TÜBİTAK

Kristal plastisite sonlu eleman metodu kullanılarak plastik deformasyon sonrası oluşan kalıntı gerilmelerin hesaplanması için nümerik yöntem geliştirilmesi ve otomotiv uygulaması

Program Kodu: 1001

Proje No: 118M285

Proje Yürütücüsü:
Dr. Eralp Demir

Danışman:
Dr. Murat Büyük

Bursiyerler:
M.Sc. Mohammad Hasan Joudivand Sarand
Dr. Ram Kumar Kesharwani
B.Sc. Ahmet Bahadır Cansever

HAZİRAN 2021
ISTANBUL

Önsöz

Projenin desteklenmesi ve fonlanması için TÜBİTAK kurumuna sonsuz teşekkürlerimizi sunuyoruz. Çeşitli aşamalarda emeği geçen ve projemize destek olan herkese minnetlerimizi sunarız.

1 Giriş 1
2 Literatür Özeti 4
3 Gereç ve Yöntem 18
3.1 Kristal plastisite 18
3.2 Fizik Temelli Modelleme 20
3.3 RVE modelinin oluşturulması 22
3.4 Lokal olmayan model 24
3.5 Metal Şekillendirme simülasyonları 25
4 Bulgular 32
4.1 Deneysel Bulgular 32
4.1.1 EBSD ölçümleri 32
4.1.2 Mekanik çekme testleri (Kalibrasyon) 36
4.1.3 Kalıntı gerilme ölçümleri (Validasyon) 38
4.2 Simülasyon sonuçları 45
4.2.1 Fizik temelli model sonuçları 45
4.2.2 RVE modeli 65
4.2.3 Lokal olmayan model 79
4.2.4 Metal şekillendirme simülasyonları 81
5 Tartışma 87
5.1 Fizik temelli modelleme 87
5.2 Kalıntı gerilme sonuçları 87
6 Sonuç ve Öneriler 90

Şekiller

Şekil 2.1 Tek kristal malzemelerde yönelimli elastik rijitlik tensörünün üç boyutlu değişimi; **a.** Alüminyum ve **b.** Bakır 4
Şekil 2.2 Yüzey merkezli kübik tek Kristal için {111} kayma düzlem normali (mavi renk) ve <110> kayma yönü (kırımızı renk). 5
Şekil 2.3 Kristal plastisite deformasyon kinematiği: B0, B_{ara}, ve B ilk, ara, ve son referans konfigürasyonlarını ifade etmektedir. **F**, $\mathbf{F^e}$, ve $\mathbf{F^p}$ ise toplam, elastik, ve plastik deformasyonları gösterir. 5
Şekil 2.4 <110> ve <111> kristal yönlerinin çekme ekseninde simetrik yükleme (çekme dışındaki eksenlerde eşit basma durumu) için: a) birim şekil değişimi öncesi rastlantısal kristal doğrultularının dağılımı, b) %100 eksenel simetrik çekme sonrası kristal doğrultularının dağılımı (Demir, 2017) 6
***Şekil 2.5** <111> kayma yönünü paylaşan BCC kafesinin kayma düzlemleri kümesi.* 11
Şekil 2.6 Kayma gerilmesinin bileşenlerinin yönleri, Schmid ve Schmid olmayan yönlerdeki kesme gerilmeleri. 13
Şekil 2.7 Kayma düzlemindeki Burger vektörüne paralel gerilme komponenti... 14
Şekil 2.8 $(\mathbf{0\ 1\ 1})$ düzlemde Burgers vektörüne paralel kayma gerilmesi, 60°'de kayma düzlemine; Akma gerilmesinin Twinning/Anti-Twinning asimetrisinden sorumludur. 14
Şekil 2.9 $(\mathbf{1\ 0\ 1})$ yönündeki kesme gerilmei Burgers vektörüne dikey olan gerilme, çekme-basma asimetrisinden sorumludur. 15
Şekil 2.10 $(\mathbf{0\ 1\ 1})$ yönündeki gerilme bileşeni Burgers vektörüne dikey olan stres; çekme-basma asimetrisinden sorumludur. 15
Şekil 3.1 Deformasyon gradyanının çarpımsal ayrışımı. 18
Şekil 3.2 Tek kristal Goss basma testi sonucu – tek kristal modeli doğruluk seviyesi testi: **a.** öncesi (dairesel kesit) ve **b.** sonrası (elips kesit). 20
Şekil 3.3 CPFEM analizi için kullanılan RVE konfigürasyonu 22
Şekil 3.4 Aynı sayıda tane adedine (ana unsur) ve farklı çözünürlüğe sahip RVE'ler 23
Şekil 3.5 BC'leri ayarlamak için kullanılan referans yüzleri 24
Şekil 3.6 GND hesaplamak için kullanılan yöntem – şematik gösterim..... 25
Şekil 3.7 Elemanlar arasında transfer katsayısı misyönelim, yüzey normal vektörü, kayma yönleri ve kayma düzlemlerine bağlıdır. 25
Şekil 3.8 Damgalama düzeni sert bir kalıp, delgi, boş tutucu ve deforme olabilen bir sac levhadan oluşur. 27
Şekil 3.9 Sacdaki elementlerin yönelimi 28
Şekil 3.10 Metal şekillendirme limit diyagramı şematik gösterimi 30
Şekil 4.1 Tane morfolojisi yönelimu. Ferrit (solda) ve martensit (sağda) fazları için major eksen yönelimsi [deg] ve alan oranları..... 33
Şekil 4.2 Ferrrit fazı için tane major (solda) ve minör (sağda) eksenlerinin yarıçapı [mikrometre] ile tane alan dağılımı..... 34
Şekil 4.3 Marsensit (siyah renk) ve ferrit (beyaz renk) fazlarının dağılımı..... 34
Şekil 4.4 Normal yönde (ND) alınan kesitten elde edilen EBSD haritası 35
Şekil 4.5 Normal yönde (ND) alınan <100>, <011>, ve <111> kristallografik yönlerindeki kutup şekilleri..... 35
Şekil 4.6 Haddeleme yönünde (RD) alınan kesitten elde edilen EBSD haritası. 36
Şekil 4.7 Tek eksenli çekme testi numune boyutları (mm) ASTM E8 uyarınca .. 37
Şekil 4.8 DP600'ün deneysel gerilme-gerilme eğrisi (Hadde yönüne göre 0°/45°/90° derecelerde) 38
Şekil 4.9 Otomotiv parçasının simülasyon sonuçları σyy– izometrik görünüş ... 39
Şekil 4.10 Otomotiv parçasının simülasyon sonuçları σyy– üssten görünüş ve 5 farklı bölge 39

Şekil 4.11 Kalıntı gerilme ölçümü için seçilen konumların konumlarını gösteren şematik diyagram (Not: Çeşitli konumların mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 4.2'e bakınız). 40
Şekil 4.12 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 1 ve 2 altındaki tam noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 4.3'ye bakın)..... 41
Şekil 4.13 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 3 altındaki kesin noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 2'ye bakın)..... 42
Şekil 4.14 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 4'ün altındaki kesin noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 2'ye bakın)..... 42
Şekil 4.15 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 5 altındaki kesin noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 2'ye bakın)..... 43
Şekil 4.16 Metal şekillendirme ile üretilen parça üzerinde X-stress Robot ile yapılan kalıntı gerilme ölçümleri..... 43
Şekil 4.17 Kalıntı gerilme ölçümleri, döndürme açıları ve ölçülen gerilme bileşeni 44
Şekil 4.18 X-stress cihazından elde edilen veriler – örnek nokta 1A 45
Şekil 4.19 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası simülasyonları ve deneysel sonuçları (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970) model kalibrasyon sonrası..... 46
Şekil 4.20 Üç farklı model ölçeğinde simülasyonların yapılması ve deneysel karşılaştırmalar..... 46
Şekil 4.21 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası deneysel sonuçlar (Sptizig ve Keh, 1970) ve simülasyon sonuçları 49
Şekil 4.22 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve deneysel sonuçlar (Sptizig ve Keh, 1970). 49
Şekil 4.23 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015) 50
Şekil 4.24 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015) 51
Şekil 4.25 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Zwiesele ve Diehl, 1979) 52
Şekil 4.26 Tek elemanlı model ve sınır şartları..... 52
Şekil 4.27 alfa-Fe tek kristal tek eleman simülasyonları ve deneysel sonuçları (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970) 53
Şekil 4.28 alfa-Fe tek kristal deneysel sonuçlar (Zwiesele ve Diehl, 1979) ve tek eleman simülasyon sonuçları 54
Şekil 4.29 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Spitzig ve Keh, 1970)..... 55
Şekil 4.30 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015) 56
Şekil 4.31 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Narayanan vd., 2014)..... 56

Şekil 4.32 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, tek elemanlı simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki deneysel sonuçların karşılaştırması (Zwiesele and Diehl, 1979) 57
Şekil 4.33 Çoklu eleman simülasyonları için çeyrek test numune geometrisi modeli (EN ISO 6892-1) 58
Şekil 4.34 Çoklu eleman simülasyonları için çeyrek test numune geometrisi yüzeyler..... 58
Şekil 4.35 alfa-Fe tek kristal çoklu eleman simülasyonları ve deneysel sonuçları (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970) 59
Şekil 4.36 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı mekanik özellikler çok elemanlı simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Spitzig ve Keh, 1970). 60
Şekil 4.37 alfa-Fe tek kristal çoklu eleman simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar (Spitzig ve Keh, 1970)..... 60
Şekil 4.38 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015). 61
Şekil 4.39 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Narayanan vd., 2014)..... 61
Şekil 4.40 alfa-Fe tek kristal sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, çok elemanlı simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki deneysel sonuçların karşılaştırması (Zwiesele ve Diehl, 1979)..... 62
Şekil 4.41 DP600 için elde edilmiş olan EBSD haritası ve içindeki herhangi bir bölgeden alınan RVE ölçüleri ve pozisyonu..... 66
Şekil 4.42 Yönelim ölçümündeki hata ve seçilen bölgenin genişliği, Ly 67
Şekil 4.43 Lx ve Ly değerlerine göre sapma miktarı..... 67
Şekil 4.44 Seçilen bölge boyutları ve pozisyonu 68
Şekil 4.45 Farklı çözünürlükte RVE tanımları – aynı mikroyapı için..... 69
Şekil 4.46 Orjinal ağ ve kabalaştırılmış ağ 70
Şekil 4.47 Farklı boyutlar için bulunan hata değerlerinin dağılımı..... 72
Şekil 4.48 Numunenin tamamından alınınan EBSD verileri ile elde edilen faz değerleri..... 73
Şekil 4.49 Sınır şartları için nod ve yüzey numaralandırılması 74
Şekil 4.50 FEM modellerinde oryantasyon dağılımı; (a) 0.5 um x 0.5 um eleman boyutu; (b) 0.375 um x 0.375 um eleman boyutu; (c) 0.25 um x 0.25 µm sonlu eleman boyutu..... 75
Şekil 4.51 0.5 µm x 0.5 µm eleman boyutu için çekme durumunun deneysel ve numerik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi 76
Şekil 4.52 Çekme-Basma asimetrisi 76
Şekil 4.53 <110> Kutup şekilleri (a) deformation öncesi, (b) deformasyon sonrası 77
Şekil 4.54 Yükleme-boşaltma çevrimi şeklinde sınır koşulu olarak uygulanan basınç yükünün zamana bağlı değişimi..... 77
Şekil 4.55 Çekme yükü sonrası oluşan kalıntı gerilmeler – S11 78
Şekil 4.56 Basma yükü sonrası oluşan kalıntı gerilmeler – S11 78
Şekil 4.57 Kesme yükü sonrası oluşan kalıntı gerilmeler – S11 79
Şekil 4.58 a. EBSD haritası ve oluşturulan ve **b.** taslak sonlu eleman modeli ... 79
Şekil 4.59 Farklı modelleme yaklaşımları ve DIC yöntemi ile elde edilen birim şekil değişimi dağılımları 80
Şekil 4.60 Öngörülen kalınlığın belirli noktalardaki deneysel değerlerle karşılaştırılması (Not: Parantez içindeki ve dışındaki değerler sırasıyla hesaplanan ve deneysel verileri temsil eder). 82

Şekil 4.61 Son artan adımda deforme olmuş levhadaki kalınlık değişiminin dağılımı 82
Şekil 4.62 Eşdeğer Cauchy gerilme dağılımı (deformasyon son adımındaki).... 83
Şekil 4.63 Son artan adımda deforme olmuş tabakadaki eşdeğerinin plastik birim şekil değişimiin dağılımı 83
Şekil 4.64 Metal şekillendirme uygulamasının simülasyon için geliştirilen farklı malzeme modeli kullanılan kritik eleman yönteminin şematik gösterimi 84
Şekil 4.65 DP600 deneylsel çekme verileri ve kalibrasyonu 84
Şekil 4.66 Kristal plasitisite malzeme modeli kullanılan bölgeler (sarı renkte) ve eş-yönelimli malzeme modeli (kırmızı renkte)..... 86
Şekil 5.1 Izotropik malzeme modeli kullanılrak elde edilen gerililm dağılımları, σyy (t = 1.8 s anında)..... 87
Şekil 5.2 Taylor homojenizasyonu ile elde edilen gerilme dağılımları, σyy (t = 1.8 s anında)..... 88
Şekil 5.3 Taylor+J2 homojenizasyonu ile elde edilen gerilme dağılımları, σyy (t = 1.8 s anında)..... 88

Tablolar

Tablo 2.1 BCC tek Kristal malzeme için kayma sistemleri..... 12
Tablo 2.2 Literatürde iki veya çok fazlı malzemeler için kullanılan çeşitli RVE'ler 16
Tablo 4.1 Ham malzemenin mekanik özellikleri 37
Tablo 4.2 Seçilen lokasyonların orijine olan mesafeleri..... 40
Tablo 4.3 Ölçülen ve simüle edilen noktaların pozisyonları, CMM cihazı ile pozisyon ölçüm sonuçları 41
Tablo 4.4 Kalıntı gerilme ölçümleri ve simülasyon sonuçları 44
Tablo 4.5 Gerilme ölçümleri – örnek nokta 1A 45
Tablo 4.6 alfa-Fe tek kristal malzeme model sabitleri..... 47
Tablo 4.7 Kalibre edilen model sabitleri 62
Tablo 4.8 Seçilen bölge boyutları ve koordinatları..... 68
Tablo 4.9 Farklı Lx ve Ly değerleri için orjinal yönelim ölçümlerden olan fark (hata) 70
Tablo 4.10 Minimum hata miktarları ve analiz edilen çeşitli farklı boyutlardaki bölgeler 72
Tablo 4.11 Seçilen çözünürlüğe göre hata miktarları 74
Tablo 4.12 Model sabitleri..... 76
Tablo 4.13 DP600 temsili mikro yapı yönelimları ve denk gelen alan miktarları 85
Tablo 4.14 DP600 temsili mikro yapı yönelimları ve denk gelen alan miktarları 86
Tablo 5.1 Simülasyon sonuçlarının karşılaltırıması – σyy, t=1.8 s anında..... 89

Özet

Proje kapsamında metal şekillendirme işlemleri sonrasında oluşan gerilmelerin hesaplanması için mikro yapı malzeme özelliklerini dikkate alan kristal plastisite sonlu eleman yöntemi geliştirilmiştir. Nümerik yöntem otomotiv firması tarafından belirlenen DP600 çelik malzemesi ve metal şekillendirme durumu için uygulamıştır. Verilen numuneler üzerinde yönelim analizleri ve çekme testleri yapılarak malzeme karakterizasyonu tamamlanmıştır. Geliştirilen kristal plastisite yönteminde daha önce literatürde bulunmayan yenilikçi fizik temelli mikro yapı modeli kullanılmıştır. Bunun yanında metal şekillendirme uygulmasını makul simülasyon süreleri içinde ve çözümleyebilmek için Taylor homojenizasyon yöntemi ile malzemenin sahip olduğu yönelim niteliklerine uygun olarak yapabilen bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen model Taylor homojenizasyon yöntemi ve gösterimsel hacim elemanı yöntemi gibi farklı yöntemler ile birlikte kullanılarak çok kristalli yapılarda oluşan kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır. Bu yöntem ile deneysel olarak kalıntı gerilmeler ölçülmekle birliket farklı yöntemler ile elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Metal şekillendirme ile elde edilen kompleks şekile sahip bir parça için analizler yapılmış ve kristal plastisite modeli ile kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır.

Abstract

A crystal plasticity finite element method is developed within the project in order to compute the mechanical and microstructure linked material properties formed after metal forming processes. The method has been applied to a metal forming automative application of DP600 steel material. Material characterization was completed by performing texture analyzes and tensile tests on the given samples of the same material. In the crystal plasticity method, an innovative physics-based microstructure model, which was not previously available in the literature, was used. In addition, in order to analyze the metal forming application within reasonable simulation times, a software has been developed that can perform the Taylor homogenization method in accordance with the texture properties of the material. The residual stresses in polycrystalline structures were calculated by using the developed model together with different methods such as the Taylor homogenization method and the demonstrative volume element method. With this method, residual stresses were measured experimentally and compared with the simulation results obtained by different methods. Analyzes were made for a part with complex shape obtained by metal forming and residual stresses were calculated with the crystal plasticity model.

1 Giriş

Projenin temel amacı kristal plastisite sonlu eleman yöntemini ve yenilikçi fizik temelli yapı modelleri kullanarak fizik temelli model geliştirmek ve bu yazılımı otomotiv firmalarında kullanılan metal şekillendirme problemine uygulayarak konvansiyonel hesaplama yöntemlerine göre getirilerini ortaya çıkarmaktır. Otomotiv uygulaması proje önerisinin gerekliliğini ve faydalarını ortaya çıkarmak için çok önemlidir. Bu amaç doğrultusunda proje çıktıları ülkemiz otomotiv sanayisinin tasarım kabiliyetlerine yönelik katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Projenin temel amaçlarının gerçekleştirilmesi aşağıda sıralanan hedeflerin başarılması ile mümkün olacaktır:

Yenilikçi fizik temelli mikro yapı modelleri geliştirilmesi: Proje kapsamında yenilikçi fizik temelli yapı modelleri geliştirilecek ve deneysel olarak ölçülebilen fiziksel parametreler simülasyonlar ile hesaplanacaktır. Model ilk olarak MATLAB® ortamında hazırlanmıştır olup istenilen sonlu eleman yazılımına entegre edilebilir nitelikte olacaktır. Ölçülecek parametreler:

- Geometrik sapmalar; elastik geri yaylanma (elastic springback)
- Mikro yapısal değişimler; kristallografik yönelim
- Kalıntı gerilmeler

Homojenizasyon yöntemlerinin yönelim oluşumuna etkisinin belirlenmesi: Bu çalışmada üç farklı homojenizasyon yönteminin yönelim ve kalıntı gerilme oluşumlarına etkisi araştırılacaktır; i. Taylor, ii. Sonlu eleman gösterimsel hacim ve lokal model, ve iii. Sonlu eleman gösterimsel hacim ve lokal olmayan model. Kullanılan homojenizasyon yönteminin mikro yapı temelli modellerle birlikte çok kristal yönelim oluşumlarına olan etkisinin belirlenmesi önemlidir. Bu hedef doğrultusunda simülasyonlarda kullanılacak olan homojenizasyon yöntemi belirlenmiş olacaktır.

Kalıntı gerilmelerin hesaplanması: Bu proje kapsamında kalıntı gerilmelerin hesaplanması için yenilikçi nümerik yöntemler geliştirilecektir. Kalıntı gerilmelerin hesaplanması konusu birçok çalışmada ihmal edilmektedir. Kristal plastisite sonlu eleman yöntemi kullanarak kalıntı gerilmelerin hesaplanması üzerine nadir olarak yapılan çalışmalar vardır. Mekanik olarak yük kaldırıldığında sonlu eleman vb.

mekanik analizler için denge kanununa göre dış yükler kaldırıldığında iç yük yani gerilme kalmaması gerekir. Bu sebepten dolayı kalıntı gerilmelerin hesaplanabilmesi için yenilikçi yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir.

Kalibrasyon testleri: Kalibrasyon testleri kapsamında mikro yapı karakterizasyonu, mekanik testlerin yapılması gerekmektedir. Model sabitlerinin belirlenmesi için kalibrasyon verileri çok önemlidir.

Validasyon testleri: Otomotiv firması tarafından belirlenecek gerçek bir metal şekillendirme işlemi için yapılacak olan deneysel ve simülasyon faaliyetlerini içerir. Deneysel olarak deformasyon sonrası numuneler üzerinde ölçülerin yapılması ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yapılacaktır. Karşılaştırılacak ölçütler:

- Geometrik sapmalar; elastik geri yaylanma (elastic springback)
- Mikro yapısal değişimler; kristallografik yönelim
- Kalıntı gerilmeler

Geliştirilen model otomotiv metal şekillendirme problemine uygulanarak yöntemin sınaması yapılacaktır. Metal şekillendirme için gerekli olan simülasyon girdileri otomotiv firması tarafından temin edilecektir. Yapılacak çalışmalar kapsamında, sonlu eleman yönteminin hazırlanması, ilgili hesaplamaların kodlama yapılarak sonlu eleman yöntemine dâhil edilmesi, ve belirlenen metal şekillendirme problemi ve sınır şartları için simülasyonlar yapılmasını içermektedir. Validasyon simülasyonlarının MSC MARC® – HYPELA2 ile kullanıcı tanımlı model olarak hazırlanması öngörülmüştür.

Proje kapsamında ele alınacak metal şekillendirme problemi için otomotiv firmasında halihazırda kullanılan mevcut klasik modelleme yöntemleri ile yapılan simülasyon sonuçları ve yeni geliştirilen model sonuçları karşılaştırılarak modelleme yöntemi ile elde edilecek kazanımların ortaya çıkarılması sağlanacaktır. Otomotiv firmasının kullandığı simülasyonlarda birim şekil değişimi hızlarına göre akma yüzeyini oranlayarak kaba bir hesap yapılmaktadır. Oysa kristal plastisite sayesinde her model birim şekil değişimi hızlarına bağlı olduğu için böyle bir ölçeklendirmeye gerek kalmamaktadır.

Belirtilen bu hedefler gerçekleştiğinde önerilen modelin getirileri net olarak ortaya konulmuş olacaktır. Proje otomotiv uygulamasından bağımsız sadece bilimsel ve yenilikçi yönleri ile teorik bir çalışma olarak planlanmadı. Bunun sebebi projede

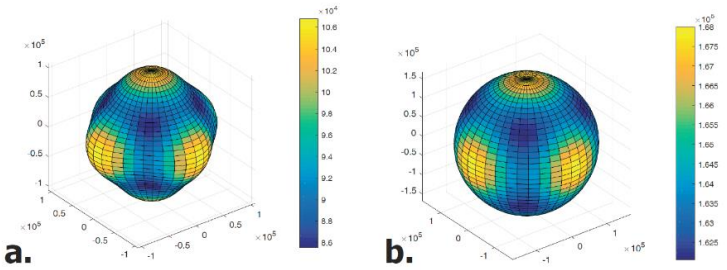
geliştirilen yöntemin bir otomotiv metal şekillendirme problemine uygulanmasıyla birlikte projenin otomotiv sanayisi için faydalı çıktıları olan bir çalışma olarak planlanmasıdır. Otomotiv firmasının kullanmakta olduğu mevcut tasarım simülasyonlarının sonuçları ile karşılaştırılarak mevcut tasarım kabiliyetlerine kıyasla tahmin kabiliyetinde olan iyileşmeler proje kapsamında ortaya konacaktır. Proje kapsamında yapılacak olan çalışmalar bununla sınırlı kalmayıp deneysel validasyon çalışmaları da içermektedir. Deneysel olarak geometrik değişimleri, yönelim oluşumu, ve kalıntı gerilmeleri ölçülerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sınanacaktır. Bu proje çıktılarının ülkemiz otomotiv endüstrisinin metal şekillendirme tasarım ve simülasyon teknolojisine yenilikçi hesaplama yöntemleri hakkında farkındalık geliştirerek önemli katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

2 Literatür Özeti

Kristal Plastisite

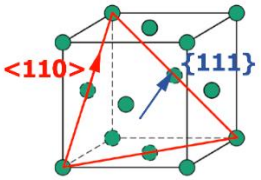
Proje kapsamında yenilikçi fizik temelli yapı modeli oluşturularak kristal plastisite sonlu eleman yöntemi kullanarak metal malzemelerin mekanik davranışı modellenecektir. Kristal plastisite; malzeme bilimi, sürekli cisim mekaniği, numerik yöntemler ve sonlu eleman yöntemi gibi birbirinden farklı çok disiplinli alanları kapsayan bir alandır. Kristal plastisite, lineer olmayan malzeme davranışı içeren numerik olarak çözümü zor bir problemdir, Dawson (2000).

Tek kristal yapıların elastik ve plastik yönelimli davranışa sahip oldukları uzun zamandan beri bilinmektedir, McDowell (2000). Şekil 2.1'de elastisite tensörünün yönelimli davranışı yüzey merkezli yapıya sahip olan alüminyum ve bakır malzeme için gösterilmiştir.



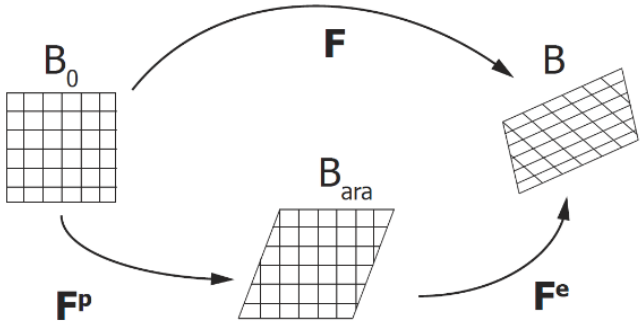
Şekil 2.1 Tek kristal malzemelerde yönelimli elastik rijitlik tensörünün üç boyutlu değişimi; **a.** Alüminyum ve **b.** Bakır

Plastik yönelimli davranışın temelinde kayma deformasyonu ve bu deformasyonun en sıkı atomik yerleşimlerin olduğu yönlerde olması sebebi yatmaktadır. Şekil 2.2'de yüzey merkezli kristaller için en sıkı atom yerleşimlerinin olduğu; {111} düzlemleri ve <110> yönleri gösterilmiştir, Gottstein (2004). Plastik deformasyon için yüzey merkezli kristallerde 12 adet farklı kayma düzlemi vardır. Hacim merkezli kristaller için kayma yönü <111> yönlerinde olmaktadır ancak, belirli bir kayma düzlemi yoktur. Sıcaklığa bağlı olarak {110}, {112}, ve {123} düzlemlerinde kayma deneysel olarak gözlemlenmiştir ve birçok çalışmada bu sistemlerin bir veya birkaçının aktif olduğu kabul edilmektedir. Tek kristal yapılar yönelimli davranışa daha eğilimlidirler, daha doğru bir deyişle en keskin yönelime sahiptirler. Tek kristallerin sahip oldukları yönelimli davranış, çok kristal davranışı belirlemektedir, Kocks vd. (1998).



Şekil 2.2 Yüzey merkezli kübik tek kristal için {111} kayma düzlem normali (mavi renk) ve <110> kayma yönü (kırımızı renk).

Tek kristal malzemelerde kullanılan deformasyon kinematiği Şekil 2.3'de gösterilmiştir, Lee (1969). Toplam deformasyon çarpımsal olarak elastik ve plastik olarak birbirinden ayrılır. Plastik deformasyon sonuncunda ara konfigürasyon olarak adlandırılan fiziksel olarak var olmayan ancak matematiksel olarak hesapları kolaylaştıran ara bir referans sistemi belirlenmiştir. Plastik deformasyon, kayma düzlemlerini ve yönlerini değişmez. Bu sebepten dolayı hesaplamaların bu ara konfigürasyonda değişmeyen vektörler ve tensörler ile yapılması kolaylık sağlamaktadır.

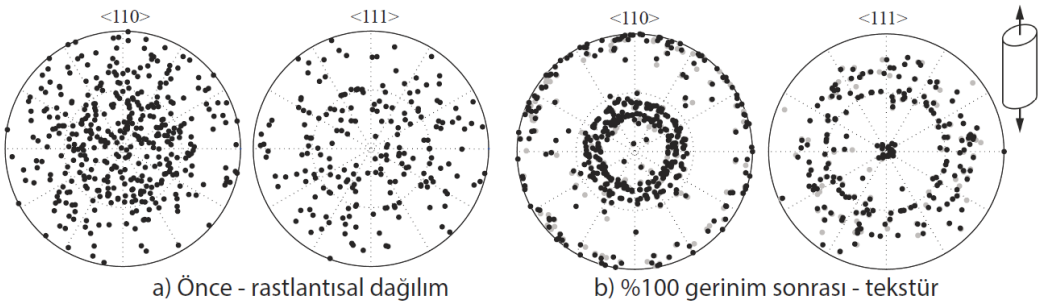


Şekil 2.3 Kristal plastisite deformasyon kinematiği: B0, B_{ara}, ve B ilk, ara, ve son referans konfigürasyonlarını ifade etmektedir. **F**, $\mathbf{F}^e$, ve $\mathbf{F}^p$ ise toplam, elastik, ve plastik deformasyonları gösterir.

Tek kristal plastisite analizlerinde temel problem plastik ve elastik deformasyon miktarını belirleyebilmektir. Bu tür lineer olmayan plastisite problemini çözmek için Newton-Raphson temelli çeşitli nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Kalidindi vd. (1992) simetrik ve altı adet birbirinden bağımsız bileşene sahip ikinci Piola-Kirchoff gerilme tensörünü ana değişken olarak kullanır. Bu sayede lineer olmayan nümerik çözüm için hesaplanması gereken tanjant 6x6 bir matrix olur ve hızlı bir şekilde çözüm bulunabilir. Ancak, gerilme hesabı için bir ilk tahmin gereklidir ve elastik tahmin bazen problemin çözümden uzaklaşmasına ve nümerik sorunlara sebep olabilmektedir. Dawson vd. (1992) ise plastik deformasyon gradyanını temel alan bir nümerik yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde deformasyon gradyanı 9 adet birbirinden bağımsız elemana sahiptir. Dolayısıyla bu yöntem yavaş sonuç vermektedir ancak plastik tahmin numerik olarak daha istikrarlı çözüm imkânı

sunar. Cuitino ve Ortiz (1993) ise daha farklı olarak kayma hızlarını temel parametre olarak kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Daha sonraki çalışmalarda McDowell (2008) plastik dönme hızına bağlı çözüm kullanmıştır. Son dönemlerdeki çalışmalarda Dawson'un kullandığı gibi plastik spin temel parametre olarak kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi plastik spin tensörünün simetrik olması dolayısıyla bileşen sayısının en az olması ve Newton-Raphson çözümü için gerekli tam plastik tahminin (fully plastic initial guess) birim şekil değişimi tahminlerine oranla numerik sonuçlarda sapma (divergence) riskinin daha az olmasıdır. Burada bahsedilen nümerik çözümlemelerin herhangi birisi kullanılarak kristal plastisite problemleri tek kristal sevisinde çözülmüştür. Proje yürütücüsünün ilgili konuda Dawson-Maniatty yöntemini uygulayarak kristal plastisite problemini çözdüğü yayınları mevcuttur, Demir vd. (2010).

Çok kristalli malzemelerde kristallerin doğrultuları rastlantısal dağılmışsa ve yeterli sayıda kristal varsa çok kristal davranışı eş-yönelimli (eş-yönelimli) olarak kabul edilebilir. Ancak eş-yönelimli başlangıç yapılarına sahip malzemelerde bile, deformasyon ile birlikte yönelimli yapıların oluştuğu bilinmektedir. Dolayısıyla çok kristalli yapılarda başlangıçta malzeme yönelime sahip değilse bile, deformasyon ile yönelimli davranışa sahip olurlar. Örnek olarak Şekil 2.4'de eksenel çekme öncesi ve sonrasında oluşan <110> ve <111> kristallografik yönlerindeki yönelim gösterilmiştir, Demir (2017). Görüldüğü gibi eksenel yükleme deformasyonda bir rotasyon olmadığı halde kristaller dönerek kümelenmektedir. Kristallerin plastik yönelimli davranışı nedeniyle belirli yönlerde kümelenmesine yönelim oluşumu denmektedir.



Şekil 2.4 <110> ve <111> kristal yönlerinin çekme ekseninde simetrik yükleme (çekme dışındaki eksenlerde eşit basma durumu) için: a) birim şekil değişimi öncesi rastlantısal kristal doğrultularının dağılımı, b) %100 eksenel simetrik çekme sonrası kristal doğrultularının dağılımı (Demir, 2017)

Yönelimli davranış modellemesi için çeşitli ölçeklerde uygulanan yöntemler mevcuttur. Öncelikli yapılan çalışmalarda Taylor kanunu kullanılarak tüm kristallere aynı deformasyon gradyanı uygulanır ve bulunan tüm gerilme

sonuçlarının kristallerin eş yoğunlukta olduğu varsayılarak ortalaması alınırdı, Balasubramanian ve Anand (2000), Anand (2004). Bu modelleme yöntemi eş birim şekil değişimi veya Taylor homojenizasyonu olarak adlandırılır, Taylor (1938). Bu homojenizasyon ile taneler arasındaki deformasyon uyumluluğu sağlanır ancak mekanik denge sağlanamaz dolayısıyla yaklaşık bir yöntemdir, Reid (1973). Daha sonra farklı daha hassas yönelim tahminleri sağlayan ALAMEL gibi homojenizasyon yöntemleri geliştirildi, Van Houtte vd. (2005). Bunun dışında GIA gibi sonlu eleman kullanılarak iki farklı kristal yapısı arasında olan etkileşimi daha hassas modelleyen yöntemler kullanıldı, Roters vd. (2010). Dawson, en iyi homojenizasyon yönteminin sonlu eleman yöntemi olduğunu göstermiştir, bunun temel sebebi bu yöntemin hem mekanik dengenin (equilibrium) hem de birim şekil değişimi uyumluluk (strain compatibility) şartlarının sonlu eleman ortamında zayıf olarak sağlanmasına olanak sağlamasıdır, Dawson (2000). Bu sayede tanelerin etkileşimi daha hassas bir şekilde modellenebilmektedir. Yakın zamanda yapılan çalışmalar kristallerden oluşan yapılarının sonlu eleman ortamında daha gerçekçi çok kristal ağlar (mesh) ile oluşturulması üzerine odaklanmıştır, Quey vd. (2011).

Fizik temelli modeller yakın zamandan itibaren farklı malzemeler için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Beyerlein vd., 2008; Alankar vd., 2009; Lee vd., 2010; Shanthrai vd., 2011; Knezevic vd., 2014). Fizik temelli model ile kastedilen, oluşturulan modelin matematiksel sabitler yerine fiziksel olarak ölçülebilen parametrelerden oluşmasıdır. Fizik temelli model kullanılması ile malzeme mukavemetini ifade eden denklemler matematiksel sabitler yerine dislokasyon yoğunluğu cinsinden ifade edilmesi ile elde edilir. Bilindiği üzere dislokasyon yoğunluğu da ölçülebilen bir fiziksel parametredir (Ungar vd., 1982). Temel olarak iki kanunun değişiminden bahsedilebilir: kayma kinetiği ve birim şekil değişimi ile sertleşme denklemleridir.

Dislokasyon kinetiği birçok çalışmada ihmal edilmekte ve kinematik denklem olarak fenomenolojik olan güç kanunu (power law) kullanılmaktır. Güç kanunu Orowan denklemi ile değiştirilerek kesme hızı dislokasyon hızı ve mobil dislokasyon miktarı ile doğru ortantılı hale getirilmiştir (Roters vd., 2000; Roters ve Ma, 2004).

Mobil dislokasyonların bulunması veya tahmin edilmesi çok zordur, Kocks ve Mecking (2003). Ancak istatiksel ortalama olarak tahmin edilebilirler. Mobil dislokasyonlar genellikle toplam dislokasyon yoğunluğunun onda biri seviyelerinde

olmaktadır, Hull ve Bacon (2001). Gascaneri ve Nix (1974), Lagneborg ve Forsen (1973) istatiksel olarak bu yoğunlukları bulmaya çalışmışlardır. Gottstein ve Argon (1987), mobil dislokasyon yoğunluğunu, kayma düzleminde segment uzunlukları için log-normal bir dağılım sergilediğini kabul ederek bulmuştur. Burada kritik dislokasyon segment boyu uygulanan efektif gerilmee bağlıdır. Bu kritik segment boyundan uzun segmentlerin aktif yani mobil olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca model, kayma düzleminde engel bulunan dislokasyonların ortalama ara mesafelerine bağlıdır, Barlat vd. (2002).

Dislokasyon temelli modellemenin önemini gösteren bir başka nokta ise, dislokasyon hızının belirlenmesinde fizik temelli bağıntıların kullanımına imkân sağlamasıdır. Oysa dislokasyon hızı, orta ve düşük birim şekil değişimi hızlarında, termal aktivasyon ile belirlenir, Argon (2008). Dislokasyonlar kayma esnasında karşılaştıkları engeller önünde beklerler. Bu engeller başka düzlemlerdeki dislokasyonlar olabilir. Dislokasyonların kayma hızı yaklaşık ses hızında gerçekleşir. Dolayısıyla sözü edilen engel önünde bekleme süresi dislokasyonların ortalama hızının belirlenmesinde önemli rol oynar, Kocks ve Argon (1975). Termal aktivasyon sayesinde birim şekil değişimi hızı fiziksel olarak deneylerde gözlendiği gibi sıcaklığa bağlı olarak ifade edilir.

Kayma direnci yerine de dislokasyon yoğunluğunu temel parametre olarak kullanan birçok yayın literatürde yer almıştır (Arsenlis ve Parks, 2002; Geers vd., 2011). Kayma direnci dislokasyon temel parametreli yöntemlerde iki farklı terim kullanılmaktadır. Uzun-menzilli termal olmayan kayma direnci ve kısa menzilli termal kayma direnci. Bu iki özelliğin değişimi malzeme mukavemetini belirlemektedir. Literatürdeki birçok referans, uzun menzilli kayma direncini paralel kenar tipindeki dislokasyon yapılarının yoğunluklarından hesaplamaktadır. Kocks'un geliştirdiği bu temel prensip uyarınca kayma düzleminde oluşan dislokasyon kümelenmelerinin ara mesafeleri, dislokasyon yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir (Kocks ve Mecking, 2003). Kocks bağıntısı kullanılarak, uzun menzilli gerilme bileşimini oluşturan dislokasyon kümelerinin ara mesafesi kullanılarak elde edilir. Kısa menzilli dislokasyon etkileşimi ise kayma düzleminde olmayan dislokasyonların yoğunluklarından hesaplanır. Dislokasyonların birbirleriyle etkileşimi plastik deformasyon sonucunda olmaktadır. Kayma düzlemler arasında olan bu etkileşimi dikkate almak için kayma düzlemlerin arasındaki etkileşimleri göz önüne alan Franciosi etkileşim modülü kullanılmaktadır

(Franciosi ve Zaoui, 1982). Klasik modellerde ise sonradan sertleşme (latent hardening) modülü phenomenolojik olarak bu etkiyi modellemekte kullanılır (Kalidindi vd. 1992) ancak Franciosi dislokasyon etkileşim modülüne göre etkileşimi modellemekte daha kaba bir seviyede kalmaktadır. Bu noktada dislokasyon yapıları ve bunların modellemedeki önemi ortaya çıkmaktadır. Kayma direnci fizik temelli modeller ile daha hassas bir şekilde modellenebilmektedir.

