

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEVİRİMSEL VE ORANTISAL YÜKLEMELER  
ALTINDA LİNEER OLMAYAN BİR PEKLEŞME  
MODELİNİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Melih ÇAYLAK**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet FIRAT**

**Haziran 2022**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEVİRİMSSEL VE ORANTISAL YÜKLEMELER  
ALTINDA LİNEER OLMAYAN BİR PEKLEŞME  
MODELİNİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Melih ÇAYLAK**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT**

**Bu tez 01/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

**Jüri Başkanı**

**Üye**

**Üye**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Melih ÇAYLAK

01.06.2022

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet FIRAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Yapmış olduğum tüm çalışmalarda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Toros Arda AKŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavımda katkılarını esirgemeyen jüri üyeleri Doç. Dr. Ahmet Çağatay ÇİLİNGİR ve Dr. Öğr. Üyesi Bora ŞENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olan, çalışmalarım için teşvik eden ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, babam Nurettin ÇAYLAK'a, annem Sevim ÇAYLAK'a ve ağabeyim Semih ÇAYLAK'a teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Literatür Taraması .....	3
1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı .....	7
BÖLÜM 2.	
MEKANİK ESASLAR.....	9
2.1. Çekme Testi .....	9
BÖLÜM 3.	
PEKLEŞME MODELLERİ.....	15
3.1. İzotropik Pekleşme Modeli .....	18
3.2. Kinematik Pekleşme Kuralı .....	20
3.3. Lineer Kinematik Pekleşme Kuralı .....	22
3.4. Multilineer Kinematik Pekleşme Kuralı .....	23
3.5. Nonlineer Kinematik Pekleşme Kuralı .....	24

## BÖLÜM 4.

SAYISAL UYGULAMALAR.....	27
4.1. Çevrimsel Çekme Basma Yüklemesine Maruz Kalan Tek Eleman Uygulaması .....	27
4.2. Basit Kayma Yüklemesi Etkisi Altında Tek Eleman Uygulaması .....	28
4.3. Birleşik ve Çevrimsel Yükleme Altındaki Delikli Plaka Uygulaması .....	29

## BÖLÜM 5.

MALZEME KARAKTERİZASYONU.....	32
5.1. Çevrimsel Çekme Basma Yüklemesine Maruz Kalan Tek Eleman Uygulaması .....	32
5.2. Basit Kayma Yüklemesi Etkisi Altında Tek Eleman Uygulaması .....	33
5.3. Birleşik ve Çevrimsel Yükleme Altındaki Delikli Plaka Uygulaması .....	35

## BÖLÜM 6.

SAYISAL MODELLEME.....	37
6.1. Analiz Modellerinin Oluşturulması .....	38
6.1.1. Çevrimsel çekme basma yüklemesine maruz kalan tek eleman uygulaması.....	38
6.1.2. Basit kayma yüklemesi etkisi altında tek eleman uygulaması ..	40
6.1.3. Birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulaması.....	40
6.2. Sınır Şartlarının Uygulanması .....	42
6.2.1. Çevrimsel çekme basma yüklemesine maruz kalan tek eleman uygulaması.....	42
6.2.2. Basit kayma yüklemesi etkisi altında tek eleman uygulaması ..	43
6.2.3. Birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulaması.....	45
6.3. Ağ Örgüsü Yapısı Hassasiyet Çalışması .....	46

BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR.....	51
7.1. Çevrimsel Çekme Basma Yüklemesine Maruz Kalan Tek Eleman Uygulaması .....	51
7.2. Basit Kayma Yüklemesi Etkisi Altında Tek Eleman Uygulaması .....	53
7.3. Birleşik ve Çevrimsel Yükleme Altındaki Delikli Plaka Uygulaması	54
BÖLÜM 8.	
DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMALAR.....	577
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Numune Anlık Kesit Alanı
$A_0$	: Numune İlk Kesit Alanı
AF	: Armstrong – Frederic
$c, \gamma$	: AF Modeli Kinematik Pekleşme Parametreleri
$C_e$	: Elastik Tensör
$D\lambda$	: Plastik Orantısallık Faktörü
E	: Elastisite Modülü
F	: Uygulanan Kuvvet
$F_{max}$	: Uygulanan Maksimum Kuvvet
$f_{vm}$	: von Mises Akma Fonksiyonu
H	: Pekleşme Modülü
$h_0^{(i)}$	: Ohno Modeli Öteleme Bileşeni
K	: Teorik gerilme – yığılma faktörü, mukavemet katsayısı
L	: Test Numunesi Anlık Boyu
$L_0$	: Test Numunesinin İlk Boyu
OFHC	: Oxygen Free High Thermal Conductivity
Q,b	: AF Modeli İotropik Pekleşme Parametreleri
S	: Gerilme Tensörünün Deviatorik Bileşeni
SAE	: Society of Automotive Engineers
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
$Y_0$	: Ohno Modeli Malzeme Sabiti
$\alpha$	: Öteleme Tensörü
$\Delta L$	: Uzama Miktarı
$\epsilon_e$	: Elastik Gerinim
$\epsilon_{müh}$	: Mühendislik Gerinimi
$\epsilon_p$	: Plastik Gerinim



$\zeta$	: Ohno Modeli Kinematik Pekleşme Parametresi
$\lambda$	: Kronecker Delta
$\rho$	: Eşdeğer Plastik Gerinim Fonksiyonu
$\sigma_{ak}, \sigma_0$	: Akma Gerilmesi
$\sigma_{çekme}$	: Çekme Gerilmesi
$\sigma_{gerçek}$	: Gerçek Gerilme
$\sigma_m$	: Ortalama Gerilme
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik gerilmesi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Örnek gerilme – gerinim grafiği [1].....	10
Şekil 2.2. Orantı sınırı ve akma gerilmesi.....	11
Şekil 2.3. Gerçek gerilme – gerinim grafiği ile mühendislik gerilme – gerinim grafiklerinin karşılaştırılması.....	13
Şekil 3.1. İki boyutta von Mises – Tresca akma yüzeylerinin karşılaştırılması.....	16
Şekil 3.2. İzotropik pekleşme [20] .....	18
Şekil 3.3. Bilineer izotropik malzeme davranışını gösteren bir malzemeye ait gerilme – gerinim eğrisi [18] .....	19
Şekil 3.4. Multilineer pekleşme modeline sahip bir malzemenin gerilme – gerinim eğrisi [18].....	19
Şekil 3.5. Non-Lineer izotropik malzeme davranışının temsili gösterilmesi.....	20
Şekil 3.6. Kinematik pekleşme modelinin şematik olarak gösterilmesi [18].....	21
Şekil 3.7. İzotropik ve kinematik pekleşme modellerinin farkının şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.8. Lineer pekleşme modeline göre gerilme – gerinim eğrisi [19].....	22
Şekil 3.9. Çok yüzeyli kinematik pekleşme modeline göre akma yüzeyleri [19].	23
Şekil 3.10. Armstrong – Frederic nonlineer kinematik pekleşme modeli [30] .....	25
Şekil 4.1. Yoshida'nın elde etmiş olduğu sonuçlar [34].....	28
Şekil 4.2. Montans'ın elde etmiş olduğu sonuçlar [10].....	29
Şekil 4.3. Modelin tanımı [8] .....	30
Şekil 4.4. Ohno'nun elde etmiş olduğu sonuçlar [8].....	31
Şekil 5.1. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen akma, öteleme ve izotropik pekleşme eğrileri.....	33
Şekil 5.2. SUS304 Çeliğine ait gerilme – gerinim grafiği [35].....	34
Şekil 5.3. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen akma, öteleme ve izotropik pekleşme eğrileri.....	35

Şekil 5.4. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen akma, öteleme ve izotropik pekleşme eğrileri.....	36
Şekil 6.1. Eleman 7'nin şematik gösterimi [37].....	38
Şekil 6.2. Birim eleman 2 boyutlu modellenmesi .....	39
Şekil 6.3. Birim eleman 3 boyutlu modellenmesi a) 1x1 mm düzlem b) 1x1x1 mm tek eleman .....	39
Şekil 6.4. Modele uygulanan sınır şartları temsili gösterimi.....	40
Şekil 6.5. Modele uygulanan sınır şartları temsili gösterimi.....	40
Şekil 6.6. Modelin temel gösterimi .....	41
Şekil 6.7. Parçalı model.....	41
Şekil 6.8. Birim elemana uygulanan sınır şartlarının temsili gösterimi.....	42
Şekil 6.9. 3 farklı deneye ait yer değiştirme – zaman grafikleri a) 1. Deney b) 2. Deney c) 3. Deney .....	43
Şekil 6.10. Kayma gerilmesine maruz kalan bir tek elemanın sınır şartları.....	44
Şekil 6.11. Tek elemana uygulanan yükleme koşulu .....	44
Şekil 6.12. Sınır şartlarının şematik olarak gösterilmesi.....	45
Şekil 6.13. Yükleme koşulları a) Çekme yükleme koşulu b) Eğme yükleme koşulu .....	46
Şekil 6.14. Kalınlık yönünde farklı elemanların oluşturmuş olduğu ağ yapıları, a) Durum 1, b) Durum 2 c) Durum 3 .....	47
Şekil 6.15. Düzlem dışı yönde farklı eleman sayıları içeren farklı ağ örgüsü yapılarından .....	48
Şekil 6.16. Düzlemsel ağ örgüsü yapıları a) Durum 2.1 b) Durum 2.2 c) Durum 2.3 .....	49
Şekil 6.17. Farklı ağ örgüsü yapıları ile elde edilen gerilme – gerinim a) monotonik yükleme b) çevrimsel yükleme .....	50
Şekil 7.1. İncelenen düğüm noktası .....	51
Şekil 7.2. Numerik modelin deneysel verilerde ve Yoshida ve Uemori'nin modeliyle karşılaştırılması a) Birinci Çevrim b) İkinci Çevrim c) Üçüncü çevrim [34].....	52
Şekil 7.3. İncelenen düğüm noktası .....	53

Şekil 7.4. Sayısal sonuçlardan elde edilen çevrimsel gerilme – gerinim eğrilerinin Montans’ın modeli ile karşılaştırılması [10].....	54
Şekil 7.5. Sayısal sonuçlardan elde edilen çevrimsel gerilme – gerinim eğrilerinin Ohno’nun modeli ile karşılaştırılması [8].....	55

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 5.1. HSS çeliğinin mekanik malzeme özellikleri .....	32
Tablo 5.2. HSS çeliğinin birleşik pekleşme katsayıları.....	32
Tablo 5.3. Kinematik pekleşme parametreleri .....	34
Tablo 5.4. HSS Çeliğinin kombine pekleşme katsayıları.....	34
Tablo 5.5. OFHC Bakırının birleşik pekleşme parametreleri.....	36
Tablo 6.1. Her bir ağ örgüsü yapısı için kalınlık yönündeki eleman sayıları.....	46
Tablo 6.2 . Her bir ağ örgüsü yapısına ait eleman sayıları .....	49
Tablo 8.1 . Deneysel ve SEY ile hesaplanan gerilme yığılması faktörü .....	56

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Birleşik pekleşme kuralı, plastisite modeli, çevrimsel gerilme – gerinim, Bauschinger etkisi, sonlu elemanlar yöntemi

Bu tez çalışmasında, birleşik izotropik – kinematik bir pekleşme kuralı uygulanarak, farklı çevrimsel yüklemeler altındaki malzeme davranışlarının tahmini gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda von Mises izotropik akma fonksiyonu ve bağdaşık akma kuralı kullanılmıştır. Birleşik pekleşme kuralının kinematik bileşeni Armstrong – Frederic modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Plastisite parametreleri Hypela2 kullanıcı tanımlı malzeme alt programı kullanılarak sonlu elemanlar yazılımına tanımlanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, tek eleman testlerinin analizleri gerçekleştirilerek malzeme modelinin doğrulaması yapılmıştır. Bu hususta çevrimsel bir çekme – basma uygulaması ve çevrimsel bir basit kayma uygulaması seçilmiştir. Kinematik ve izotropik pekleşme parametreleri, malzemenin monotonik ve çevrimsel gerilme – gerinim davranışlarından elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözümlerin sonuçları deneysel verilerle ve literatürden elde edilen sayısal tahminlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise önerilen plastisite modeli delikli bir plakanın birleşik yükleme altındaki davranışının tahmininde kullanılmıştır. Son uygulamada OHFC bakırı test malzemesi olarak ele alınmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar literatürden elde edilen sayısal tahminlerle karşılaştırılmıştır.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre önerilen plastisite modelinin düşük gerinimli çevrimsel yükleme şartları altında başarılı sonuçlar verdiği kaydedilmiştir. Modelin ayrıca kalibrasyonunun da basitliği dikkate alındığında, tez kapsamında düşük çevrimli çevrimsel uygulamalar için pratik bir yaklaşım sunulmuştur.

# **EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A NONLINEAR HARDENING MODEL UNDER CYCLIC AND PROPORTIONAL LOADINGS**

## **SUMMARY**

Keywords: Combined hardening, plasticity model, cyclic stress – strain behavior, Bauschinger effect, finite element method

In the present dissertation, a combined hardening model was employed in order to predict the material behavior of a plate with a hole under cyclic loadings. Von Mises yield criterion in conjunction with associated flow rule was utilized in the numerical approach. The kinematic part of the combined hardening rule was model using Armstrong – Frederic model. To incorporate the plasticity models into the finite element software, a user defined material subroutine so-called Hypela2 was used.

In the first stage, single element test simulations were carried out to validate to plasticity model used in this work. To this end, cyclic tension – compression and simple reversal shear applications were considered. Kinematic and isotropic hardening parameters were obtained from the monotonic and reversal stress – strain responses of the materials. Numerical results obtained from the finite element analyses were compared with the experimental outcomes and numerical predictions from literature studies. In the second stage, plasticity model with combined hardening model was used so as to determine the material response of a plate with a hole under combined loadings. Within this concept, OHFC copper was considered as a test material. Finite element results were compared with the numerical predictions procured from literature studies.

According to the findings obtained in this research, it was concluded that the plasticity model used in this work provide accurate results especially for small strain.cyclic loading. Moreover, this model is user friendly and has an easy identification procedure.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüz şartlarında teknoloji çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir. İlerleyen teknoloji sayesinde pek çok sektörde, ciddi oranda gelişmeler kaydedilmiştir. Son kullanıcının talepleri rekabeti arttırmakta ve bu rekabet artışı da teknolojik gelişmelerin daha da hızlanmasına sebep olmaktadır. Bu gelişmelerin hızlı yol almasının en önemli etmenlerinden birisi de şüphesiz mühendislik çalışmalarıdır. Hızla ilerleyen teknolojik gelişmeleri yakalayabilmek için mühendislik çalışmaları kapsamında birçok araştırma – geliştirme faaliyeti yapılmaktadır. Yapılan araştırma – geliştirme faaliyetlerinde malzeme teknolojileri oldukça önemli bir yere sahiptir. Son kullanıcıların talepleri doğrultusunda bu çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu talepler özellikle sürdürülebilirlik, yeşil dönüşüm ve çevre kirliliğinin azaltılması yönünde olduğu için, üretilen mühendislik ürünlerinin hafifletilmesi ve hammadde kullanımının azaltılması önem kazanmıştır. Bu bağlamda firmalar ürünlerini hafifletmek ve karbon ayak izini azaltmak için malzeme teknolojileri alanında bir rekabete girmiştir. Pek çok sektörde, pek çok firma bu rekabete ayak uydurabilmek için malzeme maliyet parametresini de hesaba katmak zorunda kalmıştır. Sonuç olarak farklı malzeme alternatifleri arayışına başlanmıştır. Yeni malzeme alternatiflerinin makine elemanlarının maruz kaldığı yükleri güvenle taşıdığından emin olmak için malzemenin mekanik testlerinin gerçekleştirilmesinin önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Makine elemanları her zaman sabit yüklere maruz kalmamaktadır. Bir makinenin çalışması sırasında konstrüksiyonu oluşturan makine elemanları değişken yüklemelere maruz kalabilmektedir. Bu yükler çalışma koşullarına, ortam ve çalışma sıcaklığına, çalışma süresi ve yağlayıcının uygunluğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin bir gün içerisinde 10 saat, sabit yükler etkisinde çalışan bir makine dişlisi ile 24 saat boyunca şok yüklere maruz kalan makine dişlisinin zorlanma miktarı aynı olmayacaktır.



Makine elemanlarını etkileyen yükler temel olarak statik ve dinamik yükler olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Bu yükleme koşullarının makine elemanları üzerindeki etkisi birbirinden farklıdır. Bu kapsamda makine elemanlarının maruz kaldığı yüklerin analizinin yapılabilmesi için yükleme şartlarının ve bu şartların makine elemanlarının üretildiği malzeme üzerine etkisi net olarak belirlenmelidir. Makine elemanı üzerine gelen yüklerin oluşturduğu gerilmeler, malzemenin elastik limitini aştığında makine elemanında kalıcı deformasyon meydana gelir. Plastik deformasyon, makine elemanında kalıcı bir şekil değişimine sebep olur ve bu durum makine elemanının fonksiyonel olarak çalışmasını engelleyebilir. Sünek malzemeler statik yüklemeler altında oda sıcaklığında akmaya maruz kaldığında sonuç nadiren hasar ile sonuçlanır. Çünkü malzeme deforme oldukça pekleşir ve deformasyon için gerekli gerilme miktarı artar. Tek eksenli yüklemelerde plastik şekil değişimi, akma gerilmesi aşıldığı noktada başlar ve birleşik gerilmeler altında akmanın, asal gerilmelerin bazı özel kombinasyonları ile ilgili olması beklenir [1].

Makine elemanları üzerindeki süreksizlikler özellikle dinamik zorlamalarda önem arz etmektedir. Keskin köşe, çentik, delik ya da çatlak gibi süreksizlik yaratan bu unsurlar gerilme yığılmasına sebep olacaktır. Gerilme yığılmaları, dinamik yükler altında kalan makine elemanlarının yorulma dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu süreksizlikler tasarım kriteri olarak dikkate alınmalıdır. Örneğin, keskin köşelerin yuvarlatılması gerilme yığılmasının azaltılması için bir yöntem olabilir.

Süreksizlikler sonucu meydana gelen gerilme yığılması etkisine ve çevrimsel yüklemelere maruz kalan makine elemanlarının davranışını belirlemek için kurulması gereken test düzenekleri oldukça maliyetli olmaktadır. Bu sebeple gelişen bilgisayar teknolojileri kapsamında, yapılan test sayısını azaltmak için çeşitli mühendislik yöntemleri kullanılır. Bu yöntemlerden başlıcası Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY). SEY kullanılan ticari simülasyon yazılımları sayesinde gerçek hayattaki problemler bilgisayar ortamında simüle edilerek sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda malzeme ve makine elemanlarının davranışları incelenebilmektedir. Bu analiz sonuçları, kullanılan yazılımların kabullerinden ve ilgili problemlerin karmaşıklığından dolayı tamamıyla gerçeği yansıtmayabilir. Ancak

günümüzde SEY ile elde edilen sonuçlarla gerçek sonuçlar arasındaki farkın gün geçtikçe azaldığı görülmektedir.

Malzeme ve makine elemanlarının maruz kaldığı yükleme koşullarının sayısal benzetimlerinin bilgisayar ortamında simüle edilebilmesi için bazı veriler gerekmektedir. Malzemelerin davranışının modellenmesi için gerçek testlerden elde edilen veya literatürde hali hazırda bulunan veriler kullanılabilir. Bu davranışların modellenmesi için malzeme modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, elastisite modülü, akma gerilmesi, pekleşme parametreleri, akma fonksiyonu ve pekleşme kuralı gibi temel bilgilere ihtiyaç duymaktadır. Gelişen teknoloji sayesinde, daha gelişmiş malzeme modeli kullanmanın önemi gün geçtikçe daha iyi anlaşılmıştır. Bu sebeple literatürde konu ile ilgili yapılan birçok önemli çalışma mevcuttur.

### **1.1. Literatür Taraması**

Çevrimsel plastisite, tekrarlı yüklemeler etkisi altında çalışan makine elemanlarının gerilme – gerinim davranışının incelenmesinde önemli rol oynamaktadır. Çevrimsel yüklemeler altında, malzemeler Bauschinger etkisi ve çevrimsel yüklemeler altında plastik gerinim birikimi gibi nadir özellikler sergiler. Bu özelliklerin modellenmesi için kinematik pekleşme modellerinin kullanılması gerekmektedir.

Malzemelerin kinematik pekleşme parametrelerinin gerilme – gerinim davranışına etkisini tanımlamak için literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Barkey 1993 yılında çentikli bir dairesel numuneyi çok eksenli yüklemeler altında incelemiştir [2]. Çalışma kapsamında çentik dibindeki gerinimleri hesaplamak için dairesel çentikli numunenin gerilme – gerinim davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal hesaplamaların yapılabilmesi için geliştirdiği hesap yöntemi anizotropik metal malzemeler için plastisite teorisinde nominal gerilme ile çentik gerinim arasında doğrudan bağlantı kuran gerilme uzayında akma yüzeyini tanımlamıştır. Sonuç olarak çalışma kapsamında kullanılan model ile elde edilen

sayısal sonuçların, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğunu kaydetmiştir [2].

Firat 2011 yılında Barkey'in çalışmasında kullandığı dairesel çentikli numuneyi kullanarak, çentik dibi gerinimlerini araştırmak için sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiştir. SAE1070 çeliği kullanılarak yapılan çalışmalarda test numunesi orantısız ve orantısız olmayan yükleme koşullarının da bulunduğu 20 farklı test gerçekleştirmiştir. Temsili bir gerilme uzayında bir akma yüzeyi ile birlikte bir kinematik pekleşme modeli testler kapsamında kullanılmıştır. Burada sayısal sonuçların test sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür [3]. Firat, von Mises akma kriteri ile birlikte çoklu komponentli bir kinematik pekleşme kuralı kullanarak aynı dairesel çentikli numune ile başka bir çalışma daha yapmıştır. Çalışma kapsamında toplamda 6 adet olacak şekilde orantısız ve orantısız olmayan yükleme koşullarında farklı simülasyonlar yapmıştır. Sonuç olarak, deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların tutarlı olduğunu kaydetmiştir ve önerilen modelin yorulma ömür tahmininde kullanılabileceğini belirtmiştir [4]. Son olarak Akşen ve arkadaşları aynı dairesel çentikli numune ile benzer çalışmalar yapmıştır. Birleşik orantısız ve orantısız olmayan yüklemeler altında, dairesel, çentikli bir numunenin farklı öteleme tensörü parametrelerinin [backstress] çevrimsel davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir [5].

Joo ve arkadaşları monotonik çekme ve tersinir çekme – basma yükleme koşulları altında TWIP980 ve TRIP980 çeliklerinin gerilme – gerinim davranışını incelemiştir. Malzemelerin farklı hızlardaki çevrimsel davranışları ile birlikte Bauschinger etkisini karakterize etmek için sayısal yaklaşımda birleşik izotropik ve kinematik pekleşme modelini içeren hıza bağlı bir malzeme modeli kullandılar. Joo ve arkadaşları önerilen malzeme modelinin geri esneme (springback) tahmininin yanı sıra sac şekillendirme uygulamalarında da kullanılabileceğini belirtmişlerdir [6]. Huh ve arkadaşları yeni bir birleşik pekleşme kuralı kullanarak DQ ve DP590 çeliklerin ortalama ve farklı gerinim değerleri altındaki çevrimsel davranışını incelemiştir. Ek olarak hem SEY simülasyonları hem de deneysel uygulamalar farklı karmaşık yükleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bauschinger etkisinin gerinim hızına bağımlılığı da

değerlendirilmiş ve Bauschinger etkisinin gerinim hızlarına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır [7].

Ohno ve arkadaşları plastik gerinim kümülatif birikiminin ve çevrimsel gerilme rahatlamasının azaltılması için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Yeni algoritmanın doğruluğunu tespit edebilmek için delikli bir plakayı kabuk ve katı elemanlar kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir. Isıl işlem görmüş bir OFHC bakır malzeme çalışma için seçilmiş ve birleşik kinematik pekleşme kuralı kullanılarak modellenmiştir. Sonuç olarak yeni algoritmanın iki ve üç boyutlu gerilme durumları için doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir [8]. Zhang ve arkadaşları Ohno'nun kullanmış olduğu aynı numuneyi kullanarak yeni bir doğrusal olmayan anizotropik kinematik pekleşme modelini ve doğrusal olmayan izotropik pekleşme modelini de hesaba katmış ve çevrimsel plastisite için yeni bir pekleşme modeli oluşturmuştur. Çalışma sonucunda, yeni pekleşme modeli ile yapılan tahminlerin farklı malzeme tipleri ve yükleme koşulları için çoğu zaman uygun olduğunu raporlamışlardır [9]. Montans ve arkadaşları aynı numune için başka bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada geniş gerinim miktarları için yeni bir doğrusal olmayan kinematik pekleşme kuralı tanımlanmıştır. Yeni yaklaşımın, yumuşak malzemeler söz konusu olduğunda büyük gerinimler için uygun olduğu ve malzeme anizotropisi veya depolanan enerjinin biçimi göz önüne alındığında herhangi bir kısıtlaması olmadığı bildirildi [10].

Fu ve arkadaşları, çekme – burulma yükleme koşulları altında çevrimsel yüklemeye maruz kalan ince çelik tellerin plastik geriniminin kümülatif artışını araştırmışlardır. Farklı yükleme koşulları altında ince AISI 316L çeliğinden üretilen teller üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları ile karşılaştırmak için, yapılan çalışma sonlu elemanlar yöntemi ile de farklı kinematik pekleşme kuralları kullanılarak modellenmiştir. Makro temelli modeller için sayısal sonuçların plastik gerinimin kümülatif artışını modellemede doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir [11].

Shojaei ve arkadaşları CS1026 çeliğinin çevrimsel yüklemeler altında plastik gerinimin kümülatif artışının davranışını incelemek için bir birleşik pekleşme kuralı kullandı. Çalışma kapsamında deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde

edilen sayısal sonuçlar karşılaştırıldı. Sonuç olarak, kullanılan kinematik pekleşme modelinin, farklı, tekrarlı yükleme koşullarında malzeme davranışını doğru olarak tayin ettiği belirtildi [12].

Badvana ve arkadaşları SS304 çeliğinin plastik gerinimin kümülatif artışının davranışını incelemek için çevrimsel yüklemeler altında sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirdi. Çalışma kapsamında kullanılan malzemenin davranışını tahmin edebilmek için, von Mises akma kriteri ve bir bileşik pekleşme kuralı uygulandı. Çalışma sonucunda, kullanılan pekleşme kuralı ile yapılan tahminlerin deneysel sonuçlar ile tatmin edici seviyede uyduğu belirtildi [13]. Tasavori ve arkadaşları 9Cr-1Mo çeliğinin çevrimsel yüklemeler altında, plastik gerinimin kümülatif artışını tespit edebilmek için benzer çalışmalar yaptı. Çalışma kapsamında sunulan birleşik pekleşme modeli kullanılarak tahmin edilen sayısal sonuçlar ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak farklı geometrilere sahip numuneler bir SEY yazılımında simüle edildi. Çevrimsel gerinim birikiminin gözlemlendiği ve birikmiş plastik gerinim miktarının, numunelerin geometrisi ile ilişkili olduğu bildirilmiştir [14].

Nath ve arkadaşları, farklı yükleme koşulları altında, çevrimsel olarak stabil olan malzemelerin plastik geriniminin kümülatif artışının etkisini incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, yeni tanımlanan bir birleşik kinematik pekleşme kuralının tahminlerinden ve deneysel çıktılarla elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yeni model ışığında elde edilen tahminlerin deneysel çıktılar ile örtüştüğü bildirilmiştir [15].

Lee ve arkadaşları pekleşme davranışının yöne bağlı değişimini incelemek için çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Farklı malzeme çeşitleriyle pek çok sayıda sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yeni bir birleşik pekleşme kuralı kullanılarak Bauschinger yöne bağlı değişimi incelenmiş ve elde edilen tahminler literatürde yer alan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda yeni model tahminlerinin yüksek oranda başarı elde ettiği belirtilmiştir [16].

Qin ve arkadaşları karmaşık yükleme koşulları altında farklı alüminyum ve çelik alaşımlarının davranışını incelemek için yeni bir birleşik pekleşme kuralı tanıtmışlardır. Modelin kullanımı ile elde edilen sonuçlar EDDQ saf alüminyum ve DP780 çeliği ile yapılan deneysel testlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar yeni tanımlanan modelin, ilgili malzemeler göz ününe alındığında Bauschinger etkisini, kalıcı yumuşamayı ve geçici pekleşmeyi farklı gerinim koşullarında modellemede yeterli seviyede olduğunu göstermiştir [17].

## **1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışması kapsamında birleşik pekleşme modeli kullanılmıştır. Malzemenin kinematik pekleşme davranışı Armstrong – Frederic birleşik gerilme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, literatürde daha önceden yapılmış olan sonuçlarla ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak modelin tahmin performansı değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde temel mekanik testler ve literatürde var olan ve çalışma kapsamında kullanılan kinematik pekleşme modelleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan Armstrong – Frederic birleşik pekleşme kuralı hakkında bilgi verilmiştir.

Tez kapsamında bulunan ikinci bölümde yapılan çalışmalara ait deneysel ve analitik yöntemler anlatılmıştır. Bu deneysel ve analitik yöntemler malzemelerin temel mekanik özelliklerinin elde edilmesinde kullanılan, mühendisliğin temel yöntemleridir. Bölüm içerisinde bazı temel mühendislik formüllerine yer verilmiştir. Tez çalışmasının üçüncü bölümünde literatürde var olan temel kinematik pekleşme parametrelerine yer verilmiştir. Bölüm içerisinde temel kinematik pekleşme modelleri ve bu modellerin önemli noktalarından bahsedilmiştir. Yine bu bölüm içerisinde akma yüzeyi kavramı ve akma yüzeyinin öteleme tensörü olan “backstress” kavramından bahsedilmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmalar kapsamında üç farklı uygulama yapılmıştır. Bu uygulamalar geniş gerinim aralığında bir tek eleman üzerine gelen çevrimsel yüklemelerin sonucunda elde edilen çevrimsel kinematik pekleşme etkileri, tek eleman üzerine gelen çevrimsel basit kayma gerilmelerinin kinematik pekleşme etkileri ve delik bulunan bir bakır plakanın birleşik, çekme ve çevrimsel eğme yüklerine maruz kalması ile elde edilen kinematik pekleşme etkilerinin incelenmesi hakkındadır. Elde edilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde literatürde var olan çalışmalar ile karşılaştırılacaktır.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde, çalışmalar kapsamında modellenen malzemelerin karakterizasyonu anlatılmıştır. Bu kapsamda malzemelerin kinematik pekleşme parametreleri, temel mekanik özellikleri anlatılmış ve bu değerlerin nasıl elde edildiği konusunda bilgi verilmiştir.

Tez çalışmasının altıncı bölümünde sonlu elemanlar yönteminden bahsedilmiştir. Çalışmalar kapsamında kurulan analiz modelleri ile bu modellerde kullanılan eleman tiplerinin yanı sıra simülasyonlarda kullanılan sınır şartları ve bu sınır şartlarının geometriler üzerine nasıl uygulandığı anlatılmıştır. Bölüm içerisinde delikli bakır plakanın ağ örgüsü hassasiyeti çalışması ve sonuçları anlatılmıştır.

Tez çalışmasının yedinci bölümünde, yapılan çalışmaların sonuçları irdelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçlar literatürde yer alan ilgili çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Son olarak da sonuçlar hakkında yorumlar ve öneriler sunulmuştur. Tez çalışmasının sekizinci ve son bölümünde ise tez kapsamında kullanılan kinematik pekleşme modelinin avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Uygulamaların sonuçları değerlendirilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

## BÖLÜM 2. MEKANİK ESASLAR

### 2.1. Çekme Testi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin elde edilmesi için bazı mühendislik testleri yapılmaktadır. Bu testlerden en çok kullanılanı ve malzemenin mekanik özelliklerinin en kolay elde edildiği test “Çekme Testi” dir. Çekme testi kuvvet ve deplasman kontrollü olmak üzere iki farklı yöntem ile yapılabilmektedir.

Mukavemet kontrolü yapılmak istenen malzeme çekme testine tabi tutulur. Bunun için ASTM standartlarında numuneler hazırlanır. Bu numuneler hidrolik bir test cihazına bağlanarak tek eksenli bir gerilmeye maruz bırakılarak kopması sağlanır. Bu test sırasında malzemenin maruz kaldığı gerilme ve bu gerilme sonucunda malzemenin geometrisindeki değişimler ölçülür. Elde edilen bu veriler ile mühendislik gerilme – gerinim eğrisi oluşturulur. Gerilme en genel anlamda, malzemeye uygulanan dış kuvvetlere karşı malzemenin iç yapısının gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. [18]. Bu bilgiler ışığında mühendislik gerilmesi şu şekilde (Denklem 2.1) ifade edilir.

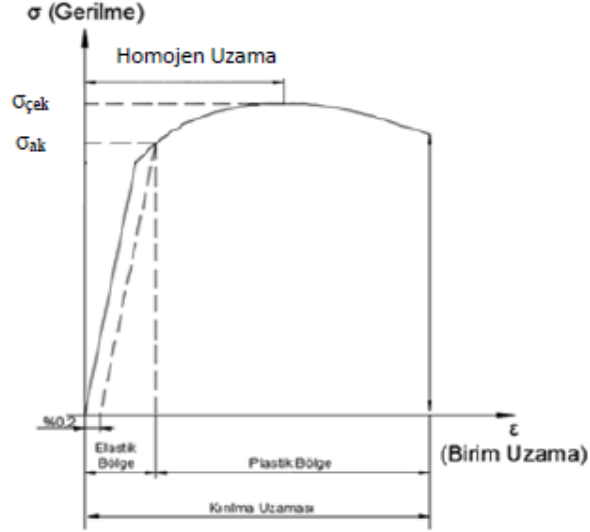
$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Bu ifadede F uygulanan kuvvet ve  $A_0$  başlangıç kesit alanını ifade etmektedir. Bir diğer gerekli veri olan mühendislik gerinimi şu şekilde (Denklem 2.2) gösterilen ifade ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{müh} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

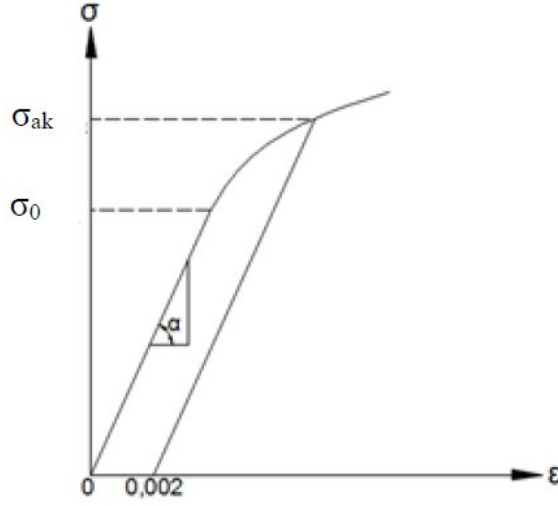


Bu ifadede  $\Delta L$  numune boyundaki değişimi  $L_0$  ise numunenin ilk boyunu ifade etmektedir. Bu değerlerin elde edilmesi ile germe – gerinim grafiği çizilebilmektedir. Şekil 2.1.'de örnek bir gerilme – gerinim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.1. Örnek gerilme – gerinim grafiği [1]

Çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikler malzemenin mukavemeti hakkında bilgi vermektedir. Bunlardan orantı sınırı, malzemenin mikro ölçekte bile herhangi bir plastik deformasyona uğramadığı, sadece elastik deformasyona uğradığı en yüksek sınır olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu bölgede malzemenin gerilme – gerinim eğrisinin eğimi sabittir. Elastisite modülü, malzemenin birim uzaması başına düşen gerilme miktarıdır ve rijitliği bir ölçüsü olarak tanımlanır. Elastisite modülü mukavemet artırıcı bir işlem olan ısıl işleminden etkilenmez, ancak sıcaklığın artmasıyla ciddi oranda düşer [1].



Şekil 2.2. Orantı sınırı ve akma gerilmesi

Şekil 2.2.'de örnek bir malzemeye ait gerilme – gerinim eğrisinde orantı sınırı ve akma gerilmesi gösterilmiştir. Grafikte yer alan  $\sigma_0$  orantı sınırını,  $\sigma_{ak}$  ise akma gerilmesini göstermektedir. Akma gerilmesi, malzemenin herhangi bir kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabildiği en yüksek gerilme değeri olarak ifade edilir. Malzeme uygulanan yük sonucunda akma gerilmesine geldiği nokta da mikro ölçekte bile olsa az bir miktar plastik deformasyon meydana gelir ve malzemeye uygulanan yük kaldırıldığında malzeme tekrar ilk haline dönemez. Bu değer, plastik geriniminin %0,2'si olarak kabul edilir ve (Denklem 2.3) aşağıda verilen ifade ile hesaplanır.

$$\sigma_{ak} = \frac{F_{(\epsilon_p = \%0,2)}}{A_0} \quad (2.3)$$

Bu denklemde üst kısımda bulunan kuvvet değeri olan  $F_{(\epsilon_p = \%0,2)}$ , malzemenin %0,2'lik gerinim noktasında maruz kaldığı kuvveti belirtmektedir. Malzemeler için bir diğer önemli mekanik özellik olan çekme gerilmesi, sünek malzemelerin boyun vermeden önce dayanabildiği en yüksek gerilme değeri olarak ifade edilir. Bu değer aşıldıktan sonra malzemenin ilk kesit alanı düşmeye başlar ve buna bağlı olarak boyun verme bölgesi olarak adlandırılan bu bölgede üç eksenli gerilmeler oluşmaya başlar [1].

Maksimum (tensile) gerilme değerleri aşağıda (Denklem 2.4) verildiği şekilde hesaplanır;

$$\sigma_{\text{çekme}} = \frac{F_{\text{maks}}}{A_0} \quad (2.4)$$

Boyun verme noktasına kadar yüklemeye maruz kalan numunede, hacim sabitliğinden dolayı homojen bir uzama meydana gelecektir. Bu hacim değişikliği şu şekilde (Denklem 2.5) ifade edilmektedir.

$$A_0 \cdot L_0 = A \cdot L \quad (2.5)$$

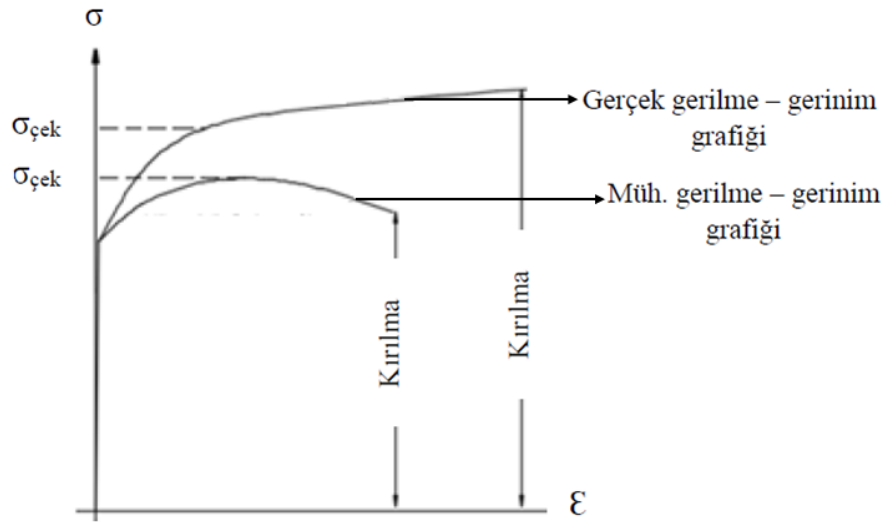
Verilen ifadede  $A_0$  test numunesinin ilk kesit alanını,  $L_0$  ise test numunesinin ilk boyunu ifade etmeyenken  $A$  ve  $L$  ise sırasıyla numunenin test sırasındaki anlık alan ve boyunu belirtmektedir. Numunenin anlık kesit alanına ve anlık boyuna göre hesaplanan gerilme - gerinim değerlerine Gerçek Gerilme – Gerinim değerleri adı verilmektedir.

Hacim sabitliği ifadesi boyun verme noktası olan maksimum çekme gerilmesine kadar geçerlidir. Bu noktadan sonra malzeme deformasyona uğrayacak ve başlangıç kesit alanı değişecektir. Buna bağlı olarak da homojen olmayan deformasyon meydana gelecektir. Boyun verme noktasından sonra yukarıda ifade edilen Gerçek Gerilme – Gerinim değerleri hesaplanmalıdır. Gerçek gerinim değerleri aşağıdaki eşitlik (Denklem 2.6) kullanılarak hesaplanmaktadır,

$$\varepsilon_{\text{gerçek}} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{\Delta L}{L} + 1\right) \quad (2.6)$$

Gerçek gerilme değeri ise aşağıdaki ifade (Denklem 2.7) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{\text{gerçek}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} + 1\right) \quad (2.7)$$



Şekil 2.3. Gerçek gerilme – gerinim grafiği ile mühendislik gerilme – gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 2.3.'te gerçek gerilme – gerinim değerleri ile mühendislik gerilme – gerinim değerleri karşılaştırılmıştır. Burada kayda değer bir fark olduğu görülmektedir. Gerçek gerilme – gerinim değerleri hesaplanırken numunenin ilk kesit alanı ve ilk boy değerleri kullanılmaktadır. Test sırasında boyun verme noktası geçildikten sonra hacim değişimi sabitliğinden dolayı malzemenin ilk kesit alanı azalmaktadır. Buna bağlı olarak da malzemenin anlık boy ve anlık alan değerleri kullanılarak hesaplanan mühendislik gerilme değeri, gerçek gerilme değerinden yüksek çıkmaktadır.

Malzemenin boyun verme noktasından önce tek eksenli gerilmeye maruz kaldığı belirtilmişti. Bu noktaya kadar gerilme – gerinim arasında lineer bir ilişki mevcuttur. Bu durum Hooke Kanunu olarak bilinmektedir ve aşağıda (Denklemler 2.8) gösterildiği üzere ifade edilmektedir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

Metallerde akma gerilmesinin üzerindeki gerilme değerlerinde malzemenin mukavemet değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum pekleşme olarak ifade edilir. Malzeme pekleşme noktasını geçmeye başladığında gerilme – gerinim değerleri

arasında non-lineer bir ilişki başlamaktadır. Bu ilişki Swift Denklemi ile ifade edilmektedir ve aşağıdaki ifade (Denklem 2.9) ile gösterilmiştir.

$$\sigma_{gerçek} = K \cdot \varepsilon_p^n \quad (2.9)$$

Bu denklemde yer alan K malzemenin mukavemet katsayısını, n pekleşme üstelini ve son olarak  $\varepsilon_p$  plastik gerinimi ifade etmektedir. Akma gerilmesinden sonra sonra yer alan plastik bölgede yer alan gerçek gerilme – gerinim değerlerinin yar aldığı eğri akma eğrisi olarak ifade edilir. Akma eğrisi çizilirken gerçek gerinim, plastik gerinim cinsinden ifade (Denklem 2.10) edilmektedir.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_T - \varepsilon_e \quad (2.10)$$

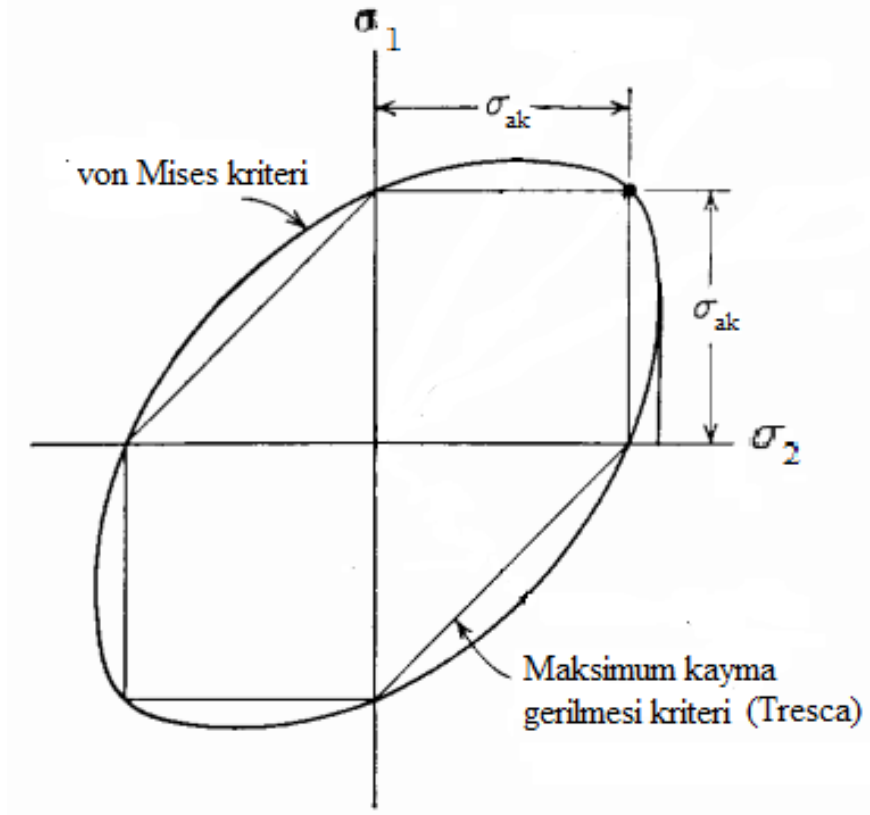
Burada  $\varepsilon_t$  toplam gerinim ya da gerçek gerinim,  $\varepsilon_e$  ise elastik gerinim olarak ifade edilmektedir. Elastik gerinim değeri Hooke Kanunu'na tabi olarak aşağıdaki ifadede (Denklem 2.11) gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_{gerçek}}{E} \quad (2.11)$$

## **BÖLÜM 3. PEKLEŞME MODELLERİ**

Önceki bölümlerde malzemenin akma gerilmesi sonrasında zorlanmaya devam ettiği noktalarda kalıcı deformasyonun meydana geldiğini ve malzemenin bu etkilerden dolayı pekleştiği anlatılmıştı. Bu bölümde pekleşme olayının ne olduğu, sayısal olarak nasıl modellendiği ve örnek pekleşme modelleri anlatılacaktır.

