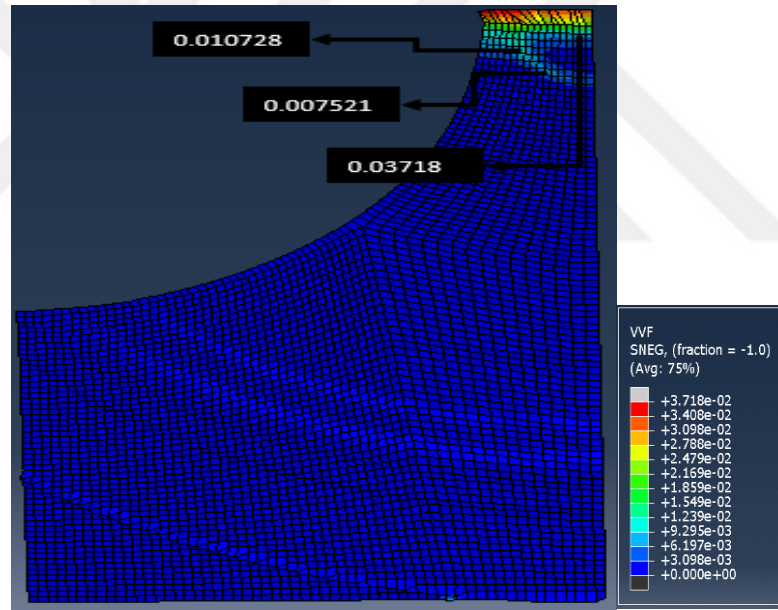
T4-Y25 numunesinin eşdeğer genleme ve boşluk hacim oranı değerleri simülasyonda ve deney sonuçlarında benzer çıkmaktadır (Şekil 4.32), (Şekil 4.33), (Şekil 4.34).



Şekil 4.31 :T4-Y25 numunesinden kesilen parçaların eşdeğer plastik genleme değerleri ve boşluk hacim oranları.



Şekil 4.32 : T4-Y25 simülasyonunda parçanın eşdeğer genleme değerleri.



Şekil 4.33 : T4-Y25 simülasyonunda parçanın boşluk hacim oranı değerleri.