Tek kristallerin mukavemetinin boyuta bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bunun sebeplerinden bir tanesi, tek kristal içinde birim şekil değişimi gradyanlarının oluşması ve bu gradyanların geometrik olarak gerekli olan dislokasyonlar tarafından sağlanmasıdır. Bu tip dislokasyonlar malzemede dislokasyon yoğunluğunu arttırarak dislokasyonlar arasındaki ortalama mesafeyi azaltmaktadır. BU sayede birim şekil değişimi gradyanı içeren tek kristallerin boyuta bağımlılığı açıklanmıştır. Geometrik olarak gerekli dislokasyonların hesaplanması için çeşitli yöntemler önerimiştir (Acharya, 2000; Gurtin vd., 2007).

Taneler arası etkileşime boyut bağımlığını da eklemek için lokal olmayan yöntemler kullanılmaktadır (Evers vd., 2004). Birçok çalışmalarda yalnızca birim şekil değişimiler arasındaki farklılıklar, geometrik olarak gerekli dislokasyonlar cinsinden ifade edilmekte ve dislokasyon yapıların yoğunluğun artması neticesinde olan mukavemet artışı yardımıyla açıklanmaktadır (Dunne vd., 2007; Liang ve Dunne, 2009). Lokal olmayan hesaplamalar ile Hall-Petch bağıntısı modellere eklenebilir olmaktadır. Lokal sonlu eleman modelleri içinde bir boyut etkisi bulunmamaktadır (Van Houtte vd., 2010). Bu yöntemlerden tane (grain) yapıları arasındaki kayma geçişini dikkate alan modeller kullanılmıştır (Roters vd., 2006). Benzer şekilde Yalçınkaya ve Özdemir (2014) tane yapıları arasındaki kayma geçişini dikkate alan tane sınırı eleman tipini tanımlamış ve Ertürk vd. (2009) boyuta bağlı mekanik davranışı modelleyebilmek için enerji temelli bir model geliştirmiştir.

Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmelerin özellikle hareketli parçaların ömürlerinde önemli etkiye sahip oldukları bilinmektedir. Bu sebepten türbin bıçakları, şaftlar gibi parçaların yüzeylerine kumlama türü iyileştirmeler uygulanarak kalıntı gerilmelerin oluşması sağlanmaktadır. Ancak istenmeyen kalıntı gerilmeler montaj, kaynak, kaplama, ve metal şekillendirme gibi üretim faaliyetleri sonucunda da istenmeyen kalıntı

gerilmeler oluşabilmektedir. Kalıntı gerilmelerin eklemeli üretim sistemlerinde temel sorunu olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla kalıntı gerilmelerin ölçülmesi yakın zamanda önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Ancak bu konudaki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bunun temel sebebi ise, sonlu eleman mekanik analizlerinde dış yükler kaldırıldığında bunları dengeleyen iç yüklerinde sıfırlanmasıdır. Beaudoin vd. (2017) lokal bir model kullanarak kalıntı gerilmeleri kristal plastisite ile modellemiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Joshi vd. (2011) ise lokal olmayan yöntem kullanmışlardır. Kalıntı gerilmelerin modellenmesi konusunda özbirim şekil değişimi yöntemi geliştirilmiştir ve bu gerilmeleri termal genleşmelere benzer bir şekilde modellemiştir (Musinski ve McDowell, 2015; Dunne vd., 2015; Salvati ve Korsunsky, 2017). Diğer birtakım çalışmalar kalıntı gerilmelerin tahribatsız olarak ölçülmesine ve özbirim şekil değişimi yöntemi ile parça üzerindeki gerilme dağılımlarının belirlenmesi üzerine yapılmış çalışmalardır. Yürütücü Dawson ile birlikte gerilme değerlerinin X-ışını kırınımı yöntemi ile tahribatsız olarak yapılan ölçüm sonuçlarından parça üzerindeki gerilme dağılımlarını hesaplayan yöntem geliştirilmiştir (Demir vd., 2013). Yöntem iki ve üç boyutlu sıkı geçme parçalara uygulanmış ve parça üzerindeki gerilme dağılımları başarıyla bulunmuştur. Bu yöntem deplasmanı değişken olarak kullanan sonlu eleman analizlerinden çok farklı olarak temel değişken gerilme bileşenleridir. Deplasman temelli sonlu eleman analizlerinde kalıntı gerilmelerin bulunması konusunda literatürde çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

Metal Şekillendirme

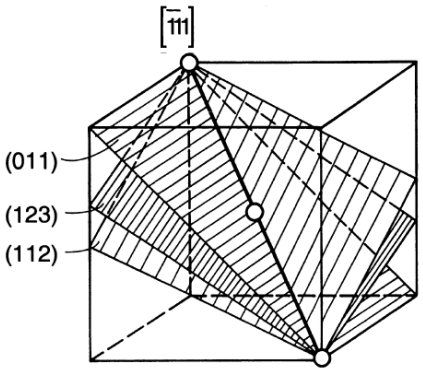
Metal şekillendirme konusunda kristal plastisite hususunu entegre etmeye dönük birçok çalışma vardır (Anand vd., 2001; Dawson vd., 2003). Roters bardak çekme esnasında oluşan kulakların periyodunu tahmin etmek için kristal plastisite kullanmıştır (Roters vd., 2008). Roters çalışmasında sonlu eleman ortamındaki her bir malzeme noktasında kristal yönelim komponentleri etrafında log-normal dağılım kabul etmiş ve tüm yönelim komponentleri için bulunan sonuçlar Taylor homojenizasyonu ile ortalaması alınarak nihai sonuç bulunmuştur. Bu çalışma yüksek hesaplama kabiliyeti gerektirmektedir.

BCC (ferrit fazı) malzeme davranışının modellenmesi

BCC malzemeler bir tek sıkı atomik paketleme yönüne sahipdir. <111> kristal yönünnde plastik deformasyon gerçekleşir. Ancak BCC malzemeler herhangibir sıkı atomik paketleme düzlemi yoktur. Dolayısıyla BCC malzemeler belirsiz ve

farklı kayma düzlemlerinde kaymaları sonucu plastik deforme olurlar (Raabe vd., 2011; Gottstein, 2013).

Sıkı olan düzlemler için {011}, {112}, ve {123} düzlemlerinde kayma gözlenmektedir, Şekil 2.5. Bu düzlemlerin etkinliği sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Oda sıcaklığında {011} düzlemi nispeten daha etkin olarak gözlenir (Bassani, 2013; Pichl, 1993).



Şekil 2.5 *<111> kayma yönünü paylaşan BCC kafesinin kayma düzlemleri kümesi.*

BCC malzemelerde deformasyon gerilmein belirli eşik değeri aşması sonucu oluşur. Bu eşik değere Peierls gerilmei adı verilir. Peierls gerilmei göre, bir kafes yapısındaki kayma gerilmesi Denklem (2.1) kullanılarak hesaplanır. Denklem 2.1'de d ve b sırasıyla kafes aralığı ve Burger vektörünün değeridir. Denklemden yorumlanabileceği gibi, kafes aralığı ne kadar sık olursa (ve Burgers vektörü ne kadar küçükse) kayma gerilmesi o kadar yüksek olur. Atomların deplasmanı, b, <111> kayma yönünde en küçüktür (BCC'de $\frac{\sqrt{3}}{2}a$, <100> boyunca ve $\sqrt{2}a$ boyunca <110>).

$$\tau_P = \frac{2G}{1-\nu}\exp\left(-\frac{2\pi}{(1-\nu)}\frac{d}{b}\right) \quad (2.1)$$

Ayrıca, d faktörü aşağıdaki Denklem (2.2) kullanılarak herhangi bir (hkl) kristal düzlemi için hesaplanır.

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2.2)$$

Düşük endeksli Miller endeksli uçakların d faktörünün maksimum seviyeye ulaşacağı formülasyondan kolayca anlaşılabilir. BCC için {110} düzlemi maksimum

kafes boşluğuna (veya bir sonraki mahalle düzlemine) sahiptir. Bu nedenle BCC yapısında <111> yönünde Schmid kayma düzlemleri ($\sqrt{3}$a olan daha fazla kafes aralığı) ve kayma düzlemi {110} doğrultusundadır.

Kayma, Schmid teorisine göre en yüksek kayma gerilmesinin gerçekleştiği düzlemlerde gerçekleşir ve Schmid faktörü, sırasıyla $\boldsymbol{m}^{\alpha}$ ve $\boldsymbol{n}^{\alpha}$ kayma düzleminin vektör yönü ve normal vektör olarak tanımlanır, Denklem (2.3-2.4). Daha yüksek Schmid faktörü, daha yüksek kesme gerilmei τ anlamına gelir (Hull ve Bacon, 2001; Hirth ve Lothe, 1982).

$$\tau_{crss} = \sigma_y \, cos\varphi_N \, cos\varphi_D \quad (2.3)$$

$$\tau^{\alpha} = \boldsymbol{n}^{\alpha} \, . \, \boldsymbol{\sigma} \, . \boldsymbol{m}^{\alpha} \quad (2.4)$$

BCC malzemeler Schmid yasalarını takip etmemektedir, bu durum aşağıdaki deneysel gözlemlere sebep olmaktadır (Duesbery ve Foxall, 1969; Christian, 1983; Duesbery, 1984; Qin ve Bassani, 1992; Wasserbaech, 1995)

- Basma ve çekme gerilme asimetrisi
- En yüksek kayma gerilmesine sahip olmayan yönlerde kayma

Schmid dışı davranış, vida tipi dislokasyonların çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır (Vitek vd., 2004). Atomik simülasyonlara göre, çekirdeğin yer değiştirme hareketinden önce dönüşmesi gerekir ve bu dönüşüm, kayma düzlemi dışındaki düzlemlerde hareket eden kayma yönlerindeki kayma gerilmelerinin yanı sıra kayma düzlemine Burger vektöra dik doğrultuda kayma gerilmelerinden de etkilenmektedir, bu nedenle, bu kayma-dışı gerilmelerin dislokasyon çekirdeği üzerindeki gerilmeleri ve bunun sonucunda dislokasyon hareketi, Schmid yasasının bozulmasına ya da diğer bir deyişle Schmid-dışı fenomeninin gelişmesine neden olur (Ito ve Vitek, 2001; Groeger, 2008).

Bu tür bir deformasyon, kolayca aktive edilen kayma sistemleri, isteğe bağlı kalıcı bir şekil değişimi oluşturmak için yeterli olmadığında meydana gelir. Schmid dışı etkiler 24 adet kayma sistemi kullanılarak ve +/- yönlerdeki kayma etkilerine farklı etki yaparak modellenmektedir, Tablo 2.1 (Weinberger, 2012).

Tablo 2.1 BCC tek Kristal malzeme için kayma sistemleri

α	Reference system	$\boldsymbol{m}^{\alpha}$	$\boldsymbol{n}^{\alpha}$	$\boldsymbol{n}_1^{\alpha}$	α	Reference system	$\boldsymbol{m}^{\alpha}$	$\boldsymbol{n}^{\alpha}$	$\boldsymbol{n}_1^{\alpha}$
1	$(01\bar{1})\,[111]$	$[111]$	$[01\bar{1}]$	$[\bar{1}10]$	13	$(01\bar{1})\,[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$[01\bar{1}]$	$[10\bar{1}]$

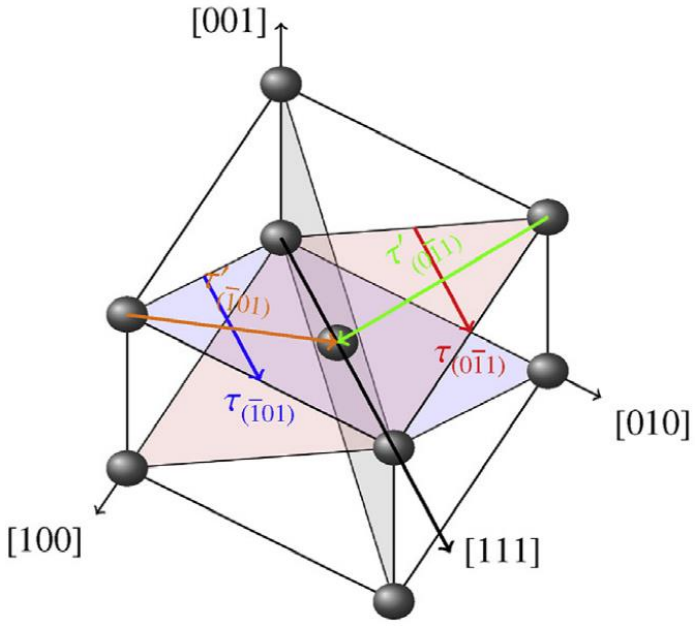
2	$(\bar{1}01)$	$[111]$	$[111]$	$[\bar{1}01]$	$[0\bar{1}1]$	14	$(\bar{1}01)$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$[\bar{1}01]$	$[\bar{1}10]$
3	$(1\bar{1}0)$	$[111]$	$[111]$	$[1\bar{1}0]$	$[10\bar{1}]$	15	$(1\bar{1}0)$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$[1\bar{1}0]$	$[0\bar{1}1]$
4	$(\bar{1}0\bar{1})$	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	$[\bar{1}\bar{1}0]$	16	$(\bar{1}0\bar{1})$	$[1\bar{1}\bar{1}]$	$[1\bar{1}\bar{1}]$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	$[01\bar{1}]$
5	$(0\bar{1}1)$	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}11]$	$[0\bar{1}1]$	$[101]$	17	$(0\bar{1}1)$	$[1\bar{1}\bar{1}]$	$[1\bar{1}\bar{1}]$	$[0\bar{1}1]$	$[\bar{1}\bar{1}0]$
6	(110)	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}11]$	$[110]$	$[01\bar{1}]$	18	(110)	$[1\bar{1}\bar{1}]$	$[1\bar{1}\bar{1}]$	$[110]$	$[101]$
7	$(0\bar{1}\bar{1})$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[0\bar{1}\bar{1}]$	$[1\bar{1}0]$	19	$(0\bar{1}\bar{1})$	$[11\bar{1}]$	$[11\bar{1}]$	$[0\bar{1}\bar{1}]$	$[\bar{1}0\bar{1}]$
8	(101)	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[101]$	$[011]$	20	(101)	$[11\bar{1}]$	$[11\bar{1}]$	$[101]$	$[1\bar{1}0]$
9	$(\bar{1}10)$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[\bar{1}10]$	$[\bar{1}0\bar{1}]$	21	$(\bar{1}10)$	$[11\bar{1}]$	$[11\bar{1}]$	$[\bar{1}10]$	$[011]$
10	$(10\bar{1})$	$[1\bar{1}1]$	$[1\bar{1}1]$	$[10\bar{1}]$	$[110]$	22	$(10\bar{1})$	$[\bar{1}1\bar{1}]$	$[\bar{1}1\bar{1}]$	$[10\bar{1}]$	$[0\bar{1}\bar{1}]$
11	(011)	$[1\bar{1}1]$	$[1\bar{1}1]$	$[011]$	$[\bar{1}01]$	23	(011)	$[\bar{1}1\bar{1}]$	$[\bar{1}1\bar{1}]$	$[011]$	$[110]$
12	$(\bar{1}\bar{1}0)$	$[1\bar{1}1]$	$[1\bar{1}1]$	$[\bar{1}\bar{1}0]$	$[0\bar{1}\bar{1}]$	24	$(\bar{1}\bar{1}0)$	$[\bar{1}1\bar{1}]$	$[\bar{1}1\bar{1}]$	$[\bar{1}\bar{1}0]$	$[\bar{1}01]$

Schmid Olmayan Etkiler

Schmid olmayan etkinin dâhil edilmesi kayma kayma direnci gerilmei (τ_{cr}) üzerine eklenerek yapılır (Yalçınkaya vd., 2008; Patra vd., 2014), Denklem (2.5).

$$\tau_{cr} = (\boldsymbol{m}^{\alpha} \otimes \boldsymbol{n}^{\alpha}) : \boldsymbol{P} + a_1 (\boldsymbol{m}^{\alpha} \otimes \boldsymbol{n}_1^{\alpha}) : \boldsymbol{P} + a_2 \left((\boldsymbol{n}^{\alpha} \times \boldsymbol{m}^{\alpha}) \otimes \boldsymbol{n}^{\alpha} \right) : \boldsymbol{P} + a_3 \left((\boldsymbol{n}_1^{\alpha} \times \boldsymbol{m}^{\alpha}) \otimes \boldsymbol{n}_1^{\alpha} \right) : \boldsymbol{P} \quad (2.5)$$

$\boldsymbol{m}^{\alpha}$, $\boldsymbol{n}^{\alpha}$ ve a_1, a_2, a_3 sırasıyla kayma yönü vektörü, kayma düzlemi normal vektörü ve Schmid olmayan katkı terimlerinin sabit parametreleridir. Girilen denklem ve etkili terimleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



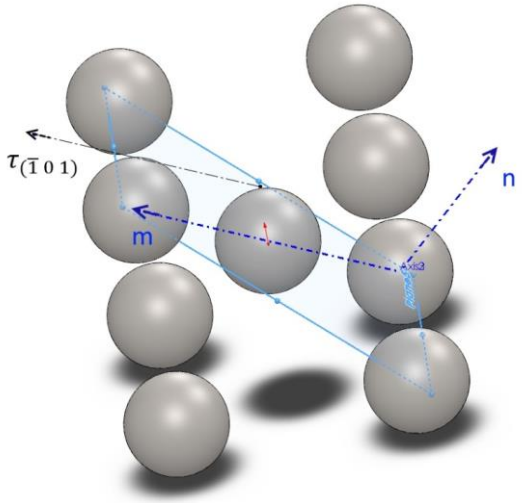
Şekil 2.6 Kayma gerilmesinin bileşenlerinin yönleri, Schmid ve Schmid olmayan yönlerdeki kesme gerilmeleri.

$\boldsymbol{n}_1^{\alpha}$, referans bölgesi $\boldsymbol{n}^{\alpha}$ ile $-60°$'lik bir açı yapan ve $\{1\ 1\ 0\}$ düzlemine normal olan birim vektördür. Kritik kayma direnci, Schmid dışı etkiler ile Schmid gerilmeinden Denklem (2.6)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\tau_{cr}^{\alpha} = \tau^{\alpha} + \sigma_{nS}^{\alpha} \quad (2.6)$$

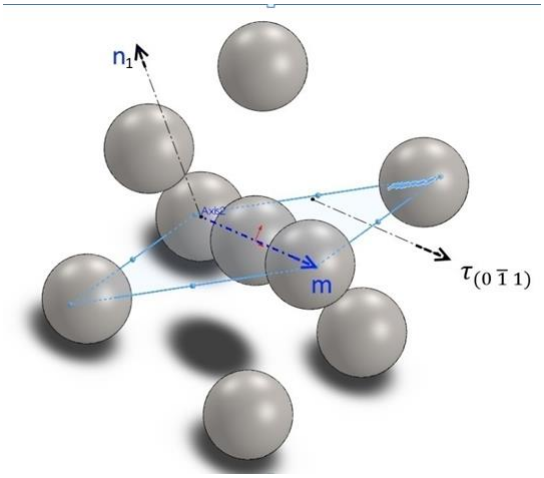
Kesme direnci şartları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- $\tau_{(\bar{1}\,0\,1)} = (\boldsymbol{m}^{\alpha} \otimes \boldsymbol{n}^{\alpha}) : \boldsymbol{P}$ (kayma düzlemindeki kayma yönüne paralel gerilme bileşeni - kayma gerilmesi) (Şekil 2.7)



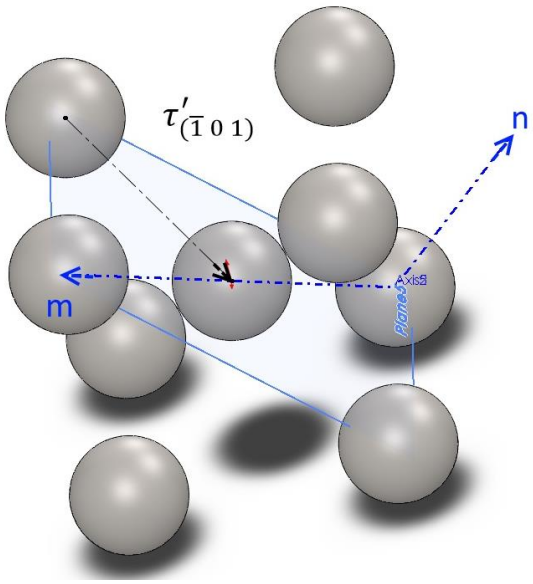
Şekil 2.7 Kayma düzlemindeki Burger vektörüne paralel gerilme komponenti.

- $\tau_{(0\,\bar{1}\,1)} = (\boldsymbol{m}^{\alpha} \otimes \boldsymbol{n}_1^{\alpha}) : \boldsymbol{P}$ $(0\ \bar{1}\ 1)$ düzlemindeki kayma yönüne paralel olarak 60°'de kayma düzlemine paralel kayma gerilmesi, akış gerilmesinin Twinning/Anti-Twinning asimetrisinden sorumludur (Şekil 2.8)



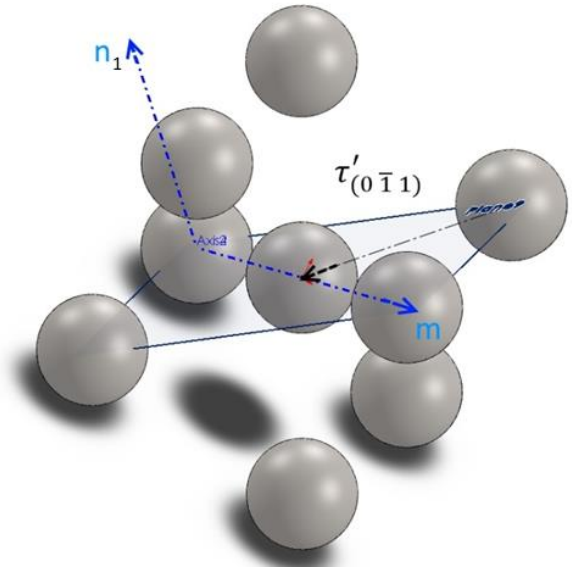
Şekil 2.8 $(\mathbf{0}\ \bar{\mathbf{1}}\ \mathbf{1})$ düzlemde Burgers vektörüne paralel kayma gerilmesi, 60°'de kayma düzlemine; Akma gerilmesinin Twinning/Anti-Twinning asimetrisinden sorumludur.

- $\tau'_{(\bar{1}\,0\,1)} = \left((\boldsymbol{n}^{\alpha} \times \boldsymbol{m}^{\alpha}) \otimes \boldsymbol{n}^{\alpha}\right) : \boldsymbol{P}$ Burgers vektörüne dik olan kayma gerilmesi; Çekme/Basma asimetrisinden sorumlu) (Şekil 2.9)



Şekil 2.9 $(\bar{\mathbf{1}}\ \mathbf{0}\ \mathbf{1})$ yönündeki kesme gerilmei Burgers vektörüne dikey olan gerilme, çekme-basma asimetrisinden sorumludur.

- $\tau'_{(0\,\bar{1}\,1)} = \left((\boldsymbol{n}_1^{\alpha} \times \boldsymbol{m}^{\alpha}) \otimes \boldsymbol{n}_1^{\alpha}\right) : \boldsymbol{P}$ Burgers vektörüne dik olan kayma gerilmesi; Çekme/Basma asimetrisinden sorumlu (Şekil 2.10)



Şekil 2.10 $(\mathbf{0}\ \bar{\mathbf{1}}\ \mathbf{1})$ yönündeki gerilme bileşeni Burgers vektörüne dikey olan stres; çekme-basma asimetrisinden sorumludur.

Denklem (2.5) aşağıdaki gibi üç farklı durum için detaylandırılabilir:

$$(\boldsymbol{m^s} \otimes \boldsymbol{n^s}) : \boldsymbol{P} + a_1(\boldsymbol{m^s} \otimes \boldsymbol{n_1^s}) : \boldsymbol{P} + a_2((\boldsymbol{n^s} \times \boldsymbol{m^s}) \otimes \boldsymbol{n^s}) : \boldsymbol{P} + a_3\big((\boldsymbol{n_1^s} \times \boldsymbol{m^s}) \otimes \boldsymbol{n_1^s}\big) : \boldsymbol{P} = \tau_{cr}$$

Uygulanan gerilmenin kayma düzlemi ve yönüne yansıması	Anti - twinning asimetrisinin katkısı	çekirdeği çarpıtan, fakat çekirdeğe çarpma için genelleştirilmiş bir termodinamik itici güç sağlamayan, kayma çekirdeğine dik olan kayma gerilmelerinin katkıları

a_1, a_2 ve a_3'ün literatürden çıkarılan moleküler statik simülasyonlarına uygun sabitler olduğu durumlar için hesaplanmıştır.

Çok kristal için Gösterimsel Hacim Elemanı (RVE)

İki numaralı iş paketinde geliştirilen modelin üç farklı homojenizasyon yöntemi ile modellenmesi planlanmıştı. Bu bağlamda projede kullanılmak üzere gösterimsel hacim elemanı (RVE) geliştirilmesi gerekmektedir.

Literatürde iki fazlı faz içeren dupleks malzemeler için kullanılmakta olan gösterimsel hacim elemanları özetlenmiştir, Tablo 2.2.

Tablo 2.2 Literatürde iki veya çok fazlı malzemeler için kullanılan çeşitli RVE'ler

Ref.	Mikro yapı oluşturuluğu ortam	Malzeme	Faz	Kristal yapısı	Toplam tane sayısı	Toplam eleman #	Tane başına eleman #	Sonlu eleman tipi
Alankar vd. (2009). Castelluccio vd. (2017)	Cubes	Al and Ni	Tek	FCC	500	500	1	3D brick
Kuramae vd. (2010)	EBSD	A6022-T43	Çift	FCC and BCC	58	51233	884	3D brick
		A6022-ASR			1122	40102	35	
		A5182-D			948	15138	16	
		HC220YD			2600	16928	6	
Keshavarz vd. (2015)	EBSD	Nickel super alloy	Çift	FCC FCC L12	62	10877	175	3D brick
Groeber vd. (2014)	DREAM.3D	Nickel super alloy	Çift	---	---	125000	---	3D brick

Hosseini-Toudeshky (2015)	SEM-EBSD	DP steel	Çift	---	---	11700	---	2D triangular
Nakamachi vd. (2007)	EBSD	DQSK	Çift	FCC BCC	1938	91200	47	3D brick
		HSLA			6430	93600	14	
		AL6022			406	97812	204	
Sun vd. (2009)	EBSD	DP 980	Çift	BCC BCT	---	---	---	2D triangular
		DP 780						
Kim vd. (2016)	EBSD TSL software	DSS	Çift	BCC FCC	---	3375	---	3D brick
Li vd. (2016)	Voronoi tess.	Titanium alloy TA15	Çift	BCC HCP	---	125000	---	3D brick
Park vd. (2019)	DREAM.3D	3GAHSS	Üç	BCC BCT FCC	---	8000	---	3D brick
Lim vd. (2019)	EBSD	---	Tek	FCC	125	1000 to 2503	8 to 125000	3D brick
Li vd. (2013)	EBSD Voronoi tess.	AA2024	Tek	---	1728	51840	30	3D brick
Li vd. (2014)	EBSD Voronoi tess.	Aluminum 7075	Tek	---	1728	51840	30	3D brick
Voothaluru vd. (2018)	---	---	Çift	BCT FCC	---	1000	---	3D brick
Prakash vd. (2009)	---	Magnesium alloy	Tek	HCP	100	8000	80	3D brick
Kim vd. (2015)	EBSD	IF steel	Tek	BCC	510	8000	15	3D brick
Qidwai vd. (2012)	EBSD	Ti alloy	Tek	BCC	100 to 200	150480 to 409584	---	3D brick
Zhang vd. (2015)	EBSD	Ti alloy	Tek	BCC	29	50000	1700	3D brick

3 Gereç ve Yöntem

Projenin uygulanması için çeşitili nümerik gereç ve yöntemler geliştirilmiştir. Aşağıda bu yöntemler özetlenmiştir.

3.1 Kristal plastisite

Kristal plastisite birçok farklı malzeme davranışının dahah hassas modellenmesi amacıyla farklı uygulamalar için kullanılmaktadır [16-25]. Büyük deformasyonlar için Green-Lagrange birim şekil değişimii, $\boldsymbol{E}$, deformasyonlardan, $\boldsymbol{F}$, hesaplanır, Denklem (3.1). $\boldsymbol{I}$ identity matrisini ifade etmektedir. Normal fontlar, a, skaler değerleri, koyu renk küçük harfler, $\boldsymbol{a}$, vektörel değerleri ve koyu renk büyük harfler tensörleri, $\boldsymbol{A}$, ifade etmektedir.

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{F}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{F} - \boldsymbol{I}) \qquad (3.1)$$

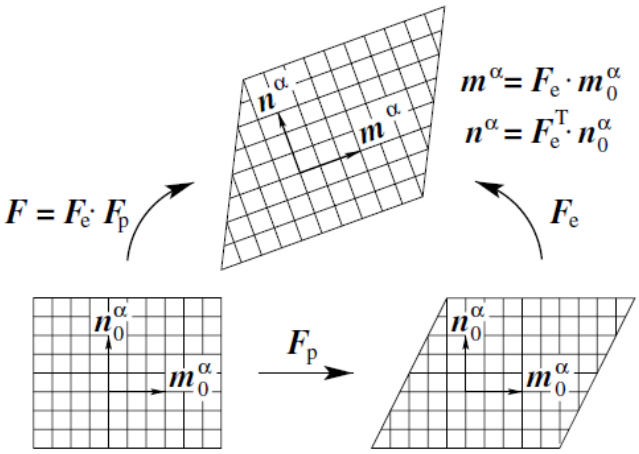
Deformasyon gradyanı, aşağıdaki gibi uzama, $\boldsymbol{U}$, ve dönme, $\boldsymbol{R}$, adı verilen iki simetrik tensör içerir, Denklem (3.2).

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{U} \qquad (3.2)$$

Deformasyon gradyanı, $\boldsymbol{F}$, aşağıdaki şekilde elastik ve plastik bileşenlerine ayrıştırılır, Denklem (3.3).

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F_e}\boldsymbol{F_p} \qquad (3.3)$$

$\boldsymbol{F_e}$ ve $\boldsymbol{F_p}$'nin elastik ve plastik deformasyon gradyan tensörleri olduğu durumlarda. $\boldsymbol{F_p}$, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi yönelim değişimi içermeyen bir ara konfigürasyonu tanımlar. Ayrıca $\boldsymbol{F_e}$, elastik fazdaki kafes deformasyonunu ve lokal sert cisim rotasyonunu bildirir.



Şekil 3.1 Deformasyon gradyanının çarpımsal ayrışımı.

Elastik deformasyon gradyanı stresden tek sorumlu olduğu için Denklem (3.1) aşağıdaki gibi şekli alır:

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{C_e} - \boldsymbol{I}) \qquad (3.4)$$

$$\boldsymbol{C_e} = \boldsymbol{F_p^{-T} C\, F_p^{-1}} \qquad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve (3.5)'te kullanılan $\boldsymbol{C}$ ve $\boldsymbol{C_e}$, sırasıyla genel ve elastik sağ Cauchy tensörleridir. Genel Cauchy tensörü, aşağıdaki denklem kullanılarak deformasyonlardan hesaplanır:

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{F^T F} \qquad (3.6)$$

Gerilme, $\boldsymbol{P}$, elastisite tensörü, $\boldsymbol{\zeta}$, ve birim şekil değişimi vektörü, $\boldsymbol{E}$, kullanılarak hesaplanır, Denklem (3.7).

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{\zeta} : \boldsymbol{E} \qquad (3.7)$$

Elastisite tensörü, $\boldsymbol{\zeta}$, ve üç farklı sabit, C_{11}, C_{12}, C_{44} ile tanımlanır, Denklem (3.8).

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \qquad (3.8)$$

$\boldsymbol{P}$ ve $\boldsymbol{\sigma}$ sırasıyla 2. Piola-Kirchhoff ve Cauchy gerilme tensörleridir ve Denklem (3.9) ile ilişkilendirilirler.

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\boldsymbol{F_e\, P\, F_e^T}}{\det(\boldsymbol{F_e})} \qquad (3.9)$$

Plastik hız gradyanı kayma hızları tüm kayma sistemleri için toplanarak modelde Denklem (3.10)'te gösterildiği şekilde hesaplanır.

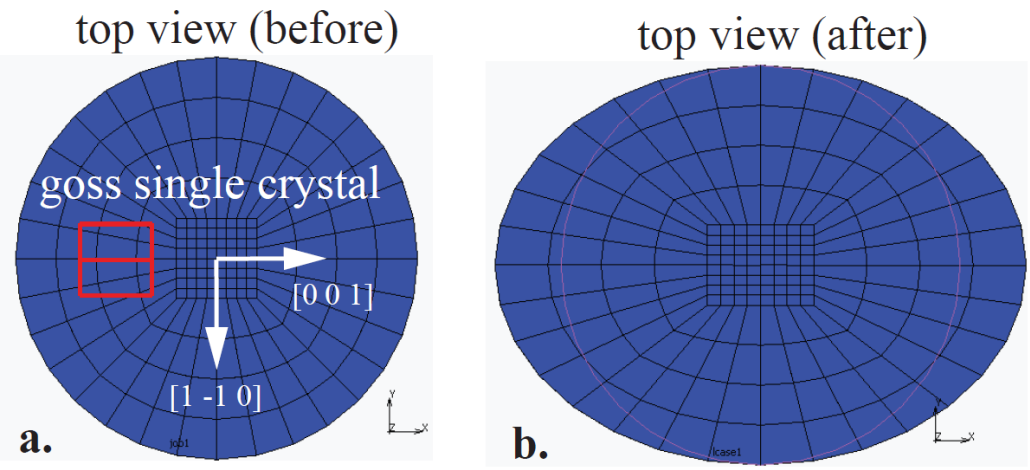
$$\boldsymbol{L_p} = \sum_{\alpha=1}^{24} \dot{\gamma}(\boldsymbol{m}^\alpha \otimes \boldsymbol{n}^\alpha) \qquad (3.10)$$

Schmid Olmayan Etkiler

Schmid olmayan etkinin dâhil edilmesi kayma kayma direnci gerilmei (τ_{cr}) üzerine eklenerek yapılır.

$$\tau_{cr} = (\boldsymbol{m}^\alpha \otimes \boldsymbol{n}^\alpha) : \boldsymbol{P} + a_1(\boldsymbol{m}^\alpha \otimes \boldsymbol{n}_1^\alpha) : \boldsymbol{P} + a_2\big((\boldsymbol{n}^\alpha \times \boldsymbol{m}^\alpha) \otimes \boldsymbol{n}^\alpha\big) : \boldsymbol{P} + a_3\big((\boldsymbol{n}_1^\alpha \times \boldsymbol{m}^\alpha) \otimes \boldsymbol{n}_1^\alpha\big) : \boldsymbol{P} \qquad (3.11)$$

Tek kristal modeli sonlu eleman ortamına aktarılmış ve çözümleme yapılmıştır. Projenin başarı kriterlerinden tek kristal silindir goss yönelimu basma testi gerçekleştirilmiş ve yönelimli davranış simülasyonlar ile doğrulanmıştır, Şekil 3.2. Bu çalışmada yapılan çalışmalar uluslararası saygın bir dergiye gönderilmiştir (Demir ve Gutierrez-Urrutia, 2021). Aşağıda yapılan çalışma detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 3.2 Tek kristal Goss basma testi sonucu – tek kristal modeli doğruluk seviyesi testi: **a.** öncesi (dairesel kesit) ve **b.** sonrası (elips kesit).

3.2 Fizik Temelli Modelleme

Mikro yapı modelinde temel parametre dislokasyon yoğunluğu olarak kullanılmıştır. Tüm diğer durum değişkenleri dislokasyon yoğunluğunun fonksiyodur.