Malzemenin pekleşme davranışı farklı yöntemlerle ifade edilmiştir. Temel olarak izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme modeli olmak üzere iki çeşit pekleşme modeli mevcuttur. Bu modeller, akma yüzeyinin yükleme şartları altındaki değişimini tanımlamaktadır. Akma yüzeyi gerilme uzayında malzemenin plastik deformasyona uğramadan dayanabildiği maksimum gerilme sınırını temsil etmektedir [19]. Akma yüzeyinin orantısal genişlemesi izotropik pekleşme kuralı ile ifade edilirken, yüzey merkezinin yer değişimi kinematik pekleşme kuralı ile tanımlanır. Çeşitli akma yüzeyi tanımlamaları yapılmaktadır. Şekil 3.1.'de bu akma yüzeyi tanımlamalarından olan Von Mises ve Tresca Akma Yüzeyleri şematik olarak gösterilmiştir. Tez kapsamında yapılacak olan uygulamaların hepsinde von Mises akma yüzeyi kullanılacaktır.



Şekil 3.1. İki boyutta von Mises – Tresca akma yüzeylerinin karşılaştırılması

Çalışma kapsamında kullanılacak olan von Mises akma yüzeyi temel olarak aşağıda verildiği gibi (Denklem 3.1) ifade edilmektedir.

$$f_{VM} = \sqrt{\frac{2}{3}(\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{\alpha}}) : (\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{\alpha}})} - \sigma_0 = 0 \quad (3.1)$$

Burada  $\underline{\underline{S}}$ , gerilme tensörünün deviatorik bileşenini ifade ederken  $\underline{\underline{\alpha}}$ , öteleme (backstress) tensörünü, son olarak da  $\sigma_0$  akma gerilmesini ifade eder. Burada, gerilmenin deviatorik bileşeni verilen ifade (Denklem 3.2) ile gösterilir.

$$\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{\sigma}} - \lambda \underline{\underline{\sigma}}_m \quad (3.2)$$

Burada,  $\lambda$  Kronecker Delta ve  $\sigma_m$  ortalama gerilme olarak ifade edilir.  $\sigma$  ise Cauchy gerilme tensörüdür. Geriliminin elastik ve plastik bileşenleri tensörel olarak aşağıda (Denklem 3.3) verildiği gibi ifade edilir.

$$d\underline{\underline{\varepsilon}} = d\underline{\underline{\varepsilon}}_e + d\underline{\underline{\varepsilon}}_p \quad (3.3)$$

Cauchy gerilme tensörü Hooke Kanunu kullanılarak aşağıda gösterildiği gibi (Denklem 3.4) ifade edilir.

$$d\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}}_e : d\underline{\underline{\varepsilon}}_e \quad (3.4)$$

Burada  $C_e$  elastik tensördür.

Malzemelerin pekleşme davranışının tanımlanabilmesi için gerekli olan bir diğer bileşen ise akma kuralıdır. Akma kuralı plastik gerinim ile gerilme artışı arasında bir ilişki kurmaktadır. Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar kapsamında bağdaşık akma kuralı kullanılmaktadır ve aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.5) ile gösterilmiştir.

$$d\underline{\underline{\varepsilon}}_p = d\lambda \frac{df}{d\underline{\underline{\sigma}}} \quad (3.5)$$

Yukarıda verilen denklemde  $d\lambda$ , plastic orantısallık faktörünü belirtir. Plastik deformasyon sırasında akma yüzeyi genişler ve Cauchy gerilmeleri bu gerilmeye uymalıdır. Bu da aşağıda verilen eşitlikteki (Denklem 3.6) duruma sebep olmaktadır;

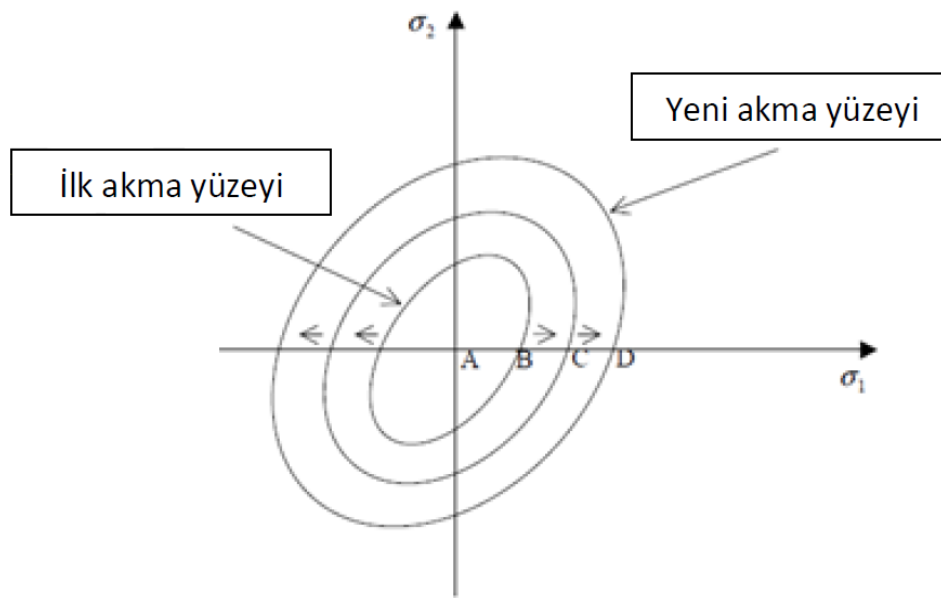
$$df = \frac{df}{d\underline{\underline{\sigma}}} : d\underline{\underline{\sigma}} + \frac{df}{d\underline{\underline{\varepsilon}}_p} : d\underline{\underline{\varepsilon}}_p = 0 \quad (3.6)$$

Pekleşme davranışının tanımlanmasında son bileşen pekleşme kuralıdır. Temel olarak pekleşme modelleri izotropik pekleşme, kinematik pekleşme ve kombine pekleşme kuralı olarak 3 sınıfta incelenir. Bir sonraki bölümlerde örnek pekleşme kuralları açıklanacak ve tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan pekleşme modeli hakkında bilgi verilecektir.



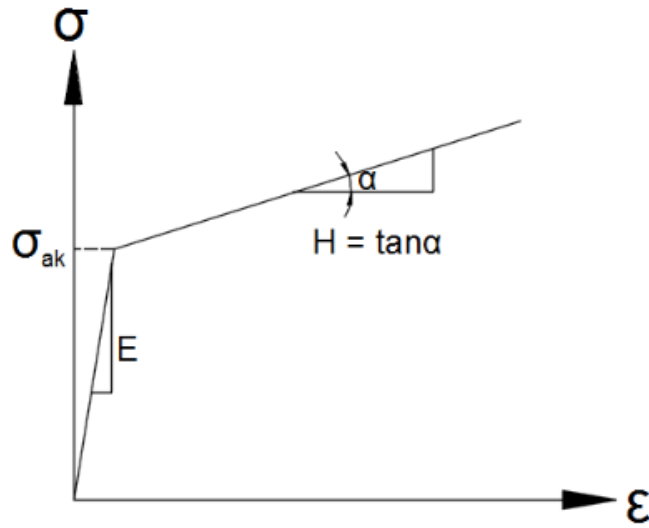
### 3.1. İzotropik Pekleşme Modeli

Pekleşme kurallarının ilki izotropik pekleşme modelidir. Bu kural, pekleşme kuralları arasında en temel ve basiti olarak tanımlanmaktadır. Bu kurallarda akma yüzeyi genişleyebilir ancak hareket edemez [19,20]. Kuralın bu temel özelliğinden dolayı, sıradan izotropik pekleşme modelleri çevrimsel yükler altında olan malzemelerin plastik davranışını modellemekte yetersiz kalır [19]. Şekil 3.2.'de akma yüzeyinin hareket etmeden genişlemesine örnek gösterilmiştir.



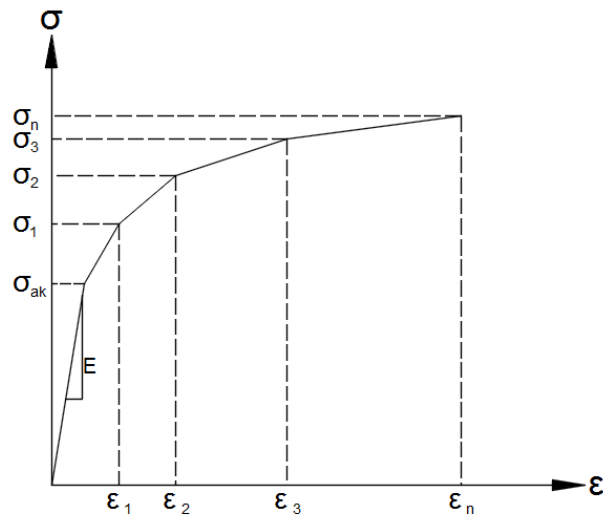
Şekil 3.2. İzotropik pekleşme [20]

Plastik davranışı tanımlamak karmaşık bir problemdir. Mises izotropik pekleşme kuralına göre malzemenin plastik davranışı 3 farklı şekilde tanımlanabilir [18]. İlk yöntem bilineer izotropik pekleşme modeli olarak bilinir. Bu modelde malzemenin plastik davranışı gerilme – gerinim eğrisi üzerinde tek bir lineer çizgi ile ifade edilir. Şekil 3.3.'te malzemenin bilineer davranışını temsilen örnek bir eğri verilmiştir.



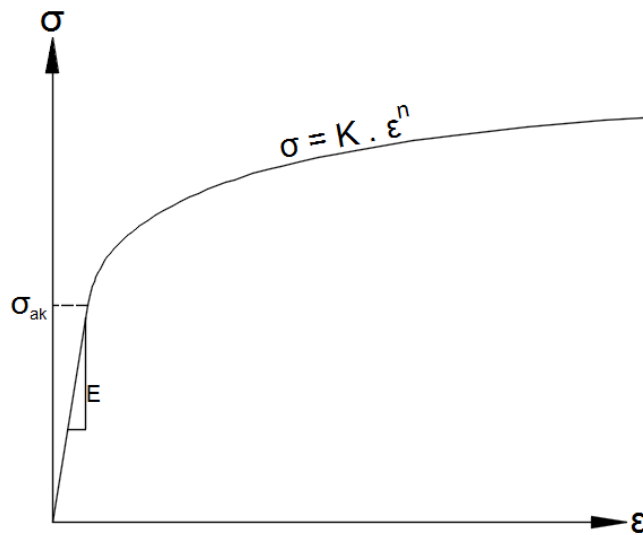
Şekil 3.3. Bilineer izotropik malzeme davranışını gösteren bir malzemeye ait gerilme – gerinim eğrisi [18]

Bu malzeme modelinde, elastik bölgenin eğimi elastisite modülü ile tanımlanırken, plastik bölgenin eğimi tanjant modülü olan  $H$  ile tanımlanır. Bir diğer malzeme modeli ise multilineer izotropik pekleşme modelidir. Bu modelde plastik davranış, gerilme – gerinim grafiğinde farklı pekleşme modülüne sahip farklı çizgilerle tanımlanmaktadır. Şekil 3.4.’te multilineer pekleşme modeline sahip bir malzemenin gerilme – gerinim eğrisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Multilineer pekleşme modeline sahip bir malzemenin gerilme – gerinim eğrisi [18]

Lineer olmayan pekleşme modelinde ise malzemenin plastik davranışı bir eğri ile tanımlanmaktadır. Bu kapsamda mukavemet katsayısı ve pekleşme üsteli olmak üzere iki farklı parametreye ihtiyaç duyulmakta ve bu parametreler mühendislik yazılımlarında kullanılan eğri uydurma yöntemleri elde edilebilmektedir. Bu model non-linear izotropik malzeme modeli olarak tanımlanır. Şekil 3.5.'te bu modele uygun bir malzeme davranışı şematik olarak gösterilmiştir.

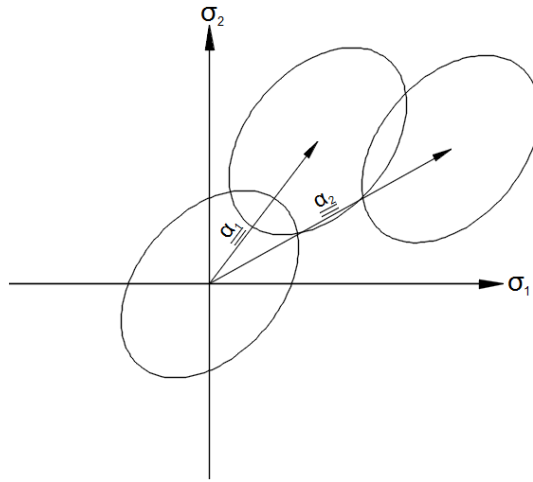


Şekil 3.5. Non-Linear izotropik malzeme davranışının temsili gösterilmesi

Bu modelde malzemenin plastik davranışı bir eğri olarak tanımlanır.

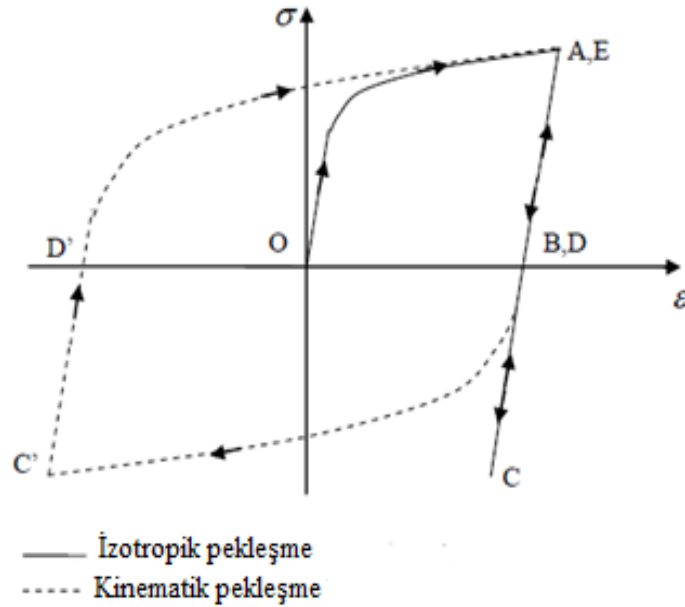
### 3.2. Kinematik Pekleşme Kuralı

Akma yüzeyinin gerilme uzayında yer değiştirebildiği pekleşme modeli kinematik pekleşme modeli olarak tanımlanmaktadır [19]. Şekil 3.6.'da kinematik pekleşme modeli şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kinematik pekleşme modelinin şematik olarak gösterilmesi [18]

Burada  $\underline{\alpha}$  ile gösterilen öteleme (backstress) tensörü akma yüzeylerinin değişimi olarak tanımlanmaktadır [19]. Kinematik pekleşme modellerinin önemli bir özelliği de Bauschinger etkisini modelleyebilmeleridir. Şekil 3.7.'de izotropik pekleşme ile kinematik pekleşmenin farkı örnek bir malzeme üzerinde gösterilmiştir.



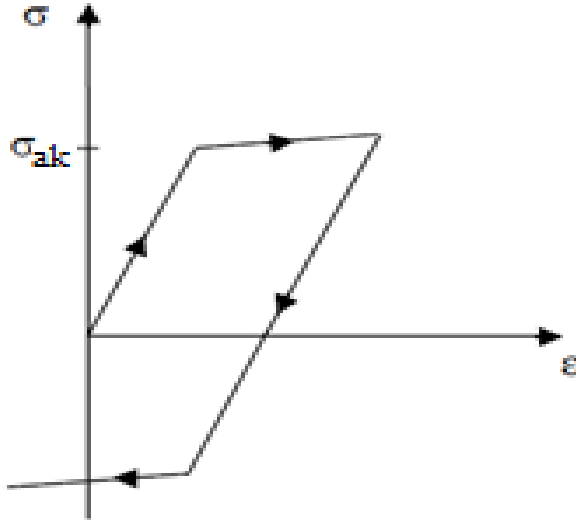
Şekil 3.7. İzotropik ve kinematik pekleşme modellerinin farkının şematik gösterimi

### 3.3. Lineer Kinematik Pekleşme Kuralı

Prager tarafından önerilen ilk model olan pekleşme modeli lineer kinematik pekleşme modellerinin en basitidir. Bu modele göre pekleşme kuralı akma yüzeyinin yer değişmesine dayanmaktadır. Prager lineer kinematik pekleşme modeli aşağıda verildiği gibi (Denklem 3.7) ifade edilmektedir [21].

$$d\underline{\underline{\alpha}} = a_p \cdot d\underline{\underline{\varepsilon}}^p \quad (3.7)$$

Denklemde ifade edilen  $d\underline{\underline{\alpha}}$  akma yüzeyi öteleme tensörü artırımı,  $a_p$  malzeme veya oransallık sabiti,  $d\underline{\underline{\varepsilon}}^p$  ise plastik şekil değişimi artırımıdır [21]. Bu model akma yüzeyi gerilme uzayında plastik birim şekil değişimi doğrultusunda lineer bir şekilde yer değiştirdiğini savunmaktadır [22]. Buna bağlı olarak da öteleme tensörü ile plastik gerinim arasında lineer bir ilişki olduğunu kabul etmektedir [19, 21, 23]. Bu model  $a_p$  ile ifade edilen bir malzeme parametresi içerir ve bu parametre çok eksenli gerilme – gerinim eğrisinden kolaylıkla elde edilebilir [22]. Bu sebeplerden dolayı Prager modeli simetrik ve simetrik olmayan yükleme koşullarında herhangi bir değişim göstermez. Şekil 3.8.'de Prager lineer pekleşme kuralına göre malzeme davranışı gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Prager Lineer pekleşme modeline göre gerilme – gerinim eğrisi [19]

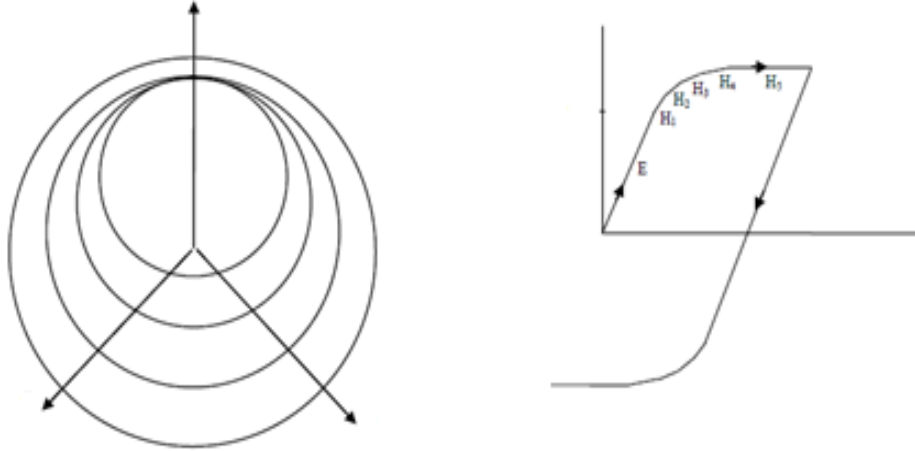
Lineer kinematik pekleşme kuralı üzerine literatürde Prager dışında da çalışmalar yapılmıştır.

### 3.4. Multilineer Kinematik Pekleşme Kuralı

İlk multilineer (çok yüzeyli model) 1969 yılında Mroz tarafından önerilmiştir. Bu modelde her bir yüzey gerilme uzayında sabit bir pekleşme modülünü temsil eder [24]. Malzemenin gerilme – gerinim eğrisi bölümlere ayrılmıştır. Buna bağlı olarak malzemenin pekleşmesi lineer bölümler doğrultusunda devam etmektedir. Gerilme – gerinim eğrisi birden fazla nokta ile genellenmiştir. Her bir eğrideki pekleşme modülü aşağıdaki eşitlikte (Denklem 3.8) verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$H = \frac{d\sigma}{d\varepsilon^p} \quad (3.8)$$

Şekil 3.9.'da Mroz tarafından önerilen çok yüzeyli kinematik pekleşme modeline göre akma yüzeyleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Çok yüzeyli kinematik pekleşme modeline göre akma yüzeyleri [19]

Daha sonra, Besseling [25] ve Mroz [26] Prager modelinin bir modifikasyonu olan çok yüzeyli kinematik pekleşme modelini önermiştir. Ancak bu model de çevrimsel yüklemeler altında plastik gerininin birikimini modellemekte başarısız olmaktadır

Bununla birlikte literatürde çok yüzeyle kinematik pekleşme modellerine başka örnekler de mevcuttur [27, 28].

### 3.5. Nonlinear Kinematik Pekleşme Kuralı

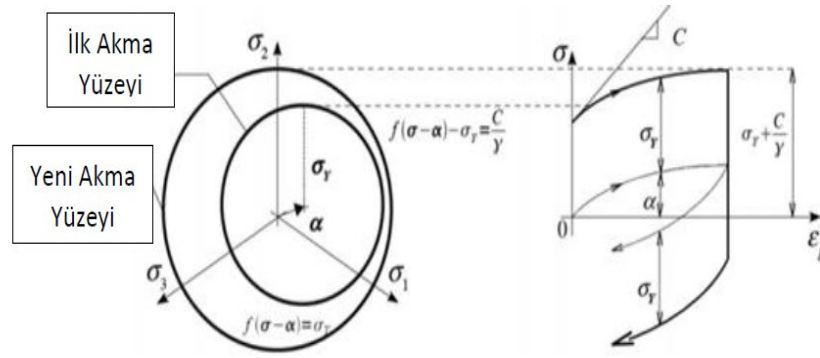
Bu bölümde tez kapsamında yapılan sayısal uygulamalarda kullanılan Armstrong – Frederic nonlinear kinematik pekleşme modeli ve uygulamalarda karşılaştırma amacıyla kullanılan Ohno – Wang nonlinear kinematik pekleşme modelleri incelenmiştir.

Armstrong ve Frederic, Bauchinger etkisini tanımlamak için 1966 yılında bir model tanıtmıştır. Bu modelde akma yüzeyinin gerilme uzayında hareket etmesine dayanan başka bir model ileriye sürmüştür ve bir tanesi normal akma yüzeyi, diğeri gerilme uzayında sabit varsayılan limit yüzey olmak üzere iki farklı akma yüzeyini ve değişken bir pekleşme modülünü kapsamaktadır. Armstrong ve Frederic'in önermiş olduğu modelin matematiksel ifadesi (Denklem 3.9) şu şekildedir [20, 29, 30].

$$d\underline{\alpha} = \frac{2}{3} \cdot C \cdot d\underline{\varepsilon}_p - \gamma \cdot \underline{\alpha} \cdot d_p \quad (3.9)$$

Bu denklemde “C” ve “ $\gamma$ ” malzeme parametreleri olarak tanımlanırken, “ $d_p$ ” eşdeğer plastik gerinim artırımındır [21]. Akma yüzeyi öteleme tensörü artırımını, akma yüzeyi merkeziyle dolaylı olarak ilişkilidir ve bu yüzden nonlinear kinematik pekleşme modeli olarak bilinmektedir [30]. Eşdeğer plastik gerinim artırımını aşağıdaki ifade (Denklem 3.10) ile gösterilmektedir [21].

$$d_p = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot d\underline{\varepsilon}^p \cdot d\underline{\varepsilon}^p} \quad (3.10)$$



Şekil 3.10. Armstrong – Frederic nonlinear kinematik pekleşme modeli [30]

Şekil 3.10.'da Armstrong – Frederic Modeline göre akma ve sınır yüzeyi ile öteleme tensörü gösterilmiştir.

Ohno backstress'i birkaç bileşene ayırmıştır. Ohno tarafından tanıtılan model [8] aşağıda (Denklem 3.11) verilmiştir.

$$d\underline{\underline{\alpha}}^{(i)} = \frac{2}{3} h^{(i)} d\underline{\underline{\epsilon}}^p - \zeta^{(i)} \left( \frac{\underline{\underline{\alpha}}^{(i)}}{r^{(i)}} \right)^{k^{(i)}} \alpha^{(i)} dp \quad (3.11)$$

Burada,

$$\underline{\underline{\alpha}} = \sum_{i=1}^m \underline{\underline{\alpha}}^{(i)} \quad (3.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte (Denklem 3.12)  $dp$  eşdeğer plastik gerinim artımını göstermektedir.  $h$  ve  $\zeta$  parametreleri tez kapsamında kullanılan modeldeki  $C$  ve  $\gamma$  ile aynı parametrelerdir.  $H$  malzeme fonksiyonudur ve şu ifade (Denklem 3.13) ile belirtilir.

$$h^{(i)}(p) = h_0^{(i)} \rho(p) \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13'te  $\rho$  eşdeğer plastik gerinimin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi (Denklem 3.14) tanımlanmıştır,



$$\rho(p) = 1.0 + 2.11 (1.0 - e^{-9.41p}) \quad (3.14)$$

Bunun dışında,  $h_0^{(i)}$  her bir backstress componenti için farklıdır. Malzemenin izotropik pekleşmesi bir sonraki eşitlikte (Denklem 3.15) açıklanmıştır.

$$Y(p) = Y_0 \rho(p) \quad (3.15)$$

Chaboche ve Rousselier, AF kinematik pekleşme modelini temel alan yeni bir model önermiştir. Bu modelde AF tarafından önerilen kinematik pekleşme kuralında yer alan akma yüzeyi öteleme tensörünü, her birisi farklı pekleşme özelliğine sahip öteleme tensör bileşenlerinin seri açılımı olarak (Denklem 3.16 ve 3.17) ifade etmiştir [21, 31, 32].

$$\underline{\underline{\alpha}} = \sum_{i=1}^m \underline{\underline{\alpha}}^{(i)} \quad (3.16)$$

$$d\underline{\underline{\alpha}}^{(i)} = \frac{2}{3} \cdot C \cdot d\underline{\underline{\varepsilon}}^p - \gamma \cdot \underline{\underline{\alpha}}^{(i)} \cdot d_p \quad (3.17)$$

Burada  $\underline{\underline{\alpha}}^{(i)}$  öteleme tensörü bileşeni, C ve  $\gamma$  malzeme katsayılarıdır. Chaboche ve Rousselier'e göre beş adet öteleme tensörü kullanılması pek çok metalde sonucun doğruluğunu ispatlamıştır.

## **BÖLÜM 4. SAYISAL UYGULAMALAR**

Tez çalışması kapsamında 3 adet sayısal uygulama yapılmıştır ve sonuçları literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu bölümde bu çalışmaların içeriği hakkında bilgi verilecektir.

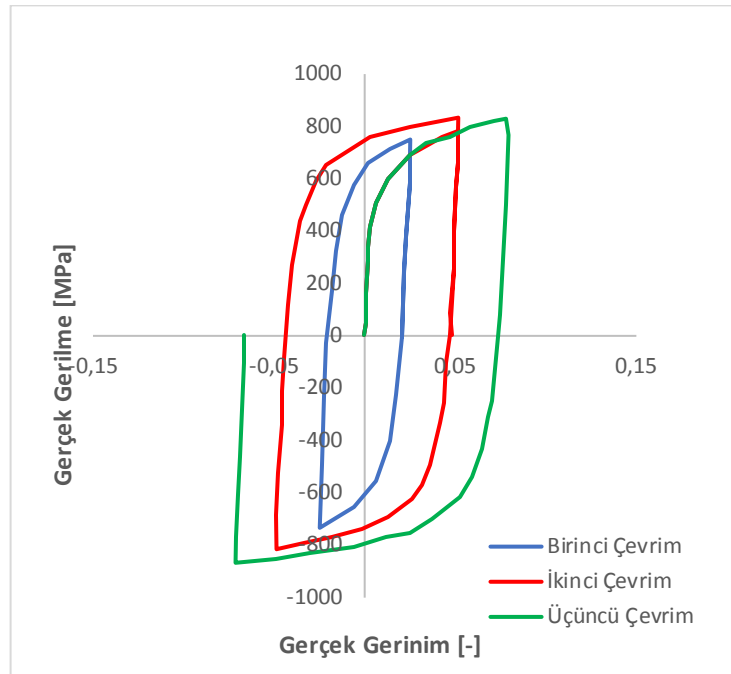
Sayısal uygulamaların tamamı Marc Mentat ticari sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçların elde edilmesinde bir kullanıcı alt programı olan “Hypela 2” alt programı kullanılmıştır. Bu alt program von Mises akma fonksiyonunu, bağdaşık akma kuralını ve birleşik izotropik kinematik pekleşme modelini içeren bir malzeme modelinin yazılıma entegre ederek Marc çözücüsü ile hesaplanmasını sağlamaktadır.

Sayısal uygulamalar sonucunda elde edilen sonuçlar, ilerleyen kısımlarda, tez çalışması kapsamında yapılan uygulamalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

### **4.1. Çevrimsel Çekme Basma Yüklemesine Maruz Kalan Tek Eleman Uygulaması**

2003 yılında Yoshida ve Uemori metallerin plastik şekillendirilmesi sırasında meydana gelen geri yaylanma etkisinin tanımlanması için yeni bir model önerdiler [33]. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarını karşılaştırarak modelin Bauschinger etkisini klasik AF modellerine göre daha iyi tahmin ettiğini bildirmiştir. 2015 yılında bu modeli bir HSS (high strength steel) çeliğe uygulayarak sonuçları irdeledi.

Yoshida ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda elde ettiği gerilme – gerinim eğrileri Şekil 4.1.’de verilmiştir [34].



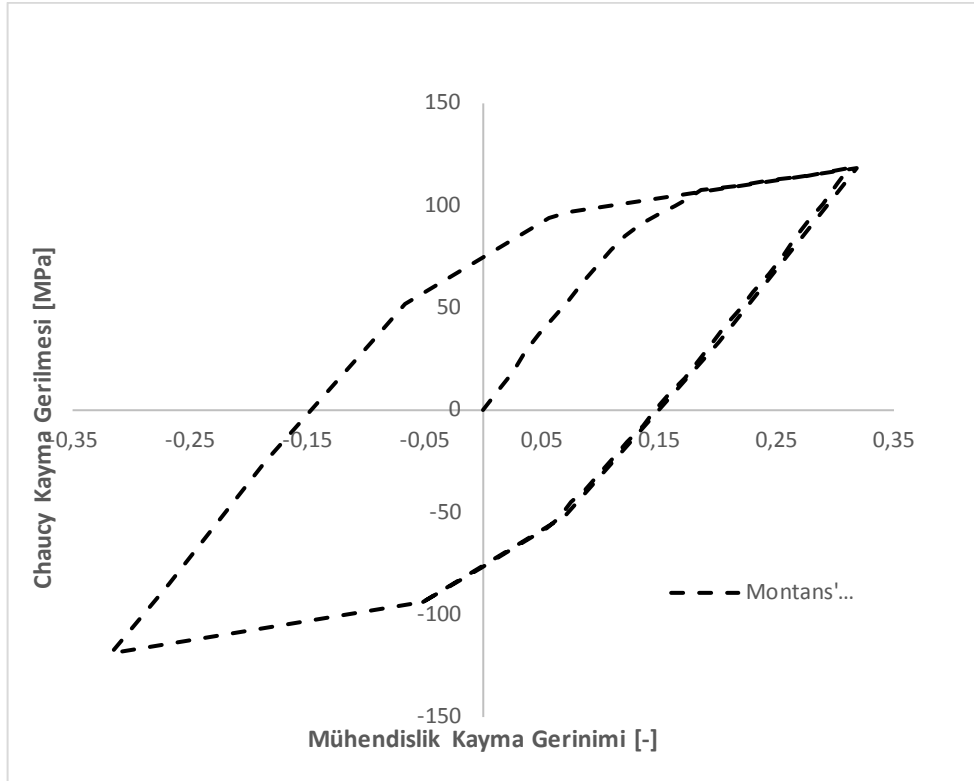
Şekil 4.1. Yoshida'nın elde etmiş olduğu sonuçlar [34]

#### 4.2. Basit Kayma Yüklemesi Etkisi Altında Tek Eleman Uygulaması

Montans 2019 yılında SUS304 çeliğinin malzeme özelliklerini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışma kapsamında SUS304 çeliğinin kinematik pekleşme parametrelerini elde etmiş ve birleşik pekleşme kuralı kullanarak elde ettiği sayısal sonuçları [10], Ishikawa'nın deneysel olarak elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır [35].

Bu çalışmada basit kayma gerilmesi altındaki tek elemanın analizi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu eleman sabit ve değişken yükleme koşullarına maruz bırakılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kayma gerilmeleri, Montans'ın sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [10].

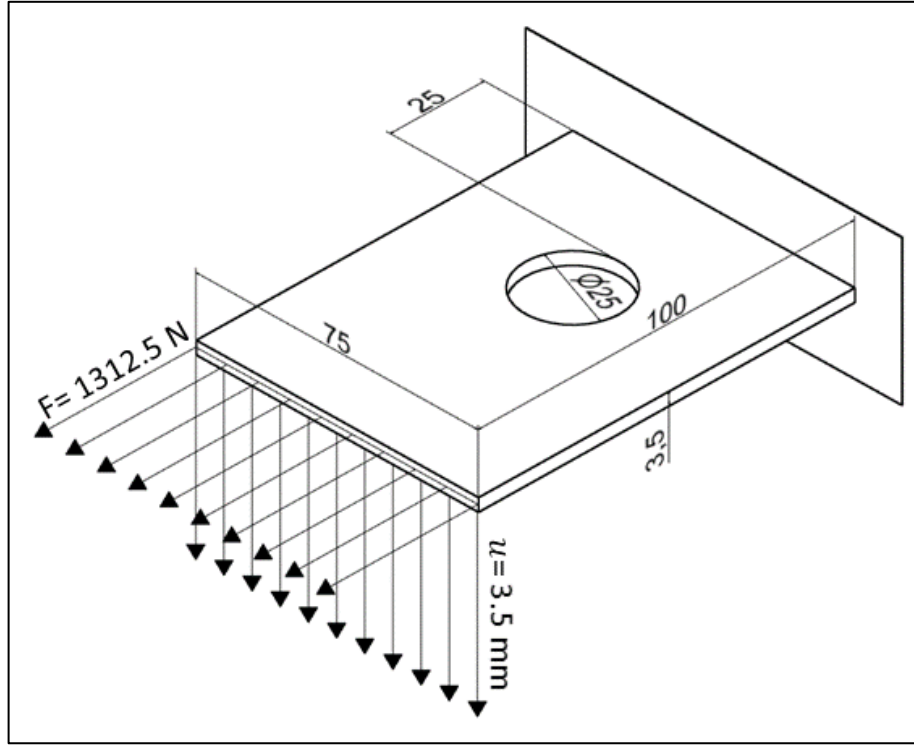
Montans'ın yapmış olduğu çalışmalarda elde ettiği gerilme – gerinim eğrileri şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Montans'ın elde etmiş olduğu sonuçlar [10]

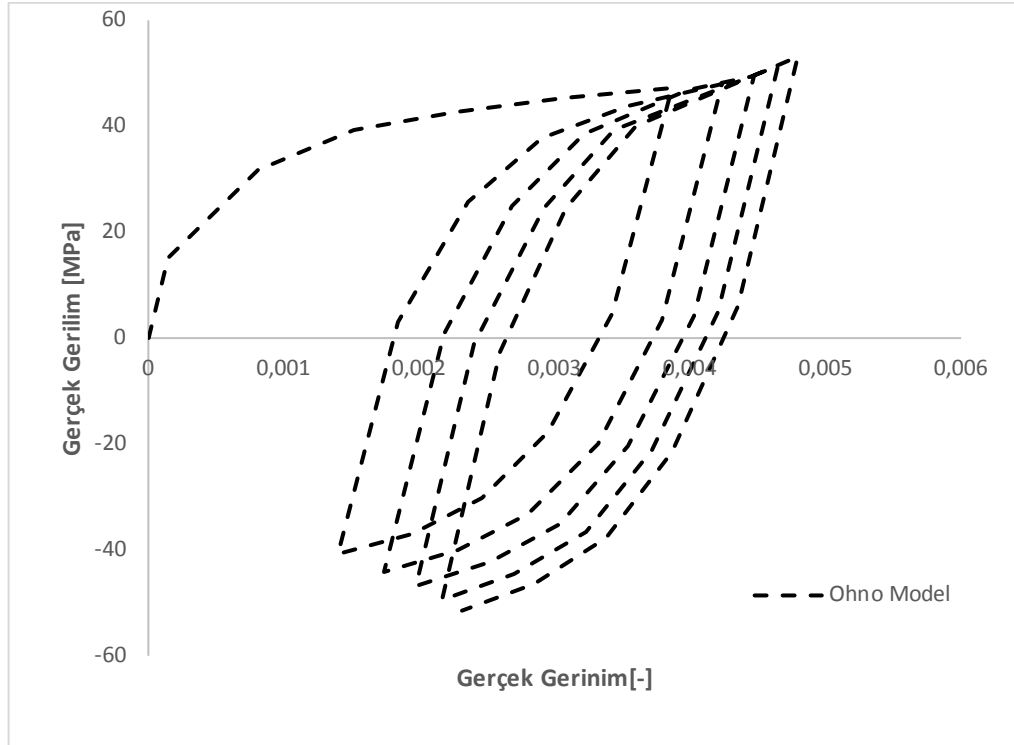
### 4.3. Birleşik ve Çevrimsel Yüklemeler Altındaki Delikli Plaka Uygulaması

Ohno'nun yapmış olduğu bu çalışmada ortasında bir delik olan bir plaka üzerine gelen kuvvetler sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir [8]. 5 MPa nominal gerilmeye neden olan 1312.5 N kuvvet plakanın bir köşesine uygulanırken diğer köşesi tüm yönlerde sabit olacak şekilde modellenmiştir. Aynı zamanda kuvvet uygulanan köşeye düzlem dışı yönde 3.5 mm yer değiştirmeye sahip çevrimsel eğme uygulanmıştır. Şekil 4.3.'te yükleme koşulları ve plakanın ölçüleri sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Modelin tanımı [8]

Çalışma kapsamında delikli levhanın sonlu elemanlar analizleri yapılacaktır. Ohno'nun yapmış olduğu testler, Marc ticari yazılımında modellenmiştir. Çalışma kapsamında Hypela 2 alt programı kullanılmış olup, kinematik pekleşme parametreleri bu alt programa tanımlanmıştır. İlerleyen bölümlerde sırasıyla modelin kurulma aşamaları ve parametrelerin belirlenme yöntemi anlatılacak olup, elde edilen analiz sonuçları yorumlanacaktır. Ohno'nun yapmış olduğu çalışmada elde ettiği çevrimsel gerilme – gerinim eğrisi Şekil 4.4.'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Ohno'nun elde etmiş olduğu sonuçlar [8]

Modelin karmaşık olması ve üzerinde kritik bölgeler bulunması sebebiyle çalışma kapsamında, ağ yapısı hassasiyet çalışması yapılacaktır. Bu hassasiyet çalışmasının yapılabilmesi için, analiz edilecek olan model kritik bölgede ve kalınlık yönünde farklı eleman sayılarıyla örülecek ve sonuçlar karşılaştırılacaktır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, analiz için en uygun yapı seçilerek çözüm süresi ve sonuç hassasiyeti açısından bir optimizasyon yapılacaktır. Bu sayede mühendisliğin temel prensiplerinden birisi olan maliyet – fayda oranı en optimal seviyede tutulmaya çalışılacaktır.

## BÖLÜM 5. MALZEME KARAKTERİZASYONU

### 5.1. Çevrimsel Çekme Basma Yüklemesine Maruz Kalan Tek Eleman Uygulaması

Yoshida ve Uemori yapmış oldukları deneyler sonucunda malzemenin mekanik özelliklerini elde etmişlerdir. Çalışma kapsamında kullanılan HSS çeliğinin test sonuçları Ref [34]'den alınarak, eğri uydurma yöntemi ile elde edilen mekanik malzeme özellikleri Tablo 5.1.'de listelenmiştir. Malzeme pekleşme eğrisi Denkem 2.9.'da belirtilen Swift kuralı kullanılarak karakterize edilmiştir.

Tablo 5.1. HSS çeliğinin mekanik malzeme özellikleri

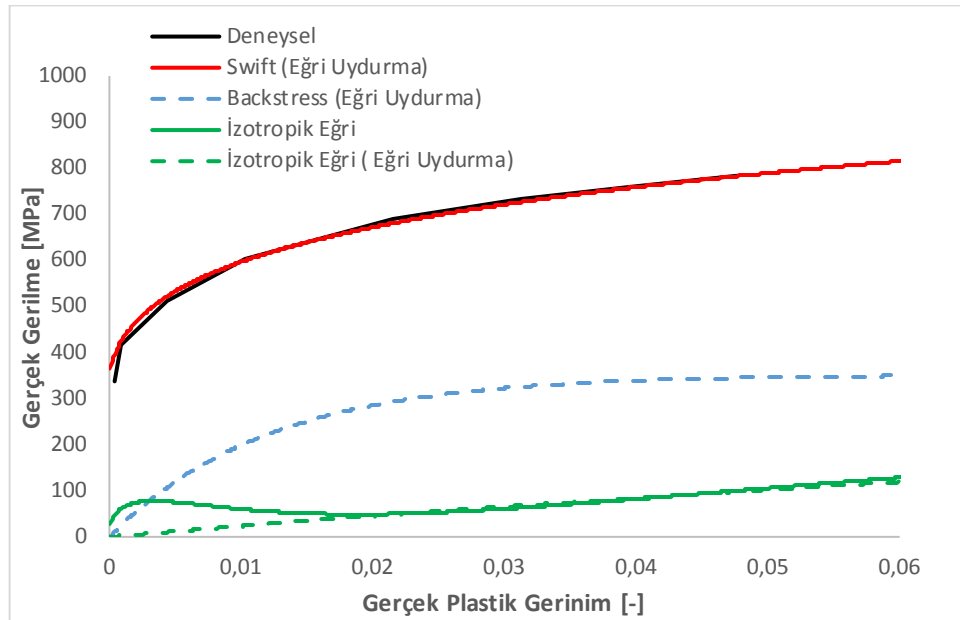
Parametre	Değer
Swift Mukavemet Katsayısı (K)[MPa]	1350
Swift Peklşme Üsteli (n)	0.18
Referans Gerinim ( $\epsilon_0$ )	0.0007
Elastisite Modülü (MPa)	210000
Poisson Oranı	0.3

Malzemenin çevrimsel yükler altındaki davranışını temsil etmek için birleşik pekleşme modeli kullanılmıştır. Kullanılan pekleşme modeline ait parametreler Excel mühendislik yazılımında eğri uydurma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Peklşme eğrisi; ilk akma gerilmesi, öteleme gerilmesi ve izotropik pekleşme eğrisinin toplamıdır. Tablo 5.2.'de elde edilen parametreler verilmiştir.

Tablo 5.2. HSS çeliğinin birleşik pekleşme katsayıları

	$\sigma_0$ [MPa]	Q[MPa]	b	C [MPa]	$\gamma$
Birleşik Peklşme	337.4	2400	6.5	29306	83.3

Bu değerler ile elde edilen izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme eğrileri Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.

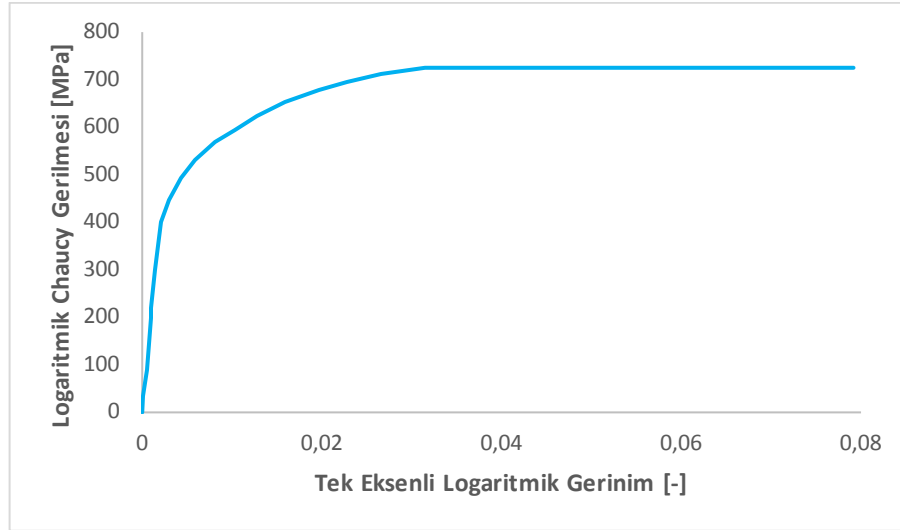


Şekil 5.1. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen akma, öteleme ve izotropik pekleşme eğrileri

## 5.2. Basit Kayma Yüklemesi Etkisi Altında Tek Eleman Uygulaması

Ishikawa yapmış olduğu testler kapsamında SUS304 çeliğinin mekanik özelliklerini elde etmiştir [35]. Bu mekanik özelliklere bağlı olarak elde etmiş olduğu gerilme – gerinim grafiği Şekil 5.2.'de verilmiştir.





Şekil 5.2. SUS304 Çeliğine ait gerilme – gerinim grafiği [35]

Çalışma kapsamında kullanılan SUS304 paslanmaz çeliğinin mekanik test sonuçları Referans [35]'ten alınarak, eğri uydurma yöntemi ile elde edilen mekanik malzeme özellikleri ve Swift parametreleri Tablo 5.3.'te listelenmiştir.

Tablo 5.3. Kinematik pekleşme parametreleri

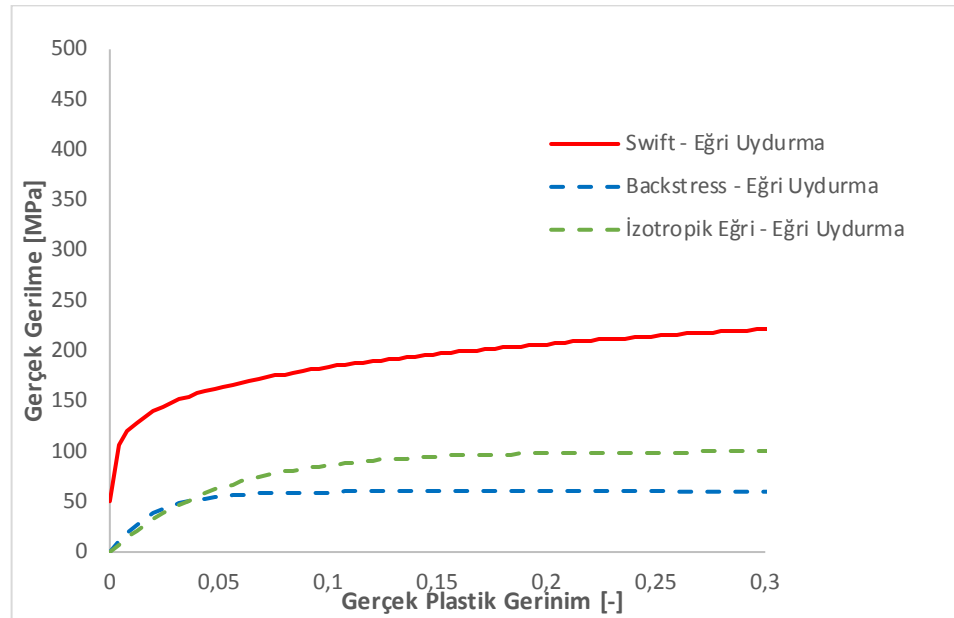
Parametre	Değer
Swift Mukavemet Katsayısı (K)[MPa]	272
Swift Pekleşme Üsteli (n)	0.17
Referans Gerinim ( $\epsilon_0$ )	0.00005
Elastisite Modülü (MPa)	198000
Poisson Oranı	0.33

Malzemenin çevrimsel yükler altındaki davranışını temsil etmek için birleşik pekleşme modeli kullanılmıştır. Çevrimsel çekme basma yüklemesine maruz kalan tek eleman uygulamasına benzer şekilde pekleşme modeline ait parametreler eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiştir. Tablo 5.4.'de elde edilen parametreler verilmiştir.

Tablo 5.4. HSS Çeliğinin kombine pekleşme katsayıları

	$\sigma_0$ [MPa]	Q[MPa]	b	C [MPa]	$\gamma$
Kombine Pekleşme	40	2000	20	1750	50

Bu değerler ile elde edilen izotropik pekleşme, öteleme tensörü (backstress) eğrileri Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen akma, öteleme ve izotropik pekleşme eğrileri

### 5.3. Birleşik ve Çevrimsel Yükl emeler Altındaki Delikli Plaka Uygulaması

Çalışma kapsamında OFHC Bakır test malzemesi olarak kullanılmıştır. Malzemenin mekanik test sonuçları Ref [8]'den alınarak, eğri uydurma yöntemi ile elde edilen mekanik malzeme özellikleri ve Swift parametreleri Tablo 5.5.'te listelenmiştir.

Tablo 5.5. OFHC Bakırın mekanik özellikleri [8]

Parametre	Değer
Swift Mukavemet Katsayısı (K)[MPa]	144
Swift Pekleşme Üsteli (n)	0.2
Referans Gerinim ( $\epsilon_0$ )	0.000011
Elastisite Modülü (MPa)	123000
Poisson Oranı	0.34

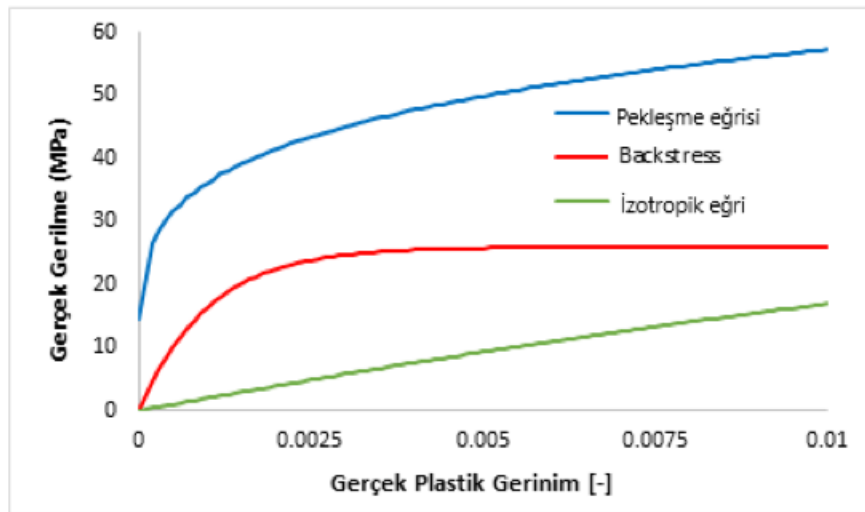
Malzemenin çevrimsel yükler altındaki davranışını temsil etmek için birleşik pekleşme modeli kullanılmıştır. Kullanılan pekleşme modeline ait parametreler Excel mühendislik yazılımında eğri uydurma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Pekleşme,

ilk akma gerilmesi, backstress ve izotropik pekleşmenin toplamı olarak kabul edilmiştir. Tablo 5.6.'da elde edilen parametreler verilmiştir.

Tablo 5.6. OFHC Bakırın birleşik pekleşme parametreleri

	$\sigma_0$ [MPa]	Q[MPa]	b	C [MPa]	$\gamma$
Birleşik Pekleşme	14.67	2060	40	26000	1000

Bu değerler ile elde edilen izotropik pekleşme, backstress eğrileri Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen akma, öteleme ve izotropik pekleşme eğrileri

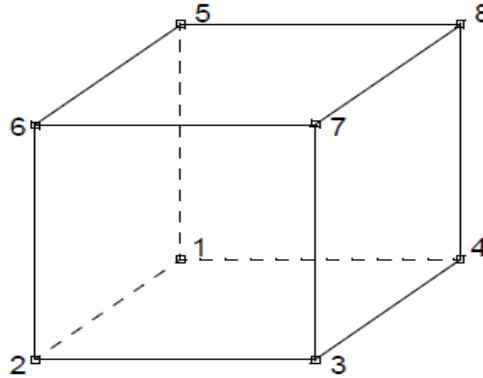
## BÖLÜM 6. SAYISAL MODELLEME

Tez çalışmasının bu bölümünde sonlu elemanlar yöntemi hakkında temel bilgiler verilecek ve tez çalışması kapsamında kullanılan sonlu elemanlar modellerinin temelleri, sınır şartları, yükleme koşulları anlatılacaktır.

Gelişen bilgisayar teknolojileri mühendislik alanında da yeni yöntemlerin geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır. Mühendislik uygulamalarında yapılan testlerin zaman ve test maliyetlerinin yüksek olması, mühendislik alanında yeni yöntemlerin bulunmasına sebep olmuştur. Bu yöntemlerden birisi de Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)'dir. SEY günümüzde mühendislik problemlerinin çözümünde büyük rol oynamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar analiz modelleri oluşturulur ve çözümlenir. Bu bilgisayar analiz modelleri, tasarım mühendislerinin ve yöntemlerin belirli bir geometrik haritalama için malzeme deformasyon tepkisini anlamasına ve süreç koşulları, malzeme özellikleri ve bazı kriterler arasında korelasyonlar kurmasına yardımcı olabilir [36]. Yöntem temel olarak karmaşık problemlerin daha küçük elemanlara indirgenmesine ve parçadan, bütüne bir çözüm elde ederek genel çözümün elde edilmesine olanak sağlar. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde önemli olan noktalardan birisi, modelleme esnasında seçilecek olan eleman tipidir. Sonlu elemanlar modelleri temel düğüm noktalarından ve bu düğüm noktalarını birbirlerine bağlayan elemanlardan oluşmaktadır. Bu eleman tipleri, katı, kabuk vb. isimlerle adlandırılmaktadır.

Çalışma kapsamı içerisinde kullanılan eleman tipinin, Marc Mentat ticari sonlu elemanlar yazılımı içerisindeki adı "Hex7"dir. Hex7, sekiz düğüm noktasından oluşan üç boyutlu bir elemandır. Hex7, hacimsel kitleme olayından bağımsızdır [37]. Bu eleman tam integrasyonlu olup sekiz adet integrasyon noktasına sahiptir. Bu durum

çözüm süresini uzatmaktadır ancak analiz sonucundaki doğruluğu arttırmaktadır [38]. Şekil 6.1.'de eleman 7'nin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.1. Eleman 7'nin şematik gösterimi [37]

Sonlu elemanlar yöntemi kapsamında pek çok alanda çalışmalar yapılabilmektedir. Bu alanlardan birisi de malzeme modellerinin oluşturulmasını kapsamaktadır. Tez çalışması kapsamında SEY kullanılarak modellenen mühendislik problemleri içerisinde malzeme modelleri entegre edilerek sonuçlar elde edilecektir. Ayrıca tez kapsamında gerçekleştirilen tüm analizlerde katı eleman kullanılmıştır.

## 6.1. Analiz Modellerinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bilgisayar destekli analizlerde önemli olan bir nokta da analiz modellerinin oluşturulmasıdır. Modelleme esnasında kullanılan bilgisayarın ve yazılımın kabiliyetleri göz önünde bulundurularak çalışmalar yapılmalıdır. Bir mühendislik probleminde yer alan bir numune ya da makine elemanı temel basitleştirmeler yapılarak modellenebileceği gibi, yazılım içerisinde tek bir eleman olarak modellenebilir. Yapılacak olan bu tek eleman çalışması çözüm süresini kısıltacaktır.

### 6.1.1. Çevrimsel çekme basma yüklemesine maruz kalan tek eleman uygulaması

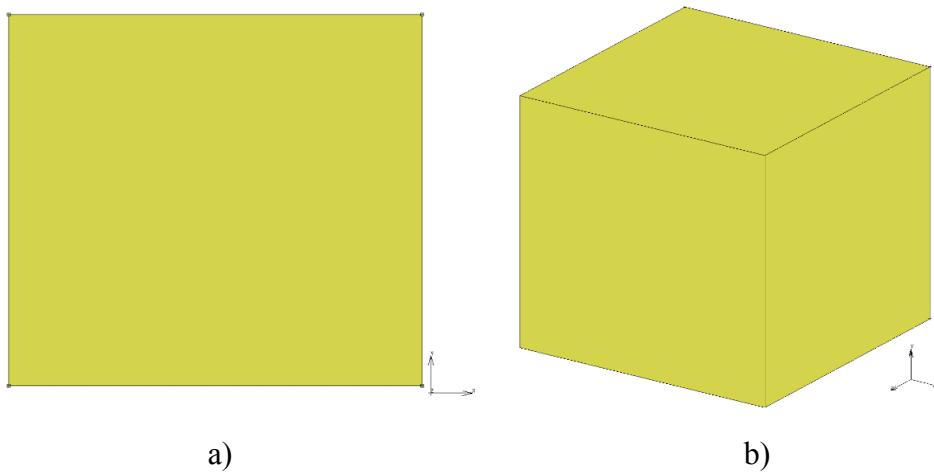
Yapılan çalışmada oluşturulan model tek eleman modelidir. Problemin basitleştirilmesi ve temele indirgenerek, hızlı çözümler alınabilmesi için bu yöntem seçilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılacak tek elemanın modellenmesi için öncelikle 1mm x 1mm bir 2 boyutlu kare oluşturulmuştur. Kareyi oluşturmak için öncelikle noktalar koordinat düzlemine atanmış ve sonrasında noktalar arası çizgilerle bağlanarak Şekil 6.2.'de gösterilen kare oluşturulmuştur.



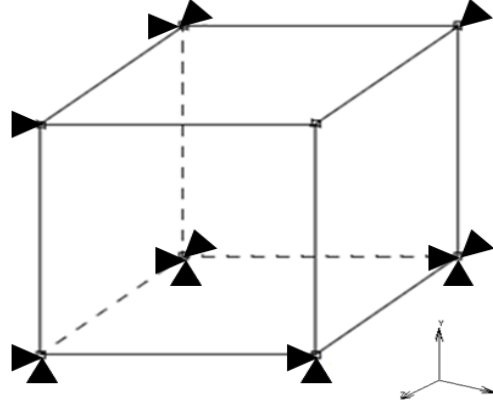
Şekil 6.2. Birim eleman 2 boyutlu modellenmesi

Modellenen geometri Şekil 6.3.'te verildiği üzere bir yüzeye çevrilmiştir. Sonrasında bu yüzey kalınlık yönünde sürüklenme komutu ile genişletilerek 1mm x 1 mm x 1 mm boyutlarında bir küp elde edilmiştir. Bu küp analiz içerisinde "Tek Eleman"ı temsil etmektedir.



Şekil 6.3. Birim eleman 3 boyutlu modellenmesi a) 1x1 mm düzlem b) 1x1x1 mm tek eleman

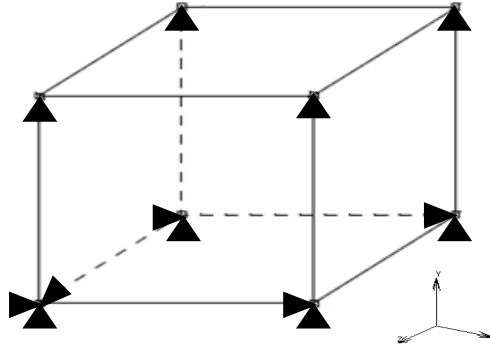
Çalışma kapsamında modele belirli sınır şartları uygulanmıştır. Modele uygulanan sınır şartları Şekil 6.4.'te temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Modele uygulanan sınır şartları temsili gösterimi

### 6.1.2. Basit kayma yüklemesi etkisi altında tek eleman uygulaması

Çalışma kapsamında bir önceki uygulamada da kullanılan tek eleman modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan modele, basit kayma oluşturacak şekilde sınır şartları uygulanmıştır. Uygulanan sınır şartları Şekil 6.5.'te temsili olarak gösterilmiştir.

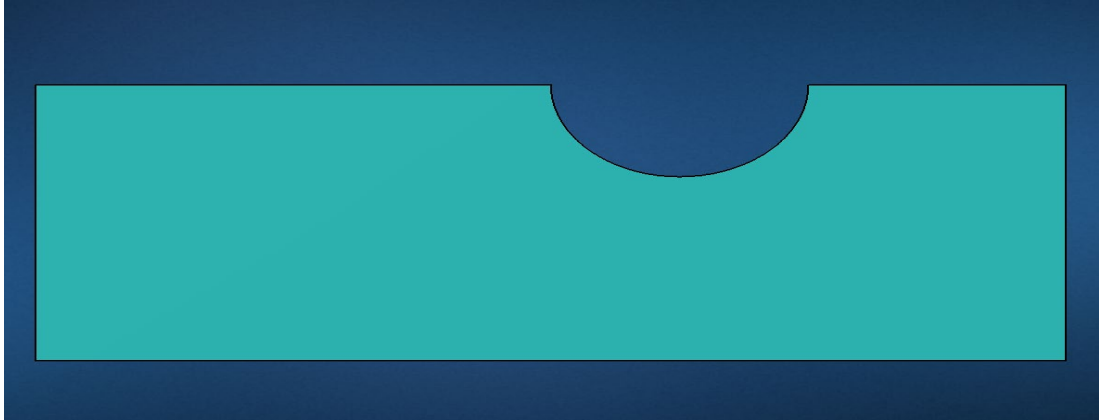


Şekil 6.5. Modele uygulanan sınır şartları temsili gösterimi

### 6.1.3. Birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulaması

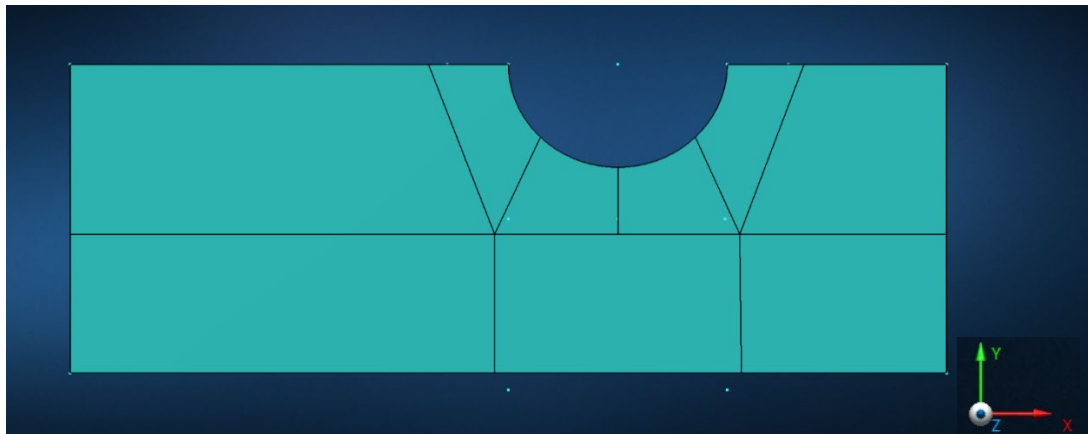
Ohno'nun kullanmış olduğu plakanın şekli, plaka üzerine uygulanan kuvvetler ve sınır şartlarının hepsi simetriktir. Ortotropik simetri özelliğinin tanınmış olduğu imkanlar sayesinde model yarım simetrik olarak kurulmuştur. Model geometrisinin ve ağ

yapısının oluşturulabilmesi için Apex ticari yazılımı kullanılmıştır. Şekil 6.6.'da modelin temel hali gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Modelin temel gösterimi

Plaka üzerinde bulunan delik yarattığı süreksizlik sebebiyle kritik bir bölgedir. Gerilme yığılması bu noktada olacaktır ve özel olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu sebeple de deliğin çevresindeki bölgelerin ağ yapısının daha sık olması arzu edilmiştir. Delik etrafındaki bölgelerin ağ yapısının diğer kısımlardan ayrılabilmesi için model Şekil 6.7.'de verildiği gibi parçalı olarak tasarlanmıştır. Bu sayede ilerleyen bölümlerde anlatılacak olan ağ örgüsü hassasiyeti çalışmaları için delik çevresindeki ağ örgüsü farklı sıklıklarla tasarlanabilecektir. Kritik bölgeler sık ağ yapısıyla örülecekken diğer kısımlar daha gevşek bir ağ örgüsüyle örülmüştür.



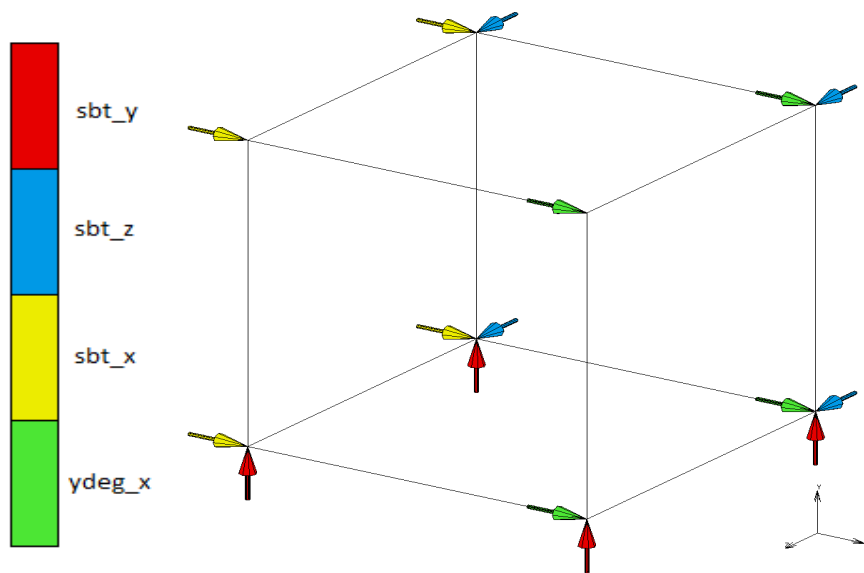
Şekil 6.7. Parçalı model



## 6.2. Sınır Şartlarının Uygulanması

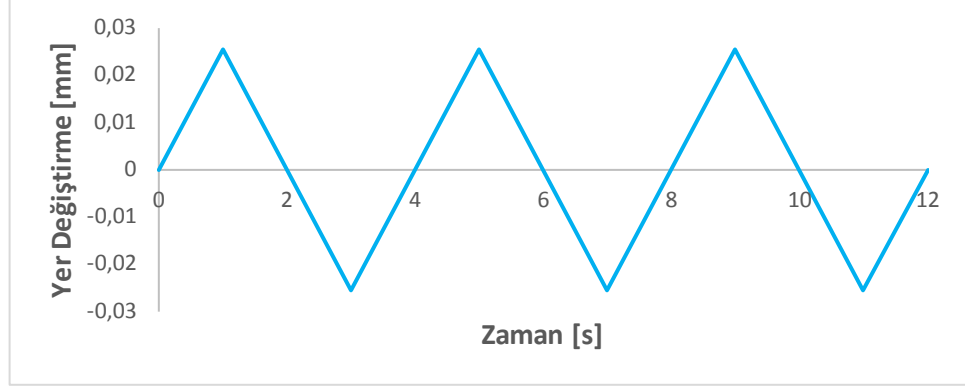
### 6.2.1. Çevrimsel çekme basma yüklemesine maruz kalan tek eleman uygulaması

Bir sonraki aşamada model üzerine sınır şartları uygulanmıştır. Tek eleman testi kapsamında model sırasıyla x, y ve z yönlerinde ilgili düğüm noktalarıyla sabitlenmiştir. X yönünde uygulanacak olan yer değiştirme sınır şartı modele uygulanmıştır. Sabitlenen düğüm noktaları “sbt\_x, sbt\_y ve sbt\_z” ve yer değiştirme sınır şartı da “ydeg\_x” etiketiyle Şekil 6.8.’de gösterilmiştir.

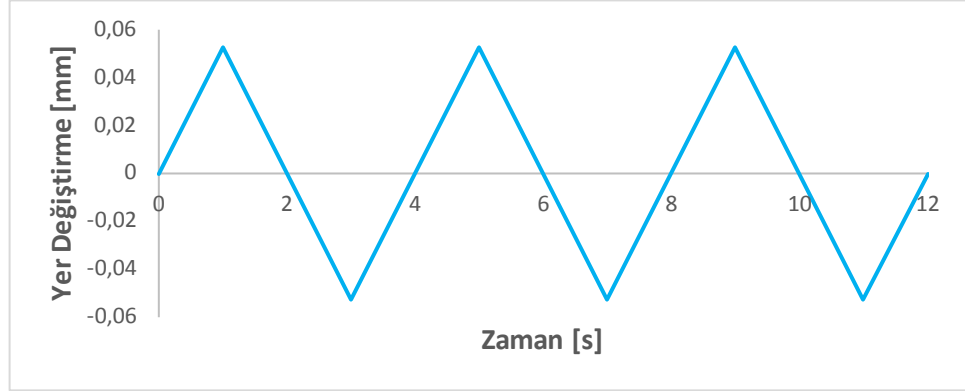


Şekil 6.8. Birim elemana uygulanan sınır şartlarının temsili gösterimi

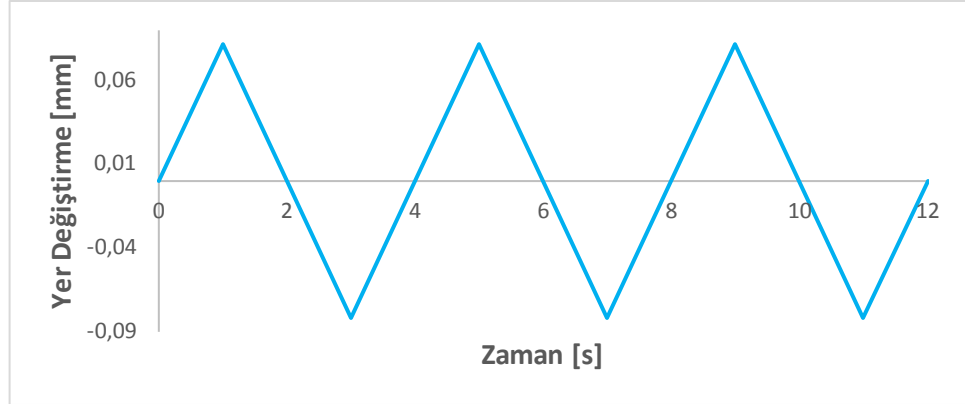
Yoshida ve Uemori yapmış oldukları testler kapsamında 3 farklı yer değiştirme değeri kullanmıştır. Bu değerler ile farklı gerinim değerleri ile kinematik pekleşmenin değişimini ve geri yaylanma oranını incelemiştir. Kullanmış oldukları yer değiştirme miktarlarının zamana bağlı değişimi Şekil 6.9.’da verilmiştir ve bu yer değiştirme miktarları “ydeg\_x” etiketiyle verilen sınır şartına teker teker uygulanarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.



a)



b)

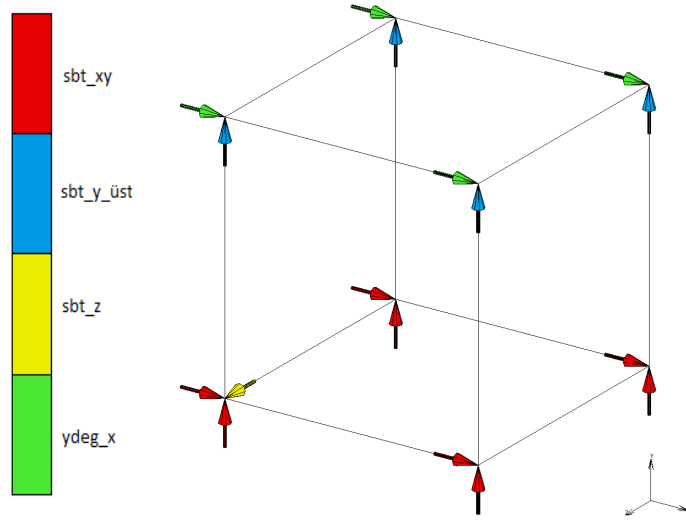


c)

Şekil 6.9. 3 farklı deneye ait yer değiştirme – zaman grafikleri a) 1. Deney b) 2. Deney c) 3. Deney

### 6.2.2. Basit kayma yüklemesi etkisi altında tek eleman uygulaması

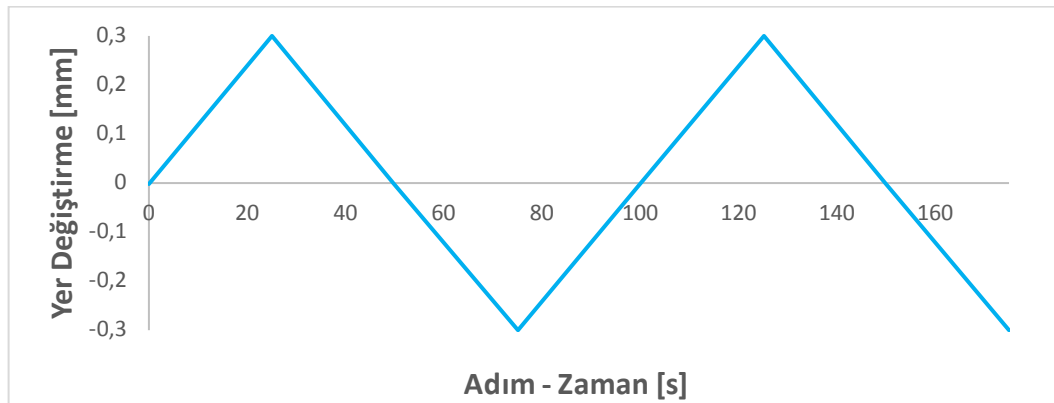
Kurulan modele uygulanan sınır şartları Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Kayma gerilmesine maruz kalan bir tek elemanın sınır şartları

Şekilde bulunan etikette gösterilen “sbt\_xy” seçilen düğüm noktalarının x ve y yönünde tamamen sabitlendiğini göstermektedir. Kayma gerilmesi oluşturabilmek için “sbt\_y\_üst” ile gösterilen sınır şartı, seçili olan düğüm noktalarının y yönünde sabitlendiğini belirtmektedir. “sbt\_z” ile verilen sınır şartı kontrol amaçlı bir adet köşe düğüm noktasının z yönünde sabitlendiğini belirtir. Son olarak yine kayma gerilmesi oluşturabilmek için “ydeg\_x” sınır şartı x yönündeki yer değiştirmeyi temsil eden sınır şartıdır. Bu sınır şartları altında tek eleman basit kayma gerilmesi etkisi altında kalacaktır.

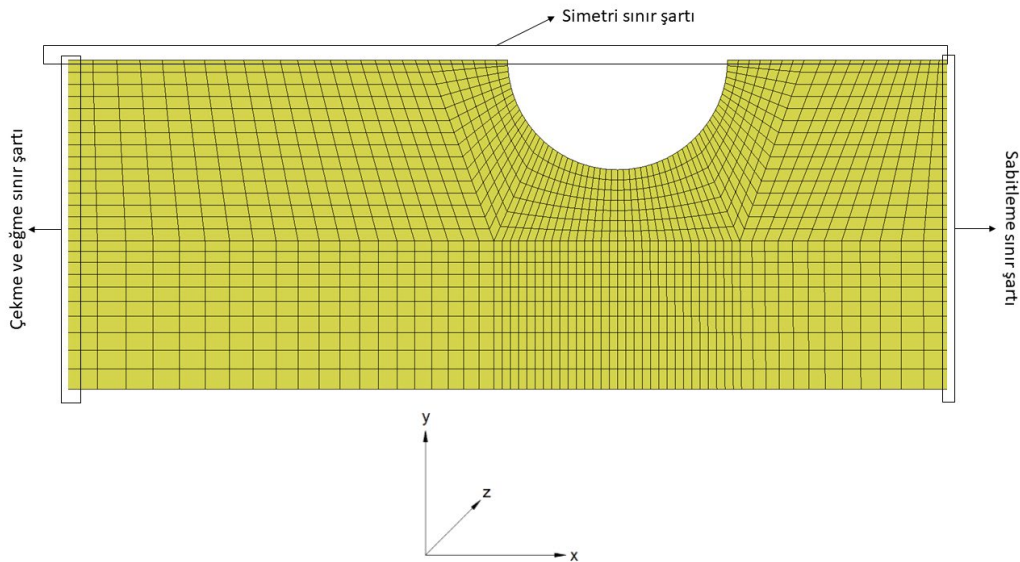
“ydeg\_x” sınır şartı uygulanan düğüm noktalarına Şekil 6.11.’de gösterilen sabit ve değişken yükleme koşulları uygulanacaktır. Bu yükleme koşulları referans makaleden alınmıştır.



Şekil 6.11. Tek elemana uygulanan yükleme koşulu

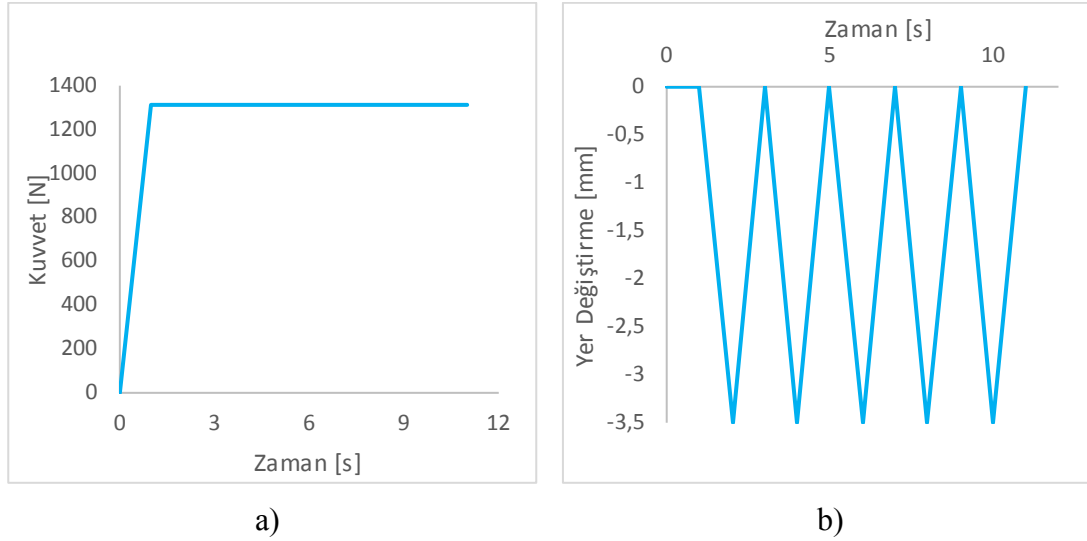
### 6.2.3. Birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulaması

Temel model Marc yazılımına aktarılarak sınır şartları verilmiştir. Şekil 6.12.'de sınır şartları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Sınır şartlarının şematik olarak gösterilmesi

Burada simetri sınır şartı için seçilen düğüm noktaları y yönünde tamamen sabitlenirken x ve z yönlerinde modelin dönmesi engellenmiştir. Bu sınır şartı modelin simetrik olması sayesinde modelin yarım model olarak kurulmasından dolayı verilmiştir. Sabitleme sınır şartı için seçilen düğüm noktaları tüm yönlerde sabitlenmiştir. Son olarak çekme ve eğme sınır şartı için seçilen düğüm noktalarına ayrı ayrı çekme ve eğme sınır şartları uygulanmıştır. Uygulanan bu çekme ve eğme sınır şartlarına ait yükleme koşulları Şekil 6.13.'te ayrı ayrı verilmiştir. Plakanın eğilmesi, aynı kesit üzerinde çekme ve basma gerilmelerinin oluşmasına sebep olacaktır. Burada amaç, maksimum gerilmenin meydana geldiği delik kenar düğüm noktalarının mekanik davranışını incelemektir.



Şekil 6.13. Yükleme koşulları a) Çekme yükleme koşulu b) Eğme yükleme koşulu

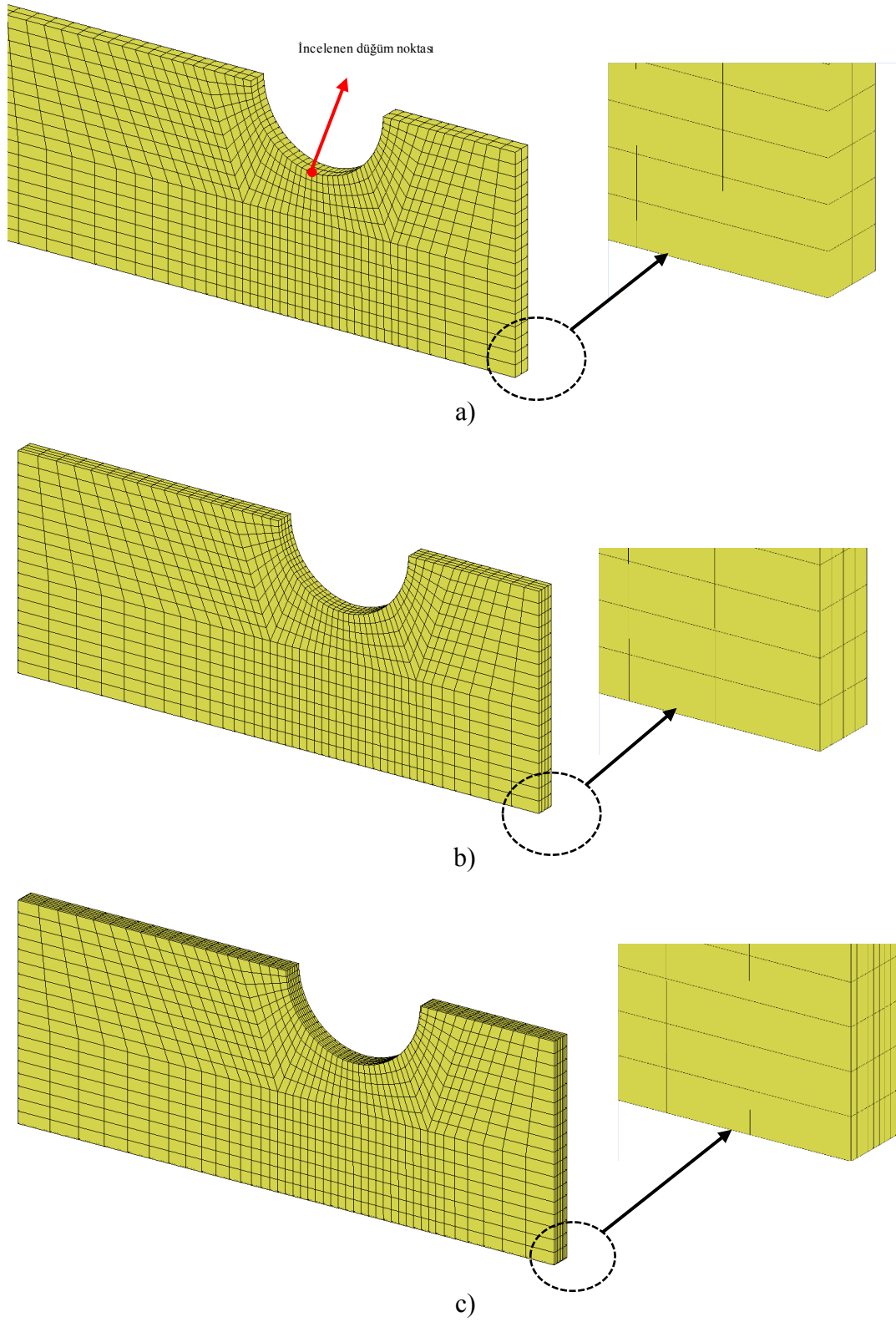
### 6.3. Ağ Örgüsü Yapısı Hassasiyet Çalışması

Çalışma kapsamında sadece birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulamasında ağ örgüsü hassasiyet çalışması yapılmıştır. Bunun sebebi diğer iki uygulamanın tek eleman üzerinden yapılmış olması ve bu uygulamaya göre daha basit olmasıdır. Bu uygulama ise daha karmaşık bir modeldir ve ağ örgüsü yapısı sonuçların doğruluğu için oldukça önemlidir.

Ağ örgüsü hassasiyeti çalışması sadece izotropik pekleşme olduğu kabulüyle yapılacaktır. Kalınlık yönündeki eleman sayısı değişimi ve düzlemsel ağ örgüsü yoğunluğu çalışmaları ayrı ayrı yapılacaktır. Çalışmanın başlangıcında öncelikle aynı düzlemsel yoğunluğa sahip model için kalınlık yönündeki eleman sayıları arttırılacaktır. Tablo 6.1.'de toplam eleman sayısı ve düzlem dışı yöndeki eleman sayıları verilmiştir. Oluşturulan ağ örgülerinin yapısı Şekil 6.14.'de gösterilmiştir.

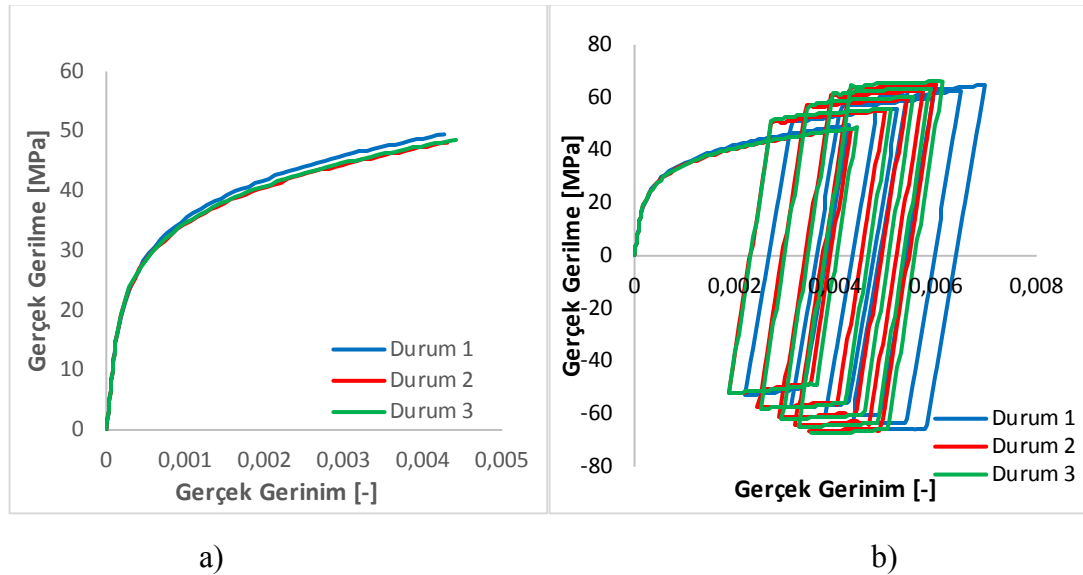
Tablo 6.1. Her bir ağ örgüsü yapısı için kalınlık yönündeki eleman sayıları

Durum	Toplam eleman sayısı	Kalınlık yönündeki eleman sayısı	Çözüm süresi[s]
Durum 1	1548	2	244
Durum 2	3096	4	567
Durum 3	6192	8	1369



Şekil 6.14. Kalınlık yönünde farklı elemanların oluşturmuş olduğu ağ yapıları, a) Durum 1, b) Durum 2 c) Durum 3

Kalınlık yönündeki eleman sayılarının etkisini araştırmak için yapılan çalışmanın sonuçları, monotonik yükleme ve çevrimsel yükleme için ayrı ayrı Şekil 6.15.'te gösterilmiştir.



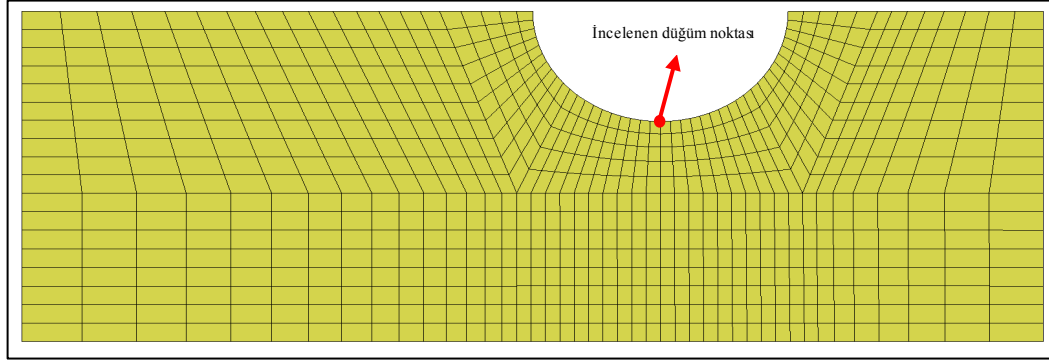
Şekil 6.15. Düzlem dışı yönde farklı eleman sayıları içeren farklı ağ örgüsü yapılarından elde edilen gerilme-gerinim grafikleri a) monotonik yükleme b) evrimsel yükleme

Şekil 6.15.'te görüldüğü tzere Durum 2 ve Durum 3'te elde edilen sonuçlar neredeyse aynıdır. Ancak, zm süresine bakıldığında Durum 2 ve Durum 3 arasında ciddi bir fark olduğu görülmektedir. Bu sebepten ötürü ilerleyen çalışmalar için Durum 2'de verilen kalınlık yönünde 4 eleman bulunan ağ örgüsü seçilmiştir.

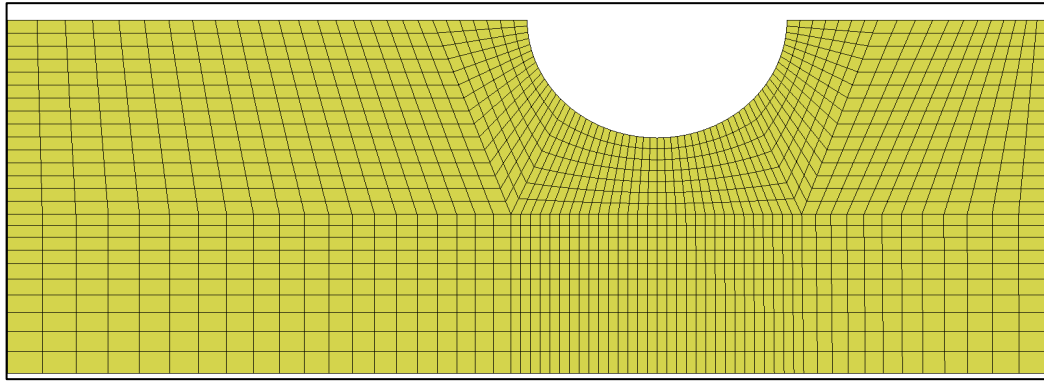
İkinci olarak, düzlemsel ağ örgüsü yoğunluğu incelenecektir. Kalınlık yönünde 4 eleman sabit olacak şekilde 3 farklı ağ örgüsü yapısı oluşturulmuştur. Tablo 6.2.'de her bir ağ örgüsü yapısı için eleman sayıları ve buna bağlı çözüm süreleri verilmiştir ve ağ örgüsü yapıları Şekil 6.16.'da gösterilmiştir.

Tablo 6.2 . Her bir ağ örgüsü yapısına ait eleman sayıları

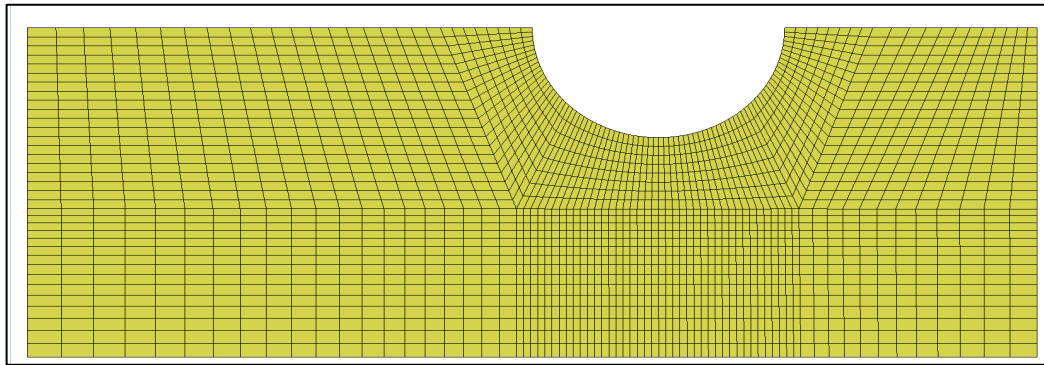
Durum	Toplam eleman sayısı	Kalınlık yönündeki eleman sayısı	Çözüm süresi[s]
Durum 2.1	3096	4	567
Durum 2.2	6080	4	1135
Durum 2.3	9440	4	1811



a)



b)

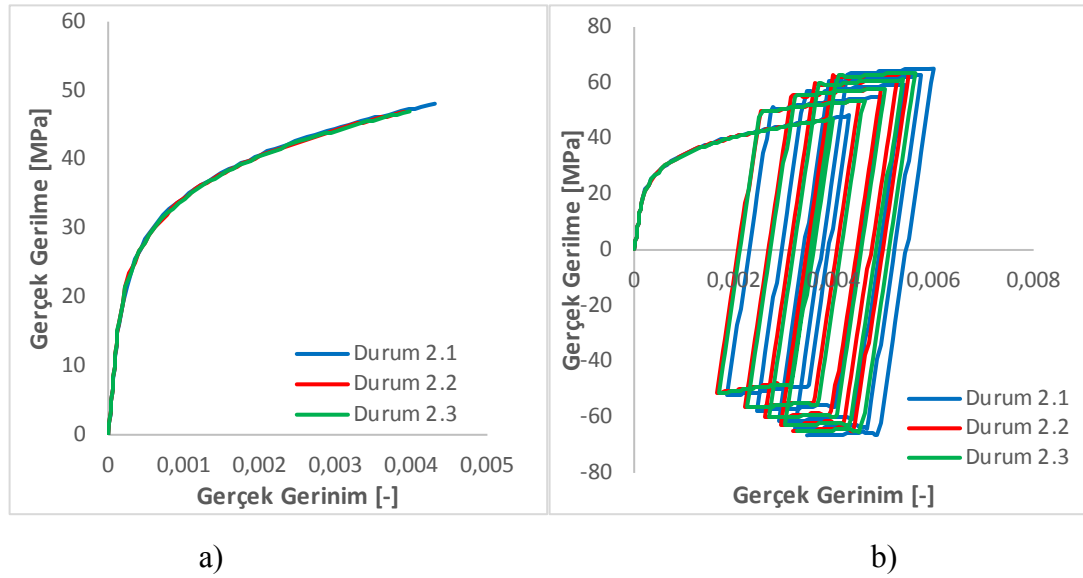


c)

Şekil 6.16. Düzlemsel ağ örgüsü yapıları a) Durum 2.1 b) Durum 2.2 c) Durum 2.3



Ağ örgüsü hassasiyeti çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 6.17.'de verilmiştir.



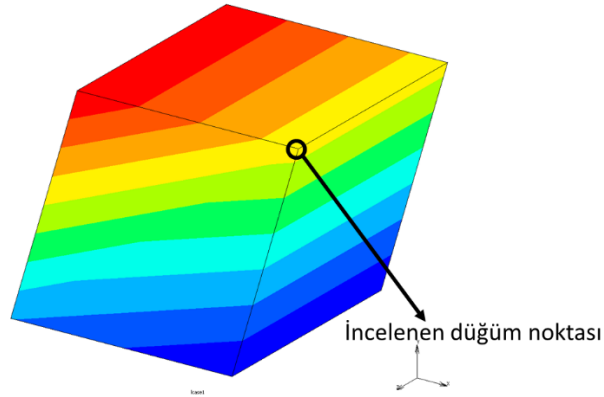
Şekil 6.17. Farklı ağ örgüsü yapıları ile elde edilen gerilme – gerinim a) monotonik yükleme b) çevrimsel yükleme

Şekil 6.17.'ye göre Durum 2.2 ve Durum 2.3 tatmin edici seviyede birbirine yakındır. Çözüm süresi hesaba katıldığında ilerleyen çalışmalar için Durum 2.2 seçilmiştir.

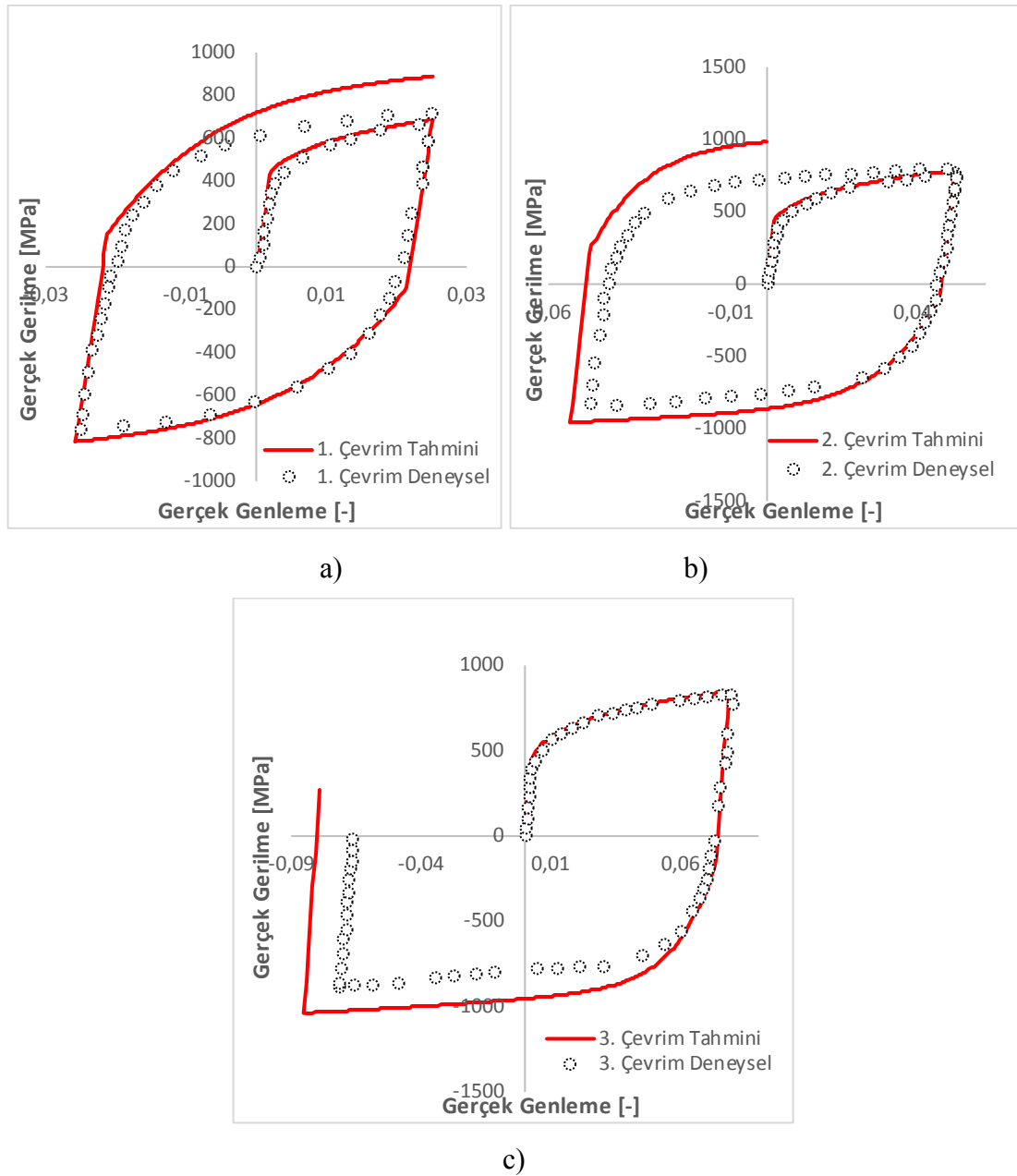
## BÖLÜM 7. SONUÇLAR

### 7.1. Çevrimsel Çekme Basma Yüklemesine Maruz Kalan Tek Eleman Uygulaması

Elde edilen malzeme plastisite parametreleri Hypela 2 kullanıcı alt programı kullanılarak Marc yazılımı içerisinde tanıtılmıştır. Her bir yer değiştirme miktarı için sonlu elemanlar analizi yapılarak ihtiyaç duyulan çevrimsel gerilme-gerinim değerleri elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarını incelemek ve gerekli değerleri elde etmek için tek eleman üzerinde yer değiştirme sınır şartının verildiği düğüm noktalarından birisi seçilmiştir (Şekil 7.1.). Seçilen düğüm noktasından malzemenin gerçek gerilme – gerinim sonuçları elde edilmiş olup Şekil 7.2.’de elde edilen analiz sonuçları ile Yoshida ve Uemori’nin deneysel verileriyle [34] karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.1. İncelenen düğüm noktası



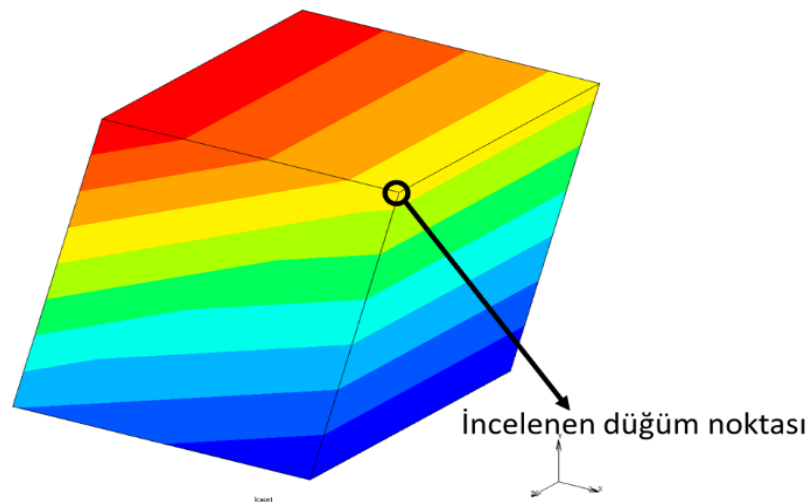
Şekil 7.2. Numerik modelin deneysel verilerde ve Yoshida ve Uemori'nin modeliyle karşılaştırılması a) Birinci Çevrim b) İkinci Çevrim c) Üçüncü çevrim [34]

Şekil 7.2.'de görüldüğü üzere, kullanılan malzeme modeli düşük gerinim aralığı için gerçekleştirilen çevrimsel yükleme analizinde isabetli sonuçlar vermiştir. Düşük gerinim aralığı için Bauschinger etkisi ve tersinir yüklemdeki pekleşme davranışı başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Bununla birlikte, gerinim aralığı arttıkça, çevrimsel yumuşama etkisinden dolayı, malzemenin deneysel davranışı ile analiz sonuçları arasında bazı sapmalar gözlemlenmektedir (Şekil 7.2. b ve c). Gerinim aralığı arttıkça bu sapma da artmaktadır. Kullanılan malzeme modeli, çevrimsel

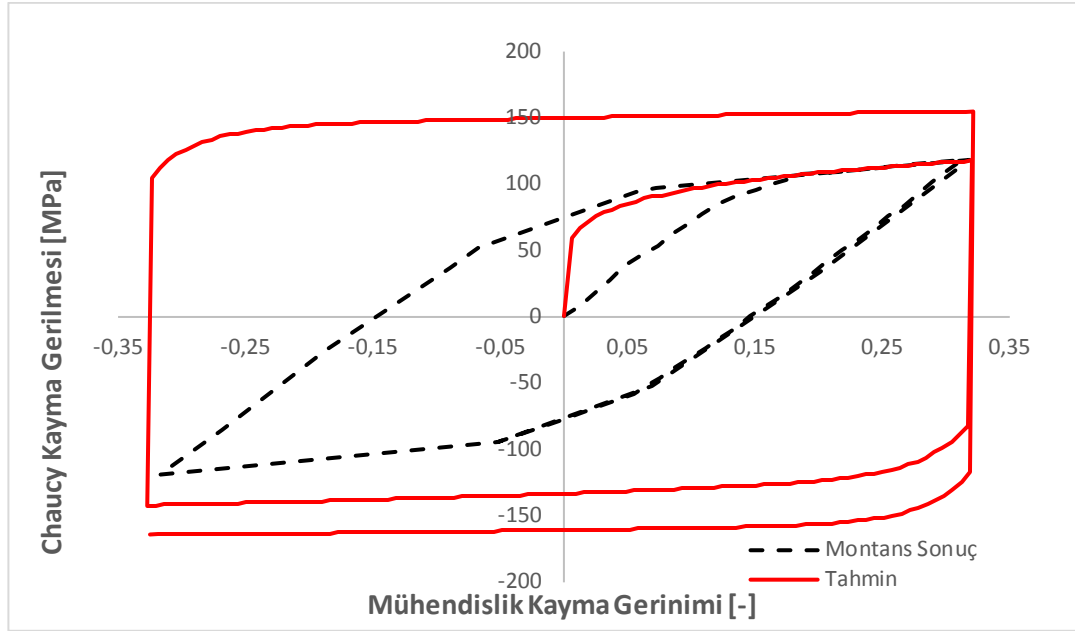
yumuşama davranışını modellemekte yetersiz kalmıştır. Ancak bütün gerinim aralıkları için Bauschinger etkisi ve tersinir yüklemdeki elasto-plastik malzeme davranışı başarılı bir şekilde modellenmiştir.

## 7.2. Basit Kayma Yükleme Etkisi Altında Tek Eleman Uygulaması

Elde edilen malzeme plastisite parametreleri Hypela 2 kullanıcı alt programı kullanılarak Marc yazılımı içerisine tanıtılmıştır. Basit kayma şartları için her bir yer değiştirme miktarı sonlu elemanlar analizi yapılarak elde edilmiş ve literatürde var olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır [10]. Analiz sonuçlarını incelemek için gerekli değerleri elde etmek için tek eleman üzerinde yer değiştirme sınır şartının verildiği düğüm noktalarından birisi seçilmiştir. Seçilen düğüm noktasından (Şekil 7.3.) malzemenin gerilme – gerinim davranışı (Şekil 7.4.) elde edilmiştir.



Şekil 7.3. İncelenen düğüm noktası

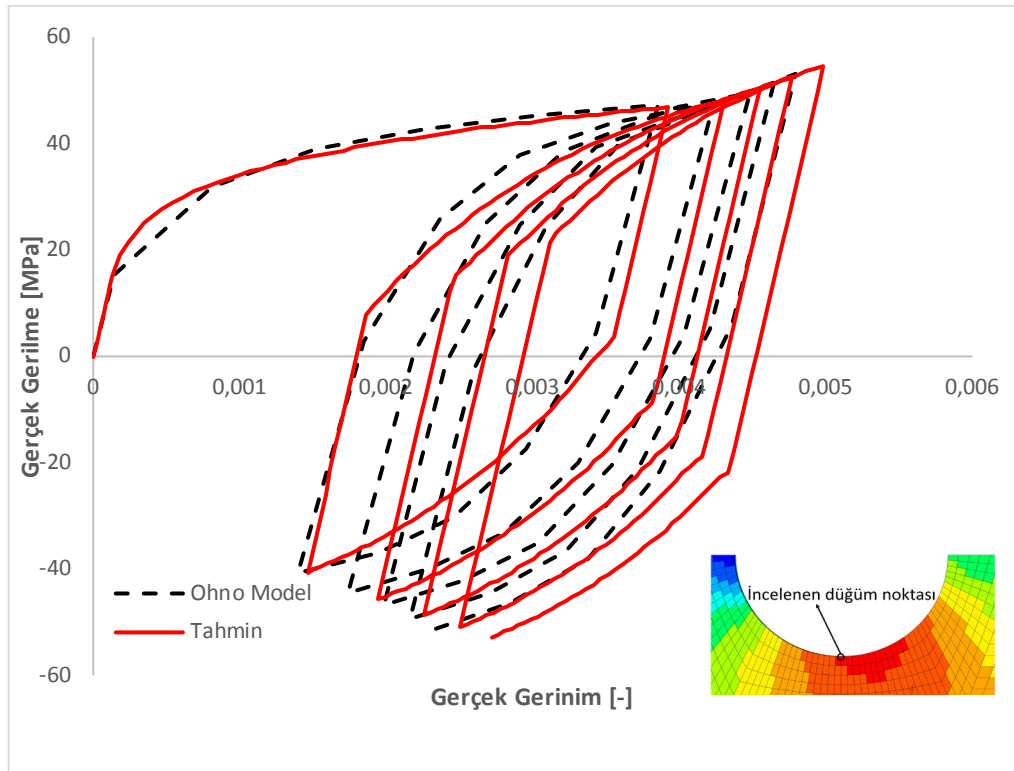


Şekil 7.4. Sayısal sonuçlardan elde edilen çevrimsel gerilme – gerinim eğrilerinin Montans'ın modeli ile karşılaştırılması [10]

Bu uygulamada, tek eleman analizlerinin sonuçları ile Ref [10]'ten elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar gözlemlenmektedir. Karşılaştırma yapılan referans sayısal sonuçlarda kayma modülünün çelik bir malzeme için çok düşük bir değerde olduğu görülmektedir. Tek eleman test simülasyonunda uygulanan olan malzeme modelinde ise elastisite modülü 210 GPa, kayma modülü 80.769 GPa olarak alınmıştır. Sayısal sonuçlar arasındaki farkların bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 7.3. Birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulaması

Bu kısımda, delikli bir plakanın çevrimsel deformasyonu birleşik pekleşme kuralı varsayımına dayanarak simüle edilmiştir. Birleşik pekleşme parametreleri Hypela 2 kullanıcı alt programına girilmiştir. Plaka aynı anda çekme ve eğme gerilmelerine maruz bırakılmıştır. Eğme gerilmesinin değişimi sırasında çekme gerilmesi sabit tutulmuştur. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sonuçlar Ohno'nun sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Gerilme – gerinim eğrilerinin tahmini ve Ohno'nun sonuçlarının [8] karşılaştırılması Şekil 7.5.'de verilmiştir.



Şekil 7.5. Sayısal sonuçlardan elde edilen çevrimsel gerilme – gerinim eğrilerinin Ohno'nun modeli ile karşılaştırılması [8]

Şekil 7.5.'de Ohno'nun sonuçlarının başarılı bir şekilde tahmin edildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar özellikle birinci çevrimdeki referans gerilme – gerinim davranışı ile tamamen örtüşmektedir. AF tipi birleşik pekleşme modeli Bauschinger etkisini modelleyebilmektedir. Ayrıca, OFHC Bakırının “çevrimsel gerinim birikimi” davranışı, AF Modelinin dinamik geri kazanım – bellek teriminin varlığıyla ele alınmıştır. Ohno'nun sonucuyla karşılaştırıldığında ilk çevrimden sonra küçük farklılıklar gözlemlendi, ancak bu farklılıklar küçük hata aralığındadır. Döngüler ilerledikçe, malzemenin tahmin edilen davranışı yakınsama eğilimi içine girmektedir.

Burada incelenmesi gereken bir başka durum ise çentik dibi radyüsünde oluşan gerilme yığılmalarıdır. Tablo 8.1'de deneysel ve SEY ile elde edilen, çentik dibi radyüsü gerilmeleri verilmiştir.

Tablo 8.1. Deneysel ve SEY ile hesaplanan gerilme yığılması faktörü

Zaman [s]	Çentik Dibi Gerilmesi Deneysel [MPa]	Çentik Dibi Gerilmesi SEY [MPa]	Süreksizliğin Merkezindeki Nominal Gerilme [MPa]	Gerilme Yığılması Faktörü Deneysel	Gerilme Yığılması Faktörü SEY
1	47.2	46.86	7.5	6.3	6.2
11	51.5	53	7.5	6.8	7

Burada açıkça görülmektedir ki, tez kapsamında kullanılan kodun çentik dibi radyüsünde oluşan gerilmeleri tahmin performansı Ohno'nun modeline göre farklılık göstermektedir. Çevrim sayısı arttıkça, kodun tahmin performansının doğruluğu azalmaktadır. Yüksek çevrimli uygulamalarda Ohno'nun kullanmış olduğu malzeme modelinin kullanımı daha uygun olacaktır.