5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında T4 ve T6 ısıtıl işlemli 6061 Al alaşımlarının tek ve iki eksenli gerilme hali deformasyon davranışları deneysel çalışmalarla ve sonlu elemanlar analizleri ile araştırılmıştır. Farklı ölçülerdeki numunelerde meydana gelen farklı iki eksenli germe haline maruz kalan 6061 Al alaşımı numunelerinde yoğunluk ve benek ölçümleri yapılarak eşdeğer plastik genleme ve boşluk hacim oranı grafikleri çıkarılmıştır. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- T6 ısıtıl işlemi görmüş ve tek eksenli çekilmiş numunelerin boşluk hacim oranı değerleri %1 - %1,5 arasında değiştiği genleme değerlerinde, iki eksenli gerilmiş numunelerde boşluk hacim oranı %1 ve altında kalmaktadır.
- T4 ısıtıl işlemi görmüş ve tek eksenli çekilmiş numunelerin kopma bölgesine yakın kısımlardaki boşluk hacim oranı değerleri %2.5 - %4 arasında değişirken aynı genleme değerlerinde iki eksenli gerilmiş numunelerde aynı oran %1 - %2.5 arasında değişmektedir.
- Bu sonuçlar 6061 alaşımında iki eksenli germe hali altındaki plastik deformasyonunda tek eksenli çekmedeki plastik deformasyondan oluşandan daha az boşluk meydana geldiğini, iki eksenli germe halinde tek eksenli haldekine göre daha az boşluk oluşumuyla hasarın meydana geldiğini göstermektedir.
- GTN parametreleri sonlu elemanların yönteminin hasar modelini doğrulaması için girdi olarak kullanılmıştır ve deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar birbiriyle iyi bir uyum göstermiştir.
- Deneysel yollarla elde edilen eşdeğer plastik genleme ve boşluk hacim oranı değerleri sonlu elemanlar analizi yöntemleriyle doğrulanmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] **Wang, N., Zhou, Z., & Lu, G.** (2011). Microstructural Evolution of 6061 Alloy during Isothermal Heat Treatment. *Journal of Materials Science and Technology*, 27(1), 8–14. doi:10.1016/S1005-0302(11)60018-2
- [2] **Benedyk, J. C.** (2010). 3 - Aluminum alloys for lightweight automotive structures. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. Woodhead Publishing Limited. doi: <http://dx.doi.org/10.1533/9781845697822.1.79>
- [3] **Demir, H., & Gündüz, S.** (2009). The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. *Materials and Design*, 30(5), 1480–1483. doi: 10.1016/j.matdes.2008.08.007
- [4] **Gronostajski, J., Matuszak, A., Niechajowicz, A., & Zimniak, Z.** (2004). The system for sheet metal forming design of complex parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 157–158(SPEC. ISS.), 502–507. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.110
- [5] **Tisza, M.** (2004). Numerical modelling and simulation in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3 SPEC. ISS.), 58–62. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.009
- [6] **Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A.** (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37–49. doi:10.1016/S0921-5093(99)00653-X
- [7] **George E. Totten, D. S. M.** (2003). *Handbook of Aluminum*. Marcel Dekker.
- [8] **Buha, J., Lumley, R. N., & Crosky, a. G.** (2006). Microstructural development and mechanical properties of interrupted aged Al-Mg-Si-Cu alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(10), 3119–3130. doi:10.1007/s11661-006-0192-x
- [9] **Braun, R.** (2010). On the stress corrosion cracking behaviour of 6XXX series aluminium alloys. *International Journal of Materials Research*, 101(5), 657–668. doi:10.3139/146.110314
- [10] **ASM Handbook Committe, C.** (1991). *ASM Metals Handbook Volume 4* (10 th Edit.). ASM International.
- [11] **Marioara, C. D., Nordmark, H., Andersen, S. J., & Holmestad, R.** (2006). Post- β'' phases and their influence on microstructure and hardness in 6xxx Al-Mg-Si alloys. *Journal of Materials Science*, 41(2), 471–478. doi:10.1007/s10853-005-2470-1

- [12] **Yassar, R. S., Field, D. P., & Weiland, H.** (2005). Transmission electron microscopy and differential scanning calorimetry studies on the precipitation sequence in an Al-Mg-Si alloy: AA6022. *Journal of Materials Research*, 20(10), 2705–2711. doi:10.1557/Jmr.2005.0330
- [13] **Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Ebner, T., & Leoben, M.** (2012). The role of co-clusters in the artificial aging of AA 6061 and AA 6060, 415–420.
- [14] **Dutta, I., & Allen, S. M.** (1991). A calorimetric study of precipitation in aluminum alloy 6061. *Journal of Materials Science Letter*, 10, 323–326. doi:10.1007/BF00719697
- [15] **Edwards, G. a., Stiller, K., Dunlop, G. L., & Couper, M. J.** (1998). The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia*, 46(11), 3893–3904. doi:10.1016/S1359-6454(98)00059-7
- [16] **Buha, J., Lumley, R. N., Crosky, A. G., & Hono, K.** (2007). Secondary precipitation in an Al-Mg-Si-Cu alloy. *Acta Materialia*, 55(9), 3015–3024. doi: 10.1016/j.actamat.2007.01.006
- [17] **Massardier, V., Epicier, T., & Merle, P.** (2000). Correlation between the microstructural evolution of A 6061 aluminium alloy and the evolution of its thermoelectric power. *Acta Materialia*, 48(11), 2911–2924. doi:10.1016/S1359-6454(00)00085-9
- [18] **Maisonnette, D., Suery, M., Nelias, D., Chaudet, P., & Epicier, T.** (2011). Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061-aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 528(6), 2718–2724. doi: 10.1016/j.msea.2010.12.011
- [19] **Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., & Picu, R. C.** (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Materials and Design*, 31(2), 972–975. doi: 10.1016/j.matdes.2009.08.017
- [20] **Xu, C., He, H., Yu, W., & Li, L.** (2019). Influence of quenching temperature on peak aging time and hardness of Al-Mg-Si-Cu alloys strengthened by nano-sized precipitates. *Materials Science and Engineering A*, 744(August 2018), 28–35. doi: 10.1016/j.msea.2018.11.149
- [21] **Yıldız, R., A.** (2019). *Investigation of the effect of heat treatments on the formability of the 6061 Al alloy.* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Mu, L., Zang, Y., Wang, Y., Li, X. L., & Araujo Stemler, P. M.** (2018). Phenomenological uncoupled ductile fracture model considering different void deformation modes for sheet metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 141(April), 408–423. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.025