Etkin kayma kesme kuvveti, τ_{eff}^{α}, aşağıda Denklem (3.12) gösterildiği gibi formüle edilmiştir. τ_{μ}, akış gerilmeinin uzun menzilli ve termal olmayan kısmını temsil eder.

$$\tau_{eff}^{\alpha} = \tau^{\alpha} + \sigma_{nS}^{\alpha} - \tau^{\alpha}{}_{\mu} \qquad (3.12)$$

Denklem (3.13)'de c_1, G, b ve ρ, geçen gerilmeyi, kayma modulünü, Burger vektörünü ve dislokasyon yoğunluğunu sırasıyla göstermektedir.

$$\tau_{\mu}^{\alpha} = c_1 G b \sqrt{\rho^{\alpha}} \qquad (3.13)$$

Kayma hızı, v^{α}, thermal aktive olan hız, v_{th}^{α}, ve sürükleme hızı, v_{dr}^{α}, Denklem (3.14) ile hesaplanır.

$$v^{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{v_{th}^{\alpha}} + \frac{1}{v_{dr}^{\alpha}}} \qquad (3.14)$$

v_{th}^{α}, termal olarak aktive edilmiş kayma hızı, Denklem (3.15)'te gösterildiği şekilde hesaplanır. Q_{Pei}, ΔV, K_B, ϑ_0, λ^{α} ve B_0, sırayısla Pierls aktivasyon enerjisi, aktivasyon hacmi, Boltman sabiti, Debye frekansı, atlama mesafesi ve sönümleme katsayılarını ifade eder.

$$v_{th}^{\alpha} = \lambda^{\alpha}\, \vartheta_0 \exp\left(-\frac{Q_{Pei}}{K_B\, T}\right) \exp\left(\frac{\tau_{eff}^{\alpha}}{K_B\, T} \Delta V^{\alpha}\right) \qquad (3.15)$$

Sürükleme hızı ise efektif kesme kuvvetinin lineer fonksiyonu olarak hesaplanır, Denklem (3.16).

$$v_{dr}^{\alpha} = \frac{\tau_{eff}^{\alpha}\, b}{B_0} \qquad (3.16)$$

Kayma hızı, Denklem (3.17)'deki Orowan bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

$$\begin{cases} \dot{\gamma}^{\alpha} = \rho_m^{\alpha} b v^{\alpha} & if\ \tau_{eff}^{\alpha} > 0 \\ \dot{\gamma}^{\alpha} = 0 & if\ \tau_{eff}^{\alpha} \leq 0 \end{cases} \qquad (3.17)$$

Mobil dislokasyon yoğunluğu, ρ_m^{α}, toplam dislokasyon yoğunluğunun, ρ^{α}, bir bölümü olarak Denklem (3.18)'deki şekilde hesaplanır.

$$\rho_m^{\alpha} = r^{\alpha}(\tau^{\alpha}, \rho_f^{\alpha}, \rho^{\alpha})\, \rho^{\alpha} \qquad (3.18)$$

Mobil dislokasyonların toplam dislokasyon yoğunluğuna oranı, r, Denklem (3.19)'dan bulunur.

$$r = (2\pi)^{3/2} \left(\frac{\tau_{eff}^{\alpha}}{G\, b}\right)^2 \frac{1}{\rho_f^{\alpha}} \qquad (3.19)$$

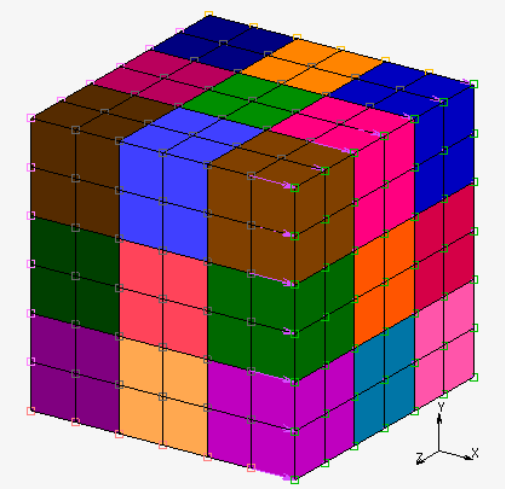
Dislokasyon yoğunluğu plastik deformasyon ile değişmektedir. Gerilme birim şekil değişimi eğrilerindeki gerilmein sabit kalmamasının sebebi bu popülasyonun artmasıdır. Dislokasyon yoğunluğu için tek değişken kullanılmıştır. Her kayma sistemi için farklı bir parametre kullanılmış ve tüm diğer özellikler dislokasyon yoğunluluğunu fonksiyonu olarak hesaplanmıştır.

Dislokasyon yoğunluğu ile geliştirilen model, sıcaklık ve birim şekil değişimi hızına olan bağımlılık fiziksel dislokayon yoğunlukları ile ifade edilmesini sağlar. Böylece fizik temelli malzeme modeli geliştirilmiştir.

3.3 RVE modelinin oluşturulması

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan yola çıkarak 8 nodlu 3-boyutlu hexahedron elemanlarına sahip birçok kristal gösterimsel hacim elemanı oluşturulmuştur. Burada iki temel parametre vardır.

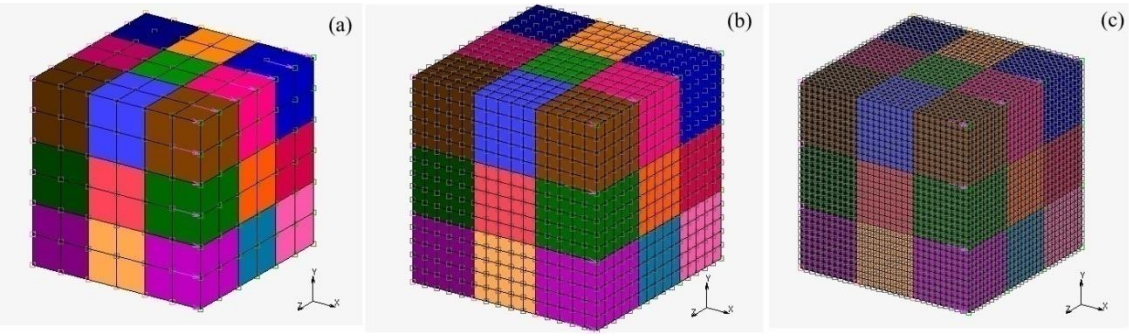
Tane sayısı (örn. Şekil 3.3'de 3x3x3 tane sayısı için oluşturulan RVE gösterilmiştir.)
Eleman çözünürlüğü / tane (örn. Şekil 3.3'deki RVE 2x2x2 eleman çözünürlüğüne sahiptir.)



Şekil 3.3 Kristal plastisite sonlue eleman analizi için kullanılan RVE konfigürasyonu

RVE, her biri belirli yönelimli bir taneyi temsil eden birkaç ana bölümden oluşur (Euler açıları). RVE'nin malzemenin özelliklerini temsil etme yönündeki etkinliğini araştırmak için, RVE başına farklı miktarlarda taneler modellenmiştir. Euler açı setleri rastgele bir şema kullanılarak tanelere oluşturulur ve atanır.

Ayrıca, RVE'ler alt elemanlara ayrılır, diğer bir deyişle her ana eleman (tek yönelimli tahıl) aynı oryantasyonlu ikincil elemanlara ayrılır, Şekil 3.4. Analiz sonuçlarının tane çözünürlüğüne olan bağımlılığı da çıktılar arasında karşılaştırma yapılarak kontrol edilir.



Şekil 3.4 Aynı sayıda tane adedine (ana unsur) ve farklı çözünürlüğe sahip RVE'ler Deformasyon işleminin sayısal simülasyonu sırasındaki yönelim değişimleri kaydedilir ve aktif kayma sistemlerini analiz etmek için çizilir.

Modelin güvenilirliğini değerlendirmek için farklı sınır koşulları (BCs) kullanılmaktadır. Aşağıdaki sınır şartları kullanılmıştır:

Çekme yük durumu

Yüz 2 (x=0): $U_x = 0$

Yüz 3 (y=0): $U_y = 0$

Yüz 1 (z=0): $U_z = 0$

Yüz 5 (x=1): $\dot{\varepsilon}_x \left(\frac{1}{s}\right)$

Basma yük durumu

BC'ler aşağıda açıklandığı şekilde ayarlanmıştır:

Yüz 2 (x=0): $U_x = 0$

Yüz 3 (y=0): $U_y = 0$

Yüz 1 (z=0): $U_z = 0$

Yüz 5 (x=1): $\dot{\varepsilon}_x \left(\frac{1}{s}\right)$

Basit kesme yük durumu

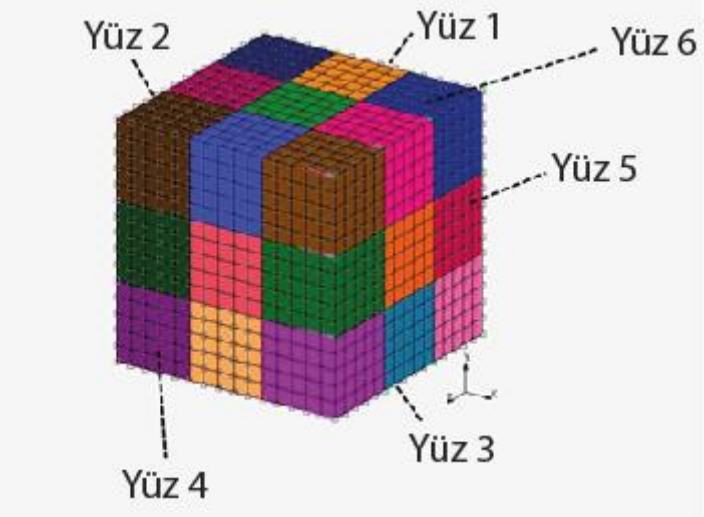
BC'ler aşağıda açıklandığı şekilde ayarlanmıştır:

Yüz 3 (y=0): $U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$

Yüz 6 (y=1): $U_y = 0$

Yüz 6 (y=1): $\dot{\varepsilon}_x \left(\frac{1}{s}\right)$

Gerilme, sıkıştırma ve basit kesme simülasyonları altında uygulanan sınır koşulları Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Sınır şartlarında belirtilen referans yüzler

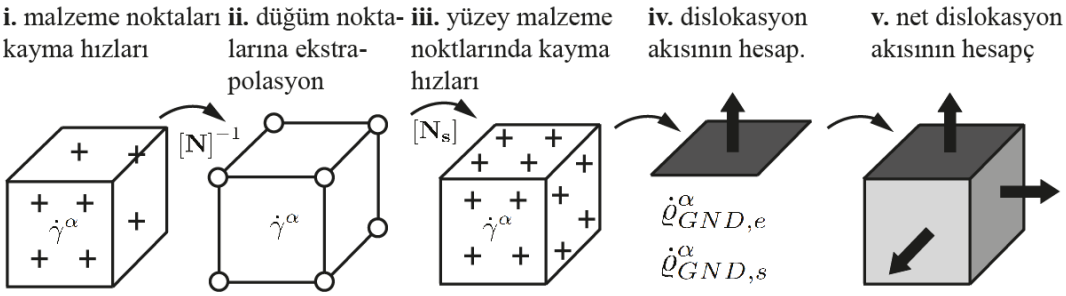
3.4 Lokal olmayan model

Lokal olmayan model ile ifade edilmek istenen malzeme noktasının sadece kendisine değil, etrafındaki diğer malzeme noktalarının da özelliklerine bağlı olduğudur. Bunun için çoğunlukla kayma miktarındaki farklılıklar esas alınır ve bir hacim integrali olarak ifade edilir. Ancak bu çalışmada tane özelliklerini dahil edebilmek için yeni bir model geliştirilmiştir. Model içerisine geometrik olarak gerekli dislokasyon (GND) yoğunluğu hesaplanıp tutarlı bir şekilde dahil edilmiştir. Kenar ve vida tipi dislokasyon yoğunlukları (sırasıyla $\dot{\rho}^{\alpha}_{GND,e}$ ve $\dot{\rho}^{\alpha}_{GND,s}$) aşağıdaki denklemlerden bulunabilir. A, ω, V, $\dot{\gamma}$, b, $\boldsymbol{s}^{\alpha}$, $\boldsymbol{t}^{\alpha}$, $\boldsymbol{r}$ sırasıyla eleman yüzeyinin alanını, geçme faktörü, elaman hacmini, kayma hızı, Burger vektörü, kayma yönü, kayma yönüne ve düzlemine dik yönü, ve yüzey normal vektörünü ifade etmektedir.

$$\dot{\rho}^{\alpha}_{GND,e} = \frac{\omega^{\alpha}}{V} \int \frac{\dot{\gamma}^{\alpha}}{b} \boldsymbol{s}^{\alpha} . \boldsymbol{r} \, dA \qquad (3.20)$$

$$\dot{\rho}^{\alpha}_{GND,s} = \frac{\omega^{\alpha}}{V} \int \frac{\dot{\gamma}^{\alpha}}{b} \boldsymbol{t}^{\alpha} . \boldsymbol{r} \, dA \qquad (3.21)$$

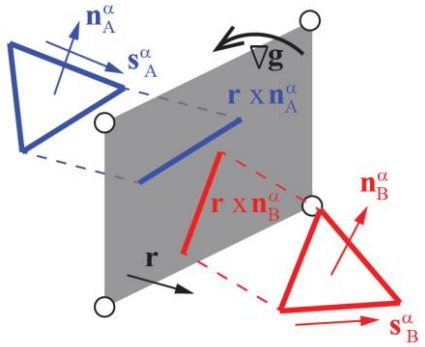
Dislokasyon yoğunluğu hesaplanması için gerekli olan alan integrali, numerik Gauss yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu nedenle eleman yüzeylerinin malzeme noktalarındaki kayma hızları gereklidir. GND yoğunluklarını hesaplamak için Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilen yöntem kullanılmıştır.



Şekil 3.6 Geometrik olarak gerekli dislokasyonları hesaplamak için kullanılan yöntem – şematik gösterim

Elemanlar arası transfer faktörü, ω, aynı zamanda farklı doğrultudaki taneler arasındaki GND yoğunluğunu hesaplamak için kullanıldı, Denklem (3.22). Şekil 3.7 transfer katsayısının hesaplama yöntemini şematik olarak göstermektedir.

$$\omega^{\alpha} = |\boldsymbol{s}_A^{\alpha} \,.\, \boldsymbol{s}_B^{\alpha}|\,|(\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{n}_A^{\alpha}) \,.\, (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{n}_B^{\alpha})| \qquad (3.22)$$

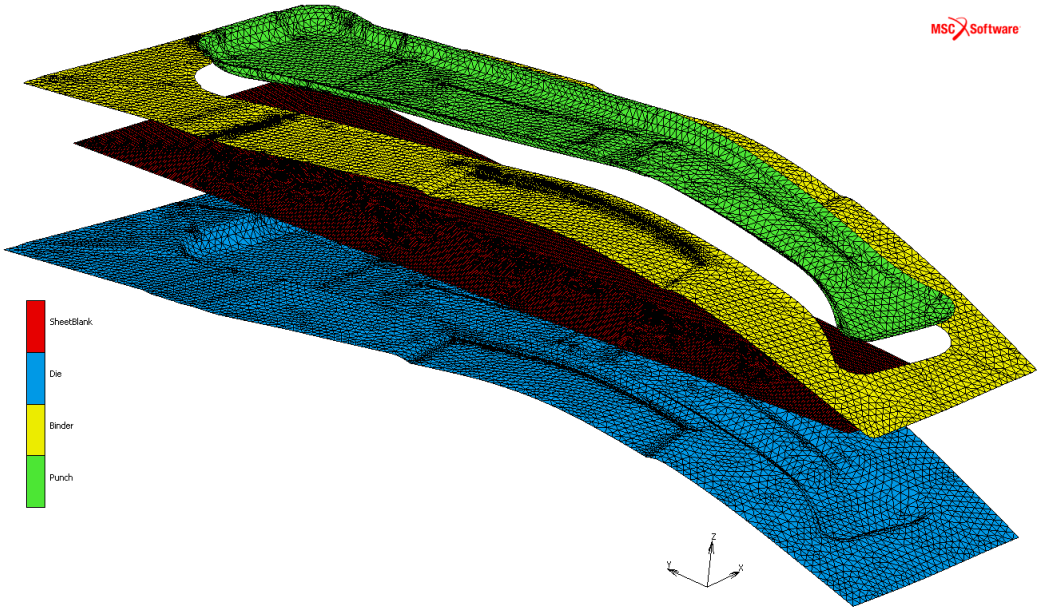


Şekil 3.7 Elemanlar arasında transfer katsayısı misyönelim, yüzey normal vektörü, kayma yönleri ve kayma düzlemlerine bağlıdır.

3.5 Metal Şekillendirme simülasyonları

Bu çalışmada, bir otomotiv bileşeninin soğuk metal şekillendirme işlemini simüle etmek ve analiz etmek için MSC MARC® ticari yazılımı kullanılarak bir sonlu eleman (FE) modeli geliştirilmiştir. Metal şekillendirme işlemi, düz bir metal levhanın, üç boyutlu karmaşık bir şekle, metal levhanın yırtılmadan veya aşırı inceltilmesi (Şekil 3.8'de gösterildiği gibi kalıp, delgi (punch) ve tutucu (blank holder) işlemlerini içerir. Bu işlem sırasında, sac levha plastik olarak deforme olur ve deformasyon ölçeği ve indüklenen suşlar genellikle yeterince büyüktür. Bu tip

işlem için genellikle kalıp sabit tutulur ve üzerine düz bir metal levha yerleştirilir. Delgi (punch) olarak bilinen başka bir erkek kalıp, yassı metal levhayı kalıp boşluğuna çekmek için kullanılır. Delgi, kalıbın şekline göre karşı bir şekle sahiptir ve genellikle pozisyon kontrol modunda çalıştırılır. Delgi, metal levhayı kalıp boşluğuna çekmeye başlar başlamaz, yassı levha metalin dış çevresi daralmaya başlar ve bu da kırışıklıkların oluşumuna yol açar. Düz sacın kırışması, metal levhayı sertleştirdiği ve sünekliğini tükettiği için istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, boş tutucu olarak bilinen başka bir parça, sac metal üzerinde burkulma kuvvetine (kırışıklık oluşumuna neden olan) karşı bir miktar kuvvet uygulayan ve böylece kırışıklık oluşumunu önleyen bu işlemde kullanılır. Bu nedenle, boş tutucu sadece kırışıklıkların oluşmasını önleyecek şekilde kuvvet kontrollü modda çalıştırılmaktadır, ancak sac metalin kalınlaşmasını sınırlandırmamalıdır. Damgalama işlemi, sac levha plastik olarak aktığı zaman başlar ve lokalize boyun atması gerçekleştiğinde biter. Bu nedenle, levha metalin başlangıç boyutu ve işlem parametreleri, damgalamadan önce simülasyonlar ile ya da içsel testlerle tanımlanır / seçilir, böylece levha metal lokalize deformasyon ortaya çıkmadan önce güvenle şekillendirilebilir. Bir damgalama işleminde, çeşitli metal levha bölgeleri, farklı zaman aralıklarında farklı gerilme ve birim şekil değişimi durumlarına tabi tutulur. Farklı gerilme ve şekil değiştirme halleri farklı deformasyon modları oluşturur; ancak, genel olarak bükme, germe ve çekme şeklinde sınıflandırılırlar. Ek olarak, damgalama bir temas problemidir ve sac ile kalıp arasında biraz temas baskısı gerektirir; bu nedenle, temas sürtünmesi, tabaka malzemesi özelliklerinden ayrı olarak önemli bir rol oynar.



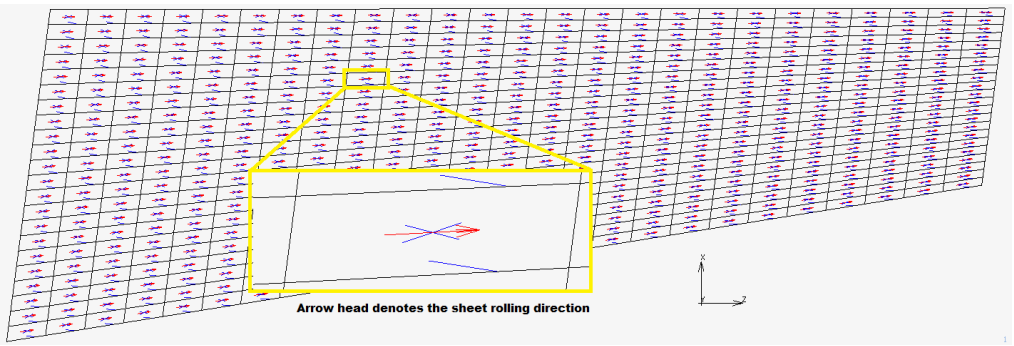
Şekil 3.8 Damgalama düzeni sert bir kalıp, delgi, boş tutucu ve deforme olabilen bir sac levhadan oluşur.

Geometrik modelleme ve sonlu eleman ağı oluşturulması:

Bu çalışmada kullanılan aletlerin (kalıp, delgi ve boş tutucu) tüm geometrik boyutları endüstri standardına uyguntu. Kalıp, delgi ve boş tutucunun geometrisi önce otomotive firması tarafından CATIA® yazılımında oluşturulmuş ve daha sonra MSC Mentat® yazılımına aktarılmıştır. Çünkü geometri bir sonlu eleman yazılımında oluşturulamayacak kadar karmaşıktır. Parçaları simülasyon ortamına aktardıktan sonra, geometrideki eğrilikleri tam olarak düşünmek için, ortalama 3 mm ağ boyutuna sahip üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı kullanıldı. FE çözücünün analiz zamanını önemli ölçüde tasarruf etmesine yardımcı olduğu için şekilledirilecek parça dışındaki tüm parçaların rijit olduğu varsayılmıştır, çünkü FE çözücüsü kalıntı takımlamadaki gerilme ve gerilme varyasyonunun hesaplanmasında zaman harcamamaktadır. Sac levhanın elastoplastik ve yönelimli olduğu varsayılmıştır ve dört düğümlü dörtlü kalın kabuk (thick shell) azaltılmış entegrasyon elemanı (MSC MARC® element kütüphanesine göre eleman tipi 140) kullanılmıştır. Ortalama ağ boyutu 1.2 mm'dir. Ağ boyutu seçimi, Duchene ve Habraken tavsiyelerine göre yapıldı. Kalın kabuk elemanlarının seçilmesinin nedeni, bükülme ve enine kayma sertliğini uygun şekilde tutma kabiliyetidir. Levha metal damgalama işleminde, levha metallerin yüzey-hacim oranının çok daha yüksek olduğunu ve özellikle üçüncü boyutun (yani kalınlığın) diğer iki boyuttan daha küçük olduğunu söylemek yanlış bir kabul olmaktadır. Dolayısıyla, işlem düzlem gerilme problemleri ile aynıdır ve bu nedenle, kabuk

elemanlarının kullanımı sonuçların kesinliğinden ödün vermeden numerik olarak en hızlı çözümü vermektedir.

Kabuk elemanlarında, kabuk kalınlığı yönü boyunca gerilme bileşeninin FE çözücüsü tarafından hesaplanmayarak toplam analiz süresini önemli ölçüde azaltılması sağlanmıştır. Ayrıca, kalın kabuk elemanları enine gerilme değişimini hesaba katar, oysa ince kabuk elemanları yapmaz. Sac metal damgalama işleminde enine deformasyon varyasyonunun değerlendirilmesi çok önemlidir, çünkü bu parametre FE çözücü tarafından nihai deforme olmuş kısmın inceltme ve / veya kalınlaşma yüzdesini hesaplamak için kullanılır. Dahası, kayma davranışını daha iyi temsil ettikleri için, bütünleştirme elemanlarında azaltılmış entegrasyon elemanları tercih edilir; bununla birlikte, parçada mevcut olan geometrik karmaşık modele bağlı olarak daha yoğun ağ gerektirmektedir. Mevcut analizdeki elementlerin kabuk kalınlığı, endüstride kullanılan sac metalin kalınlığı ile aynı tutuldu (yani, 1 mm). Bununla birlikte, levha metalin enine doğrultuda deformasyonunu tam olarak yakalamak için her bir kabuk elemanına toplam 11 adet kalınlık koordinatında entegrasyon noktası atanmıştır. Dönme yönü, tabakanın her bir elemanında da belirtildi ve Şekil 3.9'da görülebileceği gibi, tabakanın boyuna ekseni ile çakışmaya devam etti.



Şekil 3.9 Sacdaki elementlerin yönelimi

Malzeme Özellikleri

Diğer özelliklerin yanı sıra, plastik yönelimli davranış, bir otomotiv bileşeninin damgalanmasında en önemli olanıdır; deforme olmuş parçanın nihai boyutlarını doğrudan etkilediği için. Normal yönelim ($\bar{R}$) ve düzlemsel yönelim (ΔR) tarafından da sunulan Lankford parametreleri, malzeme plastik yönelimli davranışının

deneysel ölçüsüdür. Bu parametreleri belirlemek için standart test prosedürü takip edildi ve daha sonra hesaplama için aşağıdaki ilişkiler kullanıldı:

$\bar{R} = \frac{\{R_0+(2\times R_{45})+R_{90}\}}{4}$ (3.23)

$\Delta R = \frac{\{R_0-(2\times R_{45})+R_{90}\}}{2}$ (3.24)

$R_\theta = \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}\right)_\theta$; $\theta = 0°, 45°, 90°$; ε_w ve ε_t genişlik ve kalınlık yönlerindeki gerçek birim şekil değişimileri ifade etmektedir.

Çok kristal bir malzeme olan DP600'ün plastik verimi Hill'in 1948 verim kriteri tarafından açıklanmaktadır ve bu nedenle daha önce araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Dolayısıyla, mevcut modelde, bu kriter amaç için kullanılmıştır. 1948'de Hill'in daha önce Huber-Mises-Hencky tarafından önerilen verim ölçütünü genel ifadesi ile

$2f(\sigma_{ij}) \equiv F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1$ (3.25)

f, verim işlevidir; F, G, H, L, M ve N malzeme sabitleridir; ve son ek x, y, z ana aneş-yönelimli eksenlerdir. Genellikle, levha haddeleme yönü boyunca x alınır; y ve z sırasıyla tabaka yuvarlanma yönüne enine ve normal boyunca alınır. Eğer ana anizotropi yönlerinde gerilme verimi geriliyorsa, X, Y ve Z ile gösterilir, o zaman F, G ve H değerleri aşağıdaki gibi kolayca gösterilebilir:

$\frac{1}{X^2} = G + H$ (3.26)

$\frac{1}{Y^2} = H + F$ (3.27)

$\frac{1}{Z^2} = F + G$ (3.28)

Benzer şekilde, eğer R, S ve T aynı anizotropi yönleriyle ilişkili kayma verimi gerilmeleriyse, o zaman

$2L = \frac{1}{R^2}$; $2M = \frac{1}{S^2}$; $2N = \frac{1}{T^2}$ (3.29)

MSC MARC®, bu değerler sabitlendikten sonra otomatik olarak bu malzeme sabitlerini hesaplar

σ_0 , σ_{45} , σ_{90} ve R_0 , R_{45} , R_{90}.

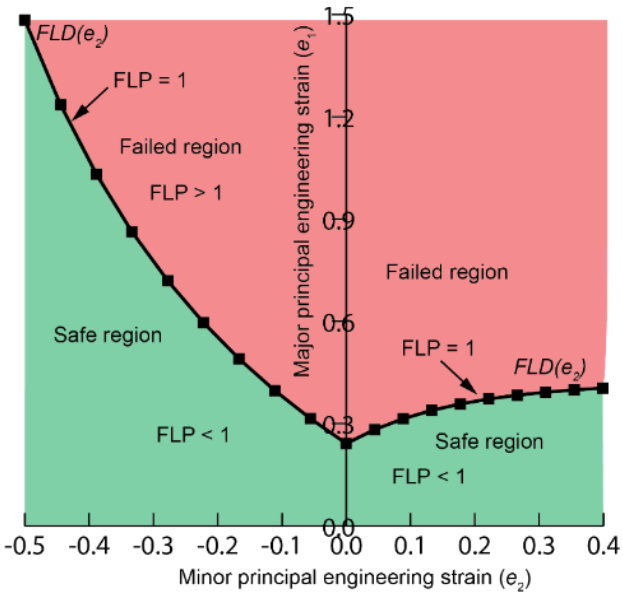
Damgalama simülasyonu sırasındaki başarısızlığı tahmin etmek için, mevcut malzeme modelinde sınırlayıcı limit diyagramı (FLD) oluşturulmuştur. MSC MARC® yazılımında son işlem sırasında, limit parametresi (FLP, yani bir alan çıktısı) oluşturuluyorsa arızanın yeri kolayca belirlenebilir. FLP, ana ana mühendislik türünün, FLD tarafından verilen izin verilen maksimum ana ana mühendislik türüne oranı olarak tanımlanır (Şekil 3.10); Böylece, FLP olarak hesaplanır.

$$FLP = \frac{e_1}{FLD(e_2)} \quad (3.30)$$

e1 is the major eksendeki birim şekil değişimii (en yüksek), e2 ise diğer minör eksendeki birim şekil değişimii, ve FLD(e2) metal şekillendirme limit birim şekil değişimiini minör birim şekil değişimi, e2, fonksiyonu olarak ifade eder.

Sınır şartları

Parça-düğüm yaklaşımı, deforme olabilen tabaka ile sert takımlama arasındaki teması tanımlamak için kullanıldı. Tüm temas yüzeyleri arasında Coulomb bilinear sürtünme katsayısı 0.15 olarak belirlenmiştir. Endüstri standardına uygun olarak boş tutucuya sabit bir aşağıya doğru 230 Ton kuvvet atandı. Büyük elastoplastik lineer olmayan suşlardaki duyarlılıkları hesaplamak için güncellenmiş Lagrangian yaklaşımı kullanıldı ve analizdeki etkinliği artırmak için plastisite prosedürü ile birleştirildi.



Şekil 3.10 Metal şekillendirme limit diyagramı (FLD) şematik gösterimi

Analiz prosedürü

Damgalama işlemi yarı-statik kapalı bir problem olarak modellenmiştir. Yakınsama için% 5 kalıntı kuvvet veya yer değiştirme kontrolü olan tam Newton-Raphson çözümü uygulandı. Zaman artışlarını düzenlemek için uyarlamalı birçok kriterli adım prosedürü kullanıldı.

4 Bulgular

4.1 Deneysel Bulgular

4.1.1 EBSD ölçümleri

Deformasyon öncesi numunelerin içyapıları elektron geri-saçılım kırınımı (EBSD) tekniği temelli oryantasyon mikroskopisi kullanılarak karakterize edilmiştir. EBSD tekniği çelik içyapılarının güvenilir ve nicel olarak açıklanabilmesini sağlamaktadır.

EBSD tekniğinin numuneyle etkileşim derinliği 5 – 10 nm arasında olduğu için numune yüzeylerinin hatalardan arındırılmış olarak hazırlanmasını gerektirmektedir. Hatalardan ve çiziklerden arındırılmış bir yüzey elde etmek için numune yüzeyleri standart SiC zımpara kağıtlarıyla hazırlandıktan sonra 3 aşamalı (9, 3 ve 1 mikron elmas pasta solüsyonu kullanılarak) parlatılmıştır. Sonrasında numune yüzeyleri 0.05 mikron çapta koloidal silis partikülleri içeren OPS solüsyonluya 15 dakika boyunca son parlatma işleminden geçirilmiştir. Belirtilen metalografik hazırlama işlemlerinin tümü tam otomatik Struers Tegramin 25 cihazlarıya yapılmıştır.

Yönelim mikroskopisi Zeiss Merlin FEG-SEM taramalı elektron mikroskobuna bağlı EDAX/TSL EBSD sistemi ve Hikari EBSD kamerası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroskobun ivmelendirme voltajı 15 kV, demet akımı 5 nA ve de çalışma mesafesi (WD) 14 mm olacak şekilde, altıgen bir örüt oluşturarak 100 nm ölçüm adımları kullanılarak EBSD haritaları çıkarılmıştır. EBSD kamerası 4x4 piksel gruplama yaparak (başka bir değişle EBSD deseni 160 x 120 piksel olacak şekilde) 10 milisaniye poz süresinde, 100 kare/s hızında çalıştırılmıştır.

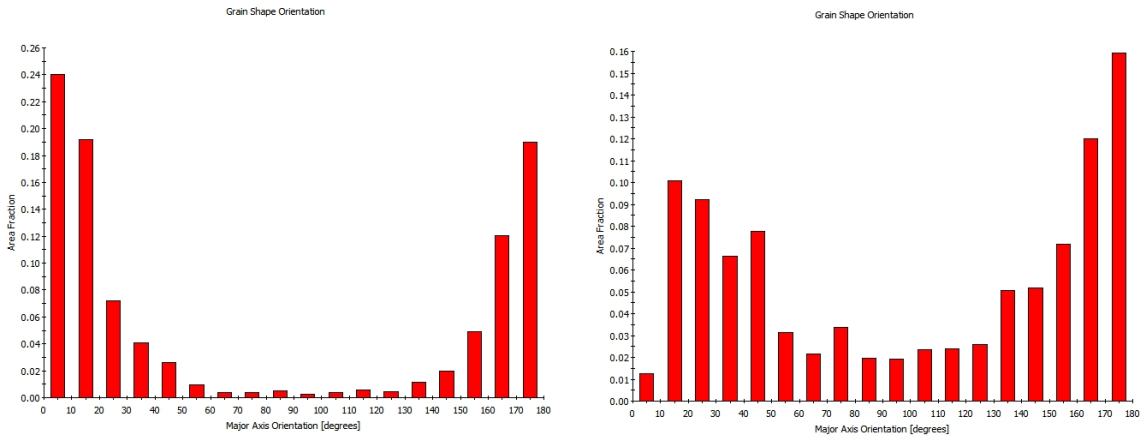
Ham EBSD verisi işlenirken, TSL OIM Analyisi v7.3.1 yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle; “tane indeksleme güveni standartlaştırması” (GCIS), yöntemi kullanılmıştır. GCIS, bir taneyi oluşturan ölçüm noktarının tamamının indeksleme güveni değerlerini kontrol ederek, bulunan en yüksek değeri taneyi oluşturan tüm noktalara atar. Sonrasında indexleme güveni 0.05’in altında olan ölçüm noktaları analizlerden çıkarılmıştır. Bu veri-temizleme yöntemi EBSD haritasını oluşturan noktaların ölçülen yönlerini değiştirmemektedir. İçyapı, EBSD desen kalitesi (image quality, IQ), ters-kutup figürleri (inverse pole figüre, IPF), tane içi yönelim

farkı açısı (Grain orientation spread), kernel-içi ortalama yönelim farkı açısı (Kernel average misorientation angle) değerlerine bakılarak karakterize edilmiştir. Analizlerde taneler, birbiri arasında 5 dereceden az yönelim farkı olan komşu piksellerin oluşturduğu kümeler olarak tanımlanmıştır. Ayrıca kalıntı ostenit oranları ve ortalama tane büyüklüğü dağılımları çıkarılmıştır.

Desen kalitesi parametresi kullanarak veriler üç temel gruba ayrılmıştır:
MART- martensit, numunenin yaklasik olarak %5'i martensit
GAMMA - kalinti ostenit, numunede %1 civari kalinti ostenit var (bu faz gerekirse ihmal edilebilir)
ALPHA - ferrit bolgeleri

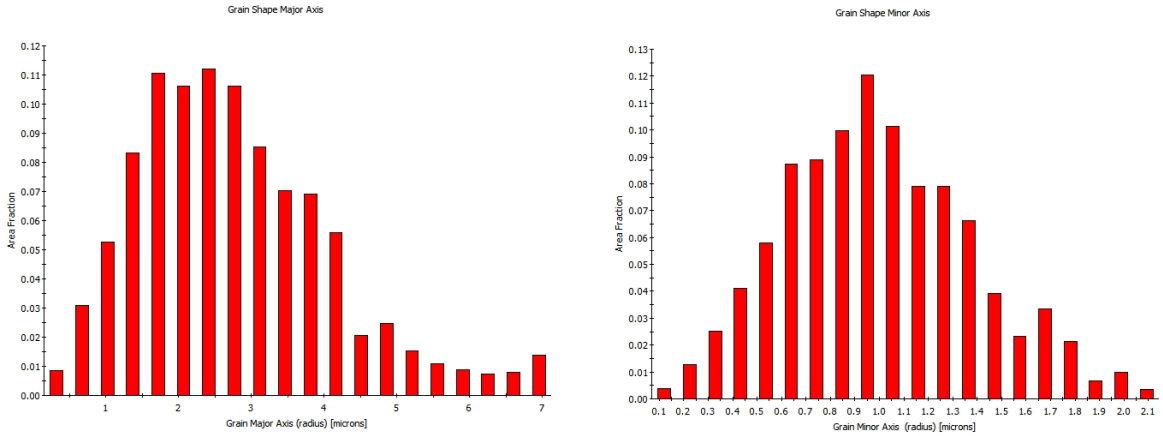
Üç grup icin tane buyuklugu, en-boy orani, elips, tane doğrultusu bilgileri çıkartılmıştır. Her taneye bir "elips" fit edildi ve bu elipsin major ekseni ile yatay düzlemin yaptigi açılar bulundu.

GrainShapeOrientation, yani tane morfolojisi yönelimu sifir ve 180 dereceler taneler hadde yonu boyunca uzamis anlamına gelmektedir. Ferrit fazına sahip bolgeler bu şekilde morfolojiye sahiptir. Martensit ve östenit fazlarında bariz yönlenme bulunmamıştır.



Şekil 4.1 Tane morfolojisi yönelimu. Ferrit (solda) ve martensit (sağda) fazları için major eksen yönelimsi [deg] ve alan oranları

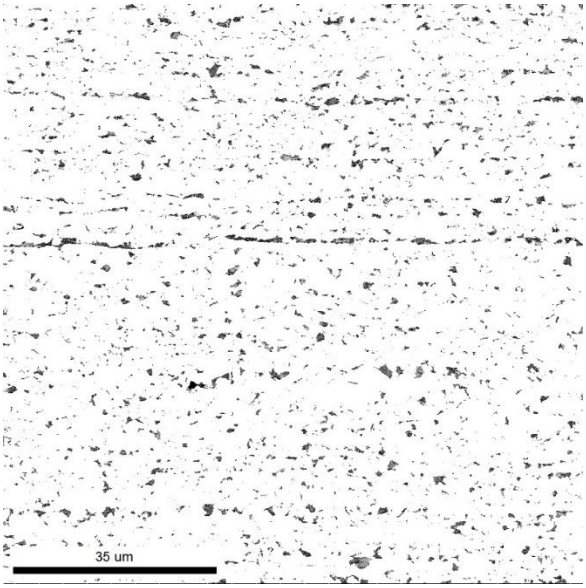
Tanelerin majör ve Minor eksenlerinin yarıçapları bulunmuştur. Bu sayede tanelerin morfolojisi belirlenmiştir, Şekil 4.1.



Şekil 4.2 Ferrrit fazı için tane major (solda) ve minör (sağda) eksenlerinin yarıçapı [mikrometre] ile tane alan dağılımı

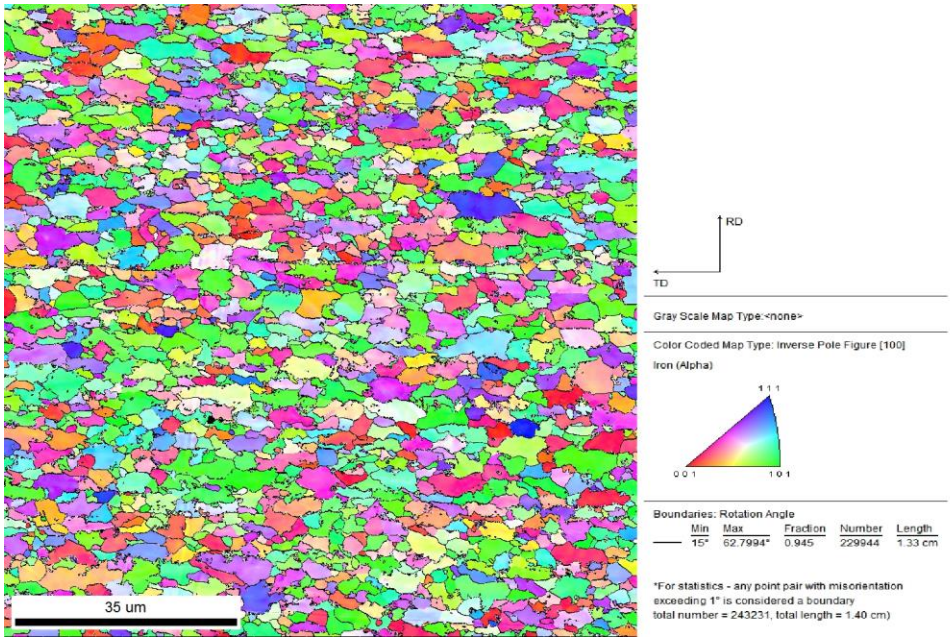
GrainSizeDiameter, bildigimiz ortalama tane buyuklugu micron cinsinden ferrit fazı için 1.84 ± 1.21 mikrometre, martensit fazı için 0.30 ± 0.17 mikrometre olarak bulundu, Şekil 4.2.

Şekil 4.3 normal yöndeki (ND) kesit üzerinde yapılan faz analizlerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Koyu bolgeler martensit, acik bolgeler ferrit fazını göstermektedir.



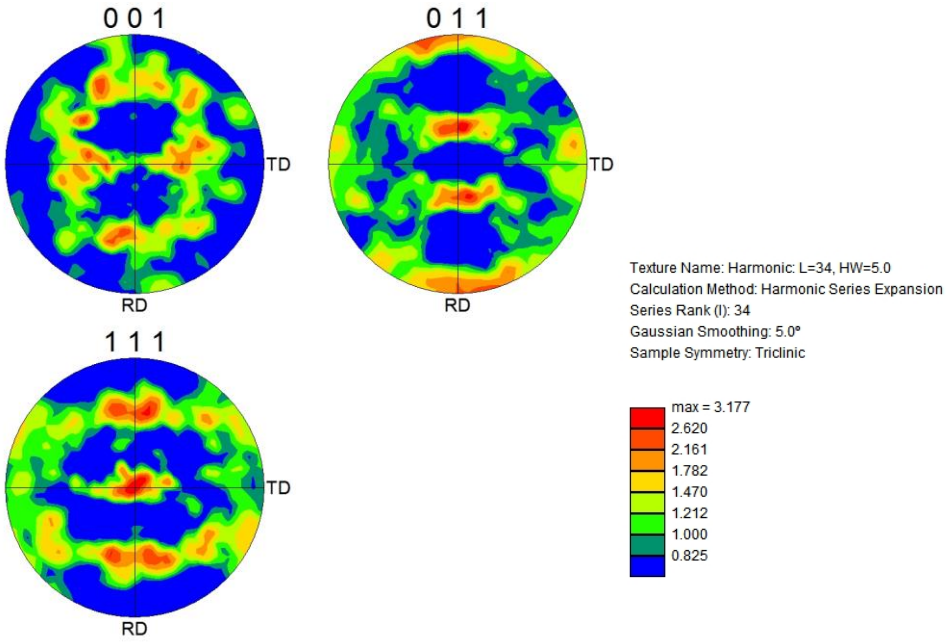
Şekil 4.3 Marsensit (siyah renk) ve ferrit (beyaz renk) fazlarının dağılımı

Şekil 4.4 Normal yönde (ND) alınan kesitteki EBSD haritası göstermektedir. <110> yönelim komponenti dominant olarak bulunmuştur.



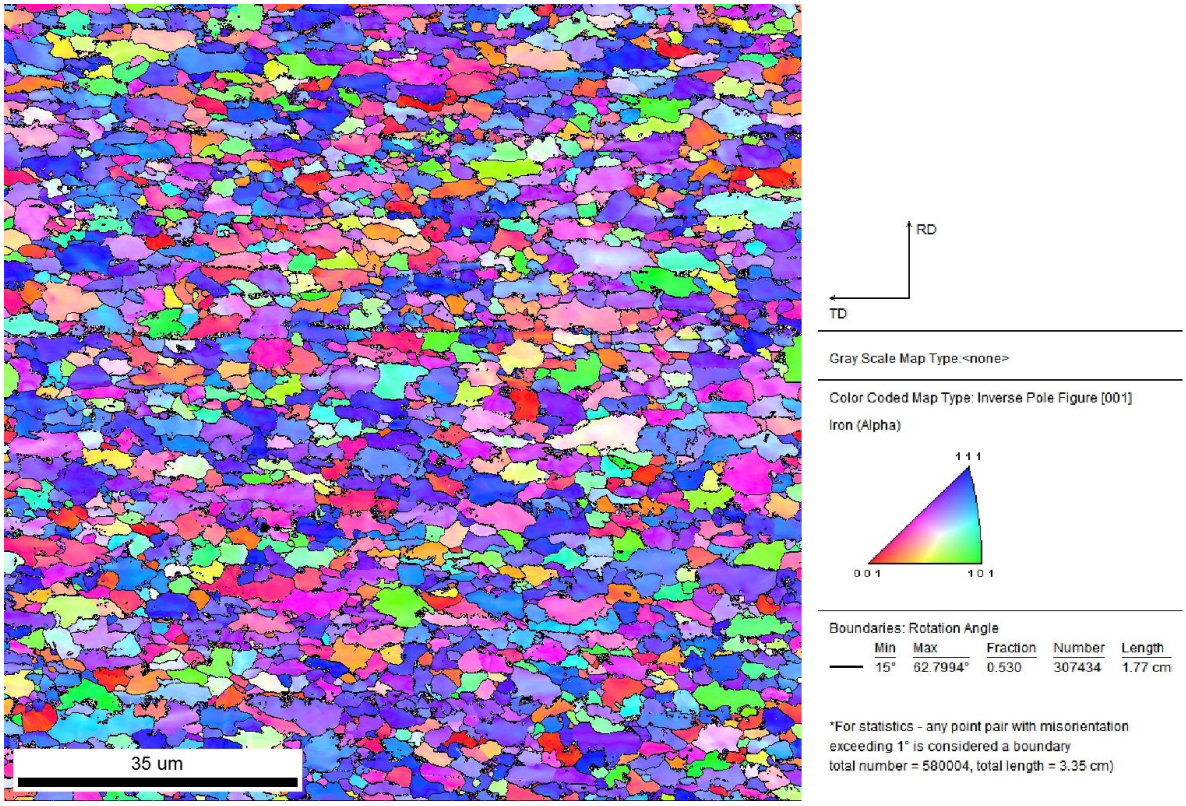
Şekil 4.4 Normal yönde (ND) alınan kesitten elde edilen EBSD haritası

Yönelimli davranış kutup şekillerinde <111> ve <011> yönelim bileşeneleri görülmektedir, Şekil 4.5.



Şekil 4.5 Normal yönde (ND) alınan <100>, <011>, ve <111> kristallografik yönlerindeki kutup şekilleri

Haddeleme yönünde (RD) alınan kesitteki EBSD haritası gösterilmiştir. <111> yönelim komponenti dominant olarak bulunmuştur.



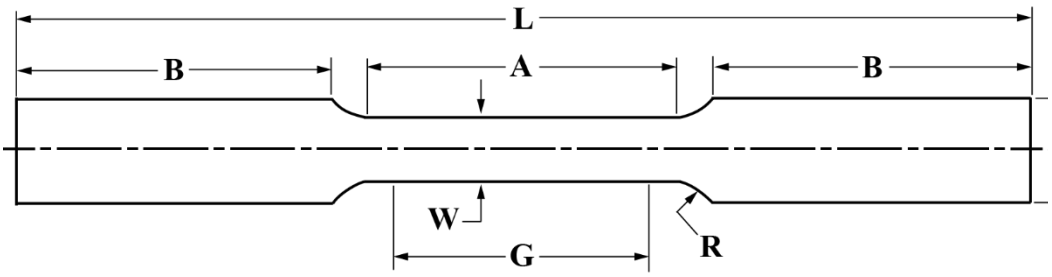
Şekil 4.6 Haddeleme yönünde (RD) alınan kesitten elde edilen EBSD haritası

Yönelimli davranış analizi sonucunda, bariz bir GAMMA-Fiber yapısı bulundu. Ferritler icin, 111//ND dokusu baskın, daha az yoğunlukta ALPHA-Fiber de bulunmuştur 110//RD. Bu özellikler haddelenmiş ürünlerde beklenen özellikerdir. Gamma-fiber rekristalizasyon sonucu, alpha-fiber yönelimünün de deformasyon sonucu yoğun olarak gözlenmektedir, Şekil 4.6.

4.1.2 Mekanik çekme testleri (Kalibrasyon)

Mevcut analiz için bir otomotiv endüstrisinde TOFAŞ Türk A.Ş. firması tarafından bir bileşen kapı parçası üretmek için kullanılan çift fazlı (DP) 600 çelik seçildi. FE modellemesi için istenen malzeme özellikleri, tek eksenli çekme testi ASTM E8 standardına göre yapılarak deneysel olarak değerlendirildi, Şekil 4.7. Çekme deneyi için örnekler levha haddeleme yönünde 0 °, 45 ° ve 90 ° boyunca kesildi. Her bir yön boyunca dört numune test edildi ve ardından ortalama özellikler

hesaplandı ve malzeme modelinde kullanıldı. Tablo 4.1, deneysel olarak elde edilen bu malzeme özelliklerini göstermektedir ve Şekil 4.8, malzemenin her yöne doğru haddeleme açılarına göre birim şekil değişimi-geriliö eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.7 Tek eksenli çekme testi numune boyutları (mm) ASTM E8 uyarınca

Not	Standart ölçü	Numune ölçüsü
A = Numune ölçüsü (minimum)	57	32
B = Tutma bölgesi ölçüsü (minimum)	50	30
C = Tutma bölgesinin genişliği (approximate)	20	10
G = Numune uzunluğu	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
L = Toplam uzunluj (minimum)	200	100
R = Kenar yuvarlama radyüsü (minimum)	12.5	6.25
T = Kalınlık (maximum)	19	6
W = Genişlik	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1

Tablo 4.1 Ham malzemenin mekanik özellikleri

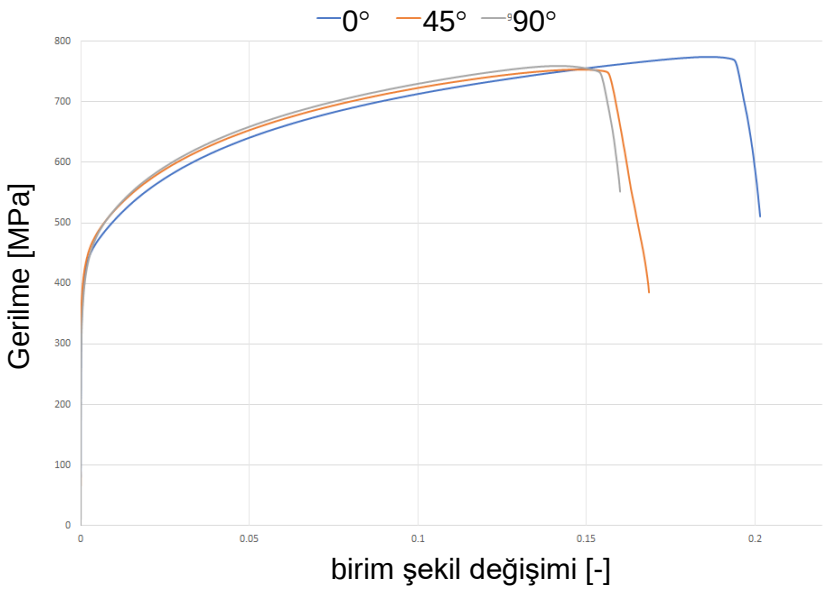
Haddeleme yönü	Akma Mukavemeti	Kopma mukavemeti	Uzama	n-değeri	K-değeri	R-değeri
0°	435.215	649.942	22.349	0.137	996.901	0.81
45°	442.651	658.644	18.150	0.133	1003.909	1.1
90°	429.251	658.788	19.055	0.135	1011.007	0.94

Aşağıdaki denklemde verilen hızlı güç kanunu sertleştirme, damgalama işleminde plastik deformasyon aşamasında malzeme sertleşme davranışını hesaba katmak için kullanılmıştır. Bu sertleştirme kanunu, çok sayıda otomotiv sınıfı çeliklerin

malzeme işlerini pekleşme davranışını yakalamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kanuna göre, akış gerilmei plastik gerilme ile aşağıdaki ilişkiyle değişir:

$$\sigma_y = A(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n + B\dot{\varepsilon}^m \quad (4.1)$$

burada σ_y eşdeğer akış stresidir; A, B n ve m, malzeme sabitidir; ε_0, başlangıçtaki ön birim şekil değişimi (malzeme daha önce tavlanmadıysa veya sertleştirilmemişse sıfıra eşittir), $\dot{\varepsilon}$ eşdeğer plastik birim şekil değişimi hızını ve $\bar{\varepsilon}$ eşdeğer plastik birim şekil değişimii ifade eder. Bu çalışmada kullanılan malzeme, oda sıcaklığında zorlanma hızına duyarlı olmadığı için ε_0 değeri sıfırdı. A ve n sabitleri tek eksenli gerilme testi verilerinden hesaplandı.

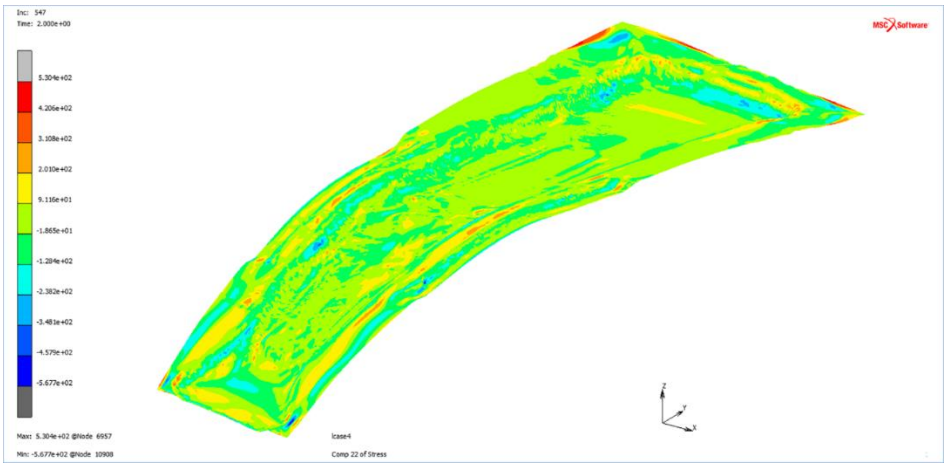


Şekil 4.8 DP600'ün deneysel birim şekil değişimi-gerilme eğrisi (Hadde yönüne göre 0°/45°/90° açılarda yapılan testler için)

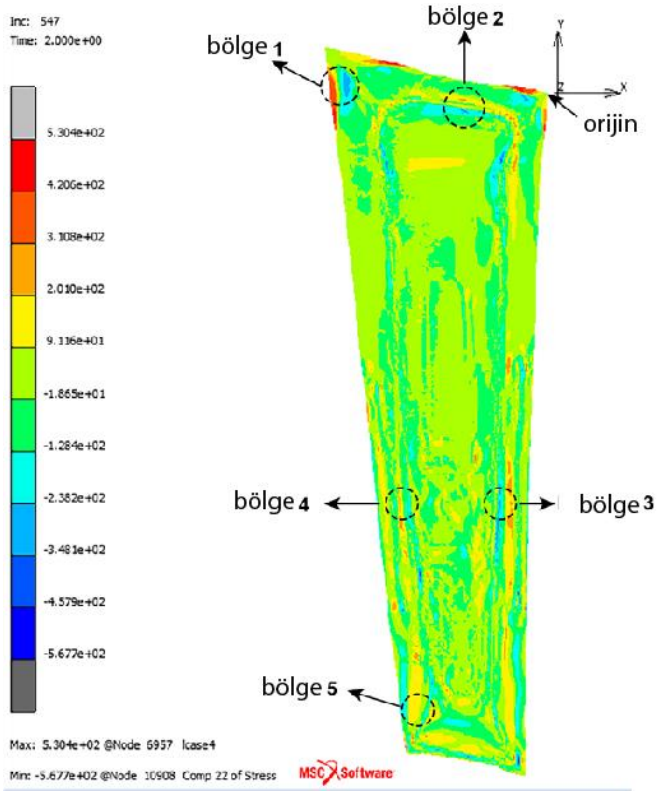
4.1.3 Kalıntı gerilme ölçümleri (Validasyon)

Validasyon testleri kapsamında metal şekillendirme ile üretilen parça üzerinde çeşitli lokasyonlar belirlenmiştir. Otomotiv bileşeni üzerindeki kalıntı gerilmelerin gerçek deneysel ölçümü için, deforme olmuş parça üzerinde beş farklı konum seçilmiştir. Bu beş farklı bölge içinde değişik noktalar belirlenmiştir. Deforme olmuş sacın en uç köşe ucu, seçilen konumların mesafesinin (X ve Y eksenleri boyunca) başlangıç noktası olarak kabul edildi. Deforme olmuş sacın üst yüzeyi, kalıntı gerilmelerin ölçüleceği seçilen alt konumların (yani Bölgelerin) derinliğinin belirlenmesi için referans konumu olarak kabul edildi, yani Z=0 değerine sahip

olduğu kabul edildi. Şekil 4.9'da deforme edilmiş tabakanın sahip olduğu σ_{yy} gerilmeleri gösterilmektedir; Şekil 4.10, aynı parçanın üstten görünüşünü göstermektedir. Ek olarak, seçilen konumların XY mesafelerini açıkça göstermek için bir şematik diyagram (Şekil 4.11) oluşturulmuştur. Ayrıca, konumların her birinin büyütülmüş görüntüleri Şekil 4.12-4.15'de gösterilmektedir. Bunların yanı sıra seçilen lokasyonların ve alt lokasyonların gerçek mesafeleri sırasıyla Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de belirtilmiştir.



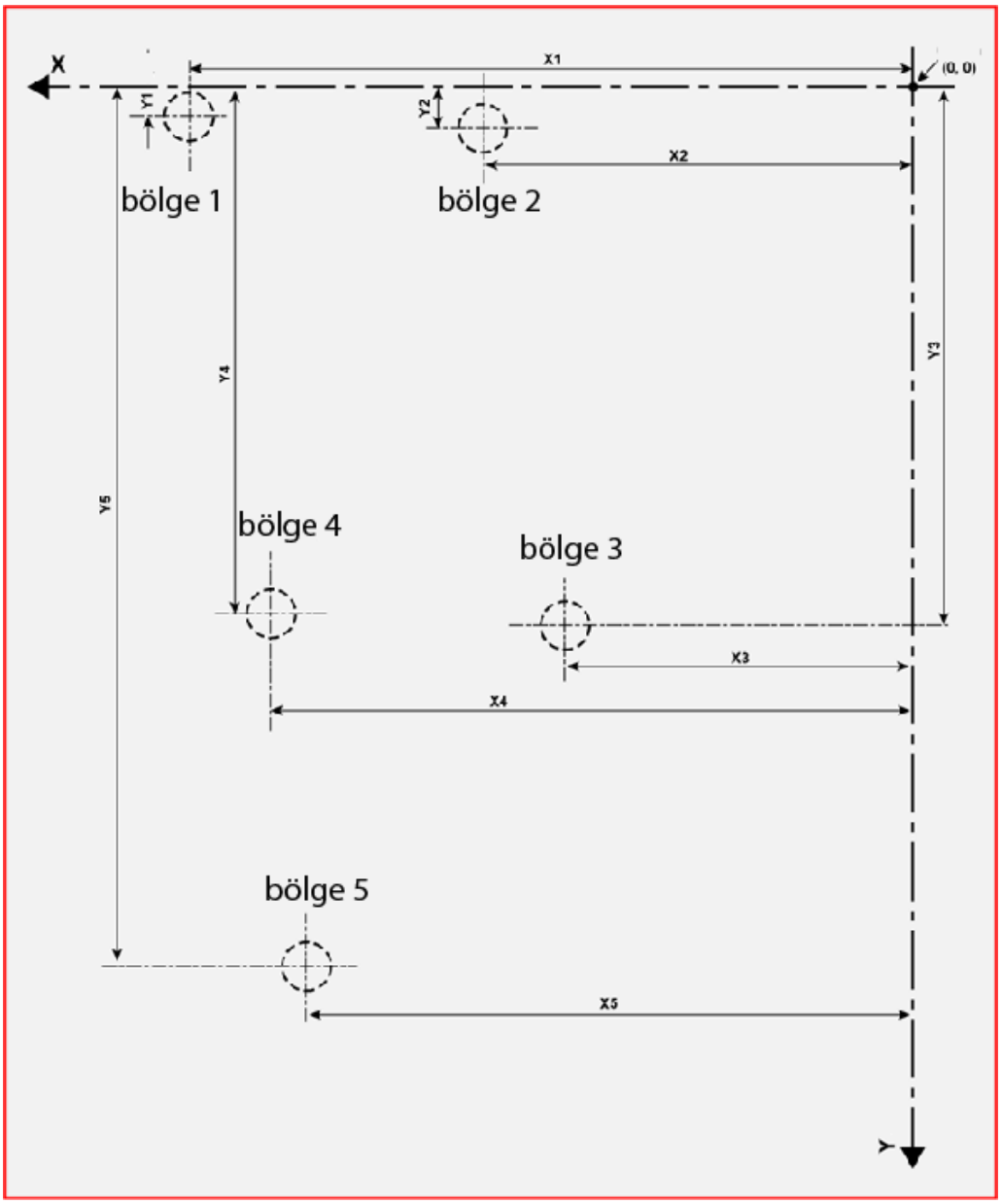
Şekil 4.9 Otomotiv parçasının simülasyon sonuçları σ_{yy}– izometrik görünüş



Şekil 4.10 Otomotiv parçasının simülasyon sonuçları σ_{yy}– üssten görünüş ve 5 farklı bölge

Tablo 4.2 Seçilen lokasyonların orijine olan mesafeleri

Lokasyon numaraları	Orijine olan mesafe (mm)	
	X-ekseni	Y-ekseni
bölge 1	-354.20	10.38
bölge 2	-145.83	-14.68
bölge 3	-69.28	-650.34
bölge 4	-245.70	-671.04
bölge 5	-210.07	-975.65



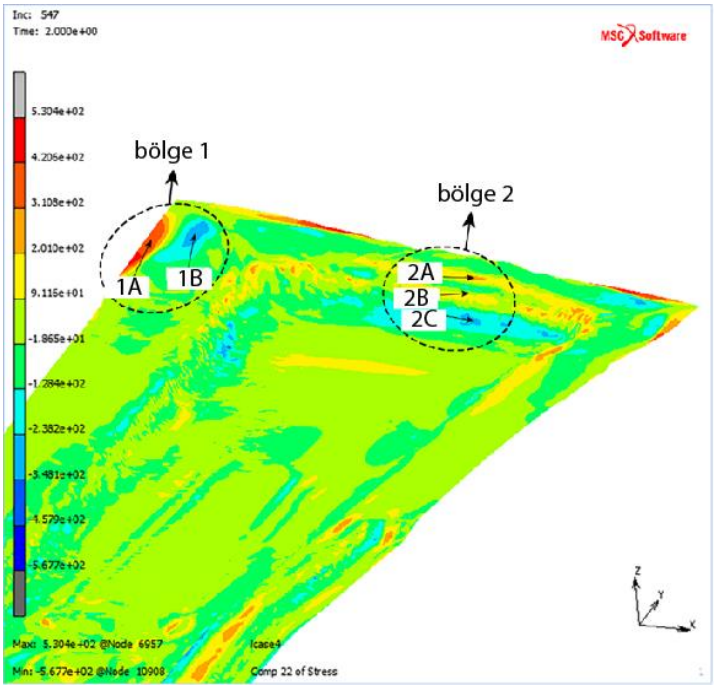
Şekil 4.11 Kalıntı gerilme ölçümü için seçilen konumların konumlarını gösteren şematik diyagram (Not: Çeşitli konumların mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 4.2'e bakınız).

Tablo 4.3 Ölçülen ve simüle edilen noktaların pozisyonları, CMM cihazı ile pozisyon ölçüm sonuçları

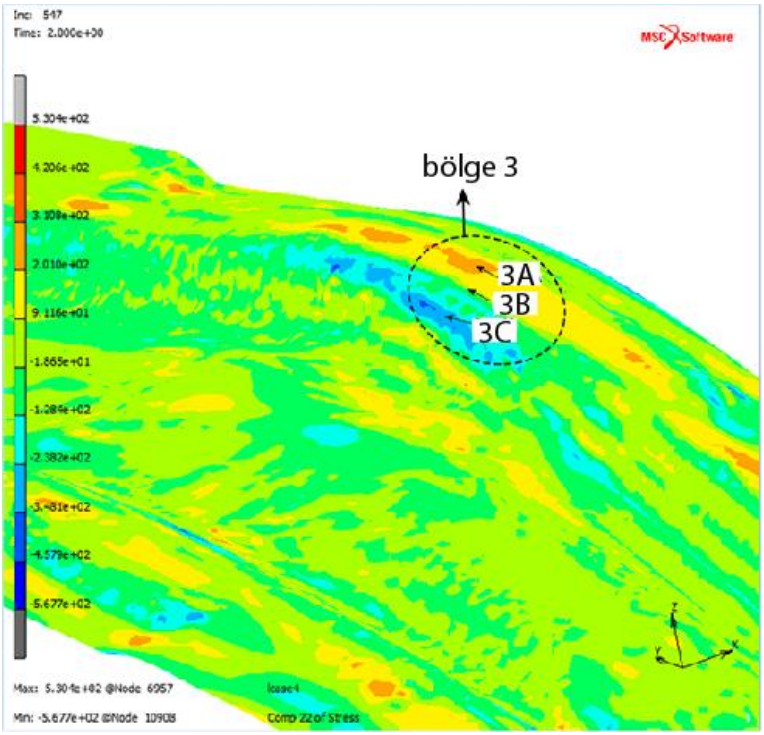
Sr No.	Lokasyon	Orijine olan uzaklık (mm)				Deforme olumuş metal (mm)
		X-ekseni		Y-ekseni		
		Simülasyon	CMM ile Ölçülen	Simulasyon	CMM ile Ölçülen	Z-ekseni
1	Zone 1A	-353.26	350.59	009.68	5.686	-01.22
2	Zone 1B	-328.50	330.939	012.90	6.162	00.00
3	Zone 2A	-146.10	145.422	-001.94	0.651	00.00
4	Zone 2B	-146.71	Yapılamadı	-019.60	Yapılamadı	-07.52
5	Zone 2C	-145.54	Yapılamadı	-027.42	Yapılamadı	-17.64
6	Zone 3A	-059.45	40.306	-650.95	645.24	00.00
7	Zone 3B	-069.28	Yapılamadı	-650.34	Yapılamadı	-01.54
8	Zone 3C	-079.12	Yapılamadı	-649.61	Yapılamadı	-06.48
9	Zone 4A	-250.58	236.166	-671.90	676.163	00.00
10	Zone 4B	-245.70	Yapılamadı	-671.04	Yapılamadı	-01.14
11	Zone 4C	-240.82	217.059	-670.25	672.926	-06.11
12	Zone 5A	-250.21	166.93	-978.32	944.609	- 01.22
13	Zone 5B	-232.57	Yapılamadı	-977.70	Yapılamadı	00.00
14	Zone 5C	-210.07	Yapılamadı	-975.65	Yapılamadı	-04.33
15	Zone 5D	-197.63	135.539	-974.32	947.609	-11.07
16	Zone 5E	-187.73	124.822	-973.11	952.214	-13.39

Tablo 4.3'te gösterilen bazı ölçümler parça üzerindeki eğimler ve karmaşık geometri nedeniyle yapılamamıştır. Sonlu eleman simülasyonlarından elde edilen sonuçlar tüm noktalar için vardır.

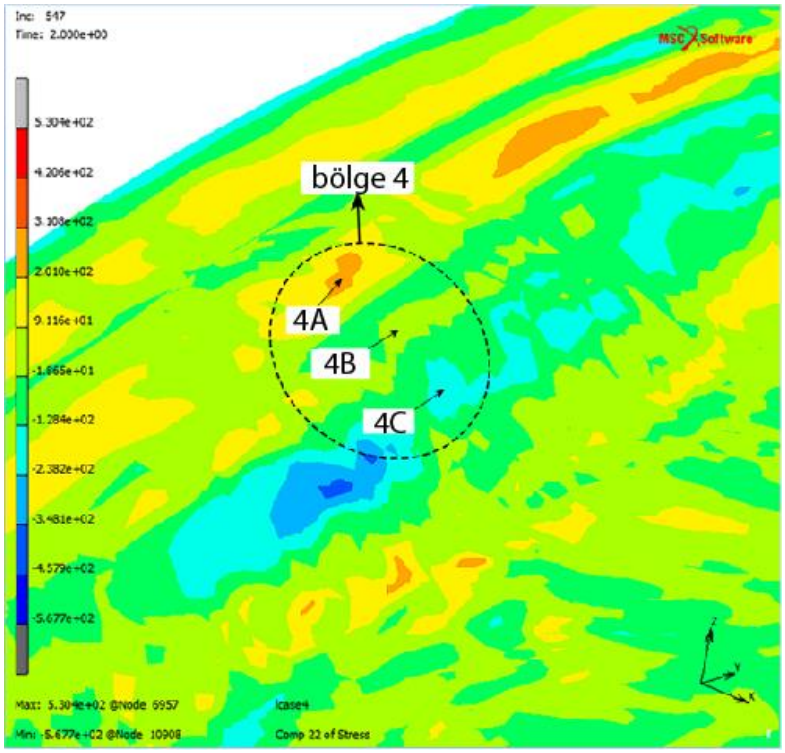
Seçilen noktalarının pozisyonları deyalı olarak Şekil 4.12-4.15'lerde gösterilmiştir.



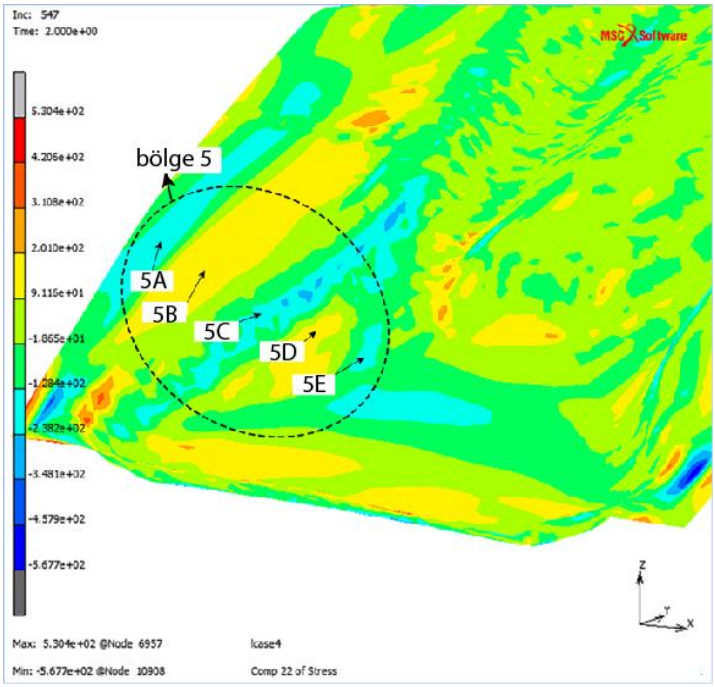
Şekil 4.12 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 1 ve 2 altındaki tam noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 4.3'ye bakın)



Şekil 4.13 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 3 altındaki kesin noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 2'ye bakın)



Şekil 4.14 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 4'ün altındaki kesin noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 2'ye bakın)



Şekil 4.15 Kalıntı gerilmelerin ölçüleceği konum 5 altındaki kesin noktaların konumu (Not: Çeşitli bölgelerin mesafesinin tam sayısal değeri için lütfen Tablo 2'ye bakın)

Kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Kalıntı gerilme ölçümleri Atılım Üniversitesi – Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde Stress-Tech X-stress robot kullanarak kalıntı gerilme ölçümü yapılmıştır, Şekil 4.16.



Şekil 4.16 Metal şekillendirme ile üretilen parça üzerinde X-stress Robot ile yapılan kalıntı gerilme ölçümleri

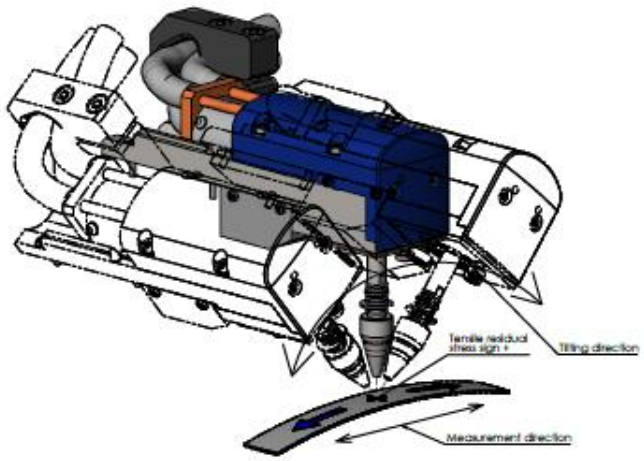
Kalıntı gerilme ölçümleri yapılan bölge üzerinde elektro-polishing yapılarak parça üzerindeki galvaniz kaplama kaldırılmıştır. Sonrasında önceden simülasyonlar ile belirlenen bölgelerde ölçümler yapılmıştır.

Kalıntı gerilme sonuçları Tablo 4.4'te gösterildiği gibidir.

Tablo 4.4 Kalıntı gerilme ölçümleri ve simülasyon sonuçları

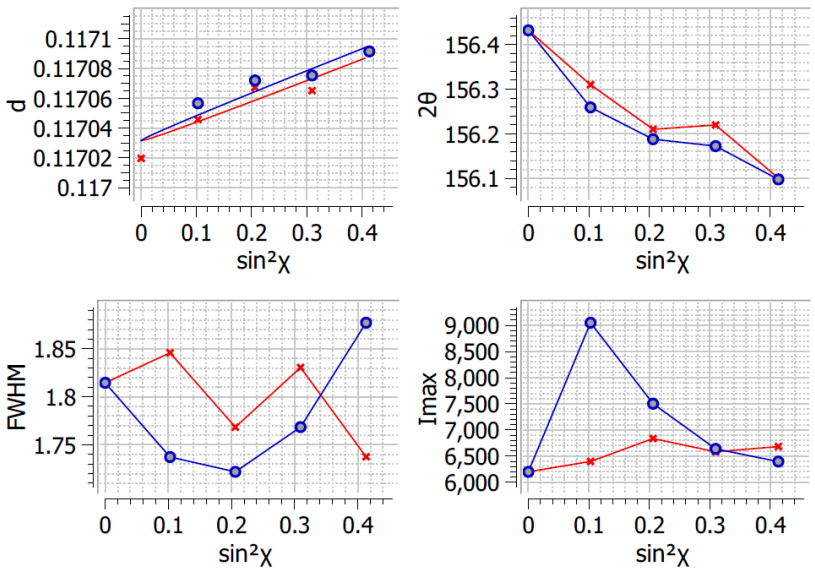
Sr No.	Lokasyon	σ_{yy}Simülasyon [MPa]	σ_{yy} X-Işını ile Öçülen [MPa] (3 adet tekrar)			Ortalama Değer [MPa
1	1A	317.9	210.0 ± 30.6	213.9 ± 28.9	214.4 ± 29.0	212.8 ± 29.5
2	1B	-266.1	-90.3 ± 13.1	-92.5 ± 14.0	-91.9 ± 13.2	-91.6 ± 13.4
3	2A	224.0	-75.7 ± 7.1	-75.6 ± 7.8	-74.0 ± 8.1	-75.1 ± 7.7
4	2B	Yapılamadı				
5	2C	Yapılamadı				
6	3A	245.9	114.3 ± 17.8	112.5 ± 16.6	113.7 ± 15.1	113.5 ± 16.5
7	3B	Yapılamadı				
8	3C	Yapılamadı				
9	4A	205.7	64.9 ± 19.6	64.6 ± 21.4	66.4 ± 20.8	65.3 ± 20.6
10	4B	Yapılamadı				
11	4C	-185.1	78.1 ± 8.0	80.3 ± 8.6	80.9 ± 7.9	79.8 ± 8.2
12	5A	-205.4	-6.4 ± 9.3	-4.6 ± 9.0	-1.6 ± 9.7	-4.2 ± 9.3
13	5B	Yapılamadı				
14	5C	Yapılamadı				
15	5D	163.7	187 ± 22.5	183.0 ± 22.8	183.8 ± 23.2	184.6 ± 22.8
16	5E	-111.6	79.4 ± 28.1	77.0 ± 27.7	78.5 ± 27.1	78.3 ± 27.6

Her bir kalıntı gerilmelerin ölçümünde 9 farklı döndürme açısı (tilt angle) kullanılmıştır, Şekil 4.17. Farklı eğme açılarında ölçümler yapılarak gerilmeler hesaplanabilmektedir. Ancak bu eğme açısı yüzünden eğik olan noktalarda ölçümler yapılamamıştır. Ölçüm yapılamayan noktalar Tablo 4.4'te belirtilmiştir.



Şekil 4.17 Kalıntı gerilme ölçümleri, döndürme açıları ve ölçülen gerilme bileşeni

Cihaz ölçümlerinden elde edilen verilen kullanılarak gerilme değerlerini bulmak için herbir analizde 9 farklı eğik açıdan elde edilen verilen kullanılarak gerilme değerleri bulunmaktadır, Şekil 4.18 ve Tablo 4.15.



Şekil 4.18 X-stress cihazından elde edilen veriler – örnek nokta 1A

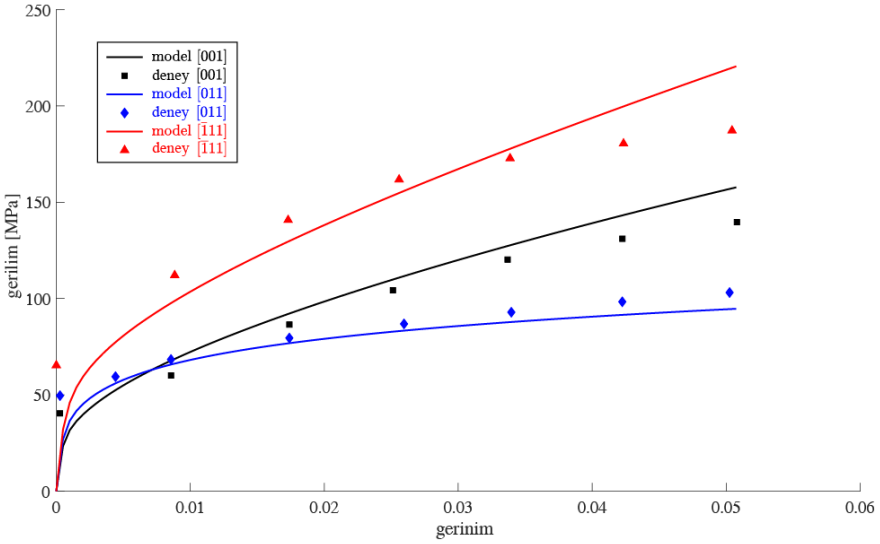
Tablo 4.5 Gerilme ölçümleri – örnek nokta 1A

Tilt angle [°]	Shift A [A°]	Shift B [A°]	D [A°]	FWHM [A°]	Imax [counts]
0	0	0	0.11702	1.81	6,199.60
-18.7	-0.21	-0.13	0.117057	1.74	9,051.20
-27	-0.23	-0.26	0.117072	1.72	7,502.90
-33.8	-0.27	-0.25	0.117075	1.77	6,638.00
-40	-0.35	-0.32	0.117091	1.88	6,395.00
18.7	-0.14	-0.1	0.117046	1.85	6,397.60
27	-0.2	-0.24	0.117067	1.77	6,835.10
33.8	-0.21	-0.21	0.117065	1.83	6,582.60
40	-0.29	-0.37	0.117091	1.74	6,681.70

4.2 Simülasyon sonuçları

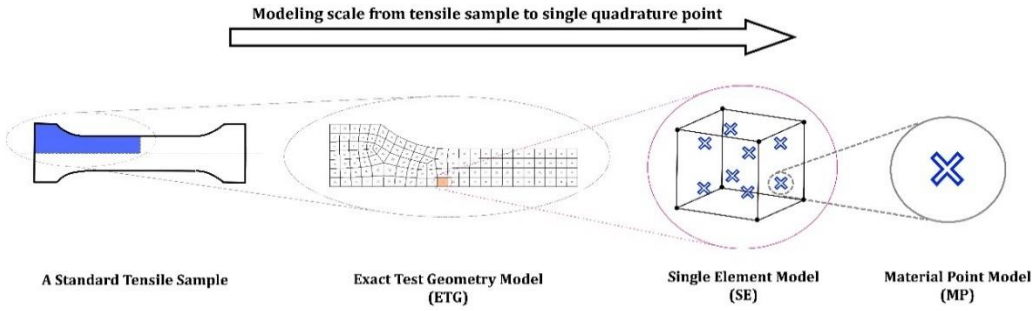
4.2.1 Fizik temelli model sonuçları

Fizik temelli model literatürde mevcut alfa-Fe tek kristalleri üzerinde yapılan deneylerdeki sonuçları açıklamak için uygulanmıştır, Keh (1965). Aynı sonuç kalibrasyon neticesinde iyileştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile daha uygun bir uyum sağlanmıştır, Şekil 4.19.



Şekil 4.19 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası simülasyonları ve deneysel sonuçları (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970) model kalibrasyon sonrası

Modelleme çalışması üç farklı ölçekte uygulanmıştır: malzeme noktası (nümerik Gauss noktası) simülasyonları, tek elemanlı simülasyonlar, ve çok elemanlı simülasyonlar. Bu sayede model ölçeğinin sonuçlara olan etkisi araştırılmıştır, Şekil 4.20.



Şekil 4.20 Üç farklı model ölçeğinde simülasyonların yapılması ve deneysel karşılaştırmalar

4.2.1.1 Malzeme Noktası Simülasyonları

Malzeme noktası simülasyonlar tek bir Gauss noktası için tek eksenli yükleme için yapılmıştır. Bu yük durumu aşağıdaki denklem:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1+\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & 1-0.5\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1-0.5\varepsilon \end{bmatrix} \qquad (4.2)$$

Elemanların yönelimi, oryantasyon vektörlerinin karşılık gelen Euler açılarının (bir MATLAB® kodu kullanılarak) çıkarılması ve aşağıda formüle edildiği gibi ardışık rotasyonların birleştirildiği $\boldsymbol{R}$ matrisi gerçekleştirilir. Burada φ_1, ϕ ve φ_2 Euler açılarıdır ve Z, X' (döndürülmüş X), ve Z" (döndürülmüş Z') ekseni etrafındaki dönüş açılarını temsil eder, Denklem (4.3).

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2) - \cos(\phi)\sin(\varphi_1)\sin(\varphi_2) & -\cos(\varphi_2)\sin(\varphi_2) - \cos(\phi)\cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2) & \sin(\phi)\sin(\varphi_2) \\ \cos(\varphi_1)\sin(\varphi_2) + \cos(\phi)\sin(\varphi_1)\cos(\varphi_2) & \cos(\phi)\cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2) - \sin(\varphi_1)\sin(\varphi_2) & -\sin(\phi)\cos(\varphi_2) \\ \sin(\phi)\sin(\varphi_1) & \sin(\phi)\cos(\varphi_1) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Kristal yönelim etkisi

Şekil 4.19 BCC kristali olarak Keh'in tek kristal deneysel sonuçları ve model karşılaştırmasını göstermektedir (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970). Sonuçlara göre, [0 1 1] doğrultusu boyunca meydana gelen deformasyon durumu için birim şekil değişimi ile pekleşme miktarı, üç yönelim arasında en az olduğu durumdur. Ayrıca [0 1 1] çekme eksenine karşılık gelen akma gerilmei [0 0 1] yönünden daha yüksektir. [0 0 1] ve [1 1 1] için pekleşme oranı, benzer aktif kayma sistemlerinin varlığı nedeniyle birbirleri ile uyuşmaktadır. Diğer kristal yönlerinde, [0 1 1] yönüne göre daha fazla pekleşme ve dislokasyon yoğunluğunun artması ile açıklanmıştır.

Schmid-olmayan katsayılar $a_1 = 0$, $a_2 = 0.2$ ve $a_3 = 0$ olarak alındığında elde edilen en iyi eğri uyumu, yani sadece Burgers vektörüne dik olan kayma gerilmei vardır, bu da gerilme değerini ve sonuç olarak akma gerilmesini etkilemektedir. Tüm model sabitleri Tablo 4.6'da gösterilmiştir (Zwiesele ve Diehl, 1979).

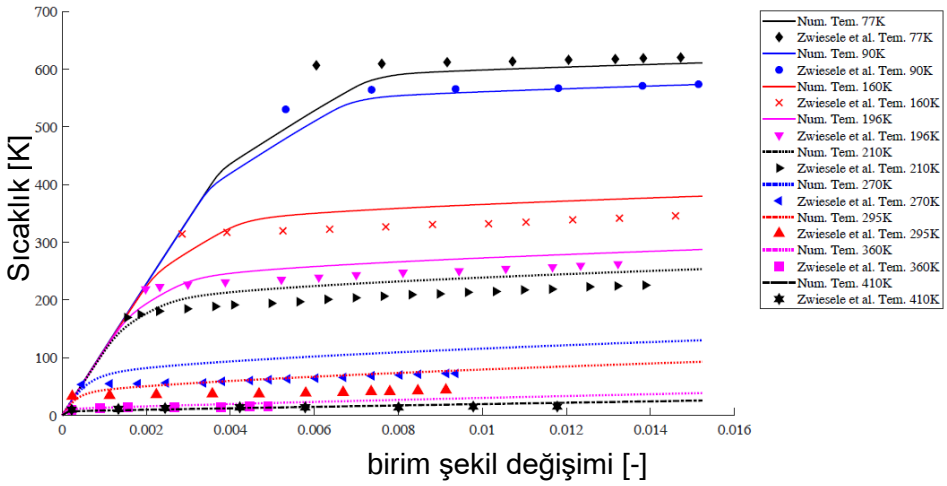
Tablo 4.6 alfa-Fe tek kristal malzeme model sabitleri

Parametre	Spitzig ve Keh (1970)	Zwiesele ve Diehl (1979)
İlk dislokasyon yoğunluğu	$\rho_0 = 8 \times 10^{10}$	$\rho_0 = 8 \times 10^{10}$
Schmid-Olmayan sabitleri	$a_1 = -0.15$ $a_2 = 0.02$ $a_3 = 0.1$	$a_1 = -0.13$ $a_2 = 0.02$ $a_3 = 0.08$
Pekleşme sabitleri	$c_1 = 0.2$ $c_2 = 5$ $c_3 = 11$	$c_1 = 0.7$ $c_2 = 10$ $c_3 = 20$

	$c_4 = 0.02$ $c_5 = 10$ $c_6 = 8000$ $c_7 = 1$	$c_4 = 0.02$ $c_5 = 10$ $c_6 = 8000$ $c_7 = 1$
Sıcaklıklar	$T_1 = 143°K$ $T_2 = 195°K$ $T_3 = 250°K$ $T_4 = 295°K$	$T_1 = 77°K$ $T_2 = 90°K$ $T_3 = 160°K$ $T_4 = 196°K$ $T_5 = 210°K$ $T_6 = 270°K$ $T_7 = 295°K$ $T_8 = 360°K$ $T_9 = 410°K$
Peierls eşik enerjisi	$Q_{Pei} = 0.682 \times 1.60218 \times 10^{-19}\, J$	$Q_{Pei} = 0.67 \times 1.60218 \times 10^{-19}\, J$
Debyen frekansı	$V_0 = 1 \times 10^{10}$	$V_0 = 1 \times 10^{10}$
Birim şekil değişimi hızı	$\dot{\varepsilon} = 5.6 \times 10^{-4} \frac{1}{s}$	$\dot{\varepsilon} = 1.3 \times 10^{-4} \frac{1}{s}$

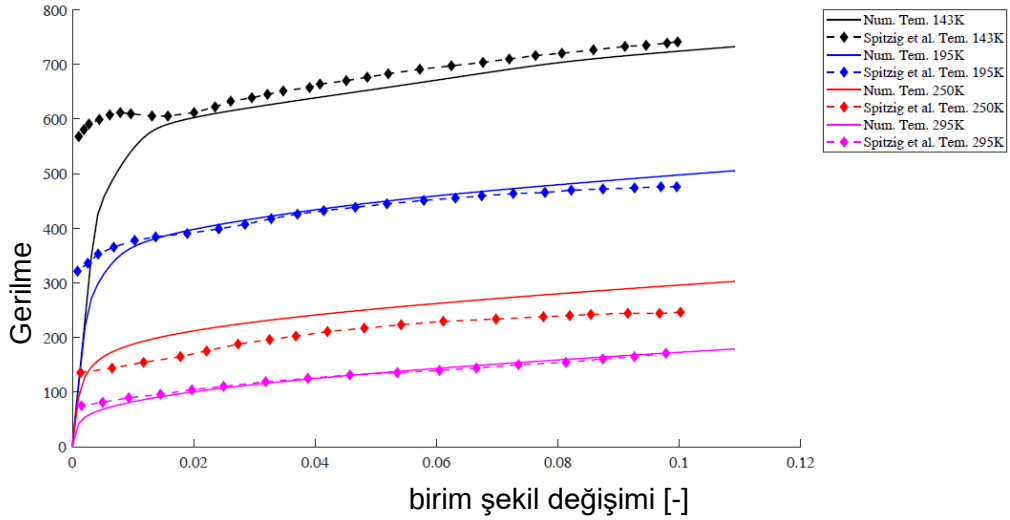
Ortam sıcaklığının etkisi

Modelin, deformasyon alanının farklı sıcaklıkları altında basma durumu için gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3'te gösterilmektedir. Sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar için kalibre edildi ve Zwiesele ve Diehl (1979) tarafından basma yükü altında elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı. Sayısal modelin sonuçları deneysel olarak yapılan araştırmalarla uyumludur ve Schmid olmayan etkinin sıcaklık artışı ile azaldığını ortaya koymaktadır. Modelde kullanılan eğri uydurma parametreleri Tablo 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.21 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası deneysel sonuçlar (Sptizig ve Keh, 1970) ve simülasyon sonuçları

Şekil 4.21'de gösterildiği gibi, elde edilen sonuçlar ile Spitzig ve Keh tarafından bildirilen eğriler arasında iyi bir uyum vardır (Sptizig ve Keh, 1970). Deneyler ve simülasyonlar çekme yükü durumu için hazırlanmıştır. Şekilde görülebileceği gibi, düşük sıcaklıklarda termal aktivasyon sayesinde akma mukavemetinin azalması model sabitleri ayarlanmadan sıcaklık bağımlılığı elde edilebilmektedir.



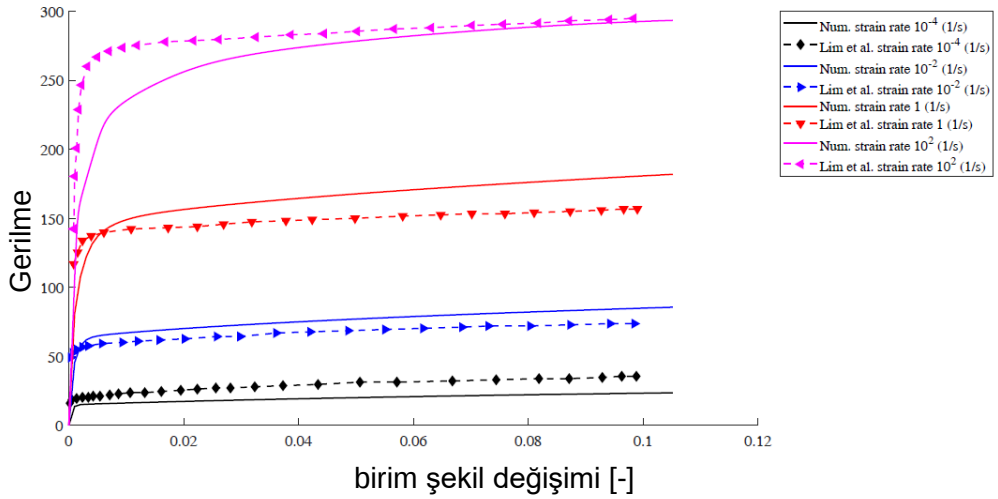
Şekil 4.22 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve deneysel sonuçlar (Sptizig ve Keh, 1970).

Şekil 4.21 ve 4.22'de gözlenebileceği üzere pekleşme miktarı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda cross-slip mekanizmanın etkinleşmesi sebebiyle pekleşme miktarı azalmaktadır. Deneysel olarak gözlenen sıcaklığa bağlı olan pekleşme, geliştirilen modelin sıcaklığa bağlı olması nedeniyle model

sabitleri tüm sıcaklıklar için aynı değerlere sahip olarak yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir.

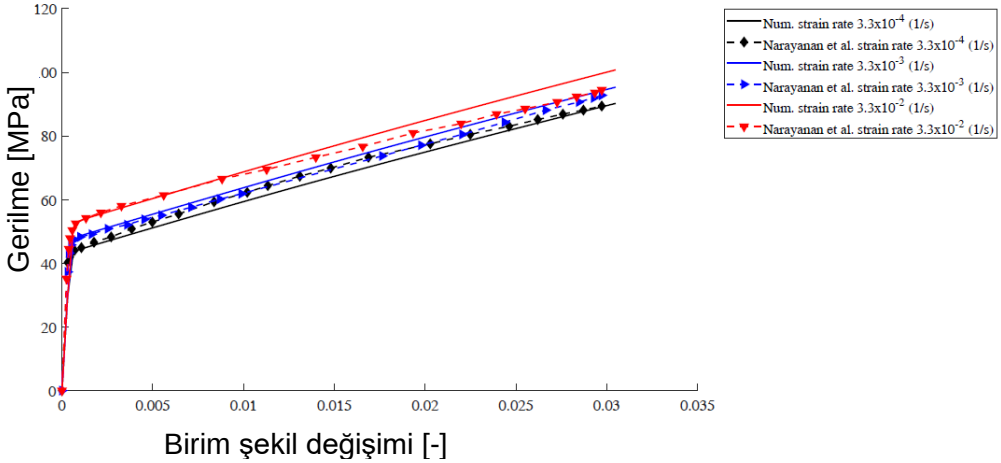
Birim şekil değişimi hızının etkisi

Geliştirilen model farklı birim şekil değişimi hızlarının mekanik özelliklere olan etkisini araştırılmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.23 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015)

Birim şekil değişimi hızları 100 kat artırıldığında (10^{-4} – 10^{-2} 1/s) mukavemetin artışı modellenebilmektedir. Modelde birim şekil değişimi hızı değiştirilirken tüm sabitlerin aynı olarak kaldığı da hatırlatılmalıdır. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de iki farklı referansta elde edilmiş olan birim şekil değişimi hızının birim şekil değişimi-gerilme eğrisine olan etkisi görülmektedir.

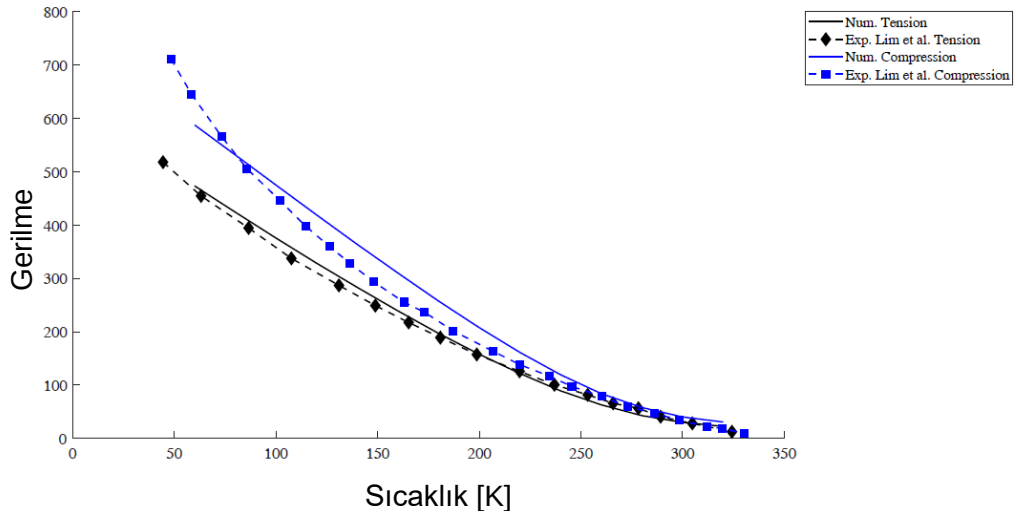


Şekil 6. alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar Narayanan (2014).

Çekme-Basma Asimetrisi

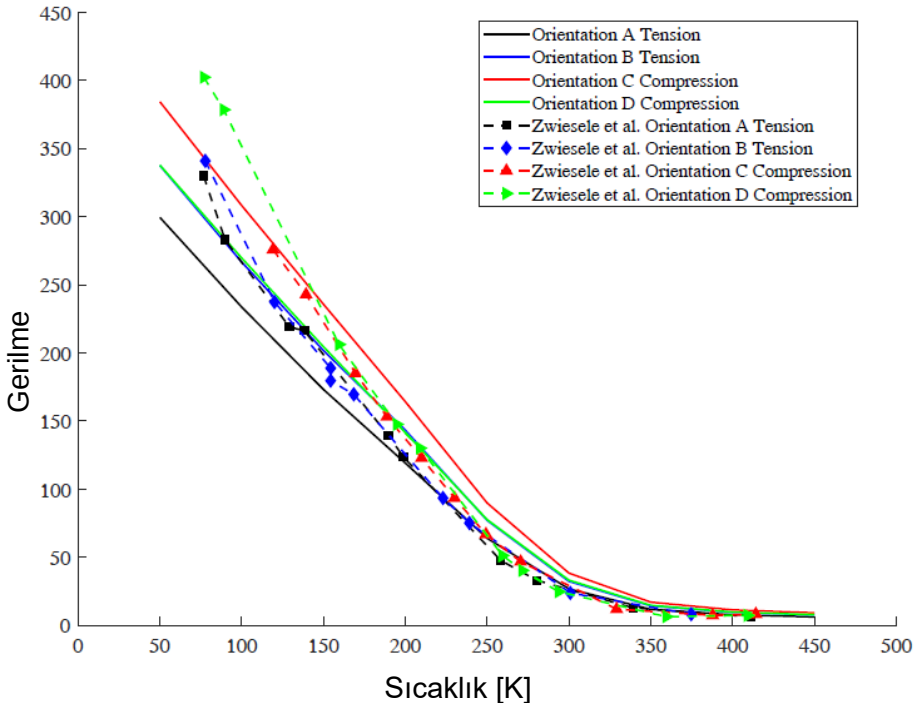
BCC malzemelere özgün çekme ve basma asimetrisinin modellenmesi önemlidir. Bu sebepten literatürden alınan iki farklı örnek durum için simülasyonlar yapılmıştır (Zwiesele ve Diehl, 1979; Lim vd., 2015). Akma mukavemet kriteri olarak %0.2 birim şekil değişimi değerinde olan gerilme kullanılmıştır.

Şekil 4.24'te literatürdeki model ile karşılaştırma yapılmıştır. Çekme/basma ekseni [-1 4 9] kristallografik yönüne denk gelmektedir. 60-320 K sıcaklık aralığında onbeş adet farklı sıcaklık değeri seçilerek çekme ve basma durumlarının simülasyonu yapılmıştır.



Şekil 4.24 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015)

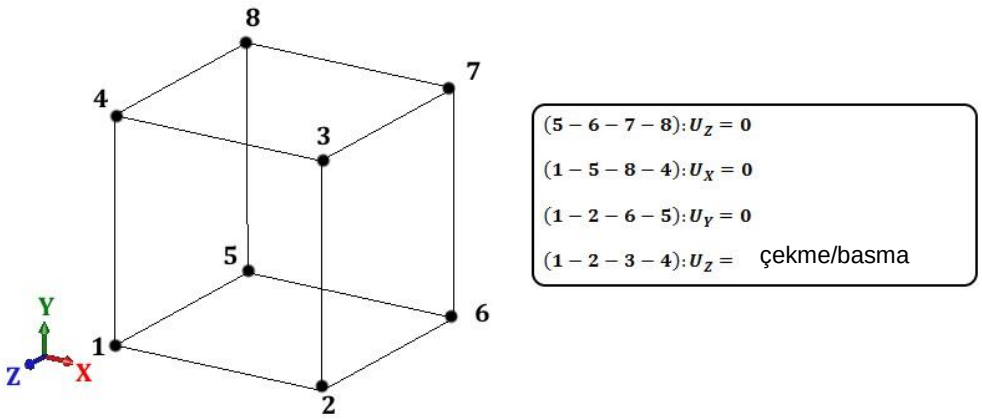
Zwiele ve Diehl (1979) deneysel olarak çekme-basma akma mukavemet değerleri ve model ile karşılaştırılması Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Akma gerilmei, birim şekil değişimi değeri tüm durumlar için %0.4 birim şekil değişimi değerinde hesaplandı ve son gerilme değeri, karşılık gelen etkin stres olarak alındı. 50K ile 450K sıcaklık aralığında dokuz farklı sıcaklık değeri kullanıldı. Deneysel çalışmada kullanılan A-B-C-D ile tanımlandırılmış dört farklı kristal doğrultusu kullanıldı. Grafikler, çekme-basma eğrilerin sadece uygulanan sınır koşullarına değil, aynı zamanda kristallerin yönelimina olan bağımlılığını da yansıtmaktadır.



Şekil 4.25 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Zwiesele ve Diehl, 1979)

4.2.1.2 Kristal plastisite sonlu eleman simülasyonları (Tek Eleman)

Bu modelleme yaklaşımında tek bir eleman kullanılmıştır. Birim kenar uzunluğuna sahip bir küp şeklinde bir eleman tek eksende yüke maruz bırakılmıştır. Çekme ve basma yük modlarında uygulanan sınır koşulları Şekil 426'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 Tek elemanlı model ve sınır şartları

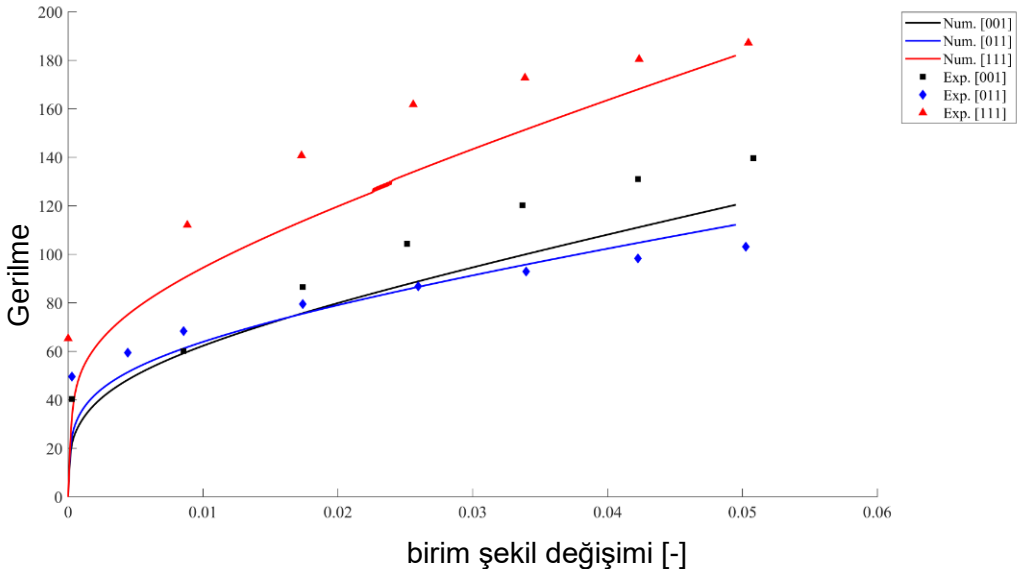
Tek kristal modelinde, deformasyon hızları küp yüzlerinden birine (Şekil 4.26'da gösterildiği gibi Z ekseni yönünde) Z ekseni boyunca uygulanır ve yüzünde dört düğüm bulunduğundan, her biri için dört farklı gerilme değeri elde edilir. Buna göre,

Z-eksenindeki yüke denk gelen üçüncü normal gerilme bileşeninin ortalama değerleri, aşağıdaki gibi gerilme-gerilme grafiklerini çizmek için hesaplanmıştır. Parantez içindeki üstel olarak ifade edilen sayılar düğüm noktalarını ifade etmektedir.

$$\sigma_{33}^{(ort.)} = \frac{\sigma_{33}^{(1)}+\sigma_{33}^{(2)}+\sigma_{33}^{(3)}+\sigma_{33}^{(4)}}{4} \quad (4.4)$$

Kristal yönelim etkisi

Şekil 4.27, kristal malzeme modelini içeren sonlu eleman ile elde edilen eğrileri ve deneysel olarak bilinen eğrileri farklı kristal doğrultuları için göstermektedir. Schmid olmayan katkıda bulunan terimlerini göz önünde bulundurarak, tek eleman ile yapılan simülasyonların BCC malzeme modelini yapısının gerçekçi davranışını ortalama bir davranış olarak daha doğru taklit ettiği anlaşılabilir. Bununla birlikte, Schmid olmayan stres bileşenlerinin katılımı, farklı modeller için yaklaşık olarak aynıdır.



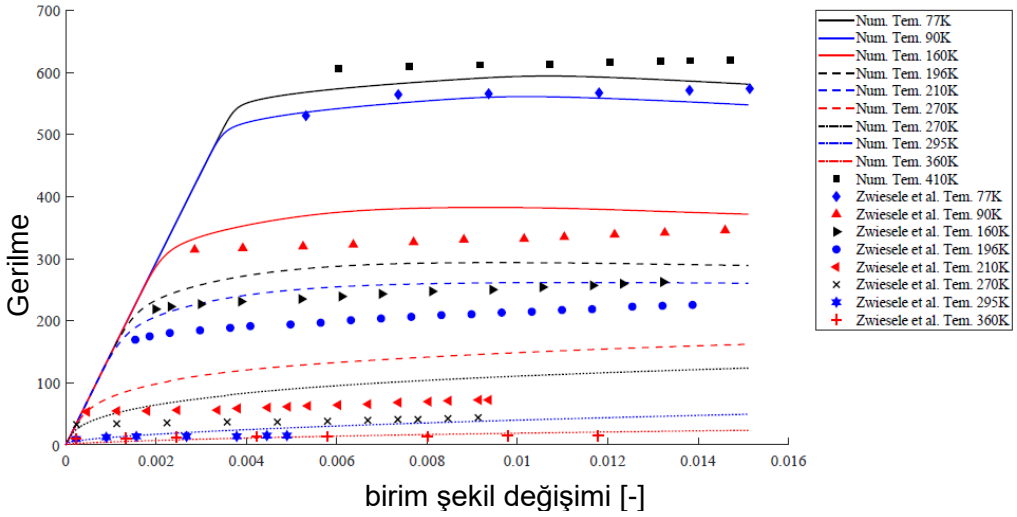
Şekil 4.27 alfa-Fe tek kristal tek eleman simülasyonları ve deneysel sonuçları (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970)

Tablo 4.6'da gösterildiği gibi (modelleme parametreleri tablosu), Schmid olmayan çarpanlar $a_1 = 0$, $a_2 = 0.2$ ve $a_3 = 0$ olarak alınarak malzeme noktası simülasyonları ile karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. Sadece a_2 terimi, yani Burgers vektörüne dik olan kayma gerilmeinin akma gerilmeine etkisi olduğu bulunmuştur. [0 1 1] yönelimi için pekleşmesi diğerlerinden daha azdır, bu da bu

oryantasyon için aktif kayma sistemlerinin sayısının daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebepten kayma düzlemleri arasındaki etkileşim daha azdır ve daha az pekleşme gözlenmiştir.

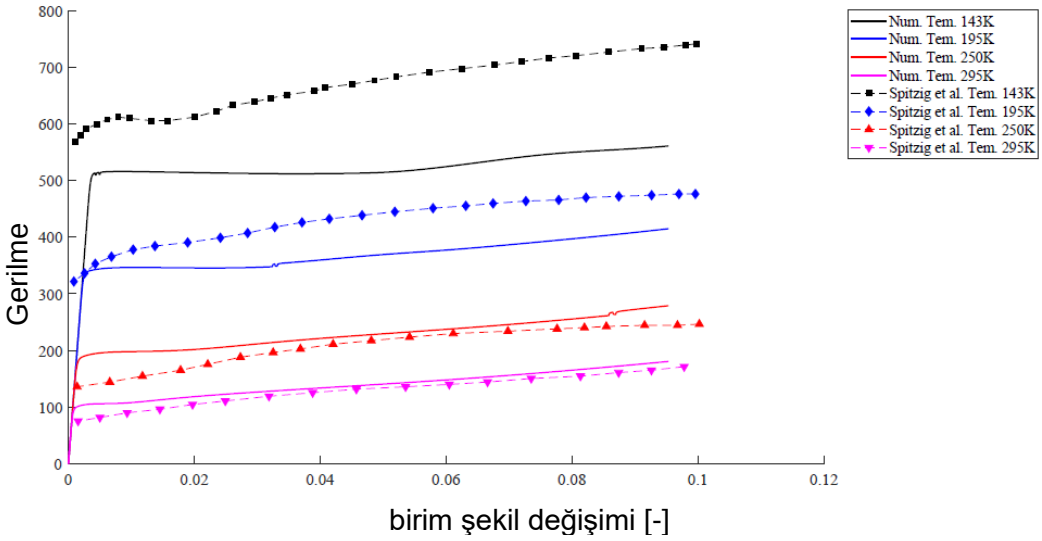
Ortam sıcaklığının etkisi

Tek elemanlı model kalibre edilmiş ve modelin parametreleri Tablo 4.7'de olarak sunulmaktadır. Şekil 4.28'de deneysel veriler ile karşılaştırmalı sonuçlar gösterilmiştir. Sıcaklık düştükçe sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki tutarsızlıklar azalır. Burada model aynı model sabitlerinin kullanıldığı belirtilmelidir, yani farklı sıcaklıklar için farklı sabitler kullanılmamıştır.



Şekil 4.28 alfa-Fe tek kristal deneysel sonuçlar (Zwiesele ve Diehl, 1979) ve tek eleman simülasyon sonuçları

Sıcaklık değişiminin akma mukavemetine olan etkisi benzer şekilde Spitzig ve Keh (1970) deneylerinde gözlemlenebilir. Şekil 4.29'da deneysel veriler ile tek eleman kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Plastik deformasyonun başlangıç aşamalarında yüksek sıcaklıklarda meydana gelen yumuşama durumu tek eleman model sonuçlarında da gözlenmektedir. Deneylerde sıcaklık azaldığında pekleşmede düşüş gözlemlenmemiştir. Ancak simülasyonlarda bu düşüş daha fazla olarak gözükmektedir.

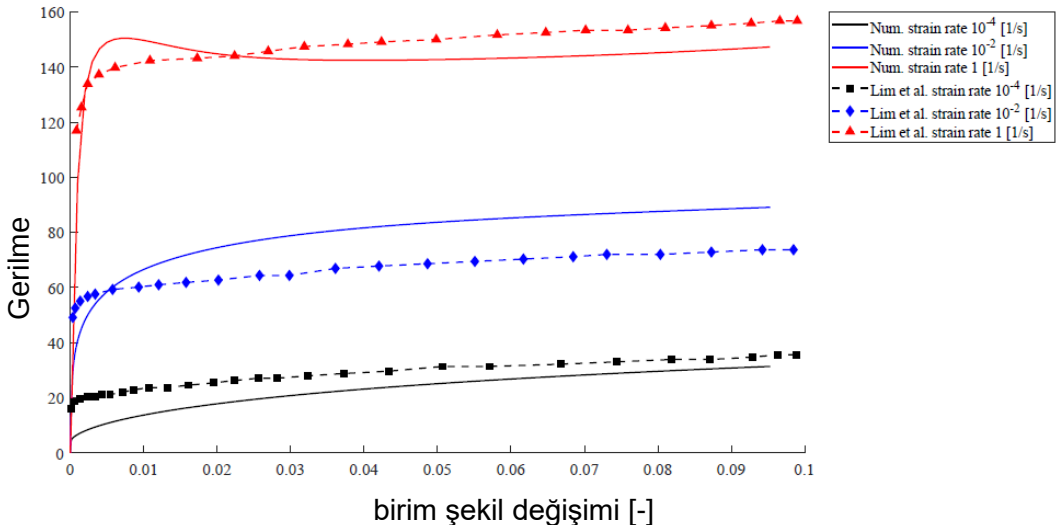


Şekil 4.29 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Spitzig ve Keh, 1970)

Birim şekil değişimi hızının etkisi

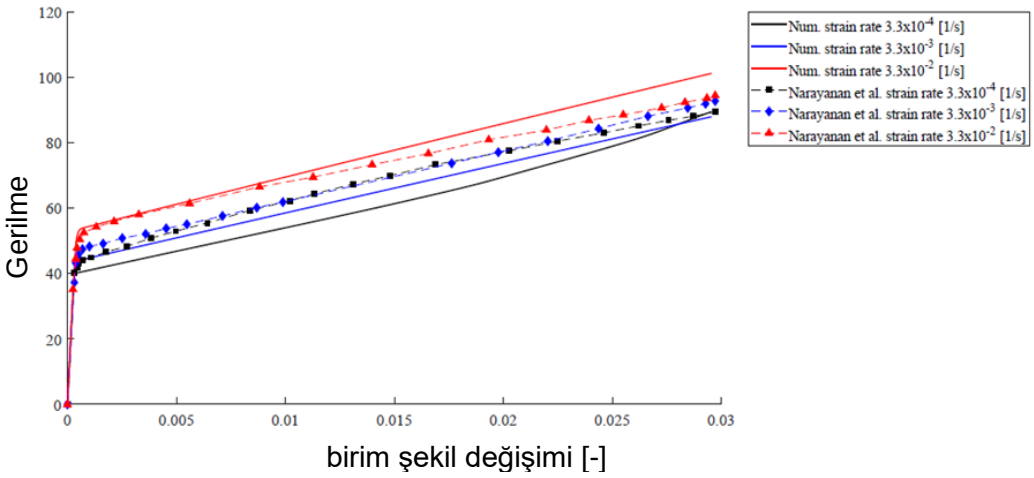
Birim şekil değişimi hızının gerilme-birim şekil değişimi eğrilerine olan etkisi incelenmiştir. Lim vd.'nin [5] yürüttüğü deneysel test koşullarını çoğaltmak için sınır koşulları ve sıcaklığı içeren model girdileri kullanılmıştır.

Şekil 4.30'da tek eleman modelinin sonuçları genellikle Lim vd. tarafından elde edilen sonuçları ile birlikte gösterilmiştir ve sonuçlar tutarlıdır. 0.0001-1 1⁄s gerilme hız aralığı için sonuçlar sunulmuştur. Model, malzeme noktasın modelinde gözlenmeyen yüksek gerilme hızlarında yumuşama (negatif pekleşme) davranışını gösterir (Şekil 4.30'da gösterildiği gibi). Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 dikkate alındığında, tek eleman modelinin, Lim vd. deney sonuçları ile benzeştiği sonucuna varılmıştır. Simülasyon daha düşük birim şekil değişimi hızlarında sorunsuz çalışmaktadır.



Şekil 4.30 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015)

Şekil 4.30 tek eleman modelinin ve Narayanan vd. (2014) deneysel sonuçları ile model karşılaştırmasını göstermektedir. Bu deneylerde birim şekil değişimi hızı, $\dot{\varepsilon} = 3.3 \times 10^{-4} - \ 3.3 \times 10^{-2}$ 1/s olarak kullanılmıştır.



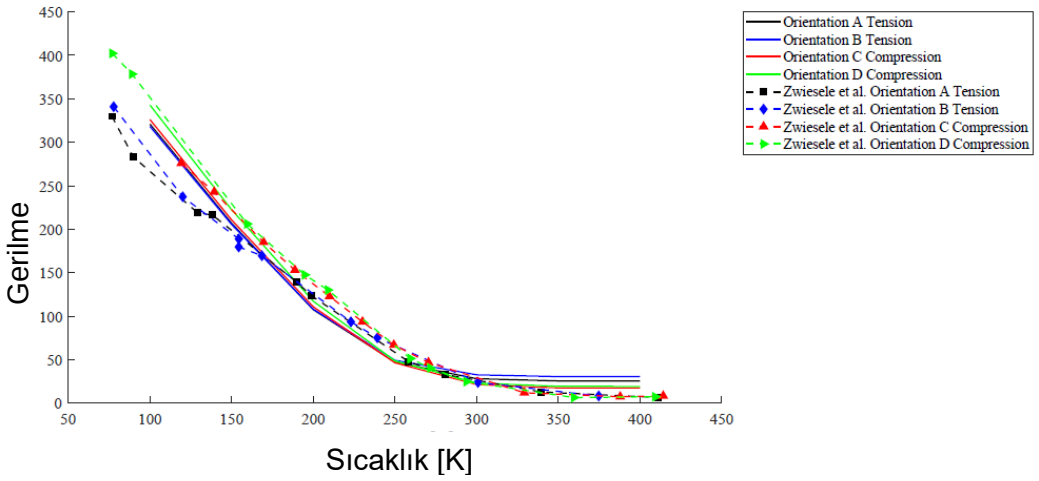
Şekil 4.31 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Narayanan vd., 2014)

Çekme-Basma Asimetrisi

Şekil 4.32 tek elemanlı modeldeki akma stresinin gerilme ve basınç altındaki sıcaklığa bağımlılığını göstermektedir. Farklı sıcaklıklardaki hesaplamaların her biri için karşılık gelen akma gerilmeleri, 0.001 değerini birim şekil değişimi kriteri kullanılarak hesaplandı. Deneyler birbirine yakın olan saf demir numuneleri için farklı kristal orientyasyonları kullanılarak gerçekleştirildi.

Deneysel sonuçlarla özdeş olan model, sıkıştırma için gerilmeden daha yüksek akma gerilmei ile sonuçlanır. BCC yapısının örnek referansına göre yönelimi da gerçekçi deneyler gibi simülasyonun gerilme-gerilme tepkisini etkilemiştir, fakat yönelimin etkisi deneysel sonuçlarda sayısal olanlardan çok daha belirgindir.

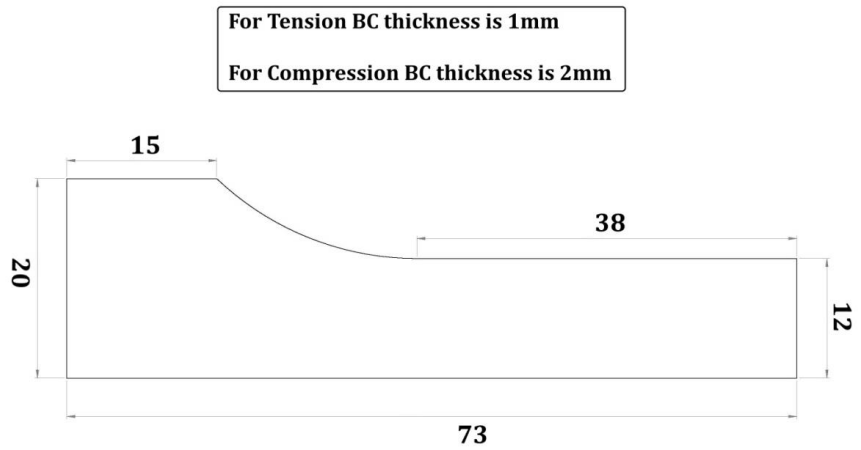
Zwiesele ve Diehl (1979) tarafından bildirildiği çekme-basma asimetrisi, 250 K sıcaklığı aşan durumlarda kaybolur. Tek elemanlı modelde de benzer bir davranış gözlenmektedir.



Şekil 4.32 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, tek elemanlı simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki deneysel sonuçların karşılaştırması (Zwiesele and Diehl, 1979)

Kristal plastisite sonlu eleman simülasyonları (Çoklu Eleman)

Çoklu eleman modeli ile gerçek test numune boyutlarının ve sınır şartlarının etkisi araştırılmıştır. Bu durumda gerçek test geometrisinin dörtte birini temsil etmek için oluşturulan bir 3D model kullanıldı. Model, EN ISO 6892-1 standart kodunda belirtildiği şekilde boyutlandırılan Şekil 4.33'te gösterilmektedir. Sıkıştırma fenomeni nedeniyle hesaplamada herhangi bir dengesizlikten kaçınmak için alınan önlemlerden birinin, basma durumunda kalınlık yönündeki eleman sayısı iki katına çıkarılarak çekme durumu için 116, basma durumu için 232 eleman kullanıldı. 8-düğüm noktalı lineer eleman tipi kullanıldı.



Şekil 4.33 Çoklu eleman simülasyonları için çeyrek test numune geometrisi modeli (EN ISO 6892-1)

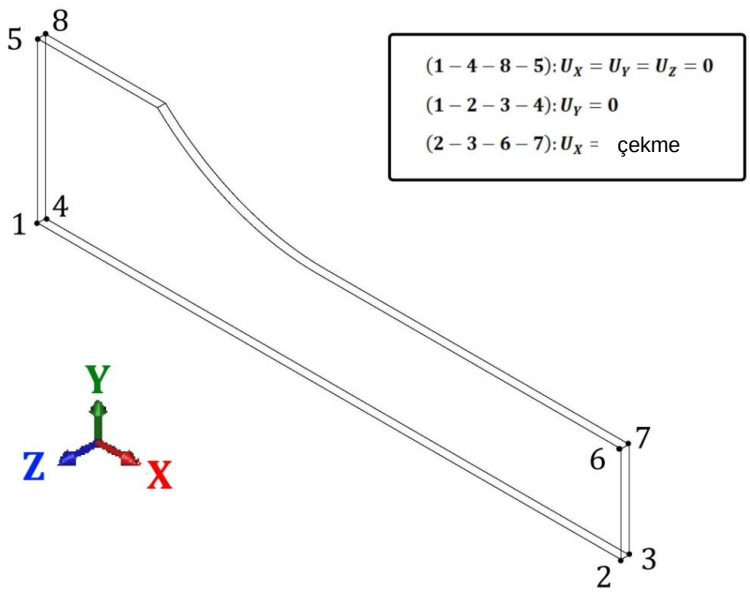
Uygulanan sınır şartları Şekil 16'da gösterilmektedir. Anlaşılabileceği gibi modellerde iki tip geometri kullanıldığı için kullanılan basma ve çekme olarak iki çeşit sınır şartı vardır. Sınır şartları aşağıdaki özelliklere sahiptir, Şekil 4.34.

basma veya çekme yükü; $U_x \neq 0$

Orta kesit (1-2-3-4 noktlarının tanımadığı düzlem) simetri sınır şartı; $U_y = 0$

Orta kesit (1-2-6-5 noktlarının tanımladığı düzlem) simetri sınır şartı; $U_z = 0$

Grip ile sabitleme (1-4-5-8 noktalarının tanımladığı düzlem); $U_x = U_y = U_z = 0$



Şekil 4.34 Çoklu eleman simülasyonları için çeyrek test numune geometrisi yüzeyler

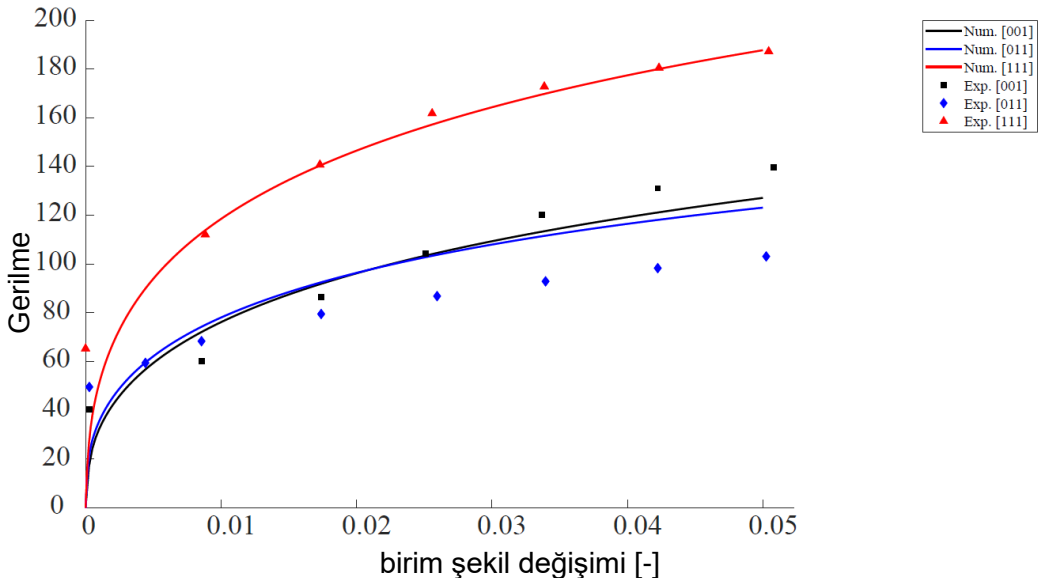
Simülasyon sonucu elde edilen gerilmeler ortalama değerlerden bulunmuştur. Simetrik yüzeydeki (2-3-7-6 ile tanımlı yüzey) düğüm noktalarındaki gerilme ve birim şekil değişimi değerlerinin ortalamaları kullanılarak bulunur.

$$\sigma_{11}^{(ort.)} = \frac{\sigma_{11}^{(1)}+\cdots+\sigma_{11}^{(N)}}{N} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{11}^{(ort.)} = \frac{\varepsilon_{11}^{(1)}+\cdots+\varepsilon_{11}^{(N)}}{N} \quad (4.6)$$

Kristal yönelim etkisi

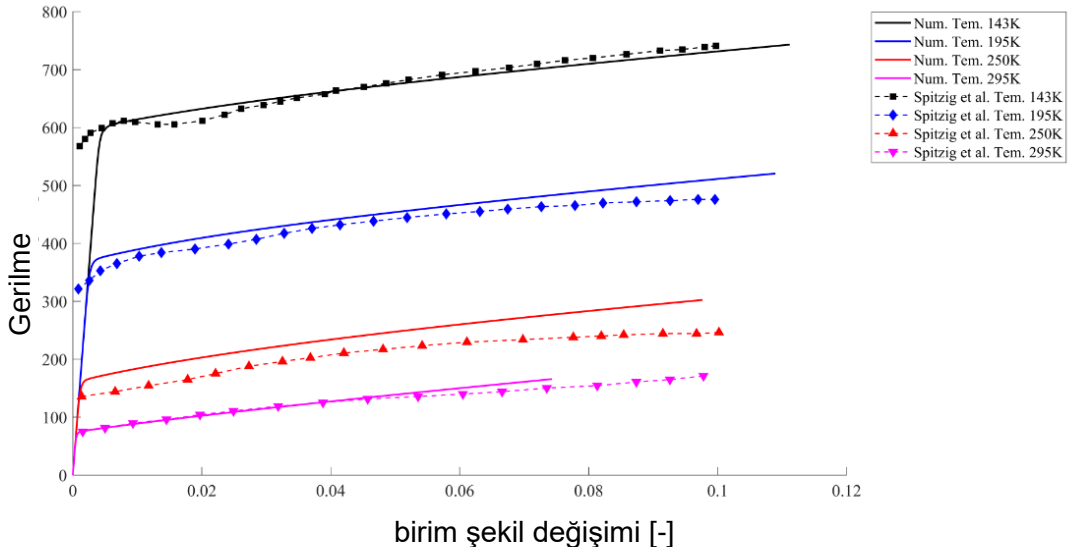
Yönelim etkisi kalibrasyon sonucunda Şekil 4.35'te gösterildiği gibidir. Bu modelde kristal yönelim etkisinden oluşan farklar özellikle [001] ve [011] doğrultuları için birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.35 alfa-Fe tek kristal çoklu eleman simülasyonları ve deneysel sonuçları (Keh, 1965; Spitzig ve Keh 1970)

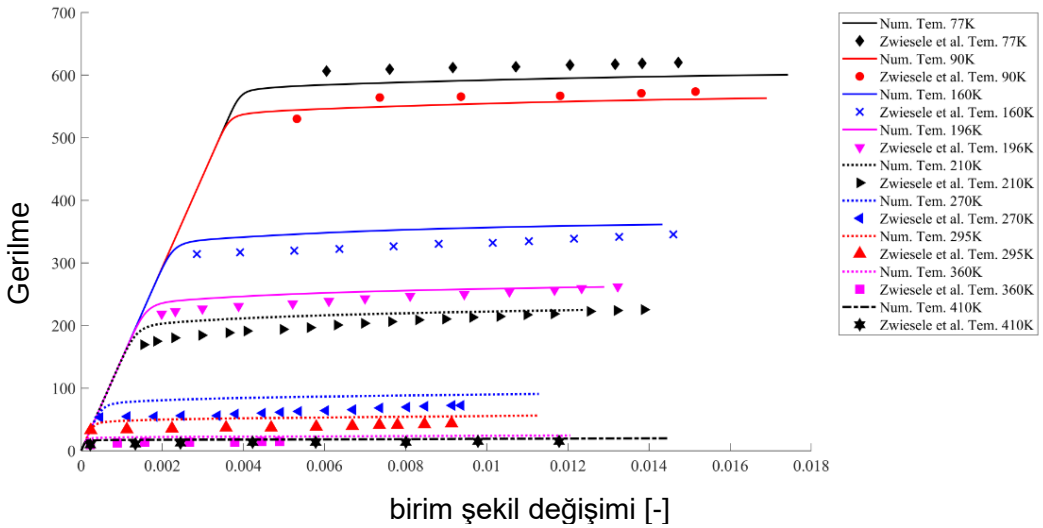
Ortam sıcaklığının etkisi

Kalibrasyon değişkenleri Tablo 2'de olarak sunulmaktadır. Şekil 4.36, çoklu eleman sıcaklık bağımlılığı doğru olarak modellenebilmektedir.



Şekil 4.36 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası sıcaklığa bağlı mekanik özellikler çok elemanlı simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Spitzig ve Keh, 1970).

Modeller arasında, çoklu eleman modelinden elde edilen sonuçlar nispeten daha kesindir. Çoklu eleman modelinde, sıcaklık bağlılığı daha tek eleman modelline göre daha doğrudur. Sınır şartlarının daha gerçeğe yakın olarak modellenmesi ile deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar bulunmuştur.



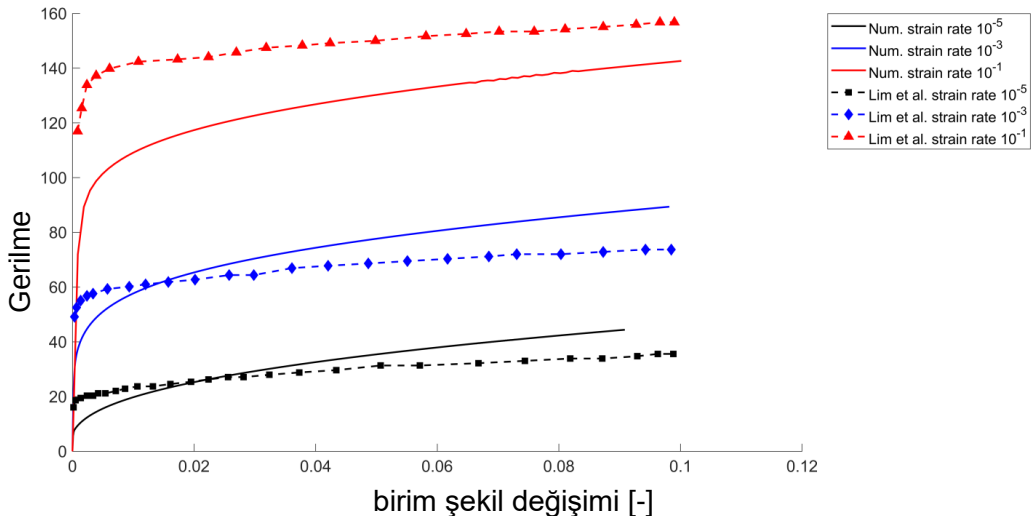
Şekil 4.37 alfa-Fe tek kristal çoklu eleman simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar (Spitzig ve Keh, 1970)

Şekil 4.37'de her iki simülasyonda da gerilme-birim şekil değişimi eğrileri arasındaki boşluk, sıcaklığın büyüklüğü arttıkça ve belirli bir değere ulaştıkça

sıcaklığın etkisinin azaldığını gösterir. Deneysel sonuçlar ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

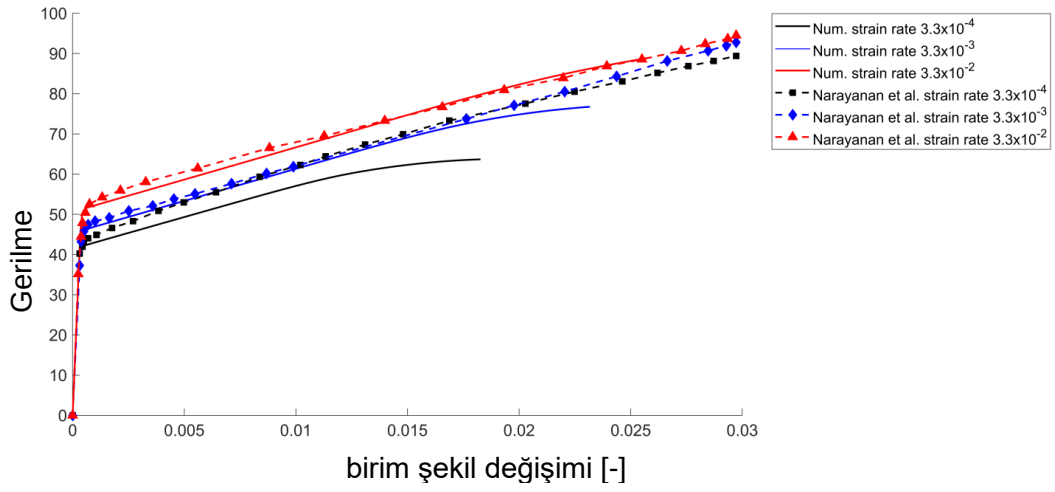
Birim şekil değişimi hızının etkisi

Kalibre edilen model sabitleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.38'de çok elemanlı simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar Lim vd. (2015) gösterilmiştir.



Şekil 4.38 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Lim vd., 2015).

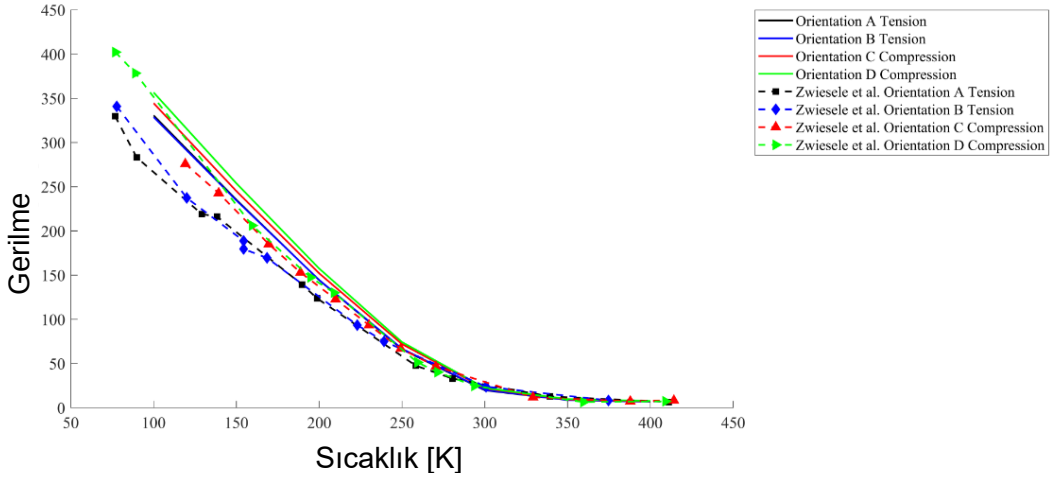
Benzer şekilde farklı literatürden deneysel verilere uygulanmıştır (Narayanan vd., 2014). Deneysel sonuçlar ile tutarlı bulunmuştur, Şekil 4.39.



Şekil 4.39 alfa-Fe tek kristal malzeme noktası birim şekil değişimi hızına bağlı mekanik özellikler simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlar (Narayanan vd., 2014).

Çekme-Basma Asimetrisi

Çekme basma asimetrisi simülasyon sonuçlar ve deneysel karşılaştırması çoklu eleman için Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Akma mukavemet kriteri 0.001 birim şekil değişimi değerinde hesaplanmıştır. Basma mukavemetinin sıcaklığa bağlı davranışı yakalanabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda bu asimetri deneysel olarak daha belirgin hale gelmektedir.



Şekil 4.40 alfa-Fe tek kristal sıcaklığa bağlı çekme ve basma akma mukavemeti, çok elemanlı simülasyondan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki deneysel sonuçların karşılaştırması (Zwiesele ve Diehl, 1979)

Tablo 4.7 Kalibre edilen model sabitleri

Sabit	ρ_0	a_1	a_2	a_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	Q_{Pei}	T	$\dot{\varepsilon}$	Tensile axis
Birim	m^{-2}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	J	K	s^{-1}	-
4.2.1.1 (Keh, 1965)	1×10^{10}	0	0.2	0	0.5	1	15	5×10^{-3}	10	8000	1	$0.7 \times 1.60 10^{-}$	298K	3.3×10^{-4}	[1 0 0]
4.2.1.1 (Spitzig ve Keh, 1970)	8×10^{10}	-0.15	0.02	0.1	0.2	5	11	2×10^{-2}	10	8000	1	$0.68 1.60 10^{-}$	143K, 195K, 250K, 295K	5.6×10^{-4}	$[-1\ 4\ 9]$

Sabit	ρ_0	a_1	a_2	a_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	Q_{Pei}	T	$\dot{\varepsilon}$	Tensile axis
4.2.1.1 (Zwiesele ve Diehl, 1979)	8×10^{10}	-0.13	0.02	0.08	0.7	10	20	2×10^{-2}	10	8000	1	0.67 1.60 10^{-}	77K, 90K, 160K, 196K, 210K, 270K, 295K, 360K, 410K	5.6×10^{-4}	$[-2663$ 4917 $8291]$
4.2.1.1 (Lim vd., 2015)	8×10^{10}	0.12	-0.1	0.17	0.005	20	20	1×10^{-3}	10	8000	1	0.7 1.60 10^{-}	300K	1×10^{-4}, 1×10^{-2}, 1 and 1×10^{2}	$[-1\ 4\ 9]$
4.2.1.1 (Narayanan, 2014)	8×10^{12}	-0.15	0.1	-0.2	0.55	25	155	3×10^{-2}	10	8000	1	0.65 1.60 10^{-}	300K	3.3×10^{-4}, 3.3×10^{-3} and 3.3×10^{-2}	$[1\ 0\ 0]$
4.2.1.1 (Lim vd., 2015)	4×10^{12}	0.2	0.1	0.2	0.5	15	12	0.1	10	8000	1	0.7 1.60 10^{-}	$[60K$ 320	1.7×10^{-4}	$[-1\ 4\ 9]$
4.2.1.1 (Zwiesele ve Diehl, 1979)	8×10^{10}	-0.13	0.02	0.08	0.7	10	17	2×10^{-2}	10	8000	1	0.67 1.60 10^{-}	$[50K$ 450	5.6×10^{-4}	$[-2825$ 5 $[-3094$ 4 $[-2665$ 4 $[-2776$ 4
4.2.1.2 (Keh, 1965)	1×10^{10}	0.18	-0.02	0.01	0.03	40	40	4.5×10^{-2}	10	1000	0.1	0.65 1.60 10^{-}	298K	3.3×10^{-4}	$[1\ 0\ 0]$
4.2.1.2 (Spitzig ve Keh, 1970)	8×10^{14}	0.2	0.01	-0.2	0.02	10	10	2×10^{-2}	10	8000	1	0.68 1.60 10^{-}	143K, 195K, 250K, 295K	5.6×10^{-4}	$[-1\ 4\ 9]$

Sabit	ρ_0	a_1	a_2	a_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	Q_{Pei}	T	$\dot{\varepsilon}$	Tensile axis
4.2.1.2 (Zwiesele ve Diehl, 1979)	8×10^{10}	0.001	0.13	0.2	0.01	95	12	0.1	10	8000	1	0.67 1.60 10^{-}	77K, 90K, 160K, 196K, 210K, 270K, 295K, 360K, 410K	5.6×10^{-4}	$[-2663\ 4917\ 8291]$
4.2.1.2 (Lim vd., 2015)	8×10^{10}	0.1	0.01	0.01	0.01	12	12	1×10^{-2}	10	8000	1	0.7 1.60 10^{-}	300K	1×10^{-4}, 1×10^{-2}, 1 and 1×10^{2}	$[-1\ 4\ 9]$
4.2.1.2 (Narayanan, 2014)	4×10^{14}	-0.15	0.1	-0.2	0.035	12	10	6.2×10^{-2}	10	8000	1	0.65 1.60 10^{-}	300K	3.3×10^{-4}, 3.3$\times10^{-3}$ and 3.3×10^{-2}	$[1\ 0\ 0]$
4.2.1.3 (Zwiesele ve Diehl, 1979)	1×10^{15}	0.2	0.2	0.00002	0.01	20	20	1×10^{-3}	100	8000	1	0.65 1.60 10^{-}	$[100K\ 42$	5.6×10^{-4}	$[-2825\ 5$ $[-3094\ 4$ $[-2665\ 4$ $[-2776\ 4$
4.2.1.3 (Spitzig ve Keh, 1970)	8×10^{14}	0.2	0.01	-0.1	0.02	10	8	5×10^{-2}	10	8000	1	0.68 1.60 10^{-}	143K, 195K, 250K, 295K	5.6×10^{-4}	$[-1\ 4\ 9]$
4.2.1.3 (Zwiesele ve Diehl, 1979)	8×10^{15}	-0.2	0.2	0.2	0.003	14	11	0.08	10	8000	1	0.72 1.60 10^{-}	77K, 90K, 160K, 196K, 210K, 270K, 295K, 360K, 410K	5.6×10^{-4}	$[-2663\ 4917\ 8291]$

Sabit	ρ_0	a_1	a_2	a_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	Q_{Pei}	T	$\dot{\varepsilon}$	Tensile axis
4.2.1.3 (Lim vd., 2015)	8×10^{10}	0.01	0.01	0.01	0.01	120000	26	1×10^{-2}	10	8000	1	0.72 1.60 10^{-}	300K	1×10^{-4}, 1×10^{-2} , 1	$[-1\ 4\ 9]$
4.2.1.3 (Narayanan, 2014)	1×10^{17}	0.05	0.01	0.02	0.0015	40	120	0.6	10	8000	0.01	0.7 1.60 10^{-}	300K	3.3×10^{-4}, 3.3×10^{-3} and 3.3×10^{-2}	$[1\ 0\ 0]$
4.2.1.3 (Zwiesele ve Diehl, 1979)	1×10^{15}	0.2	0.2	0.0002	0.01	20	20	1×10^{-3}	100	8000	1	0.65 1.60 10^{-}	$[100K$ 42	5.6×10^{-4}	$[-2825\ 5$ $[-3094\ 4$ $[-2665\ 4$ $[-2776\ 4$

4.2.2 RVE modeli

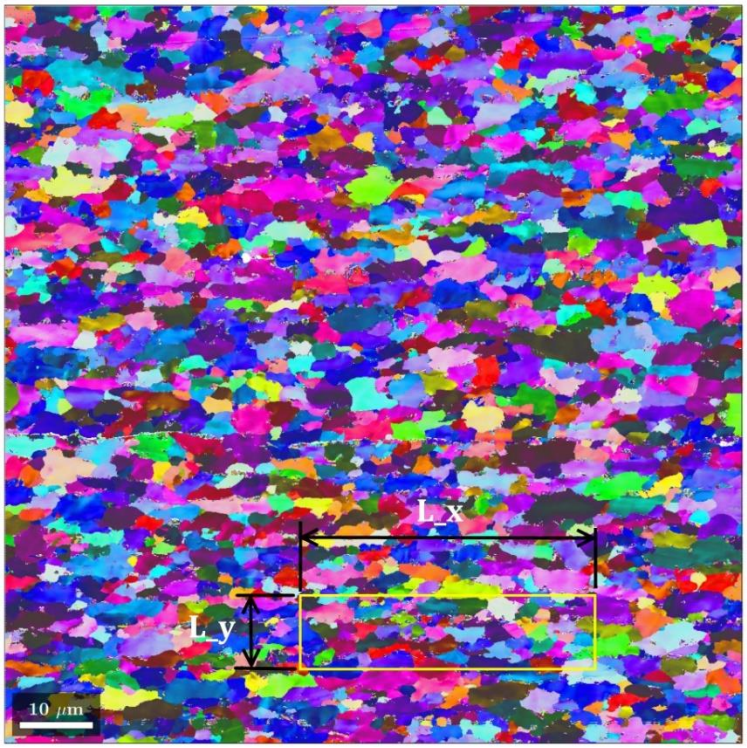
Sonlu eleman RVE yöntemi çok kristalli yapıların mekanik davranışını anlamak için çok önemlidir ve Taylor yöntemine göre oldukça daha hassas sonuçlar verir. Çünkü Taylor modeli birim şekil değişimi yani deformasyonların tanelere eşit olarak dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Ancak birim şekil değişimlerinin tane içlerinde de bir dağılıma sahip oldukları ve taneler arası mekanik denge denklemini sağlamak için gerekli oldukları bilinmektedir.

Çalışmamızda TOFAŞ firması tarafından önerilen çift fazlı DP600 çelik malzeme tipi modellenmektedir. Bu tür metalik saclar daha çok otomotiv endüstrisinde araçlarda hafif gövdeler ile birlikte yüksek mukavemet elde etmek için tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu çeliklerde martensit adaları, ferrit matrisindeki içinde adalar şeklindedir. Bu çelik grubu, hafif yapılar için çok ilgi çekicidir çünkü yüksek bir nihai mukavemeti yüksek bir kırılma gerilmesi ile mümkün kılmaktadırlar.

DP600 için elde edilen EBSD analizinde yeterli büyüklükte gösterimsel hacim elemanının (RVE) belirlenmesi gerekmektedir. Tüm RVE'nin kullanılması çok

yüksek hesaplama sürelerine sebep olmaktadır. Dolayısıyla RVE'nin EBSD haritalarından belirlemek için bi yöntem geliştirilmiştir. RVE'nin belirlenmesi için kullanılan terminoloji ve değişkenler aşağıda detaylandırılmıştır:

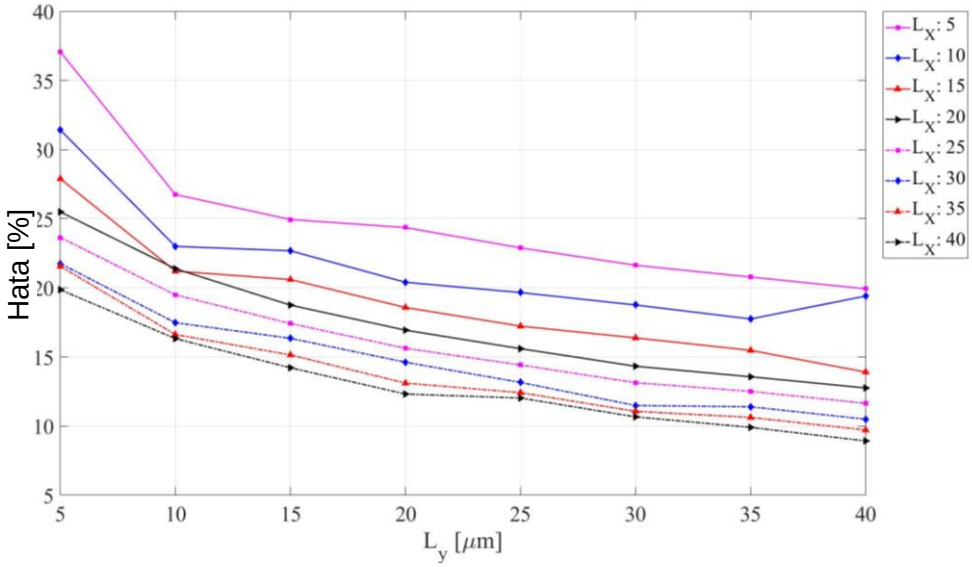
- L_x ve L_y, Şekil 4.41'de gösterildiği gibi ana EBSD grafiğindeki bölgeleri seçmek için kullanılan dikdörtgen kutunun ölçülerini ifade etmektedir.
- Bu rapordaki bölgenin koordinatı, seçim kutusunun sol alt köşesinin X ve Y ekseni boyunca orijinden uzaklığı olarak diğer değişkenleri gösterir.
- Hata değerleri, original (EBSD haritasının tamamından) durumdan olan sapma yüzdesi olarak ifade edilir.



Şekil 4.41 DP600 için elde edilmiş olan EBSD haritası ve içindeki herhangi bir bölgeden alınan RVE ölçüleri ve pozisyonu

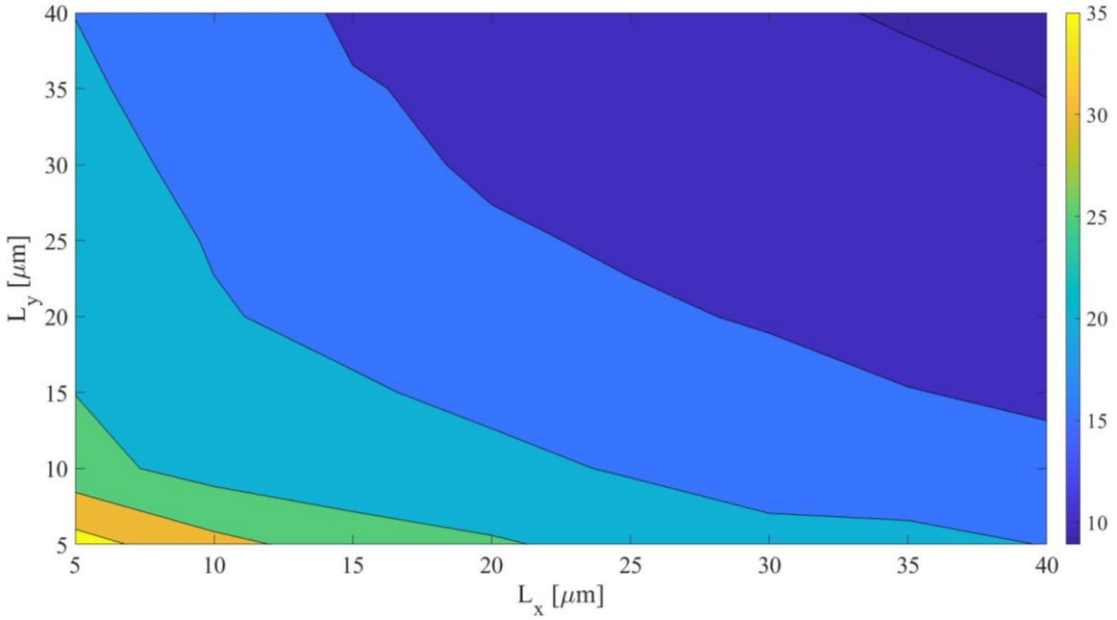
EBSD grafiği, üzerinde 2 μm'lik yatay ve dikey artışlarla dikdörtgen ve kare bölgeler seçilerek tarandı. Hatalar (sapmanın büyüklüğü) her kutu boyutu için kaydedildi ve raporlanır. Burada hata seçilen bölgenin orjinal bölgeye göre yönelim farklılığını gösteren ölçüttür. MTEX® yazılımı kullanılrak hesaplanmıştır. Kapsamlı sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

Hata sonuçları, Şekil 4.42'de gösterildiği gibi seçilen bölgenin boyutuna göre gösterilmiştir. 20µm sınır değerini geçtikten sonra bölge uzunluğunun etkisinin azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.42 Yönelim ölçümündeki hata ve seçilen bölgenin genişliği, L_y

Ayrıca L_y'nin artışının L_x'e göre biraz daha etkili olduğu fark edilebilir, örneğin bölgenin boyutlaru 25 µm x 15 µm olduğunda hata %17,42 iken bölge ölçüleri 15 µm x 25 µm olduğunda hata miktarı %17.23'e ulaşır. Bu durum Şekil 4.43'de gösterilmiştir.

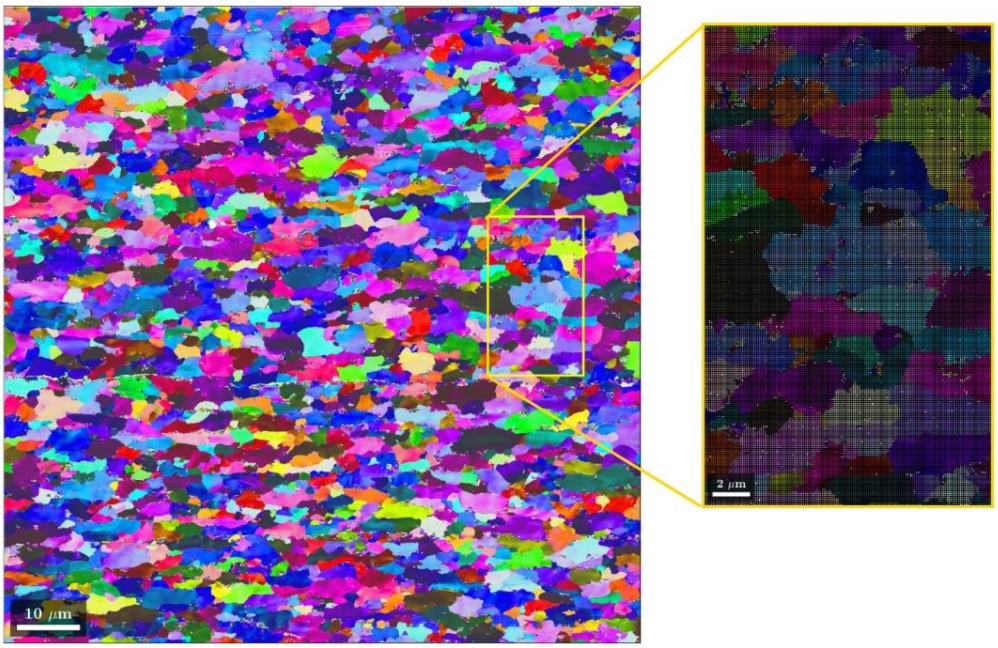


Şekil 4.43 Lx ve Ly değerlerine göre sapma miktarı

Yönelim ölçümlerindeki hata veya sapma miktarları tüm durumlar için araştırılmıştır. Analizelre göre, Tablo 4.8'de gösterilen bölge boyutlarının ve poziyonunun kullanılması kararlaştırılmıştır. Seçilen bu bölge Şekil 4.44'de gösterilmiştir.

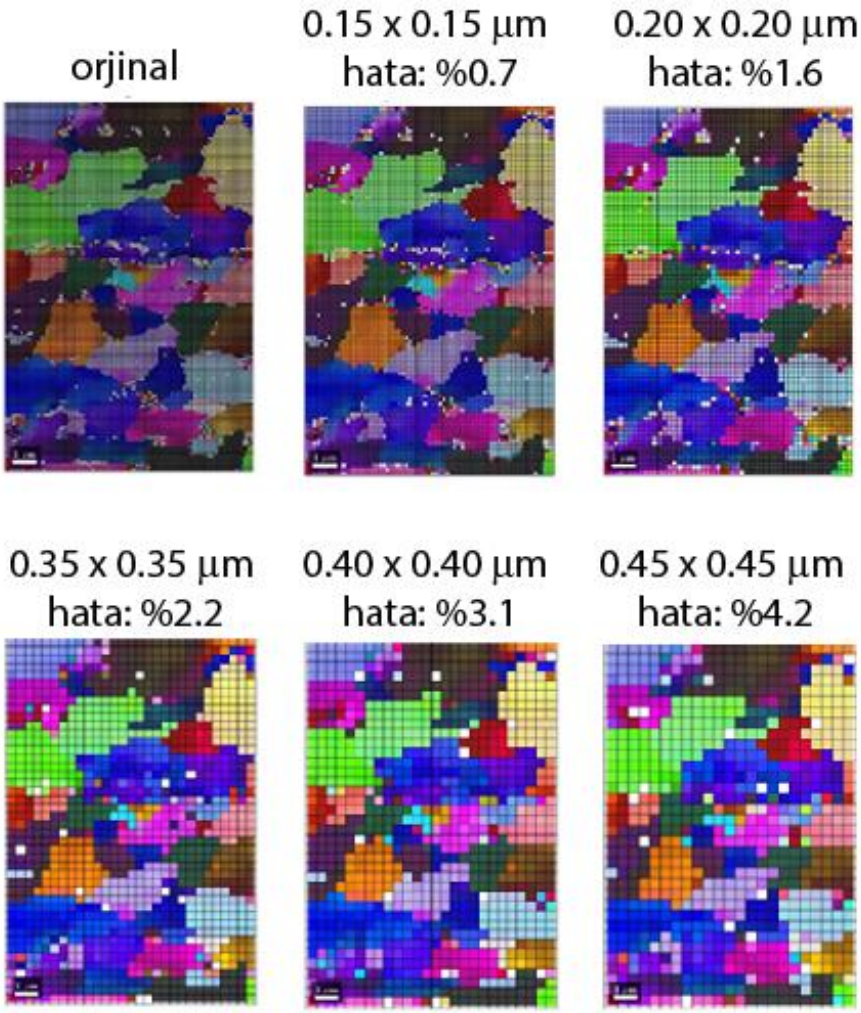
Tablo 4.8 Seçilen bölge boyutları ve koordinatları

$L_x\ \mu m$	$L_y\ \mu m$	Adım μm	Hata	Koordinat
15	25	2	% 17.23	[76 42]



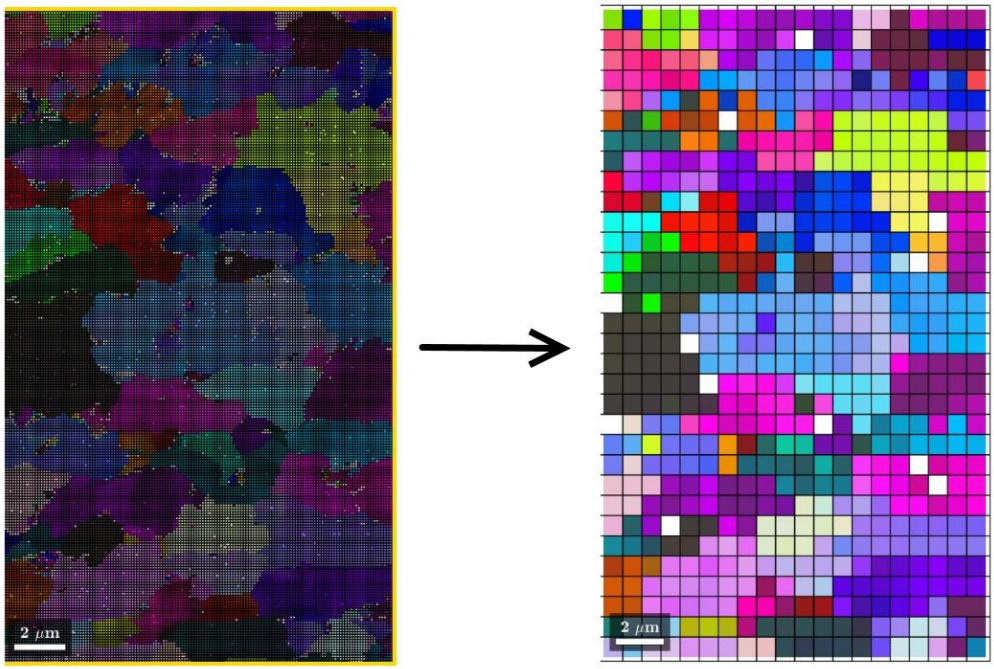
Şekil 4.44 Seçilen bölge boyutları ve pozisyonu

Bölgelerin kare şekilde sonlu eleman ağına bölünmesi gerektiğinden ve hesaplama süresi ve doğruluğu açısından eleman boyutu çok önemlidir. Dolayısıyla, bu seçilen bölgenin ve çözünürlüğünün mikro yapı sadeleştirmesinde sonucunda oluşan hatayı ne kadar etkileyeceğini kontrol etmek için çeşitli farklı boyutlar kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



Şekil 4.45 Farklı çözünürlükte RVE tanımları – aynı mikroyapı için

Orijinal durum ile 0.8 µm x 0.8 µm çözünürlükte çizim arasındaki hata %3,67'dir. Bu, orijinal moddan 8 kat kadar sonlu eleman ağının çözünürlüğünün azaltılması kabul edilebilir bir aralıkta hata değeri ile sonuçlanması anlamına gelir. Bu nedenle, Şekil 4.46'da gösterilen 0.8 µm x 0.8 µm gibi kaba bir ağın kullanılabileceği görülmektedir.



Şekil 4.46 Orjinal ağ ve düğüm sayısı azaltımış sonlu eleman ağları

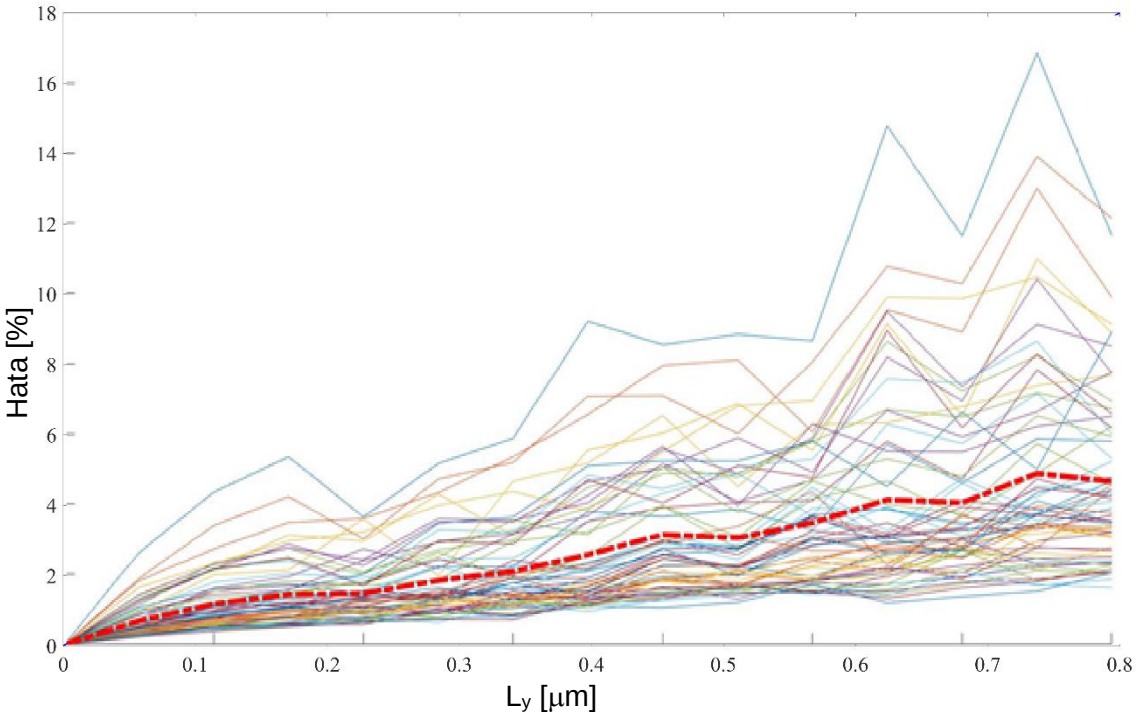
Ortalama hata, Tablo 4.9'de gösterien 64 farklı durumun tümü için hesaplandı.

Tablo 4.9 Farklı Lx ve Ly değerleri için orjinal yönelim ölçümlerden olan fark (hata)

Durum	$L_x\ \mu m$	$L_y\ \mu m$	Adım μm	Hata	Koordinat
1	5	5	2	0.3707	[58 38]
2	5	10	2	0.2675	[58 32]
3	5	15	2	0.2494	[58 30]
4	5	20	2	0.2436	[58 22]
5	5	25	2	0.2289	[58 20]
6	5	30	2	0.2163	[58 14]
7	5	35	2	0.2078	[58 10]
8	5	40	2	0.1993	[58 2]
9	10	5	2	0.3142	[46 14]
10	10	10	2	0.2300	[54 32]
11	10	15	2	0.2268	[54 32]
12	10	20	2	0.2040	[78 42]
13	10	25	2	0.1966	[14 12]
14	10	30	2	0.1876	[14 8]
15	10	35	2	0.1775	[54 10]
16	10	40	2	0.1941	[28 0]
17	15	5	2	0.2789	[44 16]
18	15	10	2	0.2121	[50 32]
19	15	15	2	0.2060	[50 32]
20	15	20	2	0.1858	[76 42]
21	15	25	2	0.1723	[76 42]
22	15	30	2	0.1638	[30 2]
23	15	35	2	0.1548	[76 32]
24	15	40	2	0.1391	[12 14]
25	20	5	2	0.2549	[38 14]

26	20	10	2	0.2138	[44 32]
27	20	15	2	0.1875	[32 12]
28	20	20	2	0.1694	[30 8]
29	20	25	2	0.1560	[50 70]
30	20	30	2	0.1433	[50 66]
31	20	35	2	0.1357	[14 20]
32	20	40	2	0.1276	[14 16]
33	25	5	2	0.2364	[38 14]
34	25	10	2	0.1949	[20 16]
35	25	15	2	0.1742	[28 14]
36	25	20	2	0.1563	[24 6]
37	25	25	2	0.1442	[28 2]
38	25	30	2	0.1314	[46 66]
39	25	35	2	0.1251	[14 20]
40	25	40	2	0.1165	[14 14]
41	30	5	2	0.217511	[36 14]
42	30	10	2	0.174886	[20 16]
43	30	15	2	0.163509	[12 18]
44	30	20	2	0.146248	[20 8]
45	30	25	2	0.131669	[40 70]
46	30	30	2	0.114931	[40 66]
47	30	35	2	0.114045	[12 20]
48	30	40	2	0.105008	[14 18]
49	35	5	2	0.2156	[32 14]
50	35	10	2	0.1662	[18 18]
51	35	15	2	0.1515	[8 18]
52	35	20	2	0.1311	[26 34]
53	35	25	2	0.1242	[38 70]
54	35	30	2	0.1107	[38 66]
55	35	35	2	0.1063	[14 20]
56	35	40	2	0.0972	[14 18]
57	40	5	2	0.1986	[30 24]
58	40	10	2	0.1633	[40 10]
59	40	15	2	0.1422	[0 20]
60	40	20	2	0.1232	[22 34]
61	40	25	2	0.1203	[26 2]
62	40	30	2	0.1067	[34 66]
63	40	35	2	0.0991	[12 20]
64	40	40	2	0.0893	[14 32]

Bulunan hata değerleri Şekil 4.47'de gösterilmektedir. Ortalama hata, 64 durumun tümü için hesaplanır ve ardından Şekil 9'da koyu kırmızı çizgide gösterildiği gibi çizilir. Grafikten de anlaşılacağı gibi, çözünürlük azaldıkça ortalama grafiğin eğimi azalır, böylece 0.5 μm değerini aştığında eğri %2 ile %4 arasında bir değere yakınsar.



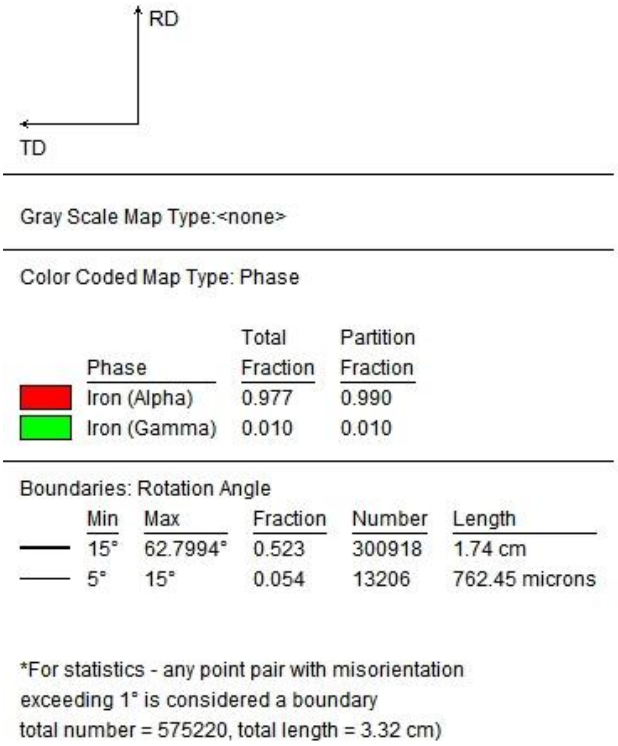
Şekil 4.47 Farklı boyutlar için bulunan hata değerlerinin dağılımı

Simülasyonda aşağıdaki bölge boyutları kullanılacaktır. Yukarıda gerçekleştirilen ve rapor edilen hata analizine göre 25 um x 25 um boyutundaki bir bölge, taranan alanın tamamını uygun şekilde temsil etmektedir, Tablo 4.10.

Tablo 4.10 Minimum hata miktarları ve analiz edilen çeşitli farklı boyutlardaki bölgeler

No	$L_x\ \mu m$	$L_y\ \mu m$	Adım miktrarı μm	Minimum Hata	Koordinat
1	25	5	2	0.2364	[38 14]
2	25	10	2	0.1949	[20 16]
3	25	15	2	0.1742	[28 14]
4	25	20	2	0.1563	[24 6]
5	25	25	2	0.1442	[28 2]
6	25	30	2	0.1314	[46 66]
7	25	35	2	0.1251	[14 20]
8	25	40	2	0.1165	[14 14]

Ağ ölçülerinin belirlenmesi söz konusu olduğunda, Martensit-Ferrit orantılı boyutlarını deneysel ölçümler ile tutarlı olması beklenmektedir. Bu amaçla, Martensit fazının tüm numune malzemeye olan başlangıç hacim oranı güvenilir bir kriter olabilir. Taranan numunede, Martensit fazı numunenin yaklaşık %1 hacimsel fraksiyonuna sahiptir. Şekil 4.48'te, Martensit fazının Gamma-Fe olarak gösterildiği fazlar hacim fraksiyonu için deneysel EBSD sonuç analizi sunulmaktadır.



Şekil 4.48 Numunenin tamamından alınınan EBSD verileri ile elde edilen faz değerleri

Eleman boyutunu seçerken, seçimlerin doğruluğundan emin olmak için Martensit tanelerinin sayısını toplam tane sayısına orantılı olarak alındı, Tablo 4.11. Tüm durumlarda bölge 25 µm x 25 µm'dir. Hesaplamalara göre aşağıdaki boyutlar seçilir:

<u>Eleman ölçüleri: 0.247 µm by 0.247 µm</u>

Eleman sayısı: n=25/0.25=100 , m=25/0.247=101 → N=m×n=10100

Martensit eleman sayısı: 153

Martensit hacim oranı: vf%=153/10100=1.51%

<u>Eleman ölçüleri: 0.373 µm by 0.373 µm</u>

Eleman sayısı: n=m=25/0.373=67 → N=m×n=4489

Martensit eleman sayısı: 83

Martensit hacim oranı: vf%=83/4489=1.84%

<u>Eleman ölçüleri: 0.49 µm by 0.49 µm</u>

Eleman sayısı: n=m=25/0.49=51 → N=m×n=2601

Martensit eleman sayısı: 49

Martensit hacim oranı: vf%=49/2601=1.88%

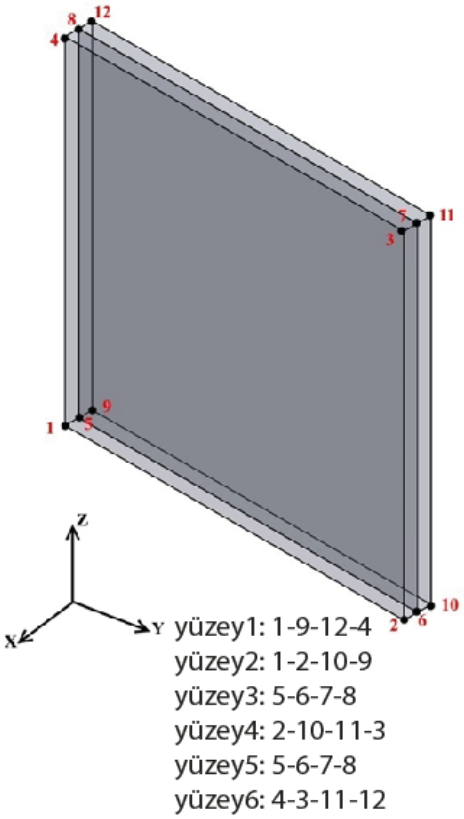
Tablo 4.11 Seçilen çözünürlüğe göre hata miktarları

Ağ Ölçüleri	0.1 μm by 0.1 μm ağ ölçülerine göre % Hata Miktarı
0.1 μm x 0.1 μm	0
0.25 μm x 0.247 μm	0.7820
0.373 μm x 0.373 μm	1.5944
0.49 μm x 0.49 μm	1.9571
1.0 μm x 1.0 μm	3.9242
2.5 μm x 2.5 μm	10.8528

Tüm eleman boyutlarında açıkça görüldüğü gibi, Martensit hacim oranı %1.4 olan orijinal duruma yakındır.

Martesit fazının modellenmes için iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi J2-eş-yönelimli yöntem diğeri ise yine fizik temelli kristal plastisite modelleridir. Bu iki modelin model sabitleri ferrit fazından farklıdır.

Simülasyonlar üç farklı yük durumu için yapılmıştır: çekme, basma ve kesme yük durumları. Bu sınır şartları Şekil 4.49'da gösterilmiştir.



Şekil 4.49 Sınır şartları için nod ve yüzey numaralandırılması

Çekme sınır şartları:

- yüzey1 üzerindeki düğümler Y ekseni boyunca sabitlenir.
- yüzey2'deki düğümler Z ekseni boyunca sabitlenir.
- yüzey3'teki düğümler X ekseni boyunca sabitlenir.
- +Y ekseni boyunca yüzey4 üzerindeki düğümlere belirli birim şekil değişimi hızı ile yer değiştirme uygulanır.

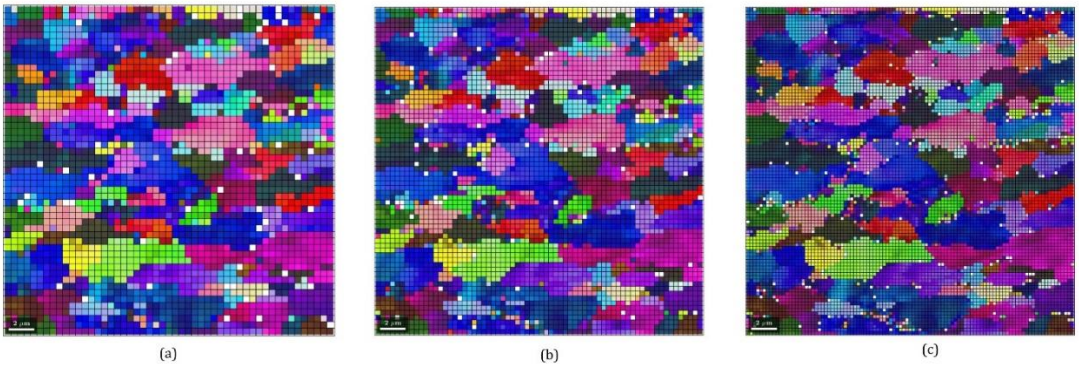
Basma yükü sınır şartları:

- yüzey1 üzerindeki düğümler Y ekseni boyunca sabitlenir.
- yüzey2'deki düğümler Z ekseni boyunca sabitlenir
- yüzey3'teki düğümler X ekseni boyunca sabitlenir
- -Y boyunca yüzey4 üzerindeki düğümlere belirli birim şekil değişimi hızı ile yer değiştirme uygulanır.

Kesme yükü sınır şartları:

- yüzey2 üzerindeki düğüm yer değiştirmeleri Y, X ve Z eksenleri boyunca sabitlenir
- +Y ekseni boyunca yüzey6 üzerindeki düğümlere belirli birim şekil değişimi hızı ile yer değiştirme uygulanır.

Aşağıda, modellerin sonlu eleman çözünürlük düzeyine göre oryantasyon dağılımı gösterilmektedir. Deneysel verilerden çıkarılır ve şekildeki her hücre bir sonlu elemanı ifade etmektedi, Şekil 4.50.



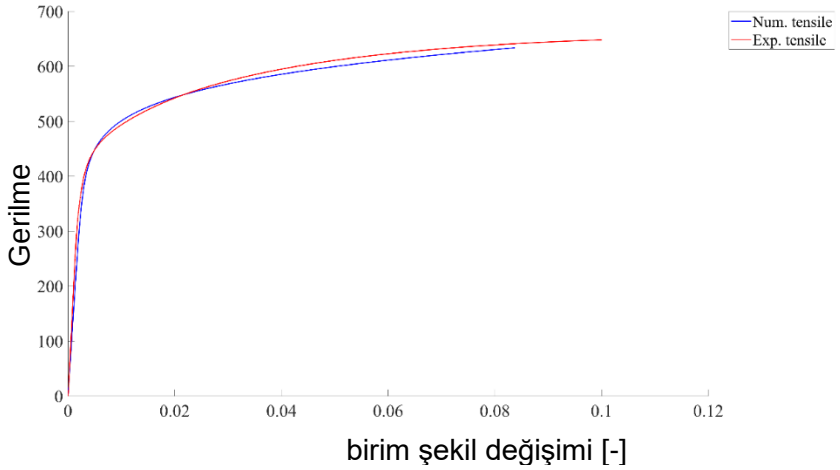
Şekil 4.50 FEM modellerinde oryantasyon dağılımı; (a) 0.5 um x 0.5 um eleman boyutu; (b) 0.375 um x 0.375 um eleman boyutu; (c) 0.25 um x 0.25 µm sonlu eleman boyutu

Çekme deneysel davranışı kullanılarak kalibrasyon yapılıdı ve deneysel sonuçları yakalamak için aşağıdaki parametreler kullanılır, Tablo 4.12.

Tablo 4.12 Model sabitleri

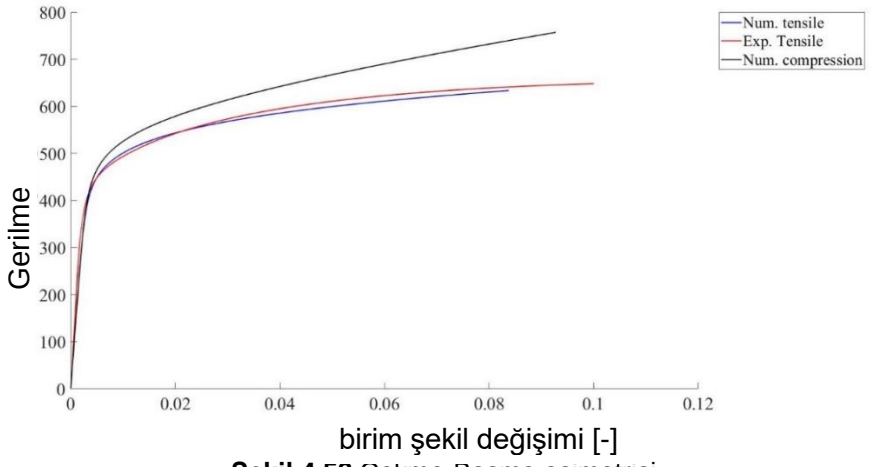
Parametre	Q_{Pei}	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Değer	1.4418×10^{-19}	0.2	7	10	0.02	10
Parametre	c_6	c_7	c_8	a_1	a_2	a_3
Değer	1000	0.1	0.08	0.1	-0.02	0.1

Modellerden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri aşağıda gösterilmiştir.



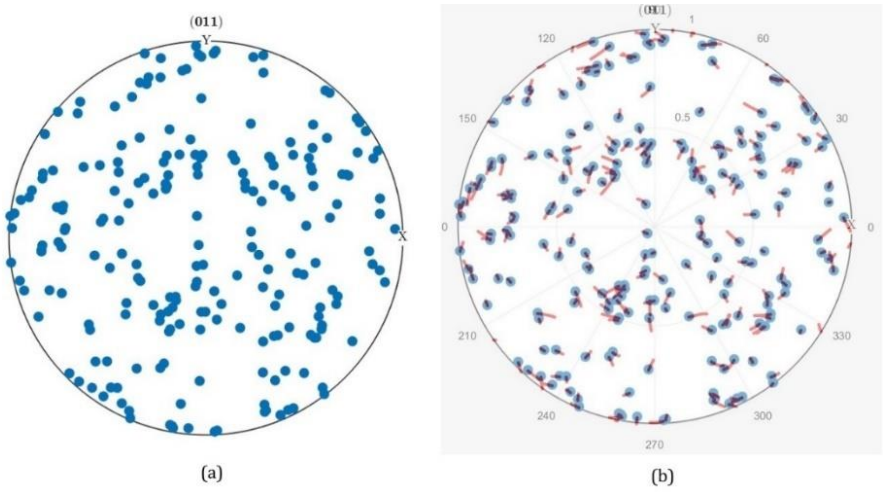
Şekil 4.51 0.5 µm x 0.5 µm eleman boyutu için çekme durumunun deneysel ve numerik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi

Aynı model sabitlerini kullanarak yapılan basma simülasyon sonucu, modelin çekme-sıkıştırma sertleştirme davranışının asimetri olduğunu gösterir.



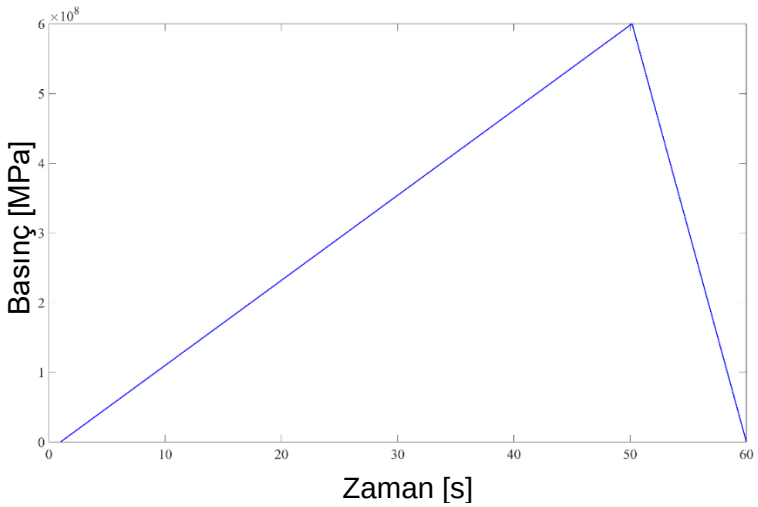
Şekil 4.52 Çekme-Basma asimetrisi

tanelerin yönelimindeki değişiklikleri izlemek için sonlu eleman sonuçları analiz edilmiştir. Şekil 4.53'te kutup şekli üzerinde bir yönelimların yönelim izleme sonucu gösterilmektedir.



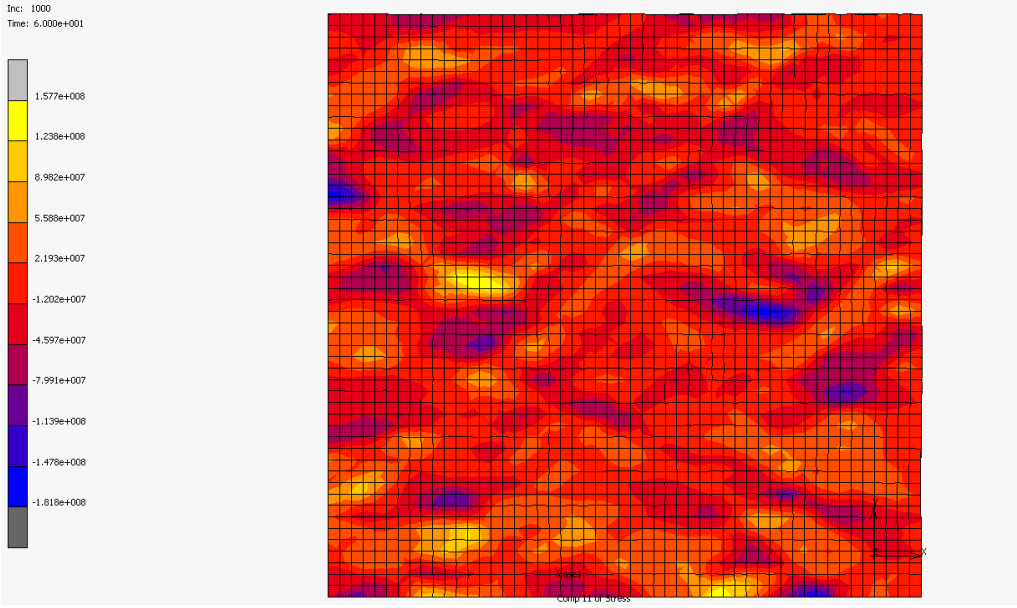
Şekil 4.53 <110> Kutup şekilleri (a) şekil değiştirme öncesi, (b) şekil değiştirme sonrası

Simülasyon durumlarının tamamında; çekme, basma ve kesme, kalıntı gerilme dağılımı incelenir. Bu amaçla, yük durumunda, basınç sınır koşulu, yükleme ve boşaltma koşullarına benzer şekilde, maksimum bir değere ulaşacak ve ardından sıfıra düşecek şekilde tanımlanır. Aşağıda kalıntı gerilme analizinde kullanılan yükleme-boşaltma grafiği gösterilmektedir. Bu yük durumu sonrası oluşan kalıntı gerilmeler incelendi.

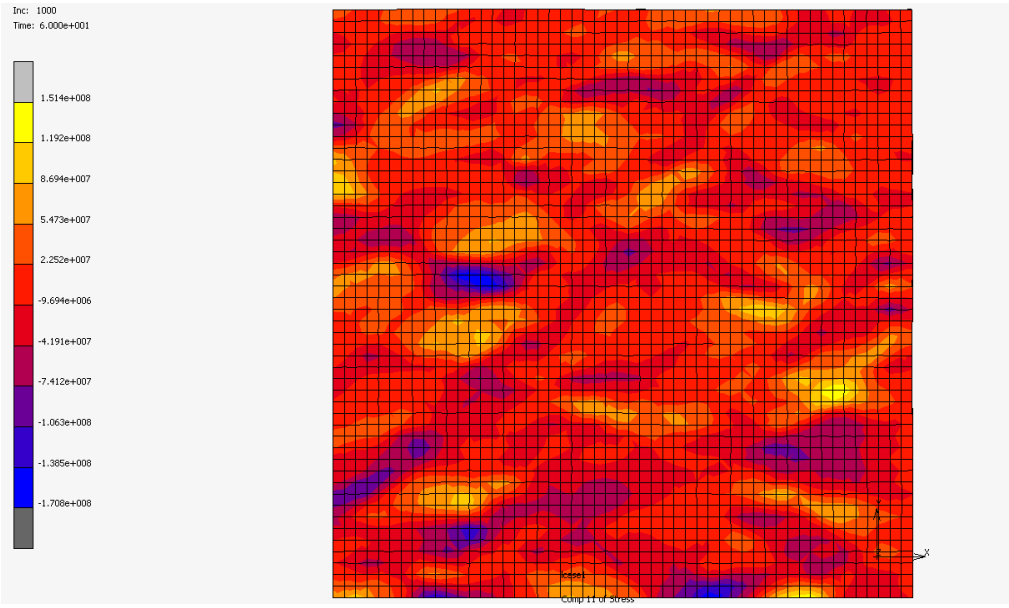


Şekil 4.54 Yükleme-boşaltma çevrimi şeklinde sınır koşulu olarak uygulanan basınç yükünün zamana bağlı değişimi

Yükleme durumlarının gerilme dağılımları Şekil 4.55-57'de farklı yük durumları için gösterilmiştir.

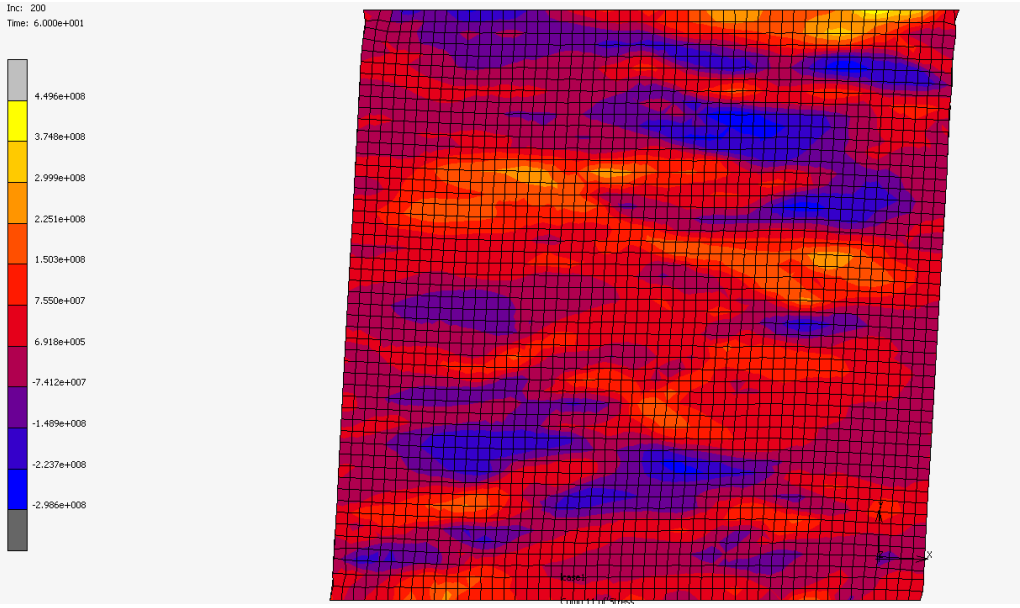


Şekil 4.55 Çekme yükü sonrası oluşan kalıntı gerilmeler – S11



Şekil 4.56 Basma yükü sonrası oluşan kalıntı gerilmeler – S11

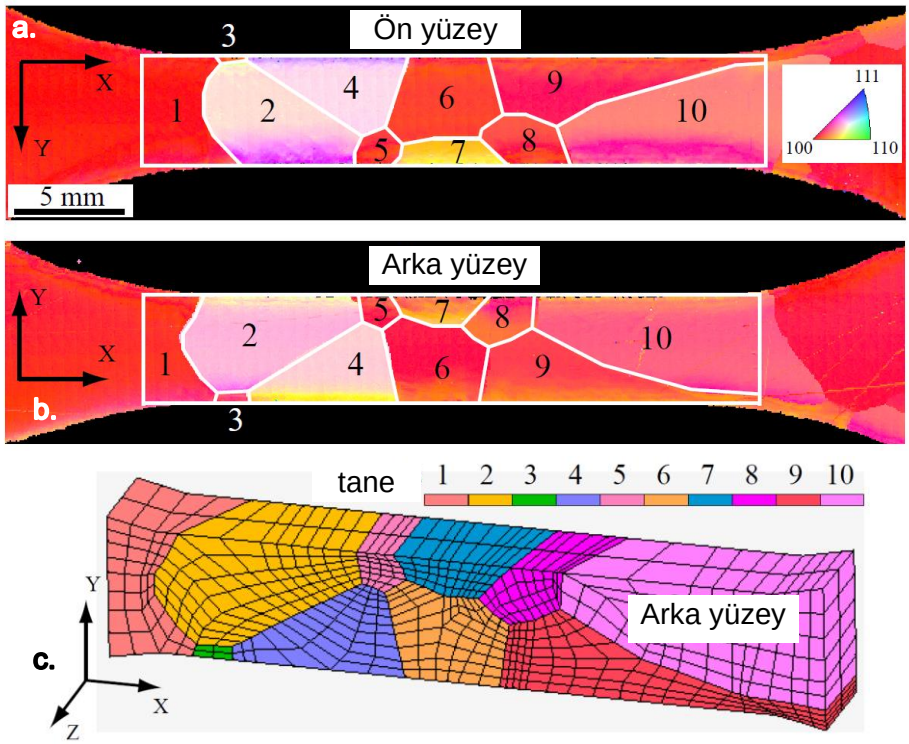
Çekme ve basma yük durumları sonrasında oluşan kalıntı gerilmeler birbirlerine oldukça benzemektedir. Ortalama olarak değerler “0”’a yakındır. Her iki durumda da seçilen yönelimlar ve bölge için en yüksek basma kalıntı gerilme değeri en yüksek çekme yükü değerinden yüksektir.



Şekil 4.57 Kesme yükü sonrası oluşan kalıntı gerilmeler – S11

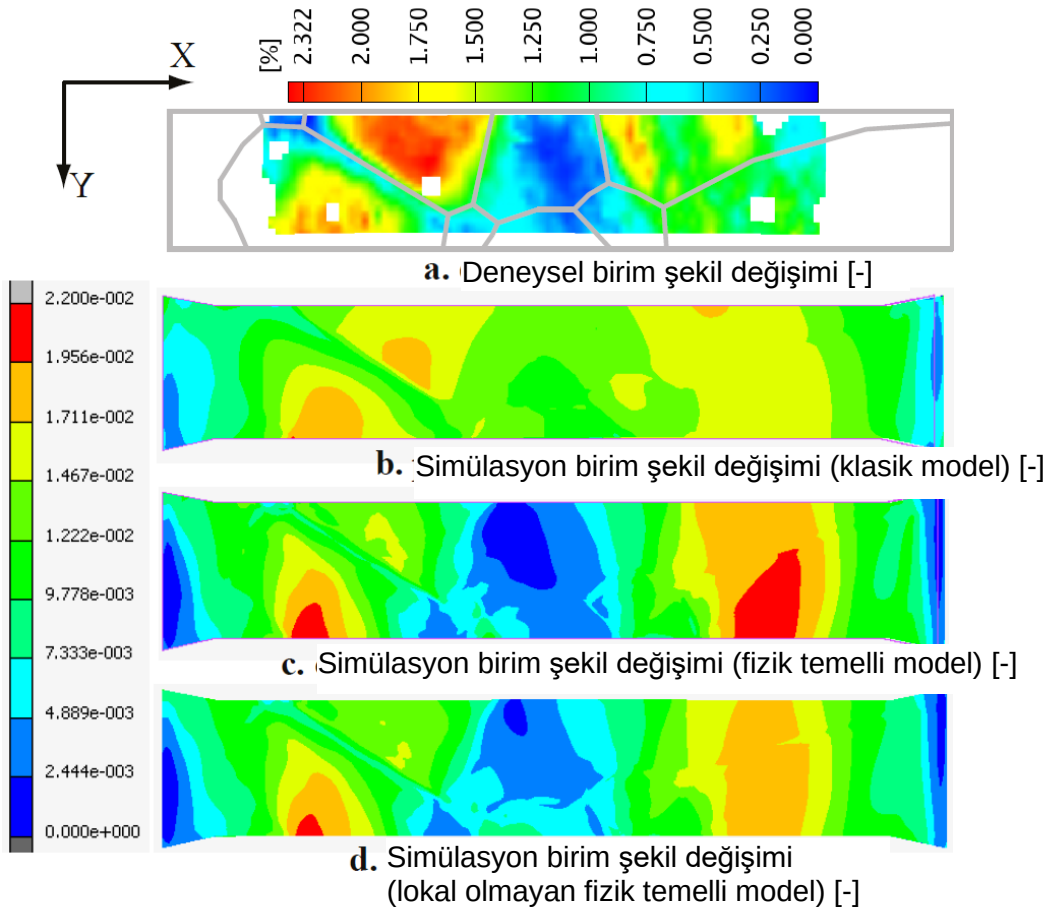
4.2.3 Lokal olmayan model

Lokal olmayan yöntem alüminyum çok kristal malzemeye uygulanarak kristallerin deformasyonu modellendi. Şekil 4'te EBSD haritaları (a-b) ve bu haritaları kullanarak oluşturulan taslak model (c) gösterilmektedir.



Şekil 4.58 a. EBSD haritası ön yüzey, **b.** EBSD haritası arka yüzey ve **c.** oluşturulan taslak sonlu eleman modeli

Model sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılarak birim şekil değişimi dağılımları bulundu. Geliştirilen model lokal model sonuçları ile de karşılaştırılarak tane sınırlarının etkileri bulundu, Şekil 4.59.



Şekil 4.59 Farklı modelleme yaklaşımları ve DIC yöntemi ile elde edilen birim şekil değişimi dağılımları

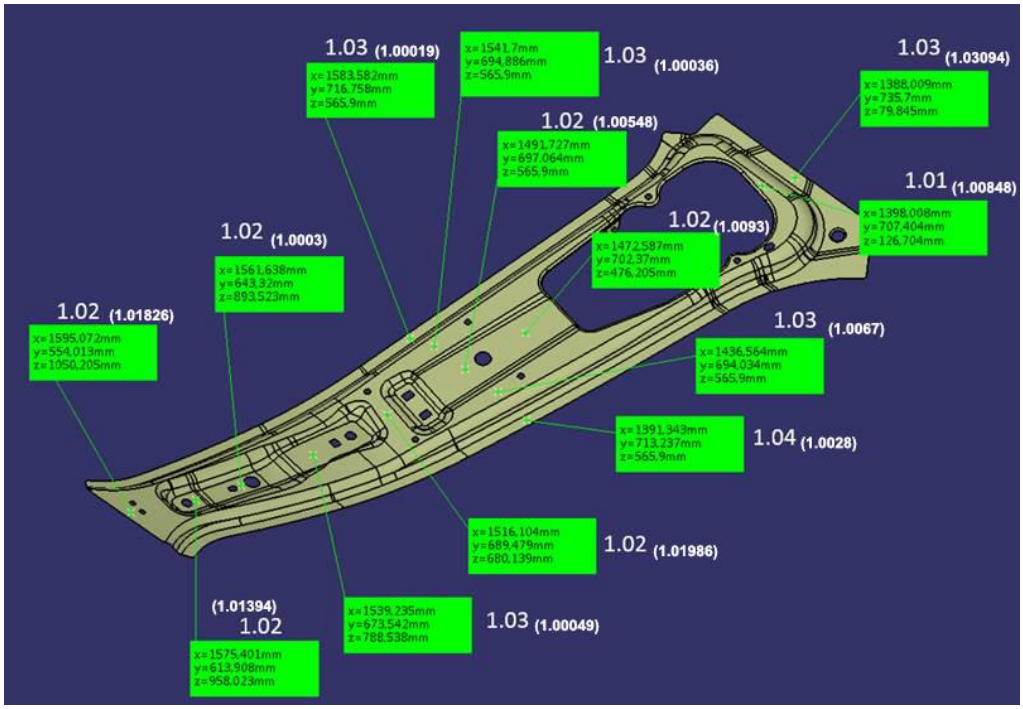
Otomotiv firmasının ihtiyaçları doğrultusunda belirlediği DP600 malzeme tipi lokal olmayan yöntemin uygulamaları açısından büyük zorluk içermemektedir. Hesaplama sürelerindeki sınırlama nedeniyle üç numaralı lokal olmayan RVE modelin uygulanması uygun olmamaktadır. Dolayısıyla metal şekillendirme simülasyonlarında lokal modeller ile elde edilen sonuçlar kullanılacaktır. Bu çalışmanın önemli bir sonuçlarından bir tanesi budur.

Bu işlerin yerine DP600 malzeme içinde bulunan martensit fazının modellenmesi için isotropic J2 plastisite modelinin dahil edilmesi gerekli olmuştur. Izotropik plastisite modeli de geliştirilmiş olup malzeme içindeki martensit fazının modellenmesi daha az hesaplama yükü ile mümkün olmuştur.

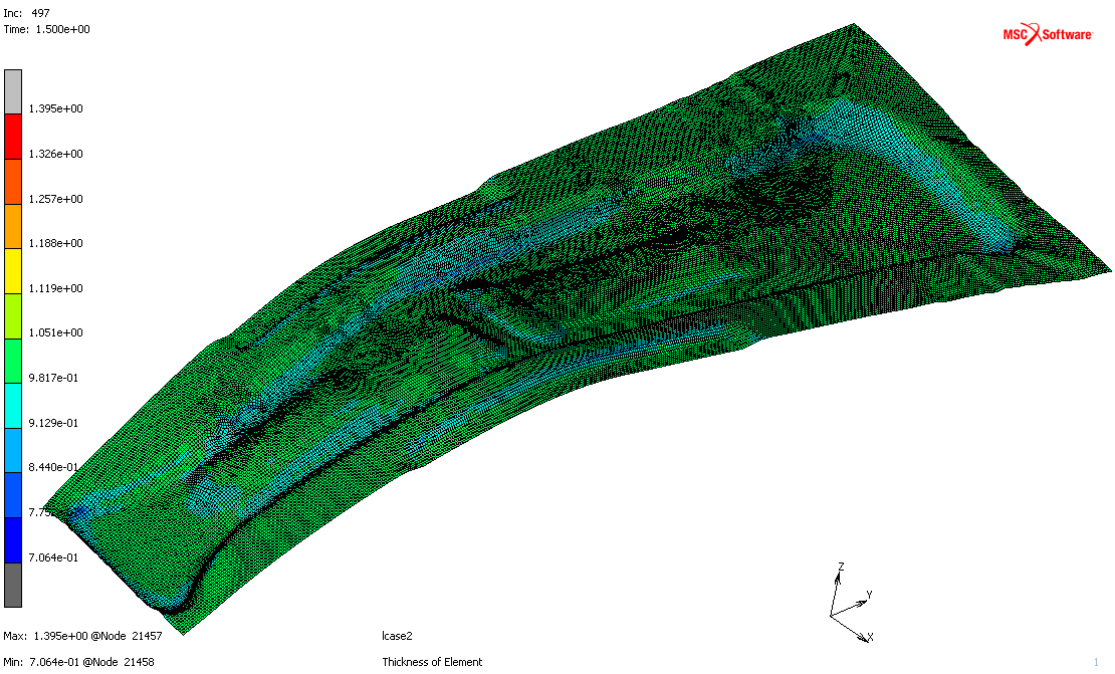
4.2.4 Metal şekillendirme simülasyonları

4.2.4.1 Eş-yönelim simülasyonları

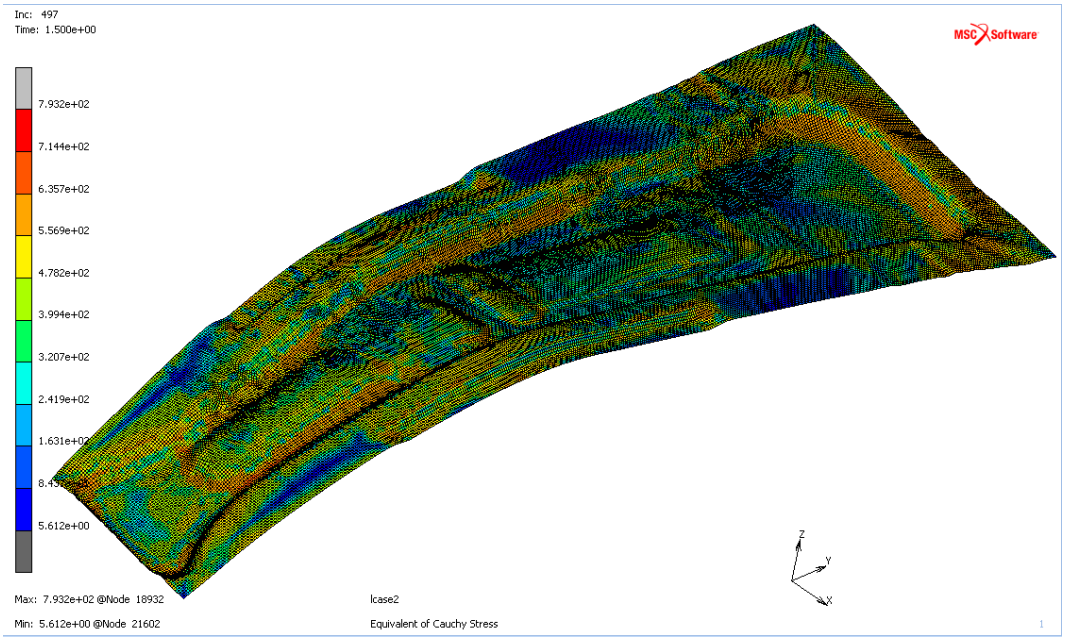
Geliştirilen modelden tahmin edilen çıktılar, eşdeğer gerilme, eşdeğer gerilme, Cauchy gerilme tensörü, elementlerin kalınlığı, ana ve küçük mühendislik gerilmeleri ve şekillendirme limit parametrelerini içerir. Bunlardan, deforme olmuş levhanın kalınlığı (bazı belirli noktalarda) deneysel verilerle karşılaştırıldı ve ayrıca Şekil 4.60'da gösterildi. Tahmini değerlerin, genel olarak 1.82'lik bir sapma ile deneysel değerlere çok yakın olduğu bulundu. Modelin geçerliliğini onaylar ve bu nedenle, öngörülen diğer çıktı parametrelerine güvenilebilir ve daha fazla analiz uygulama için kullanılabilir. Bununla birlikte, daha emin olmak için, geliştirilen model aynı zamanda malzemenin (örneğin, DP600) metal şekillendirme limitinin (LDR) tahmin ederek standart hızlı silindir kap çekme testi için de incelenmiştir. LDR, silindir kap çekme testindeki biçimlenebilirliğin bir ölçüsüdür ve güvenle zımba çapına çekilebilecek maksimum boşluk çapının oranı olarak tanımlanır. DP600'ün tahmini LDR'sinin 2.2 olduğu ve önceki bir araştırmacı tarafından bildirilen deneysel değer ile tam olarak eşleştiği 2.2 olarak bulundu. Bu arada, Şekiller 4.60-63, son artan adımda deforme olmuş tabakadaki kalınlık, eşdeğer Cauchy gerilmei ve eşdeğer plastik gerginlik dağılım grafiğini göstermektedir.



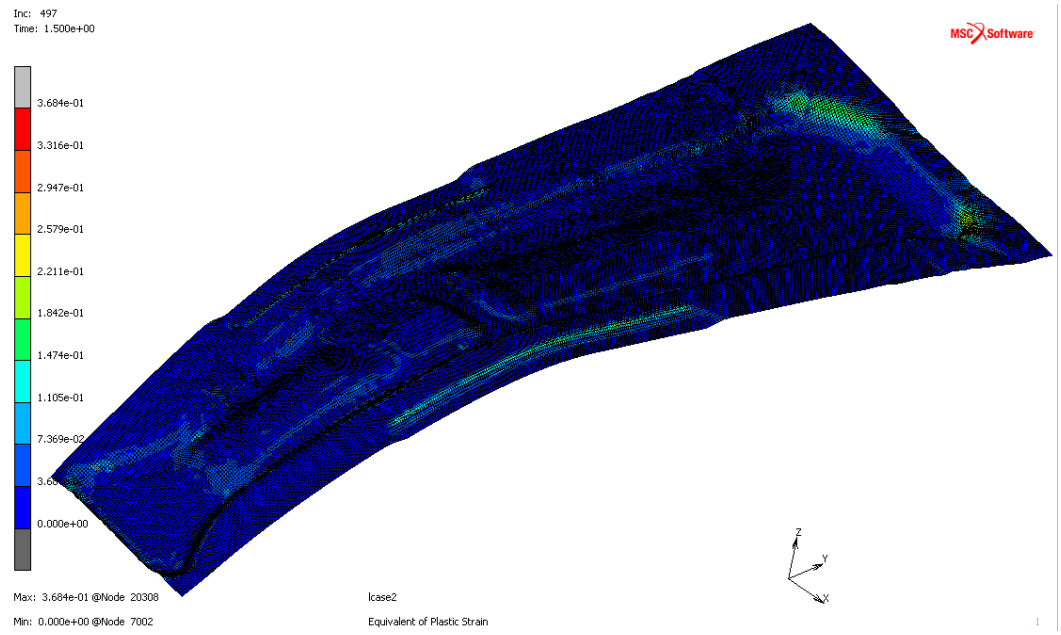
Şekil 4.60 Öngörülen kalınlığın belirli noktalardaki deneysel değerlerle karşılaştırılması (Not: Parantez içindeki ve dışındaki değerler sırasıyla hesaplanan ve deneysel verileri temsil eder).



Şekil 4.61 Son artan adımda deforme olmuş levhadaki kalınlık değişiminin dağılımı



Şekil 4.62 Eşdeğer Cauchy gerilme dağılımı (deformasyon son adımındaki)

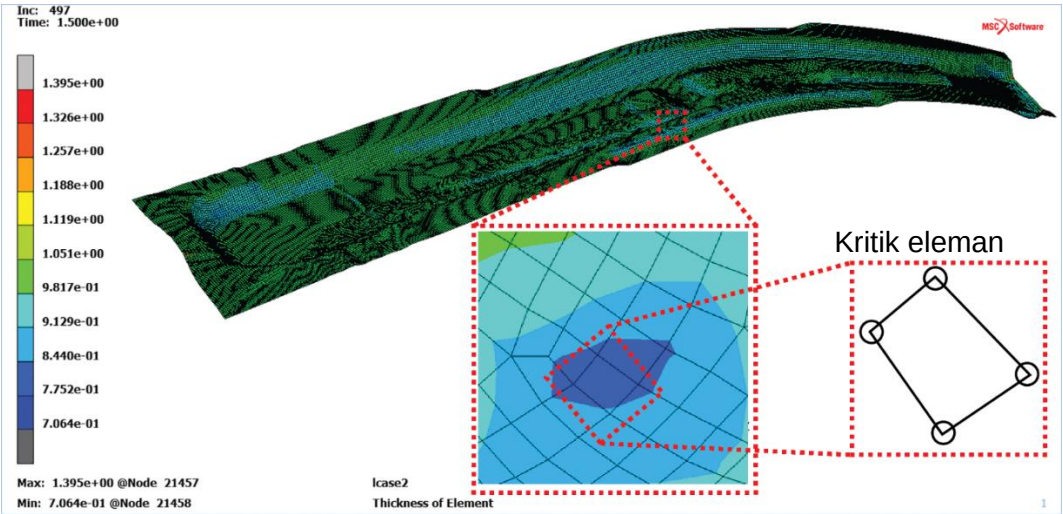


Şekil 4.63 Son artan adımda deforme olmuş tabakadaki eşdeğerinin plastik birim şekil değişimiin dağılımı

4.2.4.2 Taylor yöntemi

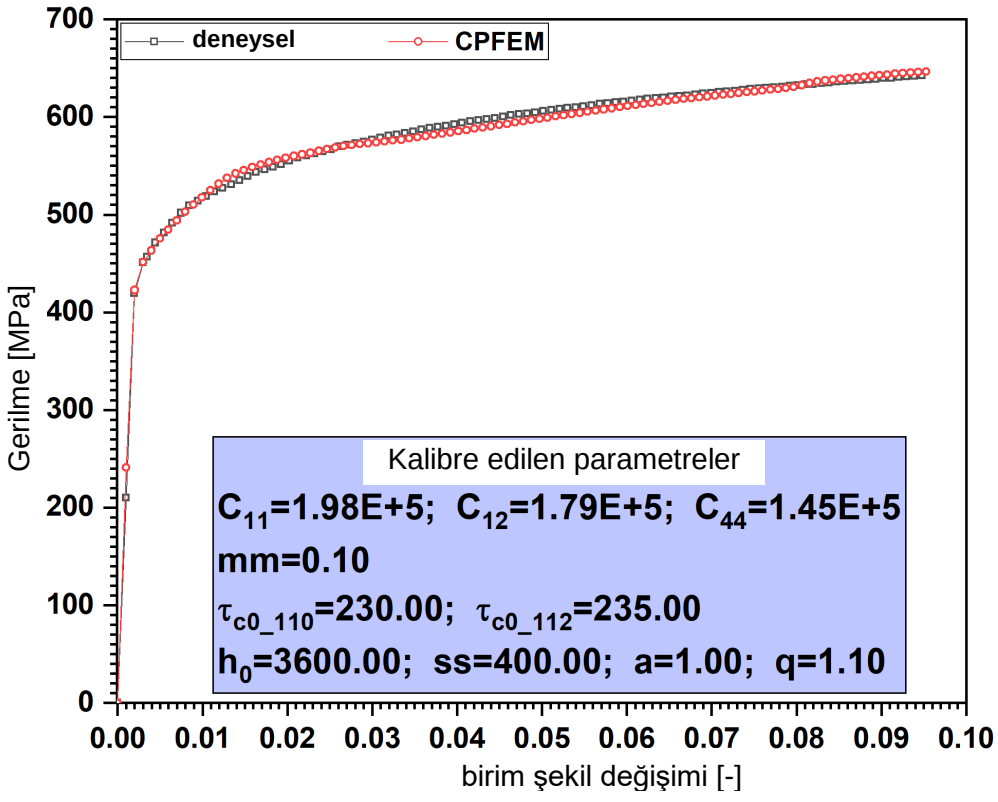
Taylor homojenizasyonunda tüm taneler aynı deformasyona maruz kalır. Deformasyon gradyanı, , için tüm tek kristaller için ayrı ayrı çözümleme yapılır. Kristallerin sahip oldukları gerilmein ortalaması alınarak gerilme değeri bulunur.

$$\sigma_{ij}^{(ort.)} = \frac{\sigma_{ij}^{(1)} + \cdots + \sigma_{ij}^{(N)}}{N}$$



Şekil 4.64 Metal şekillendirme uygulamasının simülasyon için geliştirilen farklı malzeme modeli kullanılan kritik eleman yönteminin şematik gösterimi

DP600 çelik malzemesi için geliştirilen modelin kalibrasyonu için gerekli olan testler firma tarafından yapılmıştır ve veriler paylaşılmıştır. Bu veriler simülasyonlar yapılmış olup tek elemanlı simülasyon için kalibrasyon yapılmıştır.



Şekil 4.65 DP600 deneylsel çekme verileri ve kalibrasyonu

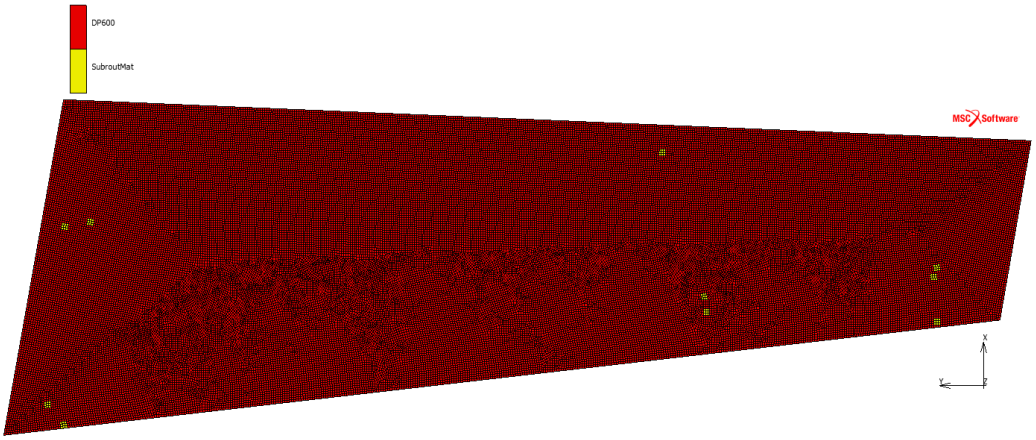
Buna ilave olarak deforme olmamış malzeme üzerinde EBSD analizleri yapılmış olup malzeme deformasyon öncesi karakterize edilmiştir.

Bu proje kapsamında ele alınan DP600 çelik malzeme mikroyapı analizlerinden, yaklaşık %50'sini temsile eden yönelimlar bulunmuştur. Diğer %50 yönelimlar rastlantısal olarak seçilmiştir. Tablo 4.13'te mikro yapıyı temsil eden yönelimlar gösterilmiştir.

Tablo 4.13 DP600 temsili mikro yapı yönelimları ve denk gelen alan miktarları

no.	ϕ_1	Φ	ϕ_2	Alan [%]
1	45.0	0.0	0.0	1.70
2	0.0	35.0	45.0	8.60
3	0.0	54.7	45.0	5.90
4	30.0	54.7	45.0	6.80
5	0.0	45.0	0.0	2.00
6	0.0	0.0	0.0	0.50
7	90.0	54.7	45.0	6.70
8	45.0	54.7	45.0	13.20
9	0.0	15.0	45.0	6.20
10	0.0	65.0	45.0	4.00
11	296.4	171.3	196.3	4.44
12	118.0	120.3	52.4	4.44
13	102.6	57.7	153.0	4.44
14	339.6	6.5	232.2	4.44
15	155.2	136.6	36.4	4.44
16	120.2	171.2	146.5	4.44
17	84.4	96.3	289.9	4.44
18	236.6	172.2	247.4	4.44
19	293.2	114.3	299.8	4.44
20	135.2	105.8	7.2	4.44

Kristal plastisite yöntemi ile belirlenen kritik noktalar için tek elemanlı Taylor homojenizasyonu kullanarak simülasyonlar yapıldı. Bu noktalarda oluşan gerilmeler hesaplandı. Bunun için parça üzerinde seçilen noktaların koordinat değişimleri sonlu eleman simülasyonlarından elde edildi. Bu x-y-z yönlerindeki nodların yer değiştirmeleri tek elemanlı simülasyonlar için girdi olarak kullanıldı, Şekil 4.66.



Şekil 4.66 Kristal plasitisite malzeme modeli kullanılan bölgeler (sarı renkte) ve eş-yönelimli malzeme modeli (kırmızı renkte)

4.2.4.3 Taylor + J2 yöntemi

Bu yöntemde DP600 malzemesi içindeki martensit fazı için belirli bir hacim oranı miktarı seçilmiş ve J2 modeli ile gerilme hesaplamaları yapılmıştır. Bu modeldeki tek fark budur. Tablo 4.14x'te kullanılan yönelim belirtilmiştir. 20 numaralı tane olarak martensit fazı kullanılmıştır.

Tablo 4.14 DP600 temsili mikro yapı yönelimları ve denk gelen alan miktarları

no.	ϕ_1	Φ	ϕ_2	Alan [%]
1	45.0	0.0	0.0	1.70
2	0.0	35.0	45.0	8.60
3	0.0	54.7	45.0	5.90
4	30.0	54.7	45.0	6.80
5	0.0	45.0	0.0	2.00
6	0.0	0.0	0.0	0.50
7	90.0	54.7	45.0	6.70
8	45.0	54.7	45.0	13.20
9	0.0	15.0	45.0	6.20
10	0.0	65.0	45.0	4.00
11	296.4	171.3	196.3	4.43
12	118.0	120.3	52.4	4.43
13	102.6	57.7	153.0	4.43
14	339.6	6.5	232.2	4.43
15	155.2	136.6	36.4	4.43
16	120.2	171.2	146.5	4.43
17	84.4	96.3	289.9	4.43
18	236.6	172.2	247.4	4.43
19	293.2	114.3	299.8	4.43
20	-	-	-	4.53

5 Tartışma

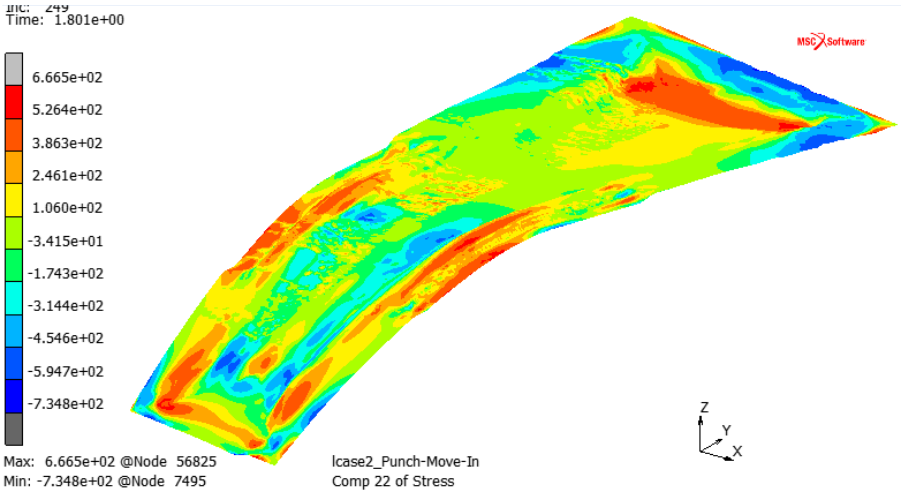
5.1 Fizik temelli modelleme

Fizik temelli modelleme ile taneler içindeki birim şekil değişimi dağılımları daha yüksek doğruluk değeri ile hesaplanabilmektedir. Lokal olmayan model getirileri ise beklenenden düşük olmakla birlikte daha iyi birim şekil değişimi dağılımı sonuçları elde edilebilmektedir.

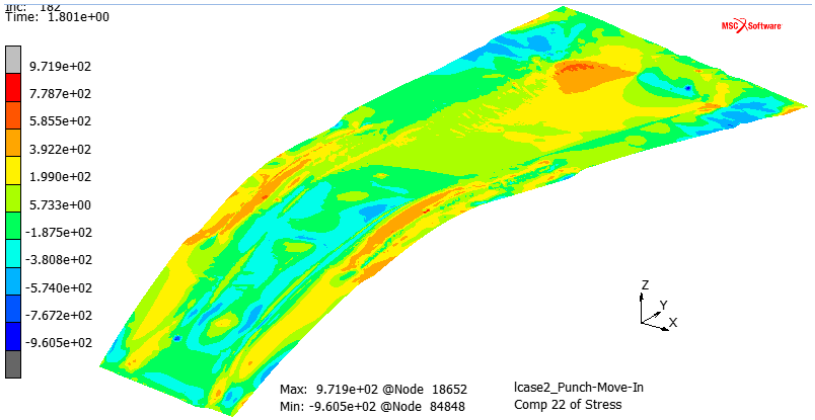
Fizik temelli modeller ile malzeme modelleri sıcaklığa bağlı hale gelmektedir. Klasik modellerde her sıcaklık için farklı sıcakllık sabitleri bulunması gerekirken, fizik temelli modellerde bu bağıntılar kendiliğinden mevcuttur. Dolayısıyla geliştirilen model oldukça esneklik kazanmaktadır.

5.2 Kalıntı gerilme sonuçları

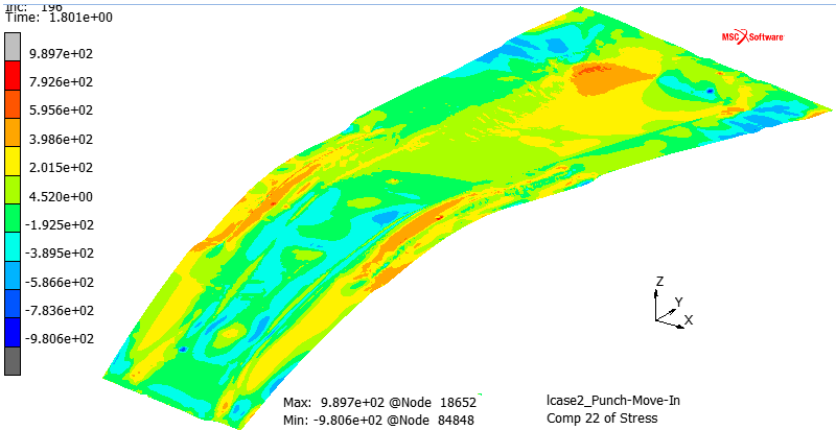
Farklı modeller ile karşılaştırma yapabilmek için aynı zamanda gerilme sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3-4-5'te sırasıyla izotorpik, Taylor, ve Taylor+J2 homojenizasyonları gibi farklı modeller ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Izotropik malzeme modeli kullanılrak elde edilen gerililm dağılımları, σ_{yy} (t = 1.8 s anında)



Şekil 5.2 Taylor homojenizasyonu ile elde edilen gerilme dağılımları, σ_{yy} (t = 1.8 s anında)



Şekil 5.3 Taylor+J2 homojenizasyonu ile elde edilen gerilme dağılımları, σ_{yy} (t = 1.8 s anında)

Tablo 5.1'de farklı noktalar için simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, Eş-yönelimli, Taylor, ve Taylor+J2 modelleri için simülasyonlar yapılmıştır. Bu çalışmada Taylor+J2 homojenizasyonu martensit hacim oranındaki malzemeyi eş-yönelimli olarak kabul ederek hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 5.1 Simülasyon sonuçlarının karşılaltırıması – σ_{yy}, t=1.8 s anında

Lokasyon	Izotropik [MPa]	Taylor [MPa]	Taylor + J2 [MPa]
1A	391.5	396.4	397.8
1B	-215.8	-139.3	-140.5
2A	-424.6	-129.3	-132.8
3A	454.6	316.0	343.1
4A	464.1	514.9	512.2
4C	-289.7	-44.8	-55.0
5A	-168.1	-108.0	-110.4

Tablo 5.1'de gösterildiği gibi ölçüm sonuçları ile simülasyon arasında farklılıklar mevcuttur. Bu farklılığın en önemli sebebinin deneysel ölçümlerdeki sınır şartlarındaki farklılık olduğu düşünülmektedir. Ölçümlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için metal şekillendirme ile üretilen parçaya uygun olarak tasarlanan bir mastar ya da kalıp gibi yapının üzerine sabitlendikten sonra yapılması gereklidir. Ölçümler esnasında parça geometrisinden dolayı parçanın sabitlenmesi mümkün olmamıştır. Bu yüzden parçanın özellikle serbest olan kısmında ölçüm esnasında hareket meydana gelmiştir. X-stress robotlu ölçüm sistemi ölçüm yapılacak bölgeye temas ederek çalışmaktadır. Bu temasın parçada harekete sebep olması düşük sabitleme rijitliği dolayısıyla meydana gelmektedir. Bu düşük sabitleme rijitliği temel olarak ölçümler ve simülasyon arasındaki farklılığa neden olmuştur. Dolayısıyla üretilen parçanın karmaşık geometrisinden dolayı doğru üretim ölçülerine göre yapılacak olan bir kalıp üzerine parça üzerinde gerilmee neden olmayacak şekilde sabitlenmesi gerekli olmuştur. Bu kalıp otomotiv firması üzerinden talep edilmiş ancak kendileri temin edemeyeceklerini belirtmişlerdir. Dolayısıyla deneyler ile simülasyonlar arasında farklılıklar oluşmuştur.

6 Sonuç ve Öneriler

Proje sonucunda önemli kazanımlar ortaya çıkmıştır. Kristal plastisite modeli malzemelerin mekanik davranışını hassas modellemek için geliştirilmiştir. Model bu projede bir metal şekillendirme problemine uygulanmıştır.

Aşağıda geliştirilen model ile ilgili olan önemli sonuçlar listelenmiştir.

- Fizik temelli model ile kristal malzeme üzerindeki birim şekil değişimi dağılımları geleneksel modellere kıyasla daha yüksek doğruluk değeri ile modellenebilmektedir.
- Fizik temelli modeler bu projede gösterilmese de doğal olarak sıcaklığa bağlı modeler vasıtasıyla sıcaklığa bağlı davranışlar tahmin edilebilmesini mümkün kılar.
- Geliştirilen model farklı seviyelerde çeşitli seviyelerde uygulanabilmektedir. Örnek olarak:
    - Tek kristal problemleri; nanoindentasyon, tek kristal özellikleri vb.
    - RVE model yöntemi ile her bir sonlu elemanın tek bir kristali temsil ettiği polikristal mekaniği problemleri
    - Bir elemanın birçok kristal ile gösterildiği Taylor homojenizasyon yöntemi ile
    - Bir eleman içinde farklı fazların bulunduğu ve hem kristal mekaniği hem de eş-yönelimli mekanik davranış içeren farklı fazların olduğu durumlarda.
- Seçilen metal şekillendirme problem uygulması çok karmaşık bir deformasyon içerdiğinden dolayı fazla sayıda eleman sayısı gerekli olmaktadır. Bu sebepten kristal plastisite yönteminin sonlu eleman modelinin tamamına uygulanması simülasyon sürelerini oldukça uzatmaktadır. Dolayısıyla kristal plastisite modellerinin sadece istenilen elemanlara uygulanması yeterli sonuçları hızlı bir şekilde vermektedir.
- Geliştirilen model çok farklı metal mekaniği uygulamalarının kullanılmasına imkan tanımakla birlikte mekanik modellemenin daha hassas bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır.

Model ile ilgili öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Metal şekillendirme problemleri çok kompleks deformasyonlar içerdiği için daha sade bir problem üzerinde farklı modellerin test edilerek getirilerinin ve farklı modellerin tahmin kabiliyetlerinin karşılaştırılması gerekmektedir.
- Model tüm metal mekaniği problemlerine uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir. Yani sadece metal şekillendirme değil, örnek olarak eklemeli üretim ile üretilen bir metal malzemenin ömrünün modellenmesine de uygulanabilmektedir. Bu sebepten dolayı geliştrilen model oldukça farklı uygulamalarda kullanılabilir.
- Model hem FCC hem BCC hem de eş-yönelimli farklı fazlar içeren malzemelere de uygulanabilmektedir. Dolayısıyla oldukça genel yelpazdeki malzemelerin davranışını açıklamak için geliştirilen model kullanılabilir.
- Kalıntı gerilme ölçümlerinin daha sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için kalıp bir sabitleyici bir yapı gerekli olmuştur. Bu yapı otomotiv firması tarafından maalesef tedarik edilememiştir. Ölçümlerin kalıp gibi sabit bir yapı üzerinde yapılması ölçüm sisteminin dokumatik sensörleri nedeniyle gereklidir.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi ERALP DEMİR
Proje No:	118M285
Proje Başlığı:	Kristal Plastisite Sonlu Eleman Metodu Kullanılarak Plastik Deformasyon Sonrası Oluşan Kalıntı Gerilimlerin Hesaplanması Için Nümerik Yöntem Geliştirilmesi Ve Otomotiv Uygulaması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	MURAT BÜYÜK
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SABANCI Ü. MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ F.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/11/2018 - 01/05/2021
Onaylanan Bütçe:	583287.96
Harcanan Bütçe:	554560.0
Öz:	Proje kapsamında metal şekillendirme işlemleri sonrasında oluşan gerilmelerin hesaplanması için mikro yapı malzeme özelliklerini dikkate alan kristal plastisite sonlu eleman yöntemi geliştirilmiştir. Nümerik yöntem otomotiv firması tarafından belirlenen DP600 çelik malzemesi ve metal şekillendirme durumu için uygulamıştır. Verilen numuneler üzerinde yönelim analizleri ve çekme testleri yapılarak malzeme karakterizasyonu tamamlanmıştır. Geliştirilen kristal plastisite yönteminde daha önce literatürde bulunmayan yenilikçi fizik temelli mikro yapı modeli kullanılmıştır. Bunun yanında metal şekillendirme uygulmasını makul simülasyon süreleri içinde ve çözümleyebilmek için Taylor homojenizasyon yöntemi ile malzemenin sahip olduğu yönelim niteliklerine uygun olarak yapabilen bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen model Taylor homojenizasyon yöntemi ve gösterimsel hacim elemanı yöntemi gibi farklı yöntemler ile birlikte kullanılarak çok kristalli yapılarda oluşan kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır. Bu yöntem ile deneysel olarak kalıntı gerilmeler ölçülmekle birliket farklı yöntemler ile elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Metal şekillendirme ile elde edilen kompleks şekile sahip bir parça için analizler yapılmış ve kristal plastisite modeli ile kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır.
Abstract:	A crystal plasticity finite element method is developed within the project in order to compute the mechanical and microstructure linked material properties formed after metal forming processes. The method has been applied to a metal forming automative application of DP600 steel material. Material characterization was completed by performing texture analyzes and tensile tests on the given samples of the same material. In the crystal plasticity method, an innovative physics-based microstructure model, which was not previously available in the literature, was used. In addition, in order to analyze the metal forming application within reasonable simulation times, a software has been developed that can perform the Taylor homogenization method in accordance with the texture properties of the material. The residual stresses in polycrystalline structures were calculated by using the developed model together with different methods such as the Taylor homogenization method and the demonstrative volume element method. With this method, residual stresses were measured experimentally and compared with the simulation results obtained by different methods. Analyzes were made for a part with complex shape obtained by metal forming and residual stresses were calculated with the crystal plasticity model.
Anahtar Kelimeler:	kristal plastisite; metal şekillendirme; fizik temelli model; tekstür; kalıntı gerilim
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- A physically based model for bcc materials including non-Schmid effects and its application to single crystals of ?-iron at different model scales (Makale - İndeksli Makale), 2- Investigation of strain hardening near grain boundaries of an aluminum oligocrystal: Experiments and crystal based finite element method (Makale - İndeksli Makale),

TÜBİTAK