## BÖLÜM 8. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, tek eleman testi uygulamaları kullanılarak, farklı çevrimsel yükleme şartları için, kombine izotropik – kinematik pekleşme kuralının tahmin performansı değerlendirilmiştir. Malzemenin akma yüzeyi izotropik von Mises akma fonksiyonu kullanılarak tanımlanmış olup, plastik gerinim artımı ile gerilme arasında ilişki kurabilmek için bağıdaşık akma kuralı kullanılmıştır. Bu malzeme modeli ise Marc programında Hypela2 kullanıcı tanımlı malzeme alt programı kullanılarak analizlere uygulanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise bu malzeme modeli uygulanarak, delikli bir levhanın birleşik yüklemeler altındaki davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Tek eleman testi çalışmaları sonucunda, birleşik izotropik – kinematik pekleşme modelinin temel çevrimsel parametrelerin tahmininde isabetli sonuçlar verdiği görülmüştür. Bütün çalışmalarda Bauschinger etkisi ve tersinir yüklemelerdeki elasto-plastik malzeme davranışı başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir.
- Uygulanan plastisite modeli, çevrimsel yumuşama davranışı sergileyen malzemelerde tersinir yüklemelerde daha yüksek gerinim değerlerini öngörmektedir. Plastisite modeli çevrimsel yumuşama davranışını modelleyememektedir. Ancak düşük gerinim aralığında bu davranışın etkisi az olduğu için düşük gerinimli çevrimsel yüklemelerde kullanılan model isabetli sonuçlar elde edebilmektedir.
- OFHC bakırından imal edilen delikli plaka ile yapılan SE analizleri sonucunda Bauschinger etkisi ve çevrimsel gerinim birikimi davranışı birleşik izotropik-kinematik pekleşme modeli kullanılarak başarıyla modellenmiştir. SE yöntemiyle elde edilen sonuçların, Ohno'nun sonuçları ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



- Ohno [8] tarafından önerilen modelde, backstress tanımı karmaşık bir kalibrasyon prosedürü gerektirir ve bu karmaşık kalibrasyon prosedürü, sonlu elemanlar analizlerinde daha büyük çözüm sürelerini beraberinde getirir. Ancak tez çalışmasında kullanılan birleşik izotropik – kinematik pekleşme modeli daha pratik ve kullanıcı dostudur. Ayrıca, sunulan model, küçük çevrimsel gerinim aralığında uyumlu sonuçlar vermiştir.
- Özellikle düşük gerinimli çevrimsel yüklemeler altında, kullanılan birleşik izotropik – kinematik pekleşme modeli başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca kullanılan plastisite modeli, kullanıcı dostu olmasının yanında, basit bir şekilde kalibre edilebilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Dieter, G., E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Company, Singapore, 1-348, 1988.
- [2] Barkey, M., E., Calculation of notch strains under multiaxial nominal loading. University of Illinois, College of Engineering at Urbana-Champaign, Doktora Tezi, 1993.
- [3] Firat, M. (2011). Notch strain calculation of a notched specimen under axial-torsion loadings. *Materials and Design*, 32: 3876–3882. DOI:10.1016/j.matdes.2011.03.005.
- [4] Firat, M. (2012). Cyclic plasticity modeling and finite element analyzes of a circumferentially notched round bar under combined axial and torsion loadings. *Materials and Design*, 34: 842-852. DOI:10.1016/j.matdes.2011.07.022.
- [5] Aksen, T.A., Esener, E., Firat, M. (2019). Investigation of Notch Root Strain Behaviors Under Combined Loadings, *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3: 42-51.
- [6] Joo, G., Huh, H. (2018). Rate-dependent isotropic–kinematic hardening model in tension –compression of TRIP and TWIP steel sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*, 146–147: 432–444. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2017.08.055
- [7] Joo, G., Huh, H., Choi, M.K. (2016). Tension/compression hardening behaviors of auto-body steel sheets at intermediate strain rates. *International Journal of Mechanical Sciences*, 108-109: 174–187. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2016.01.035.
- [8] Ohno, N., Tsuda, M., Kamei, T. (2013). Elastoplastic implicit integration algorithm applicable to both plane stress and three-dimensional stress states. *Finite Elements in Analysis and Design*, 66:1–11. DOI: 10.1016/j.finel.2012.11.001.

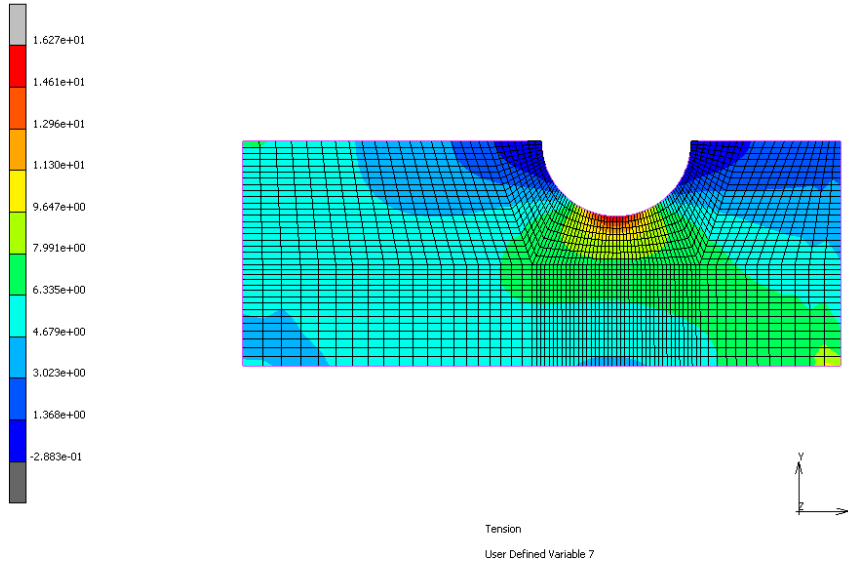
- [9] Zhang, M., Benitez, J.M., Montáns, F.J. (2018). Cyclic plasticity using Prager's translation rule and both nonlinear kinematic and isotropic hardening: Theory, validation, and algorithmic implementation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 328:565–593. DOI:10.1016/j.cma.2017.09.028
- [10] Zhang, M., Montáns, F.J., (2019). A simple formulation for large-strain cyclic hyperelasto-plasticity using elastic correctors. Theory and algorithmic implementation. *International Journal of Plasticity*, 113: 185–217. DOI:10.1016/j.ijplas.2018.09.013.
- [11] Fu, S., Yu, D., Chen, G., Chen, X. (2016). Ratcheting of 316L stainless steel thin wire under tension-torsion loading. *Fracture and Structural Integrity*, 38: 141-147. DOI:10.3221/IGF-ESIS.38.19.
- [12] Shojaei, A., Eslami, M.R., Mahbadi, H. (2010). Cyclic loading of beams based on the Chaboche model. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 6:217–228. DOI:10.1007/s10999-010-9131-5.
- [13] Badnava, H., Pezeshki, S.M., Nejad, F., Farhoudi, H.R. (2012). Determination of combined hardening material parameters under strain controlled cyclic loading by using the genetic algorithm method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(10):3067~3072. DOI:10.1007/s12206- 012-0837-1.
- [14] Tasavori, M., Zehsaz, M., Tahami, F.V. (2020). Ratcheting assessment in the tube sheets of heat exchangers using the nonlinear isotropic/kinematic hardening model. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 183:104-103. DOI:10.1016/j.ijpvp.2020.104103.
- [15] Nath, A., Ray, K.K., Barai, V. (2019). Evaluation of ratcheting behaviour in cyclically stable steels through use of a combined kinematic-isotropic hardening rule and a genetic algorithm optimization technique. *International Journal of Mechanical Sciences*, 152:138–150. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2018.12.047.
- [16] Lee, E., Stoughton, T.B., Yoon, J.W. (2019). Kinematic hardening model considering directional hardening response. *International Journal of Plasticity*, 110:145–165. DOI:10.1016/j.ijplas.2018.06.013.
- [17] Qin, J., Holmedal, B., Hopperstad, O.S. (2018). A combined isotropic, kinematic, and distortional hardening model for aluminum and steels under complex strain-path changes. *International Journal of Plasticity*, 101: 156–169. DOI:10.1016/j.ijplas.2017.10.013.

- [18] Aksen, T.A., Çentikli ve homojen malzemelerin çevrimsel deformasyonlarının modellenmesi ve sonlu elemanlar analizleri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [19] Dahlberg, M., Segle P., Evaluation of models for cyclic plasticity deformation – a literature study. Inspecta Technology AB, 2010.
- [20] Araújo, M., C., Nonlinear kinematic hardening model for multiaxial cyclic plasticity. Universidade Federal do Piauí - Louisiana State University, The Department of Civil and Environmental Engineering, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- [21] Firat, M., Lineer olmayan kinematik pekleşme bünye denklemlerinin yorulmaömrü tahmininde uygulanması. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2003.
- [22] Paul, S. K., Sivaprasad, S., Dhar, S., Tarafder, M., Tarafder, S., Simulation of cyclic plastic deformation response in SA333 C–Mn steel, Computational Materials Science 48 (2010) 662–671.
- [23] Prager, W., A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids. Journal of Applied Mechanics, 23, 493-496, 1956.
- [24] Mroz, Z., An attempt to describe the behaviour of metals under cyclic loads using a more general work-hardening model. Acta Mechanica, 7(2,3), 199- 212,1969.
- [25] Besseling, J.F. (1958). A theory of plastic and creep deformations of an initially isotropic material. ASME Journal of Applied Mechanics, 25: 529-536, DOI:10.1115/1.4011867.
- [26] Mroz, Z. (1967). On the description of anisotropic work hardening. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 15: 163-175, DOI:10.1016/0022-5096(67)90030-0.
- [27] Dafalias, Y.F., Popov, E.F. (1976). Plastic internal variables formalism of cyclic plasticity. ASME Journal of Applied Mechanics, 98: 645-651. DOI:10.1115/1.3423948.
- [28] Ohno, N., Wang, J.D., (1993). Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery. Part 1: Formulations and basic features for ratcheting behavior. International Journal of Plasticity, 9: 375-390. DOI:10.1016/0749-6419(93)90042-O.

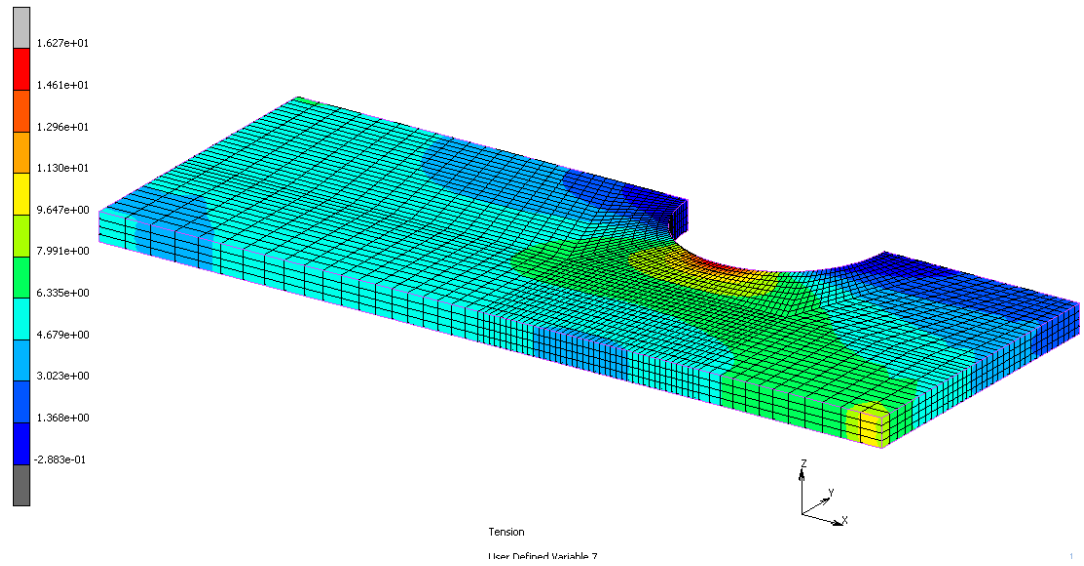
- [29] Frederick, C., Armstrong, P. J., A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, *Materials at High Temperature*, 24(1), 1-26, 2007(İlk basım 1967).
- [30] Halama, R., Sedlák, J., Šofer, M., Phenomenological Modelling of cyclic plasticity. *Numerical Modelling InTech*, 15, 329-354, 2012.
- [31] Chaboche, J. L., Rousselier, G., On the plastic and viscoplastic constitutive equations, part 1: Rules developed with interval variable concept. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 105, 153-158, 1983.
- [32] Chaboche, J. L., Rousselier, G., On the plastic and viscoplastic constitutive equations, part 2: Application of interval variable concepts to the 316 stainless steel. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 105, 159-164, 1983.
- [33] Yoshida, F., Uemori, T., A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation, *International Journal of Mechanical Sciences* 45 (2003) 1687–1702.
- [34] Yoshida, F., Takeshi, U., 2015. In: Tekkaya, A.E. (Ed.), *60 Excellent Inventions in Metal Forming*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 61–66 chapter *Cyclic Plasticity Model for Accurate Simulation of Springback of Sheet Metals*.
- [35] Ishikawa, H., Constitutive model of plasticity in finite deformation, *International Journal of Plasticity* 15 (1999) 299-317
- [36] Firat, M., Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts, *Materials and Design*, 28, 1298-1303, 2007.
- [37] Marc 2018.1 Volume A: Theory and User Manual.
- [38] Marc 2018.1 Volume B: Element Library

## EKLER:

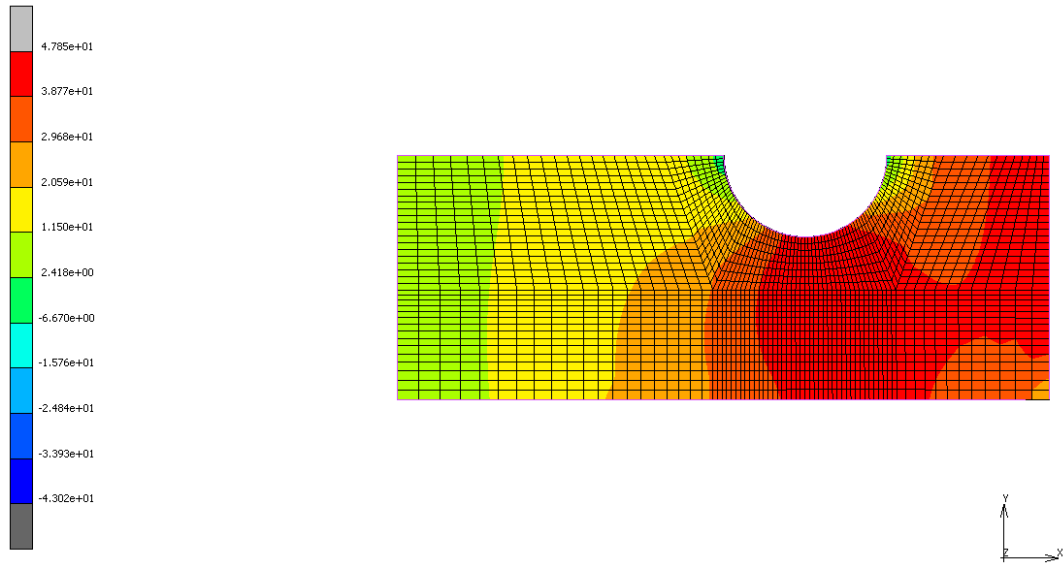
**EK A:** Birleşik ve çevrimsel yüklemeler altındaki delikli plaka uygulaması sonuç görselleri



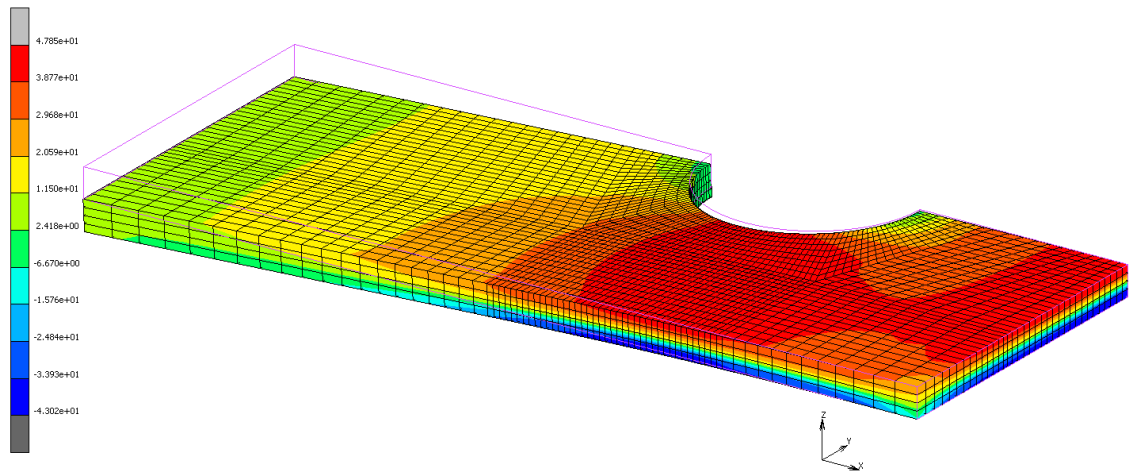
T=10 Anında Maksimum Çekme Gerilmesine Maruz Numunedeki Gerilme Dağılımı – Ön Görünüş



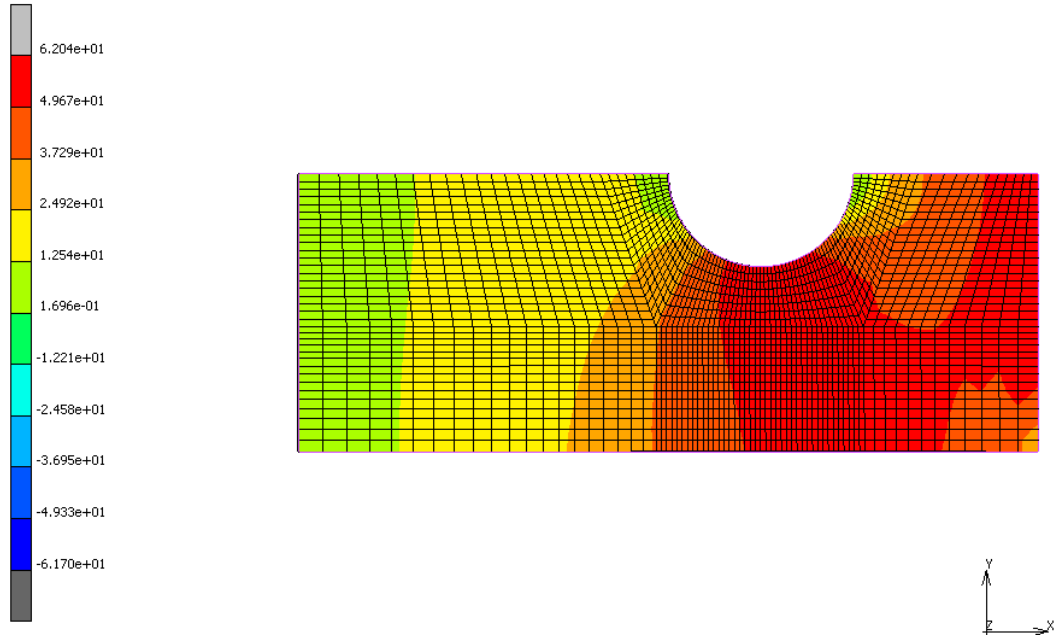
T=10 Anında Maksimum Çekme Gerilmesine Maruz Numunedeki Gerilme Dağılımı – Isometrik Görünüş



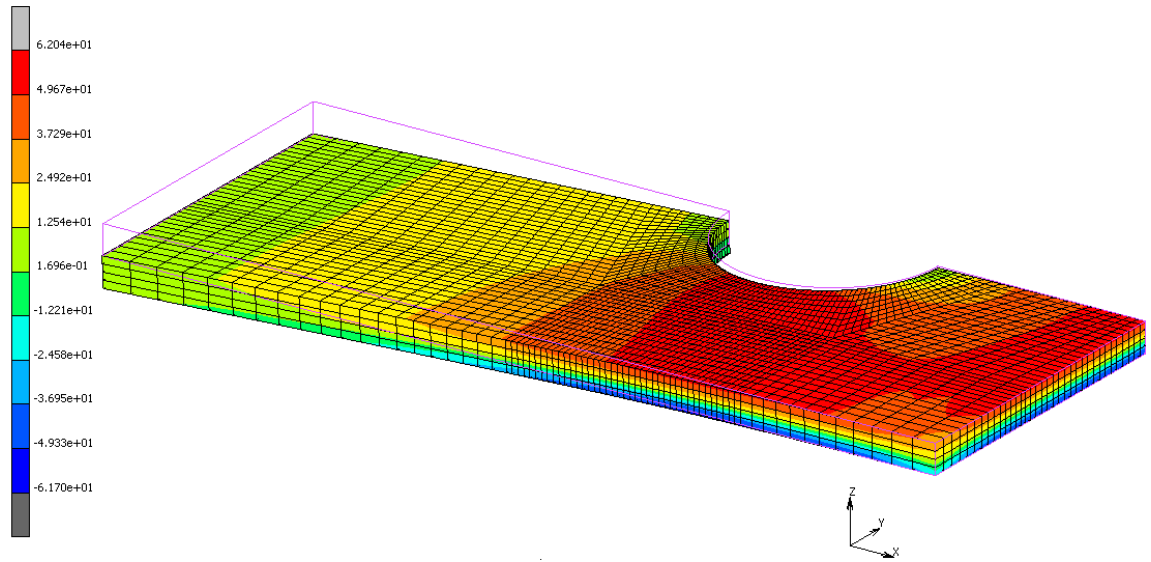
Birinci Çevrim Eğilme Yüklemesi Anında Maksimum Eğme Gerilmesine Maruz Numunedeki Gerilme Dağılımı – Ön Görünüş



Birinci Çevrim Eğilme Yüklemesi Anında Maksimum Eğme Gerilmesine Maruz Numunedeki Gerilme Dağılımı – Isometrik Görünüş



Son Çevrimde Eğilme Yüklemesi Anında Maksimum Eğme Gerilmesine Maruz Numunedeki Gerilme Dağılımı – Ön Görünüş



Son Çevrimde Eğilme Yüklemesi Anında Maksimum Eğme Gerilmesine Maruz Numunedeki Gerilme Dağılımı – Isometrik Görünüş



## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Melih ÇAYLAK

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makina Mühendisliği	2018
Lise	Susurluk Anadolu Lisesi	2011

### İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2022-Halen	ASAŞ Alüminyum A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2016-2021	TurkRED Redüktör San. Tic. Ltd. Şti	Ar-Ge Mühendisi

### YABANCI DİL

İngilizce

### ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Caylak, M., Aksen, T.A., Fırat, M., Evaluating the effectiveness of combined hardening models to determine the behavior of a plate with a hole under combined loadings, European Mechanical Science (2022), 6(2): 97-104  
<https://doi.org/10.26701/ems.1051057>

### HOBİLER

Müzik, Doğa Gezileri, Kampçılık