- [23] **Rousselier, G., Morgeneyer, T. F., Ren, S., Mazière, M., & Forest, S.** (2017). Interaction of the Portevin–Le Chatelier phenomenon with ductile fracture of a thin aluminum CT specimen: experiments and simulations. *International Journal of Fracture*, 206(1), 95–122. doi:10.1007/s10704-017-0203-5
- [24] **Gurson, A. L.** (1977). Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99(1), 2. doi:10.1115/1.3443401
- [25] **Tvergaard, V.** (1981). Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. *International Journal of Fracture*, 17(4), 389–407. doi:10.1007/BF00036191
- [26] **Needleman, A., & Tvergaard, V.** (1984). An analysis of ductile rupture in notched bars. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 32(6), 461–490. doi:10.1016/0022-5096(84)90031-0
- [27] **Feng, F., Li, J., Yuan, P., Zhang, Q., Huang, P., Su, H., & Chen, R.** (2018). Application of a GTN Damage Model Predicting the Fracture of 5052-O Aluminum Alloy High-Speed Electromagnetic Impaction. *Metals*, 8(10), 761. doi:10.3390/met8100761
- [28] **Chen, Y., Zhang, C., & Varé, C.** (2017). An extended GTN model for indentation-induced damage. *Computational Materials Science*, 128, 229–235. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.11.043
- [29] **Shi, Y., Jin, H., Wu, P. D., & Lloyd, D. J.** (2017). Effects of superimposed hydrostatic pressure on necking and fracture of tube under hydroforming. *International Journal of Solids and Structures*, 113–114(4), 209–217. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.02.027
- [30] **Ding, H., Zhu, C., Song, C., & Qian, D.** (2017). Effect of the quenching residual stress on ductile fracture behavior of pre-stretched aluminum alloy plates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(6), 2259–2267. doi:10.1007/s40430-017-0713-0
- [31] **Steglich, D., Wafai, H., & Brocks, W.** (2010). Anisotropic Deformation and Damage in Aluminium 2198 T8 Sheets. *International Journal of Damage Mechanics*, 19(2), 131–152. doi:10.1177/1056789508101916
- [32] **Ren, S.-C., Morgeneyer, T. F., Forest, S., Mazière, M., & Rousselier, G.** (2016). Numerical investigation of dynamic strain ageing and slant ductile fracture in a notched specimen and comparison with synchrotron tomography 3D-DVC. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3385–3392. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.422
- [33] **Kahziz, M., Morgeneyer, T. F., Mazière, M., Helfen, L., Bouaziz, O., & Maire, E.** (2016). In situ 3D Synchrotron Laminography Assessment of Edge Fracture in Dual-Phase Steels: Quantitative and Numerical Analysis. *Experimental Mechanics*, 56(2), 177–195. doi:10.1007/s11340-015-0076-3

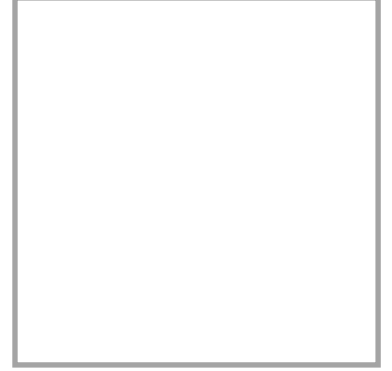
- [34] **Cao, T. S., Maire, E., Verdu, C., Bobadilla, C., Lasne, P., Montmitonnet, P., & Bouchard, P. O.** (2014). Characterization of ductile damage for a high carbon steel using 3D X-ray micro-tomography and mechanical tests - Application to the identification of a shear modified GTN model. *Computational Materials Science*, 84, 175–187. doi: 10.1016/j.commatsci.2013.12.006
- [35] **Kingklang, S., Suthon, M., Mahabunphachai, S., Uthaisangsuk, V., Yuenyong, J., & Thanakijkasem, P.** (2017). Formability Prediction for Tube Hydroforming of Stainless Steel 304 Using Damage Mechanics Model. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(1), 011006. doi:10.1115/1.4038208
- [36] **Wang, X., Zhan, M., Guo, J., & Zhao, B.** (2016). Evaluating the Applicability of GTN Damage Model in Forward Tube Spinning of Aluminum Alloy. *Metals*, 6(6), 136. doi:10.3390/met6060136
- [37] **Taktak, W., Taktak, R., Haddar, N., & Elleuch, R.** (2017). Study of the influence of cold working on mechanical behavior and ductile fracture of 5754 aluminum alloy: experimental and numerical simulations. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, (2007), 923. doi:10.15632/jtam-pl.55.3.923
- [38] **Ancelet, O., Crepin, J., Allais, L., Garnier, J., Hiver, J.-M., & Shen, Y.** (2011). Experimental and numerical characterization of anisotropic damage evolution of forged Al6061-T6 alloy. *Procedia Engineering*, 10, 3429–3434. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.565
- [39] **Nielsen, K. L.** (2008). Ductile damage development in friction stir welded aluminum (AA2024) joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(10), 2795–2811. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.01.012
- [40] **Tanguy, B., Luu, T. T., Perrin, G., Pineau, A., & Besson, J.** (2008). Plastic and damage behaviour of a high strength X100 pipeline steel: Experiments and modelling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(5), 322–335. doi: 10.1016/j.ijpvp.2007.11.001
- [41] **Zhong, J., Xu, T., Guan, K., & Huang, L.** (2017). Evaluation of Ductile Damage Parameters under High Stress Triaxiality. *Experimental Mechanics*, 57(3), 501–504. doi:10.1007/s11340-016-0224-4
- [42] **Abbassi, F., Belhadj, T., Mistou, S., & Zghal, A.** (2013). Parameter identification of a mechanical ductile damage using Artificial Neural Networks in sheet metal forming. *Materials and Design*, 45, 605–615. doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.032
- [43] **Wcislik, W.** (2016). Experimental determination of critical void volume fraction f_F for the Gurson Tvergaard Needleman (GTN) model. *Procedia Structural Integrity*, 2, 1676–1683. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.212
- [44] **He, M., Li, F., & Wang, Z.** (2011). Forming limit stress diagram prediction of aluminum alloy 5052 based on GTN model parameters determined by in situ tensile test. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24(3), 378–386. doi:10.1016/S1000-9361(11)60045-9

- [45] **Hosford, W., & Caddell, R.** (2007). *Metal Forming* (Third.). Cambridge University Press.
- [46] **Altan, T., Oh, S.-I., & Gegel, H.** (2000). *Metal Forming* (Seventh.). American Society for Metals.
- [47] **Mori, T., & Tanaka, K.** (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21(5), 571–574. doi:10.1016/0001-6160(73)90064-3
- [48] **Zhao, P. J., Chen, Z. H., & Dong, C. F.** (2016). Failure analysis based on microvoids damage model for DP600 steel on in-situ tensile tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 154, 152–168. doi:10.1016/j.engfracmech.2015.11.017
- [49] **Tvergaard, V., & Needleman, A.** (1984). Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 32(1), 157–169. doi:10.1016/0001-6160(84)90213-X



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Egemen Uz



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : Halen, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı