

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

METAL TOZU PRESLEME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mak.Yük.Müh. Faruk GÜNER

EKİM 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

METAL TOZU PRESLEME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Makine Yüksek Mühendisi Faruk GÜNER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.09.2014

Tezin Savunma Tarihi : 09.10.2014

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hasan SOFUOĞLU

İkinci Danışman : Yrd.Doç.Dr. Ömer Necati CORA

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Faruk GÜNER tarafından hazırlanan

METAL TOZU PRESLEME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16/09/2014 gün ve 1570 sayılı kararıyla
oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ

Olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Prof.Dr. Sultan ÖZTÜRK

Üye : Yrd.Doç.Dr.Hasan GEDİKLİ

Üye : Prof.Dr. Gençaga PÜRÇEK

Üye : Prof.Dr. Mustafa Kemal APALAK

Prof.Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Son elli yıldır, akademik ve endüstriyel çalışmalarda artan bir ilgiyle üzerinde çalışılan toz metalürjisi, yüzey alan artışının, malzeme yoğunluğu azaltılmasının ya da minyatür parça üretiminin amaçlandığı alanlarda ön plana çıkan bir üretim yöntemidir. Yönteme ait parça üretim süreçlerinin geliştirilebilmesi amacıyla mikro yapıda inceleme gerekmektedir. Toz metalürjisiyle parça üretim yöntemlerinden bir tanesi olan metal presleme süreci, malzemenin plastik deformasyonu, gerilmeler ve sürtünme katsayısı yönünden, “Metal Tozu Presleme Prosesinin Sayısal ve Deneysel İncelenmesi” adı verilmiş olan bu tez çalışması kapsamında mikro boyutta incelenmiştir. Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (ÇPSEY/MPFEM-Multi Particle Finite Element Method) ile farklı malzeme ve sürtünme modelleri ve de farklı sıcaklık değerleri için sayısal inceleme yapıldıktan sonra bulgular deneysel çalışmalarla kıyaslanmıştır.

Bu tez çalışmasının yürütülmesi esnasında, akademik bir çalışmanın nasıl yürütüleceği ve bir akademisyende bulunması gereken özellikleri bana gösteren değerli danışman hocam Prof.Dr.Hasan SOFUOĞLU’na, bir çok konuda fikir ve görüşlerini sunarak yardımcı olan ikinci danışmanım Yrd.Doç.Dr. Ömer Necati CORA’ya, tez çalışmamın en başında doğru tercihleri yapmam ve sonraki çalışmalarımda yol göstericiliğine devam eden değerli hocam Prof.Dr.Sultan ÖZTÜRK’e, bir çok defa teknik anlamda yardımlarını benden esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Hasan GEDİKLİ’ye tüm içtenliğimle saygılarımı sunarken teşekkürü bir borç bilirim. Bunların yanı sıra çalışmalarım esnasında bana kolaylık sağlayan T.C. Bayburt Üniversitesi yöneticilerine, değerli hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ve son olarak bu zahmetli süreç boyunca bana tahammül eden aileme de teşekkür ederken kendilerine hediye ettiğim çalışmamın çocuklarım için yol gösterici olmasını temenni ederim.

Faruk GÜNER
Ağustos 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Metal Tozu Presleme Prosesinin Sayısal ve Deneysel İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof.Dr.Hasan SOFUOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.15/09/2014

Faruk Güner

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Malzeme Modelleri.....	3
1.2.1. Von Mises Malzeme Modeli	5
1.2.2. Modifiye Cam-Clay (MCC) Malzeme Modeli	7
1.2.3. Mohr-Coulomb Malzeme Modeli	11
1.2.4. Shima-Oyane Malzeme Modeli	15
1.3. Sürtünme Modelleri	18
1.3.1. Amonton-Coulomb Sürtünme Modeli	21
1.3.2. Wanheim/Bay Sürtünme Modeli	22
1.3.3. Levanov Sürtünme Modeli	25
1.4. Modelleme Yaklaşımları	26
1.4.1. Sürekli Ortam (Continuum) Modelleme Yaklaşımı	28
1.4.2. Mikromekanik (Moleküler) Modelleme Yaklaşımı.....	30
1.4.3. Ayrık (Discrete) Eleman Modelleme Yaklaşımı	33
1.4.4. Pürüzsüz Parçacık Hidrodinamiği (SPH) Modelleme Yaklaşımı.....	44
1.4.5. Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (MPFEM)	45
1.5. Tezin Konusu ve Amacı	48
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	51
2.1. Modellerin Oluşturulması	51
2.2. Model Optimizasyonu	62
2.3. Malzeme Parametrelerinin Tayini	63
2.3.1. von Mises Malzeme Modeli	63
2.3.2. Modifiye Cam-Clay (MCC) Malzeme Modeli	64

2.3.3. Mohr-Coulomb Malzeme Modeli	68
2.3.4. Shima-Oyane Malzeme Modeli	71
2.4. 2-boyutlu Analizler	74
2.5. 3-boyutlu Analizler	74
2.6. Sürtünme Etkisinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar	76
2.7. Sıcaklık Etkisinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar	77
2.8. Deneysel Çalışmalar	79
2.8.1. Deney Kalıbı Modeliyle Yapılan Sayısal Çalışmalar	79
2.8.2. Yapılan Deneyler	81
3. BULGULAR VE İRDELEME	86
3.1. Malzeme Modelleri Göre Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	86
3.1.1. Sürekli Ortam Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	86
3.1.2. MPFEM Analizlerden Elde Edilen Bulgular	93
3.1.2.1.von Mises Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	96
3.1.2.2.MCC Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	99
3.1.2.3.Mohr-Coulomb Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	101
3.1.2.4.Shima-Oyane Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	103
3.1.3. Malzeme Modellerinin Karşılaştırılması	104
3.1.4. MPFEM ve Sürekli Ortam Analizlerinin Karşılaştırılması	109
3.2. Sürtünme Modellerinden Elde Edilen Bulgular	115
3.2.1. Coulomb Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular	115
3.2.2. Wanheim/Bay Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular	126
3.2.3. Levanov Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular	132
3.2.4. Sürtünme Modellerinin Karşılaştırılması	137
3.3. 270°C’de Yapılan Analizlerden Elde Edilen Bulgular	141
3.3.1. 270°C’de Coulomb Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular	141
3.3.2. 270°C’de Wanheim/Bay Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular	143
3.3.3. 270°C’de Levanov Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular	148
3.3.4. 270°C’de Sürtünme Modellerinin Karşılaştırılması	152
3.4. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	158
3.4.1. Deney Kalıbı Modeliyle Yapılan Sayısal Çalışmalardan Elde Edilen	158
3.4.2. Deneylerden Elde Edilen Bulgular	164
4. SONUÇLAR	174

5.	ÖNERİLER.....	177
6.	KAYNAKLAR.....	178
7.	EKLER	191
	ÖZGEÇMİŞ.....	195

ÖZET

METAL TOZU PRESLEME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSSEL İNCELENMESİ

Faruk GÜNER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU
İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati
CORA 2014, 190 Sayfa, 4 Ek Sayfa

Bu çalışmada, birçok alanda uygulaması yaygınlaşan metal tozu presleme prosesi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Mikro yapıdaki deformasyon, gerilme ve sürtünme davranışının gerçekçi olarak belirlenebilmesi için, rijit kalıp içerisine rastgele yerleştirilen 200 µm çapındaki 74 adet küresel bakır tozları Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (Multi Particle Finite Element Metod-MPFEM) modellenmiştir. 60076 adet üç boyutlu tetrahedral eleman ile ağ örgüsü oluşturulan tozlar, von Mises, Modifiye Cam-Clay, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modelleri kullanılarak oda sıcaklığında analiz edilmişlerdir. Bu aşamada, von Mises malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen MPFEM analizindeki gerilme dağılımlarının diğer malzeme modellerine göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Sürtünme davranışının belirlenmesi amacıyla $\mu=0$, $\mu=0,1$, $\mu=0,25$ ve $\mu=0,4$ gibi farklı sabit Coulomb sürtünme katsayılarıyla ve prosese ait sürtünme katsayısının elde edilmesi için ayrıca yazılan kullanıcı alt programlarıyla oluşturulan Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modelleriyle analizler yapılmıştır. Sıcaklığın, gerilme ve sürtünme davranışına etkisinin incelenmesi amacıyla, çalışmalar bu üç sürtünme modeli ile 270°C’de sürdürülmüştür. Analizlerde, $\mu=0,25$ değerinin malzeme deformasyonu açısından kritik bir değer olduğu ve Wanheim/Bay modeliyle 20°C’de ortalama 0,05 sürtünme katsayısı elde edilirken 270°C’deki değer ise 0,04 olarak tespit edilmiştir. Tezin son bölümünde ise, geometrik süreksizliği daha az olan ve 130 adet elastik-plastik toz içeren yeni bir model oluşturularak yine aynı üç sürtünme modeliyle 270°C’de analizler gerçekleştirilmiştir. Rijit zımbaya etkileyen kuvvet değerinden yola çıkılarak belirlenen basma değerleri ile yapılan deneylerden alınan numuneler, SEM ile incelenerek deforme olmuş tanelerin görüntüleri sayısal verilerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal Tozu Presleme, von Mises, Modifiye Cam-Clay, Mohr-Coulomb, Shima-Oyane, Wanheim/Bay, Levanov, Sürtünme Katsayısı, Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi

SUMMARY
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF METAL POWDER
COMPACTION PROCESS

Faruk GÜNER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof.Dr. Hasan SOFUOĞLU
Co-Advisor: Asst.Prof. Ömer Necati CORA
2014, 190 Pages, 4 Appendix Pages

Metal powder compaction process which has spreading applications in several areas was investigated in this study. In aim to determine deformations, stresses and frictional behavior realistically in micro structure, 74 spherical particles in 200 μm diameter randomly filled in a die cavity were modelled by Multi Particle Finite Element Method (MPFEM). The particles that meshed by 60076 3-D tetrahedral elements were analyzed in room temperature by using von Mises, Modifiye Cam-Clay, Mohr-Coulomb and Shima-Oyane material models. In terms of stress distributions obtained from all MPFEM analyses of this study, it was concluded that von-Mises material model is more appropriate for MPFEM analyses. Coulomb constant friction coefficient of $\mu=0$, $\mu=0.1$, $\mu=0.25$ and $\mu=0.4$ were utilized to determine friction behavior of compaction process. Wanheim/Bay and Levanov friction models were implemented into FEA through user subroutines in order to obtain friction coefficients of compaction process. In aim to investigate temperature effect on stress and friction behavior, the studies were pursued by Coulomb, Wanheim/Bay and Levanov friction models at 270°C. $\mu=0.25$ was detected a critical value for powder deformations on these analyses. Average friction coefficient of 0.05 was attained at 20°C while 0.04 was obtained at 270°C with Wanheim/Bay model. At the final stage of this study, experiments were also performed for comparison purpose. A new finite element model having 130 elastic-plastic bodies with less discontinuity on the die geometry was constituted for experimental studies and analyzed by utilizing three friction models at 270°C. Experiments were performed by the compacting pressure determined from the force acting to rigid punch on numerical analyses. Specimens that were obtained from experiments were investigated by SEM and the captured views of deformed particles were compared with the numerical results.

Keywords: Metal Powder Compression, von Mises, Modified Cam-Clay, Mohr-Coulomb, Shima-Oyane, Wanheim/Bay, Levanov, Friction Coefficient, Multi Particle Finite Element Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. a) σ_1 - σ_2 Düzleminde ve b) asalla eş açı yapan düzlemlerde $1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}$ von Mises akma yüzeyi (Khan ve Huang (1995))	5
Şekil 1.2. a) Cam Clay ve b) MCC modelleri için p - q düzleminde akma çizgileri [Callari vd.(1998)]	8
Şekil 1.3. Logaritmik ortalama eşdeğer gerilme ile boşluk oranının değişimi.[Callari vd. (1998)]	9
Şekil 1.4. Mohr-Coulomb Akma Eğrisi [Sinha vd. (2010)]	13
Şekil 1.5. Shima-Oyane ve Drucker-Prager akma yüzeylerinin gösterimi [Sun vd. (1999)]	16
Şekil 1.6. Wanheim/Bay sürtünme modelinde f , sürtünme faktörü değişimi [Cora (2004)]	23
Şekil 1.7. Sürtünme faktörüne göre normalize kayma gerilmesinin nominal normal gerilmeye göre değişimi a) Levanov Modeli b) Levanov ve Wanheim/Bay karşılaştırılması [Cora (2004)].....	25
Şekil 1.8. Iwashita (2000)'nin çalışmasında mikromekanik modellerde temas tanımı	31
Şekil 1.9. Procopio vd. (2003)'nin çalışmalarında uyguladıkları kuvvetlerin gösterimi	33
Şekil 1.10. Sonlu-Ayrık Eleman Analizinde simetrikliğin bozulması [Munjiza (2004)]	34
Şekil 1.11. a) Plastik-Plastik gövde ve b) plastik-rijit gövde temasında boyun verme hacimleri [Sweeney (2003)]	38
Şekil 1.12. Gethin vd. (2006)'nin çalışmasında kalıp doldurma sürecinde oluşan gerilmeler	39
Şekil 1.13. Bir metal tozunun preslenme prosesinin şematik gösterimi [Harthong vd.(2009)].....	41
Şekil 1.14. Düğüm-yüzey temas algılama tanımının şematik gösterimi [Khoei vd. (2013)]	43
Şekil 1.15. Al tozlarının soğuk preslenmesinde zimba deplasmanın deformasyona etkisi Lee vd.(2009)	47
Şekil 1.16. Gustafsson vd. (2013)'nin çalışmalarında oluşturdukları ağ örgüsü ve elde edilen gerilme dağılımları.....	48
Şekil 2.1. İki boyutlu modeller a) Sürekli ortam b) Çoklu ortam.....	53
Şekil 2.2. a) Kalıp boyutları b) SEM görüntüsü ve c) Numune görüntüsü. Cora vd. (2009).....	54

Şekil 2.3.	Bu çalışmada oluşturulan 3-boyutlu sürekli ortam sonlu elemanlar modeli	54
Şekil 2.4.	Sekiz adet metal tozun ayrıık modellendiği üç boyutlu model.....	55
Şekil 2.5.	Yirmi yedi adet elastik-plastik küresel metal tozu ile yapılan analiz modeli	56
Şekil 2.6.	Jerier vd. (2011)'den referans alınan, 32 adet elastik-plastik bakır tozunun oluşturduğu model	57
Şekil 2.7.	Rastgele yerleştirilmiş metal tozlarının hareket analizinden a) öncesi ve b) sonrası.....	58
Şekil 2.8.	Kalıp içindeki metal tozları a) Ağ örgüsü oluşturulmadan önce b) Ağ örgüsü	60
Şekil 2.9.	Sonlu elemanlar analizinde kullanılan çoklu parçacık (MPFEM) modeli	60
Şekil 2.10.	Belirlenen ve çalışmada kullanılan referans tozların MPFEM analizindeki geometrik yerleri	61
Şekil 2.11.	Eleman sayısına göre eşdeğer gerilme değişimi.....	62
Şekil 2.12.	Martin vd. (2003) hidrostatik basıncın bağıl yoğunluğa göre değişimi.....	65
Şekil 2.13.	Park (2007) çalışmasında verilen, bağıl yoğunluğun fonksiyonu olarak akma düzlemleri a) pekleşme etkisi ihmal edilmiş (düz çizgiler) ve b) Pekleşme etkisi dahil edilmiş (kesik çizgiler).....	67
Şekil 2.14.	Vyal ve Laptev (2002)'in ortaya koyduğu iç sürtünme açısı değişimi.....	70
Şekil 2.15.	OFHC Bakır için 269°C'de farklı şekil değiştirme hızları için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrileri (Tanner ve McDowell (1999)).....	78
Şekil 2.16.	269°C ve 1s ⁻¹ için OFHC bakırın logaritmik gerçek gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	79
Şekil 2.17.	Yeni kalıp geometrisinin kesiti.....	80
Şekil 2.18.	130 adet toz içeren yeni kalıp için oluşturulan MPFEM modeli	80
Şekil 2.19.	Deneyisel çalışmada kullanılan kalıp bileşenleri.....	82
Şekil 2.20.	Deney Düzenegi.....	83
Şekil 2.21.	Deneylerde kullanılan küresel bakır tozlarının SEM görüntüsü.....	84
Şekil 2.22.	Preslenmiş ve bakalite alınmiş numuneler	85
Şekil 3.1.	Sürekli ortam analizinde MCC malzeme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	87
Şekil 3.2.	Sürekli ortam analizinde MCC malzeme modelinin kullanılması sonucu elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri	88
Şekil 3.3.	Sürekli ortam analizinde Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	89

Şekil 3.4.	Sürekli ortam analizinde Mohr-Coulomb malzeme modelinin kullanılması sonucu elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri	90
Şekil 3.5.	Sürekli ortam analizinde Shima-Oyane malzeme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	91
Şekil 3.6.	Sürekli ortam analizinde Shima-Oyane malzeme modelinin kullanılması sonucu elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri	92
Şekil 3.7.	Sekiz adet elastik-plastik gövdeye sahip çoklu parçacık modelinde deformasyon sonrası oluşan gerilme dağılımı	94
Şekil 3.8.	Jerier vd. (2011) çalışmasına ait modelden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı	95
Şekil 3.9.	von Mises malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	97
Şekil 3.10.	von Mises malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi.....	98
Şekil 3.11.	MCC malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	99
Şekil 3.12.	MCC malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi	100
Şekil 3.13.	Mohr Coulomb malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	101
Şekil 3.14.	Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi	102
Şekil 3.15.	Shima-Oyane malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi.....	104
Şekil 3.16.	Alt referans tozdan elde edilen MPFEM modelleme yaklaşımı sonuçları	106
Şekil 3.17.	İç referans tozdan elde edilen MPFEM modelleme yaklaşımı sonuçları	107
Şekil 3.18.	Üst referans tozdan elde edilen MPFEM modelleme yaklaşımı sonuçları.....	108
Şekil 3.19.	Malzeme modellerine göre MPFEM analizinde zımbaya gelen kuvvetin oluşturduğu gerilme değerleri.....	109
Şekil 3.20.	Alt referans tozda, sürekli ve çoklu parçacık analizlerinin malzeme modelleri açısından karşılaştırılması	111
Şekil 3.21.	İç referans tozda, sürekli ve çoklu parçacık analizlerinin malzeme modelleri açısından karşılaştırılması	112

Şekil 3.22. Üst referans tozda, sürekli ve çoklu parçacık analizlerinin malzeme modelleri açısından karşılaştırılması	113
Şekil 3.23. Zimbada oluşan gerilme değerlerini sürekli ve çoklu parçacık analizi açısından karşılaştırılması.....	114
Şekil 3.24. $\mu=0$ ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı	116
Şekil 3.25. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	117
Şekil 3.26. MPFEM analizinde referans tozlar için $\mu=0$ kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme grafiği	118
Şekil 3.27. MPFEM analizinde $\mu=0,1$ için von Mises malzeme modeli kullanılarak elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği	119
Şekil 3.28. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0,1$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	120
Şekil 3.29. $\mu=0,25$ ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı	121
Şekil 3.30. MPFEM analizinde referans tozlar için $\mu=0,25$ kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme grafiği	122
Şekil 3.31. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0,25$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar.....	123
Şekil 3.32. $\mu=0,4$ ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı	124
Şekil 3.33. MPFEM analizinde referans tozlar için $\mu=0,4$ kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme grafiği	125
Şekil 3.34. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0,4$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	126
Şekil 3.35. Wanheim/Bay sürtünme modeli ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	127
Şekil 3.36. MPFEM analizinde Wanheim/Bay sürtünme modeli kullanılarak referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme grafiği	128
Şekil 3.37. Referans tozların MPFEM analizinde Wanheim/Bay sürtünme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	129
Şekil 3.38. Wanheim/Bay sürtünme modelinde sürtünme katsayısının sürtünme faktörüne göre değişimi (Cora (2004))	130
Şekil 3.39. Wanheim/Bay sürtünme modelinde referans tozların sürtünme katsayıları... 131	
Şekil 3.40. Levanov sürtünme modeli ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	132
Şekil 3.41. MPFEM analizinde Levanov sürtünme modeli kullanılarak referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme grafiği.....	133
Şekil 3.42. Referans tozların MPFEM analizinde Levanov sürtünme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	134

Şekil 3.43. Levanov sürtünme modelinde sürtünme katsayısının sürtünme faktörüne göre değişimi (Cora (2004)).....	135
Şekil 3.44. Levanov sürtünme modelinde referans tozların sürtünme katsayıları.....	136
Şekil 3.45. Referans tozların sürtünme davranışına göre eşdeğer gerilme değerleri.....	138
Şekil 3.46. Sürtünme modeline göre zimbada oluşan gerilmeler	139
Şekil 3.47. Referans tozlar üzerinde oda sıcaklığında analizlerden elde edilen sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimi	140
Şekil 3.48. 270°C ve $\mu=0,1$ için MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	141
Şekil 3.49. 270°C ve $\mu=0,1$ için MPFEM analizinden elde edilen referans tozların eşdeğer gerilme grafikleri.....	142
Şekil 3.50. 270°C ve $\mu=0,1$ için MPFEM analizinde referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar.....	143
Şekil 3.51. 270°C ve Wanheim/Bay sürtünme modeli için MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı	144
Şekil 3.52. 270°C ve Wanheim/Bay sürtünme modeli için MPFEM analizinden elde edilen referans tozların eşdeğer gerilme grafikleri	145
Şekil 3.53. 270°C ve Wanheim/Bay sürtünme modeli için MPFEM analizinde referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	146
Şekil 3.54. Wanheim/Bay sürtünme modeli ve 270°C için MPFEM analizinde elde edilen referans tozlara ait sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimi.....	147
Şekil 3.55. 270°C ve Levanov sürtünme modeli için MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı.....	148
Şekil 3.56. 270°C ve Levanov sürtünme modeli için MPFEM analizinden elde edilen referans tozların eşdeğer gerilme grafikleri	149
Şekil 3.57. 270°C ve Levanov sürtünme modeli için MPFEM analizinde referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar	150
Şekil 3.58. Levanov sürtünme modeli ve 270°C için MPFEM analizinde elde edilen referans tozlara ait sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimi	151
Şekil 3.59. Alt referans tozu üzerinde ısı analizlerinden elde edilen eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluğa ve sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimleri ..	152
Şekil 3.60. İç referans tozu üzerinde ısı analizlerinden elde edilen eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluğa ve sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimleri ..	153
Şekil 3.61. Üst referans tozu üzerinde ısı analizlerinden elde edilen eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluğa ve sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimleri ..	154
Şekil 3.62. 270°C’de yapılan analizlerde zimbada oluşan gerilmeler	155

Şekil 3.63. Wanheim/Bay sürtünme modeli için oda sıcaklığında ve 270 °C’de elde edilen sürtünme katsayısı değişim grafikleri	156
Şekil 3.64. Levanov sürtünme modeli için oda sıcaklığında ve 270 °C’de elde edilen sürtünme katsayısı değişim grafikleri	157
Şekil 3.65. Yeni kalıp modelin MPFEM analizinde a) $\mu=0,1$ b) Wanheim/Bay ($f=0,3$) ve c)Levanov ($f=0,3$) sürtünme modelleri için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımları	159
Şekil 3.66. Yeni kalıp MPFEM modelinde seçilen referans tozlar	160
Şekil 3.67. Yeni kalıp modelin MPFEM analizinde elde edilen referans tozlara ait eşdeğer gerilme değerleri.....	161
Şekil 3.68. Yeni kalıp ile MPFEM analizinde referans tozların eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonu	162
Şekil 3.69. Yeni kalıp modeli ile elde edilen sürtünme katsayıları	163
Şekil 3.70. Deneylerden elde edilen bir numunenin görüntüsü	164
Şekil 3.71. Kalıp kesitinin SEM ve sayısal analiz görüntüleri	166
Şekil 3.72. Kalıbın sol yan kesitinin SEM ve sayısal analiz görüntüleri	167
Şekil 3.73. Zımbaya yakın bölgenin optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırılması	169
Şekil 3.74. Kalıp üst bölgesinin optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırılması	171
Şekil 3.75. Zımba ile kalıbın daralmaya başladığı kesit arasında kalan bölgenin sol yandan optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırılması.....	173

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. von Mises malzeme modeline ait malzeme parametreler.....	64
Tablo 2. Modifiye Cam-Clay Modeli için hesaplanan sıkışma oranı değerleri.....	66
Tablo 3. Modifiye Cam-Clay analizine ait değerler.....	68
Tablo 4. Mohr-Coulomb modeli analiz bilgileri.....	70
Tablo 5. Shima-Oyane analizine ait veriler.....	73

SEMBOLLER DİZİNİ

A, B, m, n	von Mises malzeme modeli parametreleri
b_1, b_2, b_3, b_4	Shima-Oyane malzeme modeli parametreleri
c	Kohezyon
Cc	Sıkışma endeksi
Cs	Şişme endeksi
e	Boşluk oranının
E	Elastisite modülünü
E_o	Başlangıç Elastisite modülünü
f	Sürtünme faktörü
F_e	Eksenel kuvvet
F_p	p'inci küreye etkiyen kuvvet
F_r	Radyal kuvvet
H	Numune yüksekliği
h_k	Kalıp Yüksekliği
J_1	Gerilme tansörünün birinci değişmezi
J'_2	Deviatorik gerilme tansörünün ikinci
k	Kaymada akma gerilmesi
K	Bulk modülü
$\ln p$	Logaritmik ortalama eşdeğer gerilme
M	Kritik durum çizgisi eğimi
MCC	Modifiye Cam-Clay
MPFEM	Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi
p	Ortalama eşdeğer gerilme
p_c	Ön destek basıncı (preconsolidation pressure)
q	Deviatorik gerilme (kayma gerilmesi)
q_n	Gerçek yüzey alanındaki normal gerilme
q_1, q_2, q_3, q_4	Shima-Oyane malzeme parametreleri
R	Preslenen numune çapı
$RD \sim D$	Bağıl yoğunluk
V_k	Zımba ilerleme hızı
W	Hacim başına düşen şekil değiştirme enerjisi
σ	Eşdeğer gerilme
σ_n	Görünen yüzey alanındaki normal gerilme
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Eksenler yönündeki gerilmeler
σ_Y	Akma gerilmesi
σ_b	Toz taneleri üzerine gelen tek eksenli gerilme
ε_o	Başlangıç akma gerilmesine karşılık şekil değiştirme
$\bar{\varepsilon}$	Eşdeğer birim şekil değiştirme
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	Eşdeğer birim şekil değiştirme hızı
λ	İlk sıkışma oranı
κ	Yeniden sıkışma oranı
β	İç sürtünme açısı
α, γ, m'	Shima-Oyane malzeme parametreleri

ϕ	Porozite
ν	Poisson oranı
τ	Kayma gerilmesini
μ	Sabit sürtünme katsayısı
α'	Gerçek temas alanının görünen temas alanına oranı
θ	Sıcaklık
λ_i	Malzeme parametreleri
μ'	Viskozite
Σ_{ij}	Makroskopik Gerilme
Δ	Plastik katsayısı
λ^T	Lagrange Çarpanları

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Modern bir imalat yöntemi olan toz metalürjisi; 21. yüzyılın ileri teknoloji malzemelerinin, küçük ve karmaşık parçaların üretimini düşük maliyetli olarak üretilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir.

Son elli yıldır yoğunlukla çalışılan bu yöntemle, Fe, Cu, Sn, Pb, Al, Zn, Mg, Ti, Ni, Co ve bunların alaşımları gibi çok sayıdaki metalik malzeme toz haline getirildikten sonra farklı prosesler uygulanarak minyatür parçaların üretilmesi mümkün olmuştur. Bu yöntemle geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla mekanik özellikleri geliştirilmiş parçalar da elde edilebilir. Yöntem sadece makine elemanı üretiminde değil ilaç ve seramik sektörü, mobil telefon ya da yakıt hücresi imalatında da kullanılabilir.

Proses modellemelerinin sağladığı avantajlar açısından bakıldığında; deneysel olarak ortaya konulması zor olan karmaşık proseslerin izlenebilmesi, fiziksel açıdan çoklu mekanizmaların izah edilebilmesi, proseslerin kapalı olarak hassas bir şekilde değerlendirilebilmesi, hızlı ve ucuz proses optimizasyonu olanağı, proses esnasında kontrol stratejileri imkanı sağlaması ve pazarlama zamanını düşürürken kaliteyi artırması sıralanabilir.

Metal tozu ve tozdan parça üretimi ile ilgili tarihsel gelişim incelendiğinde kesin bir başlangıç tarihi elde edilememekle birlikte milattan önce 3000 yıllarında demir tozundan üretilmiş tarihi eserler bulunmuştur. Bilimsel çalışmaların ise, 20.yüzyılın son çeyreğinde yoğunlaştığı görülmektedir. Farklı yöntemlerle toz üretimi yapılabilir olmasına karşın tüm yöntemlerin bazı ortak yönleri mevcuttur. Toz üretim süreci genel olarak, eriyik halindeki metalin yüksek hız ortamına gönderilerek bu ortamda küçük tanecikler halinde hızla katılaşması şeklinde ifade edilebilir. Taneciklerin küresel formda olması için uygulanan üretim aşamalarına rağmen bazı metal ve alaşımlarda düzensiz şekilli tanecik oluşumu da söz konusudur.

Döner disk atomizasyonu, sprey atomizasyonu ve vakum atomizasyonu yöntemi metal tozu üretim yöntemlerinden bazılarıdır. Döner disk atomizasyonu yönteminde metal, bir induksiyon ısıtıcı tarafından bir grafit pota içerisinde eriyik haline getirilmektedir. Metal eridikten sonra potanın alt kısmındaki tapanın açılarak eriyiğin yüksek hızla dönen disk üzerine basınçlı gaz ya da doğal akış etkisi ile bırakılması sağlanır. Disk kanatçıklı ya da düz yapıda

olabilmektedir. Disk üzerindeki eriyik diskten üç farklı formda; damla, ligament ya da tabaka formunda ayrılabilir. Farklı formlardaki metal diskten ayrıldıktan sonra belli bir müddet havada ya da ortamdaki gaz etkisi ile soğutulduktan sonra katılaşması için soğuk yüzeylere çarptırılır. Ortamda argon gibi gazlar bulundurularak üretilen taneciklerin küresel formda olması sağlanır.

Döner disk gaz atomizasyon yönteminde ise; eriyik, bir disk üzerinde yüksek hızda dönerken merkezkaç kuvvetleri etkisiyle disk kenarlarına doğru ilerler. Bu şekilde eriyik film kalınlığı azalır ve disk kenarından ayrılma noktasında eriyiğe yüksek basınçlı gaz gönderilir. Bu sayede eriyik toz haline getirilirken aynı zamanda soğutulmaktadır.

Bir diğer metal tozu üretim yöntemi olan gaz atomizasyon yöntemi aynı zamanda sprey atomizasyon yöntemi olarak da bilinmektedir. Eriyik halindeki metal bir sifon yardımıyla yüksek hızda gaz akışı olan nozula gönderilir. Nozul da yüksek hızlı gaz sayesinde oluşan vakum eriyiğin haznedan çıkmasına yardımcı olmaktadır.

Farklı yöntemlerle elde edilen metal tozlarının birden çok üretim aşamasından geçirilerek parça üretimi söz konusudur. Genel bir toz metalürjisi parça üretim prosesini oluşturan dört ana aşama; toz ve yağlayıcı madde karıştırma, presleme, sinterleme ve post sinterleme şeklinde sıralanabilir.

Karıştırma işlemi, tozun homojen bir şekilde presleme kalıbına yerleştirilmesini sağlamaktadır. Presleme, soğuk ya da sıcak presleme olarak iki farklı ısı düzeyinde olabilmektedir. Kelvin cinsinden erime sıcaklığının üçte birinden daha düşük sıcaklıklarda yapılan presleme işlemleri soğuk presleme olarak kabul edilmektedir. Soğuk presleme yapıldığı durumlarda, metal tozları, üretilecek parçanın şekline uygun kalıbın içerisine doldurulduktan sonra belirli bir basma kuvveti altında preslenir. Presleme işleminden sonra farklı amaçlar için sinterleme işlemi yapılabilir. Presleme işleminden çıkmış ürün aynı zamanda sinterleme işleminin hammaddesi olan ara ürün "ham gövde" (green body) şeklinde adlandırılır. Sıcak presleme yapıldığı durumlarda sinterleme işlemine gerek duyulmaktadır. Post sinterleme işlemi ise her iki presleme işlemi için uygulanabilecek son işlemleri kapsamaktadır. Bu işlemler dövme, aşılama, emprenye etme ve ısı uygulamaları olarak sıralanabilir.

Yalnızca metalürjik çalışmalar için değil, zemin malzemelerin, seramik malzemelerin, kompozit malzemelerin ve medikal ürünlerin geliştirilmesi için de başvurulan modelleme çalışmaları literatürde genel olarak iki başlık altında toplanmıştır. Bunlar malzeme modelleri ve modelleme yaklaşımlarıdır [Gethin vd. (2006), Harthong vd. (2009), Gustafsson vd.

(2013), Khoei vd. (2007)]. Bu tez çalışmasında bu başlıklara bir yenisi daha eklenerek sürtünme modellerinin de incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde, kullanılan modelleme mekanizmalarında, elastik-plastik deformasyonu, tozun yeniden yerleşmesini, iç sürtünmesi ve temas ettiği ekipmanlarla olan etkileşiminin modelleme yaklaşımları, malzeme modelleri ve sürtünme modelleri açısından birçok aşamada farklı olduğu görülmektedir. Sistem verimini etkileyen parametrelerin bazı modellerde ihmal edildiği, kabullerle aşıldığı ya da yeterince hassas elde edilemediği de literatür araştırmasında karşımıza çıkmaktadır.

1.2. Malzeme Modelleri

Metal tozu presleme proseslerinde, malzemenin elastik-plastik deformasyonu gerilmenin yalnızca deviatorik kısmının değil aynı zamanda hidrostatik kısmının da ele alınmasıyla açıklanabilir. Bu amaçla von Mises akma kriteri değiştirilerek gözenekli malzemelere uygun modeller geliştirilmiştir. Modellerin, gerilme, şekil değiştirme gibi mekanik davranışları ifade edebilmesi, mümkün olabildiğince az kabul ve parametre içermesi, elastik-plastik davranışları yükleme ve yükün kaldırılması aşamalarında etkin ifade edebilmesi önemlidir. Ayrıca, malzeme modellerinin temel fonksiyonu olarak tanımlanan bağıl yoğunluk (RD) ve porozite (ϕ) değerleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$RD = \frac{\text{Toz hacmi}}{\text{Kalıp Hacmi}} \quad (1.1)$$

$$\phi = 1 - RD$$

Sun ve Kim (1997), modelleme çalışmasında, deneysel verileri Shima-Oyane, Cam-Clay ve Kuhn-Fleck modelleri ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada Shima-Oyane ve Cam Clay modelinin bakır tozları presleme prosesine ait malzeme parametreleri verilmiştir.

Akma modelleri genel olarak akma mukavemeti ve bağıl yoğunluğun bir fonksiyonu olarak ifade edilse de Zohdi vd. (2002) gözenekli malzemedeki akmayı gözenek hacmi ve gözeneksiz malzemenin akma mukavemetine bağlı olarak ifade etmiştir. Bu şekilde malzemenin elastik-plastik davranışı açıklanabilmektedir.

Cedergan vd. (2002), üç boyutlu metal tozu presleme prosesinin teorik alt yapısını araştırmalarında ortaya koymuşlardır. Çalışmada Shima-Oyane, Gurson, Kuhn-Fleck

modelleri monolitik (tek parça) malzeme için incelenmiş ve sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Bejerano vd. (2003), % 94'ü demir alan bir alaşım tozu ile yaptığı analiz çalışmasında Drucker-Prager modelini kullanmış ve malzemenin elastik davranışını ifade etmek için ayrı bir bünye denklemi kullanarak açık (eksplisit) ve kapalı (implisit) çözümleri birlikte uygulamışlardır. Böylece modelin yüklemenin kaldırılması bölgesinin tanımlamasına ek olarak elastik bölgedeki ifadesinin iyileştirildiği bildirilmiştir.

Soğuk presleme prosesinin yapısı gereği çözümün kapalı (implisit) yapılması düğüm noktalarında yakınsamanın olması açısından bir gereklilik olmakla birlikte bazı araştırmacılar çözümü açık (eksplisit) yapmaya çalışmışlardır. Xin vd. (2003) soğuk presleme prosesini açık adımlı (eksplisit) sonlu elemanlar yaklaşımı ile analiz etmeye çalışmıştır. Sonuç olarak bu yöntemle de plastik deformasyonun yalnızca bağıl yoğunluğa değil aynı zamanda kohezyona da bağlı olduğu, monolitik gövdelerde Cam Clay akma modelinin verimli sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Radchenko (2004), sinterlenmemiş yani soğuk preslenmiş bakır, demir ve bunların alaşımları ile ilgili literatürdeki bir kısım akma modellerinin bünye denklemlerini karşılaştırarak, gerekli olan malzeme parametrelerini ortaya koymuştur. Araştırmacı bu modellerin genel olarak dört bölümden oluştuğunu; birinci bölümde gerilmenin lineer arttığı elastik davranış, ikinci bölümde gerilmede lineer olmayan artış, üçüncü bölümde akma, dördüncü bölümde ise gerilmenin en yüksek değeri ve ardından sifıra geri dönüş olarak belirtmiştir. Bunun yanı sıra farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş bakır tozlarının preslenmesi için gerekli presleme basıncı ortaya konularak bahsi geçen bünye denklemlerindeki malzeme katsayılarının metal tozunun üretim yöntemiyle yakından ilgili olduğu açıklanmıştır. Ayrıca araştırmacı, Druger-Prager modelinin toz boyutu ve boyut etkisini içerecek modifikasyonlara ihtiyacı olduğu kanaatine varmıştır.

Bier ve Hartmann (2006), toprak ve metal malzemeler için geçerli olabilecek, şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olan akma modelini ortaya koymuşlardır. Oluşturulan bu modelin, deformasyon sertleşmesi ve modelin kinematiği açısından deneysel verilerle çok iyi örtüştüğünü ifade etmişlerdir.

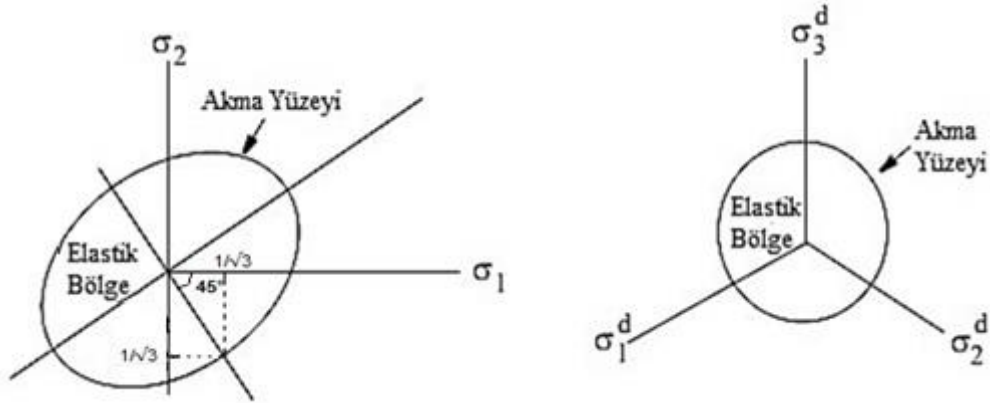
Zhang vd. (2010), ayrık eleman yöntemiyle (Discrete Element Method (DEM)) kübik kalıp içerisindeki soğuk presleme prosesini modelledikleri çalışmalarında, metal tozlarının preslenmesi ve presleme yükünün kaldırılması sürecindeki, elastisite modülü, akma bölgesi, geçiş bölgesi ve sürtünme katsayısı gibi malzeme parametrelerini ortaya koymuşlardır.

Yapılan deneysel çalışmalarla akma modeli verilerinin birbiriyile gayet uyumlu olduğu bildirilmiştir.

Literatürde sıklıkla karşılaşılan bazı malzeme modelleri aşğıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

1.2.1. Von Mises Malzeme Modeli

von Mises malzeme kriteri mühendislik çözümlerinde en fazla kullanılan akma modelidir. Modelin başarısı akma fonksiyonunun sürekliliği ve sünek malzemeler üzerindeki etkin sonuç vermesine bağlıdır. Malzemeye uygulanan eşdeğer (efektif) gerilmenin, malzeme için uygun gerilme sınırının üzerine çıkması durumunda akmanın gerçekleşeceği prensibi tanımlanmıştır.



Şekil 1.1. a) σ₁-σ₂ Düzleminde ve b) asalla eş açı yapan düzlemlerde (1/√3, 1/√3, 1/√3) von Mises akma yüzeyi (Khan ve Huang (1995))

İzotropik bir malzemede, σ₁, σ₂ ve σ₃ asal gerçek gerilmeleri ise eşdeğer gerilme aşğıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\sigma = \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (1.2)$$

Genel gerilme bileşenleri cinsinden ise;

$$\sigma = \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. İzotropik bir malzemede (1.3) denkleminde gerilme tansöründen elde edilen eşdeğer gerilme değerlerinin genellikle malzemenin akma gerilmesinin $1/\sqrt{3}$ katının üzerine çıkması durumunda plastik deformasyonun gerçekleşeceği hesaplanmaktadır. Bu sınır değeri malzeme özelliklerine bağlı kalmak koşulu ile deformasyon miktarına bağlı olarak değişebilmektedir. Akma değerinin, deformasyon sertleşmesini dikkate alan üstel fonksiyon ile ifadesi denklem (1.4)'te verilmiştir (Marc 2012 Volume A:Theory and User Information).

$$\text{Burada, } \sigma_Y = A(\varepsilon_o + \bar{\varepsilon})^m + B\dot{\varepsilon}^n \quad (1.4)$$

σ_Y	Akma Gerilmesi (MPa)
ε_o	Başlangıç akma gerilmesine karşılık gelen şekil değiştirme
$\bar{\varepsilon}$	Eşdeğer şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}$	Eşdeğer şekil değiştirme hızı (s^{-1})
A, B, m ve n	Malzeme parametrelerini tanımlamaktadır.

Yukarıdaki denklemden de anlaşılacağı üzere malzeme modellerinin temel parametresi olan bağıl yoğunluk bu denklemde dikkate alınmamıştır.

Senthilvela vd. (2003), bakır tozlarının soğuk presleme proseslerini inceledikleri çalışmalarında von Mises üstel fonksiyon modelinin uygun sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada proses sonucunda malzeme üzerinde oluşan artık gerilmeler incelenerek modelin deformasyon sertleşmesi katsayıları için ampirik denklemler geliştirilmiştir.

Chen vd. (2007), granüler malzemelerin presleme prosesini modelledikleri çalışmalarında, granüler tozlar üç boyutlu olarak modellemiştir. Modellemede toz parçacıklarının birbirleriyle etkileşimi ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri analiz edilmiştir. Bu analizler 0,95 bağıl yoğunluk değerine kadar incelenirken akma modeli ve deformasyon sertleşme etkisi von Mises malzeme modeli kullanarak belirlenmiştir. Araştırmacılar, toz parçacıkların mikroskopik düzeyde ayrı modellenmesinin granüler malzemelerin presleme proseslerindeki mekanik davranışlarını çok iyi tanımladığını bildirmiştir.

Al-Qureshi vd. (2008), oluşturdukları von Mises akma kriteri temelli yeni algoritma ile deformasyon sertleşmesini, geometri etkisini ve kalıp malzeme sürtünmesini analize dahil etmişlerdir. Poroziteye bağlı soğuk presleme basıncı ve bağıl parametrelerin ortaya

konulduğu çalışmada demir, bakır ve nikel gibi malzemeler için sürtünme katsayısı 0,05-0,2 arasında uygulanabileceği belirtilmiştir.

Champion (2013), von Mises malzeme modelini kullanarak nano boyuttaki küresel bakır tozlarının davranışını incelemiştir. 77-273K sıcaklık aralığında olduğundan modelin, kırılma hasarının oluşma ihtimalinde dahi verimli sonuçlar verdiğini, elde edilen sonuçların mikro-makro geçişinde kullanılabilir veriler ortaya koyduğunu bildirmiştir.

1.2.2. Modifiye Cam-Clay (MCC) Malzeme Modeli

Bu model, malzemede deformasyondan sonra eşdeğer gerilme bileşenlerinde ya da boşluk oranında herhangi bir değişim yoksa bir kritik durumun oluştuğunu kabul eder. Kayma gerilmesi deformasyonu altındaki malzemenin, herhangi bir akma ya da hasara uğramadan kritik bir değere kadar kayma gerilmesine maruz kalabileceğini ifade eden modeldir. Bu durumda akma yüzeyi, gerilme invaryantının ilk iki teriminin bir fonksiyonudur.

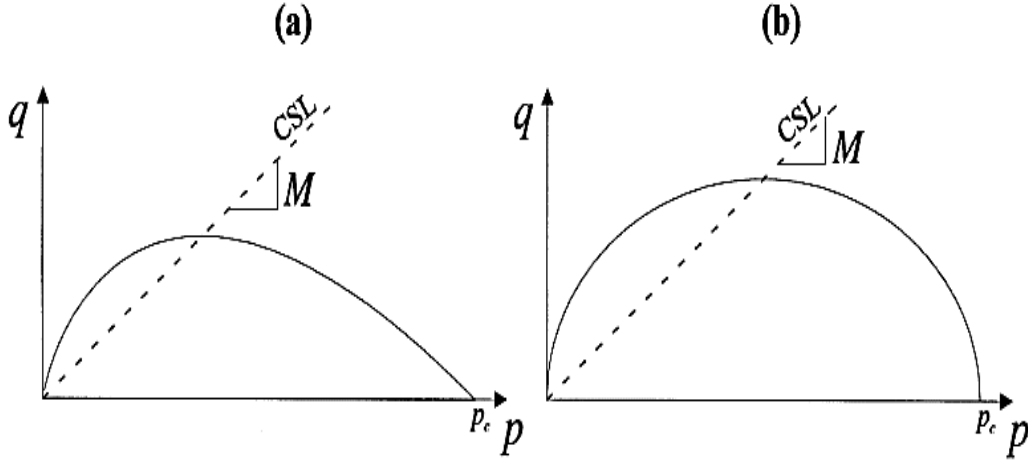
Model bazı geliştirmelerden sonra izotropik, lineer olmayan elastik-plastik malzeme modeli halini almıştır. Bu modifikasyonlar ile elde edilen Modifiye Cam Clay (MCC) modeli, genel üç boyutlu gerilme ve şekil değiştirme halini dikkate almıştır. Model birçok metal tozu presleme araştırmasında ve özellikle yaş kil için deneysel değerlerle çok iyi örtüşen matematiksel modellerin öncüsü olarak kabul edilmektedir. Ortiz ve Pandolfi (2004), varyasyonel Cam-Clay çözümü ile kohezif olmayan granüler ortamlar için zemin mekaniği analizine visco-plastik yaklaşım ortaya koymuşlardır.

Cam Clay ve MCC modeli için akma kriterleri Callari vd. (1998) tarafından detaylı bir şekilde aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, modelin yumuşak kil için sayısal ve deneysel sonuçlarının örtüştüğünü bildirmiştir.

$$f(\sigma, p_c) = q + Mp \ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = 0 \quad \text{Cam Clay} \quad (1.8)$$

$$f(\sigma, p_c) = \left(\frac{q^2}{M^2}\right) + p(p - p_c) = 0 \quad \text{MCC} \quad (1.9)$$

Burada, p ortalama eşdeğer gerilme, q deviatorik gerilme (kayma gerilmesi), p_c ön destek basıncı (preconsolidation pressure) ve M kritik durum çizgisi eğimidir. M ve p_c değerlerinin p ve q gerilmelerine bağlı olarak değişimi Şekil 1.2'de verilmiştir. Şekilde, KDC (Critical State Line, CSL) olarak ifade edilen çizgi kritik durum çizgisidir.



Şekil 1.2. a) Cam Clay ve b) MCC modelleri için p - q düzleminde akma çizgileri [Callari vd.(1998)]

Bu modeldeki p ve q değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir;

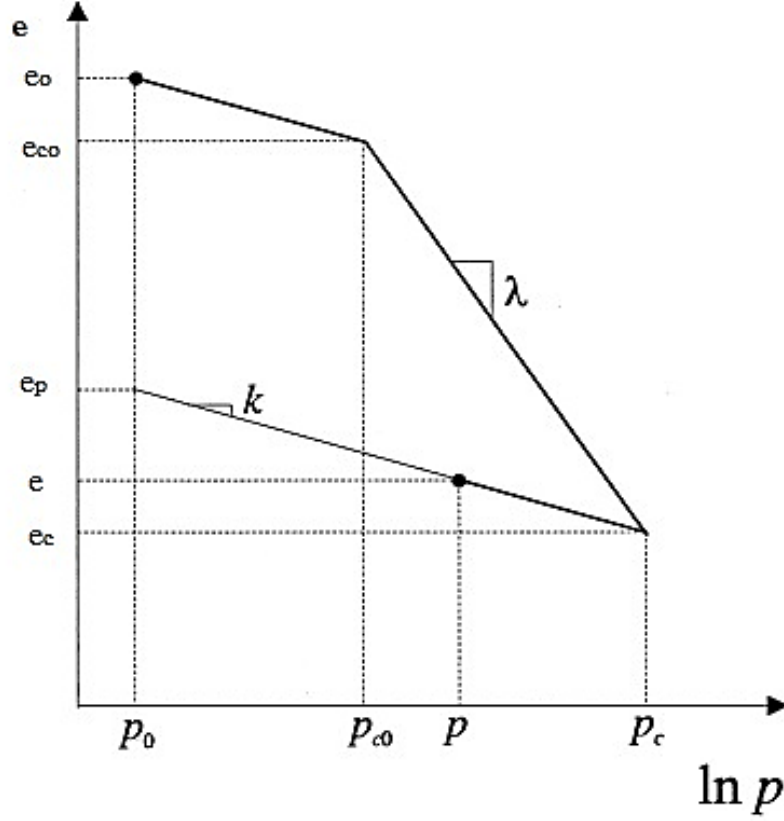
$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1.10)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (1.11)$$

Cam Clay modeli, malzeme içerisindeki boşluk oranının (e), logaritmik ortalama eşdeğer gerilme ($\ln p$) ile değişimi malzeme parametreleri λ ve κ ile açıklanmaktadır. Bu parametreler malzemenin preslenebilme kabiliyetini ifade etmektedirler. Literatürde λ , ilk sıkıştırma oranı, κ ise yeniden sıkıştırma oranı olarak tanımlanmıştır. Yeniden sıkıştırma oranı malzemenin elastik davranışını ifade etmektedir. Şekil 1.3 bu değişimleri göstermektedir.

Boşluk oranı, preslenecek hacim içerisindeki boşluğun, mevcut malzeme hacmine oranı olup, porozite ise preslenecek hacim içerisindeki boşluğun bütün hacme oranıdır. Bu nedenle bazı araştırmacılar modeli porozite cinsinden de ifade etmişlerdir. Aubertin ve Li (2004), mühendislik malzemeleri için poroziteye bağlı geliştirdiği modeli von Mises, Mises-

Schlicher, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, Modifiye Cam-Clay, Cap Model, Shima-Oyane, Gurson, Lade, Desai, Modifiye Gurson, Ehlers, Lee-Oung modelleri ile kıyaslayarak sonuçların örtüşüğünü ifade etmişlerdir.



Şekil 1.3. Logaritmik ortalama eşdeğer gerilme ile boşluk oranının değişimi.[Callari vd. (1998)]

Callari vd. (1998), araştırmasında MCC modelini tanımlarken bulk modülünü sabit bir değer yerine basıncın bir fonksiyonu şeklinde ortaya koymuşlardır. Eşdeğer gerilme, boşluk oranı ve yeniden sıkışma oranına bağlı olarak bulk modülü, MCC modelinde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$K = \frac{pe}{\kappa} \quad (1.15)$$

Modelin bir diğer dikkat çeken özelliği de, mühendislik mekaniğinin önemli iki parametresi olan Elastisite modülü (Young Moduli) ve Poisson oranından bağımsız olmasıdır. Böylece malzemenin elastik davranışı, Hooke bağıntısı direkt olarak denkleme alınmadan sadece yeniden sıkışma oranı terimiyle ifade edilmiştir.

Sun (1999), çalışmasında demir ve bakır tozları ile yapılmış deneysel sonuçları Cam-Clay, Shima-Oyane ve Fleck modelleri ile karşılaştırmıştır. Cam-Clay analizi sonuçlarının soğuk presleme için deneysel sonuçlarla çok iyi örtüştüğünü ve Cam-Clay modelinin soğuk presleme analizi için önerilebileceğini bildirmiştir. Yapılan çalışmalarda, bakır için Cam Clay parametrelerinden olan $M=6$ değerinin kullanıldığını bildirilmiştir.

Sun (1999) çalışmasında mevcut deneysel değerler kullanılarak ilk sıkıştırma oranı ve yeniden sıkıştırma oranı değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilmiş olan bağıl yoğunluk-hidrostatik basınç grafiği Şekil 1.3'de verilmiş olan grafiğe dönüştürülerek çalışmaya ait ilk sıkıştırma oranı ve yeniden sıkıştırma oranı değerleri ortaya konulmuştur. Bağıl yoğunluk malzeme hacminin toplam hacme oranı olup porozite ya da boşluk oranı cinsinden ifade edilebilmektedir.

Peric ve Ayari (2002), akma yüzeyini p-q düzlemindeki kritik durum çizgisinde eğim açısı olarak tanımlamış ve denklem (1.8) yeniden düzenlenerek oluşan eliptikliğe göre boşluklu kil için elde edilen sonuçlar literatüre kazandırılmıştır.

Mittal ve Puri (2006), farklı metalik malzemeleri soğuk preslemeye tabi tutup bu presleme çalışmalarını MCC modeli ile analiz etmişlerdir. Bu analiz sonucunda, malzeme parametreleri olan ilk sıkıştırma oranı, yeniden sıkıştırma oranı ve boşluk oranı değerlerinin değişiminin hidrostatik gerilme değerlerini değiştirdiğini ifade etmişlerdir. Bu tespit MCC modelinin gerilmenin hidrostatik kısmını da bünye denkleminde bulundurduğunu ve analiz sonuçlarının bu durumu desteklediğini ortaya koymuştur.

İlk sıkıştırma ve yeniden sıkıştırma oranları, malzemelerin presleme testlerinden elde edilmektedir. Değerlerin ne şekilde elde edileceği ve nasıl optimize edileceği Navarro vd. (2007) tarafından açıklanmıştır. Çalışma kil ile yapılmış ve optimizasyon prosedürü de ortaya konulmuştur.

MCC modelinin sadeliği birçok farklı uygulama alanı için modifikasyona uygun olmasını sağlamıştır. Yamakawa vd. (2010), çalışmasında hiper elasto-plastik malzemelerin sonlu şekil değiştirmelerini, yeniden sıkışma ile ifade edecek bir algoritma ile oluşturmuştur. Oluşturulan bu algoritma ile büyük deformasyonların meydana geldiği geoteknik problemlerin çözümüne uygun simülasyonlar yapılmıştır.

Literatürde Cam-Clay modeli genelde kil ve topraksı malzemeler için uygulanmış olmasına karşın, Haliti (2011) bakır ile yapılmış deneysel sonuçlarla kalibre ettiği sayısal çalışması ile Siboc sarı kili için analiz sonuçlarını ortaya koymuştur. Çalışmasında, sıkışma endeksi ve şişme endeksi olarak tanımlanmış model parametreleri ile geliştirilmiş ampirik formülleri kullanarak, bu formüllerinin güvenilirliğini belirlemişlerdir. C_c sıkışma endeksi ve C_s şişme endeksi ile sıkışma oranı λ ve yeniden sıkışma oranı κ , arasındaki bağıntıların aşağıdaki gibi olduğu belirtilmiştir. Bu şekilde λ ve κ arasında yaklaşık bir değer ifade edilebilmiştir.

$$\lambda = \frac{C_c}{\ln 10} = \frac{C_c}{2,3} \quad (1.12)$$

$$\kappa = \frac{C_s}{\ln 10} = \frac{C_c}{2,3} \quad (1.13)$$

$$C_c \cong \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10} \right) C_s \quad (1.14)$$

Zouain vd. (2010), çalışmasında MCC modeli kullanarak oluşturdukları algoritma ile kil analizleri için gerekli parametreleri ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar çalışmalarında, kayma plastik şekil değiştirme oranının model açısından belirleyici rol oynadığını ortaya koymuşlardır.

Suebsuk vd. (2010), farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş olan kil malzemeler için MCC modelini kullanarak farklı akma yüzeyleri için malzemenin mekanik davranışını ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, şekil değiştirme sertleşmesinin ve yumuşamasının, malzemenin plastik potansiyeli açısından önemini ve modelin basitliğini ifade etmişlerdir.

1.2.3. Mohr-Coulomb Malzeme Modeli

Mohr-Coulomb akma kriteri Coulomb akma kriterinin bir genelleştirilmesidir. Bu akma kriterinin Mohr dairesi denklemi ile yeniden düzenlenmesi sonucu elde edilen bünye denkleminin maksimum kayma gerilmesi (Tresca) akma kriterini ifade ettiği görülmüştür. Bu yöntemin iki dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan ilki bünye denkleminde ortanca asal

gerilmenin ihmal edilmesi, ikincisi ise analiz aşamalarında, kalıbın geometrik süreksiz olduğu keskin köşelerde analiz hatalarının görülmesidir.

Mohr-Coulomb akma kriterine başka bir yaklaşımda Drucker-Prager tarafından geliştirilmiştir. Drucker-Prager, von Mises akma kriterine bir terim daha ekleyerek gerilmenin hidrostatik kısmının da denklemde ifade edilebilmesini sağlamışlardır. Bu gelişmeler ve bünye denklemlerinin aynı olması neticesinde Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager malzeme modellerinin birlikte anılan, eş modeller olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Khoei (2010) tarafından Mohr-Coulomb/Drucker-Prager modelinin denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir. Öncelikle Coulomb akma denklemi;

$$q + p \tan(\beta) + c = 0 \quad (1.16)$$

Burada c kohezyon ve β iç sürtünme açısı olarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte genel Mohr dairesi denklemi ve denklemin düzenlenmiş hali denklem (1.17) ve (1.18) de verilmiştir.

$$-\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \beta = c - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \beta \right) \tan \beta \quad (1.17)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2c \cos \beta - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \beta \quad (1.18)$$

Vyal ve Laptev (2002), bakır ve demir tozları kullanarak yaptıkları çalışmalarında Drucker Prager modeliyle akmanın, malzemenin merkezinde başladığını belirtmişlerdir. Çalışmada presleme basıncı bağıl yoğunluğun bir fonksiyonu olarak tanımlanmış, bakır ve demir için kohezyon ve iç sürtünme değerleri bildirilmiştir. Silindirik bir presleme ortamında deformasyonun olduğu kuvvetler ölçümlenerek malzemenin Drucker Prager eğrisi çıkarılmıştır. Elde edilen kuvvetler aşağıdaki (1.19) ve (1.20) denklemleri kullanılarak asal gerilmelere dönüştürülmüştür. Presleme sonucunda malzeme üzerinde kalan gerilemelerin tayininde plastisite teorisi ve sürekli ortam sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilmiş bir Drucker-Prager modeli kullanılarak yapılan bu analizde, Drucker-Prager diyagramındaki eğri kısım kalıptan çıkarma hatalarına neden olmaktadır. Bu kısım

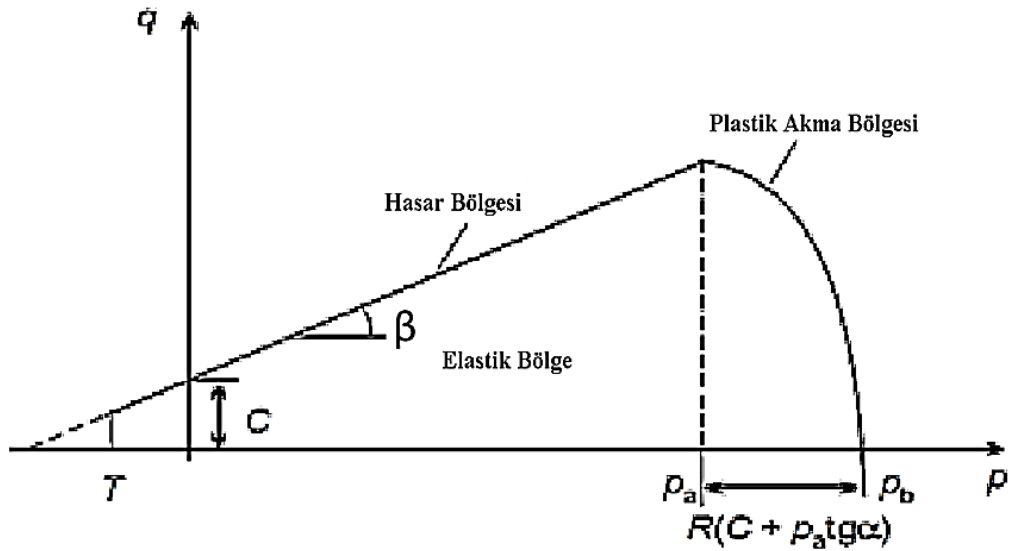
yüklemenin kaldırıldığı bölge olduğundan malzeme üzerindeki artık gerilmeleri bu kısım ifade etmektedir.

$$\sigma_1 = \frac{4F_e}{\pi R^2} \quad (1.19)$$

$$\sigma_3 = \frac{6F_r}{\pi RH} \quad (1.20)$$

Burada, F_e eksenel kuvvet, F_r radyal kuvvet, R preslenen numune çapı, H numune yüksekliğidir. Bu denklemler ışığında araştırmacılar bakır iç sürtünme açısının 67° - 70° arasında değiştiğini bildirmişlerdir.

Şekil 1.4'de verilen akma eğrisi literatürde Modifiye Druger-Pruger/Cap (DCP) Plastisite Modeli akma eğrisi olarak ta bilinmektedir. Plastik akma bölgesinin şekli nedeniyle "Kapak" (Cap) akma yörüngesi olarak adlandırılmaktadır. Modelde, plastik deformasyon, iki farklı durumda ortaya çıkmaktadır. İlk durum hasar bölgesinde gerilmenin malzeme için belirlenmiş sınır değerine ulaştığında meydana gelen plastik deformasyondur. İkincisi ise gerilme alanı basit kayma ve sınırlandırma açısı küçük ise kayma akması olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.4. Mohr-Coulomb Akma Eğrisi [Sinha vd. (2010)]

Sınka vd. (2004) yaptıkları çalışmada, önceki çalışmalarında modelledikleri ve deneysel ölçümlerini elde ettikleri tablet preslemenin sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. Yaklaşımda; presleme yönündeki ortalama gerilmeye maruz kaldığından, radyal gerilme dönüşümleri ve sürtünmeleri ihmal ettiğinden ve üç boyutlu gerilme bölgelerinin ifadesinde yetersiz olduğundan farklı bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. ABAQUS standart ticari sonlu elemanlar yazılımı analiz için kullanılmıştır. Analizde, daha önceden birçok araştırmacı tarafından kullanılmış olan Drucker-Prager/Cap modeli kullanılmıştır. Model bir kapak (Cap) yüzeyi ve düşük hidrostatik basınç etkisindeki kayma akması eğrisini içermektedir. Diğer taraftan toz ve kalıp arasındaki sürtünme Coulomb sürtünme modeli ile ifade edilmiştir. Kullanılan sürtünme katsayısı ise uygulanan basınca bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Khoei vd. (2007), farklı alaşımlarla yaptıkları çalışmalarında üç boyutlu olarak soğuk presleme prosesini ortaya koyarken Mohr-Coulomb/Drucker-Prager yaklaşımının iki handikabından bahsetmiştir. Bunlardan birincisi, elastik ve plastik davranışın aynı akış çizgisi üzerinde olmasının aşırı şekil değiştirmelere neden olduğudur. İkinci handikap olarak teorik olarak malzemenin limitsiz bir hidrostatik basınca dayanabildiği kabul edilmesi gösterilmiştir. Çalışmada Cam Clay modelinin daha uygun olabileceğini ifade etmişlerdir.

Heisserer vd. (2007), bakır tozlarının soğuk preslenmesiyle elde edilen bir makine parçasının oluşturulması prosesini incelediği çalışmalarında, Mohr-Coulomb malzeme modelini kullanarak sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Sayısal analizde adimsal ilerlemenin de matematiksel modeli ifade edilmiştir. Başlangıç durumu için bünye denklemindeki α katsayısı, $\alpha=0,558$ olacak şekilde sonuçlar elde edilmiştir.

Han vd. (2008) medikal tozlar için yaptıkları çalışmalarında Drucker-Prager/Cap modelini kullanarak tablet preslemede kohezyon değerinin, iç sürtünme açısının ve Elastisite modülünün bağıl yoğunluk ile değişebileceğini ortaya koymuşlardır. Özellikle Elastisite modülündeki bu değişikliğin malzeme içerisindeki gözenekliliğin azalmasından kaynaklandığı ve modelin bir deformasyon sertleşmesi etkisi meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Sinha vd. (2010), medikal tozlarla yaptıkları soğuk presleme analizinde, tozun Drucker-Prager eğrisini tanımlamışlardır. Analizde Drucker-Prager modeli kohezyon ve iç sürtünme değerleri deneysel verilerle uyumlu olarak elde edilmiştir. Modelin malzemenin elastik ve plastik davranışını hem yükleme hem de yükün kaldırılması boyunca gayet olumlu olarak ifade ettiği bildirilmiştir.

Literatürde bazı çalışmalarda malzemenin sürtünmesiz kabul edilmesinin yanında, bazılarında yalnızca kalıp ve tozlar arasında sürtünme tanımlanmıştır. Mohr-Coulomb malzeme modelinde iç sürtünme açısı, granüler malzemelerin akma eğrisinde belirleyici rol oynamaktadır. Song vd. (2010), demir tozlarının preslenmesi sonucu elde edilen bir makine parçasına ait bilgisayar simülasyonunda ortaya koymuşlardır ki geometri ve malzeme etkilerine bağlı olarak farklı temas yüzeylerinde farklı sürtünme kuvvetleri yoğunluğa bağlı olarak elde edilmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak iç sürtünmenin meydana geldiği bölgelerin mikro düzeyde incelenmesinin yerinde olacağı söylenebilir.

Diarra vd. (2012), Drucker-Prager akma modelini kullanarak kozmetik tozların presleme prosesini incelemiştir. Modelin özellikle yüklemenin ardından yükün kaldırılması durumu hakkında analiz imkânı vermesi metal tozları dışında daha elastik ve kohezyon etkisi düşük malzemeler için kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır.

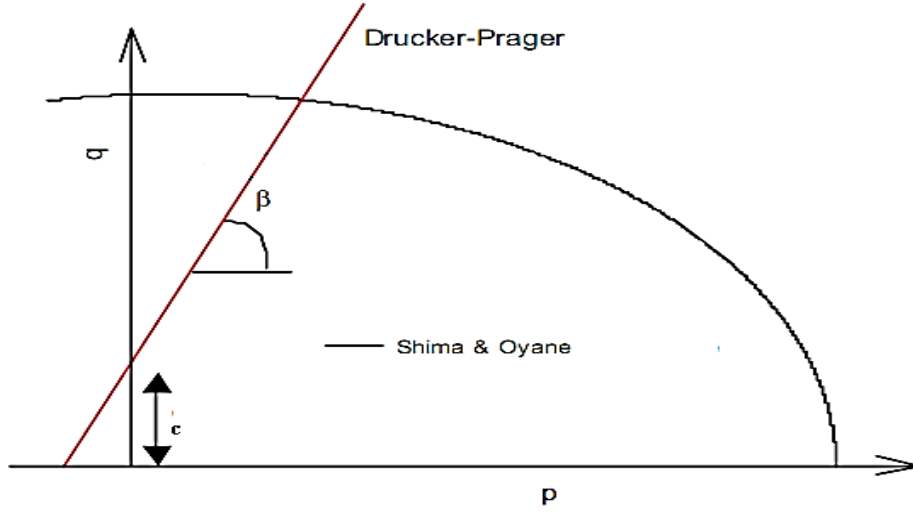
1.2.4. Shima-Oyane Malzeme Modeli

Shima-Oyane modeli bakır tozları ile yapılmış deneyler sonucunda 1976 yılında ortaya konulmuş bir gözenekli ortam malzeme modelidir. Modelin genel denklemi aşağıdaki denklem (1.21)'de verilmiştir [Kwon vd. (2004)];

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma} \right)^2 + \alpha (1-D)^\gamma \left(\frac{p}{\sigma} \right)^2 - D^{m'} \quad (1.21)$$

Denklem (1.21)'de verilen α, γ, m' malzeme parametreleri olup, önceki denklemlerde bağıl yoğunluk (RD) ile ifade edilmiş olmasına karşın orijinal çalışmaya bağlı kalınarak bu denklemde D bağıl yoğunluğu ifade etmektedir. Denklem yapılan deneyler sonucunda bakır tozlarının preslenmesini ifade eden malzeme parametreleri aşağıdaki (1.22) ampirik denkleminde verilmiştir.

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma} \right)^2 + 6,2(1-D)^{1,028} \left(\frac{p}{\sigma} \right)^2 - D^5 \quad (1.22)$$



Şekil 1.5. Shima-Oyane ve Drucker-Prager akma yüzeylerinin gösterimi [Sun vd.(1999)]

Modelde malzemenin yeniden yerleşme etkisinin incelenebilmesi açısından malzemeye bir viskozite katsayısı tanımlanmıştır. Bu viskozite değerinin elde edilmesi amacıyla Hall akış ölçeri (Hall Flow Meter) kullanılmaktadır. Viskozite parametresi Shima vd. (1995) tarafından bakır tozları için 2×10^{-4} olarak kullanılmıştır. Bu değer literatürdeki bakır tozları için tanımlanmış diğer değerlerle uyumluluk göstermektedir. Sun vd. (1999), Shima-Oyane modelin ilk ortaya atılan haliyle deformasyon sertleşmesi içermemesinden dolayı deneysel sonuçlarla uyuşmadığını fakat daha sonradan sabit bir akma gerilmesi değeri yerine plastik şekil değiştirmeye bağlı bir akma gerilmesi içeren modifikasyonla daha uygun hale getirildiğini ifade etmiştir.

Kim vd. (2001), Shima-Oyane modelini kullandığı simülasyon çalışmasında, bakır tozlarının gerilme-şekil değiştirme grafiğinde malzemenin plastik bölge davranışının lineere yakın fakat eğrisel olduğunu göstermiştir. Bakır tozları için Shima-Oyane malzeme modelinde kullanılacak malzeme parametrelerini ifade etmişlerdir.

Kim ve Cho (2001), bakır tozlarıyla ortaya koydukları çalışmalarında, Shima-Oyane modelinde bağıl yoğunluğun bire eşit ($RD=1$) olması durumunda modelin von Mises malzeme modeline eşit olacağını ifade etmişlerdir. Çalışmada bu oranın elde edilebilmesi için uygulanacak soğuk presleme basıncının GPa düzeyinde olduğunu ortaya konulmuştur. Araştırmacılar malzemenin dislokasyon yoğunluğunun preslemeye olan etkisini incelemiş, preslemenin başlangıcında dislokasyonlarının etkili olduğunu fakat prosesin devamında bu etkinin azalmasından dolayı dikkate alınmasına gerek olmadığını belirtmişlerdir.

Shima-Oyane malzeme modeline ait, Kwon vd. (2004) ortaya koyduğu parametreler bakır için olmasına karşın, içerisinde ağırlıkça %4,2 Ni, %1,5Cu, %0,5Mo, %0,5C ve %1 wax bulunan demir alaşımının analizleri aynı parametrelerle yapılmıştır. Ardından malzeme için yapılmış olan Drucker Prager analizi ile karşılaştırılmıştır.

Hassanpour ve Gadhiri (2004), medikal tozlarının presleme analizinde sıklıkla kullanılan bir akma modeli olan Heckel modelinin metal tozları için geçerliliğini incelemiştir. Araştırmanın sonucunda elastisite modülünün uygulanan gerilme ve bağıl yoğunlukla değiştiğini belirlemiş ve sonuç olarak elastisite modülünün akma gerilmesinin otuz katından fazla olan malzemeler için bu yaklaşımın uygun olmayacağı, dolayısıyla modelin bütün tozlar için geçerli olmayacağı bildirilmiştir.

Sakaue ve Yoshimaru (2005), çalışmalarında bakır tozlarının viskozitelerini ve yüzey pürüzlülüklerini tespit etmiştir. Küresel ve düzensiz şekilli bakır tozları için yapılmış farklı deneyler sonucunda küresel geometrili bakır tozları için viskozite değeri 1×10^2 ile 3×10^2 Pa.s olarak elde edilmiştir. Pokorska (2008), benzer çalışmasında elde ettiği grafik verilerden benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Lewis vd. (2005), 140 adet medikal toz granülünü, iki farklı malzeme özelliğinde iki boyutlu olarak modelleyerek analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda küresel olmayan tozlar için bir presleme algoritması ortaya koymuşlar fakat aynı zamanda küresel tozlar için bu şekilde bir algoritmaya ihtiyaç olmadığını ifade etmişlerdir.

Lewis vd. (2005), medikal tozlarla yaptığı tablet presleme analizinde Elastisite modülünü denklem (1.23) 'deki gibi ifade etmiştir. Shima-Oyane modelinin soğuk presleme prosesine uyum sağlaması açısından Elastisite modülünü porosite ve malzeme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Porozite ϕ , ile ifade edilmiştir. E elastisite modülünü, E_0 başlangıç elastisite modülünü, b ve c malzeme parametrelerini ifade etmektedir. Elastisite modülünün bu yaklaşımısinter MCC ve Mohr-Coulomb malzeme modelleri içinde geçerlidir.

$$E = E_0 \exp \left[- (b\phi + c\phi^2) \right] \quad (1.23)$$

Lee ve Kim (2007), medikal tozlarla yaptığı tablet presleme analizinde Elastisite modülünü tanımlamak için Lewis vd. (2005) ile aynı denklemi kullanmıştır. Bakır ve demir tozları için bu malzeme parametreleri $b= 5,56$ ve $c=4,29$ olarak tanımlanmıştır. Aynı çalışmada araştırmacılar, alüminyum ve bakır tozları ile yaptığı analizlerde Shima-Oyane

malzeme modelini kullanmıştır. Modelin sinterleme kaynaklı olmasından dolayı yüksek bağıl yoğunluklu malzemeler için iyi uyum sağladığını fakat düşük bağıl yoğunluklu malzemelerde farklılıklar gösterebildiğini ifade etmişlerdir. Lee (2007), bakır için verilen denklemdeki katsayıları değiştirerek Shima-Oyane malzeme modeli bünye denklemini aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir.

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^2 + 5,71(1-D)^{0,944} \left(\frac{p}{\sigma_y} \right)^2 - D^5 \quad (1.24)$$

Alves vd. (2006) çalışmasında sinterleme prosesini Shima-Oyane modeli ile incelemiştir. Çalışmada poisson katsayısı plastik poisson katsayısı şeklinde bağıl yoğunluğun fonksiyonu olarak aşağıdaki denklem (1.25) ile tanımlanmıştır.

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \left[2,49(1-D)^{0,514} \right]^2}{9} \right) / \left(1 + \frac{\left[2,49(1-D)^{0,514} \right]^2}{9} \right) \quad (1.25)$$

Vlachos ve Chang (2011) çalışmasında tamamen kuru malzeme için yaptığı deneylerde bakır tozlarının farklı kanallardan akışını incelemiş, tozların küreselliğine bağıl olarak viskozite katsayısının 1×10^{-4} ile 3×10^{-4} arasında değiştiğini belirlemiştir.

Wiacek vd. (2012) benzer bir yaklaşımla bezelye ve fasulye taneleriyle deneysel ve ayrık eleman yöntemiyle yaptıkları çalışmalarında etkin elastisite modülünün uygulanan basınçla değiştiğini bildirmişlerdir. Bu durum malzemenin plastik deformasyonu ile ilgili olduğundan elastik yaklaşımın modifiye edilmesi gerekliliği ortaya koymuştur.

1.3. Sürtünme Modelleri

Günlük hayatın bir parçası olan sürtünme davranışı yüzyıllardır mühendislik çalışmalarında araştırılan bir malzeme davranışı olmuştur. Yapılan çalışmalarda, statik ve dinamik olmak üzere iki temel sürtünme davranışı tanımlanmıştır. Toz metalürjisinde sürtünme davranışı birçok açıdan önem arz etmektedir. Tozların birbirleriyle etkileşimleri

sonucunda nihai geometrik şeklin elde edilmesinde, istenilen bağıl yoğunluğun yüksek hassasiyetle sağlanmasında sürtünme faktörü önemli olmakla birlikte son yıllarda sürtünmeli toz presleme gibi yeni yöntemler için de önem arz etmektedir.

Khoei vd. (2002), yağlayıcı kullanarak yaptığı sonlu elemanlar analizlerinde metal tozlarının düşük yükler altındayken gerilmelerin etkilendiğini fakat proses ilerledikçe yağlayıcı etkisinin giderek azaldığını ve yağlayıcının var olduğu ve olmadığı durumlar için bir ortalama sürtünme katsayısı alınabileceğini göstermiştir.

Simülasyon çalışmalarında sürtünme konusu öncelikle kalıp ve malzeme arasındaki sürtünme olarak ele alınmıştır. Bağıl yoğunluk ve malzeme özelliklerine göre sürtünme katsayıları kalıp ve malzeme arasında tanımlanmıştır. Sınka vd. (2003), Drucker-Prager akma modelini kullanarak yaptıkları tablet presleme analizinde bağıl yoğunluğa bağlı olarak, kohezyon, sürtünme açısı, elastisite modülü, Poisson oranı gibi değerleri inceleyerek medikal tozun kalıpla olan sürtünme katsayısını ortaya koymuşlardır.

$\mu=0,08-0,1$ aralığında sabit değerle, toz metalürjisinde soğuk presleme mekanizmasının araştırıldığı Al-Qureshi vd. (2005)'nin çalışmasında, metal tozları arasındaki sürtünme davranışının ölçülebilmesi için mevcut deney yöntemlerinden farklı deneyler yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Tien vd.(2007), çalışmalarında sadece metal tozlarının değil, bentonit tozlarının da presleme ve kalıp boşaltma süreçlerinde sürtünmenin yüksek etkili bir süreç olduğunu ve sürtünme katsayısı ölçümlerinin yüksek basınçtan etkilenerek farklılaştırıldığını ifade etmişlerdir.

Bhushan (2007), micro/nano elektro mikromekanik malzemeler üzerinde mikro/nano ölçek adezyon kuvveti, sürtünme ve aşınma davranışlarını boyut etkisi açısından incelemiştir.

Sürtünme davranışı iki temel ayırım olan statik ve dinamik değişkenlerin dışında sıcaklığa bağlı olarak ta farklılık göstermektedir. Nor vd. (2008), sıcak presleme esnasında yağlayıcıların, yağlayıcıların malzemeye ağırlık yüzdesinin, yağlayıcı ve malzeme karıştırma sürecinin sürtünme davranışı üzerinde etkilerini ortaya koymuştur.

Makro düzeyde sürtünme, yüzey işleme kalitesine bağlı olarak, yüzeyde kalan mikro boyuttaki tepeciklerden kaynaklanmaktadır. Bu tepecikler boyutunda işlemler yapıldığından mikro-makro sürtünme araştırma konusu olmaktadır. Mikro boyuttaki sürtünme davranışı ile makro boyuttaki sürtünme davranışı arasında temas yüzey alanının bir fonksiyonu olarak

Wanheim/Bay sürtünme modelini kullanan Peng vd.(2010) metal dövme işlemini modellemilerdir.

Renouf vd. (2011), araştırmasında sonlu elemanlar yönteminin 80'li yıllardan bu yana sürtünme davranışının sayısal analizle çalışmalarında, kuru temas tribolojisinin ifade edilmesinde önemli bir enstrüman olduğunu bildirmişlerdir.

Bera (2013), temas yüzeylerinde statik sürtünmeye neden olan yüzey pürüzlülüklerinin belirli bir basınç değerine kadar elastik, basıncın kritik bir değeri açmasıyla plastik ekil değitirdiklerini, analiz süresince plastik deformasyon kuvvetinin elastik deformasyon kuvvetinden çok daha büyük olduğunu göstermiştir.

Hangai vd.(2013), bakır tozlarının NaCl porozite sağlayıcı kullanılarak yapılan sürtünmeli toz presleme prosesini sürekli ortam analiziyle modellemilerdir. Benzer ekilde, Hangai vd. (2014) alımalarında alüminyum tozların büyük ölçekli yüzeylere kaplama sürecinde kullanılan sürtünme toz presleme yöntemini modellemilerdir.

Mikro boyutta sürtünmenin etkili olduğu bir başka mekanizmada aınmadır. Schmutz vd. (2010) mikroskobik dinamik kuvvetin ve sürtünme kuvvetinin bileşkesi olarak aşınma ölçümleri yapmışlardır. Cozza (2013) alımasında, Titanyum Nitrit (TiN) ve Titanyum Karbid (TiC) kaplamalarında sürtünme katsayısının mikro abrazif aşınma etkisini incelemiştir.

Zheng vd. (2013), sürtünme katsayısının, malzemenin ekil değiştirme sertleşmesi üssünün ve temas alanının bir fonksiyonu olarak tanımlandığı Tabor sürtünme modelini kullanarak micro şekillendirme prosesinde kuru sürtünmenin sürekli modellenmesini yapmışlardır. Bu çalışmada da sürtünme katsayısının uygulanan gerilme ile değiştiği görülmüştür.

Toz presleme prosesinin yoğunlukla uygulandığı başka bir endüstriyel alan olan medikal tablet presleme işlemiyle ilgili Krok vd.(2014) araştırmalarında, toz ve kalıp arasındaki sürtünme katsayısının, uygulanan gerilme ile değiştiği fakat gerilmenin belirli bir değerinden sonra $\mu=0,1$ civarındaki dar bir aralıkta hareket ettiği görülmüştür.

Avlonitis vd.(2014), temas halindeki iki yüzeyde oluşan kayma direncinin, gerçek temas yüzeyine oranı cinsinden ifade edilen bir sürtünme katsayısıyla dinamik sürtünme analizini yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda yüzey pürüzlülüğü deformasyonun sürtünme davranışına etkisini içeren bir dinamik sürtünme modelinin oluşturulma gerekliliği ifade edilmiştir.

1.3.1. Amonton-Coulomb Sürtünme Modeli

17. yüzyılda ilk olarak Amonton tarafından ortaya atılan daha sonra da Coulomb tarafından, literatürde bilinen halini almış olan bir sürtünme modelidir. Oluşan kayma gerilmesi yüzey normal gerilmesinin bir oranı olarak sabit bir katsayı ile değişmektedir. Sabit sürtünme katsayısı tanımlı model denklem (1.26)'da verilmiştir. Denklemde τ kayma gerilmesini, μ , sabit sürtünme katsayısını, σ_n , yüzey normal gerilmesini ifade etmektedir.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (1.26)$$

Ayrık eleman analiz yönteminin uygulanmaya başladığı ilk yıllarda temasın algılanması için eleman yüzeyleri, özel elemanlar, özel temas bölgeleri gibi teması algılayacak unsurlar oluşturulmaktaydı. Bu kapsamda Cameron ve Gethin (2001) metal tozları ile kalıp arasındaki sürtünme mekanizmasını ortaya koymak amacıyla yaptıkları çalışmalarında, toz tanelerinin etrafında yani sonlu elemanlar ağ örgüsü yapısını saran temas bölgesi olduğu şeklindeki bir algoritma ile analiz yapmışlardır. Geliştirilen teknikle, parçacıkların pürüzsüz ve sert yüzeylerdeki kaymalarını teorik olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Analiz sonucunda yüzeylerde ortaya çıkan Coulomb sürtünme katsayısının, kayma gerilmesine ve toz kütlelerine bağlı olduğu ortaya konulmuştur.

Karishna vd. (2004), demir ve bakır tozlarının karışımlarını kullanarak yaptıkları çalışmalarında, sürtünme katsayısının 0,15-0,3 arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Akma modeli parametrelerinin değişmesine karşın temas noktalarında elastik-plastik davranışın gözlemlendiğini bildirmiştir.

Procopio ve Zavalingos (2005), kaba ve ince ağ örgüsü yapısında von Mises malzeme modeli ile iki boyutlu analiz yapmışlardır. Analizler 0-0,3 arasında farklı sürtünme katsayıları ile yapılmış ve 0,192 değerinin Coulomb sürtünme modelindeki en uygun sürtünme katsayısı olduğu, bu sürtünme katsayısının presleme boyunca sabit kabul edilmesinin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında yeniden yerleşmenin olduğunu ayrıca temas noktalarında düşük bağıl yoğunluklarda bile akmanın meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir.

Azhdar vd. (2006), polimer tozlarıyla dinamik sürtünme, temas yüzeylerinin statik sürtünmeleri ve noktasal temas sürtünmelerini inceledikleri çalışmalarında, malzemenin

düşük bağıl yoğunlukta neredeyse pürüzsüz kayma eğilimi gösterdiğini, yüksek bağıl yoğunluklarda ise düşük sürtünme katsayıları ölçüldüğünü belirtmiştir.

Keshavarz vd. (2008), bakır tozları ve kalıp arasındaki sürtünmenin nihai ürün özellikleri üzerine etkilerini, sürekli model analiz yaklaşımında Coulomb sürtünme modeli ile açıklamışlardır. Makro boyutta toz presleme prosesi olmakla birlikte 0,1 sürtünme katsayısının, sürtünmesiz ve 0,3 sürtünme katsayısına göre daha iyi sonuçlar verdiği bildirmişlerdir. Benzer şekilde Khoei vd.(2006) çalışmasında 0,08 sabit sürtünme katsayısında Coulomb sürtünme modelini kullanarak toz presleme prosesini incelenmiştir.

Joun vd. (2009), Coulomb ve kayma sürtünme modellerini kullanarak metal şekillendirme prosesinde sürtünme etkilerini araştırmışlardır. Araştırmada, sabit sürtünme katsayısı kullanılmış ve analiz içerisinde her iki modelde sürtünme katsayısı olarak 0,1'den daha küçük değerler alınmıştır.

Khoei vd. (2009), çalışmasında Coulomb sürtünme modelini farklı sürtünme katsayılarında kullanmıştır. Sürtünme katsayısı olarak 0-0,08 arasında değerler kullanma gerekliliğini, küresel tozları temas yüzeylerindeki teğetsel kayma gerilmelerine bağlamışlardır.

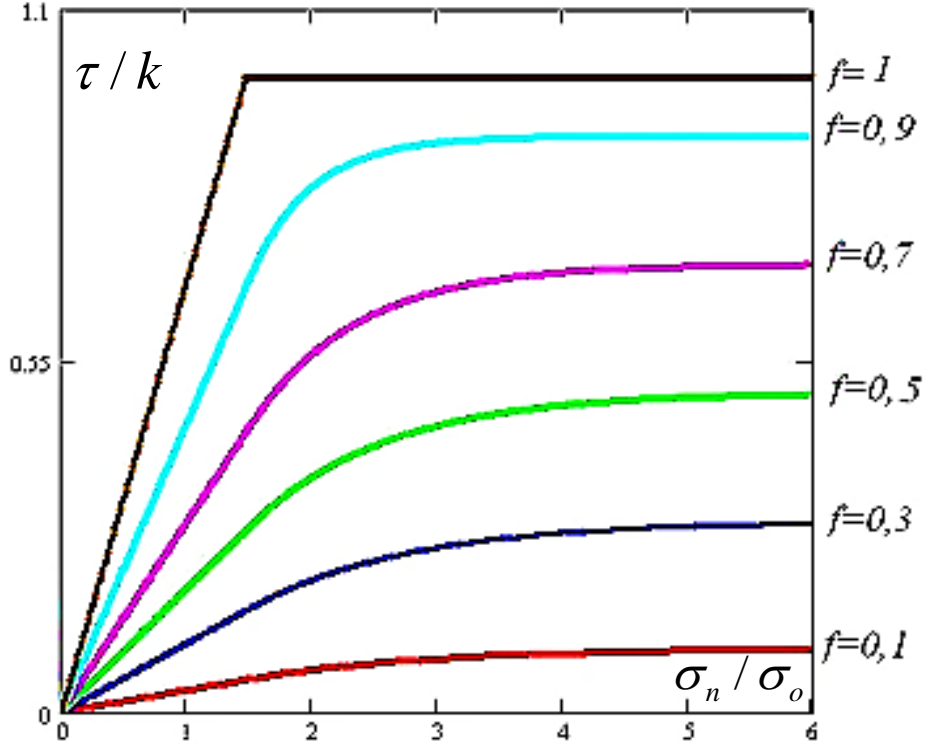
1.3.2. Wanheim/Bay Sürtünme Modeli

Malzemenin yüzey normaline uygulanan gerilmenin akma gerilmesi değerinin üzerine çıktığı durumlarda Amontons-Coulomb modelinin geçerli olmayacağı fikrinden yola çıkarak Wanheim vd. (1974) tarafından genel sürtünme modeli geliştirilmiştir. Kayma çizgisi teorisine dayalı denklem (1.27)'de verilen genel denklem Coulomb sürtünme modelinin temas yüzey alanı etkisi dahil edilmiş halidir. Burada, f , 0 ile 1 arasında değişen sürtünme faktörü, α' , gerçek temas alanının görünen temas alanına oranı, k , kaymada akma gerilmesidir.

$$\tau = f \cdot \alpha' \cdot k \quad (1.27)$$

Kalıpla malzemenin kayma çizgileri arasındaki açı kullanılarak deneysel yollarla elde edilen f , sürtünme faktörü ise τ/k ile ifade edilen kayma gerilmesinin kaymada akma gerilmesine bölünmesiyle elde edilen normalize kayma gerilmesi ve σ_n / σ_o ile ifade edilen

temas basıncının başlangıç akma gerilmesine oranı olan nominal normal gerilmenin fonksiyonu olarak elde edilen grafikler Şekil 1.6'da verilmiştir.[Cora (2004)]



Şekil 1.6. Wanheim/Bay sürtünme modelinde f , sürtünme faktörü değişimi [Cora (2004)]

Sürtünme faktörü grafiğinden kayma gerilmesinin, nominal normal gerilmenin 1,5 değerinden küçük gerilme değerleri için, Coulomb modelinde olduğu gibi, normal gerilmenin doğrusal bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Nominal normal gerilmenin üçten daha büyük değerleri için sürtünme faktörü sabit bir değer almaktadır. 1,5-3 arasındaki nominal normal gerilme değerleri lineer bölgeden sabit değere geçiş bölgesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Denklem (1.27)'de kullanılan bir diğer parametre olan α' temas alanı oranı ile ilgili olarak Petersen (1995) ve Tan (2002) çalışmasında Wanheim/Bay sürtünme modelinin sonlu elemanlar yöntemleri için gelişmiş hali verilmiştir. τ'/k ve σ_n'/k değerleri gerçek temas yüzey alanına bağlı oluşan oransal gerilme değerlerini ifade etmektedir.

$$\text{Eğer, } \sigma_n \leq \sigma_n' \text{ ise; } \quad (f.\alpha') = \frac{\tau}{k} = \frac{\sigma_n / \sigma_0}{\sigma_n' / \sigma_0} \frac{\tau'}{k} \quad (1.28)$$

$$\text{Eğer, } \sigma_n > \sigma_n' \text{ ise; } \quad (f.\alpha') = \frac{\tau}{k} = \frac{\tau'}{k} + \left(f - \frac{\tau'}{k} \right) \left(1 - \exp \left[\frac{\frac{\tau'}{k} \left(\frac{\sigma_n'}{\sigma_0} - \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \right)}{\frac{\sigma_n'}{\sigma_0} \left(f - \frac{\tau'}{k} \right)} \right] \right) \quad (1.29)$$

$$\left(\frac{\sigma_n'}{\sigma_0} = \frac{1 + \frac{\pi}{2} + \arccos(f) + \sqrt{1-f^2}}{\sqrt{3} \left(1 + \sqrt{1-f^2} \right)} \right) \quad (1.30)$$

$$\frac{\tau'}{k} = 1 - \sqrt{1-f^2} \quad (1.31)$$

Wanheim vd. (1974) çalışmasında ifade edildiği üzere Amonton-Coulomb modeli, sürtünme katsayısının 0,2 gibi küçük değerleri için Wanheim/Bay modeline çok yakın sonuçlar vermekte ve nominal normal gerilmenin 1,3 değerine kadar olan gerilme durumları için kullanılabilmekte fakat daha büyük gerilmeler için uygun olmamaktadır.

Guerin vd.(1999), Wanheim/Bay sürtünme modelinin, Coulomb sürtünme modeline göre avantajlarını araştırdıkları çalışmalarında ortaya koymuşlardır ki Wanheim/Bay modeli daha kesin sonuçlar vermekte ve Coulomb modeli gerilme sonuçlarında %20 daha fazla değerler vermektedir.

Mikro şekillendirme proseslerinde yağlayıcıların kalıp ve toz arasında sıkışarak kapalı ceplerde kalmasının etkilerini araştıran Engel (2006), Wanheim/Bay modelinin mikro şekillendirme işlemi için geometrik büyüklük etkisini karşılayabildiğini bildirmiştir.

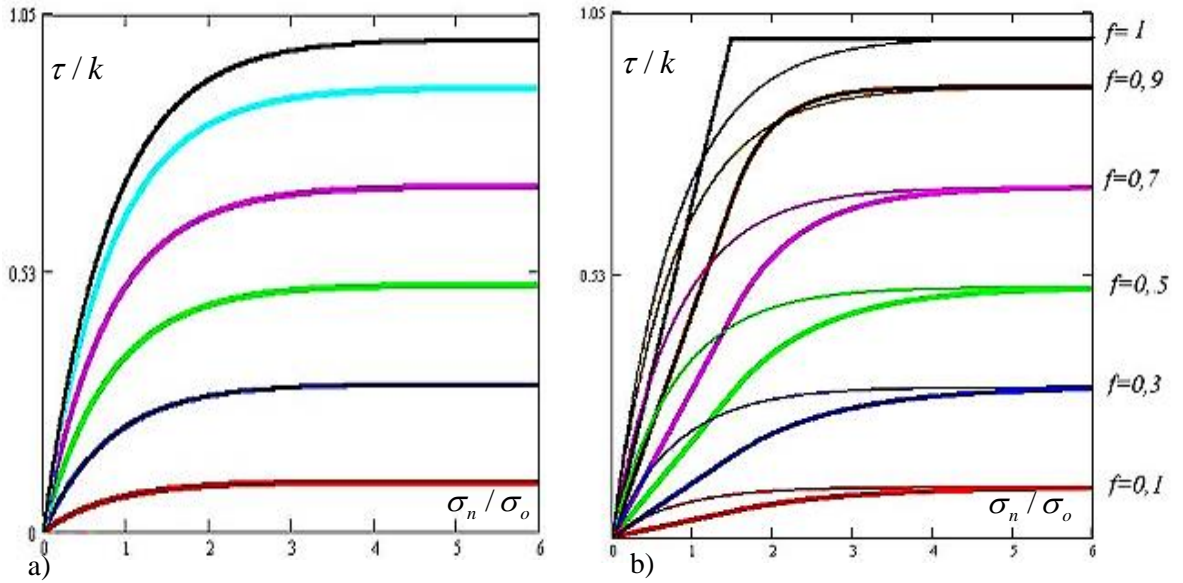
Mikro boyutta sürtünmenin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması amacıyla Wang vd. (2013) bakır kullanarak yüzeydeki nano kristalleri iyon huzmesi ışınımıyla kaldırmışlardır. Çalışma sonunda, küçük temas yüzeylerinin sürtünmesini açıklamak için Wanheim/Bay gibi modellerin kullanılmasının ve iyon huzmesi ışınımının, sürtünme kuvvetini azalttığını ifade etmiştir.

Wang vd.(2014), Wanheim/Bay sürtünme modelini kullanarak mikro şekillendirme tribolojisini açıklamaya çalışmıştır. Temas yüzeylerinde yağlayıcıların kullanıldığı

analizlerde geometrik büyüklük etkisi incelenmiş ve sürtünme katsayısının belirli bir değere kadar azaldığı ardından sabit kaldığı gösterilmiştir. Geometrik büyüklük etkisinin araştırıldığı başka bir çalışmada, Veganzones vd. (2014) sabit sürtünme faktörünün farklı büyüklükteki numunelerle sonlu elemanlar analizi yapmıştır.

1.3.3. Levanov Sürtünme Modeli

Levanov (1997) tarafından geliştirilen ve FORM2D (Moskova,1996) sonlu elemanlar ticari programı tarafından metal şekillendirme proseslerinin modellemesinde kullanılan bir sürtünme modelidir. Levanov sürtünme modeli de Wanheim/Bay modeli gibi gerçek temas yüzey alanının görünen yüzey alanına oranından yola çıkılarak elde edilmiş bir modeldir. İki modelinde genel amacı metal şekillendirme proseslerindeki plastik deformasyonun sürtünme üzerine etkilerini ortaya koymaktır. Levanov sürtünme modelinde sürtünme faktörünün değişimi Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7. Sürtünme faktörüne göre normalize kayma gerilmesinin nominal normal gerilmeye göre değişimi a) Levanov Modeli b) Levanov ve Wanheim/Bay karşılaştırılması [Cora (2004)]

Wanheim/Bay modelinden farklı olarak Levanov modelinde $\sigma_n \sim \sigma_n'$ (görünen yüzey alanındaki normal gerilme~gerçek yüzey alanındaki normal gerilme) arasındaki oransal değere bakılmaksızın bütün gerilme değeri için tek bir denklemde verilmiştir.

$$\frac{\tau}{k} = f \left(1 - \exp \left(-1,25 \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} \right) \right) \right) \quad (1.32)$$

Hallström (2000), kalıp doldurmanın dövme prosesine etkisini sayısal ve deneysel olarak incelediği çalışmasında Levanov sürtünme modeli ile Wanheim/Bay sürtünme modellerini birbirleriyle karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlarla desteklediği $m=0,2$ sürtünme faktörü, yalnızca iki modelin değil aynı zamanda Coulomb sürtünme modelinin de birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği bir değerdir.

Tomov vd. (2003), katı metal şekillendirme çalışmalarının sonlu elemanlar analizlerinde parametre seçimlerinde sürtünmenin etkisini ortaya koymak amacıyla sürtünmeli ve sürtünmesiz yaptıkları analizlerde sürtünme modeli olarak Levanov sürtünme modelini kullanmışlardır.

Titanyum alaşımlarının düşük sıcaklıklarda şekillendirme işlemlerinin modellendiği bir çalışmada Chumachenko vd.(2005), Levanov sürtünme modelinin, temas yüzeyi oranı, sıcaklık değişimi, adezyon kuvvet etkisi, yağlayıcı kalınlığı gibi birçok değişkeni denklem (1.32)'in ifade edebildiğini belirtmişlerdir.

1.4. Modelleme Yaklaşımları

Modelleme çalışmaların da yapılan çalışmanın doğal süreci yansıtması açısından modelleme yaklaşımları önem taşımaktadır. Literatürde kullanılan Sürekli Ortam (Continuum) Modelleme Yaklaşımı, Mikromekanik (Moleküler) Modelleme yaklaşımı, Ayırık (Discrete) Eleman Modelleme Yaklaşımı, Pürüzsüz Parçacık Hidrodinamiği (SPH) Modelleme Yaklaşımı, Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (MPFEM) bu bölümde incelenmiştir.

Zavalingos (2002), çalışmasında toz metalürjisi proseslerine ait sürekli ortam (continuum), mikromekanik (moleküler), ayırık eleman (discrete) ve çoklu parçacık sonlu elemanlar modelleme yaklaşımları değerlendirmiştir. Bu modellemelerin en gerçekçi olanlarının, karmaşık matematiksel yapıya sahip oldukları ve analitik çözümlerinin olmadığı ifade edilmiştir. Modellerin endüstriyel kuruluşlar tarafından tercih edilmesinin başlıca nedenleri olarak; Moore kanununa uygun bilgisayar ve depolama alt yapısının gelişimi, ticari

programların kalitesinin artarken kullanıcı ara yüzlerinin geliştirilmesi ve modelleme konusunda temel eğitim almış mühendislerin mezun edilmesi gösterilmiştir.

Khoei vd. (2002), çalışmasında metal tozu preslemelerinde, işlem esnasında deformasyon oluşan bölgede yeniden ve daha küçük ağ örgüsü yapısı oluşturmanın gerekliliğini açıklamış ve bir metal tozu presleme prosesine ait analizde olması gereken dört ana kriteri şu şekilde vermiştir; aşırı deplasman formülasyonu toplam yada yenilenmiş Lagrangian formülasyonu ile kullanılmalı, analiz algoritması hata tahmini ve yeniden ağ örgüsü oluşma özelliğine sahip olmalı, deformasyon sertleşmesi ve malzemenin lineer olmayan davranışını içeren bir malzeme modeli kullanılmalı ve etkili bir temas algoritması kullanılmalıdır.

Ayrık eleman yöntemi geniş bir çalışma alanında kısıtlı yeteneklere sahip olduğundan, yakın dönem çalışmalarında mikromekanik ve ayrık eleman modelleme yaklaşımları iç içe girmiş durumdadır. Bu durum Sinka'nın (2007) toz presleme prosesini genel hatlarıyla tanımladığı makalesinde karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, modelleme süreçleri sürekli ortam modellemeleri ve ayrık eleman modellemeleri şeklinde iki grupta irdelenmiştir.

Hartmann vd. (2008), metal tozlarının preslenmesi sürecinde plastik davranışın ifade edilmesinde, sabit zaman adımlarının yerel iterasyonlarda Newton-Raphson çözümlerinde yakınsama problemleri çıkardığından analizlerin birbirine eşit olmayan zaman adımlarıyla yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu yakınsama problemlerinin özellikle metal tozlarının yeniden yerleşmesi sürecinde, yer değiştirmeler ve birçok temasın aynı anda meydana gelmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Kozicki ve Donze (2008), ayrık eleman yöntemi temelli açık kaynak kodlu bir algoritma geliştirerek, ayrık eleman analizi, sonlu elemanlar analizi ve kafes geometri eleman modelleme yaklaşımlarını bir arada kullanmıştır. Özel bazı problemler için kodun (algoritmanın) geliştirilmeye ihtiyacı bulunduğunu fakat açık kod olması nedeniyle bu kodla çalışanların geliştirdikleri yenilikleri paylaşarak toz presleme proseslerinde kullanımın artacağını ifade etmişlerdir.

Kodam vd.(2009), kürelerin birbirine yapıştırılmasıyla elde ettiği karmaşık şekilli tozları inceleyerek aralarındaki kuvvet ve gerilme değişimlerini incelemiştir. Küresel olmayan geometriler için geometri etkisini içeren bünye denklemi kullanılması araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde her parçacık, ağırlığı, atalet momenti ve temas özellikleri ile tanımlanmaktadır. Parçacık rijit veya deforme edilebilir olmaktadır.

Temas halindeki parçacıkların miktarı ve örtüşme (sıkışma) oranları, zamana bağlı olarak temas kuvvetlerini vermektedir.

Ayrık eleman analizinin tarihsel süreç içerisindeki gelişimine bakıldığında öncelikle rijit parçacıkların oluşturduğu blokların hareket analizi için kullanılan ve ağ örgüsünden bağımsız olan model, yapılan kurucu denklem modifikasyonları ile elastik-plastik malzemelerin analizine uygun, parçacık etkileşimlerine kısmen cevap verebilen, kalıpla olan sürtünmeyi modele dahil eden bir yapıya kavuşmuştur.

Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi sayesinde yukarıda bahsedilen yöntemlere ilave olarak Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (Multi Particle Finite Element Method) adı verilen yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem mikro düzeydeki her bir parçacığı bağımsız bir sonlu elemanlar gövdesi olarak ele aldığından daha gerçekçi modeller oluşturulabilmektedir. Mikro düzeydeki bu gövdelerin oluşturduğu makro gövdelerin içerdiği yüksek düğüm noktası sayısı, çözümün süresi ve kesinliği açısından zorluklar içermektedir. Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar yöntemine benzer olarak ayrık eleman analizi ile sonlu elemanlar analizini birleştiren modeller Eberhart vd.(2004), Munjiza (2008) ve Labra vd. (2013) tarafından geliştirilmiştir.

1.4.1. Sürekli Ortam (Continuum) Modelleme Yaklaşımı

Sürekli ortam (continuum) modelleri, istenilen ürünün boyutlarını esas alarak, geometrik ölçeklendirme esasına göre oluşturulmaktadır. Yükleme ve sıcaklık gibi dış etkenler, temel denge denklemlerinde ve bünye denkleminde yer almaktadır. Yöntem genelde bir sonlu elemanlar analizine ihtiyaç duymaktadır. Bu şekildeki bir analizin genel bünye denklemleri;

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{mn} &= f(\sigma_{ij}, \theta; \lambda_i) \\ \dot{\lambda}_i &= g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \theta; \lambda_i)\end{aligned}\tag{1.33}$$

şeklinde ifade edilir. Burada σ , gerilme, θ , sıcaklık, λ_i , malzeme parametreleri değerlerini ifade etmektedir.

Bu modelleme, gözenekliliğin değişmesi ve malzeme yoğunluğunun artması prensibine göre şekillendiğinden plastik deformasyon, gözenekliliğin bir fonksiyonu olarak

karşımıza çıkmaktadır. Yükleme ve sıcaklık gibi dış parametreler ile bağıl yoğunluk gibi iç parametreler bünye denkleminde fonksiyonlar şeklinde ifade edilmektedir. Endüstriyel problemler için sürekli ortam elastik-plastik modeller en çok kullanılan modellerdir. Bu modeller, malzeme davranışlarını boyut ölçeğinde açıklamaktadır. Bu boyutlar, tanecik boyutlarının katları olup sürekli ortam mekanik model temelleri, yeterli miktarda tanecik içeren bir hacme, gerilme ve yer değiştirmeler tanımlanarak uygulanmaktadır.

Park (2007), bakır tozlarının soğuk preslenmesini sürekli ortam mekaniği ile modellemiştir. Araştırmada, bakır tozlarının presleme işlemi ile ilgili bağıl yoğunluğa bağlı olarak aşağıdaki bünye denklemini ve çözümünü geliştirmiştir. Akma yörüngesini ifade eden F fonksiyonu;

$$F = AJ'_2 + B(J_1 - s)^2 = \delta\sigma_b^2 \quad (1.34)$$

Burada A , B malzeme sabitleri, σ_b toz taneleri üzerine gelen tek eksenli gerilme, J_1 gerilme tansörünün birinci değişmezi, J'_2 deviatorik gerilme tansörünün ikinci değişmezidir. Malzeme parametreleri olan A ve B bağıl yoğunluk cinsinden tanımlanmış olup bu parametrelerin sinterleme işlemi için geçerli olmadığı belirtilmiştir.

Pavier ve Doremus (1999), demir tozları ile yapılmış ham deneysel verileri kullanarak, üç eksenli yükleme durumunda metal tozu davranışlarını incelemiştir. Önceki çalışmalara ait birçok bünye denkleminin ifade edildiği çalışmada tozun elastik-plastik davranışı incelenmiştir. Elastik davranışın yoğunluğa bağlı olarak lineer olmayan bir yapıda olduğu ortaya çıkarılmıştır. Malzemeye yüksek bir gerilme ve deviatorik gerilme oluşturacak yükleme uygulanıp von Mises akma kriterine bağlı kritik limit aşıldığında plastik davranış gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu plastik davranışın, analizde kullanılan tozun element ya da bileşiminin plastik davranışı ile aynı olduğu ortaya koyulmuştur.

Zavalingos vd. (2003), maden endüstrisinde yoğunlukla kullanılan silindir presleme prosesinin iki boyutlu analizini yapmıştır. Araştırmacılar, öğütme analizi ve presleme analizi olarak iki farklı analiz yapacak bir bünye denklem oluşturmuşlardır. Yapılan analizde, ABAQUS sonlu elemanlar kodu kullanılmıştır. Dinamik eksplisit (açık) sürüm tercih edilmiştir. Simülasyonun hızlandırılması için kütle ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır.

Cunningham vd. (2004) çalışmalarında, kohezyon ve iç sürtünmelerin ele alındığı Drucker Prager modeli ile yaptıkları tablet presleme analizinde, sürekli ortam yaklaşımındaki altı temel unsurun eksiksiz uygulanması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Bunlar, denge denklemleri, kütlenin korunumuna bağlı süreklilik denklemleri, problemin geometrisi, tozun gerilme-şekil değiştirme davranışını ifade eden bünye denklemleri, sınır şartları ve başlangıç koşullarıdır. Temas gerilmeleri ve malzeme özelliklerinin doğrusal olmaması durumunda problemlerin çözümü için önemli bazı kabul ve yalınlaştırmaların gerekli olduğunu belirterek sayısal yaklaşımların uygulanmasının çözümün elde edilmesinde daha etkin sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir

Jonsen ve Hägbläd (2005), ham gövde (green body) adı verilen, metal tozundan sinterleme öncesi soğuk preslenmiş parçalarda, proses esnasında kalan kalıntı gerilmeleri incelemişlerdir. Kalıntı gerilmeler, tablet preslemede zımba kaldırılması esnasında ya da makine parçası üretiminde, sinterleme esnasında kırılmalara neden olabilmektedir.

Bier vd. (2007), bakır tozlarını kullandıkları çalışmalarında inceledikleri toz hacmini bütün bir gövde olarak kabul etmişler ve kendilerinden önce yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırarak modellerin tanımlanmasında kullanılan malzeme parametrelerini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular ayrık eleman yöntemiyle elde edilen bazı bulgularla benzerlik göstermiştir.

Yukarıdaki literatür araştırmalarından da anlaşılacağı üzere, sürekli ortam modelleri bağıl yoğunluğun bir fonksiyonu olarak tanımlandığından, bu tez çalışmasının ileriki bölümlerinde kullanılacak olan sürekli ortam analizlerinde kullanılan malzeme modelleri MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane'dir. von Mises malzeme modeli ise gözeneksiz hacimler için tanımlandığından sürekli ortam analizi modellerinde kullanılmamıştır.

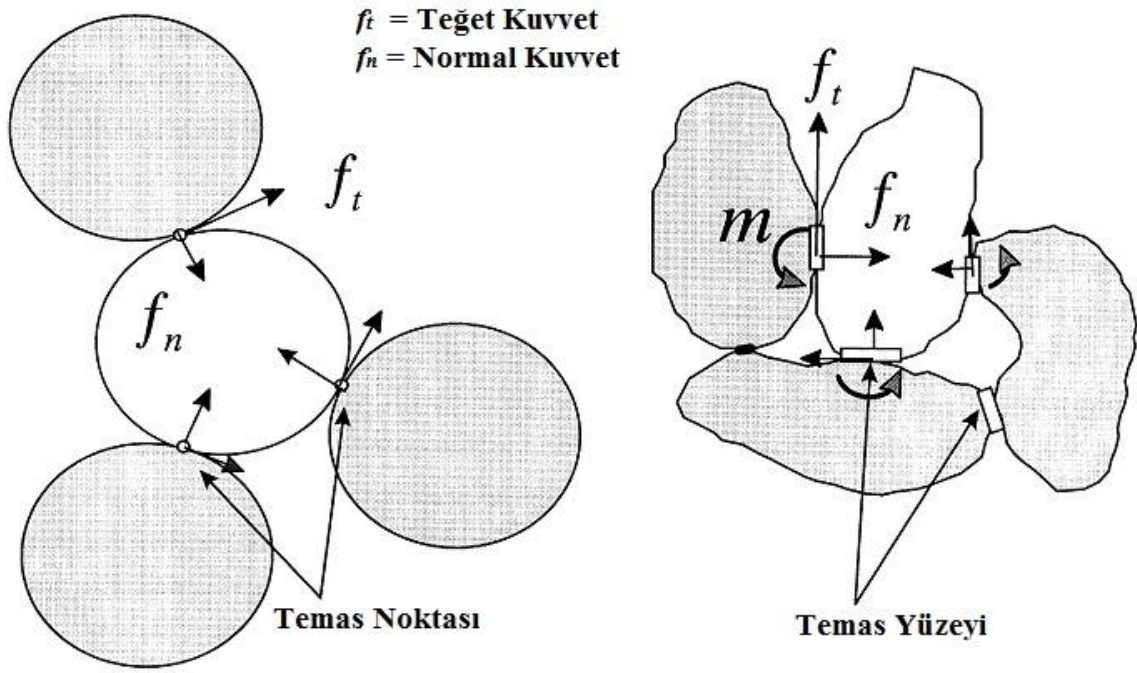
1.4.2. Mikromekanik (Moleküler) Modelleme Yaklaşımı

Mikromekanik analizde presleme prosesi genel olarak iki farklı yaklaşım uygulanarak mikro boyutta incelenmektedir. Bunlardan ilki rijit tozların titreşim veya kayma gerilmesi etkisiyle yeniden yerleşerek daha yoğun bir yapı ortaya koymasındır. Diğer yaklaşımda ise basma gerilmeleri etkisinde kırılma ve plastik deformasyona uğrayan tozların yeniden yerleşerek daha yoğun bir yapı ortaya çıkarmasıdır.

Gerilmelerin analizinde de iki farklı yaklaşım mevcuttur. Bunlar her elemanda eşit şekil değiştirme ve her elemanda eşit gerilme yaklaşımlarıdır. Her elemanda eşit şekil değiştirme yaklaşımında elemanlar üzerindeki gerilmeler, gerilme-şekil değiştirme bağıntılarıyla elde edilerek ortalama makroskopik gerilmeleri hesaplanmaktadır. Eşit gerilme yaklaşımında ise yerel deformasyonlar gerilme-şekil değiştirme yaklaşımıyla

hesaplanarak makroskopik ortalama bir deformasyon ve buna bağı makroskopik şekil değiştirmeler elde edilmektedir.

Iwashita vd. (2000), mikromekanik analizde kayma mekanizmalarını ifade eden kuvvetleri Şekil 1.8’ deki gibi belirtmişlerdir. Çalışmada, malzemenin yeniden yerleşme eğiliminde olduğu bildirilmiştir.



Şekil 1.8. Iwashita (2000)’nin çalışmasında mikromekanik modellerde temas tanımları

N adet, R yarıçaplı deforme olabilen kürenin x_1 , x_2 ve x_3 kartezyen uzayında bulunduğu, bunların kendi aralarındaki ortalama n tane temasın olduğu, p ’inci küreye etkiyen dış kuvvet F_p , kürenin pozisyonundaki küçük sanal değişim U_p ise temas deformasyonu kürelerin sanal hareketi ile elde edilebilir. i ’inci elemandaki $Nn/2$ temastaki kuvvetler f_i ve temas başlangıcındaki sanal adım u_i ise virtuel iş teoreminden;

$$\sum_{i=1}^{Nn/2} f_i \cdot u_i = \sum_{p=1}^N F_p \cdot U_p \quad (1.35)$$

B gövdesine etkiyen gerilme tansörü σ , sınır çekim kuvvetleri T ve kütle kuvvetleri $g\rho$, e' sonsuz küçük şekil değiştirme ise mikromekanik analiz aşağıdaki gibi sanal iş yöntemiyle ifade edilebilir.

$$\int_B \sigma : e' dV = \int_{\delta B} T \cdot U dS + \int_B g \cdot U \rho dV \quad (1.36)$$

$$\sum_{p=1}^N F_p \cdot U_p = \int_{\delta B} T \cdot U dS + \int_B g \cdot U \rho dV \quad (1.37)$$

$$\int_B \sigma : e' dV = \sum_{i=1}^{Nn/2} f_i \cdot u_i \quad (1.38)$$

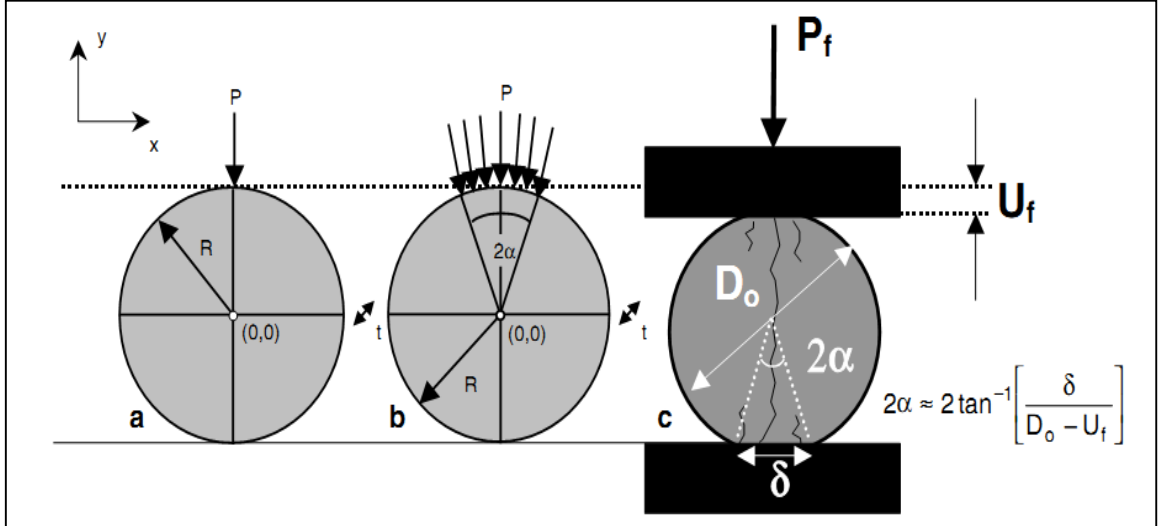
Henderson vd. (2001) mikromekanik analizde, başlangıç durumunda gerilme ve şekil değiştirmelerin sıfır olduğu, eşit yoğunluktaki malzemelerde, daha genel ortalama yüklemelere göre preslemenin gerçekleşmesi için gerekli gerilmenin belirlenmesinde, başlangıçta hidrostatik yüklemeye malzemenin akma yüzeyinin ve yüklemenin tamamen kaldırılmasından sonra hidrostatik yüklemenin neden olduğu deformasyonun tahmin edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Granüler malzemelerin preslenmesi için üç farklı mikromekanik model kullanmışlardır. Bu modellerden bir tanesi hacimsel şekil değiştirmenin bir fonksiyonu şeklinde tanımlanmış akma yüzeyine sahip izotropik bir malzeme, diğeri deformasyonun, kürelerin merkezinde meydana geldiğini kabul eden anizotropik bir malzeme, üçüncü ise temas kuvvetlerinin hesaplanmasına bağlı malzeme yaklaşımıdır. Araştırmacıların ortaya koyduğu bu modeller sonucunda, soğuk toz presleme proseslerinde malzemenin yeniden yerleşme göstereceğini bildirmişlerdir. Bu yeniden yerleşmenin incelenebilmesi açısından mikromekanik yaklaşım yeterli olmadığından mikro düzeyde farklı bir yaklaşım gerekmektedir.

Bu durum mikromekanik modellerin dezavantajı olan sadece fiziksel durum üzerinde yoğunlaşmanın göstergesidir. Örneğin presleme prosesinde sadece plastik deformasyon göz önünde tutulurken, taneciklerin yeniden düzenlenmesi ve fragmentasyon ihmal edilmektedir.

Procopio vd. (2003), Şekil 1.9'da şematik olarak gösterilen çapsal presleme prosesinin (diametrical compression) akma kriteri hesaplamasında ve malzeme özelliklerinin tayininde sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. İki boyutlu bu simülasyonda lineer elastik, elastik-plastik ve gözenekli elastik-plastik modeller ticari bir programla elde edilmiştir.

Çapsal presleme testi aynı zamanda, çapsal gerilme testi, Brezilya disk testi, endirek gerilme testi, pres ezilme testi, pres sertlik testi olarak da bilinmektedir.

Mikromekanik analizde, mikro ölçekten makro ölçüğe geçişte temasta bulunan eleman sayısı ve bu sayıya endekslenmiş malzeme parametreleri büyük önem taşımaktadır. Kruyt vd. (2009), mikromekanik analizde Elastisite modülünün belirlenmesi amacıyla bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışmada makro düzeydeki elastisite modülü ile mikro düzeydeki elastisite modülü ve bulk modülü arasında ilişki incelenmiştir. Analizde temas durumunun başlangıçta biliniyor olmasının gerekliliğine dair kabuller, temas geometrisinin ya ayrıık eleman analizi ile ortaya konulması ya da daha önceki deneysel sonuçlara dayanarak belirlenmesinin gerektiği bildirilmiştir.



Şekil 1.9. Procopio vd. (2003)'nin çalışmalarında uyguladıkları kuvvetlerin gösterimi

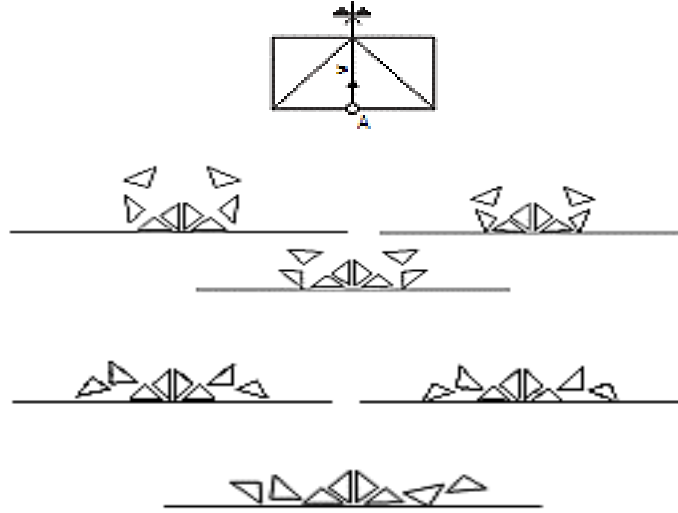
1.4.3. Ayrıık (Discrete) Eleman Modelleme Yaklaşımı

Müstakil (Distinct) eleman yöntemi olarak da bilinen ayrıık eleman yönteminin ilk kurucusu olarak Cundall (1971) bilinmektedir. Kaya ve zemin mekaniği problemlerinin çözümü için geliştirilen bu model daha sonra, parçacıklar arası etkileşimlerin Newton'nun ikinci kanunu ile ifade edildiği Cundall ve Strack (1979) çalışmasında ortaya konulmuştur.

Ayrıık (Discrete) eleman modelleme yaklaşımı zemin mekaniği çalışmaları sayesinde gelişmiştir. Genel olarak taneciklerin, parametreleri tanımlanmış çevreleri ile etkileşimlerini belirleyen sayısal bir modelleme yaklaşımıdır. Zemin mekaniğinde tercih edilmesinin

nedeni, dış yüklemeler ve yer değiştirmeler etkisindeki, taneciklerden oluşmuş bütün hakkında, tanecik hareketi, temas kuvvetleri gibi birçok makroskopik büyüklük ile ilgili bilgiler ortaya koymasındır. Bu nedenle tanecikler arası etkileşimin basit olarak ifade edilebilmesi yöntem açısından çok önemlidir.

Temel olarak, dinamik sistemlerin doğrusal olmamasından kaynaklanan düzensiz ve tahmin edilemeyen davranışları ifade eden deterministik kaos'tan (Munjiza (2004)) yola çıkılarak oluşturulmuş bir yaklaşımdır. Dinamik bir sistemde başlangıç durumunda simetrik olan elemanların yük etkisiyle simetrikliğinin bozulmasının nedeni yuvarlatma hataları ya da başlangıç koşullarındaki değişimler olabilmektedir. Bu nedenle temasın algılandığı ve bu temasa göre başlangıç koşullarının oluşturulduğu analizlere Sonlu-Ayrık (Finite-Discrete) Analizi adı verilmektedir. Şekil 1.10'da başlangıç durumunda bitişik ve simetrik olan parçaların kuvvet etkisiyle farklı yerleşimleri gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Sonlu-Ayrık Eleman Analizinde simetrikliğin bozulması
[Munjiza (2004)]

Ayrık eleman modeli ilk olarak ortaya atıldığında rijit parçaların oluşturduğu gövdelerin analizine yönelik bir çalışma olmasına karşın, özellikle 2000 yılından sonra modelde yapılan geliştirmeler sayesinde günümüzde deforme olabilen sürekli veya süreksiz ortamların büyük plastik şekil değişimlerini ve yer değiştirmelerini analiz edebilmektedir. Bu gelişmelerle birlikte modele uygun birçok temas algılama algoritması geliştirilmiştir. Model kendi içerisinde iki grupta incelenmiştir. Bunlar açık ayrık eleman modeli, (Explicit

DEM) ve kapalı (Implicit DEM) Ayrık eleman modelidir. Açık yaklaşım da kendi içerisinde statik çözüm ve dinamik çözüm olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Statik çözümde parçacıkların oluşturduğu kütlelerin yer değiştirmesi denge denklemleriyle, dinamik çözümde ise Newton'un ikinci kanunu ile elde edilir. Daha çok süreksiz deformasyon problemlerinde kullanılan kapalı Ayrık eleman modeli, sonlu elemanlar analizine benzer şekilde, Hamilton prensibi ya da minimum potansiyel enerji prensibi gibi iş-enerji metotlarıyla çözüme gider.

Bu modelleme yaklaşımı için oluşturulan temas algoritmaları da iki gruba ayrılır: temas bulma ve temas etkileşimi algoritmaları. Temas bulma algoritmalarında problem içerisinde görece birbirine yakın yani temasta bulunabilecek gövdeler için temas tanımlayıp diğerlerini temasta bulunmayacak şekilde tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım paket programların işlem zamanını kısaltmakla birlikte kırılma ve aşırı plastik deformasyonla oluşabilecek yeni temaslarda yakınsama sorunlarına neden olmaktadır. İkinci algoritma tipi olan temas etkileşiminde, başlangıçtan itibaren her elemanın temasa uygun ve her an temasın gerçekleşebilecek olduğu, temas meydana geldikçe de temas kuvvetlerinin belirlendiği bir yaklaşım kullanılmaktadır.

Algoritmaların oluşturulma şekli göz önüne alındığında Sonlu-Ayrık eleman analizinde ağ örgüsü yapısında başlangıç koşulları belirlenmiş bir sistem için öncelikli olarak temasın algılanması ve ardından Newton'un hareket kanununa bağlı olarak parçacıkların, dengelenmemiş kuvvetler etkisi altındaki hareketlerinin sonuçları incelenmektedir. Ransing vd. (2000) demir tozları için yaptıkları modellemede temasın algılanması için aynı yöntemi kullanmışlar ve Cam Clay, Gurson modeli gibi malzeme modellerini iki boyutlu olarak karşılaştırmışlardır. Yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar, tanecik ivmelenmesinin ihmal edildiği ve yalnızca uygulanan kuvvetlerin ele alındığı ayrık eleman yönteminin eksik yönlerini ortaya koymuştur. Sonuçlar göstermiştir ki, ayrık eleman modelinde Gurson malzeme modelinin birlikte kullanılması deneysel sonuçlara çok yakın sonuçlar vermesine karşın, büyük hacimli işlemler için kullanışlı olmamaktadır.

Gethin vd. (2001), granüler boyutta modellemeyi, ayrık (discrete element) elemanlar, sonlu elemanlar ve sürekli ortam modelleri ile yapıp karşılaştırmışlardır. Analizler iki boyutlu olarak yapılmıştır. Ayrık yöntemde von Mises akma kriteri yardımıyla her eleman kendi kütlesi ve çevresi ile ele alınmıştır. Her taneciğin komşu tanecikle temasta olduğu ve kalıp zeminine paralel durdukları kabul edilmiştir. Temastaki iki taneciğin gelen kuvvetleri sönümlenme ve elastik yaylanma etkisi olduğu ifade edilmiştir.

Metal tozunun bir dizi huni yardımıyla kalıba doldurulması düzgün dağılımsız toz yoğunluğuna neden olmaktadır. Kalıp duvarları ve metal tozu arasındaki sürtünmenin neden olduğu artık gerilmeler, “green body” (ham gövde) adı verilen sinterleme öncesi yapıda kalmaktadırlar. Cocks (2001), malzeme modellemesini oluştururken, makroskopik gerilmeyi Σ_{ij} , makroskopik şekil değiştirmeyi $\dot{\epsilon}_{ij}$ ve malzeme sabitlerini de S^k ($k=1\dots n$, n malzeme sabiti sayısı) olmak üzere adımsal (incremental) plastisite teorisini kullanmıştır. Bu çalışmada model için tanımlanan akma yörüngesi;

$$F(\Sigma_{ij}, S^k) = 0 \quad (1.39)$$

şeklinde ortaya konulmuştur. Plastik şekil değiştirme oranı ise, bir Δ plastik katsayısına bağlı olarak (1.40) denkleminde ifade edilmiştir.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \Delta \frac{\partial F}{\partial \Sigma_{ij}} \quad (1.40)$$

Benzer bir ayırık-eleman modelleme yaklaşımında enerji denklemi ise Narayanasamy vd. (2001) tarafından aşağıdaki denklem (1.41)'de verilmiştir.

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{(1+\nu)}{E} \sigma'_{ij}{}^2 + \frac{(1-2\nu)}{3E} \sigma_{kk}{}^2 \right) \quad (1.41)$$

Burada, W hacim başına düşen şekil değiştirme enerjisidir. Şekil değiştirme enerjisinin denklem (1.42)'de ifade edildiği gibi malzemeye bağlı kritik bir K değerine ulaştığında akma gerçekleşir.

$$3(1+\nu)\sigma'_{ij}{}^2 + (1-2\nu)\sigma_{kk}{}^2 = K \quad (1.42)$$

Chtourou vd. (2002), demir tozları ile yaptıkları sayısal çalışmada, modeli iki boyutlu ve izotropik kabul etmiş, cap (kapak) modelleri ile Kuhn-Shima modelini karşılaştırmıştır. Sonlu elemanlar analizinde, bir lokal yoğunluk ölçme tekniği geliştirilerek sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu analiz neticesinde çözümün asimetric kabulünün gerekli olduğunu ifade etmişlerdir. Ulaşılan bu sonuç ayırık sonlu elemanlar analizinin üç

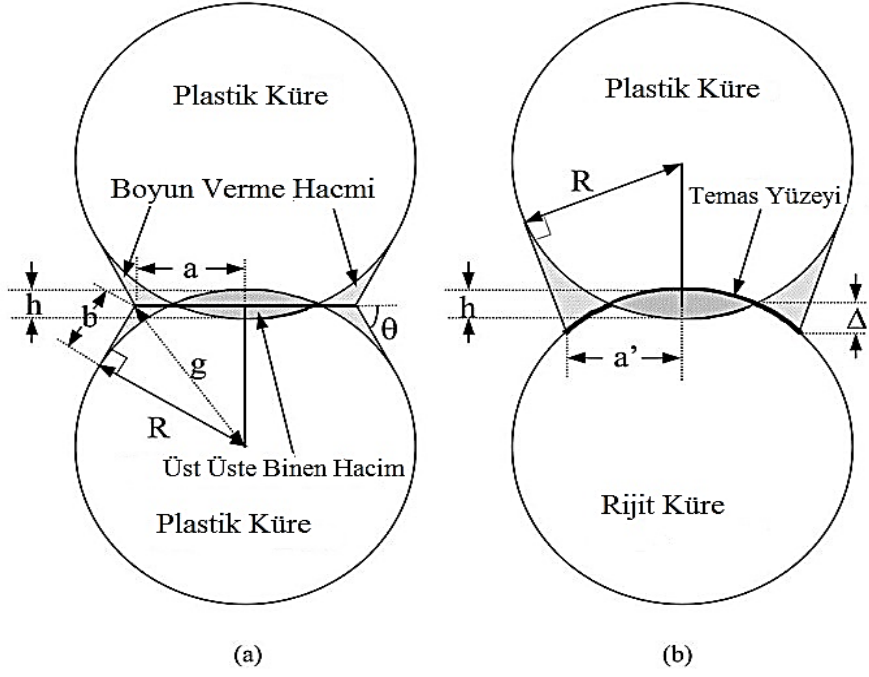
boyutlu yapıma gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen Cap malzeme modeli toz presleme adımlarını çok iyi ifade edebilmesi rağmen parametrelerin fazla olması standart bir kalibrasyon prosesi geliştirilmesini güçleştirmektedir.

Gethin vd. (2003), ligament ve kırılma yapıdaki tozlar için akma kriterlerine uygun bir ayrık deforme olabilen eleman modeli geliştirmişlerdir. İki boyutlu analizde, taneciklerin küresel olduğu, düzlem şekil değiştirme kabulleri ile yüksek başlangıç yoğunluğundaki akma düzlemlerini ifade etmişlerdir. Modelde ayrık elemanların, sonlu yer değiştirme ve dönmelerini tamamıyla bağımsız analiz ederken elemanlarda oluşan yeni temas durumlarını da simülasyona eklemiştir. Elemanın kinetik davranışları ile ilgili kabuller yapılırken iç ve dış kuvvetlerin dengede olduğu yaklaşımıyla sınır şartları tanımlanmış ve bünye denklemleri oluşturulmuştur. Ligament yapılar için kayma gerilmesinin etkin olduğu von Mises malzeme modeli ve kırılma yapılar için normal gerilmelerin etkin olmasından dolayı Rankine kırılma modeli ele alınmıştır. Çalışmada temasın algılanmasında küresel malzemenin dış yüzeyine temas bölgesi tanımlanmıştır.

Martin vd. (2003), bakır, alüminyum ve bronz tozları için izostatik presleme prosesinde tozların yeniden yerleşmelerini ayrık eleman modeli ile çalışmışlardır. Çalışmada iki metal tozu küresinin temas noktasındaki kuvvetlerin analizi ile malzemenin bağıl yoğunluk- gerilme, bağıl yoğunluk-koordinasyon sayısı (toz çapına bağlı parametre) gibi değişkenleri incelenmiştir. Parçacıkların yeniden yerleşme davranışı ve temas noktasında plastik deformasyona uğrayan bölgenin ihmal edilmemesi çalışmanın öncü detaylarından.

Skrinjar ve Larsson (2004), izostatik presleme de ayrık eleman analizini kullanarak malzeme çapının gerilme ve bağıl yoğunluk üzerine etkilerini araştırmıştır. Küresel metal tozları arasında tanımladıkları temas algoritması, Martin vd. (2003) çalışmasına benzer şekilde bağıl yoğunluk-gerilme, bağıl yoğunluk-koordinasyon sayısı analizleri yapmışlardır. Bu analizin eksik yönleri olarak metal tozlarının sürtünmesiz kabul edilmesi ve tozların kalıp içerisine düzgün istiflenmiş bir şekilde yerleştirilmesi karşımıza çıkmaktadır.

Sweeney vd. (2003) plastik deformasyona tabi tutulan presleme prosesinde oluşan gözenek dağılımının üç boyutlu analizini ayrık eleman yöntemi ile yapmıştır. Çalışmada ele alınan 4000 adet eşlenmiş, küresel geometri ve bağıl yoğunluğu 0,64 olan parçacıklar, önce homojen mükemmel plastik küresel tanecikler olarak, ardından %30 elastik ve %70 plastik tanecikler olarak modellenmiştir. Ayrıca çalışmada plastik-plastik gövde teması ve rigid-plastik gövde temaslarında ortaya çıkan boyun verme durumu aşağıdaki Şekil 1.11'de şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1.11. a) Plastik-Plastik gövde ve b) plastik-rijit gövde temasında boyun verme hacimleri [Sweeney (2003)]

Munjiza (2004) Sonlu-Ayrık Eleman Metodu adını verdiği kitabında, temas içeren bir sınır değer probleminin varyasyonel çözümünün, bir Γ bölgesi sınırlarında tanımlanmış Π fonksiyonun temas parametrelerine bağlı olarak çözümüyle aynı olduğunu belirtmiştir. Bu temas parametrelerinin elde edilmesinde ise en küçük kareler, Lagrange çarpanları ve penaltı fonksiyonu olarak üç farklı çözüm metoduna yer vermiştir. Aşağıdaki (1.43) denklemi temas parametrelerini ifade eden Lagrange çarpanlar fonksiyonu olmak üzere;

$$\int_{\Gamma} \lambda^T C(u) d\Gamma \quad (1.43)$$

Sonlu elemanlar çözümüne ait bünye denklemi aşağıdaki gibi oluşur;

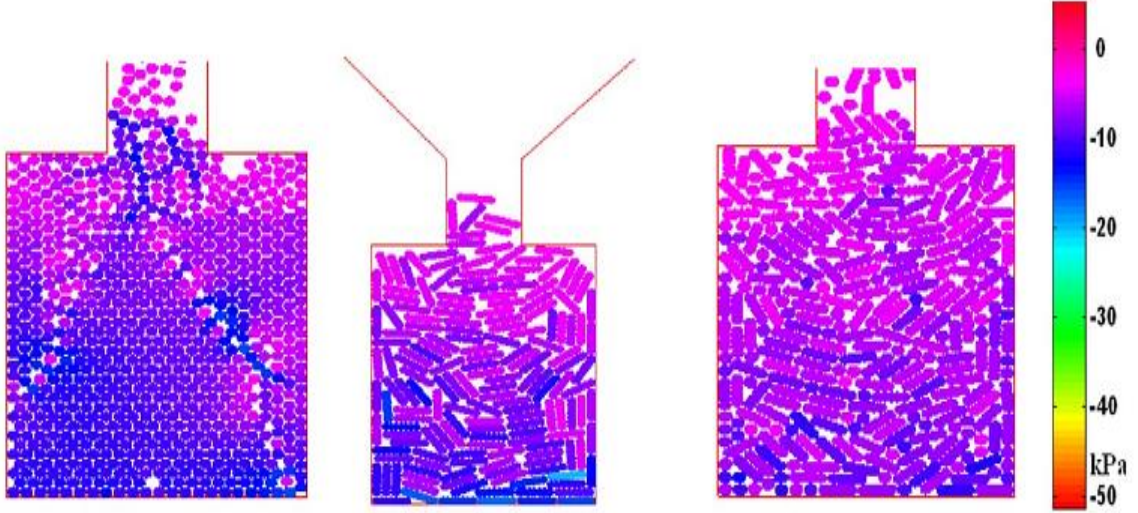
$$\delta \Pi(u, \lambda^T) = \delta \Pi(u) + \delta \int_{\Gamma} \lambda^T C(u) d\Gamma = 0 \quad (1.44)$$

Burada λ^T , Γ bölgesinde tanımlı bağımsız fonksiyonları ifade etmektedir ki bunlara Lagrange çarpanlar denilmiştir. Denklem (1.44)'te her üç terimin de sıfır olması gerekmektedir. Bu

çarpanlar kullanılarak elde edilen çözümler, sistemin temas kuvvetleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Martin (2004), yeniden yerleşen metal tozlarında olası elastik ve plastik deformasyon ve kırılmaları incelemiştir. Bağıl yoğunluğa göre elastisite modülü ve poisson sayısı gibi değerler ayrık eleman yöntemiyle analiz edilmiştir.

Gethin vd. (2006), medikal tozlarla yaptıkları çalışmalarında farklı yapıdaki tozların kalıplara doldurulma prosesini mikro düzeyde incelemiştir. Farklı şekil ve boyutlara sahip tozların kalıba akarken maruz kaldıkları gerilmeler ortaya konulmuştur. Şekil 1.12’de verilen çalışmaya ait sonuç grafiğinde, farklı geometrilere sahip tozların kalıba doldurulduktan sonra küçük hacimli tozların daha yüksek gerilmeler altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 1.12. Gethin vd. (2006)’nın çalışmasında kalıp doldurma sürecinde oluşan gerilmeler

Malone ve Xu (2008), temas algılamada yoğunlukla kullanılan doğrusal yay sönümlenme ve doğrusal olmayan “Hertzian” yay sönümlenme temas modellerini kullanarak oluşturdukları ayrık eleman analizinde, tanecikli malzemeler için model parametrelerini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, malzemelerin belirli bir yükseklikten bırakılarak elde edilen sönümle katsayılarının temas algoritmalarına uyumu irdelenmiştir.

Frenning (2008), çalışmasında ayrık eleman analizi ile medikal tozların soğuk preslenmesini üç boyutlu olarak modellemiştir. Çalışmada farklı ağ örgüsü yapısına sahip

modellerin kalıp içerisindeki sıkıştırılma miktarına bağlı olarak oluşan gerilmeler, Heckel sayısı, koordinasyon sayısı gibi değerler analiz edilmiştir.

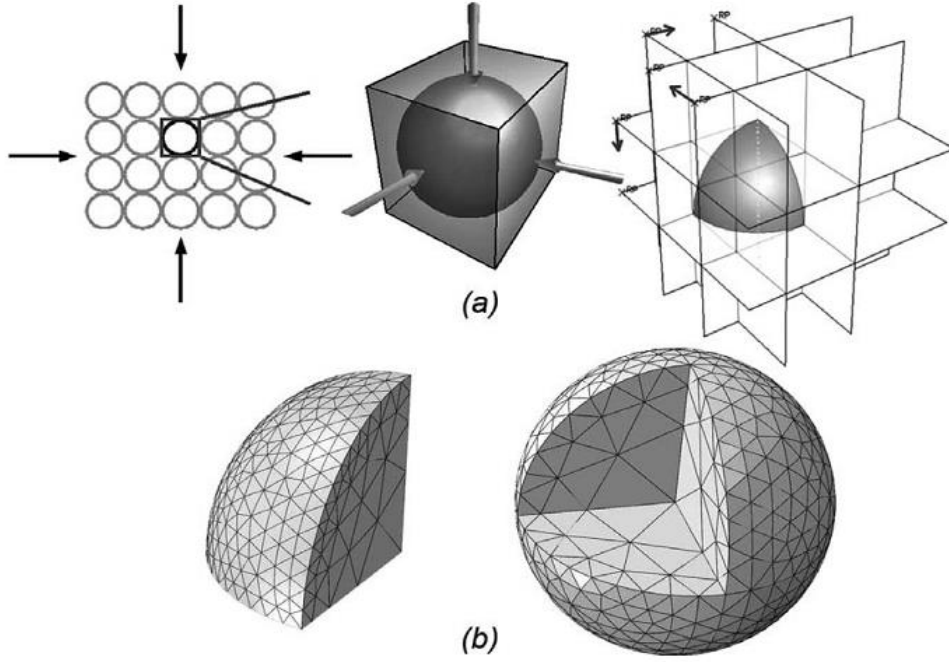
Marketos ve Bolton (2009), kumtaşı kütesinin, basma ve kayma gerilmeleri altında oluşturduğu sıkışma bantlarını ayırık eleman modelleme yaklaşımı ile incelemiştir. Marketos ve Bolton (2009) ve Frenning (2008)'in çalışmalarında görüldüğü üzere toz sıkıştırma proseslerinde çok farklı alanlarda ayırık eleman modelleme yaklaşımı yaygın olarak kullanılmıştır.

Bierwisch vd. (2009), hareket eden bir kabın içerisindeki metal tozlarının dairesel şeklindeki doldurulması esnasında toz kürelerinin temasını ayırık eleman modeli ile tanımlamışlardır. Konteynır hızına bağlı kalıp içerisindeki toz miktarının incelendiği çalışmanın sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçları değerlendirilmiştir.

Harthong vd. (2009), yaptıkları ayırık eleman analizinde metal tozlarının soğuk presleme proseslerini mikroskobik düzeyde inceleyerek temas mekanizmasını değerlendirmişlerdir. Şekil 1.13'de gösterildiği üzere tek bir küresel tozun sekizde biri incelenerek toz hacminin tamamı hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Bu tüme varım yaklaşımın kullanılma sebebi, düşük eleman sayısı, elemanların birbirleriyle temaslarının olmaması ve analiz maliyetlerinin azalmasıdır. Bunun yanı sıra küresel tozun tamamen plastik ve sürtünmesiz kabul edilmesi, elemanların yeniden yerleşme etkisinin analize dahil edilmemiş olması, bu analizin eksik yönleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ayrık eleman analiz yönteminde sıklıkla kullanılan yöntem geometrik temelli algoritmalarıdır. Jerier vd. (2010) çalışmasında küp şeklinde bir hacim içerisine küresel tozların paketlenmesine örnek bir algoritma ortaya koymuştur. Çalışmada, öncelikle her küresel toz tanesinin yerleşeceği uygun merkez noktası üç boyutlu uzayda tanımlanmış üçgensel yüzeylerin köşeleri olacak şekilde belirlenmiş ardından bu köşe noktalarında birbirlerine teğet ve temas konumunda olması sağlanmıştır.

Shuang vd. (2010), ayırık eleman analiz yöntemini kullanarak yüksek hızlı presleme prosesini tanımlamıştır. Yüksek hızlı presleme, malzemenin saniyenin beşte biri kadar süre içerisinde soğuk presleme basıncının ve zımba yer değiştirmesinin tamamlanmasını ifade etmektedir. Çalışma, yöntemin soğuk presleme prosesine uygunluğunu ortaya koymanın yanı sıra sönümlenme etkisinin nihai gerilemeleri ihmal edilebilecek düzeyde etkilediğini göstermiştir.



Şekil 1.13. Bir metal tozunun preslenme prosesinin şematik gösterimi [Harthong vd.(2009)]

McCarthy vd. (2010), ayrık eleman analizlerinin niceliksel geçerliliğini ortaya koymak amacıyla, ortalama 4,76 mm çapındaki metal bilyeleri bir dairesel kayma hücresi diski içerisinde incelemiştir. Kuvvet, gerilme ve kinematik teoriye ait sonuçlarla deneysel sonuçların birbirleriyle son derece uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Ayrık eleman analizinde kullanılan bir diğer temas algılama yöntemi Voronoi hücreleri yöntemidir. Bu yöntem analiz edilmek istenen küresel tozların tamamının küp şeklinde bir hücre içerisinde bulunduğu bir yaklaşımdır. Jerier vd. (2011), soğuk presleme prosesini bu yaklaşımla analiz etmiştir. Voronoi hücrelerinin hareketlerini Newton'un ikinci kanunu ile ifade ederek von Mises malzeme modeliyle geliştirdikleri algoritma ile süreci açıklamışlardır. Yaklaşım bir çok hücrenin bir arada kullanılmasına imkan sağlayarak avantaj oluştururken, hücrelerin yeniden yerleşmesi süreci olmadığından tozun gerçek davranışından uzaklaşmaktadır. Sonuçların deneysel sonuçlara uygun olmasına karşın modele sürtünme ve kohezyon etkisinin eklenmesi gerekliliği araştırmacı tarafından belirtilmiştir.

Tanecik paketleme algoritmaları, kayma ve yoğunluk paketleme algoritmaları, presleme ve sinterleme algoritmaları literatürde ayrık eleman yönteminin önemli uygulama alanlarıdır. Chung ve Ooi (2011), çalışmalarında ayrık eleman yöntemi ve sonlu elemanlar

analizi arasında matematiksel bağıntıyı açıklamışlardır. Ticari bir simülasyon programında bulunan algoritmaların matematiksel temelleri, farklı ağ örgüsü yapılarıyla örneklerek ortaya konulmuştur.

Guo vd. (2011), çalışmalarında ayırık eleman modeli ile bir akışkanlar mekaniği sayısal modelini birleştirerek metal tozlarının kalıp doldurma prosesini modellemiştir. Çalışmada iki tip modelleme mevcuttur. Birinci tipte 21,096 ile 105,480 arasında değişen sayıda metal tozu küresinin üç boyutlu olarak kalıba doldurulması modellenmiştir. İkinci tipte ise kalıbın sadece bir dilimi alınarak modelleme yapılmıştır. Çalışma neticesinde zaman ve basınca bağlı olarak kalıp içindeki toz kalınlığı ve toz hareketleri incelenmiştir.

Shilko vd. (2011), Ayırık eleman analiziyle heterojen elastik-plastik malzemelerin modelini ortaya koydukları çalışmalarında, parçacık etkileşiminin dikkate alınarak plastik deformasyonun nasıl elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Ayırık eleman analizi, çoklu parçacıkların bulunduğu akış modellemelerinde de kullanılabilir. Wang vd. (2011), düzensiz çok fazlı akışlarda parçacıkların sürüklenme davranışını, parçacık dağılımının heterojen olduğu durumlarda incelemiştir.

Höhner vd. (2011), çoklu temas durumlarında küresel olmayan tozların temasını ifade edebilmek amacıyla çokgen temas algılama algoritması ile yarı küre temas algılama algoritmalarını ayırık eleman yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Çalışma, geometrinin ayırık eleman temas gerilme değerlerini ne ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

Soroush ve Ferdowsi (2011), farklı çaplardaki küresel tozları küp şeklindeki bir kalıba yerleştirerek tekrarlı yükler altındaki davranışlarını ayırık eleman yöntemiyle mikro düzeyde incelemiştir. Tozların temaslarına ilişkin parametrelerin değişimi ve yeniden yerleşmelerine ait yer değiştirmeler çalışmada ortaya konulmuştur.

Szarf vd. (2011), iki boyutlu olarak modelledikleri ayırık eleman analizinde, farklı geometrik şekilli partikülleri birbirlerine yapıştırma algoritmaları ile birleştirerek yeni algoritmalar oluşturmuş ve oluşan yeni partikül geometrilerinin ayırık eleman analizlerini karşılaştırarak düzensiz geometri toz analizleri için uygunluklarını incelemiştir.

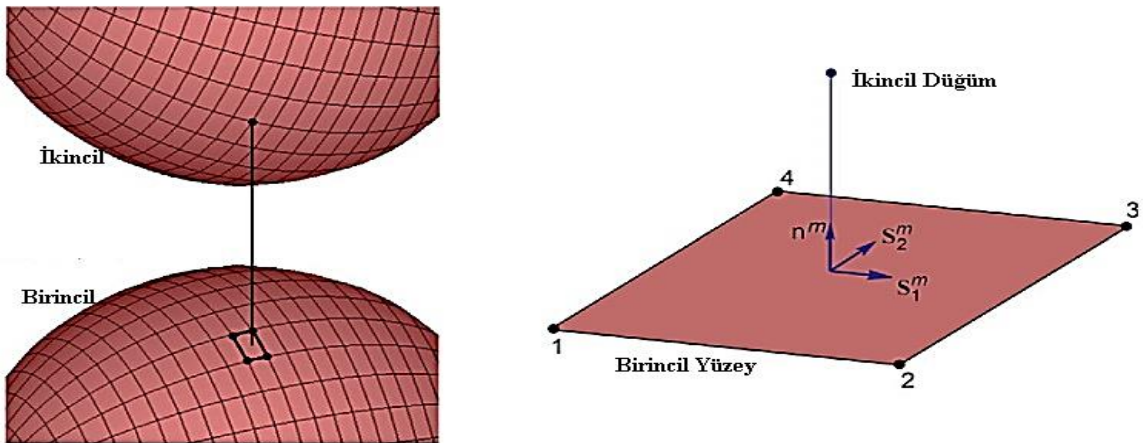
Shamsi ve Mirghasemi (2012) farklı geometrik özellikli malzemelerin ayırık eleman analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada küresel tozların birleşerek oluşturdukları karmaşık şekilli tozların sürtünme katsayıları modellenmiştir. Analiz sonucunda karmaşık şekilli tozlar için sürtünme katsayısı 0,5 olarak elde edilmiş ve tozların geometrilerinin küreselleştikçe sürtünme katsayısının ve buna bağlı olarak presleme basıncının azaldığı ortaya konulmuştur.

Nwose vd. (2012), kalıp doldurma prosesinde ayrıık eleman yöntemini kullanmıştır. Oluşturulan modele, kohezyon ve viskoz etkiler de dâhil edilmiştir. Farklı akış hızlarında kalıp bağıl yoğunluğunun değişebileceği ve dolayısıyla metal tozlarına etkiyecek gerilmelerin değişebileceği ortaya konulmuştur.

Benzer şekilde bir silo akışında parçacık geometrisinin akış üzerine etkisi Höhner vd. (2012) tarafından ayrıık eleman yöntemiyle incelenmiştir. Silo akışı esnasında parçacıkların plastik deformasyona uğramamaları parçacıkların rijit olarak kabul edilmesine imkân sağlamakta ve ayrıık eleman analiz yöntemini çalışma için uygun hale getirmektedir. Parçacıkların rijit kabul edilmesi temas algılanmasında ve etkileşim analizinde kolaylık sağlamaktadır.

Jiang vd. (2013), SiC seramik tozlarıyla yaptıkları çalışmalarında ifade ettikleri gibi, ayrıık eleman analizi, parçacıklar birbirleri üzerine gelebilen ya da birbirlerinden ayrılabilen, iki boyutlu analizlerde dairesel, üç boyutlu analizler de ise küresel olarak kabul edilmektedir. Buna rağmen bu parçacıklar üzerinden normal ve kayma gerilmelerinin hesaplanabileceğini Jonsén vd. (2011) göstermişlerdir.

Son yıllarda kullanılan ticari amaçlı programlarda düğüm-yüzey, yüzey-yüzey ve düğüm-düğüm temas algoritmaları bulunmaktadır. Khoei vd. (2013) çalışmasında, Şekil 1.14'te gösterilen temas algoritması tanımlanarak düğüm-yüzey yaklaşımın ayrıık eleman modeline uyumlu olduğunu göstermiştir. Yöntemde düğüm ve yüzeyler birincil ya da ikincil olarak üç boyutlu uzayda tanımlanmakta ve hareketlerine bağlı olarak temasta olup olmadıkları incelenmektedir. Araştırmacılar Coulomb sürtünmesini uygulamış ve sürtünme katsayısını 0,08-0,3 arasında değişen değerlerde kullanmıştır.



Şekil 1.14. Düğüm-yüzey temas algılama tanımının şematik gösterimi [Khoei vd. (2013)]

1.4.4. Pürüzsüz Parçacık Hidrodinamiği (SPH) Modelleme Yaklaşımı

Literatürde, Smoothed Particle Hydrodynamics olarak bilinen Pürüzsüz Parçacık Hidrodinamiği (SPH) Modelleme Yaklaşımı iki grup araştırmacı, Gingold ve Monaghan (1977) ve Lucy (1977), tarafından birbirlerinden bağımsız olarak ortaya konulmuştur. Astrofizik problemlerinin çözümünde, bilgisayar tarafından yapılandırılmış bir ağ örgüsü gerektirmeyen hesaplamalar yapabilmek amacıyla oluşturulmuş bir modelleme yaklaşımıdır. Yaklaşımın ağ örgüsü gerektirmemesi sayesinde, büyük deformasyonların olduğu modellerde, analiz esnasında elemanların çarpılması sonucu oluşan yakınsama hatalarını ortadan kaldırmakta ve analizin kesintiye uğramasını engellenmektedir.

SPH modelleme yaklaşımında, analiz edilecek kontrol hacmi içerisindeki parçacıklar elemanlar ile değil, noktalar ile tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım, hacim ve ağırlığı tanımlanmış parçacığın koordinatı, hızı ve iç enerjisi hakkında bilgiler içermektedir. Gerilme ve şekil değiştirmeler, bu modelleme yaklaşımının ana denkleminde integre edilerek elde edilmektedir. Parçacıklar, her biri serbest hareket edebilen ve aralarında herhangi bir bağ olmayacak şekilde tanımlanmaktadır. Kontrol hacminin sınırlarını belirleyen rijit bölgeler, hareketsiz (sıfır hız tanımlı) parçacıklarla oluşturulmaktadır.

SPH modelleme yaklaşımı astrofizik çalışmaları için ortaya atılmasına karşın, zaman içerisinde farklı alanlara uygulanmıştır. Liu vd. (2013)'nin hidro-elastik problemlerin çözümü için ortaya koydukları akış modelinde, SPH modelleme yaklaşımının genel denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (1.45)$$

$$\frac{dv_i}{dx_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + f_i \quad (1.46)$$

burada, ρ yoğunluk, x_i konum, v_i hız, f_i dış kuvvet ve σ_{ij} gerilme tansörünü ifade etmektedir. Gerilme tansörü ise (1.47) denkleminde verildiği üzere hidrostatik gerilme ve deviatorik gerilme olarak iki bölümden oluşmaktadır.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (1.47)$$

Modelin gelişme süreci içerisinde, Johnson (1994) ve Attaway vd.(1994) çalışmalarında, SPH modelleme yaklaşımını sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte kullanarak yüksek hızlı parçacık ortamlarının sayısal analizlerini yapmışlardır.

SPH yöntemi ağ örgüsü içermeyen bir yöntem olduğundan başlangıç temas tanımlanmasında bazı yetersizlikler ortaya çıkmaktadır. Oger ve Savage (1999), yaklaşımın genel denkleminde terimler ekleyerek SPH modelleme yaklaşımının kohezyon etkisini içermesini amaçlamışlardır. Benzer şekilde, Campbell vd.(2000), SPH modelleme yaklaşımı içerisinde kullanılacak yeni bir temas algoritması oluşturarak 0,2-4,0 km/s arasındaki hızlarda hareket eden bir ve iki boyutlu problemlerin analizinde test etmişlerdir. Elde edilen bulgular DYNA3D yazılımından elde edilen standart SPH analiz bulgularıyla karşılaştırılmıştır.

Sugino ve Yuu (2002) çalışmalarında, daha önce ayırık eleman (DEM) modelleme yaklaşımı ile analiz edilmiş olan toz akışını SPH yöntemi ile incelemiştir. Denklem (1.47)'de görüldüğü üzere, SPH modelleme yaklaşımı Mohr-Coulomb genel denkleminin kohezyon etkisi ihmal edilmiş hali olduğu kabulünden yola çıkan araştırmacılar, elde ettikleri sayısal bulguları deneysel çalışmalarla doğrulamaya çalışmışlardır.

Gustafsson vd.(2007) çalışmalarında demir cevheri kürelerinin silo akışını SPH yaklaşımı ve Drucker/Prager malzeme modeli kullanarak analiz etmişlerdir. Modelleme çalışmasında elde ettikleri bulguları silindirik silo akışının deneysel bulgularıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmada, SPH modelleme yaklaşımının açık (explicit) bir çözüm yöntemi olması nedeniyle analiz adımlarının çok küçüldüğü, bu nedenle de analiz süresinin çok uzadığı ifade edilmiştir. İlave olarak SPH yönteminde parçacık sayısının doğrusal artışı ile analiz süresinin parabolik arttığını ortaya koymuşlardır. Gustafsson vd. (2007) sonraki yıllarda demir cevheri kürelerinin kalıp içerisine akışlarını ve presleme işlemlerini MPFEM yaklaşımı ile incelemiştir.

1.4.5. Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (MPFEM)

Özellikle bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde son yıllarda geliştirilen Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yönteminin (Multi Particle Finite Element Metod - MPFEM) toz metalürjisinde kullanımından olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Bu yöntem, süreksiz ortamlarda iç etkileşimleri olan elastik-plastik parçacıkların oluşturduğu heterojen hacimlerin lineer olmayan analizinde, önceki bölümlerde bahsedilen yöntemlerin parçacık

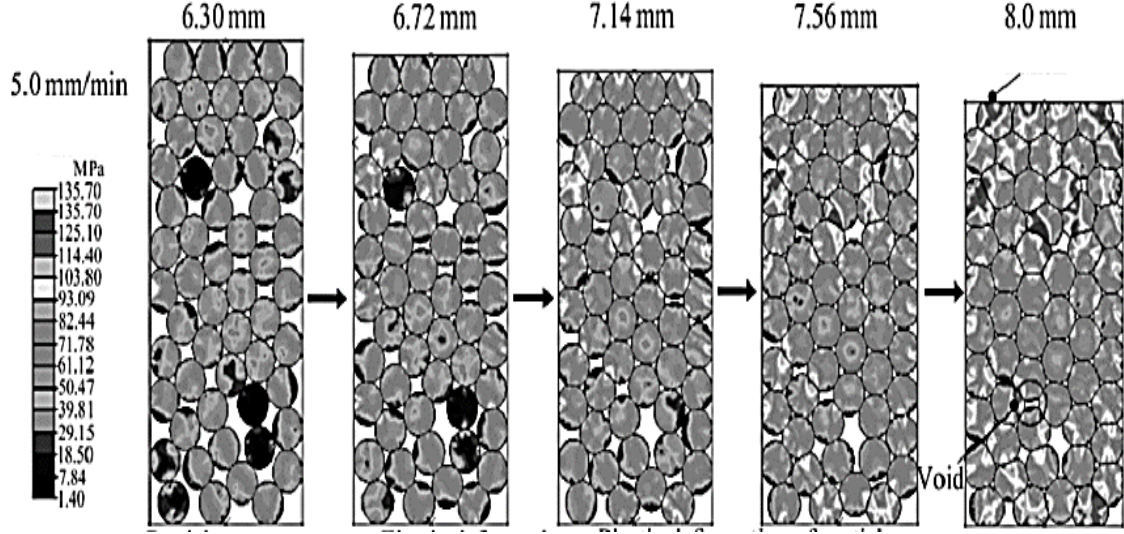
etkileşimini ifade edememeleri, yeniden yerleşme sürecini içermemeleri, sürtünme modeli tanımlanamaması gibi dezavantajlarını gidermektedir. Temel avantajı ise farklı geometrilere sahip parçacıkların farklı malzeme özellikleri ile aynı hacim içerisinde analizine imkan sağlarken yeniden yerleşme sürecini modellemesidir. Bu yöntemde her bir parçacık ayrı bir sonlu elemanlar ağ örgüsü ile diğerlerinden bağımsız, tekil olarak ele alınmaktadır. Bu sayede hacim içerisindeki hareketleri, yeniden yerleşmeleri, temasları rahatlıkla adım adım incelenebilmektedir.

Çoklu parçacık etkileşim analizlerine yönelik yapılan çalışmalar içerisinde Ayrık Eleman analizinin kullanılmasının doğurduğu sakıncalar nedeniyle MPFEM etkin bir çözüm yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Ayrık Elemanlar yöntemiyle çoklu sistemlerin analizinde ortaya çıkan sorunlardan bir tanesi olan kırılma ya da hasar durumunu simule etmek amacıyla Bilgili ve Capece (2011) teorik bir çalışma ortaya koymuşlardır.

Munjiza vd. (1995), sonlu elemanlar ve ayrık elemanlar yöntemi bir arada kullanarak kırılma katıların geçiş dinamiğini analiz etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirli bir bölge için etkin analiz yapılabilmesine karşın ayrık eleman yönteminde toz taneciklerinin kendi aralarındaki temas davranışlarının incelenebilecek mikro düzeyde analiz yapmanın mümkün olduğunu ve iki yöntemin birlikte kullanılabileceğini bildirmiştir. Yani açık (explicit) ve kapalı (implicit) yöntemler bir arada çalıştırılmıştır. Cauchy ve Piola-Kirchoff gerilme denklemleri bünye denklemi olarak ele alınıp oluşturulan algoritmalar ile hareketli düğüm noktaları, köprü kırılmaları, uzun duvar hasarları gibi örnek durumlar için değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrık ve sonlu elemanlar yönteminin bir arada kullanıldığı ve mikro düzeydeki analizlerde sonlu elemanlar yönteminin avantajlarının ortaya konulduğu bu öncü çalışma, doğal süreci yansıttığındaki başarısı nedeniyle çoklu parçacık sonlu elemanlar yönteminin ayrık eleman yöntemine kıyasla mevcut çalışma için daha uygun olacağını göstermektedir.

Larsson (2008) temas problemlerinin benzerliklerini, avantaj ve dezavantajlarının incelediği çalışmasında, temas modellerinde küçük şekil değiştirmelerin, elastik ya da plastik deformasyon sertleşmesini içeren modellerin daha uygun olacağını bildirmiştir.

Lee vd.(2009) çalışmalarında, soğuk preslenen alüminyum tozlarının iki boyutlu modelinde, zımba deplasmanının proses üzerine etkilerini çoklu parçacık sonlu elemanlar analizi ile ortaya koymuşlardır. Şekil 1.15’de gösterilen zımba hızı ve yer değiştirmesinin parçacık deformasyonuna etkisi, MSC. Marc Mentat ticari yazılımı ile yapılmıştır.

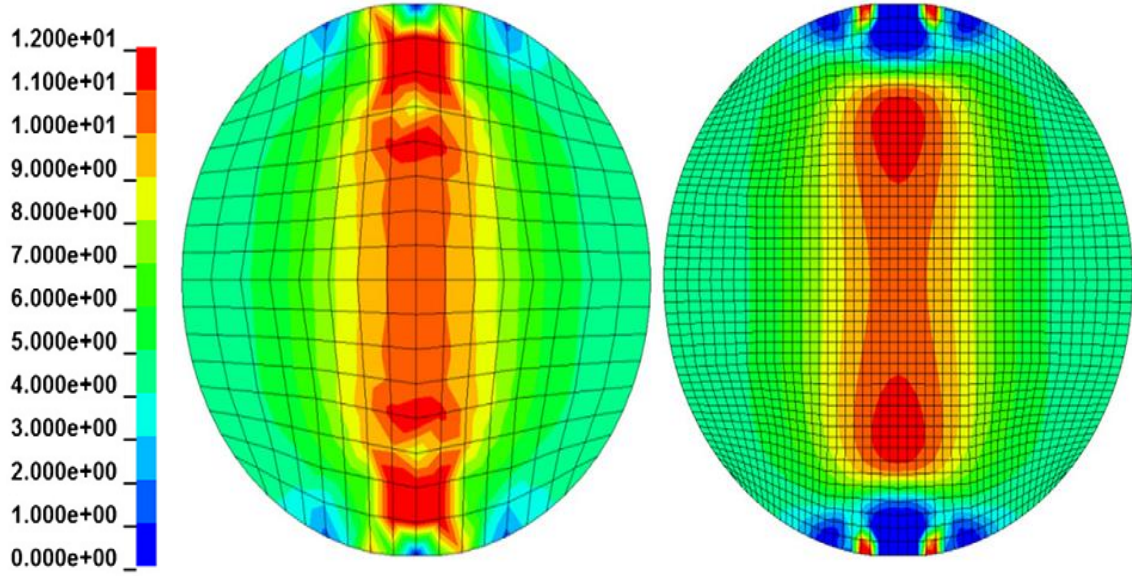


Şekil 1.15. Al tozlarının soğuk preslenmesinde zımba deplasmanın deformasyona etkisi Lee vd.(2009)

Yöntemle gözenekli ya da toz malzemelerin modellemelerinin yanı sıra katı malzemeleri işleme modelleri de kullanılmıştır. Bu kapsamda, Kumar ve Shukla (2012) yaptıkları çalışmada aşındırıcı su jetlerinde abrazyif taneciklerin işlenen parça yüzeyini aşındırmasını bu yöntemle modellemiştir. İş parçasına gönderilen aşındırıcı taneciklerin yüzeyde oluşturduğu gerilme ve aşınma davranışı çoklu parçacık sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir.

Gustafsson vd. (2013), farklı çaplardaki demir cevheri kürelerinin silindirik bir kalıp içerisinde presleme prosesini bu yöntemle modellemiştir. Kullanılan 1680 bağımsız küre kalıp içerisine doldurularak presleme analizi yapılmıştır. Bu şekilde malzemenin ya da kalıbın tamamına ait gerilme dağılımlarının yanı sıra herhangi bir demir cevheri küresindeki gerilme dağılımı da elde edilebilmiştir. Oluşturulan ağ örgüsü ve elde edilen gerilme dağılımlarına ait bir örnek aşağıdaki Şekil 1.16'da verilmektedir.

Benzer bir yaklaşımla Zhang vd.(2013), daha önce ayırık eleman yöntemi ile tanımlanmış bir zemin mekaniği problemini MPFEM yöntemiyle modelleyerek, deforme olabilen zemin malzemesinin elastik ve plastik davranışları açısından incelemiştir.



Şekil 1.16. Gustafsson vd. (2013)'nin çalışmalarında oluşturdukları ağ örgüsü ve elde edilen gerilme dağılımları

1.5. Tezin Konusu ve Amacı

Toz metalürjisinde parça üretim yöntemlerinden biri olan presleme esnasında malzemenin kalıp içerisindeki davranışı, üretilecek ürünün kalitesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Minyatür ve karmaşık şekilli parçaların bu üretim yöntemiyle üretilebilmesi için prosesin geliştirilmesi gerekmektedir. Bir prosesin geliştirilmesi için deneysel çalışmalar yapmak yüksek maliyetli olmakla birlikte mikro düzeyde verilerin elde edilebilmesini de güçleştirmektedir. Örneğin deneysel yollarla 200µm çapında tek bir toz tanesinin sürtünme katsayısını ölçmek hem mühendislik açısından hem de maliyet açısından zorlayıcı bir çalışma olacağı çok açıktır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için prosesin sayısal analiz edilmesi yoluna gidilmiş ve bu konuda günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak iki boyutlu olarak yürütülmüştür (Procoppio vd. (2003), Gethin vd. (2006), Szarf vd. (2011), Veganzones vd.(2014)). İki boyutlu çalışmalar, modelin geometrik olarak hazırlanması sırasında kolaylık sağlamanın yanı sıra analiz süresini ve dolayısıyla da maliyetleri düşürmektedir. Üçüncü ekseninde hareket imkanı olmadığından analiz esnasında oluşabilecek bütün temaslar ve etkileşimler model hazırlanırken belirlenmiş olmaktadır. Ancak, presleme prosesinin doğasını yansıtması

açısından üç boyutlu bir çalışmanın ortaya konulması gerekmektedir ve bu da bu tez çalışmasının amaçlanan yeniliklerinden birini oluşturmaktadır.

Sayısal analiz yöntemlerinin ilk temel bileşeni malzeme modelidir. von Mises, Cam-Clay, Mohr-Coulomb/Drucker-Prager, Shima-Oyane, Kuhn-Fleck, Cap malzeme modelleri gibi birçok model analizlerde kullanılmıştır. Chen vd. (2007), Al-Qureshi (2008) ve Champion (2013) çalışmalarında von Mises malzeme modelini, Zouain vd.(2010), Suebsuk vd. (2010) ve Haliti (2011) çalışmalarında zemin mekaniği için geliştirilmiş olan MCC malzeme modelini, Han vd. (2008), Sinha vd. (2010) ve Diarra vd. (2012) çalışmalarında iç sürtünme açısını ve kohezyon kuvvetleri bünye denklemine alan Mohr-Coulomb malzeme modelini, Sun vd. (1999), Alves vd.(2006) ve Lee ve Kim (2007) çalışmalarında bakır tozları yapılan deneyler sonucunda ampirik olarak elde edilen Shima-Oyane malzeme modelini kullanmışlardır.

Sayısal analiz yöntemlerinin ikinci temel bileşeni ise analiz yaklaşımıdır. Sürekli ortam, mikromekanik ve ayırık eleman analiz yöntemleri ile çoklu parçacık sonlu elemanlar yöntemi (MPFEM) karşılaştırıldığında, MPFEM yönteminin, mikro ve makro düzeyde incelemeye olanak sağlaması, yeniden yerleşme sürecini dikkate alması ve elastik ve plastik deformasyona bağlı gerilme değerlerini ortaya koyabilmesi açısından üstün olduğu görülmektedir. Lee vd. (2009), Kumar ve Shukla (2012) ve Gustaffsson (2013) çalışmalarında tercih ettikleri MPFEM yönteminin yüksek bilgisayar altyapısı talebini, temas algılama konusunda başarılı bir sonlu elemanlar yazılımı ihtiyacını ve uzun analiz sürelerini dezavantajlar olarak bildirmişlerdir. Literatürde yapılan bu çalışmalar incelendiğinde, sürtünme etkisinin birçok çalışmada ihmal edildiği ya da yalnızca kalıp ve tozlar arasına Coulomb sürtünme katsayısı tanımlandığı görülmüştür (Keshavarz vd. (2008), Joun vd. (2009), Khoei vd (2009)). Ayrıca, Wanheim/Bay ve Levanov gibi statik sürtünme modellerinin, prosesin analizi esnasında malzemeye ait sürtünme katsayısını, gerilme ve temas alanı değişiminin bir fonksiyonu olarak mikro düzeyde ortaya koyabileceği görülmüştür.

Sağladığı avantajlar, dezavantajlarına kıyasla daha fazla olduğundan bu tez çalışmasının ana konusunu oluşturan metal tozu presleme prosesinin sayısal olarak modellenmesi için MPFEM analiz yaklaşımı kullanılacaktır. MPFEM yaklaşımına ilave olarak sürekli ortam analizleri yapılarak iki yaklaşımın karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında von Mises, Modifiye Cam-Clay, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modellerinin karşılaştırılması ikinci temel hedef olarak belirlenmiştir. Çalışmanın

devamında MPFEM'nin sağladığı, tozların birbirleriyle etkileşimlerinin belirlenmesi imkanı ile Coulomb, Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modelleri analize dahil edilerek mikro boyutta sürtünme katsayılarının elde edilmesi amaçlanmıştır.

Presleme işlemi, endüstriyel uygulamalarda yalnızca oda sıcaklığında yapılmadığından ve uygulanan ısı işlemlerin tozların kalıptan çıkarken birbirlerine yapışma özelliğini arttırdığından farklı sıcaklıklarda analizler yapılarak sürtünme katsayılarının elde edilmesi de çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Son olarak sayısal model şartlarında yapılacak olan deneysel çalışmalar ile sayısal çalışma bulgularının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürdeki sayısal çalışmalar incelenerek bir simülasyonda bulunması gereken standart özellikler aşağıdaki gibi belirlenmiş olup bu özelliklere uygun olarak tez çalışması için bir iş planı ortaya koyulmuştur.

- Temel yasalar ve sınır şartlarının belirlenmesi
- Veri ve ara yüz girişi parametrelerinin açıklanması
- Sorular ve simülasyon amaçlarının belirlenmesi
- Proses görüntüleri, hata analizi ve stabilite parametrelerinin elde edilmesi
- Doğrulama ve geçerlilik çalışmaları
- Deneysel verilere uygunluk kontrolü

Çalışmalara, öncelikle literatürde yaygın olarak karşımıza çıkan tozun gözenekli yapı olduğu kabulüne dayalı yani, preslenecek olan metal tozu kütesinin tek bir elastik plastik gövde olarak kabul edildiği 2-boyutlu sürekli ortam modelleriyle başlanmıştır. Daha sonra 2-boyutlu çoklu elastik-plastik gövde analizleri yapılmıştır. Üç boyutlu modellerin sürekli ortam ve çoklu parçacık modelleri oluşturulduktan sonra uygulanacak olan malzeme modelleri ve bunlara ilişkin malzeme sabitleri belirlenmiştir. Sayısal analize ait sonlu elemanlar parametrelerinin belirlenmesinin ardından 2-boyutlu analiz çalışmaları ve ardından da üç boyutlu analizler kendi içerisinde aşamalı olarak yapılmıştır. Üç boyutlu analizlere sürekli ortam ve çoklu parçacık ortam modelleri tamamlandıktan sonra da farklı sürtünme katsayıları ve oluşturulan kullanıcı alt programları (user subroutine) aracılığıyla farklı sürtünme modellerinin araştırılmasıyla devam edilmiştir. Son aşamada sayısal çalışma şartlarında deneyler yapılarak elde edilen bulgular incelenmiştir.

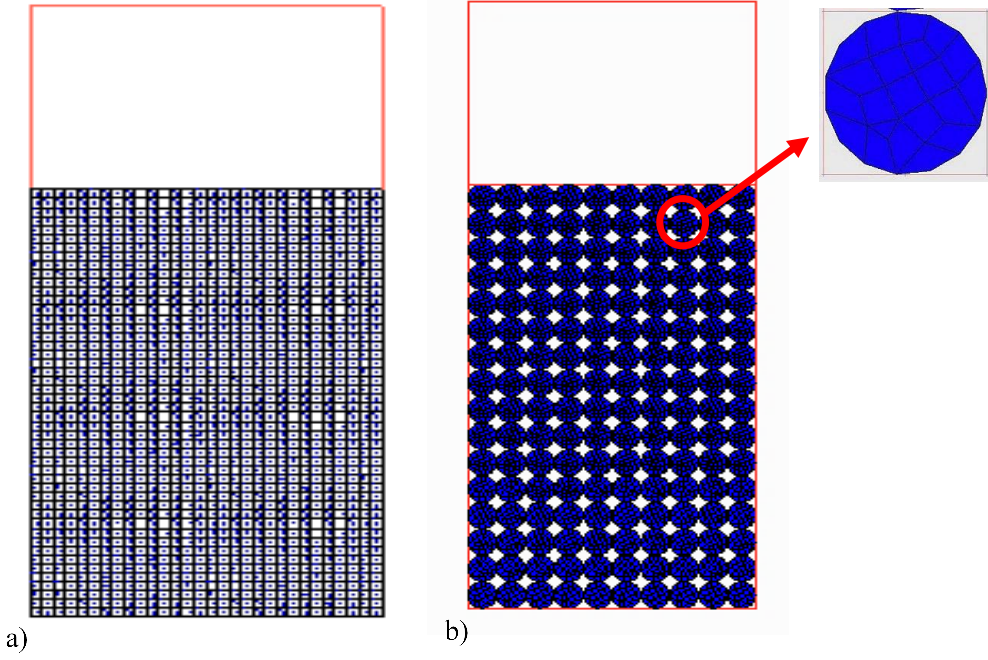
2.1. Modellerin Oluşturulması

Literatür araştırmasında sürekli ortam analizleri, toz metalurjisinde genel kabul görmüş bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (MPFEM) ve literatür çalışmaları ile karşılaştırma yapma imkanı oluşturması açısından sürekli ortam analizleri önem taşımaktadır. Tez çalışmasının amaçlanan yeniliklerinden

birinin, toz metalürjisinin üç boyutlu olarak modellenmesi olmasına rağmen öncelikli olarak 2-boyutlu modeller simüle edilmiştir. İki boyutlu analizlerde ortaya çıkan gerilme değerleri ve malzeme davranışları üç boyutlu analizler için yol gösterici olmuştur. İki boyutlu modeller olarak önce 2-boyutlu sürekli ortam modeli ardından 2-boyutlu çoklu parçacık modeli oluşturulmuştur.

Sürekli ortam modelinin iki boyutta oluşturulması amacıyla ilk olarak rijit kalıp oluşturulmuş, ardından kalıp içerisindeki boşluğun tamamı belirli bir poroziteye sahip metal tozu olarak tanımlanmıştır. Daha sonra metal tozları ile dolu olarak kabul edilen kalıp içi hacmi 1440 doğrusal olmayan eleman ile ağ örgüsü yapısında modellenmiştir. Kalıp içerisindeki hacme tanımlanmış olan elastik-plastik metal tozu yığını Şekil 2.1.a'da gösterildiği gibi tek bir gövde olarak tanımlanmıştır.

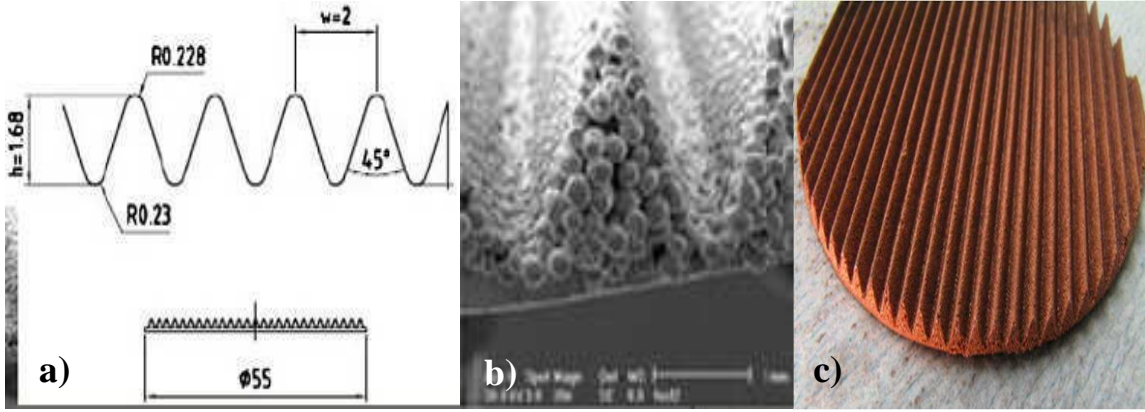
İki boyutlu modellerin ikinci aşaması olarak, elastik-plastik tanımlanan metal tozlarının her birinin bağımsız gövdeler olarak kabul edildiği çoklu parçacık modellerine geçilmiştir. Bu modelde, kalıp oluşturulduktan sonra uygun boyutlu metal tozları kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 2.1 b'de gösterilen metal tozları küresel formda olup çapları 200 mikrondur. Ardından birbirinden bağımsız yalnızca temas ediyor durumda tanımlanmış olan 160 metal tozu kuadratik elemanlar ile 4370 eleman olacak şekilde ağ örgüsü yapısında modellenmiştir. Geometri ve malzeme parametreleri aynı kalmak koşulu ile yapılan bu analiz yaklaşımı, literatürde ayrık (discrete) veya çoklu parçacık modelleme yaklaşımı olarak ifade edilmektedir. Kalıba ağ örgüsü oluşturulmamasının nedeni kalıp yüzeylerinin rijit yüzeyler olarak kabul edilmesidir. Gethin (2002), benzer modelleme ile ağ örgüsü yapısının değişimi ile elde edilen mekanik verilerin değişimini incelemiştir.



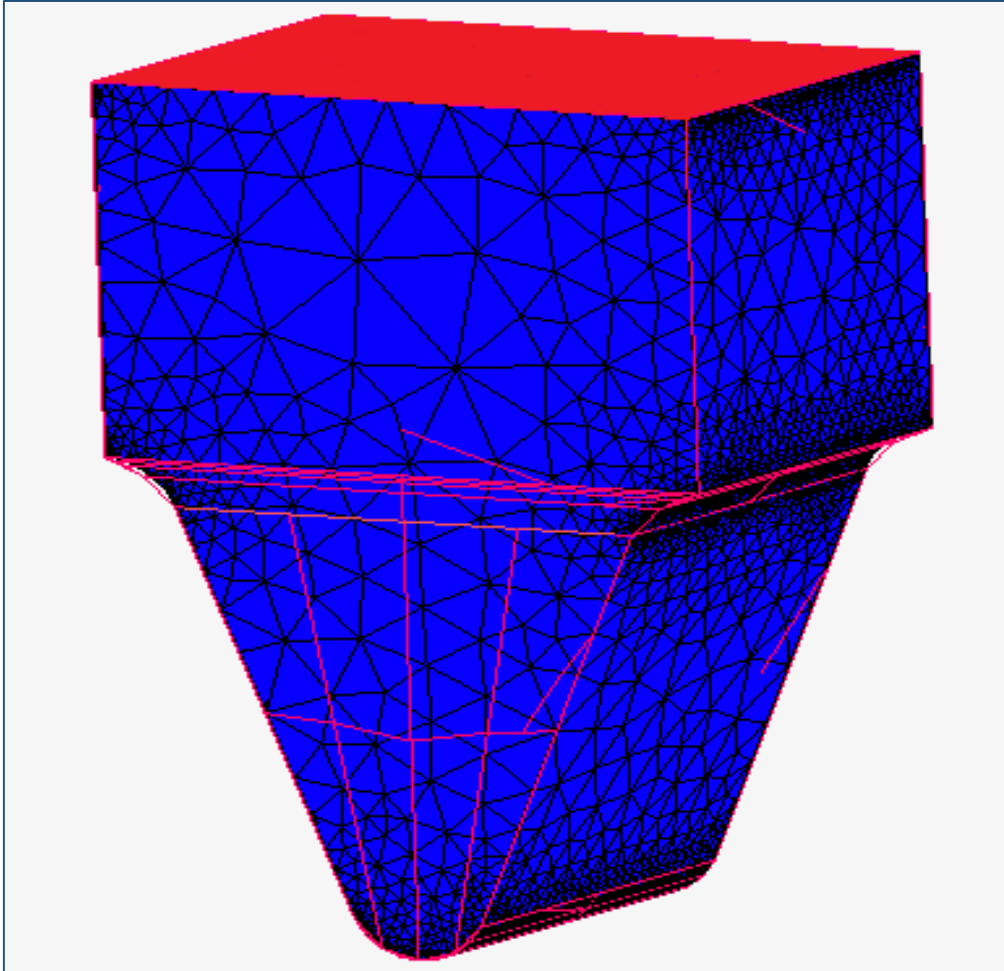
Şekil 2.1. İki boyutlu modeller a) Sürekli ortam b) Çoklu ortam

Üç boyutlu modellerin oluşturulmasında 2-boyutlu modellerde olduğu gibi öncelikle sürekli ortam modelleri ardından da çoklu ortam modelleri oluşturulmuştur. İki boyutlu çalışmalarda seçilen silindirik ya da kare kesitli bir kalıp basma sürecini modellemesine karşılık üç boyutlu modeller daha farklı kalıp geometrisi ile yürütülmüştür. Bu amaçla bakır tozlarıyla yapılan ve Şekil 2.2’de geometrisi verilen Cora vd. (2009)’nin çalışmasındaki soğuk presleme kalıbının modeli oluşturularak üç boyutlu çalışmalara başlanmıştır. Cora vd. (2009), 200µm çapındaki küresel tozları ısı transfer artışı için en uygun boyut olarak ifade ettiklerinden, tozlar 200µm çapında küresel olarak modellenmiştir.

Sürekli ortam modelinde, rijit kalıp oluşturulup kalıp hacminin içi, üç boyutlu ağ örgüsü yapısında modellenmiştir. Ortaya çıkan üç boyutlu sürekli ortam modeli, analiz başlangıcında 44644 tetrahedral eleman taşımaktadır. Şekil 2.3’te görüldüğü üzere eleman dağılımı, kalıbın süreksizlik gösterdiği bölgelerde küçük eleman boyu ile eleman yoğunluğunun artması şeklinde elde edilmiştir. Kalıbın süreksiz olduğu bölgelerde yakınsama problemleri yaşanacağından yoğun ağ örgüsünün yanı sıra analiz esnasında ağ örgüsü yenileme (remeshing) uygulanmıştır. Seçilen çalışma hacmi 0,73 mm³ olduğu, başlangıç durumunda kalıbın süreksiz bölgelerindeki eleman boyunun 0,5 mikronun altına düşmüş olması sürekli ortam modelindeki ağ örgüsü hassasiyetini açıklamaktadır.



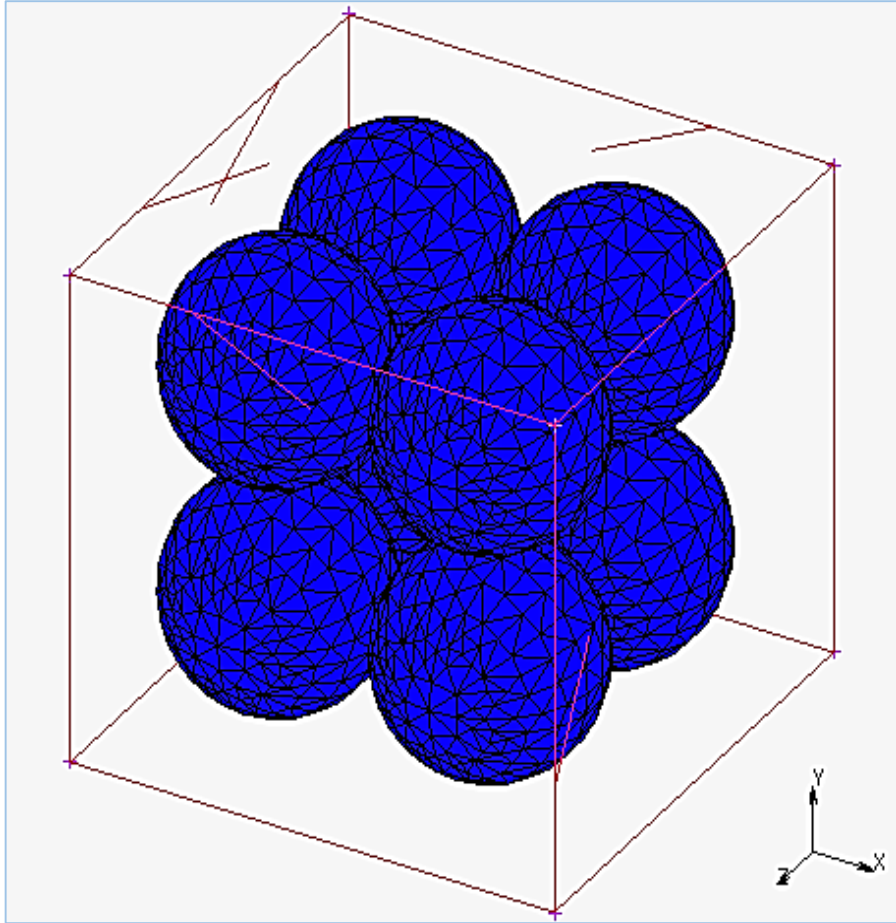
Şekil 2.2. a) Kalıp boyutları b) SEM görüntüsü ve c) Numune görüntüsü. Cora vd. (2009)



Şekil 2.3. Bu çalışmada oluşturulan 3-boyutlu sürekli ortam sonlu elemanlar modeli

Sürekli ortam modelinin tamamlanmasının ardından çoklu parçacık modeline geçilmiştir. Yapılan ilk 3-boyutlu çoklu parçacık modelleri ortaya koymuştur ki metal tozlarının presleme esnasındaki yeniden yerleşme sürecinin gözlemlenebilmesi için tozların başlangıçta belirli bir formasyonda değil rastgele dağılımlı olarak kalıba yerleştirilmesi gerekmektedir.

İlk 3-boyutlu çoklu parçacık modeli Şekil 2.4'te sekiz adet ayrı metal tozu ve 21472 tetrahedral eleman ile oluşturulan ağ örgüsü yapısının görüntüsüyle verilmiştir. Bu aşamada ayrı elemanların bir birleriyle yapışık ya da başlangıçta temas halinde oluşu gibi iki farklı durum için analizler yapılmıştır.

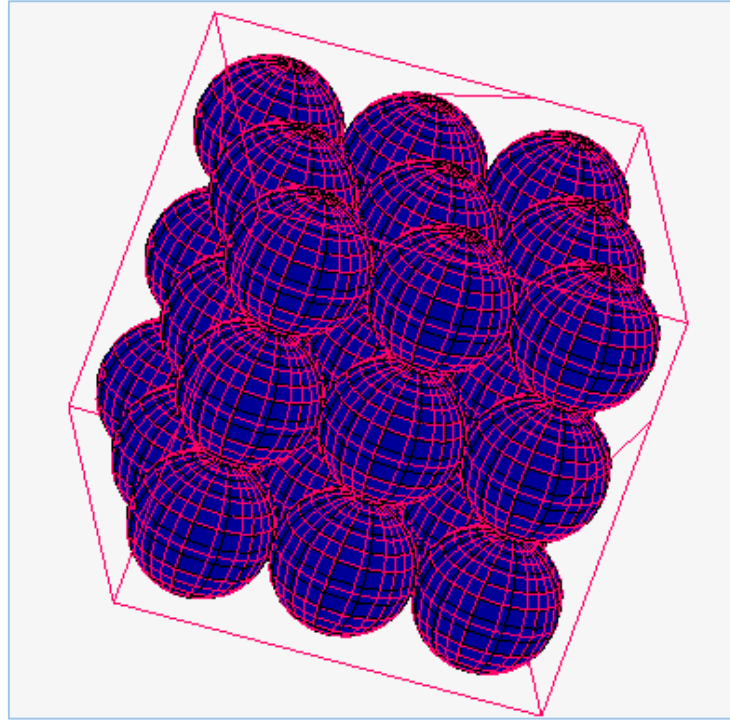


Şekil 2.4. Sekiz adet metal tozun ayrı modellendiği üç boyutlu model

Metal tozu presleme prosesinin doğasını yansıtabilmesi amacıyla daha fazla elastik plastik gövde kullanılmasına karar verilmiştir. Temas yüzeylerinde oluşan gerilme ve temas

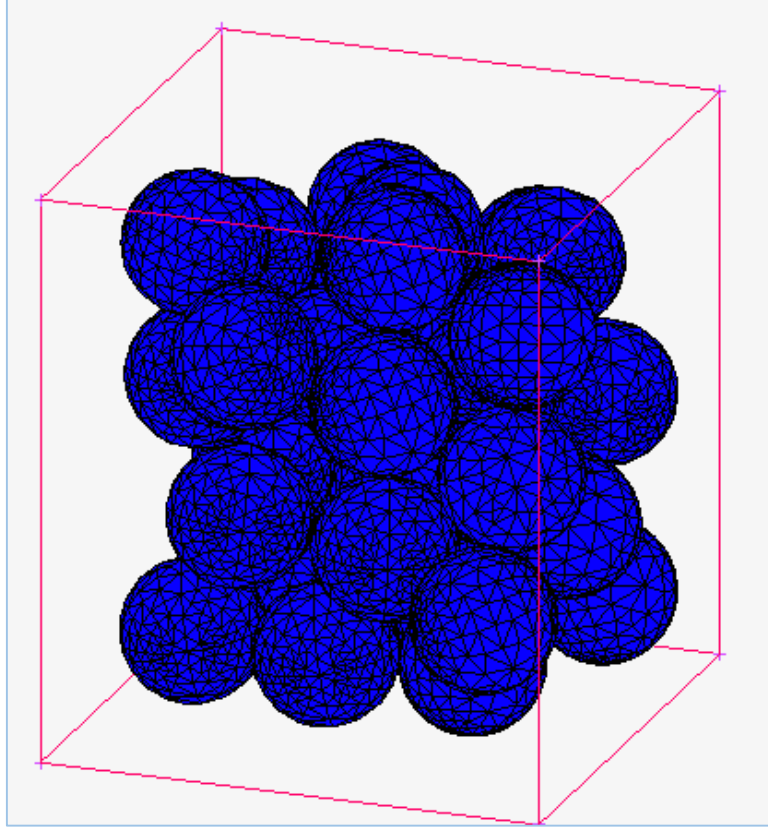
bölgelerinde artacak olan düzensizlik, doğal süreci daha iyi modelleme imkânı sunacaktır. Bu nedenle Şekil 2.5'te gösterildiği gibi yeni bir model oluşturulmuştur.

Şekil 2.5'te verilen modelde 27 adet küresel toz 34000 adet tetrahedral eleman ile modellenmiştir. Kullanılan bu modelde elemanlar tek bir elastik-plastik gövde ya da çoklu elastik plastik gövde olarak tanımlansalar dahi kalıpla olan temasları sonucunda düzensizlik, rastgele dağılma ve ayrılma göstermeden kalıp içerisinde preslenebilmiştir. Martin vd. (2003) metal tozlarının soğuk preslenmesi işleminde tozların başlangıç konumlarının, proses esnasında üç ekseninde de değişebildiğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.5. Yirmi yedi adet elastik-plastik küresel metal tozu ile yapılan analiz modeli

Bu aşamada benzer bir hacim içerisinde 32 adet metal tozunu ayrı eleman analizi ile inceleyen Jerier vd. (2010)'nin çalışmasında kullanılmış ve Şekil 2.6'da verilmiş olan model oluşturularak analiz edilmiştir. Bu model 32 adet elastik-plastik gövde ile 70217 tetrahedral eleman içermektedir. Kalıp içerisindeki tozların başlangıç anında yapışık tek bir gövde olması, yapışık 32 bağımsız gövde olması ve temas halindeki bağımsız gövdeler olması durumuna göre analizler yürütülmüştür.



Şekil 2.6. Jerier vd. (2011)'den referans alınan, 32 adet elastik-plastik bakır tozunun oluşturduğu model

Şekil 2.6'da gösterilen tozlar ve kalıp için bağıl yoğunluk başlangıç durumunda %30 düzeyinde olup, 0,65 mm zımba deplasmanı ile bağıl yoğunluk %73'lük nihai değerine ulaştırılmıştır. %73 bağıl yoğunluk değeri çalışmada soğuk preslenecek malzeme için amaçlanmış nihai değer olup bütün analizlerde bu değere uygun zımba deplasmanları oluşturulmuştur

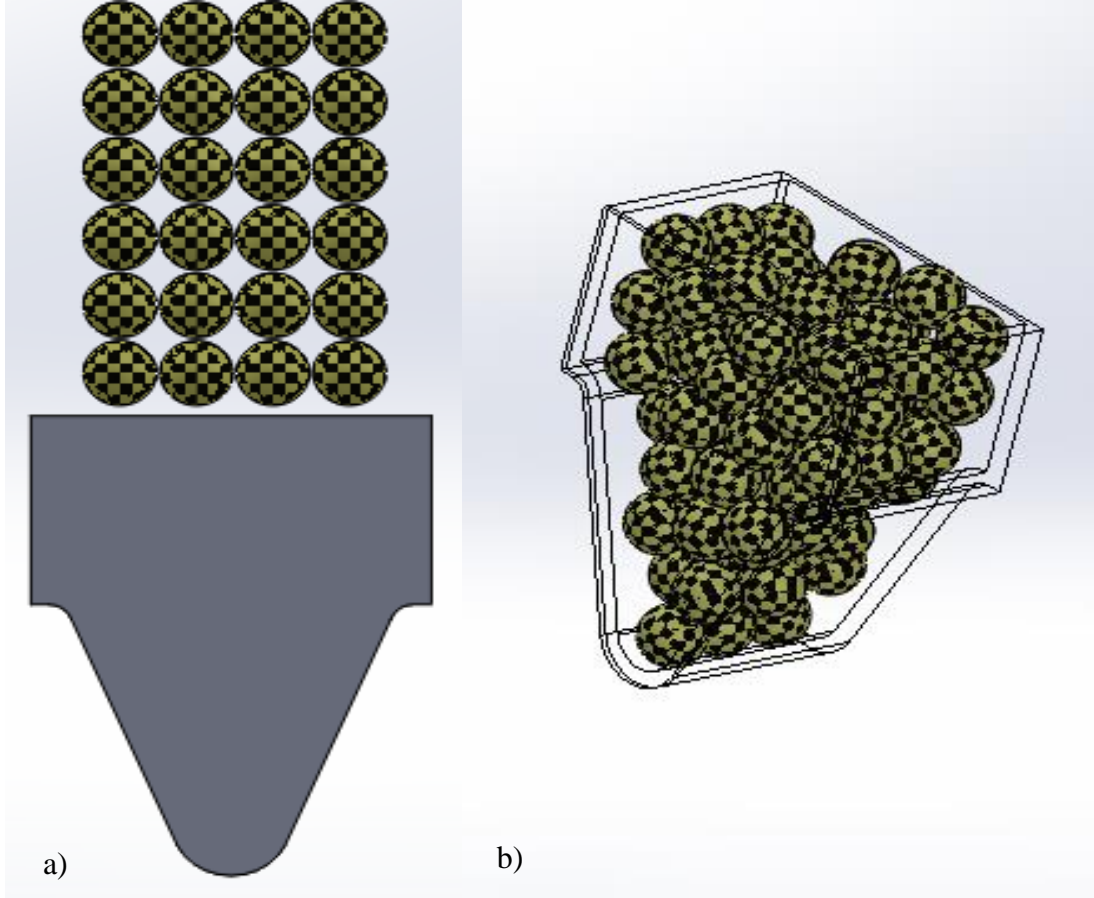
Rastgele dizilimin modellenmesi amacıyla Şekil 2.2'deki kalıp ve malzeme geometrisi kullanılarak ½ oranındaki ölçekli katı model, Solidworks (Solidworks Corp., Waltham, MA, USA) ticari yazılımıyla elde edilmiştir. Oluşturulan kalıp ve metal tozu küreleri, hareket analizi modülünde yer çekimi etkisiyle serbest düşürülerek kalıba rastgele yerleştirilmiştir. Şekil 2.7'de metal tozlarının hareket analizinden öncesi ve sonrası görülmektedir. 3-boyutlu modelde kullanılan $0,73 \text{ mm}^3$ kalıp hacmi içerisinde ancak 74 adet 200 mikron çapında metal

tozu yerleştirilebilmiştir. Toplam toz hacmi $0,31 \text{ mm}^3$ olmuştur. Bu durumda, bağıl yoğunluk ve porozite değerleri (1.1) denkleminde aşağıdaki gibi elde edilir;

$$RD = \frac{\text{Toz hacmi}}{\text{Kalıp Hacmi}} = \frac{0,31}{0,73} \cong 0,425$$

(2.1)

$$\phi = 1 - RD = 0,575$$



Şekil 2.7. Rastgele yerleştirilmiş metal tozlarının hareket analizinden a) öncesi ve b) sonrası

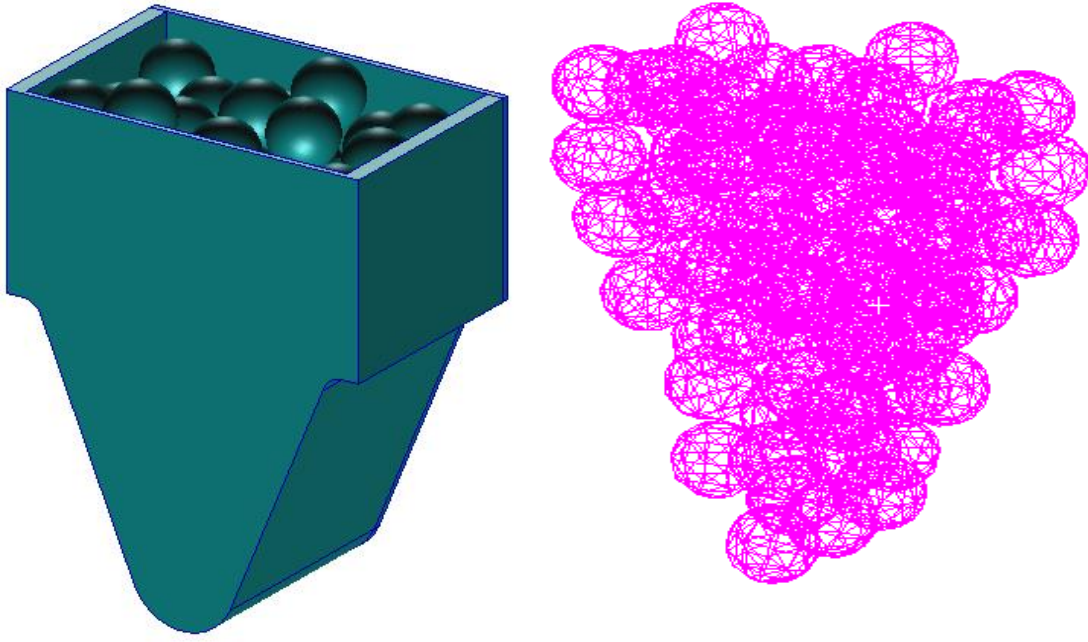
Benzer bir çalışmada, Han vd. (2005), 26.787 küresel tozun bir silindirik kalıp içerisine yerleştirilmesi amacıyla geometrik temelli bir algoritma oluşturmuşlardır. Yapılan bu düzensiz ya da rastgele kalıp yerleştirme işleminde ulaşılan en yüksek doluluk oranı ancak %52 değerindedir.

Hareket analizi sonucunda kalıp içerisine yerleştirilmiş olan 200 mikron çapında metal tozlarının sonlu elemanlar analizine uygun hale getirilmesi maksadıyla ağ örgüsü yapısı oluşturulmuştur. Bu işlem için mevcut analiz ya da katı modelleme programının elverişli olmasına karşın sürekli ortam modelinde tercih edildiği gibi, bu konuda daha başarılı sonuçlar veren başka bir ticari yazılımın kullanımına karar verilmiştir.

Katı modelleme programında oluşturulan model parasolid formatında PATRAN 2012 (64 bit Version 19.0.132332) programına aktarılarak Şekil 2.8.a daki dizilim elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde eleman sayısının olabildiğinde küçük tutularak analiz süresinin kısaltılması adına, Patran yazılımına taşınan kalıp silinerek yalnızca metal tozları üzerinde ağ örgüsü oluşturulmuştur. Kalıp daha sonra rijit yüzey olarak yeniden tanımlanacaktır. Metal tozları, tetrahedral eleman kullanılarak Şekil 2.8.b de gösterilen ağ örgüsü yapısı oluşturulmuştur. Oluşan ağ örgüsü yapısında 60076 tetrahedral eleman mevcuttur.

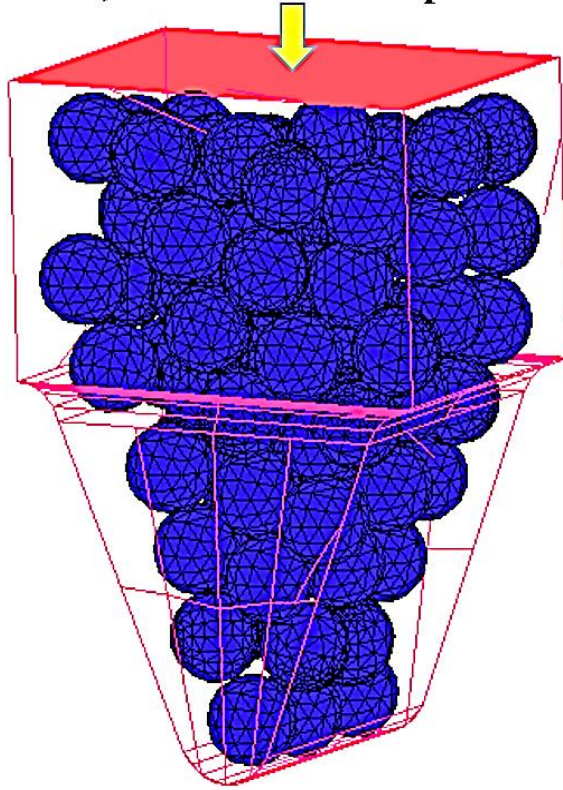
Ağ örgüsü oluşturulmuş model, sonlu elemanlar analiz programına uygun formatta kaydedilerek, model analiz programına taşınabilir hale getirilmiştir. Mentat kullanıcı arayüzüne alınan model, öncelikle çakışık ya da kullanılmayan düğüm, nokta ve elemanlar açısından kontrol edilerek hem analiz süresi hem de çakışık elemanlardan kaynaklanan yakınsama hataları açısından kontrol edilmiştir.

Model, analiz programına Şekil 2.8.b'deki haliyle taşındığından kalıp, geometrik özelliklerine bağlı kalınarak, tekrar oluşturulur. Katı model üzerindeki referans noktalarından yeniden çizilen kalıp, rijit yüzey olarak tanımlandığından herhangi bir ağ örgüsü yapısı oluşturulmasına gerek yoktur. Oluşturulan yüzeylerin program tanımında iç yüzey ya da dış yüzey olarak doğru tanımlanması sonucun yakınsaması adına önemli bir parametredir. Modelin analiz işleminden önceki görüntüsü Şekil 2.9 da verilmiştir. Metal tozlarının preslenmesi, zımba olarak üst bölgede tanımlanan rijit yüzeyin 1 sn içerisinde 0,45 mm yer değiştirmesiyle sağlanmıştır.



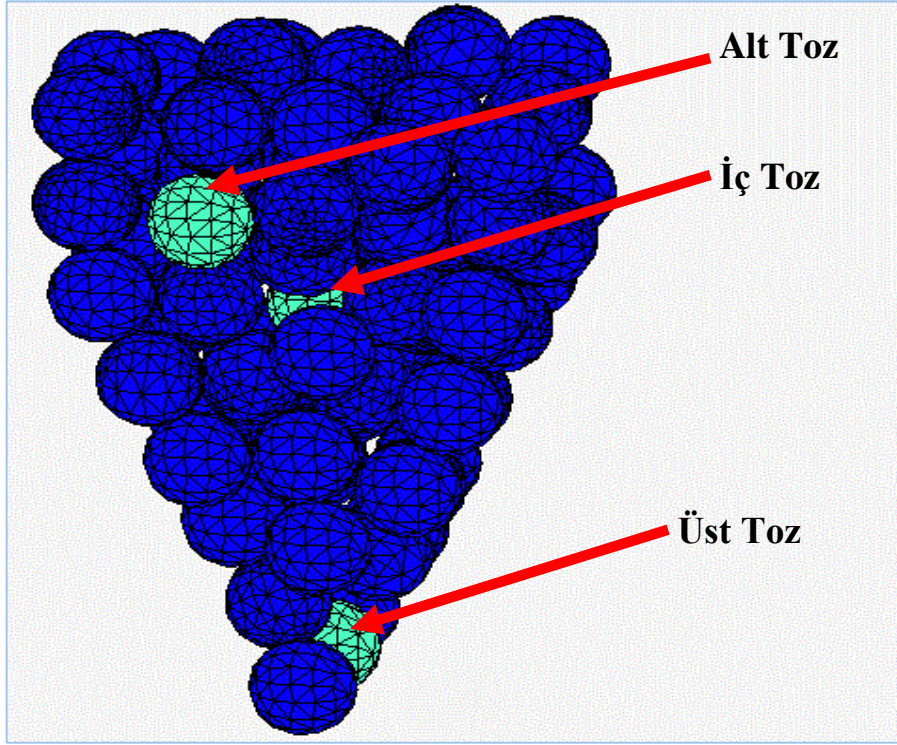
Şekil 2.8. Kalıp içindeki metal tozları a) Ağ örgüsü oluşturulmadan önce b) Ağ örgüsü

0,45 mm Zimba Deplasmanı



Şekil 2.9. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan çoklu parçacık (MPFEM) modeli

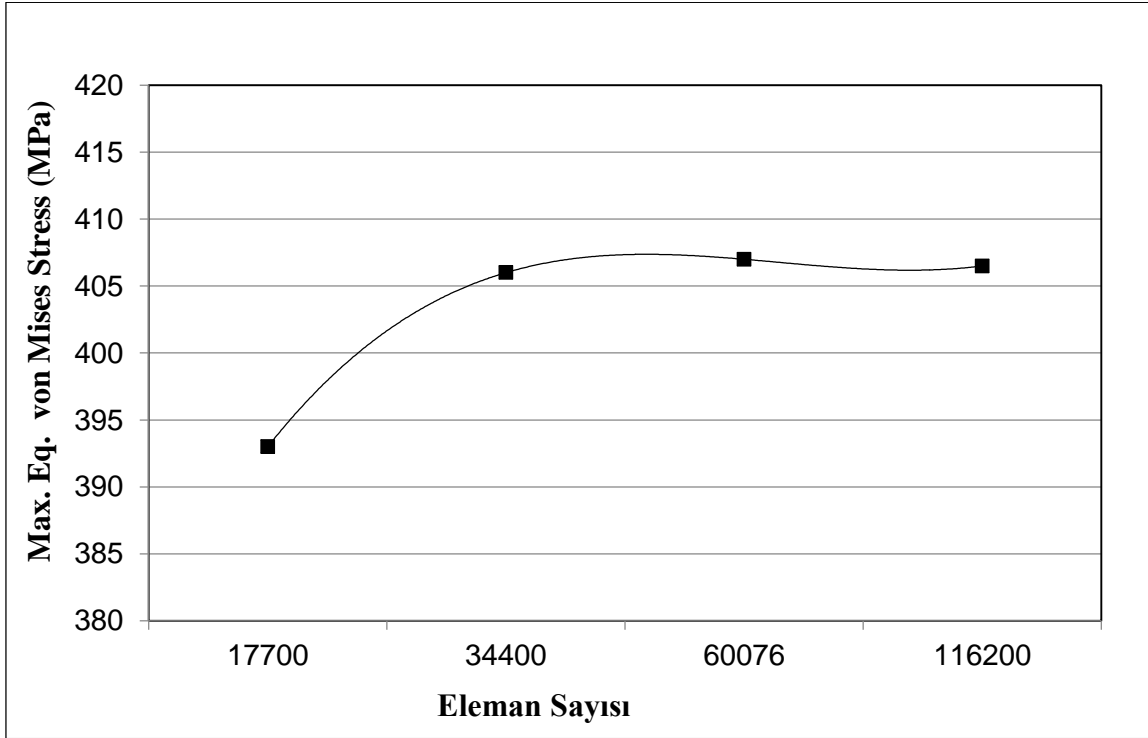
Oluşan gerilmelerin bir toz tanesi üzerinde dahi büyük değişkenlik göstermesi ve her toz tanesinin ayrı ayrı incelenemeyecek kadar çok olması nedeniyle deformasyonu temsil edecek bir referans eleman grubu seçilmesine karar verilmiştir. Seçimin homojenizasyonu ve deformasyon davranışının yansıtılabilmesi açısından üç farklı metal tozu seçilerek incelemelere bu tozlar üzerinden devam edilmiştir. Bu üç tozdan bir tanesi, gerilmenin daha az olduğu üst bölgede, kalıpla ve diğer tozlarla temas halinde olacak şekilde seçilmiştir. İkinci toz, modelin iç kısmında yalnızca diğer tozlarla temas halinde olacak şekilde, üçüncü toz ise gerilmenin daha yoğun olduğu kalıba yakın bölgede, kalıpla ve diğer tozlarla temas halinde olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 2.10 bu referans tozların konumlarını göstermektedir. Alt bölgedeki referans tozda 139 adet düğüm noktası, iç bölgede bulunan tozda 133 adet düğüm noktası ve kalıba yakın bölgedeki üst tozda 136 adet düğüm noktası mevcut olup bu noktalarda değerler elde edilerek sonraki bölümlerde tozların karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 2.2’de geometrisi verilmiş olan numune görüntüsü incelendiğinde zımbanın basınç uyguladığı kesitin, numunenin alt kısmında olduğu görülmüş ve referans tozlar zımbadan olan uzaklıklarına göre adlandırılmıştır.



Şekil 2.10. Belirlenen ve çalışmada kullanılan referans tozların MPFEM analizindeki geometrik yerleri

2.2. Model Optimizasyonu

Modelleme çalışmalarının temel sorgularından biri olan eleman sayısı ve eleman tipi bu aşamadan sonra incelenmiştir. Öncelikli olarak tetrahedral eleman yerine 3-boyutlu farklı geometriye sahip elemanlar denenmiş ve aynı simulasyon için analiz sürelerinin uzadığı görülmüştür. Tetrahedral elemanların dışındaki diğer geometrik formlarda 3-boyutlu eleman kullanmak düğüm sayısını arttırdığından çözüm matrisleri büyümekte ve analiz süreleri artmaktadır. Tetrahedral elemanların çözüm hassasiyetlerinin arttırılması amacıyla 10 düğüm noktasına sahip tetrahedral elemanlar kullanılarak analizler denenmiş olsa da bu elemanların ağ örgüsü yenileme özelliği olmadığından kalıbın süreksiz bölgelerinde yakınsama sorunlarına neden olmuştur. Bu nedenle 3-boyutlu, dört yüzlü ve dört düğüm noktalı tetrahedral eleman kullanımına karar verilmiştir. Yüksek yakınsama hassasiyeti ve kısa analiz süresi amacına uygun optimum bir tetrahedral eleman sayısı belirlemek için farklı eleman sayılarında analizler von Mises malzeme modeliyle yapılarak elde edilen maksimum eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 2.11’de verilmiştir. Yakınsama hassasiyeti ve analiz süresi açısından 60076 eleman sayısı uygun değer olarak modellere esas olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.11. Eleman sayısına göre eşdeğer gerilme değişimi

2.3. Malzeme Parametrelerinin Tayini

Sürekli ortam ve çoklu parçacık olarak planlanan iki farklı analiz türü için modellerin oluşturulmasının ardından malzeme modellerinin uygulanmasında ihtiyaç duyulan parametreler belirlenmiştir. Tez çalışmasında metal tozu olarak bakır seçilmiş ve gerekli malzeme parametrelerinin bazıları literatürde kullanılan veriler, bazıları kullanılan değerlerden ilgili denklem aracılığıyla elde edilen veriler ve bazıları da grafiklerden okunan veriler olarak bir araya getirilmiştir.

2.3.1. von Mises Malzeme Modeli

Plastik malzeme davranışını modellemek için öncelikli olarak von Mises malzeme modeli incelenmiştir. Birinci bölümde de belirtildiği üzere von Mises malzeme modeli, denklem (1.4) kullanılarak üstel akma fonksiyonu şeklinde modele uygulanmış ve modelde oluşan eşdeğer gerilmenin, malzeme için uygun gerilme sınırının üzerine çıkması durumunda, plastik deformasyonun gerçekleşeceği prensibine göre tanımlanmıştır. İhtiyaç duyulan malzeme parametreleri arasındaki $A = 451,6$ MPa ve $m=0,328$ olarak Altan vd. (1983)'den alınmış ve kullanılan diğer malzeme parametreleri de bunlarla birlikte Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmada yapılacak analizler çerçevesinde yeniden yükleme söz konusu olmadığı için ve analizin başlangıç durumunda eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer birim şekil değiştirme oranının değişimi ihmal edilerek denklem (1.4) aşağıdaki (2.2) denklemine dönüşür:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= 0 \quad \text{ve} \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = 0 \\ \sigma_Y &= A\varepsilon_o^m \end{aligned} \quad (2.2)$$

Analiz başlangıcında, elastik bölgede Hooke Kanunu geçerli olacağından,

$$\sigma_Y = E\varepsilon_o \quad (2.3)$$

(2.3) denklemini (2.2) denklemine eşitlenerek, elastisite modülü E 'ye bağlı olarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$A\varepsilon_o^m = E\varepsilon_o$$

$$\varepsilon_o^{m-1} = E / A \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'de görüldüğü gibi, deformasyon sertleşmesinin analize dahil edilmesi için malzeme parametreleri olan A, E ve m belirlenerek modellere ilave edilmişlerdir.

Tablo 1 von Mises malzeme modeline ait malzeme parametreleri

SEA Yazılımı	MSC Marc (v 2012.1.0)			
Geometri	3-boyutlu katı model			
Malzeme Modeli	Elastik-Plastik			
Akma Kriteri	von Mises-Power Law			
Malzeme Parametreleri	E [MPa]	ν	A [MPa]	m
	110000	0,35	451,6	0,328
Eleman Sayısı ve Tipi	60076 - Tetrahedral			
Elastik-Plastik Gövde	74			
Ağ Örgüsü Yenileme	Patran Tetra (0,25 Şekil Değişimi)			
Analiz Adım Zamanı	Sabit Zaman Adımı			
Temas Tipi	Ayrık			
Sürtünme Modeli	Coulomb Bilinear Displacement			
Sürtünme Katsayısı	0,1			
Başlangıç Koşulları	Yok			
Analiz Süresi	184.760 s			

2.3.2. Modifiye Cam-Clay (MCC) Malzeme Modeli

Bu analizin ardından bir sonraki malzeme modeli olarak Modifiye Cam-Clay (MCC) modeline geçilmiştir. Birinci bölümde açıklandığı üzere, bu modelde akma yüzeyinin tayin edilmesi için elastisite modülüne gerek olmamasına karşın, başlangıç durumu için malzemenin bulk modülünün elde edilmesi amacıyla elastisite modülünün ve poisson oranının analiz programına verilmesi gerekmektedir.

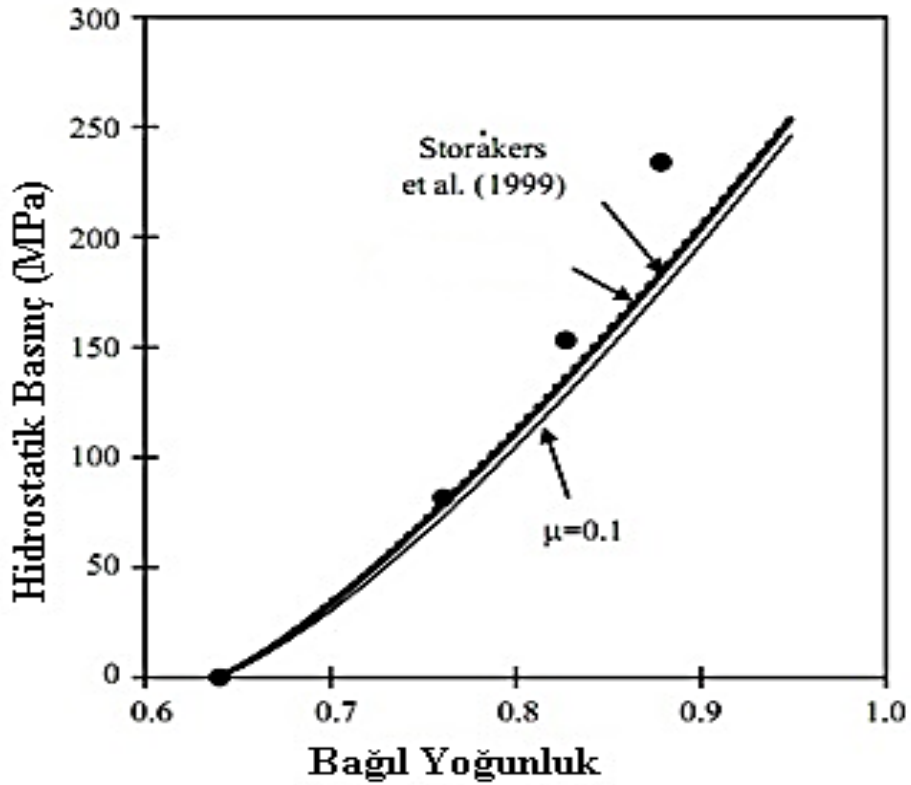
Elastisite modülü ise gözenekli malzemeler için denklem (1.23) ile aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Denklemde belirlenmiş olan porozite değeri kullanılan model için 0,575 olup gözeneksiz bakır malzemenin elastisite modülü 110 GPa olarak alındığında başlangıç durumu için elastisite modülü denklem (2.5) ile 1150 MPa olarak elde edilmiştir;

$$E = E_0 \exp\left[-(5,56\phi + 4,29\phi^2)\right]$$

$$E = 110000 \exp\left[-(5,56 \times 0,575 + 4,29 \times 0,575^2)\right]$$

$$E = 1150 \text{ N / mm}^2 \quad (2.5)$$

MCC malzeme modeli için gerekli olan sıkışma oranı (λ), yeniden sıkışma oranı (κ) ve kritik durum çizgisi eğimi (M) değerleri literatürde daha önce yapılmış deneysel çalışmalardan alınmıştır. Bu amaçla, Storakers vd. (1999) ve Martin vd (2003)'nin kullandığı bakır tozları için hidrostatik basınç-bağıl yoğunluk deneysel verileri kullanılarak bakır tozlarına ait ilk sıkışma oranı (λ), yeniden sıkışma oranı (κ) hesaplanmıştır. Aynı parametreler için literatürden elde edilen farklı araştırmalara ait değerler Tablo 2'de verilmiştir. Martin vd. (2003) çalışmasından alınan gerilme grafiği Şekil 2.12'de verilmiştir.



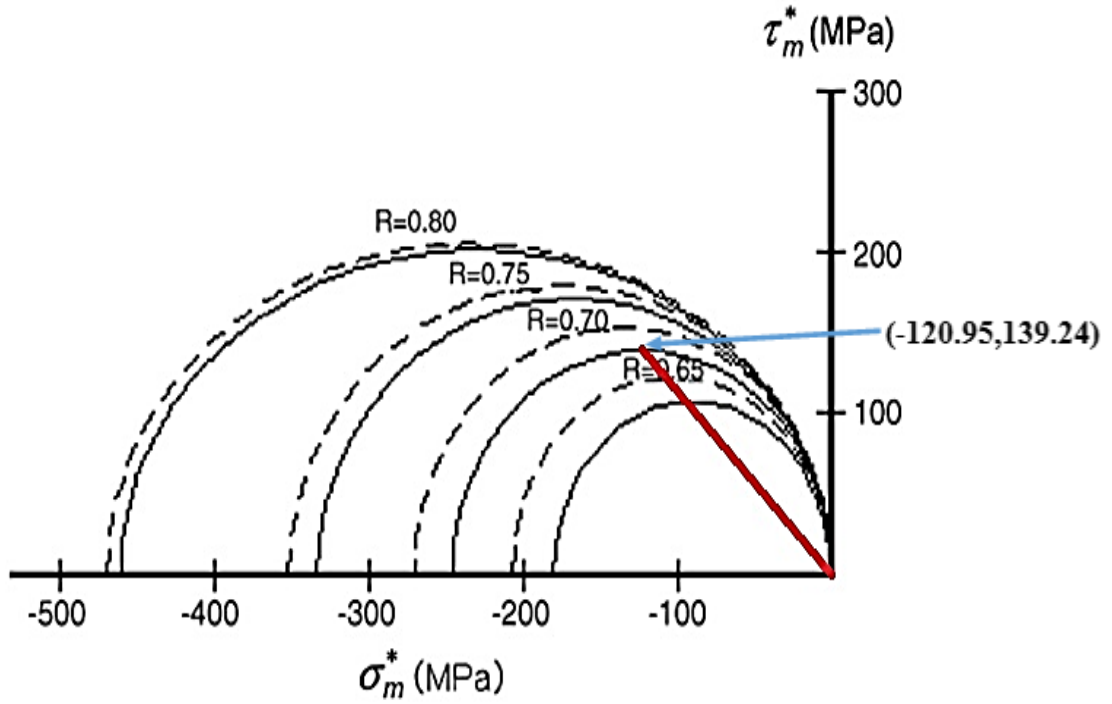
Şekil 2.12. Martin vd. (2003) hidrostatik basıncın bağıl yoğunluğa göre değişimi

Tablo 2 ve Şekil 1.3'den görüldüğü gibi yeniden sıkışma oranı elastik bölgeyi ilk sıkışma oranı değerleri plastik bölgeyi ifade etmektedir. Tablo 2'de gerilmenin 1 MPa olduğu küçük değerlerdeki sıkışma oranı, yeniden sıkışma oranına karşılık gelmektedir. Büyük gerilmeler için daha büyük sıkışma oranları elde edilirken bunlar ilk sıkışma oranına karşılık gelmektedir.

Tablo 2 MCC Modeli için hesaplanan sıkışma oranı değerleri

	Hidrostatik Basınç, P (MPa)	Bağlı Yoğunluk, RD	Boşluk Oranı, e	Sıkışma Oranı
Kim vd.(2001)	150.363	0,812	0,232	0,144
	249.307	0,863	0,159	0,17
	349.833	0,908	0,101	0,155
	349.833	0,908	0,101	0,155
Sun vd.(1999) Data 1	1	0,629	0,59	0,011
	10.158	0,673	0,486	0,017
	252.381	0,698	0,432	0,104
	453.404	0,729	0,371	0,107
Sun vd.(1999) Data 2	1	0,64	0,563	0,023
	90.561	0,77	0,299	0,175
	180.867	0,849	0,178	0,124
	271.118	0,887	0,128	0,156
James (1977)	1	0,636	0,573	0,023
	84.951	0,761	0,315	0,18
	155340	0,829	0,206	0,158
	240.291	0,88	0,137	0,1712
Storakers vd. (1999)	1	0,64	0,562	0,022
	80.769	0,76	0,315	0,166
	152.473	0,827	0,209	0,166
	234.066	0,879	0,138	0,166
Lee ve Kim (2007)	1	0,601	0,665	0,036
	150.288	0,811	0,234	0,146
	250.144	0,863	0,159	0,164
	348.991	0,905	0,105	0,153

Storakers vd. (1999)'nin çalışmasındaki deneysel verilerden elde edilen ilk sıkışma oranları bir süreklilik gösterdiğinden yapılan çalışmalarda bu değerler kullanılmıştır. Buna göre ilk sıkışma oranı $\lambda=0,166$ ve yeniden sıkışma oranı $\kappa=0,022$ olarak elde edilmiştir. Modelde ihtiyaç duyulan kritik durum çizgisi eğimi M değeri Park (2007) çalışmasından $M=1,1512$ olarak alınmış ve diğer malzeme parametreleri ile birlikte Tablo 3'te verilmiştir. Park (2007) çalışmasından alınan şekil değiştirme pekleşmesinin ihmal edildiği ve bağıl yoğunluğun 0,70 için kullanılan gerilme grafiği Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Park (2007) çalışmasında verilen, bağıl yoğunluğun fonksiyonu olarak akma düzlemleri a) pekleşme etkisi ihmal edilmiş (düz çizgiler) ve b) Pekleşme etkisi dahil edilmiş (kesik çizgiler)

Tablo 3 MCC analizine ait değerler

SEA Yazılımı	MSC Marc (v 2012.1.0)				
Geometri	3-boyutlu katı model				
Malzeme Modeli	Elastik-Plastik				
Akma Kriteri	Modifiye Cam-Clay				
Malzeme Parametreleri	E [MPa]	ν	λ	k	M
	1150	0,35	0,166	0,022	1,1512
Eleman Sayısı ve Tipi	60076 - Tetrahedral				
Elastik-Plastik Gövde	74				
Ağ Örgüsü Yenileme	PatranTetra (0.25 Şekil Değişimi)				
Analiz Adım Zamanı	Sabit Adım (100 Adım)				
Temas Tipi	Ayrık				
Sürtünme Modeli	Coulomb Bilinear displacement				
Sürtünme Katsayısı	0,1				
Başlangıç Koşulları	Preconsolidation Pressure = 30,89 MPa				
Analiz Süresi	96.953 s				

2.3.3. Mohr-Coulomb Malzeme Modeli

Kullanılan bir diğer malzeme modeli de Mohr-Coulomb modelidir. Modeli tanımlamak için malzemeye ait bir kohezyon (c) ve iç sürtünme açısına (β) ihtiyaç duyulmaktadır. İç sürtünme açısı biliniyorken denklem (2.6) kullanılarak modeli tanımlayan α değeri elde edilir. Hesaplanan α parametresi, sonlu elemanlar analiz programına akma gerilmesi ile birlikte verilerek programın akma sınırına bağlı olarak kohezyon değerini hesaplaması sağlanır. Anahtar malzeme parametresi olan iç sürtünme açısının tespiti, modelin ortaya koyacağı analiz sonuçları açısından belirleyici rol oynamaktadır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda Vyal ve Laptev (2002) tarafından belirlenen iç sürtünme aç değerleri Mohr-Coulomb malzeme model analizinde kullanılmıştır. Denklem (1.16), denklem (2.6) ve denklem (2.8) incelendiğinde analiz açısından ihtiyaç duyulan parametrelerin kohezyon, iç sürtünme açısı ve akma gerilmesi değeri olduğu görülmektedir. Analiz amacıyla kullanılan Marc Mentat 2012 programına ait User Manuel Volume A:

Theory and User Information yayınında kohezyon, iç sürtünme açısı ve akma gerilmesi arasındaki ilişkiler literatüre paralel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\sin \beta = \frac{3\alpha}{(1-3\alpha^2)^{1/2}} \quad (2.6)$$

Analiz programına iç sürtünme açısı olan β ve akma mukavemet değeri verilerek malzeme parametresi olan α ve kohezyon değeri olan c değeri elde edilerek sayısal analiz yapılmıştır.

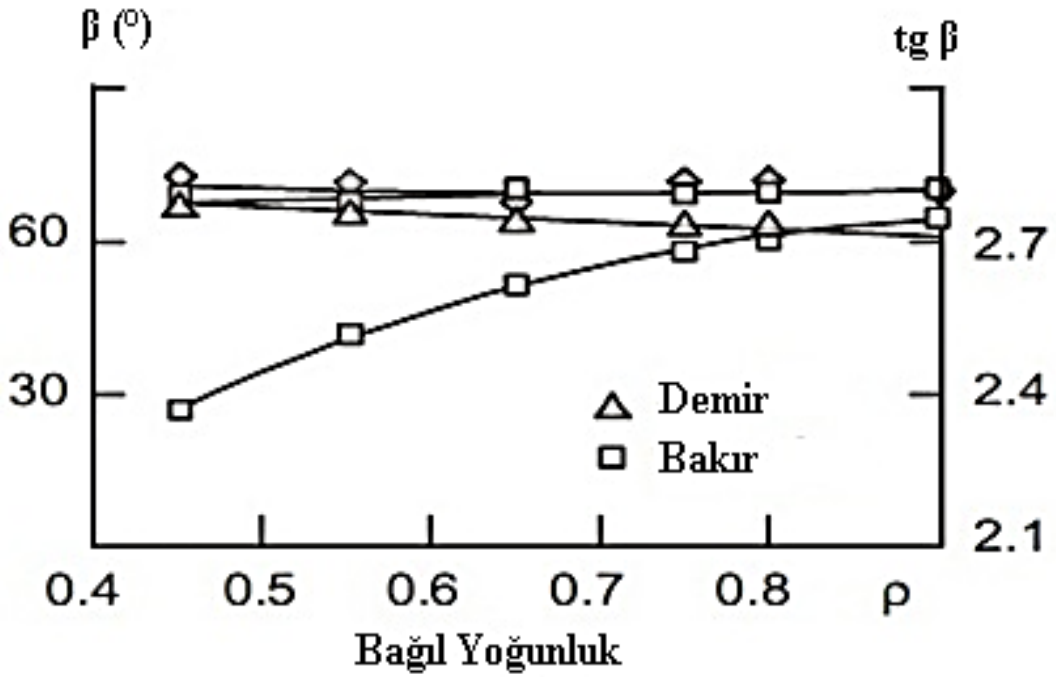
$$\sin(25,6) = \frac{3\alpha}{(1-3\alpha^2)^{1/2}}$$

$$\alpha = 0,2684 \quad (2.7)$$

İç sürtünme açısına bağlı olarak kohezyon değeri ise denklem (2.8) kullanılarak elde edilmiştir.

$$c = \frac{\sigma_y}{[3(1-12\alpha^2)]^{1/2}} \quad (2.8)$$

Bakır tozlarının iç sürtünmesini Vyal ve Laptev (2002) çalışmasından 0,425 bağıl yoğunluk için $\beta=64,9^\circ$ olarak okunmuş ve $\alpha=0,2684$ olarak hesaplanmıştır. Modelde tanımlanması gereken bir diğer parametre de akma gerilmesidir. Bakırın saflık ve ısıl işlem görmüş olmasına bağlı olarak çok farklı akma gerilmeleri mevcut olmasına karşın kullanılan modeller arasında bir bütünlük olması maksadıyla von Mises malzeme modelinde elde edilen 30,89 MPa değeri Mohr-Coulomb malzeme modeli için de akma gerilmesi olarak alınmıştır. Malzemenin elastisite modülü ve poisson oranı MCC modelinde açıklandığı gibi belirlenmiştir. Mohr-Coulomb malzeme modelinde kullanılan malzeme parametreleri ve analiz bilgileri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2.14. Vyal ve Laptev (2002)'in ortaya koyduğu iç sürtünme açısı değişimi

Tablo 4 Mohr-Coulomb modeli analiz bilgileri

SEA Yazılımı	MSC Marc (v 2012.1.0)		
Geometri	3-boyutlu katı model		
Malzeme Modeli	Elastik-Plastik		
Akma Kriteri	Mohr-Coulomb/Drucker-Prager		
Malzeme Parametreleri	E [MPa]	ν	α
	1150	0,35	0,2684
Eleman Sayısı ve Tipi	60076 - Tetrahedral		
Elastik-Plastik Gövde	74		
Ağ Örgüsü Yenileme	Patran Tetra (0.25 Şekil Değişimi)		
Analiz Adım Zamanı	Çoklu parametreler		
Temas Tipi	Ayrık		
Sürtünme Modeli	Coulomb Bilinear Displacement		
Sürtünme Katsayısı	0,1		
Başlangıç Koşulları	Yok		
Analiz Süresi	136.126 s		

2.3.4. Shima-Oyane Malzeme Modeli

Dördüncü malzeme modeli olarak Shima-Oyane modeli kullanılmıştır. Shima-Oyane genel denklemi (1.21)'de tanımlanmıştır. Marc Mentat yazılımında model için denklem (2.9) tanımlanmış olup denklem (2.10),(2.11) ve (2.12)'deki işlemler uygulanarak genel denklemin son hali (2.13)'denkleminde verilmiştir.

$$F = \frac{1}{\gamma} \left[q^2 + \frac{p^2}{\beta^2} \right]^{1/2} + \sigma_Y \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{\gamma} \left[q^2 + \frac{p^2}{\beta^2} \right]^{1/2} + \sigma_Y = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{\gamma^2} \left[q^2 + \frac{p^2}{\beta^2} \right] = (-\sigma_Y)^2 \quad (2.11)$$

$$\left[\frac{q^2}{\sigma_Y^2} + \frac{p^2}{\sigma_Y^2 \beta^2} \right] = \gamma^2 \quad (2.12)$$

$$\frac{q^2}{\sigma_Y^2} + \frac{p^2}{\sigma_Y^2 \beta^2} - \gamma^2 = 0 \quad (2.13)$$

Marc Mentat analiz programında Shima-Oyane malzeme özellikleri aşağıdaki (2.14) ve (2.15) denklemlerinde ifade edildiği gibi verilmiştir.

$$\gamma = \left(q_1 + q_2 D^{q_3} \right)^{q_4} \quad (2.14)$$

$$\beta = (b_1 + b_2 D^{b_3})^{b_4} \quad (2.15)$$

Marc Mentat analiz programında model için tanımlanmış ve denklem (2.13)'te düzenlenmiş olan bünye denklemi denklem (1.22)'ye eşitlenerek aşağıda gösterildiği şekilde β ve γ değerlerini ifade etmek için kullanılan $q_1, q_2, q_3, q_4, b_1, b_2, b_3, b_4$, parametreler elde edilir.

$$-\gamma^2 = -D^5 = (q_1 + q_2 D^{q_3})^{q_4} \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{\beta^2} = 6,2(1-D)^{1,028} \quad (2.17)$$

$$\beta = (5,9 - 5,9D)^{-0,514} = (b_1 + b_2 D^{b_3})^{b_4} \quad (2.18)$$

$$q_1 = 0 \quad , \quad q_2 = 1 \quad , \quad q_3 = 1 \quad , \quad q_4 = 2,5$$

$$b_1 = 5,9 \quad , \quad b_2 = -5,9 \quad , \quad b_3 = 1 \quad , \quad b_4 = -0,514$$

Modelde istenilen bir diğer parametre ise malzemeye ait viskozite değeridir. Bakır tozlarına ait viskozite ölçümlerine ilişkin yapılan literatür araştırması verileri Bölüm 1.1.4'te verilmiştir. Mevcut çalışmada kullanılacak viskozite değerinin tayininde viskozitenin malzeme modelindeki fiziki karşılığı belirlenmeye çalışılmıştır. Marc Mentat yazılımı Volume A (Theory and User Information)'da bulunan viskozite (μ') denklem (2.19)'daki gibi tanımlanmıştır. $\dot{\epsilon}$, şekil değiştirme hızı olup başlangıç durumu için zımbanın ilerleme hızının (V_k), kalıp yüksekliğine (h_k) oranı olarak denklem (2.20)'de tanımlanmıştır (Sofuoğlu ve Rasty (2000)). von Mises üstel akma fonksiyonundan elde edilen akma gerilmesi değeri 30,89 MPa, zımba ilerleme hızı 0,45mm/s ve katı modele ait kalıp yüksekliği kullanılarak viskozite değeri 91,52 N.s/mm² olarak belirlenmiştir.

$$\mu' = \frac{2}{3} \frac{\sigma_Y}{\dot{\varepsilon}} \quad (2.19)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_k}{h_k \cdot \exp(\bar{\varepsilon})} \quad (2.20)$$

Shima ve Oyane (1976), Alvesvd. (2006) ve bazı diğer araştırmacılar poisson oranının toz malzemelerde farklı değerlerde kullanılması gerekliliğine ilişkin çalışmalar ortaya koymuşlardır. Shima ve Oyane (1976) poisson oranı ile ilgili olarak bakır tozları için denklem (2.21) eşitliğini vermişlerdir. Denklem (2.21) kullanılarak poisson oranı, bağıl yoğunluğun fonksiyonu şeklinde $\nu=0,13$ olarak elde edilmiş ve diğer malzeme parametreleri ile birlikte Tablo 5'te verilmiştir.

$$\nu = 0,5 \left(1 - \frac{2 \left(2,49(1-D)^{0,514} \right)^2}{9} \right) / \left(1 + \frac{\left(2,49(1-D)^{0,514} \right)^2}{9} \right) \quad (2.21)$$

Tablo 5 Shima-Oyane analizine ait veriler

SEA Yazılımı	MSC Marc (v 2012.1.0)									
Geometri	Katı 3-boyutlu									
Malzeme Modeli	Elastik-Plastik									
Akma Kriteri	Shima- Oyane									
Malzeme Parametresi	E [MPa]	ν	q_1	q_2	q_3	q_4	b_1	b_2	b_3	b_4
	1150	0,13	0	1	1	2,5	5,9	-5,9	1	-0,514
Eleman Sayısı ve Tipi	60076 - Tetrahedral									
Elastik-Plastik Gövde	74									
Ağ rgs Yenileme	Yok									
Analiz Adım Zamanı	Sabit Zaman Adımı = 0,005									
Temas Tipi	Ayrık									
Sürtünme Modeli	Coulomb Bilinear Displacement									
Sürtünme Katsayısı	0,1									
Başlangıç Koşulları	Bağıl Yoğunluk = 0,425									
Analiz Süresi	60.810 s									

2.4. 2-boyutlu Analizler

Toz metalürjisi prosesleri ile ilgili literatürde sıklıkla 2-boyutlu analizlere rastlanmaktadır. Szarf (2011) ve Redanz (1999), metal tozu kütlesini poroziteli bir elastik-plastik gövde olarak kabul etmiş ve 2-boyutlu olarak modellemiştir. Bu tip çalışmalarda gerilmeler genel olarak tozun bağıl yoğunluğunun fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Mevcut çalışmada ilk olarak kalıp içerisine yerleştirilen tozların Şekil 2.1’de verilmiş olan 2-boyutlu model ile sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Analizler Intel Core i7-3632QM 2.20 GHz işlemci ile sürekli ortam modeller için 100-350 saniyede, çoklu parçacık modelleri için 200-450 saniyede tamamlanmıştır. Yapılan bu çalışmaların tamamı MARC MENTAT (Version 2012.1.0) yazılımı ile yürütülmüştür.

İki boyutlu analizlerin ilk aşamasında bağıl yoğunluk tanımlı sürekli ortam model analizleri yapılmıştır. Şekil 2.9’deki 3-boyutlu çoklu parçacıklı (MPFEM) modelde, toz hacminin kalıp hacmine oranı olarak hesaplanan bağıl yoğunluk değeri olan 0,425, 2-boyutlu sürekli ortam modelinde kalıp içerisindeki ağ örgüsünü oluşturan elemanların bağıl yoğunluk değeri olarak ta alınmıştır. 2-boyutlu çoklu parçacık modellerde bu bağıl yoğunluk değerini sağlamak için, bir küresel tozun kapladığı dairesel alanın, tozun içinde bulunduğu kareye oranı sabit bir değer olduğundan, 2-boyutlu modeldeki eleman yapısına da bağıl yoğunluk tanımlanmıştır. Böylece, 2-boyutlu analizler, düzlem şekil değiştirme analizi olarak MCC, Shima-Oyane ve Mohr-Coulomb malzeme modelleriyle yapılmıştır. Çalışmanın devamında 2-boyutlu çoklu parçacıklı analizlerde von Mises malzeme modeli ilavesiyle dört malzeme modeli kullanılarak yapılmıştır.

2.5. 3-boyutlu Analizler

3-boyutlu sürekli ortam modelleme yaklaşımında, iki boyutlu modellerde kullanıldığı gibi, Şekil 2.9’deki 3-boyutlu çoklu parçacık modelinin bağıl yoğunluğu tanımlanarak sonlu elemanlar analizine başlanmıştır. Ağ örgüsü yapısına sahip simülasyonlarda, bütün hacmin analizi tek bir elastik-plastik gövde kabulü ile bağıl yoğunluk tanımını içeren MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme model ve parametreleri ile yapılmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi von Mises malzeme modeli, bağıl yoğunluğa bağlı olmadığından sürekli ortam analizlerinde kullanılmamıştır. Kalıp ve toz temas yüzeyleri arasında 0,1 Coulomb sabit sürtünme katsayısı tanımlanmıştır. Sürekli ortam modelinde tek bir elastik-plastik

gövde olduğundan şekil değiştirme oranı bütün gövde için hesaplanmaktadır. Bazı bölgelerde aşırı şekil değişimi olması nedeniyle ağ örgüsü yenilenmeden yakınsama problemleri çıkacağından ağ örgüsü yenileme, belirli adım aralıklarında yapılmıştır. Sürekli ortam modellerinin sorun yaşadığı noktalar kalıbın süreksiz bölgeleri olduğu için ağ örgüsü zımba ilerlemesine bağlı olarak artma ya da azalma yönünde eğilim gösterebilmektedir.

İlk çoklu parçacık modeller, analiz sorunlarının sağlıklı bir şekilde tespit edilebilmesi açısından, hedeflenen çalışmadaki toz sayısından daha az sayıda toz bulunan modellerle ve bazı kabullerle oluşturulmuştur. Temas algılamanın kolaylaştırılması için yapılan ilk kabul, bütün tozların bir birine yapışık olarak tanımlanmasıdır. Başlangıçta az sayıda eleman içeren modellerden olumlu sonuçlar elde edildikçe elastik-plastik gövde sayısı ve buna bağlı olarak eleman sayısı da arttırılmıştır. Birbirlerine yapışık olarak tanımlanan tozların yapışıklık özeliği, elastik plastik gövdeler için gerilme değeri 1×10^{20} Pa'ı aşmadıkça program tarafından korunmaktadır. Temas tanımında bu değer değiştirilerek malzemenin akma gerilmesi değerine kadar tek bir elastik plastik gövde olarak hareket etmesi, ardından aralarındaki bağın çözülerek her bir metal tozu küresinin ayrı bir gövde olarak hareketine olanak sağlanmıştır. Tozların yapışık olarak tanımlanması başlangıçta tozlar bağımsız hareket edemediklerinden temas algılama problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Bu modelin ikinci adımda ise her bir metal tozu başlangıçtan itibaren diğer metal tozlarıyla ve kalıpla temasta bulunan bağımsız elastik plastik gövdeler olarak analiz edilmiştir.

Çoklu parçacık modelinde ağ örgüsü yenileme özeliği, tozların belirli bir şekil değişimine uğramaları kriterine bağlı olarak düzenlenmiştir. Bunun için her adımda her bir toz için şekil değişim miktarı ayrı ayrı hesaplandığından ağ örgüsü yenileme işlemi gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde modelin doğası gereği sağlanmıştır.

Çoklu parçacık (MPFEM) model kullanılarak yapılan sayısal çalışmalarda, von Mises, MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modelleriyle analizler yapılmıştır. Bu analizlerdeki bağıl yoğunluk değeri, Şekil 2.9'daki sonlu elemanlar modelinin sahip olduğu geometri ile doğal olarak tanımlanmış olup daha önce verildiği gibi 0,425 değerine eşittir. Bu modellerdeki her bir parçacık gözeneksiz olarak kabul edildiğinden her bir parçacığın bağıl yoğunluk değerleri bire eşit olarak tanımlanmıştır.

2.6. Sürtünme Etkisinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Farklı malzeme modellerinin metal tozu presleme prosesine etkilerinin incelendiği bu tez çalışmasında sayısal analizlerin doğal süreci yansıtması açısından sürtünme davranışının da tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple farklı sürtünme modelleriyle analizler yapılarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ele alınan ilk sürtünme modeli Coulomb sürtünme modeli olmuştur. Sürekli ortam modelinde yalnızca toz ve kalıp arasındaki temas yüzeylerine sürtünme katsayısı tanımlanırken çoklu parçacık modellerinde ise kalıp ve toz arasındaki temas yüzeylerinin dışında, tozların birbirlerine temas bölgeleri için de sürtünme tanımlanmıştır. Tüm bu modellerde 0,1 sabit sürtünme katsayısı ile sonuçlar elde edilmiştir.

Sürtünme problemlerinde malzemenin gözle görünen temas yüzey alanıyla gerçek temas alanının aynı olmaması Coulomb sürtünme modeline alternatifler araştırılmasına neden olmuştur. Görünen temas alanı ile gerçek temas alanı arasındaki ilişkiyi sürtünme problemlerinin çözümüne dahil etmek amacıyla oluşturulmuş Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modelleri hakkında önceki bölümlerde bilgi verilmiştir.

Bu modeller analiz işleminde kullanılan Marc Mentat sonlu elemanlar ticari yazılımının standart kurulumunda bulunmadığından ilk olarak Marc Mentat programının kullanıcı alt programlarını koşturması için gerekli eklentiler yapıldı. Marc Mentat fortran yazılım diliyle üretildiğinden Intel Fortran Composer 2011 (Intel Corp., Santa Clara, CA, USA) ve bu derleyici ile Marc Mentat programı paralel çalışmasını sağlayan Microsoft Visual Studio 2010 Ultimate Sürüm 10.0.30319.1 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) yazılımlarının eş çalışması için gerekli düzenlemeler yapıldı.

Marc Mentat programının sürtünme katsayısının hesaplanmasına yönelik olarak kullanıcının müdahalesine izin veren bir alt program olan “uftric.f” oluşturulmuş ve Ek-1 de verilmiştir. Ek-1’de verilen değişkenler kullanılarak Wanheim/Bay sürtünme modeli, denklem (1.28), (1.29), (1.30) ve (1.31) Fortran dilinde Ek-2’de verildiği şekilde kodlanmışlardır. Bu kodlama temel olarak Cora (2004) çalışmasından alınmış olup, 3-boyutlu durum, malzeme modeline bağlı parametreler ve sonuçların hassasiyetine bağlı bazı Fortran terimlerinde değişiklikler ve eklemeler yapılmıştır. “c” indisi ile başlayan satırlar, hesaplama dahil olmayan fakat alt program içerisinde hesaplatılan değişkenlere ait açıklamaları veren satırlardır. Algoritmanın başlangıcında seçilmesi gereken sürtünme faktörü, Wang (2014) ve Cora (2004)’ verildiği üzere $f=0,3$ olarak alınmıştır.

Yazılan bu programın amacı sürtünme katsayısının bir çıktı olarak elde edilmesi olduğundan, hesaplamanın başlangıcında bir dosya açıp değerler bu dosyaya kaydedilmiştir. Bütün elemanlar için toplanan verinin çok büyük olmasından dolayı yalnızca daha önceden belirlenmiş referans tozlara ait elemanların sürtünme katsayılarının kaydedilmesine yönelik düzenlemeler yapılmıştır.

Wanheim/Bay modeline benzer şekilde Levanov modelinde de bazı değişiklikler ve düzenlemeler yapılmıştır. Modele ait algoritma düzeyinde uygulanan en önemli değişiklik denklem (1.32)'de verilen eksponansiyel ifadenin mutlak değer olarak alınmasıdır. Sürtünme modeli oluşturulurken kayma gerilmesinin yalnızca bası durumunda olacağı varsayılmıştır. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki az sayıda olsa da bazı elemanların bazı düğüm noktaları temasta olmasına rağmen çeki gerilmesine maruz kalabilmektedir. Modelin uygulanabilmesi için gerilmenin mutlak değeri üzerinden işlem yapılmıştır.

Bu modele ait algoritma Ek-3'te verilmiş ve bu algoritmanın oluşturulmasından elde edilen sürtünme katsayıları, çıktı dosyaları üzerinden düzenlenerek Bulgular bölümünde sunulmuştur.

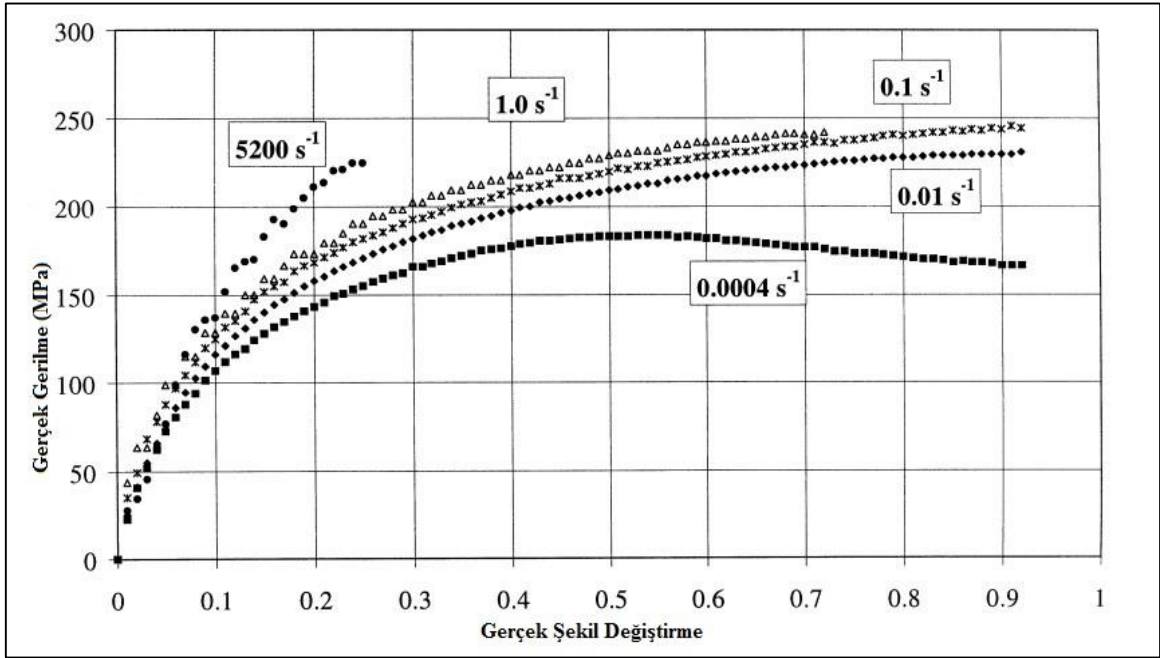
2.7. Sıcaklık Etkisinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Tez kapsamında bu aşamaya kadar yapılan analiz çalışmaları oda sıcaklığında yürütülmüştür. Endüstriyel presleme işlemlerinde yüksek bağıl yoğunlukların elde edilmesi ya da ürünün kalıptan çıkarken tozların birbirlerine yapışık kalması amacıyla sinterleme öncesinde düşük sıcaklık uygulamaları yapılmaktadır. Sıcaklık etkisinin incelenmesi için değişik sıcaklıklarda analizler yapılmasına karar verilmiştir. Uygun sıcaklık değerinin belirlenmesi amacıyla Kalpakjian (2008) ve Altan vd. (1983) kitapları incelendiğinde görülmüştür ki denklem (1.4)'ün ikinci kısmı olan eşdeğer birim şekil değiştirme hızı için malzeme parametreleri 300°C'nin üzerindeki sıcaklık değerleri için mevcuttur. Elde edilecek sonuçların oda sıcaklığındaki sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için oda sıcaklığında ihmal edilen eşdeğer birim şekil değiştirme hızının burada da ihmal edilebilecek düzeyde olması amaçlanmıştır.

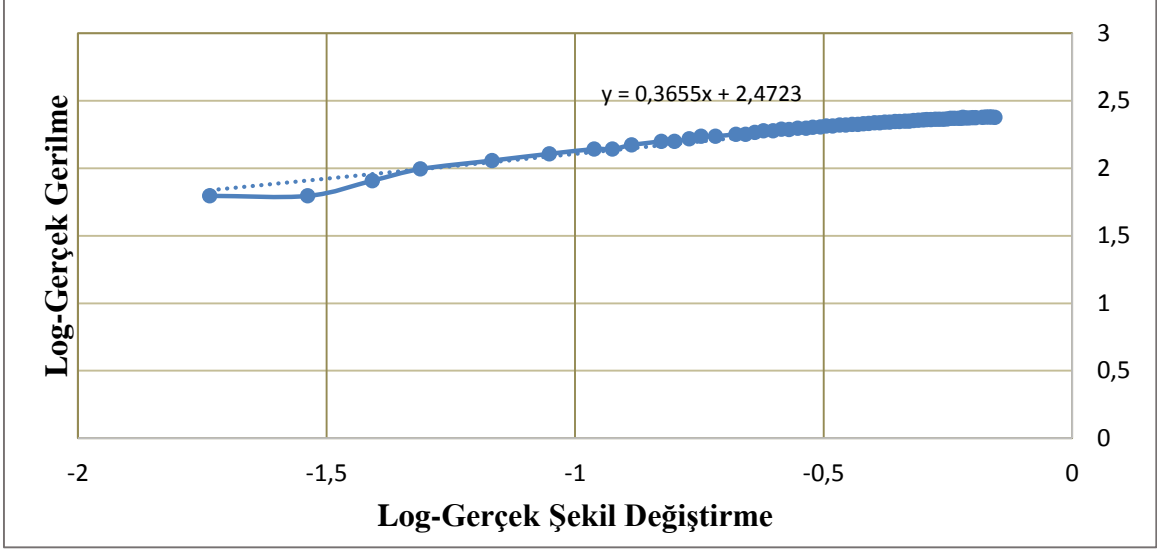
Saf bakır için malzeme parametrelerinin elde edilmesi amacıyla yapılan literatür araştırmasında, Tanner ve McDowell (1999) %99,95 oranında saf OFHC (Oxygen-Free High Conductivity) bakır ile farklı şekil değiştirme hızlarında yaptıkları presleme çalışmasında elde ettikleri gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.15'te

verilmiştir. Denklem (2.20)'de verilen şekil değiştirme hızı mevcut çalışmada, başlangıç durumunda $0,3s^{-1}$ değerinde hesaplanmıştır. Şekil 2.15'te verilen eğriler incelendiğinde $0,3s^{-1}$ değerinde şekil değiştirme hızı için eğri mevcut olmamasına rağmen $0,1s^{-1}$ ve $1s^{-1}$ eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Buradan $1s^{-1}$ eğrisi dijitalize edilerek veri noktaları alınmış ve Şekil 2.16'da verilmiş olan logaritma eğrisi çizilmiştir. Sofuoğlu ve Rasty (2000)'nin, çalışmasında detayları verilmiş olan yöntemle Şekil 2.16'daki eğrinin eğimi m ve dikey eksenini kestiği nokta A olacak şekilde, $269^{\circ}C$ için denklem (1.4)'teki malzeme parametreleri $A=296,7MPa$ ve $m=0,3655$ olarak elde edilmiştir. Bu parametrelerin değişimi ile denklem (2.4) ile hesaplanan akma gerilmesi $30,89 MPa$ 'dan $10,42 MPa$ değerine düşmüştür. Bu değişim ve elde edilen yeni akma gerilmesi, boyut ve sıcaklık etkisinin incelendiği Deb Nath (2014) çalışmasıyla örtüşmektedir.

Sıcaklığın etkilediği bir diğer parametre de elastisite modülü olup Agostinetti vd. (2011)'nin çalışmasından $99300 MPa$ olarak alınmıştır.



Şekil 2.15. OFHC Bakır için $269^{\circ}C$ 'de farklı şekil değiştirme hızları için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrileri (Tanner ve McDowell (1999))



Şekil 2.16. 269°C ve 1s⁻¹ için OFHC bakırın logaritmik gerçek gerilme-şekil değiştirme grafiği

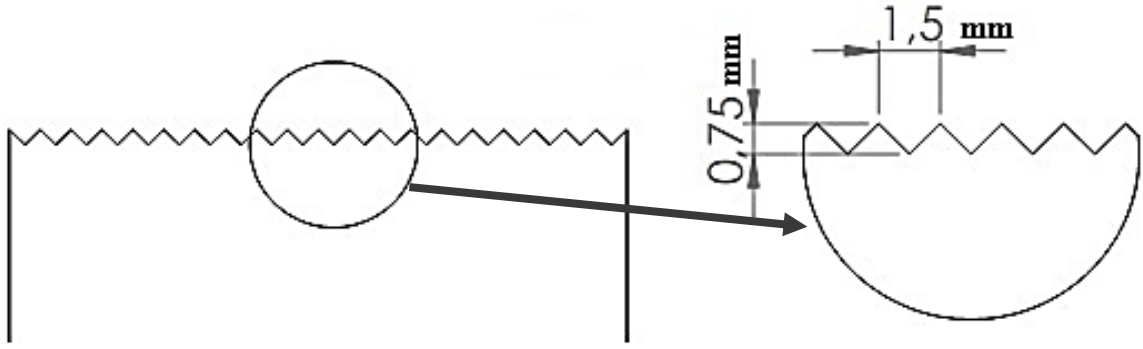
2.8. Deneysel Çalışmalar

2.8.1. Deney Kalıbı Modeliyle Yapılan Sayısal Çalışmalar

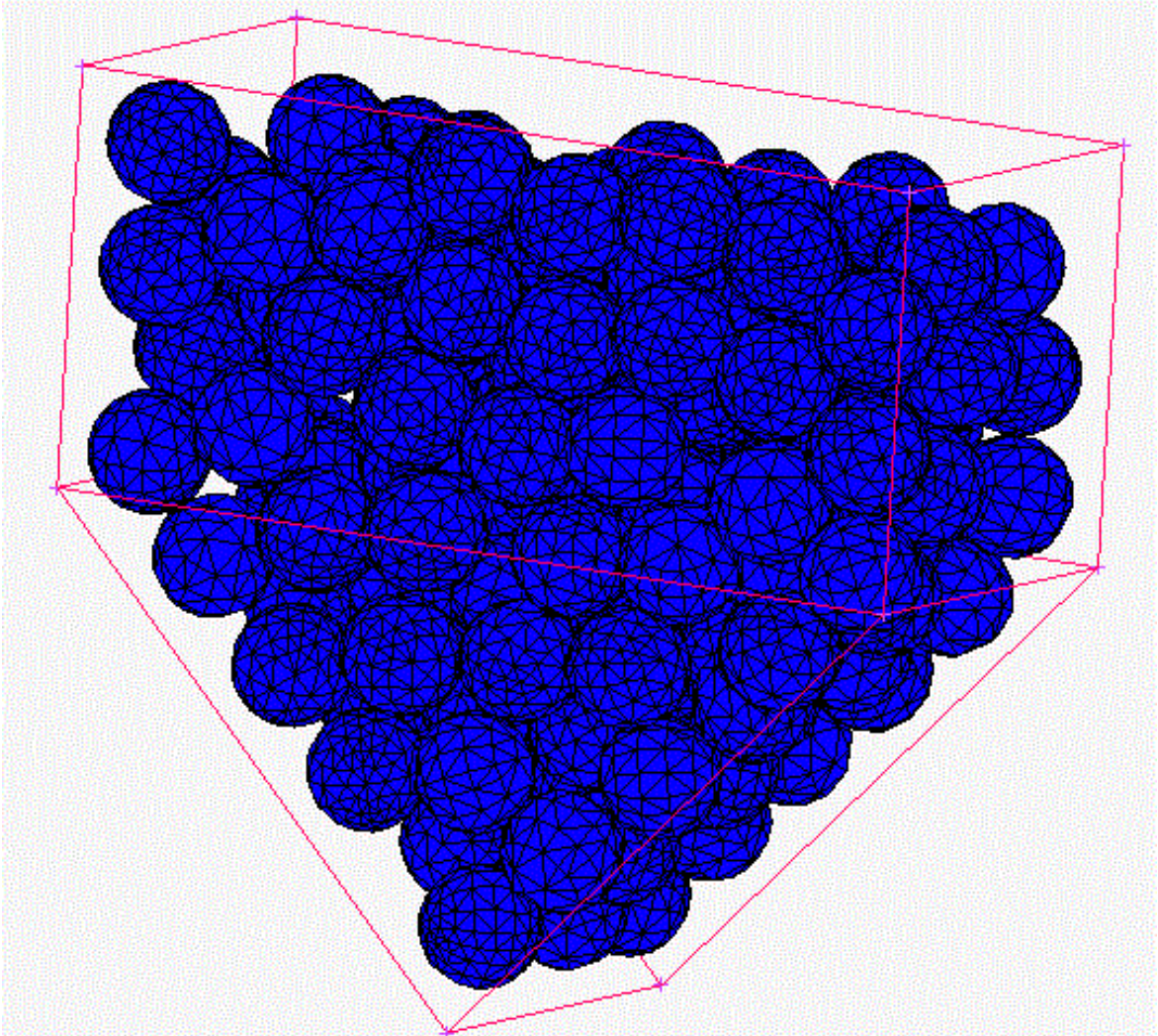
MPFEM çalışmalarında kullanılan kalıp geometrisinin süreksiz noktalarının sürece etkisinin irdelenebilmesi amacıyla ikinci bir MPFEM modeli oluşturulmasına karar verilmiştir. Oluşturulacak olan model mevcut modele benzer fakat geometrik süreksizliği daha az ve aynı zamanda deneysel çalışmalara uygun olmasına dikkat edilmiştir.

Deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada “yeni kalıp” olarak adlandırılan deney kalıbı modellenerek, bu model için sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal sonuçların ışığında deneyler yapılarak deneysel bulgularla sayısal bulguların karşılaştırılması ise ikinci aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara referans oluşturacak sayısal çalışmalar için geometrisi farklı bir “yeni kalıp” oluşturulmuş ve detayları Şekil 2.17’de verilmiştir.

Şekil 2.17’de kesiti verilen yeni kalıp geometrisine 0,68 mm’lik alt toz doldurma bölgesi ve derinlik kazandırılmış hali Bölüm 2.2. de anlatılan adımlar tekrarlanarak Şekil 2.18’deki model oluşturulmuştur.



Şekil 2.17. Yeni kalıp geometrisinin kesiti



Şekil 2.18. 130 adet toz içeren yeni kalıp için oluşturulan MPFEM modeli

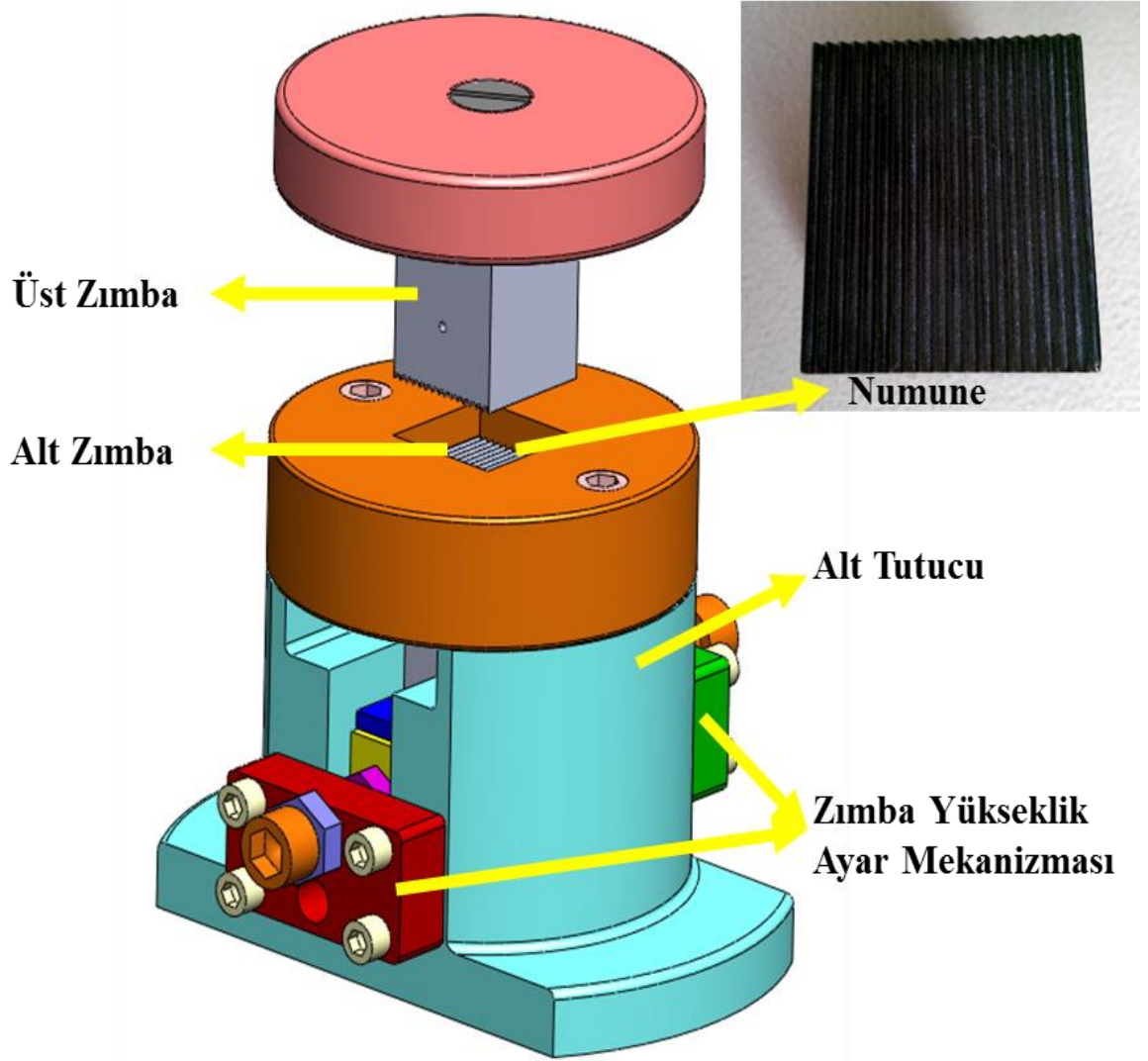
Bu iki kalıp geometrisi kıyaslandığında benzer olmalarının yanı sıra ilk modelde kavisli bazı bölgelerin bu kalıpta 45° açıyla geçildiği, kalıp dış yüksekliğinin dış genişliğine oranı ilk kalıpta 0,84 iken ikinci kalıpta 0,5 olduğu görülmektedir. Görünüm oranı olarak adlandırılan dış yüksekliğinin dış genişliğine oranının artmasının yeniden yerleşme sürecini kolaylaştırması ve gerilme yığılmalarını da azaltması amaçlanmıştır.

Elde edilen yeni kalıp geometrisi içerisinde 130 adet elastik-plastik bağımsız gövde üzerinde 92836 tetrahedral eleman bulunmaktadır. von Mises malzeme modeliyle farklı sürtünme modelleri kullanılarak analizler Marc Mentat yazılımı ile koşturulmuştur.

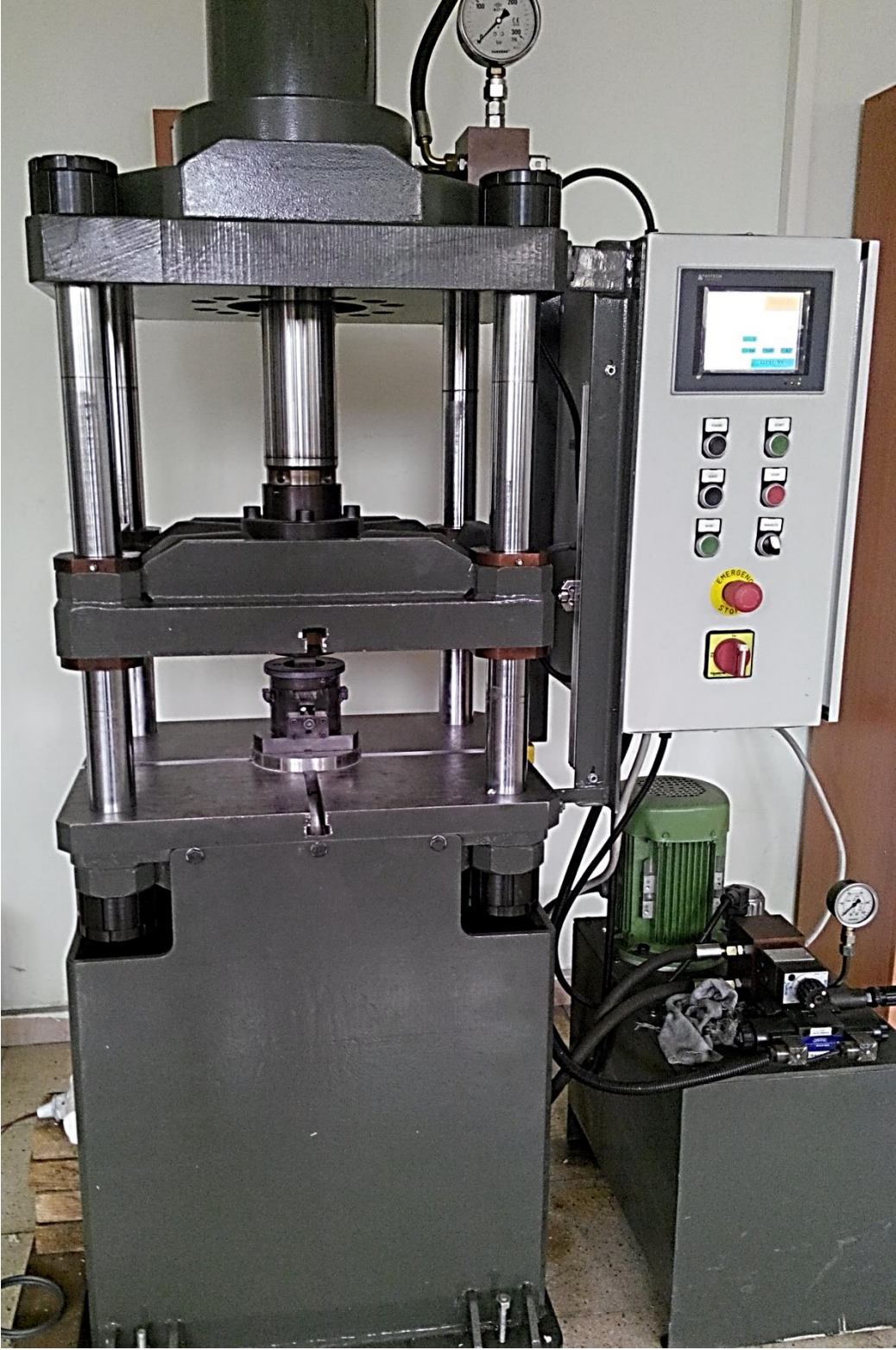
2.8.2. Yapılan Deneyler

Bu bölümde yapılan çalışmalarla elde edilen sayısal analizlere ait veriler deneysel çalışmalarından elde edilen bulgularla karşılaştırılarak malzeme ve sürtünme modellerinin toz presleme prosesinin doğasına uygunluğunun incelenmesi amaçlanmıştır. Şekil 2.19 ve Şekil 2.20'de verilmiş olan kalıp destek sistemi ve presleme deney düzeneğinde deneyler yapılmıştır. İndüksiyon ısıtıcı kullanılarak ısıtılan kalıbın sıcaklığı termokupl kullanılarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen zımba gerilme değerlerinde basınç uygulanarak numuneler elde edilmiş ve çekilen mikroskop görüntüleri Bulgular ve İrdeleme bölümünde verilmiştir.

Kalıp üst zımbası olarak sayısal analizlere benzer düz bir zımba kullanılmıştır. Kalıba konulan toz miktarı, kalıp destek sisteminin her iki tarafında bulunan cıvatalar ile sağlanmaktadır. Bu cıvatalar kalıbın alt kısmında bulunan iki eğik kamanın hareketini belirlemektedir. Bu kamalar birbiri üzerinden kayarak kalıbı aşağı ya da yukarı hareket ettirmektedir. Deneyde kullanılması planlanan toz miktarı ayarlandığında cıvatalar sökülerek kalıbının destek sistemi üzerine oturması sağlanır. Böylece kalıba gelen basıncın tamamı destek sistemine iletilirken zımbanın da destek sistemi içerisinde yataklanarak hareket etmesi sağlanmaktadır.

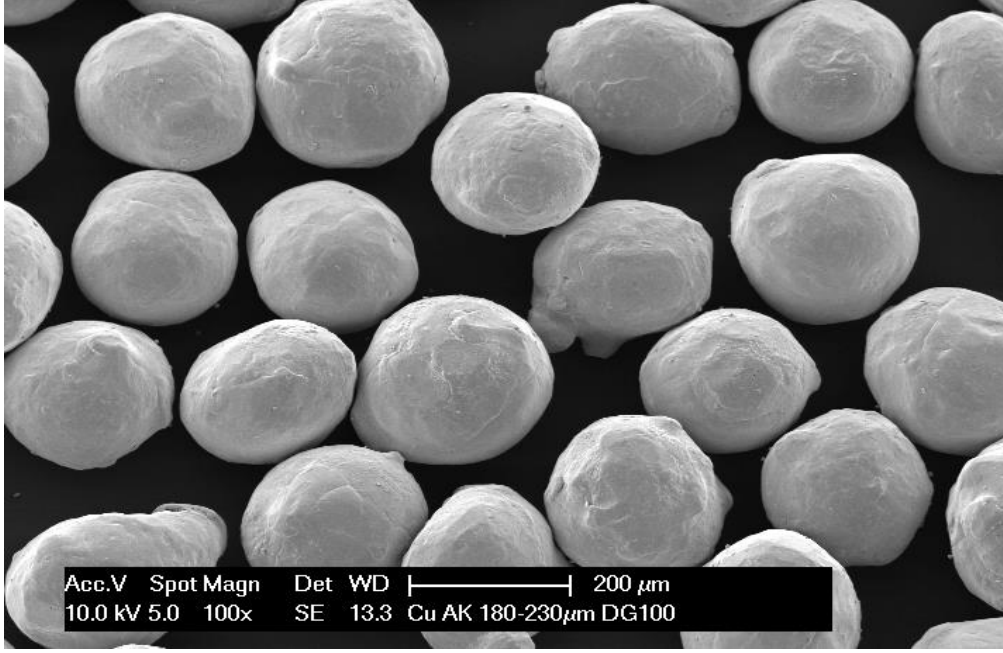


Şekil 2.19. Deneysel çalışmada kullanılan kalıp bileşenleri



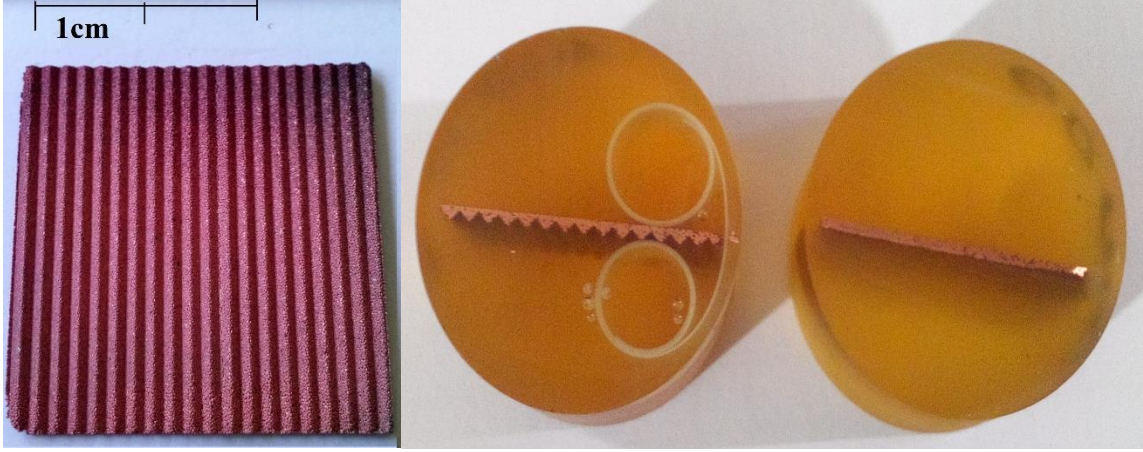
Şekil 2.20. Deney Düzenegi

Bileşimi %99.9 oranında saf bakırdan oluşan küresel tozlar, yapılacak olan deneylerde kullanılmak üzere tedarik edilmiştir. ECKA Granules Germany GmbH (Fürth/Almanya) tarafından üretilen küresel bakır tozlarının optik mikroskop altındaki görüntüleri Şekil 2.21’de verilmiştir. Sayısal çalışmalarda kullanılan 200µm boyutunda tozlara uygun olarak deneylerde 180-220µm aralığındaki tozlar kullanılmıştır.



Şekil 2.21. Deneylerde kullanılan küresel bakır tozlarının SEM görüntüsü

Hall-Flowmeter akış özelliği 100 g/s olan küresel bakır tozlarının preslenmesiyle elde edilen numuneler bakalit kalıbına konularak üzerlerine sıvı polimer ve sertleştirici karışımı dökülmüştür. Karışım yedi saat bekletildikten sonra bakalit katılaşmıştır. Bakalit içerisindeki numuneler 200-600-800 numara zımparalarla kademeli olarak zımparalanmış ve bakalit içerisindeki numuneler SEM (Scanning Elektron Mikroskop) ve optik mikroskop için hazır hale getirilmiştir. Elde edilen bir numune ve bakalite alınmış SEM örnekleri Şekil 2.22 de verilmiştir.



Şekil 2.22. Preslenmiş ve bakalite alınmış numuneler

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Malzeme Modelleri Göre Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

Bölüm 1’de genel denklemleri ve diğer özellikleri açıklanan dört malzeme modeli; von Mises, Modifiye Cam-Clay (MCC), Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane modelleri kullanılarak Sürekli ortam ve Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi (MPFEM) analizlerinden elde edilen bulgular bu bölümde verilmiştir.

3.1.1. Sürekli Ortam Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

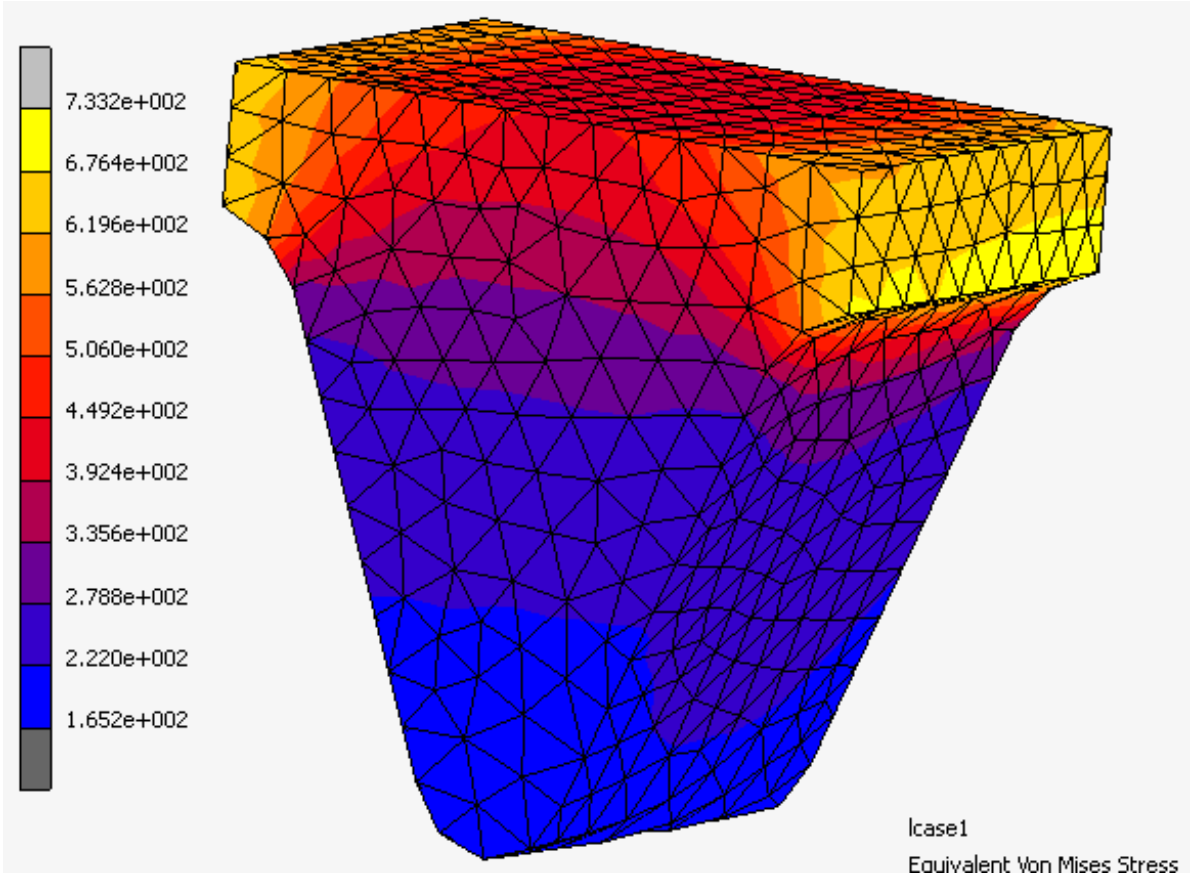
Sürekli ortam modelleri, 2-boyutlu ve 3-boyutlu olarak oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. İlk olarak 2-boyutlu modeller malzeme davranışı ve prosesi tanıma amacıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve sonra 3-boyutlu modellerle analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Belirli bir porozite ya da bağıl yoğunluk değeri tanımlanmış olan sürekli ortam modeli yapısı gereği, tozların kalıp içerisinde yeniden yerleşme davranışını, toz-kalıp etkileşimini ve tozların kendi aralarındaki etkileşimlerini ifade edememektedir. Bu sebeple herhangi bir temas gerilmesi, sürtünme gerilmesi ya da toz boyutunda şekil değişimi hesaplanması söz konusu olmamıştır.

Sürekli ortam analizlerinde, 3-boyutlu çoklu parçacık modelinin oluşturulmasıyla ortaya çıkan bağıl yoğunluk değerinde analiz edilmiştir. Şekil 2.3’de geometrik detayları verilen model kullanılarak farklı malzeme modelleri için analizler yapılmıştır.

a) MCC Malzeme Modeli Kullanılarak Gerçekleştirilen Analizler

Bu kısımda zemin mekaniği uygulamaları için geliştirilmiş olan malzeme modelinin toz presleme prosesine uygulaması yapılarak elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Modelde elastik sınırın belirlenmesi amacıyla başlangıç koşulu olarak analize bir akma gerilmesi (Preconsolidation Pressure) tanımlanmıştır. Şekil 3.1 MCC malzeme modelinin sürekli ortam analizi sonucunda deformasyona uğramış gövde üzerindeki eşdeğer gerilme dağılımını vermektedir.

Kalıba, başlangıç koşulu olarak %42,5 oranındaki bağıl yoğunluğa eşdeğer, 1,353 değerinde boşluk oranı tanımlanmıştır. Kalıp içerisindeki tozların arasındaki boşlukların kalıp hacmine oranı olan boşluk oranı, zımbanın 0,45 mm aşağı yönlü hareketi sonucunda 0,37 değerine ulaşmıştır. Tozların kendi aralarındaki etkileşiminin yansıtılmadığı bu analizde, kalıp ve toz temas bölgelerindeki sürtünme, Coulomb sürtünme modeliyle analiz edilmiştir.

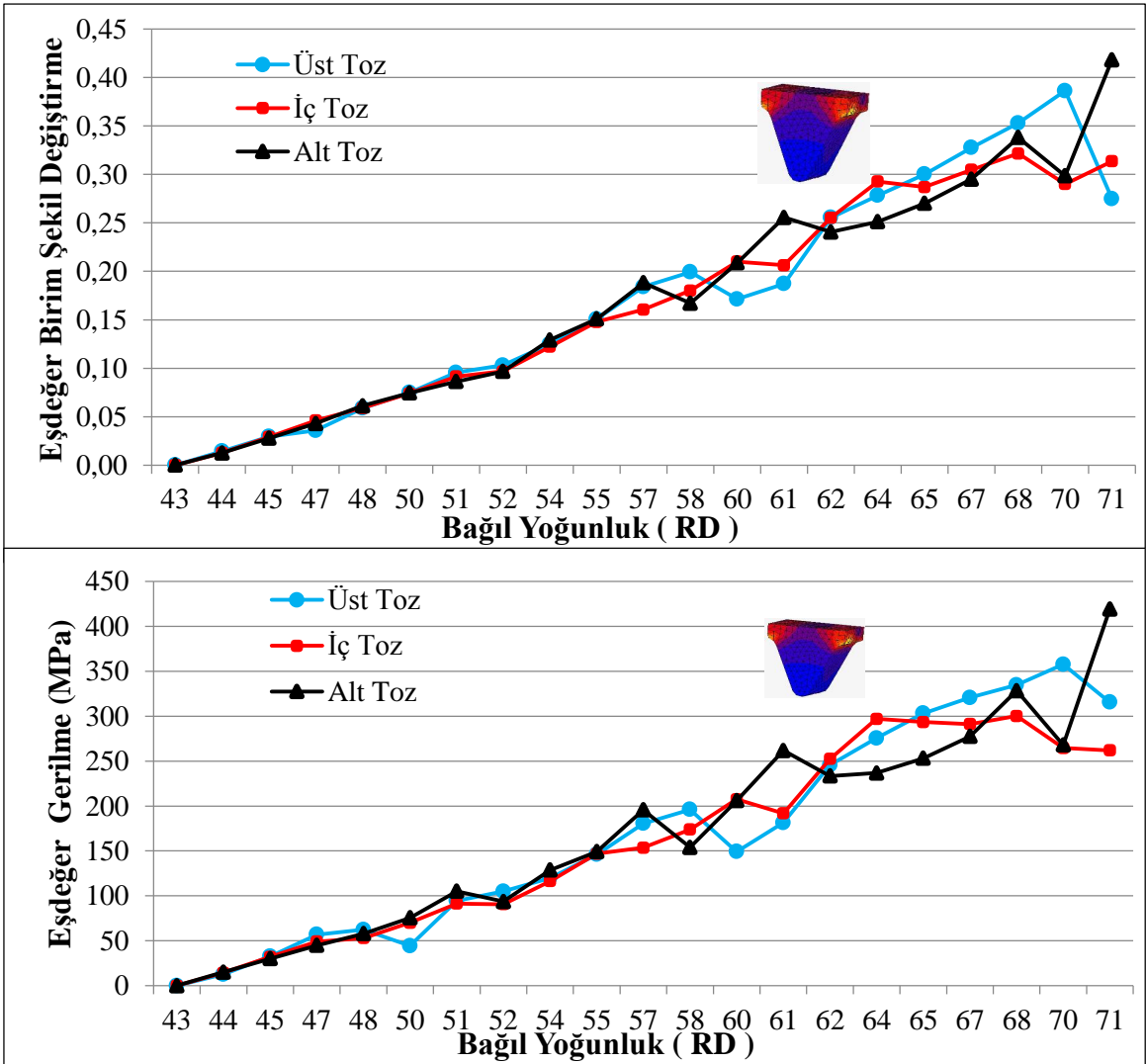


Şekil 3.1. Sürekli ortam analizinde MCC malzeme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Kalıbın süreksizlik gösterdiği bölgelerde ve zımbaya yakın yüzeylerde eşdeğer gerilmenin arttığı görülmüştür. Oluşan en düşük eşdeğer gerilme değeri 165 MPa düzeyinde olmasına karşın kalıbın geometrik olarak süreksizlik gösterdiği (keskin köşeli) bölgelerinde çok az sayıdaki eleman üzerinde gerilmelerin 733 MPa düzeyine çıktığı görülmüştür. Bu gerilme değerlerine karşılık gelen eşdeğer birim şekil değiştirme miktarı 0,24-0,64 aralığında gerçekleşmiştir ki bu bölgede yüksek oranda plastik deformasyondan bahsetmek

mümkündür (Şekil 3.2). Zımbaya gelen kuvvetin ise bir saniye içerisindeki 0,45 mm'lik yer değiştirme sonucunda 717 N düzeyine ulaştığı görülmüştür.

Modele ait eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değişimi değerleri referans tozlar üzerinden Şekil 3.2 de verilmiştir. Şekil 3.2.'de verilmiş ve sonrasında Şekil 3.4 ve Şekil 3.6. da verilecek olan üst toz, iç toz ve alt toz olarak belirtilmiş değerler bütün düğüm noktalarını incelemek yerine seçilen referans bölgelerini ifade etmektedir. Bu bölgelerin bulunduğu koordinatlara karşılık gelen tozlar MPFEM modelleme yaklaşımında referans tozlar olarak adlandırılmış ve eşdeğer gerilme değerleri bu bölgelerdeki tozların tüm düğüm noktalarındaki değerlerin ortalaması hesaplanarak verilmiştir.

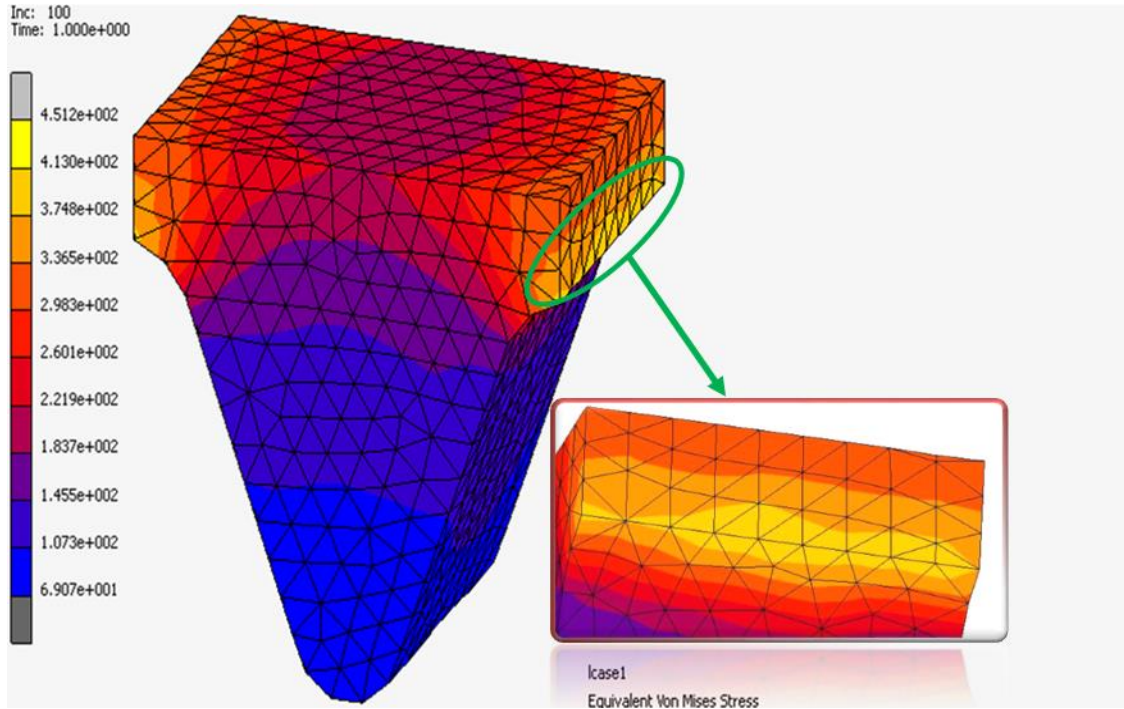


Şekil 3.2. Sürekli ortam analizinde MCC malzeme modelinin kullanılması sonucu elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri

b) Mohr-Coulomb Malzeme Modeli Kullanılarak Gerçekleştirilen Analizler

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan ikinci malzeme modeli olan Mohr-Coulomb malzeme modeli ile gerçekleştirilen analizler sonucunda MCC malzeme modeli ile yürütülen analize benzer olarak, kalıbın süreksiz bölgelerinde ve zımbaya yakın yüzey elemanlarında Şekil 3.3'te gösterildiği üzere aşırı deformasyonlar gerçekleşmiştir. Analizin yakınsama kriteri bu bölgelerdeki elemanlar üzerinden belirlenmiştir. Aşırı deformasyonun olduğu bu bölgelerde başlangıç eleman yoğunluğu fazla tutulmuş olmasına karşın yine de ağ örgüsü yenileme işlemi şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak yapılmıştır.

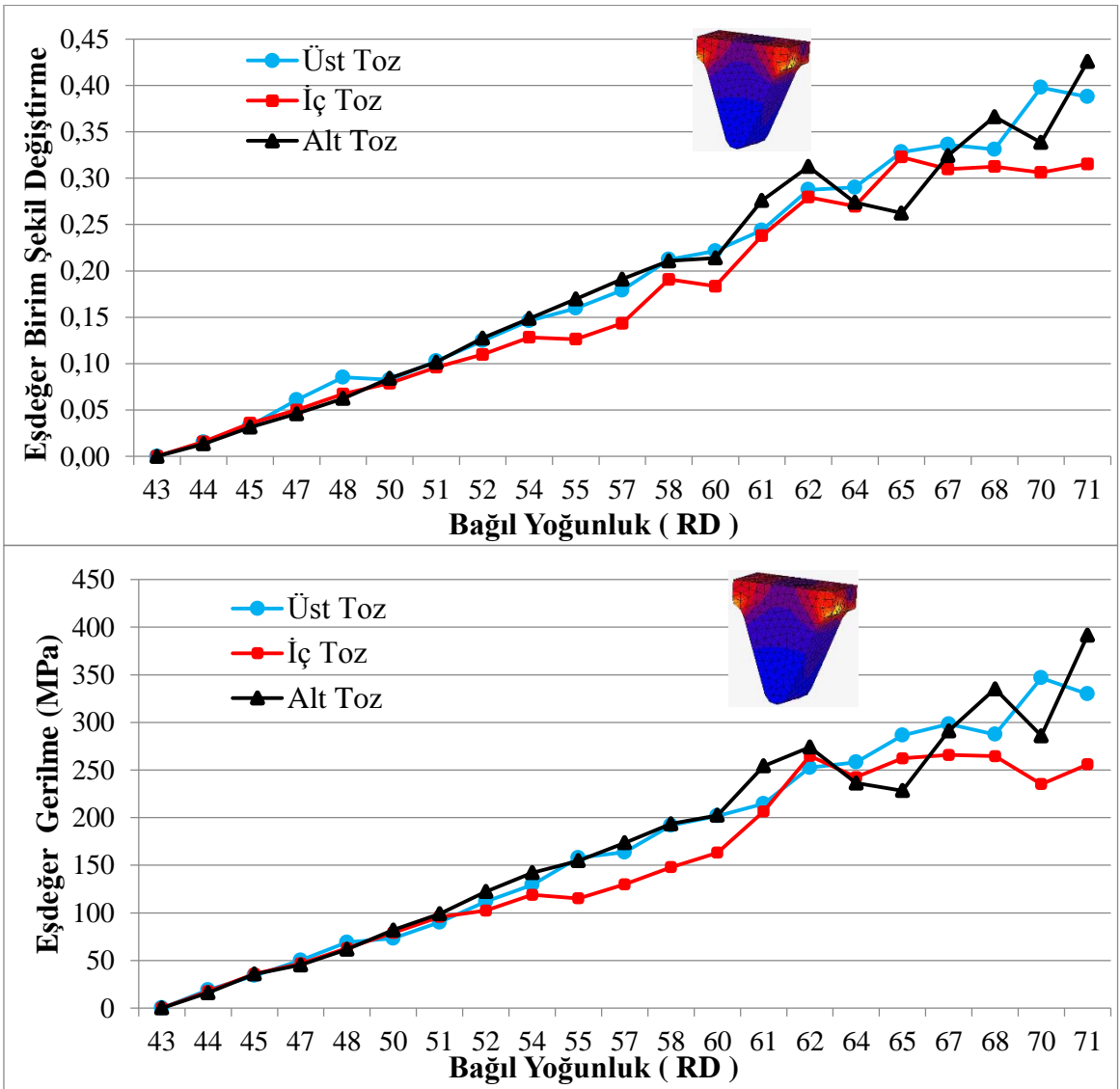
Tozların preslenmesi sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme değeri 69 MPa ile 451 MPa arasında değişmektedir. Eşdeğer birim şekil değiştirme miktarı ise 0,22 - 0,81 aralığında değişmektedir. Zımbaya gelen dikey tepki kuvveti ise 351 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Sürekli ortam analizinde Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 3.4 Mohr-Coulomb malzeme modeli ile yapılan sürekli ortam analizi sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değişimi değerlerini vermektedir.

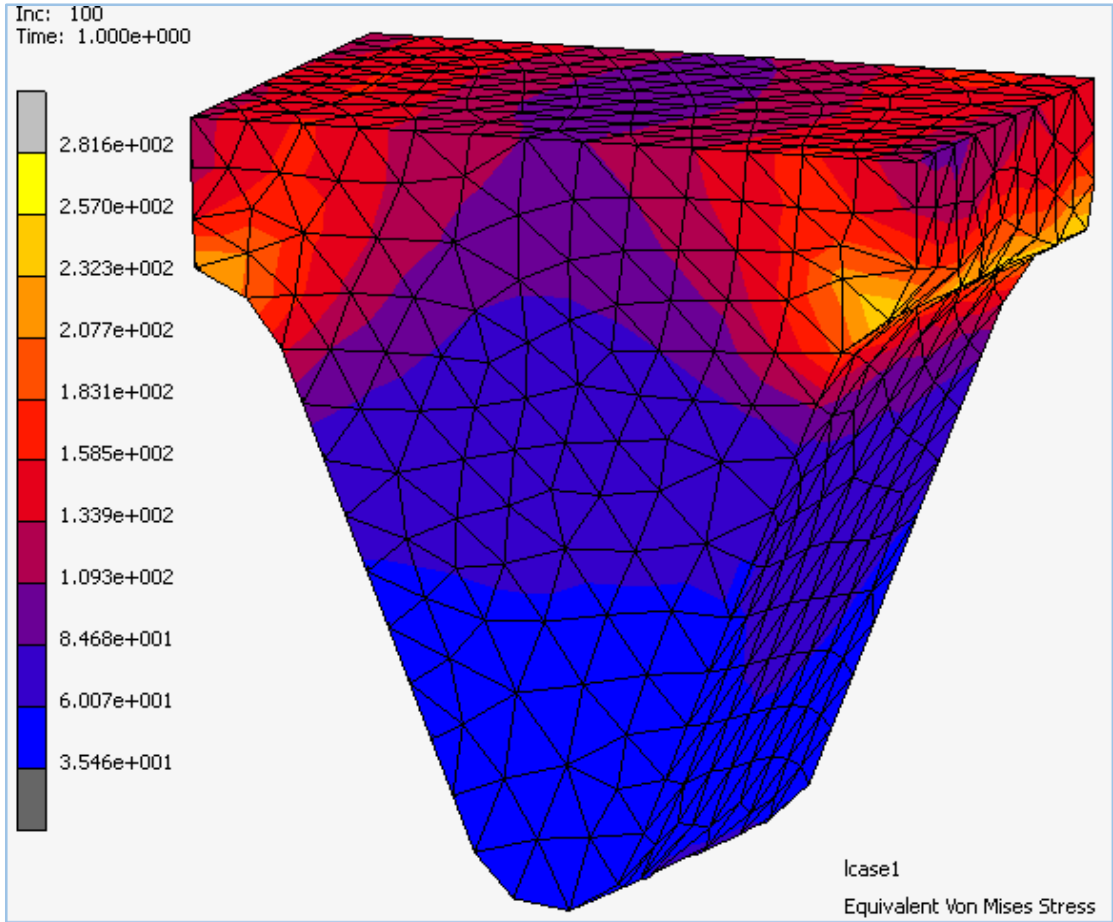
Hesaplanan eşdeğer gerilme değerleri arasında farklılıklar olmasına rağmen modelin genel davranışı MCC modeli ile benzerlik göstermektedir. Eşdeğer gerilme ve şekil değiştirme değerleri doğrusal bir eğilim içerisinde artmaktadır. Ani değişikliklerin sebebi ise ağ örgüsü yenileme özelliğinden dolayı düğüm noktasına etkiyen gerilmenin değişmesidir. Referans tozların eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değişimleri, % 58 bağıl yoğunluğa kadar birbirlerine çok yakın değerlerde olmasına karşın bu bağıl yoğunluk değerinden sonra eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değiştirme grafikleri arasında farklar oluşmaya başlamıştır.



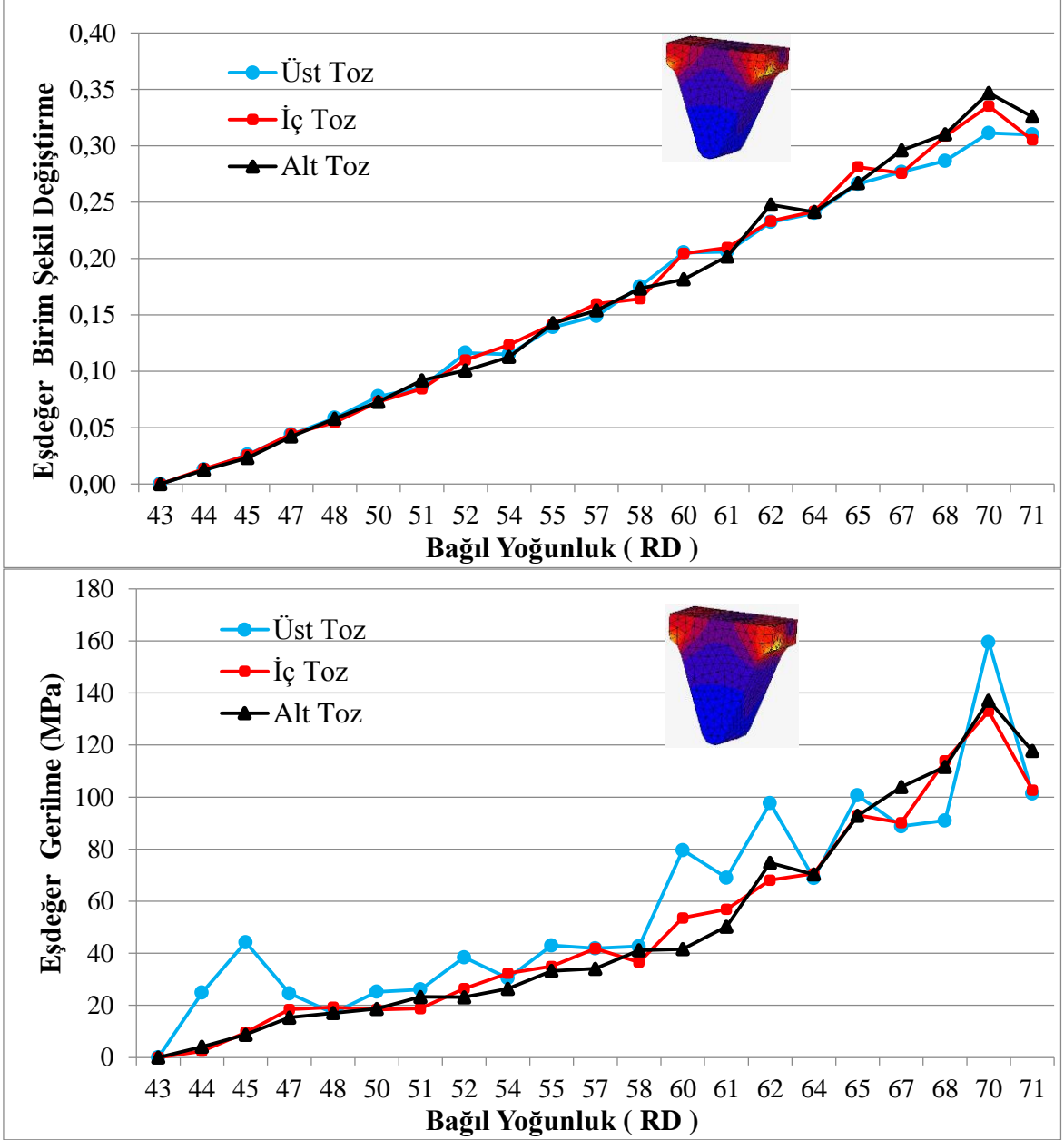
Şekil 3.4. Sürekli ortam analizinde Mohr-Coulomb malzeme modelinin kullanılması sonucu elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri

c) Shima-Oyane Malzeme Modeli Kullanılarak Gerçekleştirilen Analizler

Shima-Oyane malzeme modeline ait sürekli gövde analizinde daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilmiştir. Eşdeğer gerilme değeri minimum 35 MPa ile maksimum 280 MPa değerleri arasında değişmektedir. Şekil 3.5'te verilmiş olan 280 MPa düzeyindeki maksimum eşdeğer gerilme, 3-boyutlu bağıl yoğunluk tanımlı model ile MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modelleri kullanılarak yapılan analizlerde elde edilen en düşük maksimum gerilme değeridir. Oysaki iki boyutlu bağıl yoğunluk tanımlı modeller ve aynı malzeme modelleri kullanılarak yapılan analizlerde Shima-Oyane malzeme modeli en yüksek gerilme değerlerini vermiştir. Referans bölgelerin eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Sürekli ortam analizinde Shima-Oyane malzeme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 3.6. Sürekli ortam analizinde Shima-Oyane malzeme modelinin kullanılması sonucu elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri

Bu model 0,28-0,53 ile, sürekli malzeme modelleri arasında eşdeğer birim şekil değişirme oranı en dar olan malzeme modeli olmuştur. Maksimum eşdeğer gerilme değerine paralel olarak eşdeğer birim şekil değiştirmenin maksimum değeri de MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modelleri arasında en düşük değeri almıştır. Buna karşılık eşdeğer birim şekil değiştirmenin minimum değeri bu üç malzeme modeli arasında en yüksek değerdedir. Yani Shima-Oyane malzeme modeli eşdeğer birim şekil değişirme değerinde

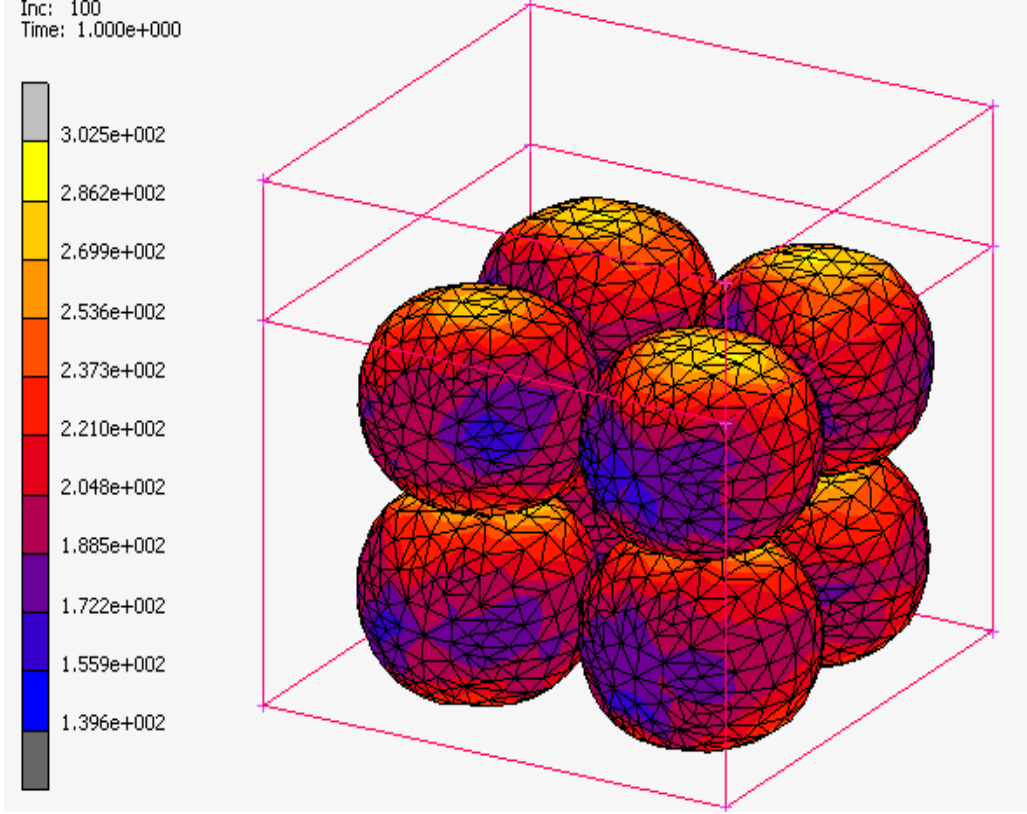
minimum değer olarak en yüksek, maksimum değer olarak en düşük sonuçları ortaya koymuştur.

Zımbaya gelen tepki kuvveti 135 N olarak ölçülmüş olup, bu kuvvet zımba yüzeyinde 200 MPa düzeyinde gerilme oluşturmuştur. Zımbaya yaptırılan yer değiştirme hareketi ile üst yüzeyde oluşan gerilme dağılımındaki göreceli yükseklik, tek eksenli presleme sistemlerinin olumsuzluklarından biri olan heterojen gerilme dağılımına bir örnektir.

3.1.2. MPFEM Analizlerden Elde Edilen Bulgular

Sürekli ortam modeli ile yapılan 3-boyutlu çalışmalar göstermiştir ki tozların iç etkileşiminin ve sürtünme davranışının tam olarak anlaşılabilmesi için MPFEM yaklaşımının kullanımı gereklidir. Bu yaklaşımın bugüne kadar kullanılmamasının önemli bir nedeni bilgisayar teknolojisindeki yetersizliktir. Analiz edilmesi gereken modelde binlerce 3-boyutlu eleman ve bu elemanlarda aynı anda gerçekleşebilecek yüzlerce temasın algılanmasını sağlayacak algoritmaların kullanılması gerekmektedir. Çalışmanın önündeki bu zorluk nedeniyle öncelikle az eleman sayısında ve az sayıda temas noktası oluşturacak modellerle analizlere başlanmıştır.

Çoklu parçacık analizlerine 3-boyutlu bir hacim içerisinde birbirine yapışık 8 adet elastik-plastik gövde ile başlanmış olup oluşturulan ilk öncül 3-boyutlu çoklu parçacık modeli Şekil 2.4'te gösterilmişti. Modeldeki 0,35 mm çapındaki küresel tozların preslenmesi sonucunda elde edilen şekil değiştirmiş yapı incelendiğinde tozların yeniden yerleşme sürecinin yine de yansıtılmadığı Şekil 3.7 de görülmektedir. Tozlar birbirine yapışık olarak tanımlandığından ve kalıp içerisinde hareket edebileceği yeni konumlar olmadığından yeniden yerleşme süreci bu modelde gözlemlenememiştir. Gerilme dağılımı, temas bölgelerinde ve özellikle kalıba yakın bölgelerde maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Kalıbın geometrik geçiş bölgelerinde deformasyon olmadığından gerilme dağılımı daha dar bir aralıkta kalmıştır.



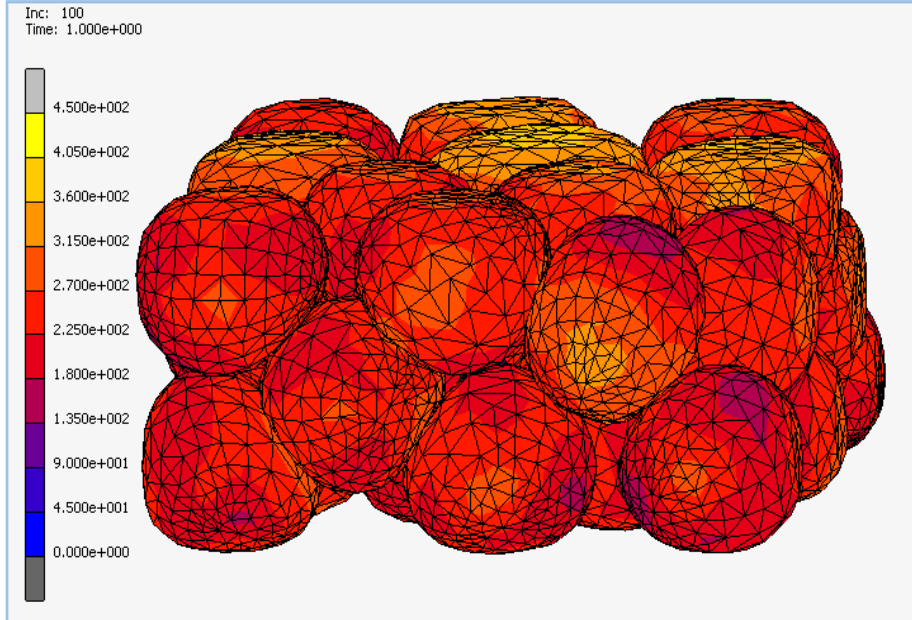
Şekil 3.7. Sekiz adet elastik-plastik gövdeye sahip çoklu parçacık modelinde deformasyon sonrası oluşan gerilme dağılımı

Sekiz adet toz içeren MPFEM modelin ardından 27 adet elastik-plastik gövdeye sahip başka bir MPFEM modeli ile analizler yapılmıştır. Geometrisi Şekil 2.5'te verilmiş olan modelin analiz sonuçları sekiz elemanlı modelle benzerlikler göstermektedir. Bu model de aynı şekilde yeniden yerleşmeye müsaade etmemekte ve özellikle temas bölgelerinde gerilme ve şekil değiştirme değerlerinde yoğunlaşmalar görülmektedir. Öncül modellerle ilgili bir diğer sorun da bu şekildeki düzenli yerleştirmenin sabit bir bağıl yoğunluk değeri oluşturmasıdır.

Model geliştirme aşamasında son olarak, Jerier vd.(2011)'nin Ayrık Eleman yöntemi ile yaptıkları çalışmalarında kullandıkları model oluşturulmuştur. Jerier vd. (2011) çalışmalarında malzeme modeli olarak kullanılan von Mises üstel fonksiyonu, model geliştirme aşamalarında bütün analizlerde uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında von Mises malzeme modelinin yanı sıra diğer malzeme modelleri de kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sonraki bölümlerde verilmiştir. Modelin 32 adet elastik-plastik

gövdenin rastgele yerleştirildiği küp şeklindeki kalıp içerisindeki görünümü Şekil 2.6’da verilmiş ve bu model ile elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 3.8’de görülmektedir.

Referans çalışma ile mevcut çalışma arasındaki farklar ortaya konulmasındaki amaç benzerlikler kıyaslanırken doğru çıkarımlara varabilmektir. Öncelikle Jerier vd. (2011)’nin çalışmasında ortaya konulan algoritma yüksek bağıl yoğunluklu modeller için oluşturulmuştur. Oysaki sinterleme işlemi yapılmadan yüzde seksen ve üzerindeki bağıl yoğunluğa ulaşmak için malzemenin aşırı plastik deformasyona izin verecek kadar elastik-plastik davranış göstermesi gerekmektedir. İkinci bir farklılık ise Jerier vd. (2011) problemi modellemek amacıyla Cundall ve Strack (1979)’ın ortaya koydukları müstakil (distinct) eleman yöntemini temel alan Ayırık eleman yöntemini kullanmasına karşın mevcut çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu iki yöntem arasındaki temel farklar Bölüm 1’de açıklanmıştır. Yapılan çalışmalar arasındaki diğer farklılıklar ise Jerier vd. (2011)’nin kullandıkları kalıp içerisinde herhangi bir süreksizlik olmadığı, toz miktarının sayıca az olması ve yeniden yerleşme süreci için kalıp içerisinde boşluklar bulunmaması olarak yazılabilir. Ayrıca presleme işlemi mevcut çalışmada tek eksen ve tek yönlü yapılmış olup Jerier vd. (2011)’nin çalışmasında ise üç eksen ve çift yönlü (isostatik) olarak yapılmıştır.



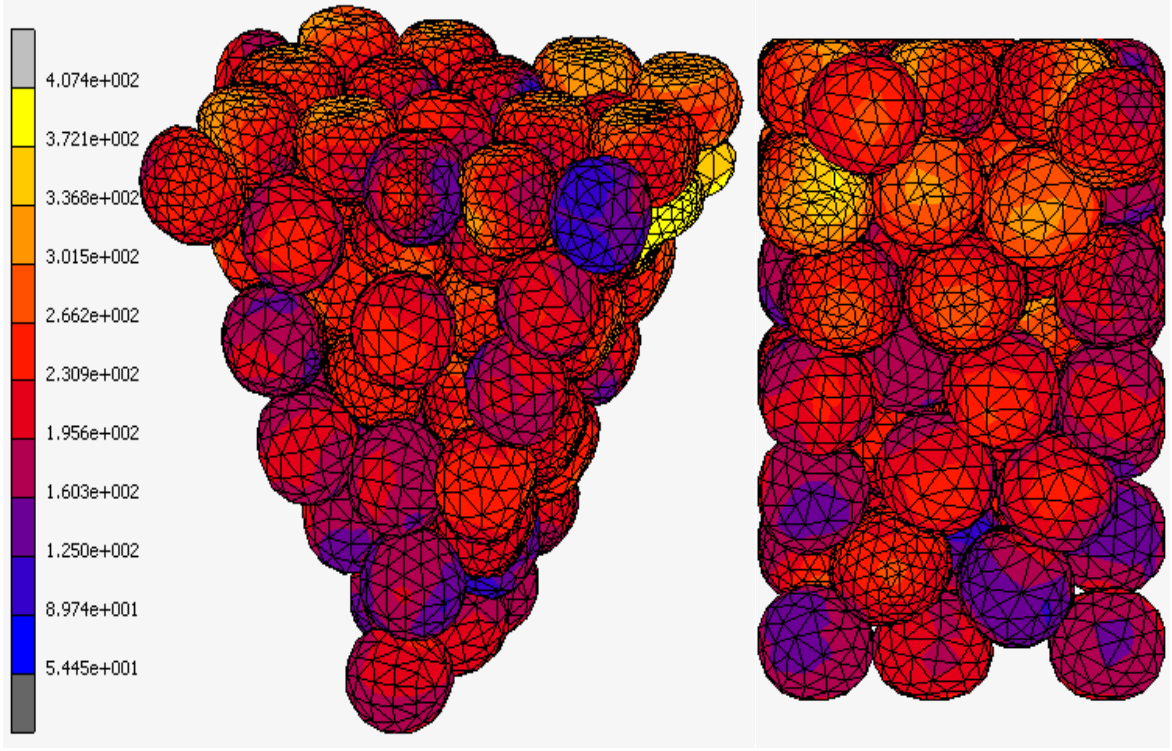
Şekil 3.8. Jerier vd. (2011) çalışmasına ait modelden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 3.8’de bu modelin preslenmesi sonucunda oluşan şekil değiştirme dağılımı görülmektedir. Bu şekildeki küresel bakır tozlarının eşdeğer birim şekil değiştirme dağılımı incelendiğinde yeniden yerleşme imkanı bulamayan ve zimba yüzeyi ile temasta olan tozlar üzerinde maksimum eşdeğer birim şekil değiştirmenin gerçekleştiği görülmektedir. Eşdeğer birim şekil değirmenin 0,2 düzeyinde olmasına rağmen bir toz tanesi üzerinde 0,63 değerinde eşdeğer birim şekil değiştirme tespit edilmiştir. Bu referans çalışmaların ardından Şekil 2.9’da verilmiş olan çoklu parçacık modeline uygulanan malzeme modelleri kullanılarak analizler sürdürülmüştür.

3.1.2.1.von Mises Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

Bu malzeme modeli ile yapılan analizin sonucunda tozların deforme olmuş son hali Şekil 3.9’da verilmiştir. Başlangıç durumunda 0,425 bağıl yoğunluk değerinde olan kalıp ve bakır tozları zimbanın 0,45 mm/s hızla 1 sn’lik deplasmanı sonucunda 0,73 bağıl yoğunluk değerine getirilmiştir.

184760 saniye işlemci süresinde tamamlanmam analiz esnasında 30 adet toz yeniden ağ örgüsü oluşturularak toplam 3-boyutlu eleman sayısı 60575’e çıkmıştır. Şekil 3.9’daki skaladan görüldüğü üzere tozlar üzerinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme değeri 407 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır. Oluşan bu maksimum gerilme değeriyle kalıbın süreksiz olduğu bölgelerde karşılaşmıştır. Yeniden yerleşme sürecinin tamamlanmasıyla tozların kalıbın içerisindeki hareketinin kısıtlanması bazı tozların aşırı deforme olmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan oluşan minimum eşdeğer gerilme değeri ise 54 MPa düzeyindedir. Malzeme modeli akma gerilmesi değeri 30,89 MPa olduğundan, her toz tanesinde plastik şekil değişiminin gerçekleştiğini söylemek mümkündür.

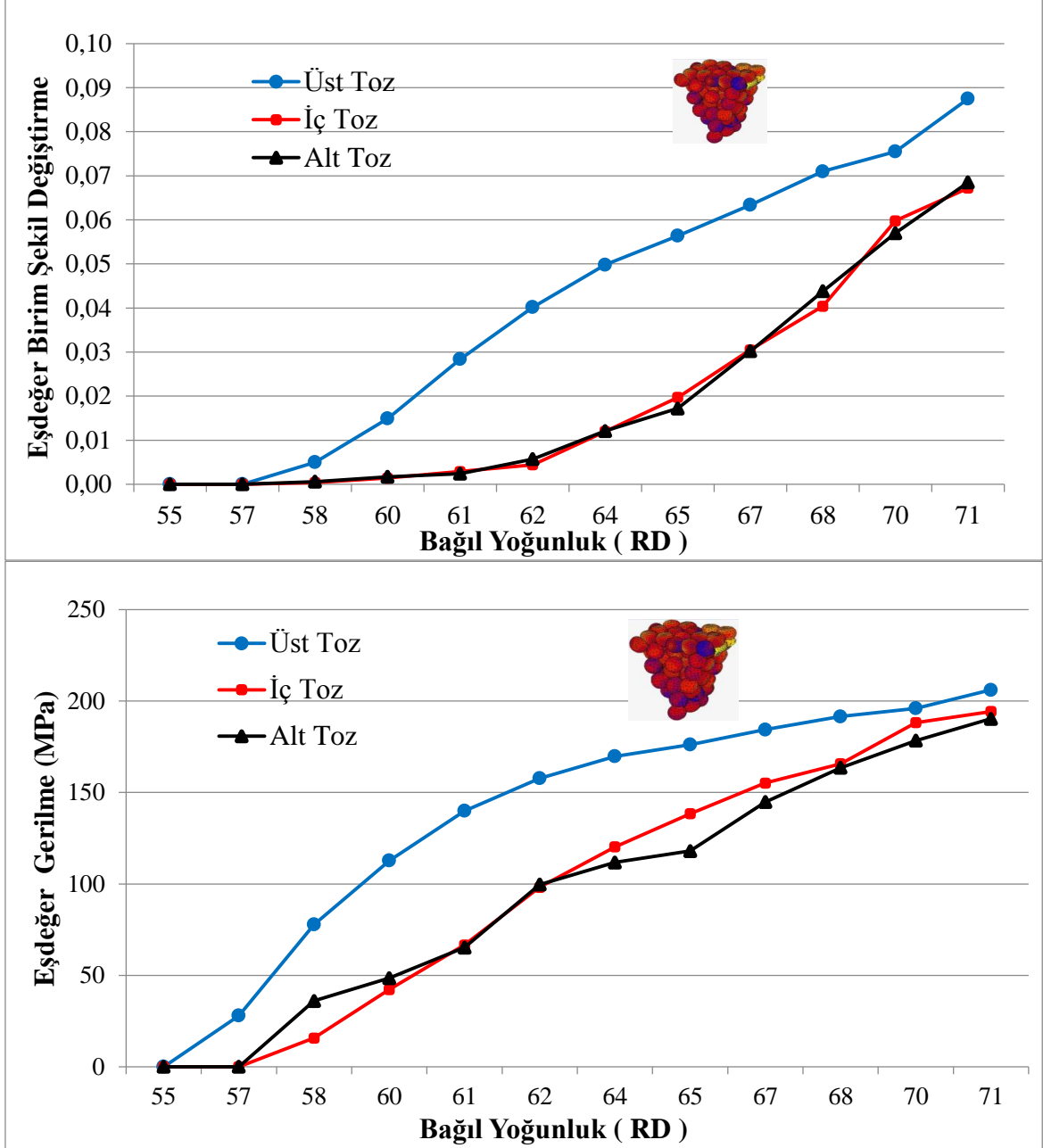


Şekil 3.9. von Mises malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Modelin maksimum şekil değiştirme dağılımı ve Şekil 3.10'da verilen referans tozların eşdeğer birim şekil değiştirme dağılımı incelendiğinde 0,0049-0,59 değerleri arasında olduğu görülmüştür. Üstel fonksiyon ve Hooke Kanununun birbirine eşitlenmesi sonucunda elde edilen akma gerilmesine karşılık gelen şekil değiştirme değeri 0,00028 olduğundan yapılan presleme işleminde, plastik deformasyona uğramamış hiçbir toz kalmadığı görülmüştür.

Grafikte tozların, bağıl yoğunluğun % 55 değerine kadar yeniden yerleşme sürecinde olduğu açıkça görülmektedir. Yeniden yerleşme sürecinde tozlar üzerine etkiyen gerilme değerleri ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu aşama içerisinde bazı tozlarda anlık gerilme artışları oluşmuş olsa bile bu tozlar kalıp içerisindeki yeni konumlarına hareket ederek bu gerilmelerden kurtulmuşlardır. Bağıl yoğunluk %55-57 aralığında kalıp içerisinde tozların hareket edebileceği uygun konumlar kalmadığından yeniden yerleşme tamamlanmış ve zımbanın hareketine devam etmesiyle tozlar elastik-plastik deformasyona uğramışlardır.

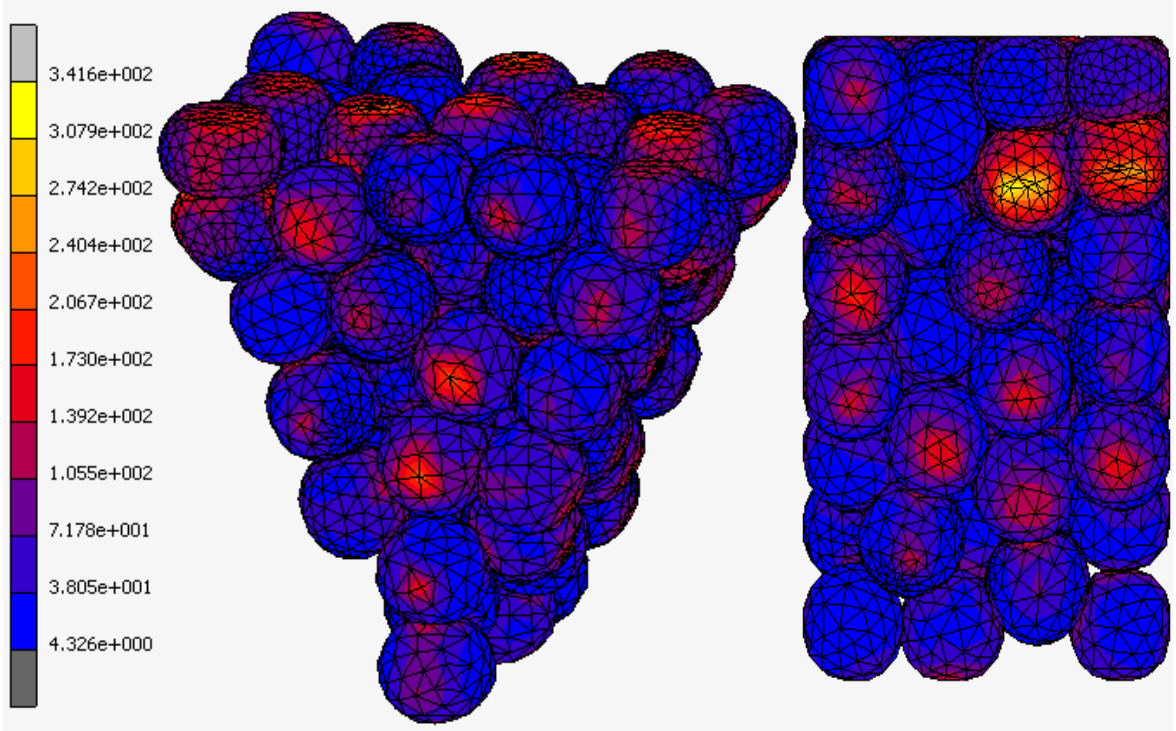
Analiz süresince referans tozlar arasında 50 MPa düzeyinde gerilme farkları oluşmasına karşın analiz sonucunda bütün referans tozlar üzerinde 200 MPa civarında nihai eşdeğer gerilmeler elde edilmiştir.



Şekil 3.10. von Mises malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değişirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi

3.1.2.2.MCC Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

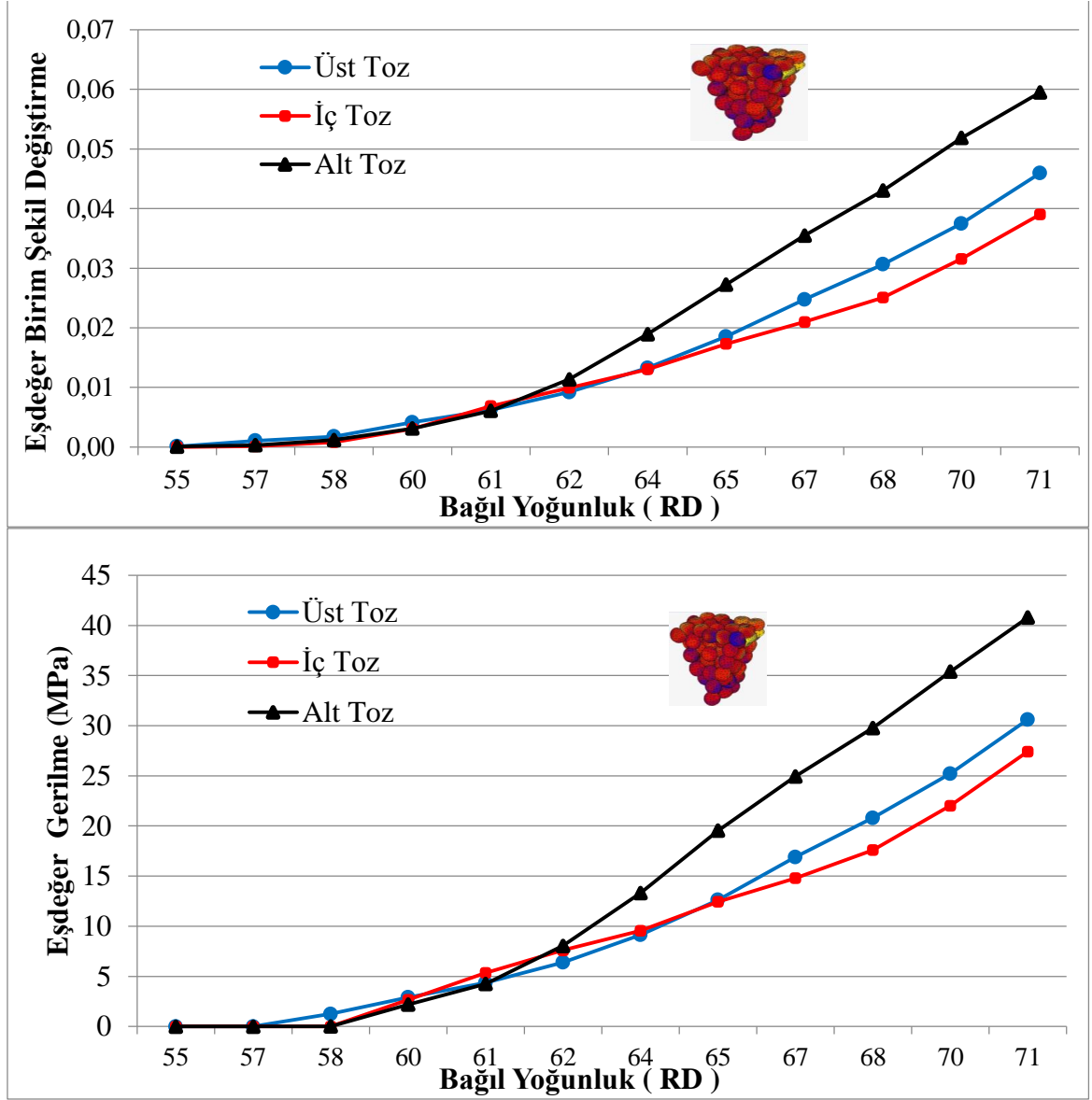
MPFEM analizlerinde ikinci malzeme modeli olarak MCC modeli ele alınmıştır. Şekil 3.11 de eşdeğer gerilme dağılımı görülen malzeme modelinin, 340 MPa maksimum gerilme değeri ile von Mises malzeme modeline çok yakın sonuçlanmıştır. Buna rağmen dağılım incelendiğinde çok daha homojen bir gerilme dağılımı görülmüştür. Zimbaya yakın bölgeler, kalıbın keskin köşeleri ve tozların temas noktalarında gerilme artışları olsa bile bu artış çok daha az sayıdaki eleman üzerinde gerçekleşmektedir. von Mises malzeme modelinde maksimum gerilme değeri elde edilen bölgelerde, özellikle kalıbın süreksiz olduğu keskin köşelerde, toz yüzeyindeki onlarca eleman bu değere ulaşmış olsa dahi MCC modelinde yalnızca birkaç eleman maksimum değeri görmüştür. Gerilme yığılması oluşan bir eleman komşu elemanları göreceli olarak daha az etkilemiştir.



Şekil 3.11. MCC malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Referans tozlarına ait MCC analizinin eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3.12’de verilmiştir. Eşdeğer gerilme değerlerine ait grafikler eşdeğer birim şekil değiştirme grafikleri ile kıyaslandığında, gerilme değerlerinin logaritmik bir

değişim içerisinde oldukları, şekil değiştirmenin de üstel fonksiyon şeklinde birer eğri ile elde edildikleri görüşmüştür. İç ve üst tozun birbirlerine çok yakın değerlerde şekil değişimine uğradığı ve alt tozun bu iki tozdan yüzde yirmi düzeyinde daha fazla şekil değişimi gösterdiği Şekil 3.12’de rahatlıkla görülmektedir.



Şekil 3.12. MCC malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değişirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi

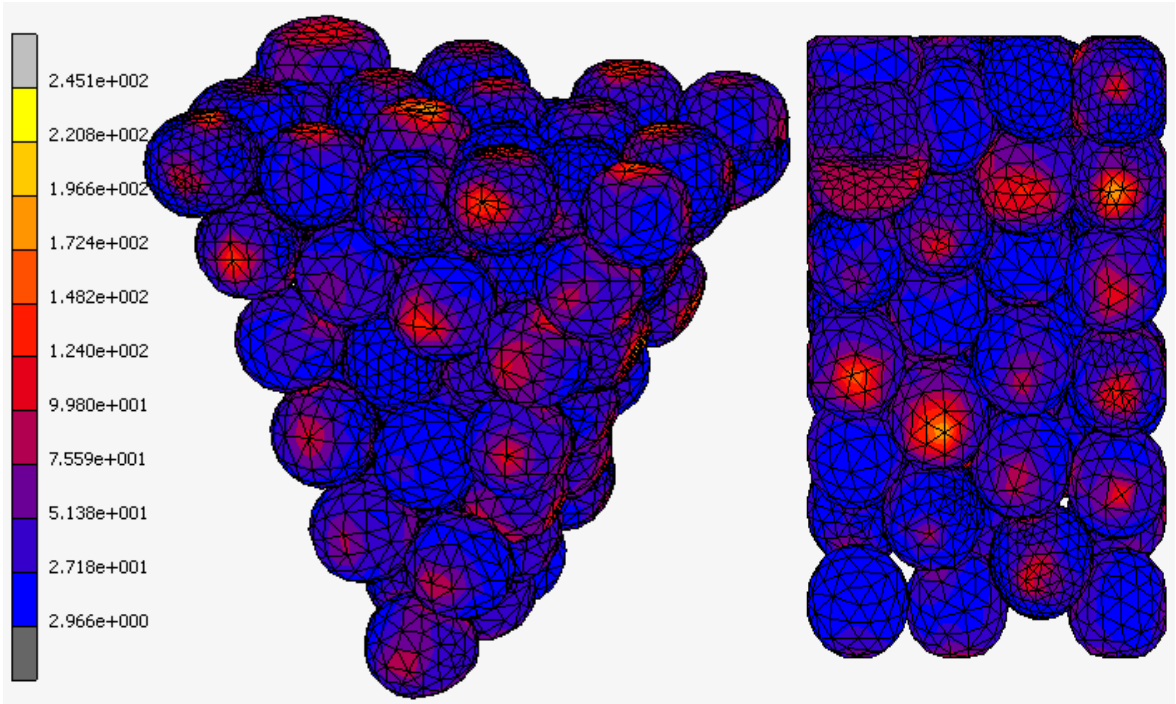
MCC malzeme modeli kullanılarak yapılan çoklu parçacık analizinde referans tozlar üzerinde yapılan değerlendirmede, en büyük eşdeğer gerilme yaklaşık 40 MPa ve en büyük

eşdeğer birim şekil değiştirme de yaklaşık 0,06 değerleriyle alt referans toz üzerinde görülmüştür.

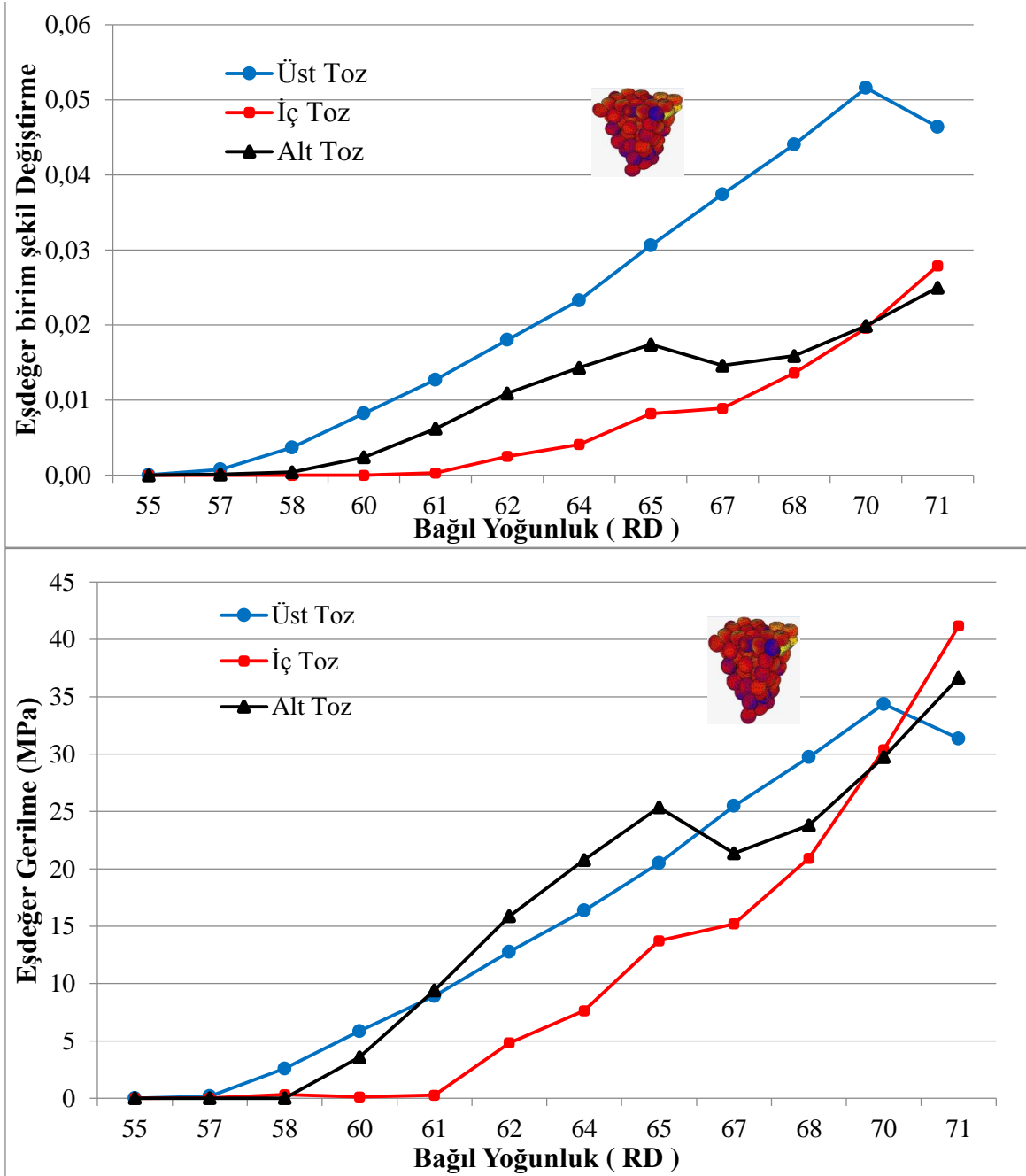
3.1.2.3.Mohr-Coulomb Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

Şekil 3.14 Mohr-Coulomb malzeme modelinin oluşturduğu gerilme dağılımını göstermektedir. Şekil 3.14'teki gerilme skalasında okunan ilk aralık 3-27 MPa değerlerinde olduğundan analiz neticesinde, bu modele göre bir çok elemanın plastik deformasyona uğramadığı ifade edilmiş olmaktadır.

Mohr-Coulomb malzeme modeliyle yapılmış olan analizler neticesinde küresel bakır tozları üzerinde yaklaşık 250 MPa düzeyinde eşdeğer gerilmesi elde edilmiştir. Maksimum değerler açısından aralarında farklar olmasına rağmen Mohr-Coulomb malzeme modeli ile MCC malzeme modelinin minimum gerilme değerleri açısından neredeyse eşit olmakla birlikte her ikisi de akma değerinin altında kalmış durumdadır.



Şekil 3.13. Mohr Coulomb malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı



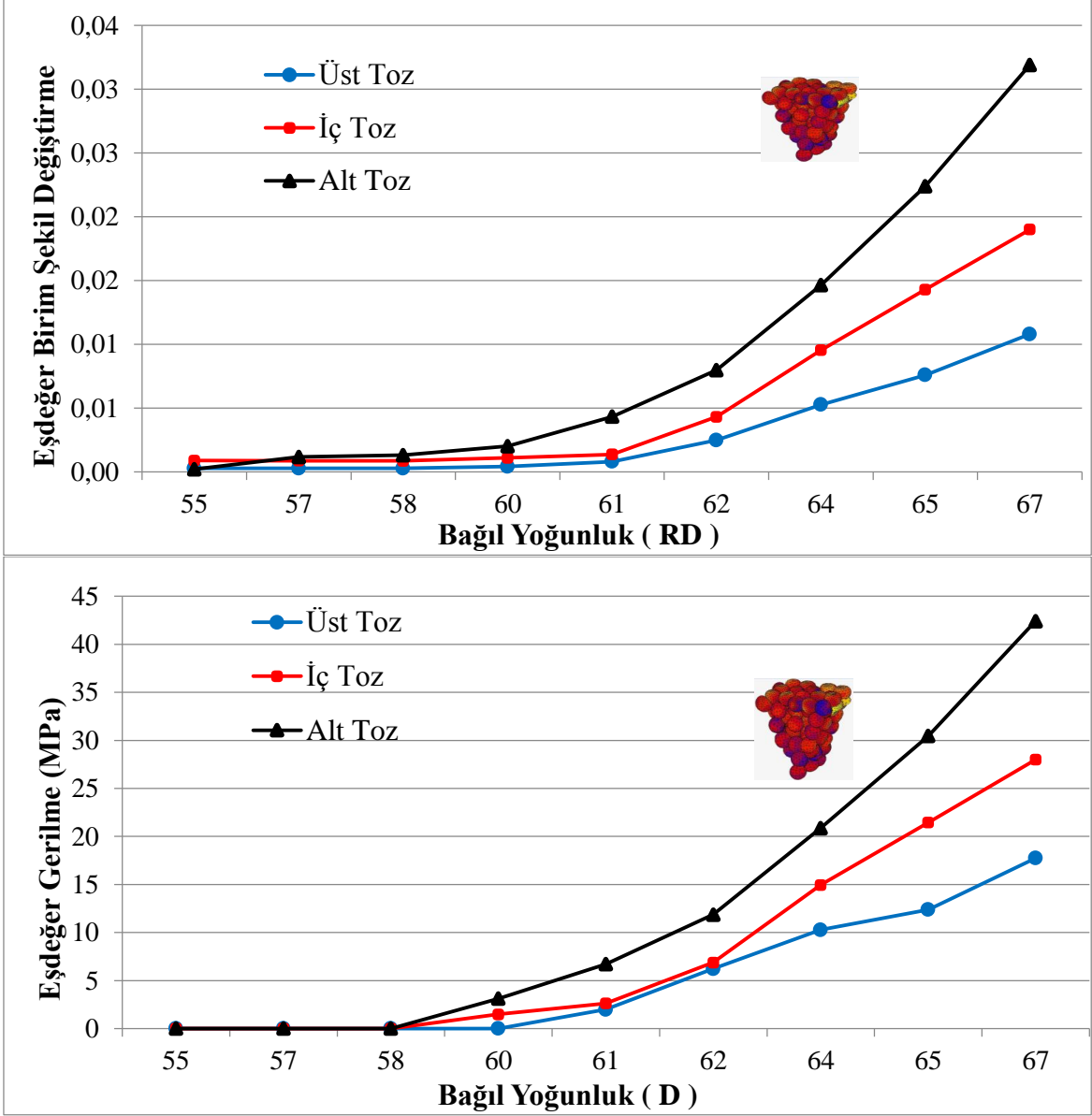
Şekil 3.14. Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer gerilmenin bağil yoğunluk ile değişimi

3.1.2.4. Shima-Oyane Malzeme Modeliyle MPFEM Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

Sürekli analiz yaklaşımında herhangi bir sorun yaşanmamasına karşın Shima-Oyane malzeme modeli kullanılarak yapılan MPFEM analizlerinde yüksek bağıl yoğunluklara ulaşılamamıştır. Bu malzeme modeli, soğuk presleme ürünü olan ham gövdenin (green body) % 67 bağıl yoğunluk değerinden daha küçük bağıl yoğunluklar için sonuçlar ortaya koyabilmiştir. Diğer modellere eş nihai bağıl yoğunluk değeri elde edilemediğinden analize ait sonuç görüntüsü verilmemiştir. Ancak %67 bağıl yoğunluk değerine kadar kabul edilebilir yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmiştir. Böylece Shima-Oyane modelinin, malzeme parametrelerinin çeşitliliği ve ampirik genel denklemi nedeniyle yüksek sıkıştırma kuvvetleri soğuk toz presleme çalışmaları için uygun olmadığı sonucu ortaya konulmuştur. Benzer şekilde Lee ve Kim (2007) çalışmalarında, modelin incelenen malzemenin bağıl yoğunluğuna göre başarısının değiştiğini ifade etmişlerdir.

Şekil 3.16 da verilen eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değiştirme grafikleri göstermektedir ki modelin hesapladığı eşdeğer gerilmelerin artış eğilimleri parabolik olmasına karşın diğer modellerde artış eğilimi doğrusala yakındı. Gerilmeler düşük olmasına rağmen eşdeğer birim şekil değiştirme değerleri von Mises malzeme modeline paralellik göstermektedir. Gerilme ve şekil değiştirme değerleri ancak bağıl yoğunluğun % 55 değerinden sonra ancak artmaya başlamıştır.

Diğer modellerden farklı olarak Shima-Oyane malzeme modelinde üç referans toz için alınan değerler arasındaki fark göreceli olarak artmıştır. Bunu tespit etmek amacıyla Shima-Oyane malzeme modeliyle yapılan analizde ancak %67 bağıl yoğunluk değerine ulaşıldığından incelemeler bu bağıl yoğunluk değerinde yapılmıştır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.14'te görüldüğü gibi MCC ve Mohr Coulomb malzeme modelleri için üç referans tozda, bağıl yoğunluğun %67 değerinde 15-25 MPa aralığında eşdeğer gerilmeler olmasına karşın, Shima-Oyane malzeme modelinde %67 bağıl yoğunluk değerinde gerilmelerin 18-43 MPa aralığında olduğu Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15. Shima-Oyane malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizinden elde edilen eşdeğer birim şekil değiştirme ve eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluk ile değişimi

3.1.3. Malzeme Modellerinin Karşılaştırılması

Şekil 3.9, Şekil 3.11 ve Şekil 3.13 karşılaştırıldığında von Mises malzeme modelinde temas noktalarında ve kalıbın keskin köşelerinde gerilme yığılmaları olmasına karşın MCC ve Mohr-Coulomb malzeme modelinde daha homojen bir gerilme dağılımı görülmektedir.

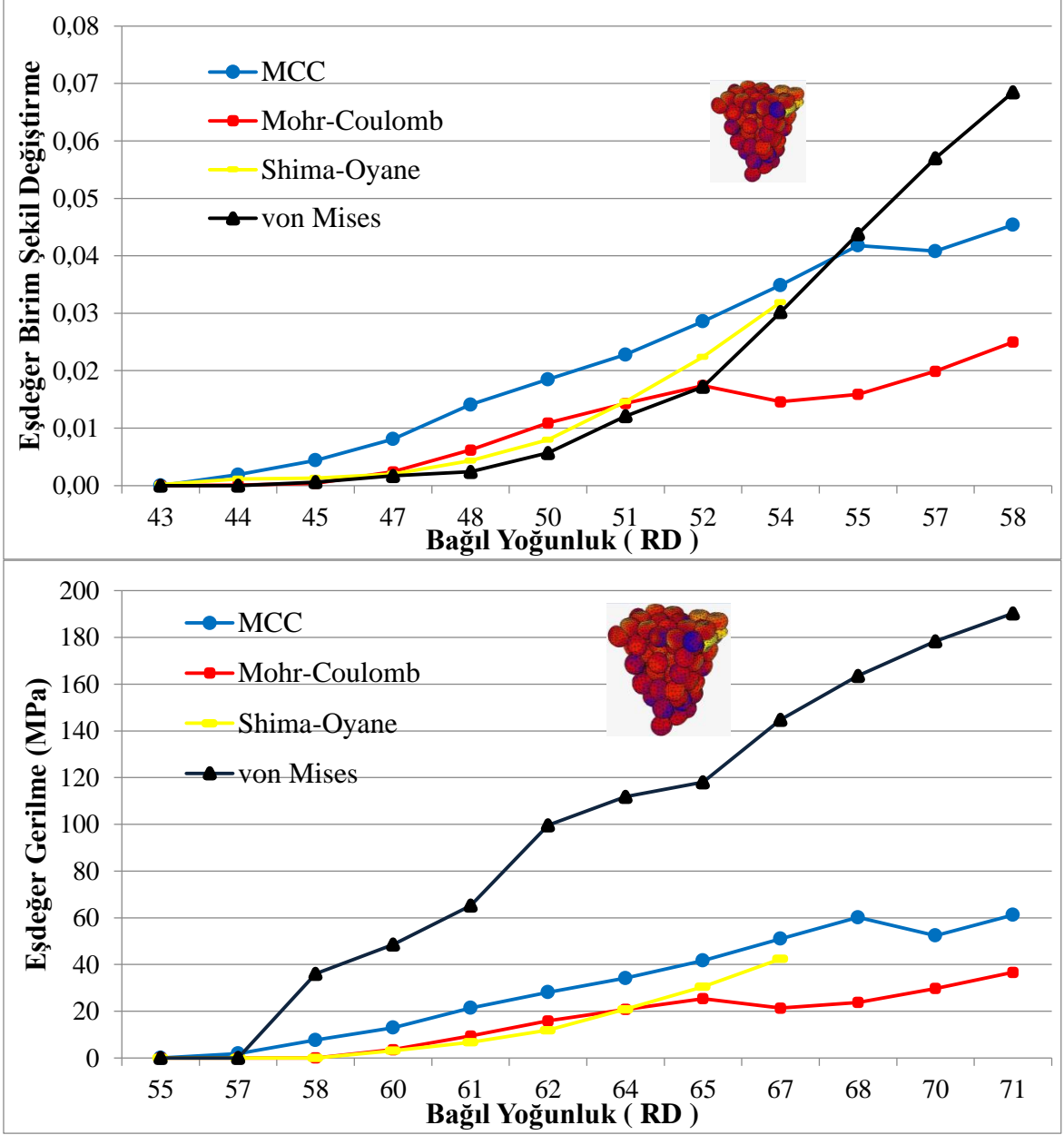
MCC modelinde maksimum değerleri taşıyan elemanların komşu elemanları bu maksimum değerden çok fazla etkilenmemiş olmasına karşın Mohr-Coulomb değerinde komşu elemanların MCC modeline oranla daha fazla etkilendiği görülmektedir. Mohr-Coulomb modelinin kalıbın keskin köşelerinde MCC modeline göre daha fazla deformasyon hesaplamasına karşılık, yaklaşık olarak aynı gerilme değerlerini hesapladığı Şekil 3.11 ve Şekil 3.13 karşılaştırıldığında görülmektedir.

Şekil 3.16'da alt referans tozun MPFEM analizlerinden elde edilen eşdeğer birim şekil değişimi ve eşdeğer gerilme grafikleri verilmiştir. von Mises malzeme modeline ait eşdeğer gerilme grafiği diğer modellerden yaklaşık beş kat daha fazla olarak karşımıza çıkmaktadır.

Benzer durum iç referans tozda görülmekle birlikte gözenekli ortam malzeme modelleri arasındaki farkı daha da artmıştır. Şekil 3.17 de verilen iç referans toza ait eşdeğer birim şekil değiştirme grafiğinde modellerin birbirlerine paralel artış eğiliminde olduğu görülmektedir.

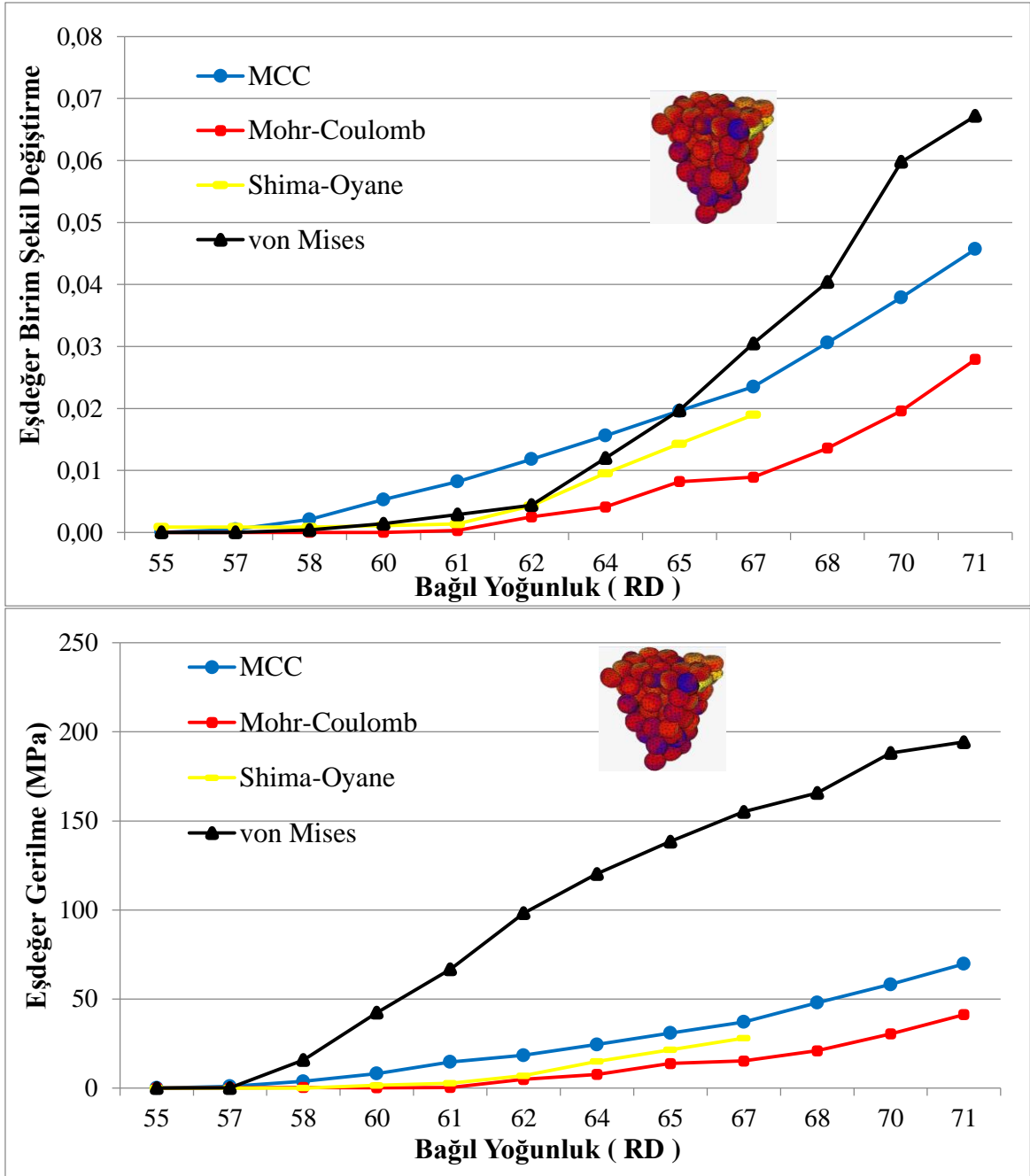
Üst referans tozun gerilme değerlerinin bir arada verildiği Şekil 3.18'de her modelin farklı eşdeğer birim şekil değiştirmeler hesaplamasına karşın gözenekli ortam modelleri olan MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modellerinin ortaya koyduğu gerilme değerleri birbirlerine çok yakındır. Şekil 3.16 ve sonrasında Şekil 3.17 ve 3.18'de görüldüğü üzere analiz sonunda bu üç model yaklaşık olarak 40-60 MPa gerilme değeri vermesine karşın von Mises malzeme modelinde 190-205 MPa eşdeğer gerilme hesaplanmıştır. Ayrıca, Mohr-Coulomb çoklu parçacık analizinde, diğer modellerden farklı olarak bağıl yoğunluğun % 65-67 değerlerinde referans tozların eşdeğer birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı görülmüştür. (Şekil 3.16- Şekil 3.17 ve Şekil 3.18)

Bütün malzeme modellerinde alt referans toz diğer iki referans toza oranla yüksek eşdeğer gerilme ve şekil değiştirme davranışı göstermiştir. Bu alt referans tozunun zımbaya yakın olmasından kaynaklanan bir durum olmakla birlikte zımbanın hareketi ile tozların daha küçük bir kesite sıkışmaları da bu etkiyi arttırmıştır. von Mises malzeme modeliyle yapılan MPFEM analizinde alt toz üzerinde ortalama olarak 0,0685 eşdeğer birim şekil değişimine karşılık elde edilen 190 MPa eşdeğer gerilme değeri en yüksek gerilme değeridir. Sun vd. (1999) Shima-Oyane ve Cam-Clay malzeme modeliyle %71 bağıl yoğunluk değeri için elde ettikleri 50 MPa düzeyindeki gerilmeler Şekil 3.16 ile uyum göstermektedir. Diğer taraftan Lee ve Kim (2007) çalışmalarında Şekil 3.16 ile uyum gösteren Shima-Oyane modeli için 60 MPa gerilme değerleri elde etmiş olmalarına karşın araştırmacılar deneysel çalışmalarında 100 MPa gerilme ortaya koymuşlardır.

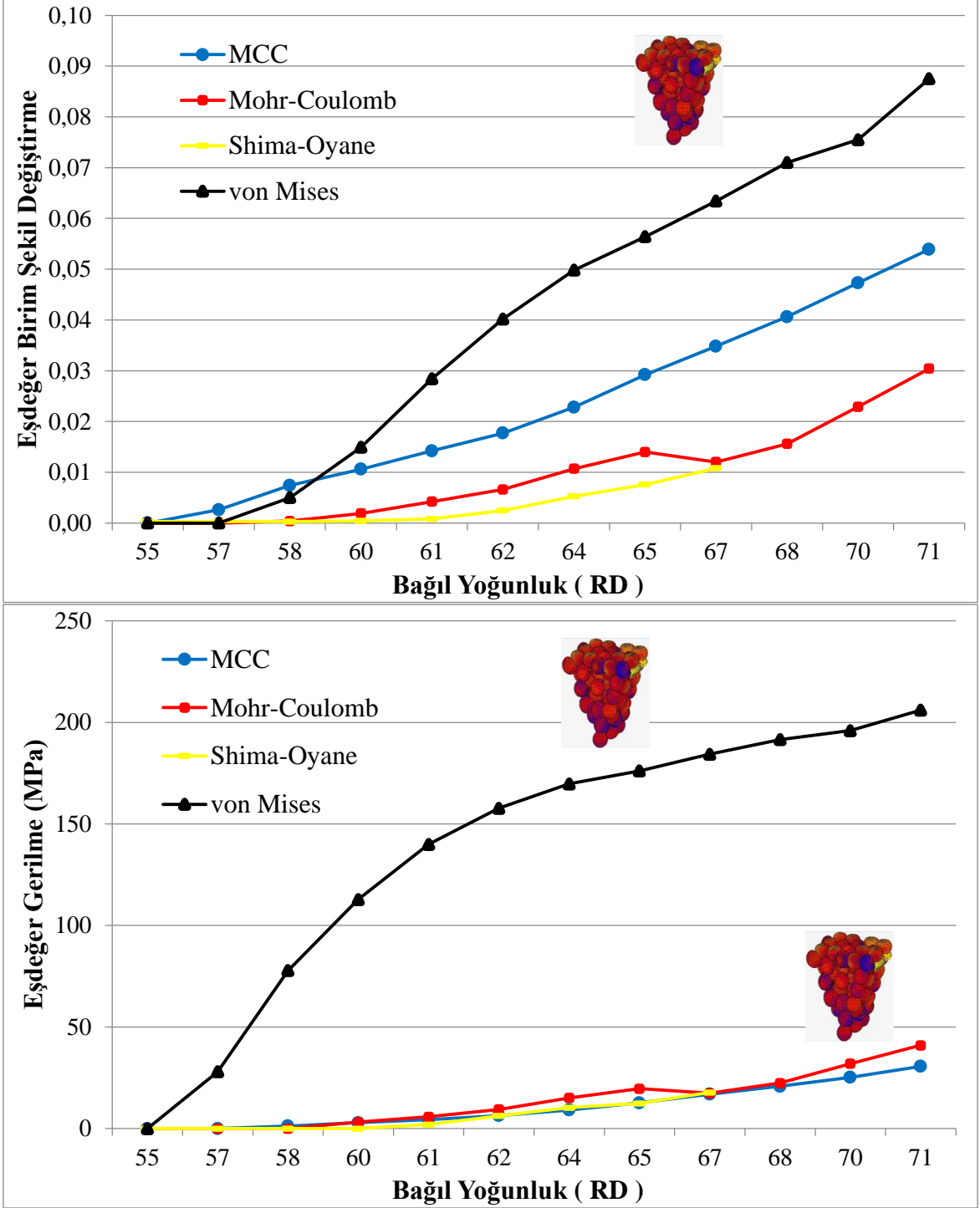


Şekil 3.16. Alt referans tozdan elde edilen MPFEM modelleme yaklaşımı sonuçları

Analiz süreleri kıyaslandığında, 51 saatin üzerinde işlemci zamanı ile von Mises malzeme modeli en uzun süren analizdir. Bütün malzeme modellerinde yaklaşık 28-33 arasında değişen sayıda toz %0,25'in üzerinde eşdeğer birim şekil değişimine maruz kaldığından, analiz esnasında yeniden ağ örgüsü oluşturulmuştur.



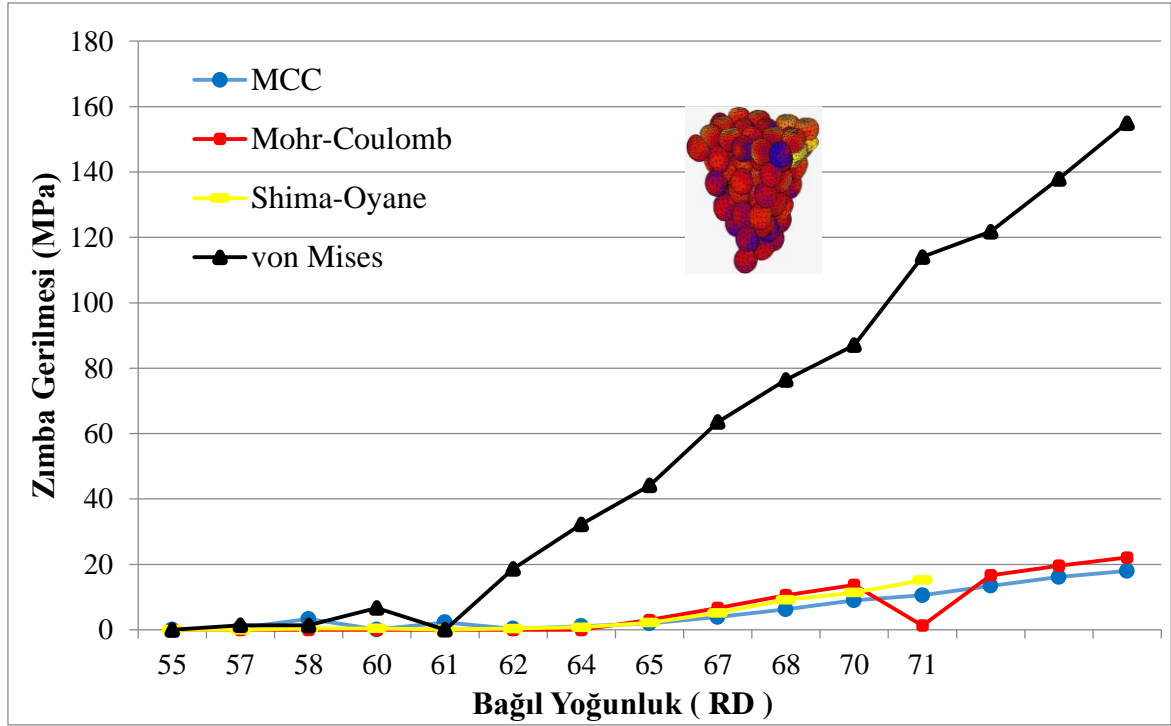
Şekil 3.17. İç referans tozdan elde edilen MPFEM modelleme yaklaşımı sonuçları



Şekil 3.18. Üst referans tozdan elde edilen MPFEM modelleme yaklaşımı sonuçları

MPFEM analizlerinde malzeme modeline göre zımbaya uygulanan gerilme değerleri analizlerde rijit zımbaya uygulanan kuvvet değerleri kullanılarak hesaplanmış ve grafikleri Şekil 3.19'da verilmiştir. Elde edilen gerilmeler tozlar üzerine uygulanan gerilme değerlerine paralel olarak von Mises malzeme modelinde en yüksek değerini almıştır.

Zımbaya en yakın referansımız olan alt toz üzerinde oluşan 190 MPa gerilme değeri ile zımbaya son adımda uygulanan 155 MPa gerilme birbirleriyle uyum göstermektedir. MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane modelleri birbirlerine çok yakın değer aralığında hareket ederek 20 MPa zımba gerilmesi hesaplamışlardır. Vyal ve Laptev (2002) Mohr-Coulomb malzeme modelini kullandıkları sürekli ortam analizlerinde 125 MPa basınç değeri bildirmiş olup bu tez kapsamında yapılan analizlerden von Mises malzeme modeli ile elde edilen sonuçlara yaklaşılmaktadır.



Şekil 3.19. Malzeme modellerine göre MPFEM analizinde zımbaya gelen kuvvetin oluşturduğu gerilme değerleri

3.1.4. MPFEM ve Sürekli Ortam Analizlerinin Karşılaştırılması

Sürekli model ile MPFEM modelinin karşılaştırılması düğüm noktalarından elde edilen veriler üzerinden yapılacağından denk bir kıyaslamamanın yapılabilmesi için her iki modelde de aynı düğüm noktaları kullanılmıştır. Bu amaçla MPFEM modelde referans tozlarının bulunduğu hacimlerin koordinatları belirlenerek sürekli modeldeki aynı bölgedeki hacimler içerisinde kalan düğüm noktaları incelenmiştir. Bu bölgelerde incelenen düğüm

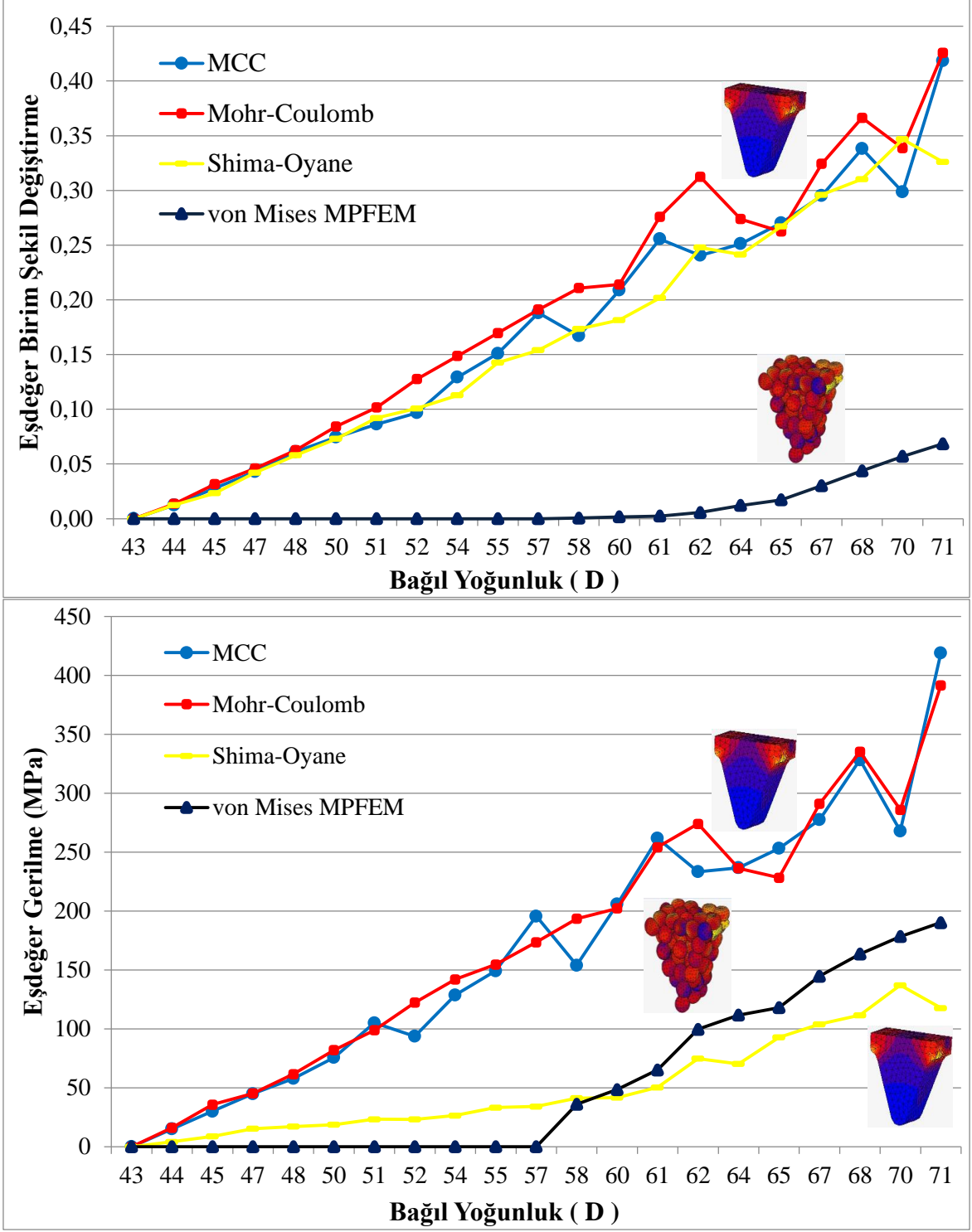
noktası sayısı, malzeme modeline ve yeniden ağ örgüsü oluşturmaya bağlı olarak 90'ana kadar çıkmıştır. Buna karşın MPFEM modelinde, bir referans toz üzerinde başlangıç durumunda dahi en az 133 düğüm noktası bulunmaktadır.

MPFEM analizleri için Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 incelendiğinde MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modellerinden elde edilen eşdeğer gerilmelerin von Mises malzeme modelinden elde edilen eşdeğer gerilmelerden çok küçük olduğu görülmüştür. Diğer taraftan Şekil 3.2, Şekil 3.4 ve Şekil 3.6 incelendiğinde bu üç malzeme modeli kullanılmış sürekli ortam analizinden elde edilen eşdeğer gerilme değerlerinin, von Mises malzeme modelinin MPFEM analizlerinden elde edilen eşdeğer gerilmelerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle karşılaştırmalı olarak von Mises MPFEM analiz sonuçları ile MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modellerinin sürekli ortam analizlerinin eşdeğer gerilme ve eşdeğer birim şekil değişimi değerleri incelenmiş ve Şekil 3.20, 3.21 ve 3.22'de sırasıyla alt, iç ve üst referans tozlar için gösterilmiştir. Şekillerdeki grafiklerin yanına koyulmuş olan küçük model görüntüleri grafiğin elde edildiği analiz tipini vermektedir.

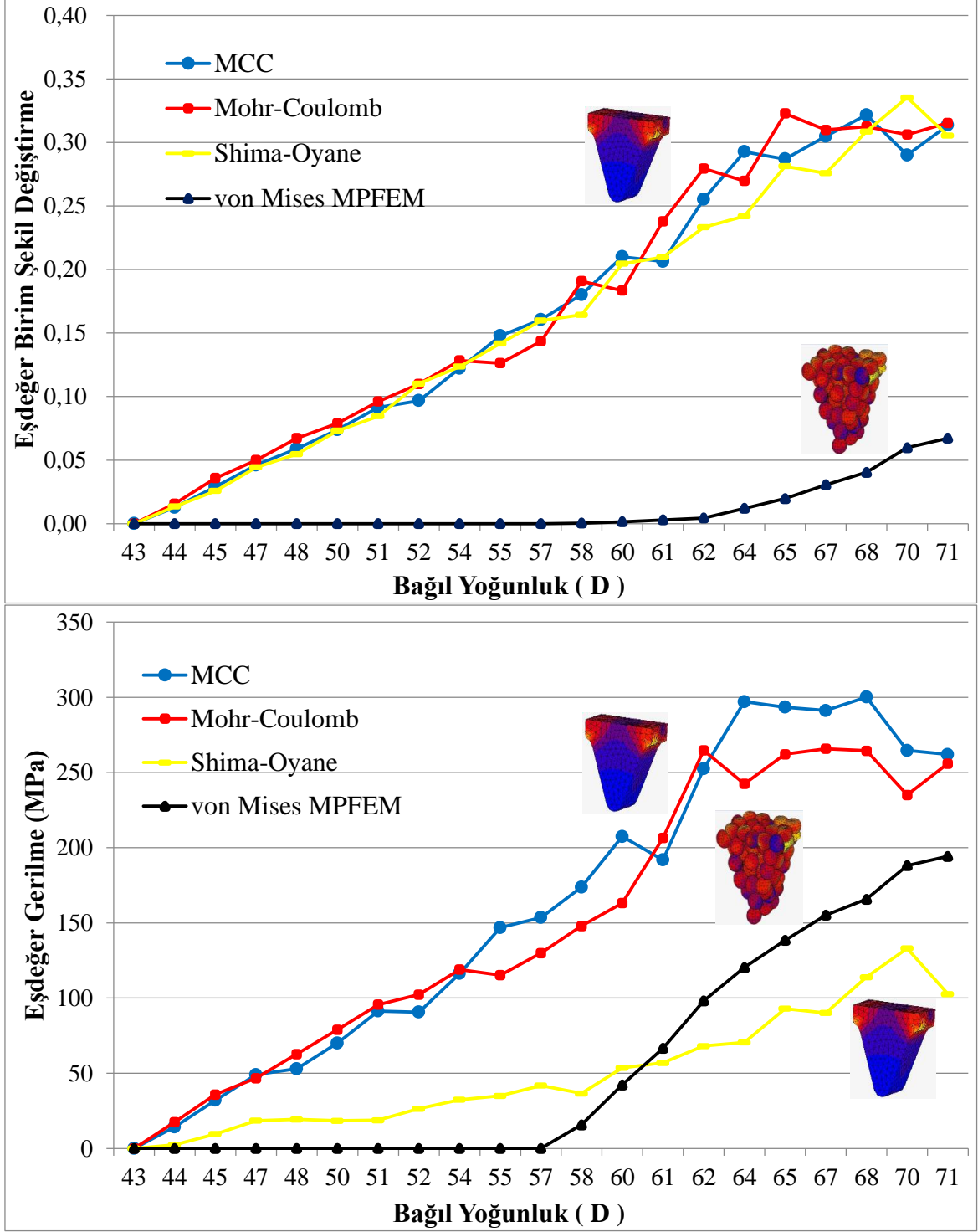
MCC, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane modelleri birbirlerine çok yakın ve 0,4 eşdeğer birim şekil değişimi vermesine karşın eşdeğer gerilme değerleri olarak MCC ve Mohr-Coulomb malzeme modellerinden 300-350 MPa aralığında, Shima-Oyane malzeme modelinden ise 150 MPa civarında değerler elde edilmiştir. von Mises malzeme modelinde ise 0,07 eşdeğer birim şekil değişimi hesaplanmasına karşılık eşdeğer gerilme miktarı 200 MPa düzeyindedir. von Mises dışındaki malzeme modellerinin gerilme artışları başlangıçtan itibaren doğrusal bir karakterde olup bazı analiz adımlarında düzensizlikler göstermektedir.

von Mises malzeme modeline ait grafiklerden kolaylıkla görüleceği gibi, %55 bağıl yoğunluğun üzerindeki yoğunluklarda değerler alınabilmiştir. Sürekli ortam modelinde belirli bir hacme tanımlanan bağıl yoğunluk, hacim içerisinde hangi bölgenin malzeme, hangi bölgenin boşluk olduğunu tam olarak tanımlayamamaktadır. Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 MPFEM analizin bu tanımlamayı yaparak tozların mevcut boşluklara yeniden yerleşerek prosesin ilerleyen aşamalarında gerilmelere maruz kaldığını göstermektedir. von Mises malzeme modelinde diğerlerine göre geç başlayan gerilme artışı davranışı, sürekli modellerdeki doğrusal artışın aksine parabolik artış şeklinde olmaktadır.

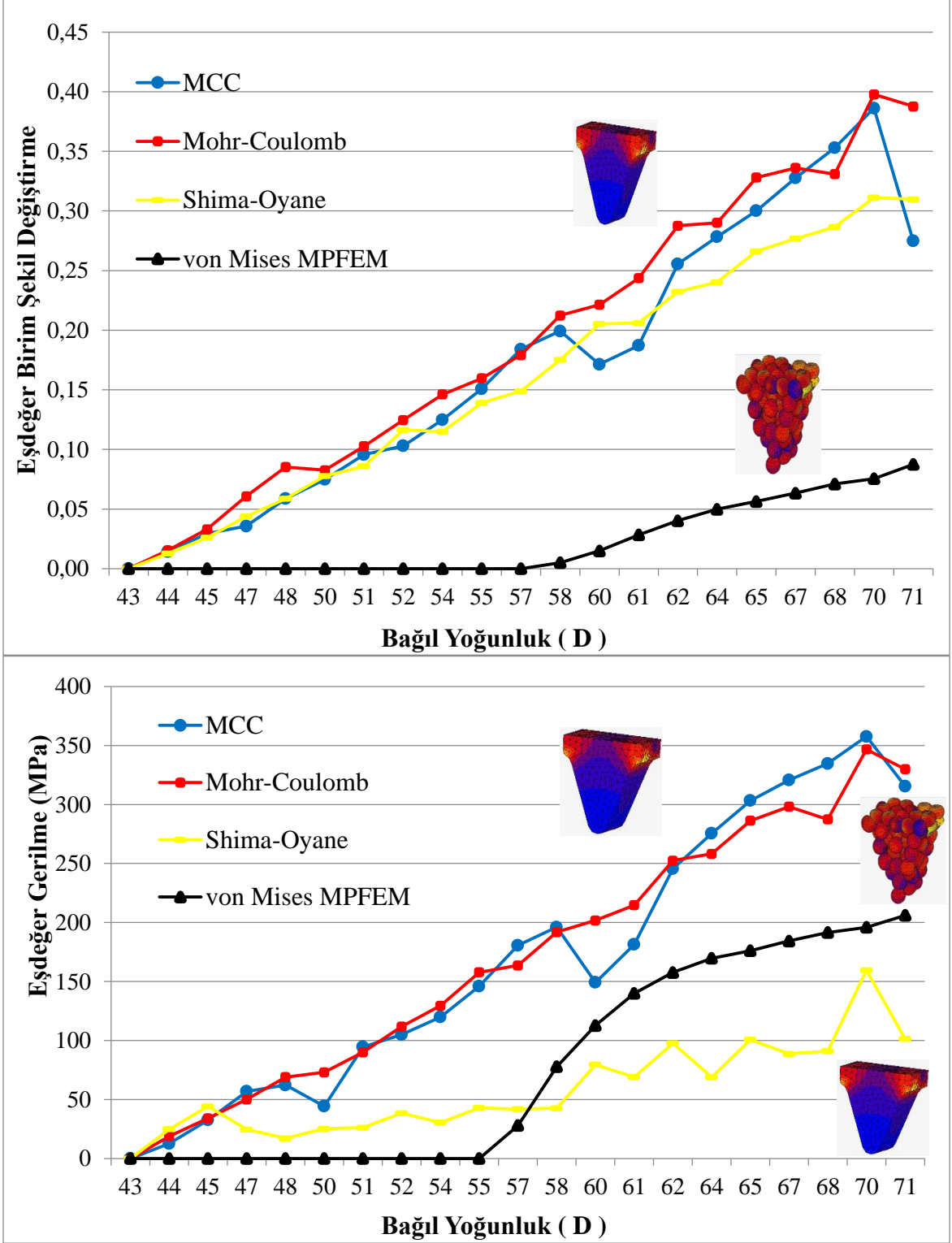
Modellerin genel davranışları ve gerilme değerleri incelendiğinde MCC ve Mohr-Coulomb ile Shima-Oyane ve von Mises malzeme modellerinin birbirlerine çok yakın sonuçlar ortaya koydukları görülmüştür.



Şekil 3.20. Alt referans tozda, sürekli ve çoklu parçacık analizlerinin malzeme modelleri açısından karşılaştırılması

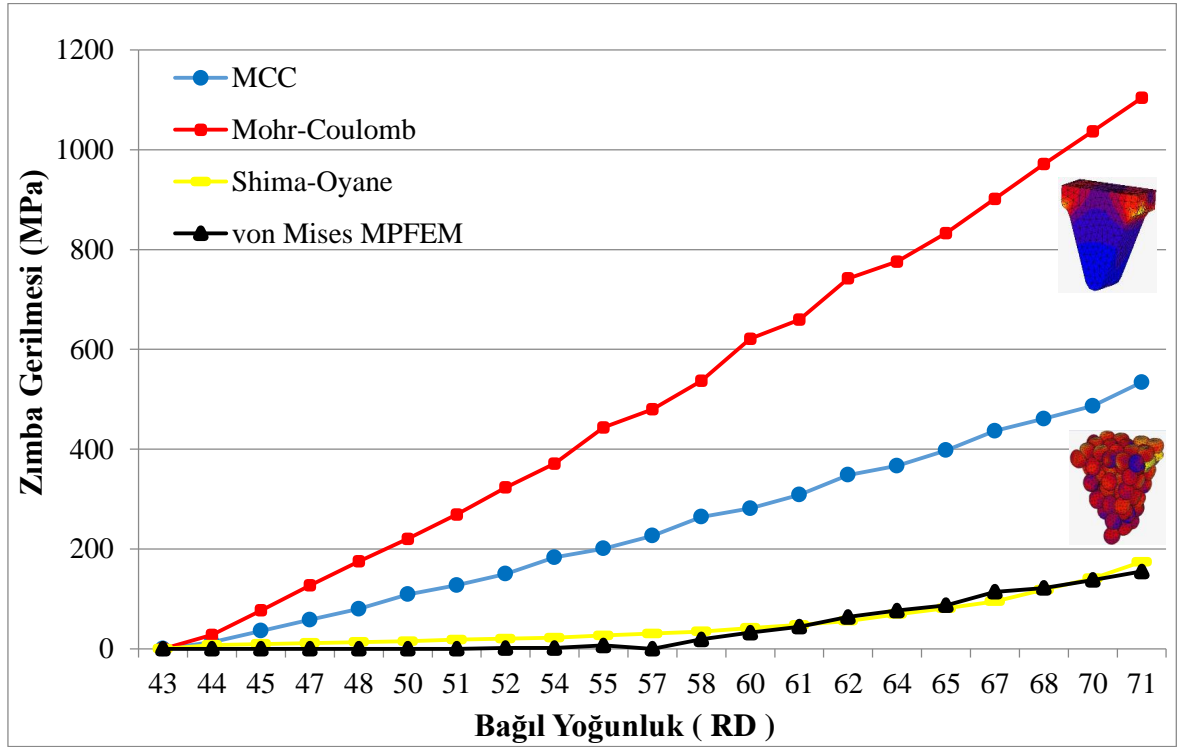


Şekil 3.21. İç referans tozda, sürekli ve çoklu parçacık analizlerinin malzeme modelleri açısından karşılaştırılması



Şekil 3.22. Üst referans tozda, sürekli ve çoklu parçacık analizlerinin malzeme modelleri açısından karşılaştırılması

Kim vd.(2001)'nin sürekli ortam modellini kullanarak elde ettikleri 450 MPa düzeyinde eşdeğer gerilme değeri Mohr-Coulomb ve Cam-Clay Malzeme modellerinden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri ile uyum göstermektedir. Kim vd.(2001) çalışmalarında uyguladıkları basınç değerini %71 bağıl yoğunluk için 300 MPa olarak bildirmişlerdir. Benzer şekilde Al-Qureshi vd. (2008) bakır tozları ile sürekli ortam analizi olarak yaptıkları çalışmalarında presleme basıncı olarak %71 bağıl yoğunluk değerinde yaklaşık 240 MPa civarında bir basınç gerektiğini bildirmiştir. Şekil 3.23 ile bu değerler karşılaştırıldığında Kim vd.(2001) ile Al-Qureshi vd.(2008) çalışmalarının Mohr-Coulomb ve Cam-Clay malzeme modelleri ile uyum gösterdiği görülmüştür. Buna karşın, Vyal ve Laptev (2002) çalışmasında elde edilmiş olan 125 MPa değeri ise, von Mises ve Shima-Oyane malzeme modelleri ile uyum göstermektedir.



Şekil 3.23. Zimbada oluşan gerilme değerlerini sürekli ve çoklu parçacık analizi açısından karşılaştırılması

3.2. Sürtünme Modellerinden Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde, malzeme modellerinin kendi aralarında kıyaslanmasının ardından toz metalürjisinde sürtünme davranışının ortaya konulması amacıyla yapılan analizler yer almıştır. Analizler öncelikle Coulomb sürtünme modelinin farklı sabit katsayılarında koşturulmuştur. $\mu=0-0,1-0,25-0,4$ katsayıları için Coulomb sürtünme analizlerinin ardından Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modelleri için farklı algoritmalar kullanılarak oluşturulan kullanıcı alt programları ile simülasyonlar yapılmıştır. Sürtünme davranışının ortaya konulması amacıyla yapılan ve bu kısımda verilen çalışmaların tamamı von Mises malzeme modeli kullanılarak, oda sıcaklığında yürütülmüştür.

3.2.1. Coulomb Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular

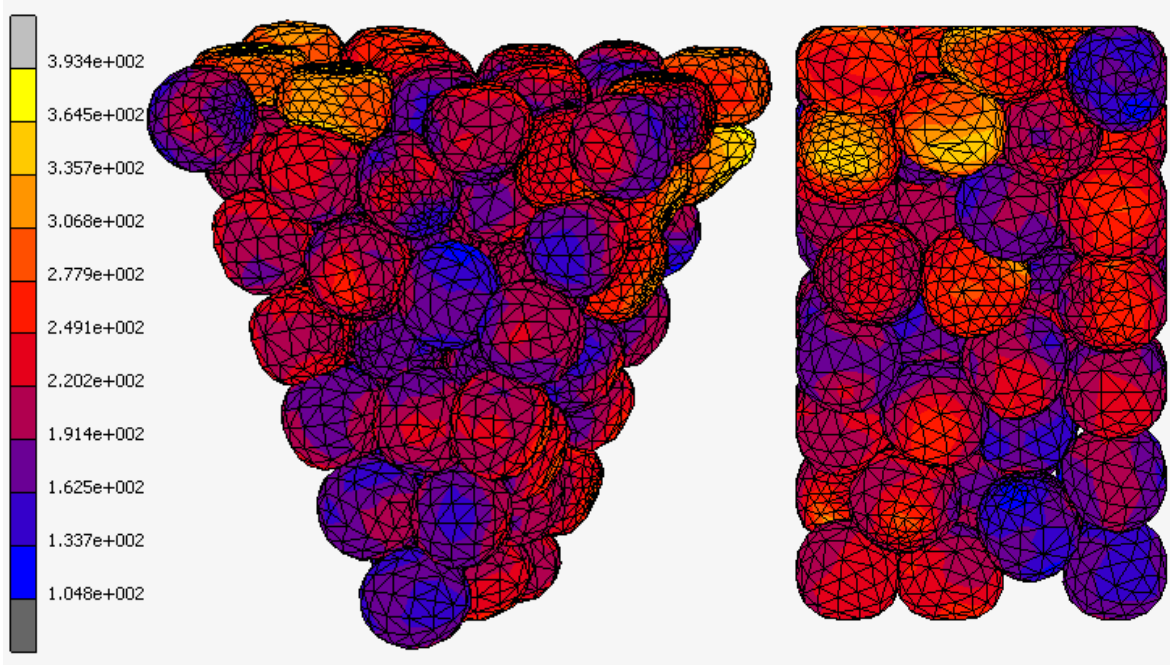
a) Coulomb Sürtünme Katsayısı $\mu=0$

Coulomb sürtünme katsayısının sıfır olarak alınması, literatürde yapılan birçok çalışmadaki sürtünmesiz model kabulüne karşılık gelmektedir. Şekil 3.24'te gerilme dağılımı verilen sürtünmesiz analiz sonucunda genel olarak 135-350 MPa aralığında eşdeğer gerilmeler elde edilmiştir. Kalıbın keskin köşelerinde gerilme yığılması sonucunda ise değerler 390 MPa düzeyine çıkmıştır. von Mises malzeme modelinde başlangıç akma gerilmesinin 30,89 MPa olarak hesaplandığını hatırlarsak, bütün tozların plastik deformasyona maruz kaldıkları görülmüştür.

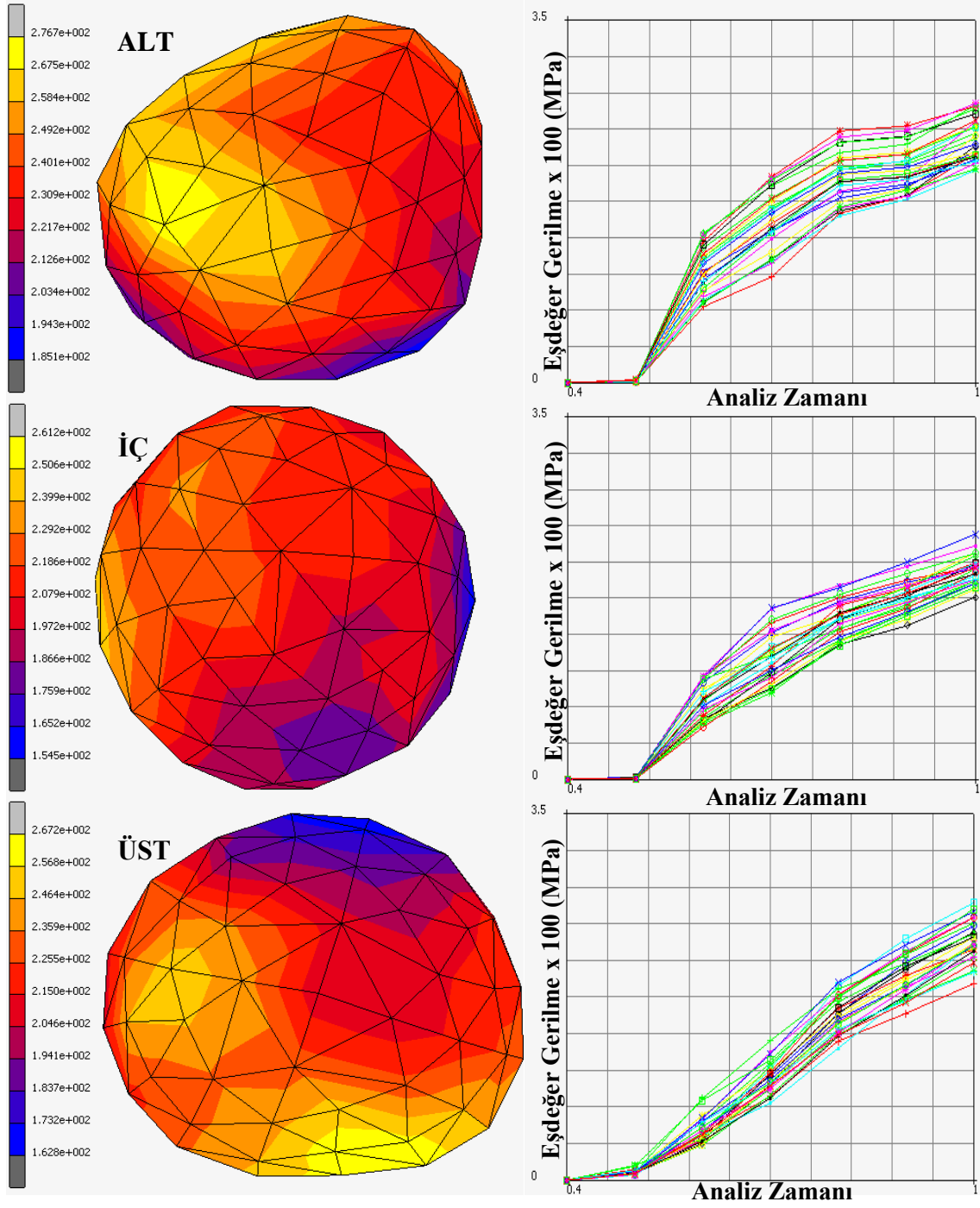
Şekil 3.25'te sırasıyla alt, iç ve üst referans tozlarına ait proses sonundaki gerilme dağılımları, şekil değişimleri ve düğüm noktalarının analiz boyunca maruz kaldıkları eşdeğer gerilme değerleri verilmiştir. Bu şekilde her bir tozun gerilme dağılımının yanında o tozu oluşturan düğüm noktalarına etkiyen gerilmelerin grafikleri verilmiştir. Bu gerilme grafikleri analiz adımının bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Zımbaya verilen 0,45 mm yer değiştirmenin yapıldığı bir saniyelik analizin 0,4'üncü saniyesinde yani bağıl yoğunluğun %54 değerinde çok küçük gerilmeler elde edilmeye başlanmış ve %57 bağıl yoğunluktan sonra büyük artışlar elde edilmiştir. Üç referans toz da kalıp içerisindeki etkileşimler sonucunda başlangıç küresel geometrilerini kaybetmişlerdir. Akma gerilmesinin yaklaşık yedi katı bir gerilme etkisiyle aşırı plastik deformasyon görülmektedir.

Şekil 3.25'te verilen gerilme grafikleri sonraki bölümlerde verilmeyecek olup bunların yerine Şekil 3.26'da gösterildiği gibi tozlar üzerindeki bütün düğüm noktalarının ortalama değerleri verilecektir.

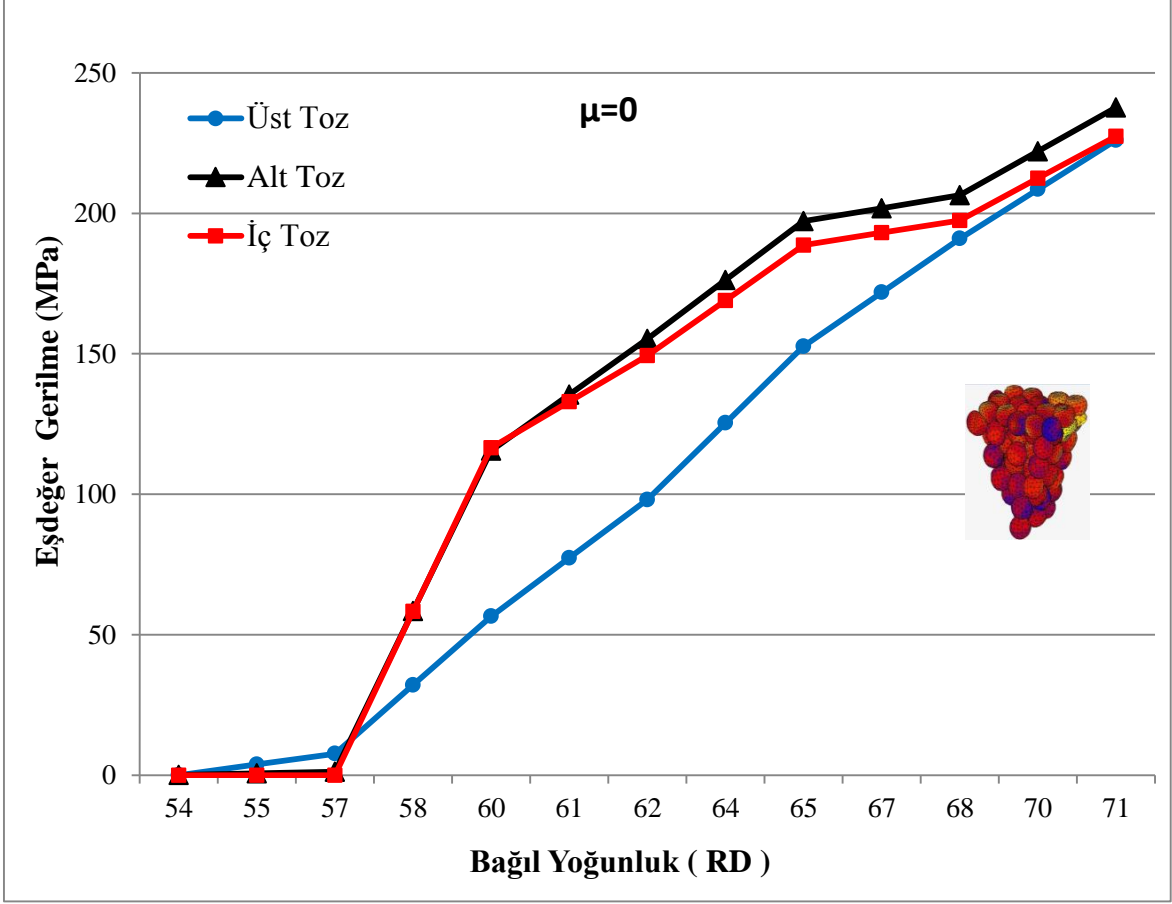
Referans tozların eşdeğer gerilme dağılımının verildiği Şekil 3.26'da, tozların zımbaya olan konumlarına göre proses esnasında farklılıklar oluşmasına rağmen prosesin sonunda tozların tümü 225 MPa civarındaki eşdeğer gerilme değerine ulaşmışlardır. Böylece Şekil 3.24'teki genel dağılımda gözlemlenen bu homojen davranış referans tozlar üzerinde de gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24. $\mu=0$ ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 3.25. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar



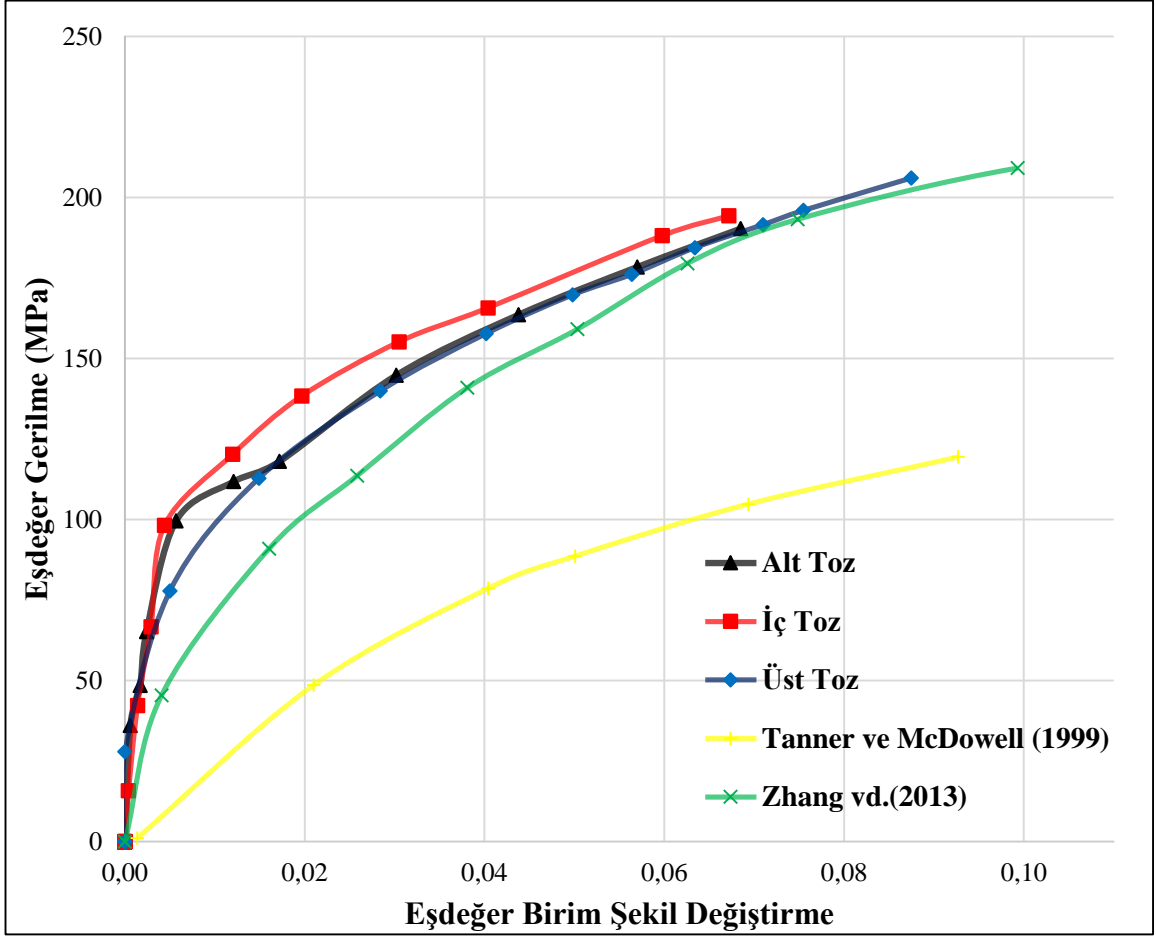
Şekil 3.26. MPFEM analizinde referans tozlar için $\mu=0$ kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme grafiği

b) Coulomb Sürtünme Katsayısı $\mu=0,1$

Malzeme modellerinin incelendiği bölümlerde verilmiş olan Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 da, von Mises malzeme modelinde MPFEM analiz sonuçları $\mu=0,1$ Coulomb sürtünme katsayısına göre elde edildiğinden bu bölümde tekrar verilmemiştir.

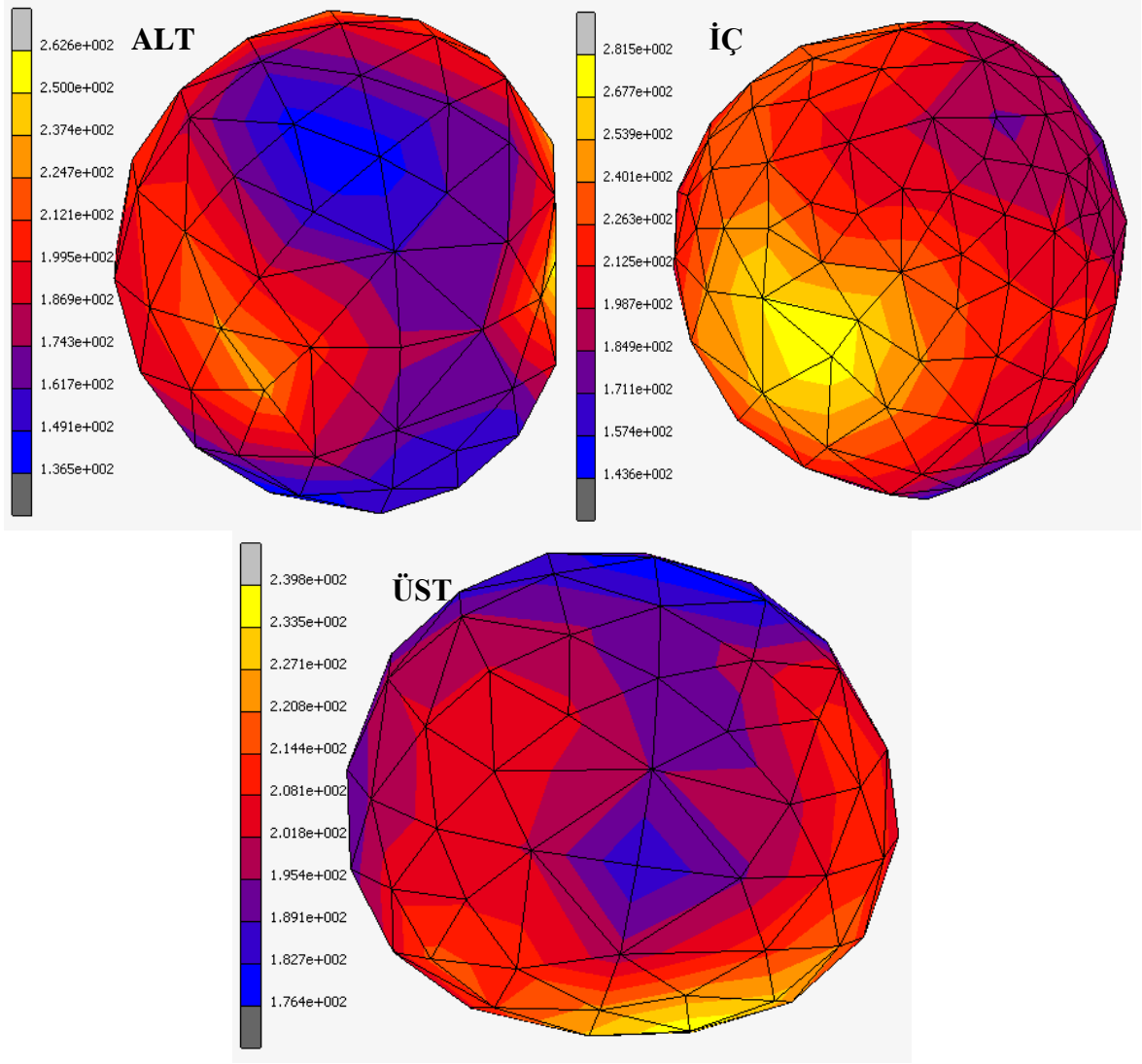
MPFEM analizi için referans çalışma von Mises malzeme modeli olduğundan bu modelin gerilme şekil değiştirme grafikleri referans tozlar için Şekil 3.27'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde zımbadan en uzakta olan üst tozun büyük bir kısmının kalıpla temasta olması sebebiyle en yüksek şekil değiştirmeye maruz kaldığı görülmektedir. Kalıpla teması olan üst ve alt tozun aynı gerilme şekil değiştirme davranışı sergilemelerine rağmen yalnızca diğer tozlarla temasta olan iç toz, sabit bir şekil değiştirme değeri için bu iki tozdan daha fazla gerilmeye maruz kalmıştır. Elde edilen eşdeğer gerilme-şekil değiştirme

grafiklerinin literatürle kıyaslanabilmesi açısından Tanner ve McDowell (1999) ve Zhang vd. (2013)'nin çalışmasında, bakır numunelere ait gerçek gerilme-gerçek şekil değişimi grafikleri Şekil 3.27'de referans tozlarla birlikte verilmiştir. Her iki referans eğrinin eğilim olarak bu tez çalışmasında elde edilen eğriler ile uyum içerisinde olduğu ve özellikle değer olarak ta Zhang vd.(2013) değerleriyle çok yakın rakamlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.27. MPFEM analizinde $\mu=0,1$ için von Mises malzeme modeli kullanılarak elde edilen gerilme-şekil değişimi grafiği

Şekil 3.28'de ise 0,1 sabit Coulomb sürtünme katsayısı ile yapılan MPFEM analizinde referans tozlarda meydana gelen deformasyon ve eşdeğer gerilme dağılımları verilmiştir. Gerilme dağılımları incelendiğinde, üzerine etkiyen maksimum ve minimum eşdeğer gerilme değeri arasındaki fark 65 MPa ile en düşük olan üst tozun en homojen gerilmeye maruz kaldığı söylenebilir.



Şekil 3.28. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0,1$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

c) Coulomb Sürtünme Katsayısı $\mu=0,25$

Sabit sürtünme katsayısı olarak analiz edilen ikinci değer 0,25'dir. Şekil 3.29'da verilen gerilme dağılımı incelendiğinde maksimum eşdeğer gerilmenin 415 MPa olduğu görülmektedir. $\mu=0,1$ analizinde elde edilen 407 MPa maksimum eşdeğer gerilme ile kıyaslandığında, arada oluşan farkın tozların birbirleri ve kalıpla olan sürtünmesinden dolayı oluşan artıştan kaynaklandığı söylenebilir.

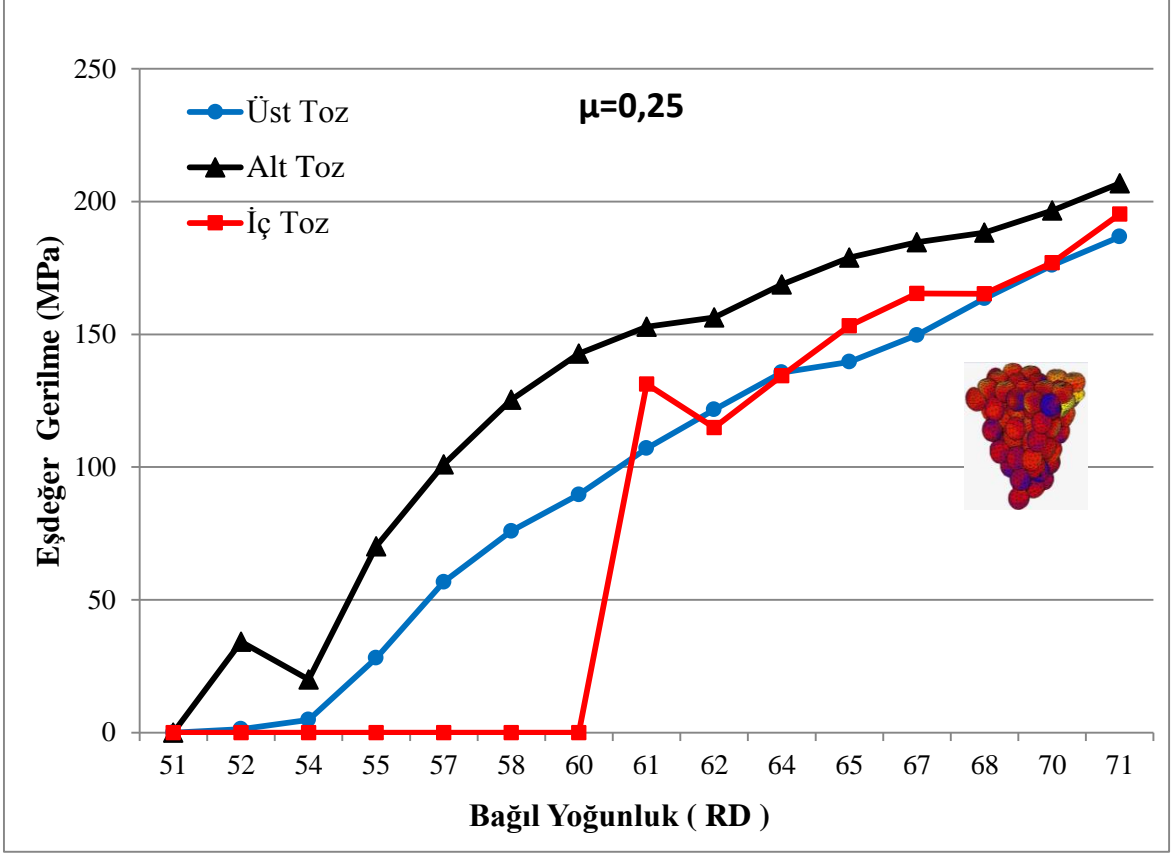
Tozların iç sürtünmelerinin artması, zimbadan uzak olan üst tozlardaki gerilme değerlerini düşürmüştür. Zimbaya yakın olan tozlar aşırı plastik deformasyona uğramıştır.

Elde edilen maksimum gerilme değeri yalnızca kalıbın geometrik süreksizliklerinin bulunduğu bölgelerde değil zımbanın temasta bulunduğu birçok eleman üzerinde de meydana gelmiştir.

Şekil 3.30'da görüldüğü gibi gerilme değerlerindeki artış eğilimi özellikle iç referans toz için düzensizleşmiştir. İç referans tozda oluşan gerilme değeri bağıl yoğunluğun % 60 değerine kadar çok küçük değerlerde kalmış fakat % 60 bağıl yoğunluk değerinin ardından aniden artmıştır. Referans tozlarda, sürtünmesiz ve 0,1 sürtünme katsayısından farklı olarak bağıl yoğunluğun % 51 değerinden itibaren gerilmelerin arttığı görülmüştür. Üzerinde 206 MPa maksimum eşdeğer gerilme hesaplanmış olan alt tozun aşırı plastik deformasyona maruz kaldığı görülmüştür. Tozlar üzerinde son analiz adımında ortalama 200 MPa düzeyinde eşdeğer gerilmeler hesaplanmıştır.



Şekil 3.29. $\mu=0,25$ ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

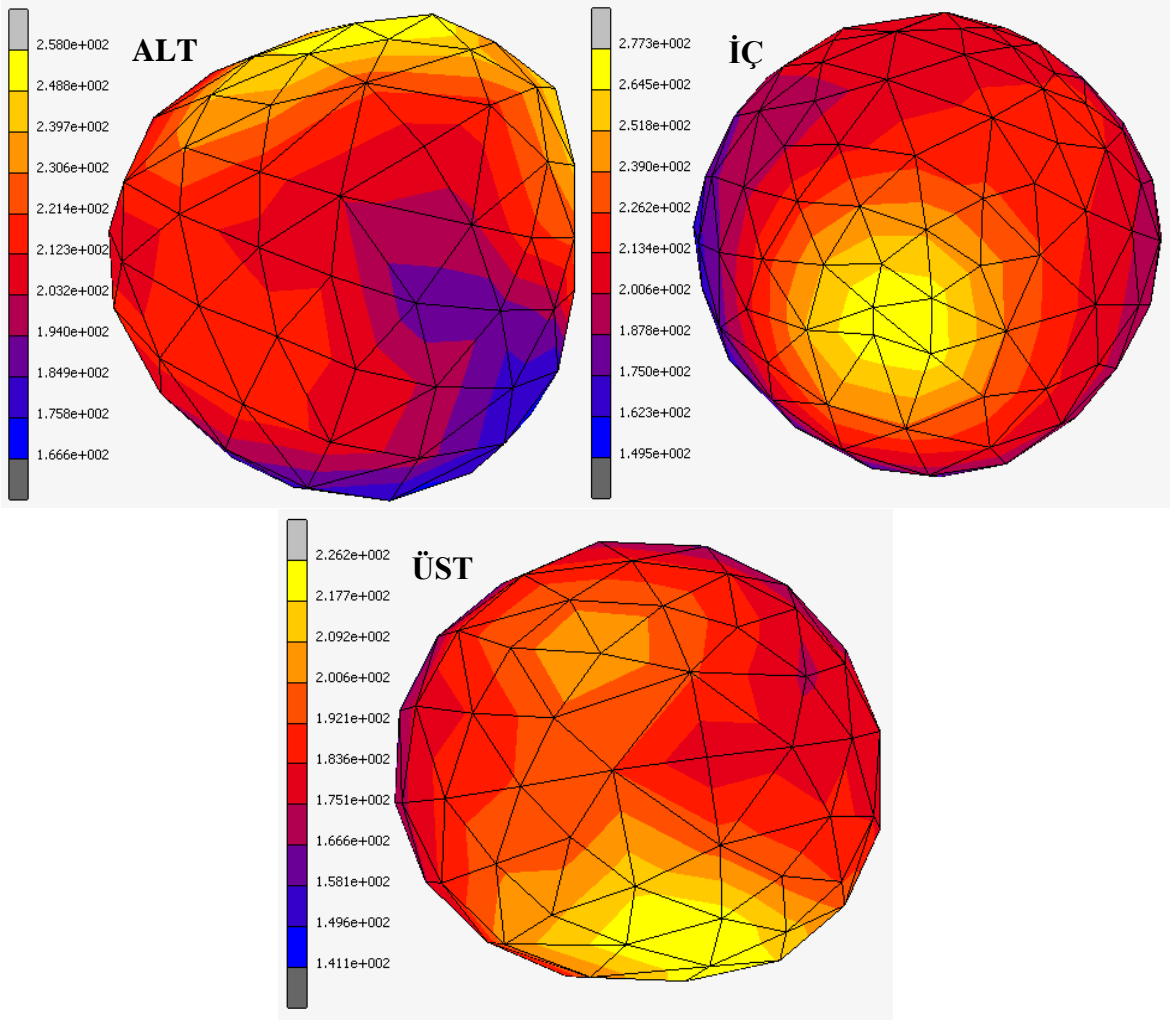


Şekil 3.30. MPFEM analizinde referans tozlar için $\mu=0,25$ kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme grafiği

Zımbaya yakın olan alt toz ve iç toz üzerinde elde edilen gerilme değerlerinde düzensizlikler görülmüştür. Gerilmeler her referans tozda farklı bağil yoğunluk değerlerinde hesaplanmaya başlanmıştır. Zımbadan uzak olan üst toz düşük bağil yoğunluk değerinde, düşükte olsa gerilmelere maruz kalmakla birlikte düzgün bir gerilme artışı görülmektedir. Sürtünme katsayısının artışı üst üzerinde, kalıpla temas sonucu oluşan gerilme artışları azalmıştır.

Zımbaya yakın tozların aşırı gerilmelere maruz kalmasının nedeni artan sürtünme katsayısının tozların yeniden yerleşmesini zorlaştırmasıdır. Tozlar zımbaya yakın bölgelerdeki boşluklara hareket ederken üst kısma yakın yerlerdeki boşluklara hareketleri iç sürtünme etkisiyle zorlaşmaktadır. Böylece artan sürtünme katsayısı ile sürtünmenin malzemenin şekil değişimi üzerindeki etkisi belirgin şekilde ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.31’de referans tozların deformasyonları ve bu tozlara ait düğüm noktalarının eşdeğer gerilme grafikleri verilmiştir.

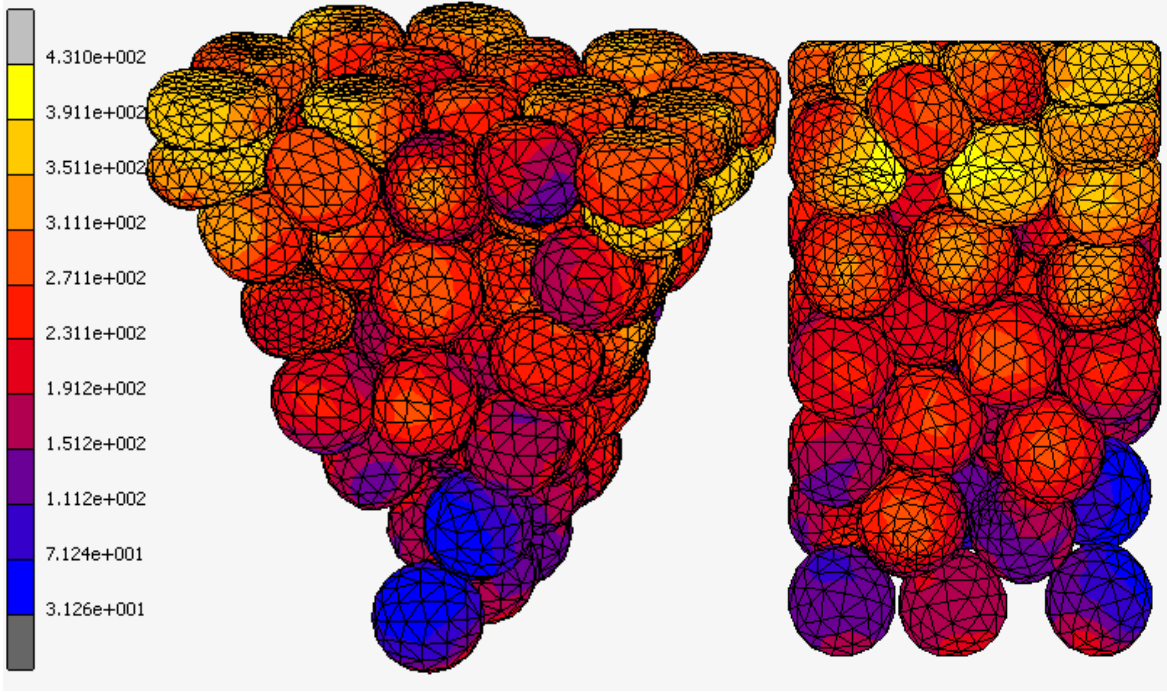


Şekil 3.31. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0,25$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

d) Coulomb Sürtünme Katsayısı $\mu=0,4$

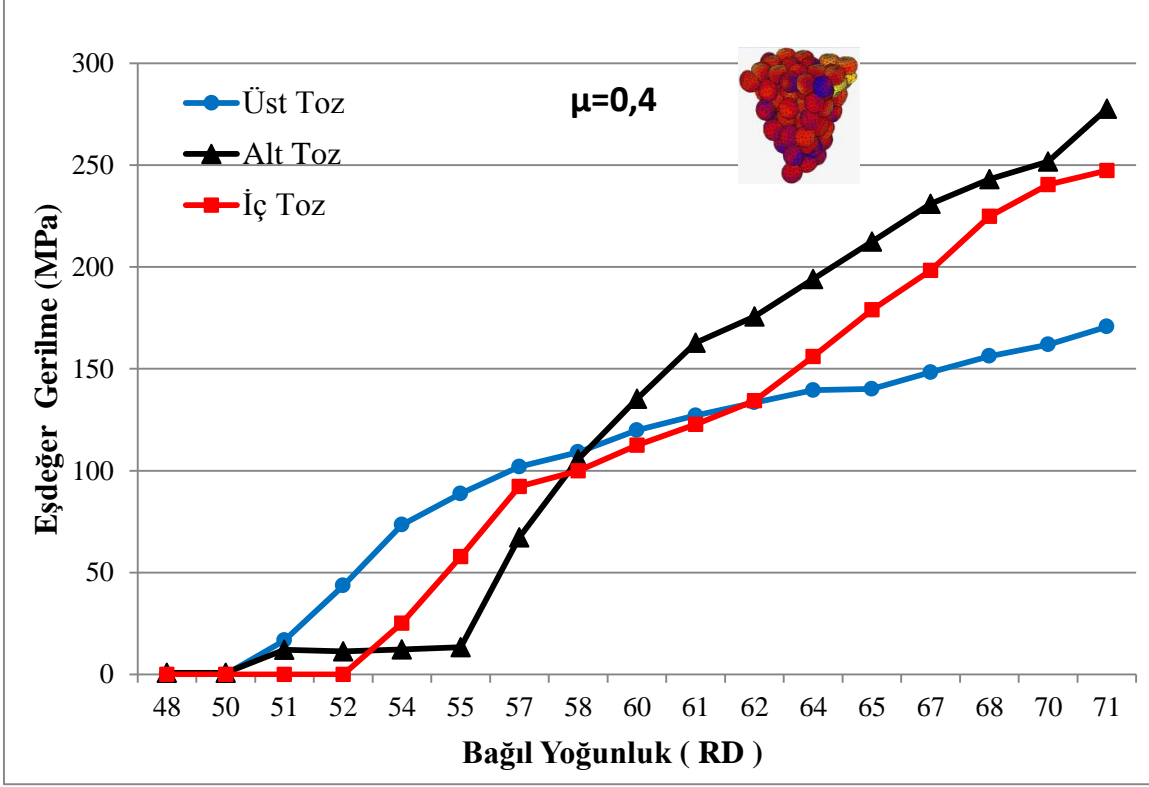
Sabit Coulomb sürtünme katsayısı olarak son incelenen değer 0,4'tür. 430 MPa düzeyinde maksimum eşdeğer gerilme ve 0,77 düzeyinde eşdeğer birim şekil değişimi hesaplanmıştır. Bu maksimum değerlerin elde edildiği eleman sayısında artış gözlemlenmekle birlikte üst kısımda düşük gerilmelere maruz kalan eleman sayısı da artmıştır (Şekil 3.32). Elemanlar üzerinde aşırı deformasyon görülmekte fakat minimum eşdeğer gerilme 31,26 MPa olarak hesaplanmıştır. Akma gerilmesinin 30,89MPa olması ve minimum eşdeğer gerilme değerinin akma gerilmesine bu derece yakın olması nedeniyle bazı elemanlar üzerinde plastik deformasyonun gerçekleşmediği söylenebilir. Eşdeğer birim

şekil değiştirme değerleri incelendiğinde, elde edilen minimum eşdeğer birim şekil değiştirme değerinin $1,462 \times 10^{-4}$ ile akma gerilmesine karşılık gelen $2,88 \times 10^{-4}$ değerinden küçük olması, bazı elemanların elastik deformasyon bölgesinde kaldığını doğrulamaktadır.



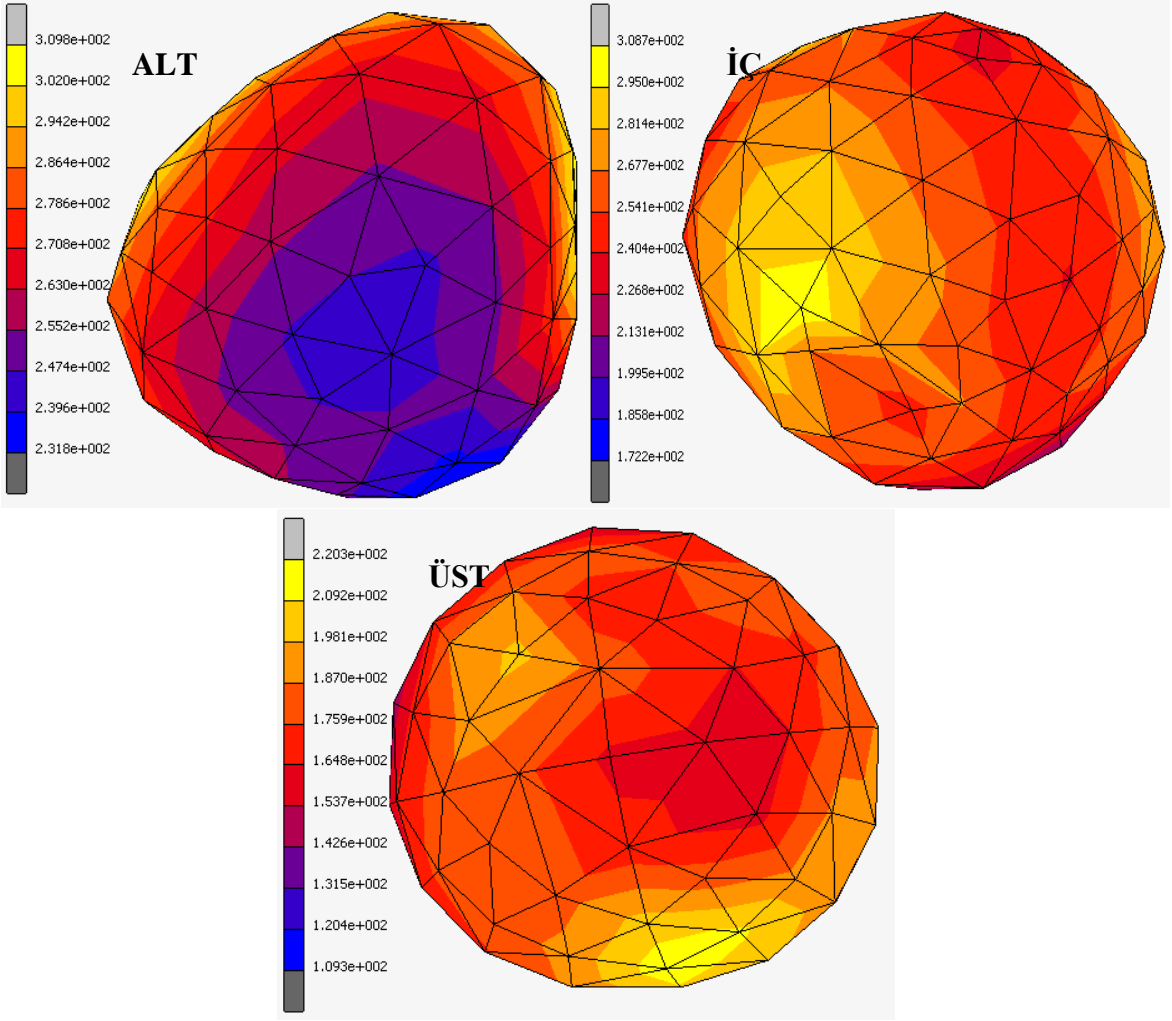
Şekil 3.32. $\mu=0,4$ ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Sürtünme katsayısında teorik sınır olan 0,577 sayısına yaklaştıkça malzemenin sürekli ortam davranışına yaklaştığı görülmüştür. Tozlar birbirlerine ve kalıba temas bölgelerindeki sürtünme gerilmeleri arttığından kayarak hareket etmeleri zorlaşmaktadır. Kayarak hareket edemeyen tozlar yeniden yerleşme sürecinde boşluklara gidemeden sıkışmaya başlamaktadırlar. Bu nedenle bağıl yoğunluğun %48 değerinde tozlar üzerinde gerilmeler oluşmuştur (Şekil 3.33). Diğer sabit sürtünme katsayılarına oranla daha düşük bir bağıl yoğunluk değerinde gerilmelere maruz kalan referans tozlardan alt ve üst toz aynı analiz adımı gerilmelere maruz kalmıştır. Zımbaya yakın bölgelerde oluşan aşırı deformasyonlar göz önüne alındığında alt toz sıkışırken üst tozun henüz gerilmeye maruz kalmaması beklenirken üst toz eşdeğer gerilmesi diğer iki tozdan önce akma sınırını aşmıştır.



Şekil 3.33. MPFEM analizinde referans tozlar için $\mu=0,4$ kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme grafiği

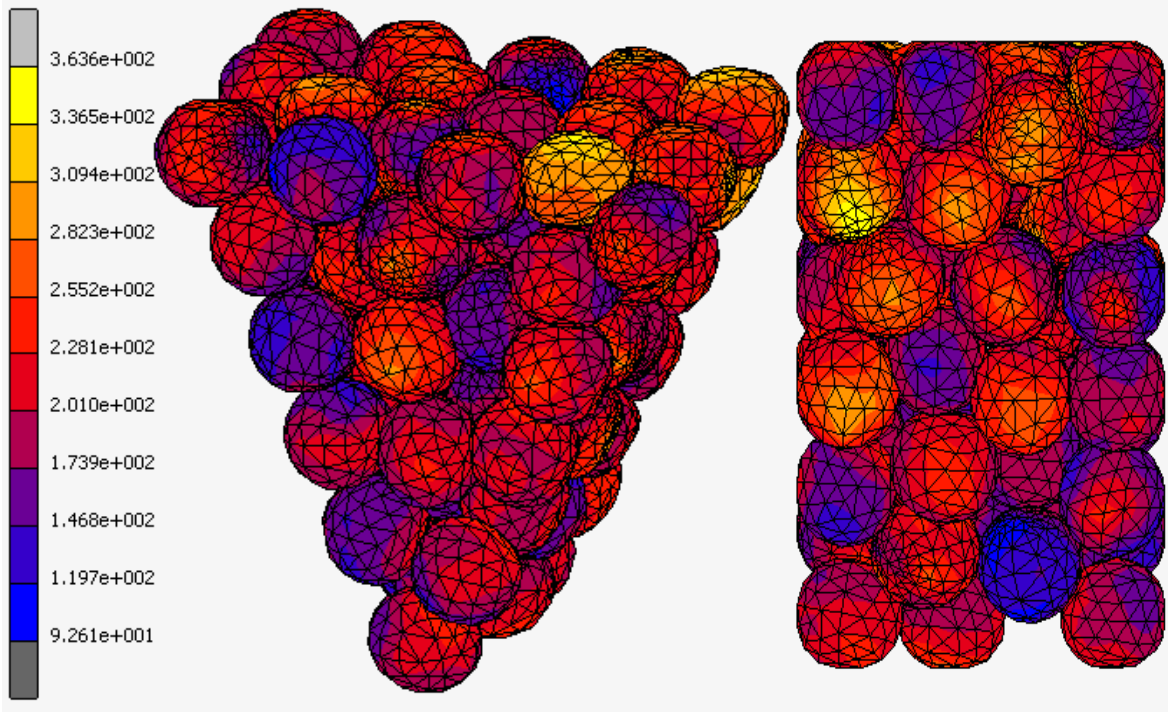
Şekil 3.33'te alt tozun çok düşük bağıl yoğunluk değerlerinde, neredeyse zımbanın tozlara temas ettiği anda, elastik deformasyona maruz kaldığı ve bağıl yoğunluğun %55 değerine kadar sabit bir gerilmeyle hareket ettiği görülmüştür. İç ve üst tozların düğüm noktalarına ait gerilme grafikleri % 52 bağıl yoğunluk değerinden itibaren düzgün dağılımlı olarak artmaktadır. Alt toza etkiyen gerilme değeri ortalama 280 MPa, iç toza etkiyen gerilme değeri 250 MPa ve üst toza etkiyen ortalama gerilme değeri 170 MPa değerinde kalmıştır. Bu değerler tozlar arasındaki gerilme farkının yüzde ellinin üzerine çıktığını göstermiştir. Üst toz üzerinde düşük gerilme bölgeleri Şekil 3.34'te görülmektedir. Aynı şekil üzerinde alt tozun aşırı plastik deformasyona uğramış yapısı görülmektedir. Tozlar üzerinde 315 MPa düzeyinde maksimum eşdeğer gerilme değeri elde edilmesine karşılık minimum değer 135 MPa'da kalmıştır.



Şekil 3.34. Referans tozların MPFEM analizinde $\mu=0,4$ için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

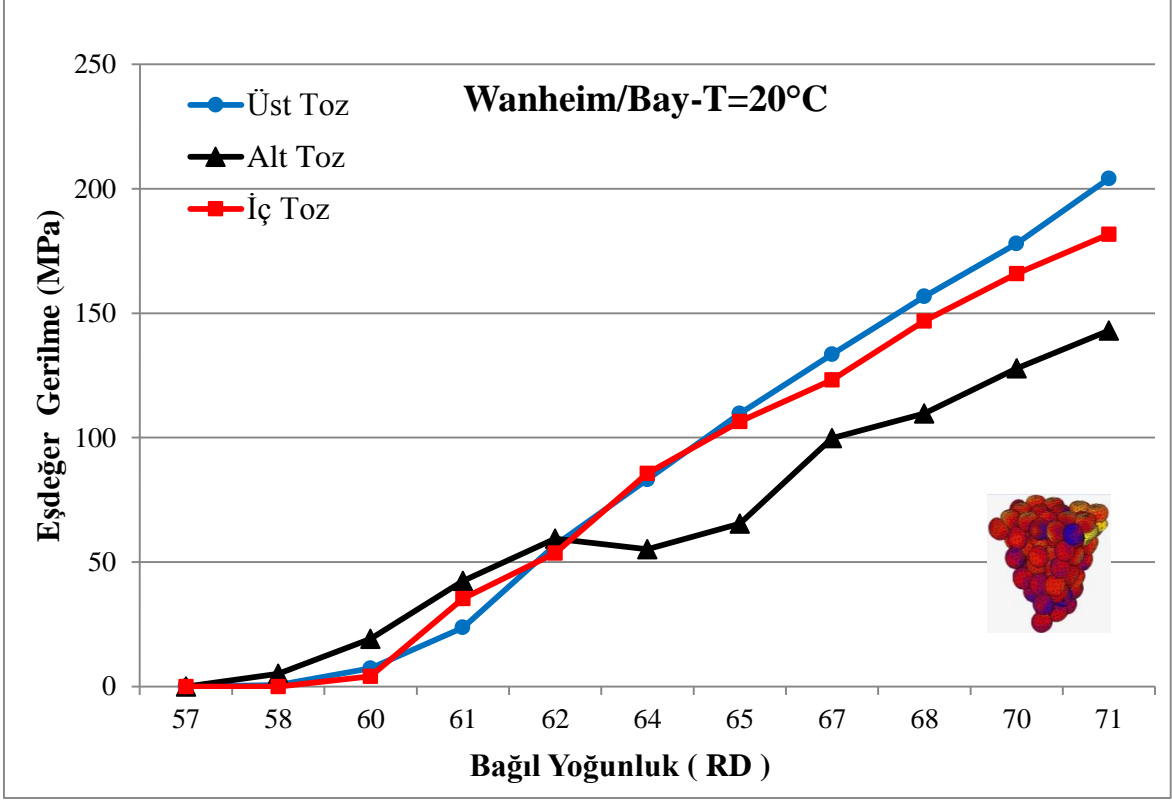
3.2.2. Wanheim/Bay Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde, sürtünmeyi gerçek temas alanını görünen temas alanının bir fonksiyonu olarak ifade eden Wanheim/Bay modeli ile yapılan analizler verilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan çalışmalar, von Mises malzeme modeline Wanheim/Bay sürtünme modelinin uygulanması sonucunda MPFEM yaklaşımı ile ortaya konulmuştur. Şekil 3.35'te verilmiş olan genel gerilme dağılımında 365 MPa maksimum eşdeğer gerilme elde edilmiştir.



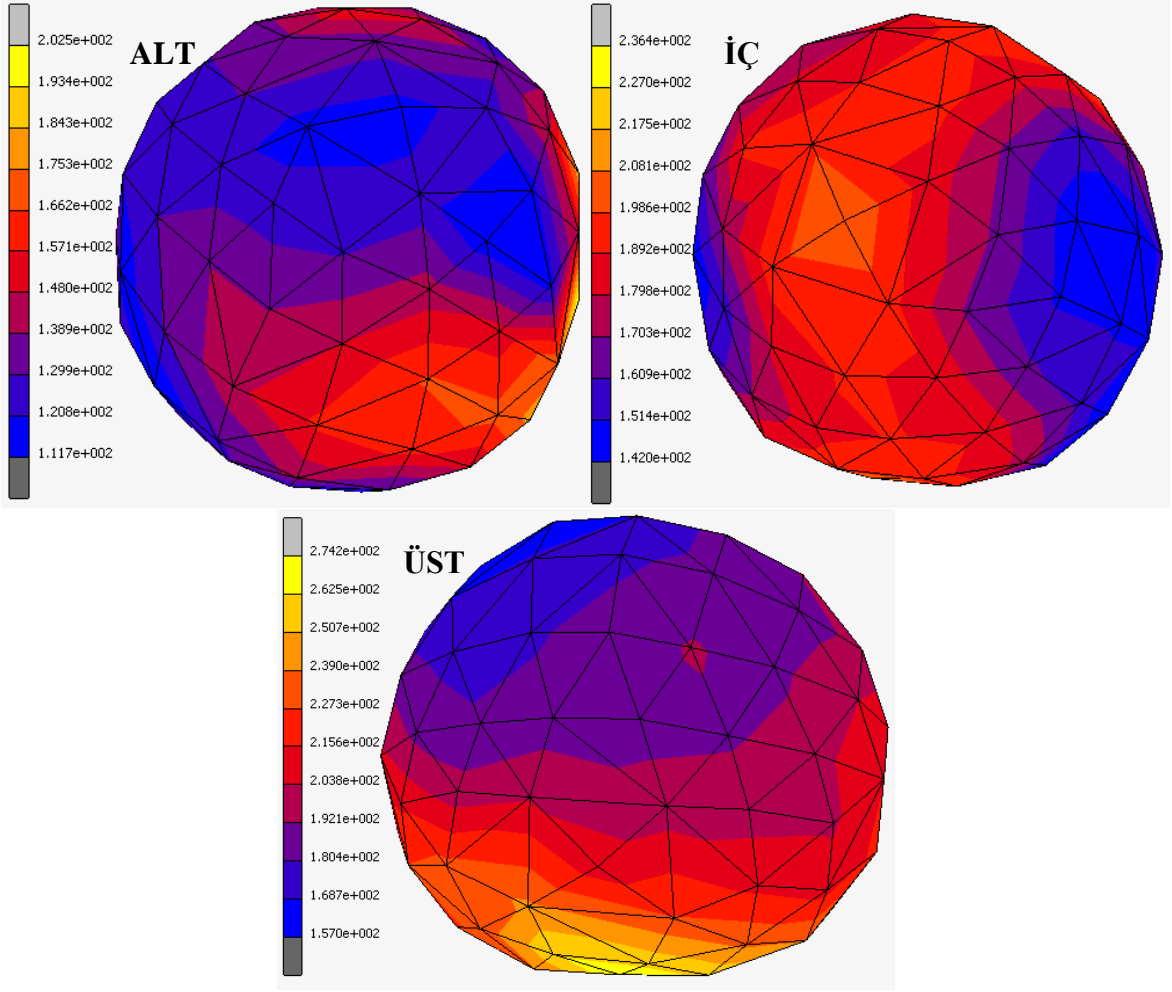
Şekil 3.35. Wanheim/Bay sürtünme modeli ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

63000 saniye işlemci süresinde tamamlanan analizde eşdeğer birim şekil değiştirme değeri 0,373 olmuştur. Tozlar üzerinde genelde homojen bir gerilme dağılımı olmasına karşın kalıpla temas elemanlarında şekil değiştirme ve gerilme artışları görülmüştür. Analiz süresince, rijit kalıpla temasta olan tozlardaki gerilme değerlerinin yalnızca diğer tozlarla temasta olan tozlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum referans tozların eşdeğer gerilmelerinin verildiği Şekil 3.36'de görülmektedir. Zımbadan uzakta olduğu için gerilme yığılmalarına maruz kalmayan fakat diğer tozların hareketiyle kalıp yüzeyine bastırılan üst tozda en yüksek ortalama gerilme 210 MPa düzeyinde ölçülmüştür. Zımbaya yakın olan alt toz üzerinde ise 140 MPa düzeyinde eşdeğer gerilme değeri elde edilmiştir. Buna karşın %57 bağıl yoğunluğa ulaşıldığında alt toz deformasyona uğramışken, iç ve üst tozlar ancak %60 bağıl yoğunluk değerinden sonra plastik deformasyona uğramıştır. İç ve üst toz bu analizde gerilme değerleri ve değerlerin artış eğilimleri açısından birbirlerine çok yakın sonuçlar ortaya koymuşlardır.



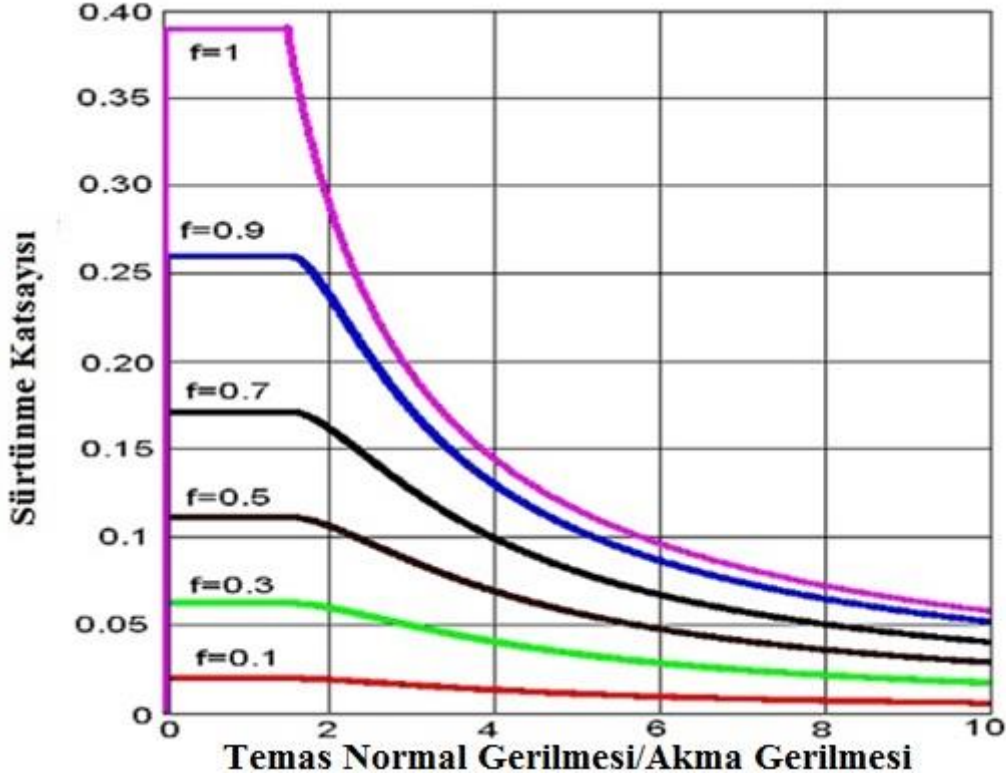
Şekil 3.36. MPFEM analizinde Wanheim/Bay sürtünme modeli kullanılarak referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme grafiği

Şekil 3.37’de referans tozlar üzerinde düğüm noktalarının gerilme dağılımları ve bu tozların deformasyonları verilmiştir. Gerilmeler incelendiğinde alt ve iç toz üzerindeki düşük gerilme bölgeleri ve üst tozun kalıpla temas bölgesinde oluşan 225 MPa’ın üzerindeki gerilmeler görülmektedir. Alt toz gerilme değerlerinde görülen düzensizlik sayısal analiz hatası olabilmesine rağmen tozun genel gerilme artış eğilimini değiştirmemiştir. Alt toz üzerinde elde edilen en yüksek gerilme değeri ise ancak 180 MPa düzeyindedir. Gerilme değerinin bu şekilde düşük olması tozda oluşan plastik deformasyon miktarını da düşürmüştür.



Şekil 3.37. Referans tozların MPFEM analizinde Wanheim/Bay sürtünme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

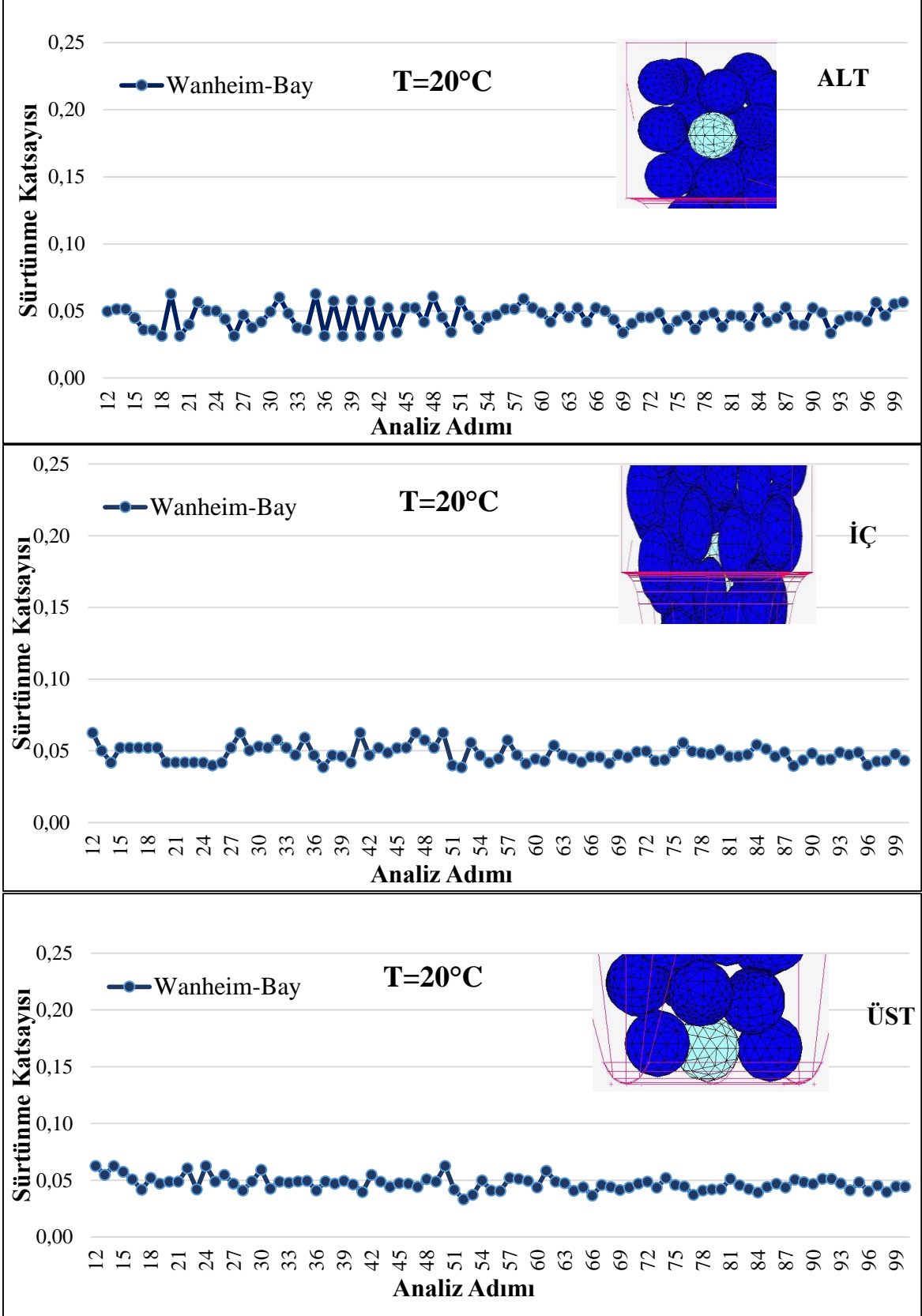
Wanheim/Bay sürtünme modeli ile analizde, Fortran dilinde yazılmış kullanıcı alt programı (user subroutine) koşturularak prosese ait sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Kullanıcı alt programına eklenen komutlarla, her analiz çevriminde sürtünme katsayısı hesaplatılmış ve belirtilen bir dış dosyaya aktarılması sağlanmıştır. Sürtünme faktörü, Cora (2004) ve Wang vd.(2014) çalışmalarında kullanıldığı haliyle 0,3 olarak alınmış ve elde edilen bu sürtünme katsayısı değerleri çalışmada verilmiş olan Wanheim/Bay modelinde sürtünme katsayısı değişim grafiği ile karşılaştırılmıştır. Daha büyük sürtünme faktörleri analizin başlangıcında 0,1'den daha büyük sürtünme katsayılarına neden olacağından sürtünme faktörünün 0,3 olarak alınması uygun görülmüştür.



Şekil 3.38. Wanheim/Bay sürtünme modelinde sürtünme katsayısının sürtünme faktörüne göre değişimi (Cora (2004))

Şekil 3.38'den kolayca görüleceği üzere 0,3 sürtünme faktörü eğrisi 0,062 sürtünme katsayısı değerinden başlayıp bir müddet sabit olarak devam edip sonra temas normal gerilmesinin artışı ile sıfıra yakınsayacak şekilde azalmaktadır. Analizler sonucunda referans tozlar üzerindeki düğüm noktası ve elemanlar temel alınarak elde edilmiş olan sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3.39'da verilmiştir. Bu şekillerde verilen grafikler incelendiğinde tozların başlangıçta 0,062 değerinde ya da çok yakın değerlerde sürtünme katsayıları elde edildiği ve analizin sonuna doğru çok az da olsa azaldığı tespit edilmiştir.

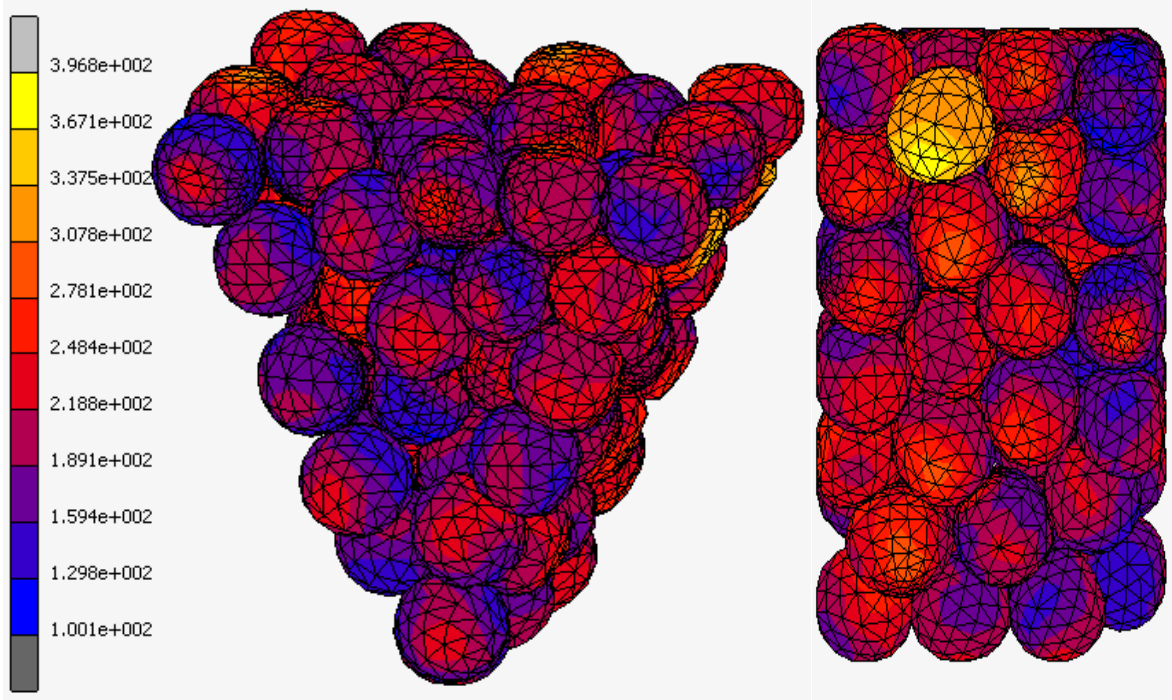
Tozların yeniden yerleşme sürecinin tamamlandığı analiz adımlarına kadar sürtünme katsayısının 0,062 civarındaki değişkenlik gösterdiği, sürecin tamamlanıp tozun sürekli bir gerilmeye maruz kalması durumunda 0,062 değerinin kesin olarak elde edildiği ardından sürtünme katsayısının modele uygun olarak azalma eğilimine girdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.39. Wanheim/Bay sürtünme modelinde referans tozların sürtünme katsayıları

3.2.3. Levanov Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular

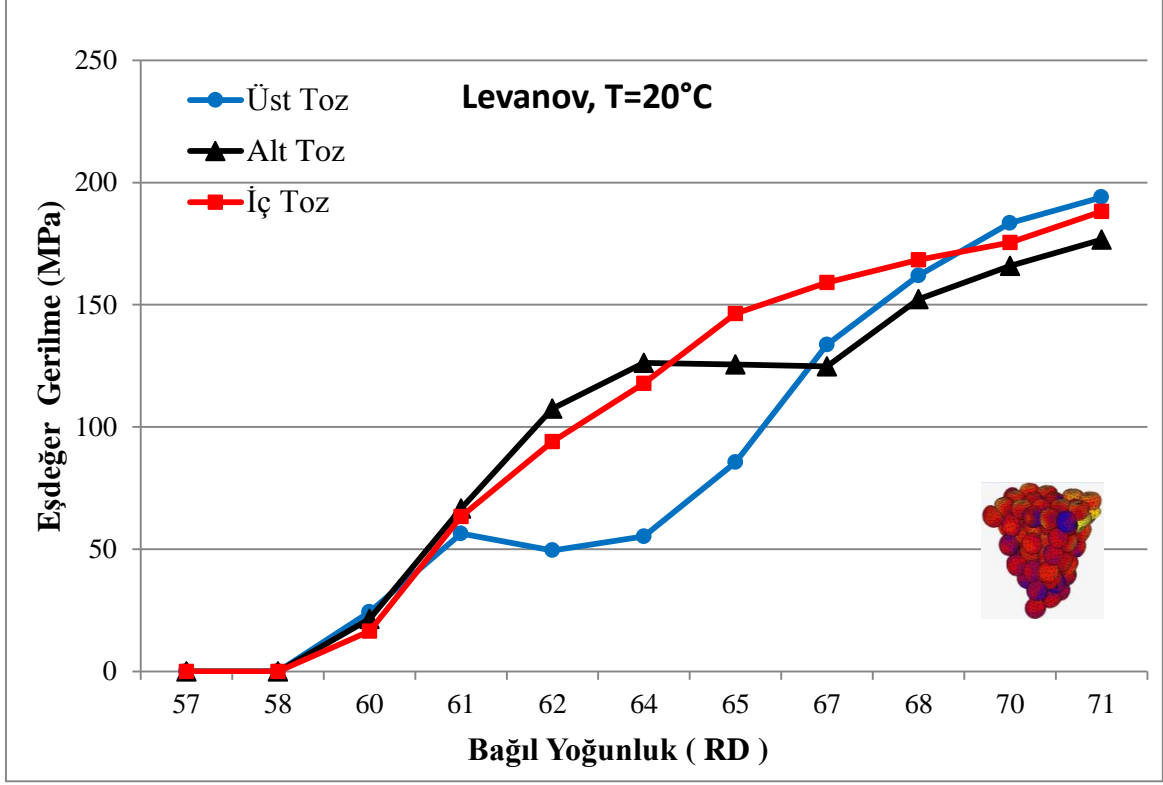
Sürtünme davranışını ifade etmeye çalışan bir diğer model de Levanov sürtünme modelidir. Wanheim/Bay sürtünme modelinde anlatıldığı şekliyle bu model için de simülasyonlar yapılmış olup gerilme, şekil değişimleri ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 3.40 Levanov sürtünme modeliyle oda sıcaklığında yapılmış analizden bütün tozlar üzerinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.40. Levanov sürtünme modeli ile MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

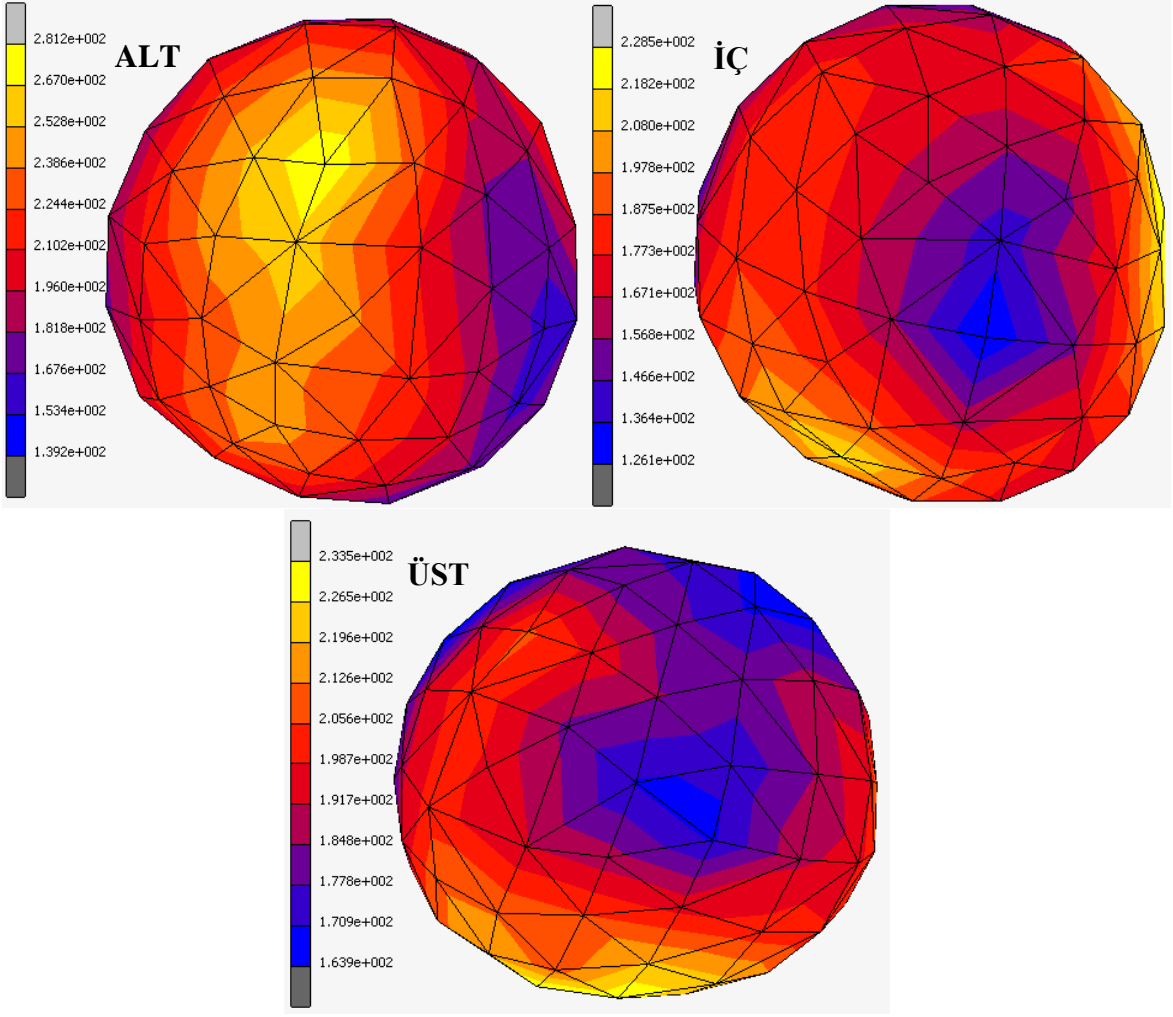
Levanov sürtünme modelinden elde edilen maksimum eşdeğer gerilme değeri 396 MPa ile Coulomb sürtünme modeli maksimum eşdeğer gerilme değerine yakın sonuçlanmıştır. Maksimum değerler bazı temas bölgelerinde görülmekle birlikte simülasyonun genelinde Coulomb sürtünme modelinden daha homojen bir gerilme dağılımı görülmüştür. Şekil 3.41’de verilmiş olan referans tozlara ait eşdeğer gerilme değerleri de bu homojen dağılımı desteklemektedir. Üç tozun oda sıcaklığında elde edilen eşdeğer gerilmeleri 175-190 MPa aralığında oluşmuştur. Üç toz da aynı bağıl yoğunluk değerinde

gerilmeye maruz kalmıştır. Analiz süresince, bazı adımlarda gerilme değerleri birbirlerinden farklılaşsalar da bu durum analiz sonunda sonucu pek değiştirmemiştir.



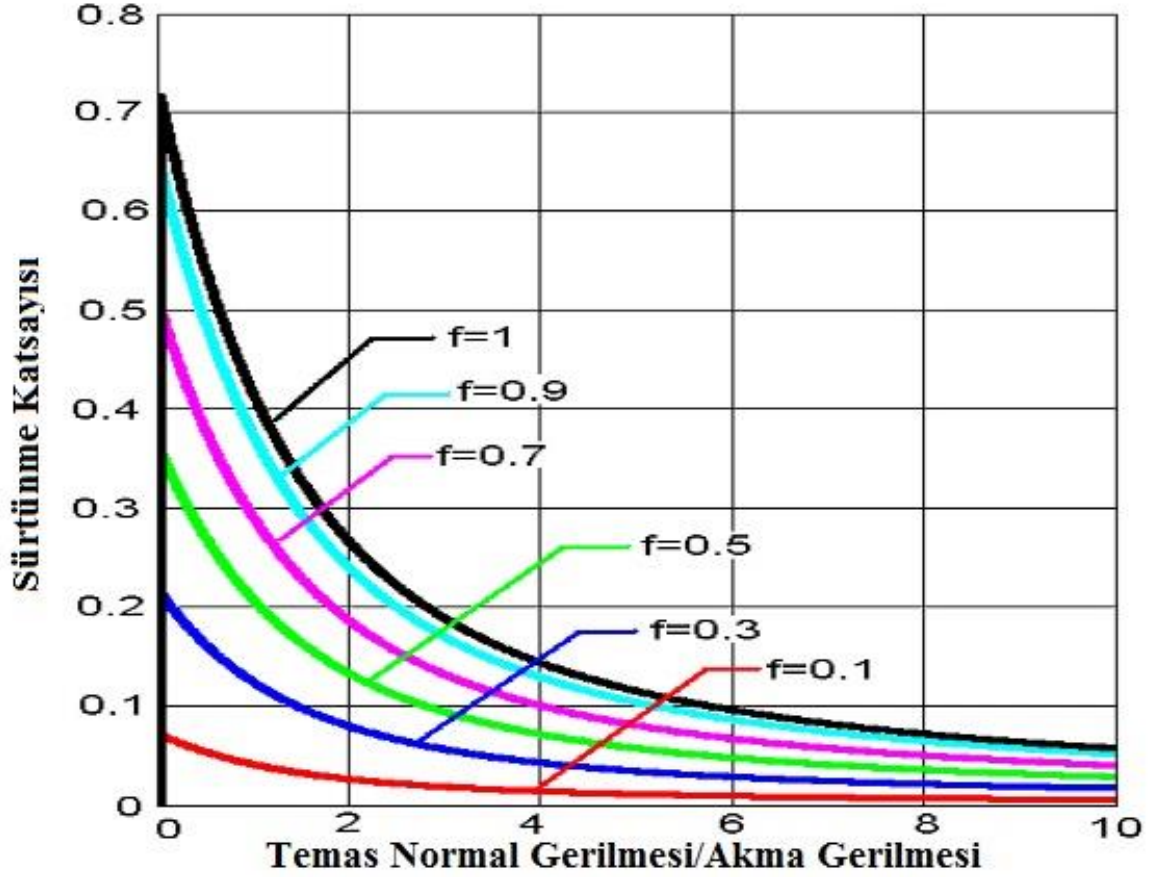
Şekil 3.41. MPFEM analizinde Levanov sürtünme modeli kullanılarak referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme grafiği

Levanov ve Wanheim/Bay modellerine ait sonuçlardan dikkat çeken benzerlik ise üst tozda oluşan eşdeğer gerilmenin diğer iki tozdan fazla olmasıdır. Levanov modelinde tozların akma gerilmesinin yaklaşık altı katı gerilemelere maruz kalmalarına rağmen plastik deformasyona bağlı şekil değişimi tozlar üzerinde belirgin değildir. İç tozda aşırı gerilmeye maruz kalan elemanlarda 315 MPa'nın üzerinde değerler hesaplanmıştır.



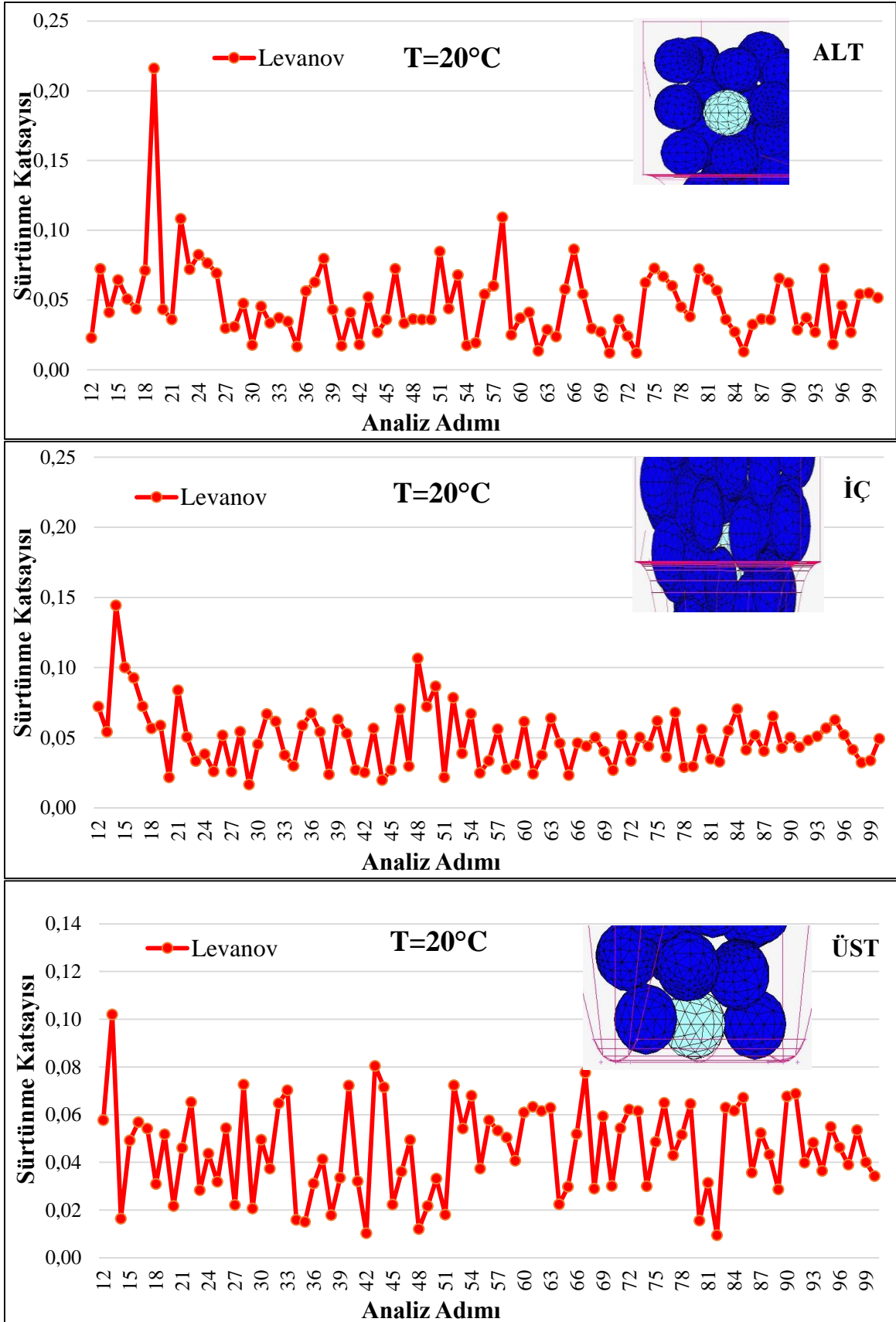
Şekil 3.42. Referans tozların MPFEM analizinde Levanov sürtünme modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

Levanov sürtünme modeli için sürtünme faktörü Wanheim/Bay modelinde olduğu gibi 0,3 alınmıştır. Sürtünme faktörünün $f=0,3$ 'den daha büyük değerlerde olması Şekil 3.43'ten de görülebileceği üzere Levanov modelinde analiz başlangıcında sürtünme katsayısını 0,35 değerine çıkaracaktır. Yapılan sabit sürtünme analizlerinde 0,4 sürtünme katsayısının, deformasyonu zorlaştırdığı ve prosesi doğal sürecinden uzaklaştırdığı görülmüş olduğundan Levanov modelinde başlangıç sürtünme katsayısı olarak 0,216 değerini veren $f=0,3$ sürtünme faktörünün kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 3.43. Levanov sürtünme modelinde sürtünme katsayısının sürtünme faktörüne göre değişimi (Cora (2004))

Levanov sürtünme modeli kullanılarak alt, iç ve üst tozlar için elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3.44'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere 0,216 değerindeki maksimum sürtünme katsayısı yalnızca alt toz da elde edilebilmiştir. İki analiz adımı arasında ani gerilme artışları ve plastik deformasyonlar olabildiğinden elde edilen değerler, Şekil 3.43 teki grafiğin maksimum değerleri birinci analiz adımı yerine daha sonraki adımlarda ortaya çıkmaktadır. İç ve üst toz sürtünme katsayıları yeniden yerleşme süresince değişkenlikler göstermekte ve yeniden yerleşme süreci bitip gerilme sürekli hale gelince sıfıra doğru azalan bir eğilim ortaya koymuştur.



Şekil 3.44. Levanoz sürtünme modelinde referans tozların sürtünme katsayıları

3.2.4. Sürtünme Modellerinin Karşılaştırılması

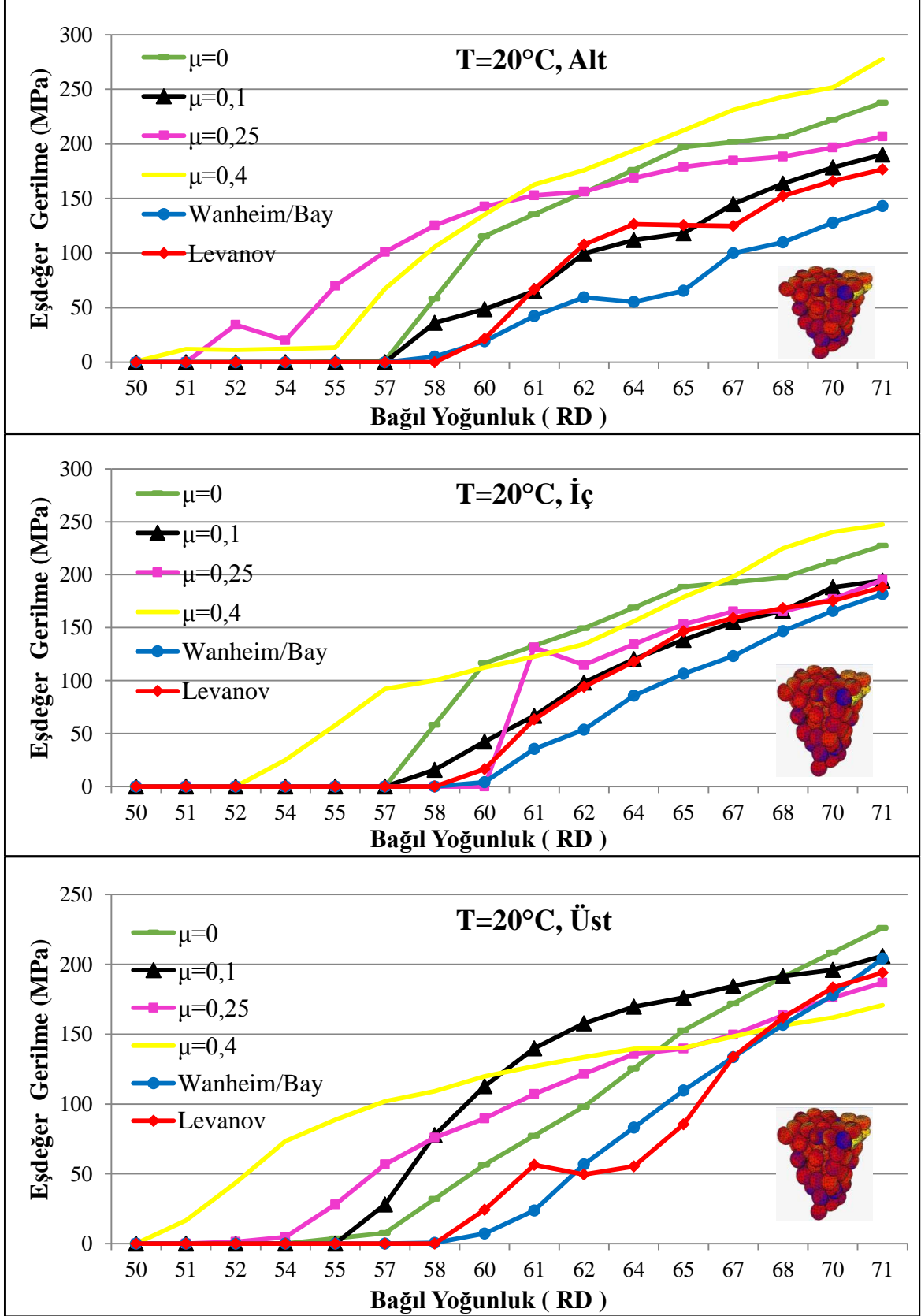
Üç referans tozun gerilme grafikleri Şekil 3.45’de bir arada incelenmiştir. Her üç referans tozda, $\mu=0,4$ analizinde %50 bağıl yoğunluk değerinden itibaren eşdeğer gerilme değerleri ortaya çıkmıştır. Sürtünme katsayısının azalmasıyla eşdeğer gerilmelerin bağıl yoğunluğun %50’nin üzerine çıktığı durumlarda hesaplandığı Şekil 3.45’ten görülmektedir.

Alt toza etkileyen eşdeğer gerilme değerleri 140-270 MPa, iç toza etkileyen eşdeğer gerilme değerleri 180-250 MPa iken üst toza etkileyen eşdeğer gerilme değerleri ise 170-220 MPa’dır. Üst toza etkileyen eşdeğer gerilme değerleri hem maksimum değer açısından hem de değer aralığı açısından en alt düzeydedir. En geniş aralığa ve en büyük gerilme değerine alt toz sahip olmuştur. Üç toz üzerinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme değerleri, sürtünme katsayısının 0,4 değeri ile maksimum ya da sürtünme katsayısının 0 ile minimum olduğu analizlerden elde edilmiştir. Sürtünme katsayısının maksimum olduğu durumlar da tozlar zımbaya yakın bölgelerde sıkışarak üst kısma doğru ilerleyememekte ve gerilme artışları alt ve iç toz üzerinde oluşmaktadır. Diğer taraftan sürtünmesiz durumda zımba hareketinden doğan sıkışma etkisi zımbadan en uzak noktaya taşınabilmiş ve üst toz üzerinde maksimum gerilme değerini meydana getirmiştir.

Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modeli ile yapılan analizlerde minimum gerilme dağılımları oluşmuştur. İç toz için sabit sürtünme katsayısının 0,1 olduğu analiz sonuçları ile Wanheim/Bay ve Levanov modellerinin analiz sonuçları birbirlerine çok yakın değerlerdedir. Alt toz için de eğriler aynı şekilde uyum içerisinde olmasına karşın üst toz da 0,1 sabit Coulomb sürtünme katsayısı eğrisi diğer iki model eğrisinden ayrılmıştır.

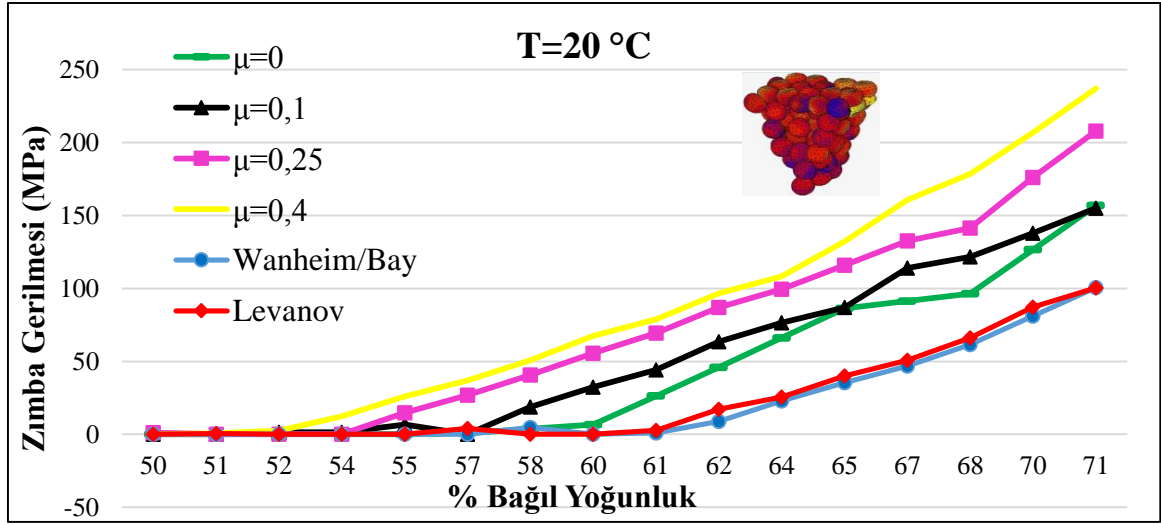
Tozlara ilk eşdeğer gerilmenin etkimesinin ardından bazı durumlarda parabolik artışlar, bazı durumlarda düzensiz artışlar olmasına rağmen genel olarak doğrusal gerilme artışı elde edilmiştir. Genel olarak sabit sürtünme katsayısının 0,1 ve üzerinde olduğu durumlarda parabolik artışlar, Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modellerinde doğrusal artışlar olduğu Şekil 3.45’ten söylenebilir.

Doğrusal gerilme artışı zımbaya etkileyen gerilme değerleri için de Şekil 3.46’de görülmektedir. Zımbaya etkileyen gerilme değeri 240 MPa ile 0,4 sabit sürtünme katsayısında maksimum değere ulaşırken Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modellerinde 100 MPa ile minimum değerde kalmıştır.



Şekil 3.45. Referans tozların sürtünme davranışına göre eşdeğer gerilme değerleri

Wanheim/Bay ve Levanov modellerinin sürtünme davranışına etkisi benzer olduğundan zımbaya etkiyen gerilme değerleri de yaklaşık aynı olmuştur. Sonuç adımıında değerlerinin çakışmasının yanında, bütün süreç boyunca eş gerilme davranışı sergilemiştir. Benzer bir durumla sürtünme katsayısının 0,1 olduğu ve sürtünmesiz analiz sonuçlarında karşılaşılmıştır. Bu iki analizin gerilme artışları Wanheim/Bay-Levanov ikilisinden farklı olarak paralel artış eğiliminde olmasalar dahi sonuç tablosunda zımbaya etkiyen gerilme değeri yaklaşık 155 MPa ile üst üste çakışmıştır.

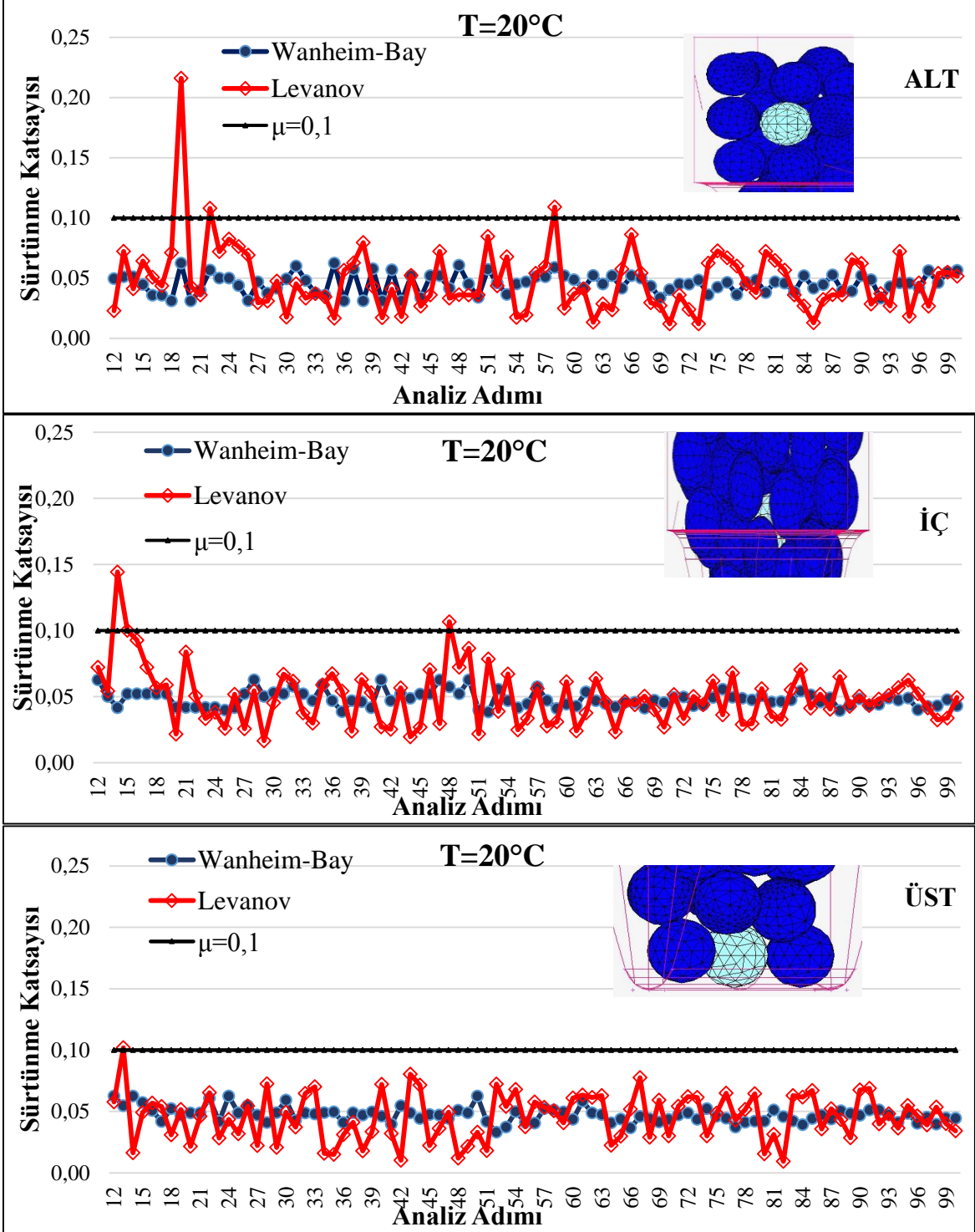


Şekil 3.46. Sürtünme modeline göre zımbada oluşan gerilmeler

Sürtünme modellerinin kıyaslanması aşamasında analizlerden elde edilen sürtünme katsayıları incelenmiş ve 0,1 sabit sürtünme katsayısı ile birlikte Şekil 3.47’te gösterilmiştir. Wanheim/Bay ve Levanov modellerinden yalnızca Levanov modelinden analiz başlangıcında ya da yeniden yerleşmenin tamamlandığı analiz adımıında 0,1 değerinden büyük değerde sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Wanheim/Bay modelinde düzensizlikler olmasına rağmen bu düzensizlikler dar bir aralıkta kalmaktadır. Özellikle iç toz, yeniden yerleşmenin tamamlanmasından sonra çok dar bir aralıkta değişerek azalan eğilimdeki sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Aynı tozun Levanov sürtünme katsayıları yeniden yerleşme tamamlandıktan sonra Şekil 3.44’teki genel davranışa uygun bir değişim içerisinde gerçekleşmiştir.

Üst ve alt tozun ikisi de hem kalıpla hem diğer tozlarla temas halinde olmasına karşın alt toz zımbanın hareketiyle y ekseninde üst zımbaya doğru hareket etmektedir. Üst tozun

bu yöndeki hareketi rijit kalıp tarafından engellenmiştir. Hareket halindeki alt tozın oluşturduğu sürtünme katsayıları üst toza oranla daha büyük değişkenlikler göstermektedir.



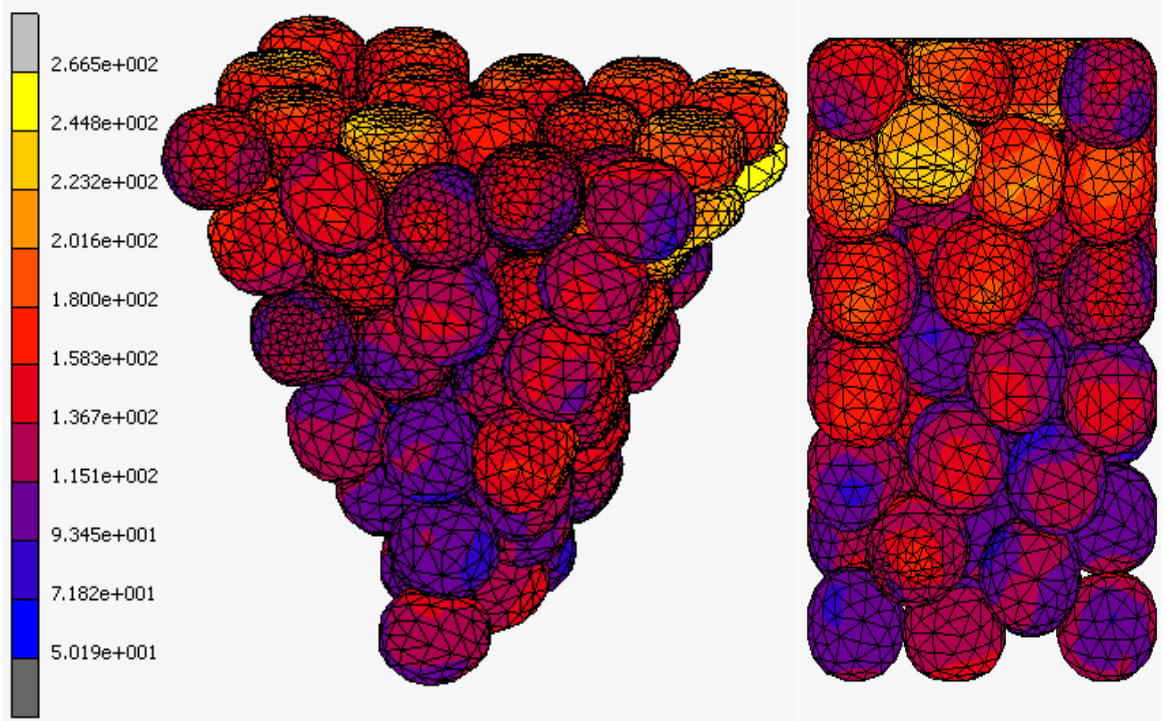
Şekil 3.47. Referans tozlar üzerinde oda sıcaklığında analizlerden elde edilen sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimi

3.3. 270°C’de Yapılan Analizlerden Elde Edilen Bulgular

Bu bölüme kadar yapılan analizlerde kullanılan malzeme parametreleri “Yapılan Çalışmalar” bölümünde açıklandığı üzere oda sıcaklığındaki değerlerdir. Bu bölümde 0,1 sabit sürtünme katsayısında Coulomb, Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modellerini incelemek üzere 270°C’de von Mises malzeme modeli kullanılarak MPFEM analizlerinde elde edilen bulgular verilmiştir.

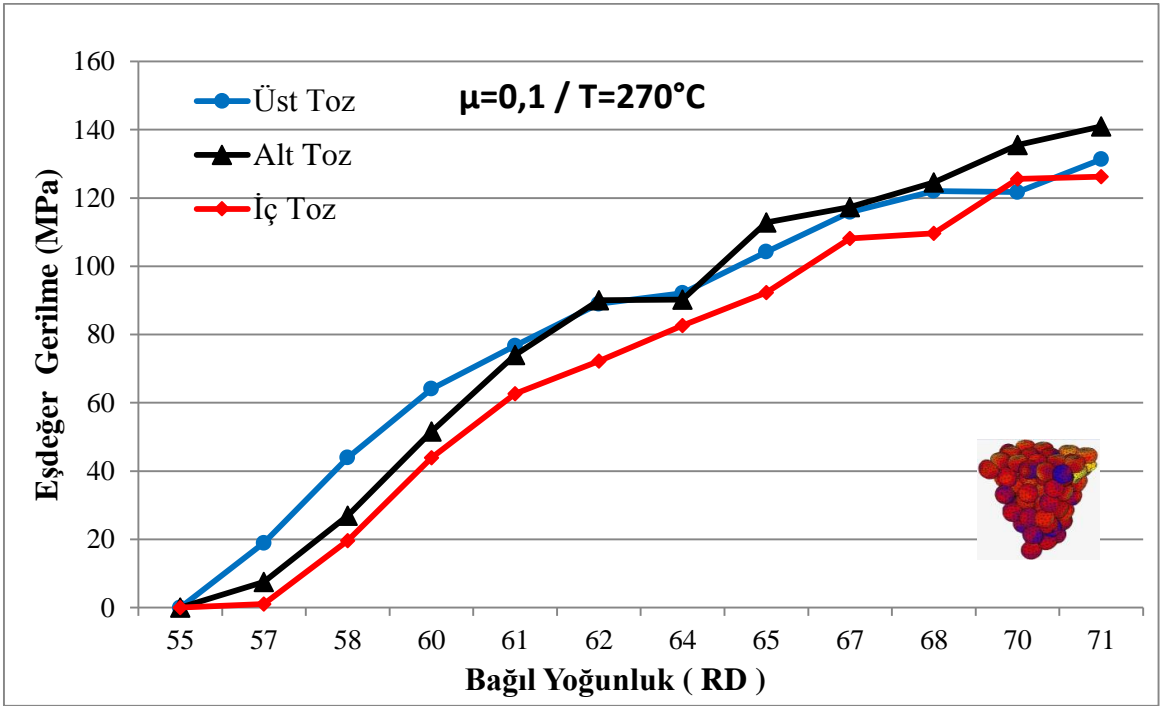
3.3.1. 270°C’de Coulomb Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular

$\mu=0,1$ sabit sürtünme katsayısı ile 270°C yapılan analizler 114024 saniye işlemci süresinde tamamlanmıştır ve eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 3.48’de verilmiştir. Bu süre oda sıcaklığındaki değerden yaklaşık %40 oranında daha düşüktür. Oda sıcaklığında 33 toza, şekil değişimine bağlı olarak yeniden ağ örgüsü oluşturulurken 270°C’de bu işlem 26 toza uygulanmıştır.



Şekil 3.48. 270°C ve $\mu=0,1$ için MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

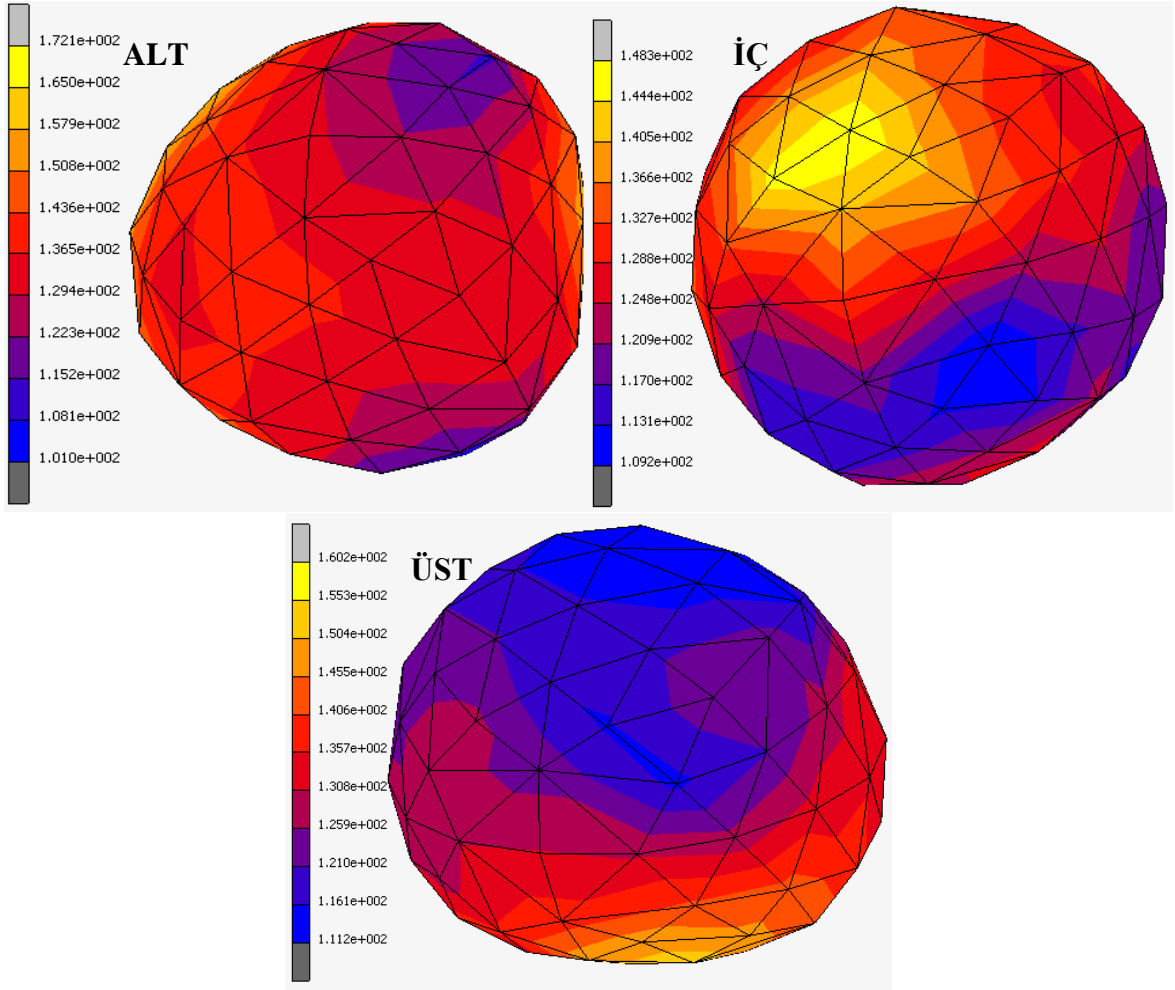
Eşdeğer birim şekil değiştirmenin 0,65 olduğu analizde minimum 50 MPa ve maksimum 266 MPa eşdeğer gerilme değeri elde edilmiştir. Minimum eşdeğer gerilme değerinden anlaşılacağı üzere kalıp içerisindeki bütün elemanların plastik deformasyona maruz kaldığı görülmüştür. Şekil 3.49'daki genel dağılıma bakıldığında neredeyse elemanların tamamında 90-180 MPa aralığında gerilmeler oluşmuştur. Zimbaya yakın ve temas bölgelerinde 135-180 MPa aralığında diğer bölgelerde ise 90-135 MPa aralığında gerilme dağılımları oluşmuştur.



Şekil 3.49. 270°C ve $\mu=0,1$ için MPFEM analizinden elde edilen referans tozların eşdeğer gerilme grafikleri

Şekil 3.49'da bağıl yoğunluğun %55 değerinden sonraki referans tozlara ait gerilme değerleri gösterilmiştir. Bağıl yoğunluk artışı ile gerilmeler parabolik bir eğilimde değişmektedir. Analiz başlangıcından analiz sonuna kadar tozlardaki gerilme artışı birbirlerine paralel bir eğilim içinde kalmışlardır. Üç tozda son adımda hesaplanan eşdeğer gerilme değeri 125-140 MPa arasında değişmiştir. 140 MPa eşdeğer gerilme zimbaya yakın olan alt toz üzerinde gerçekleşmiştir.

Tozlar üzerinde plastik deformasyona bağlı şekil değişimleri Şekil 3.50’de verilmiştir. Bu şekilde verilen gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarına bakıldığında ise, maksimum gerilme değerlerinin üst ve alt tozda kalıpla temas bölgelerinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. İç tozda ise yalnızca başka bir tozla temas noktasında 135 MPa üzerinde gerilme hesaplanmıştır.

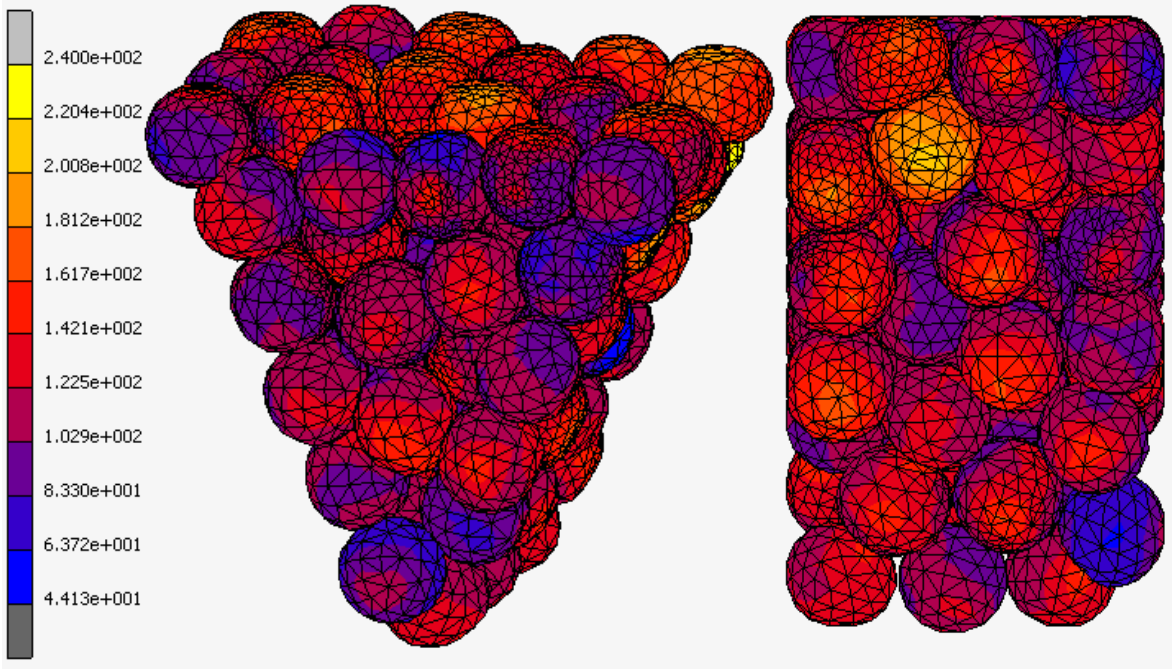


Şekil 3.50. 270°C ve $\mu=0,1$ için MPFEM analizinde referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

3.3.2. 270°C’de Wanheim/Bay Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular

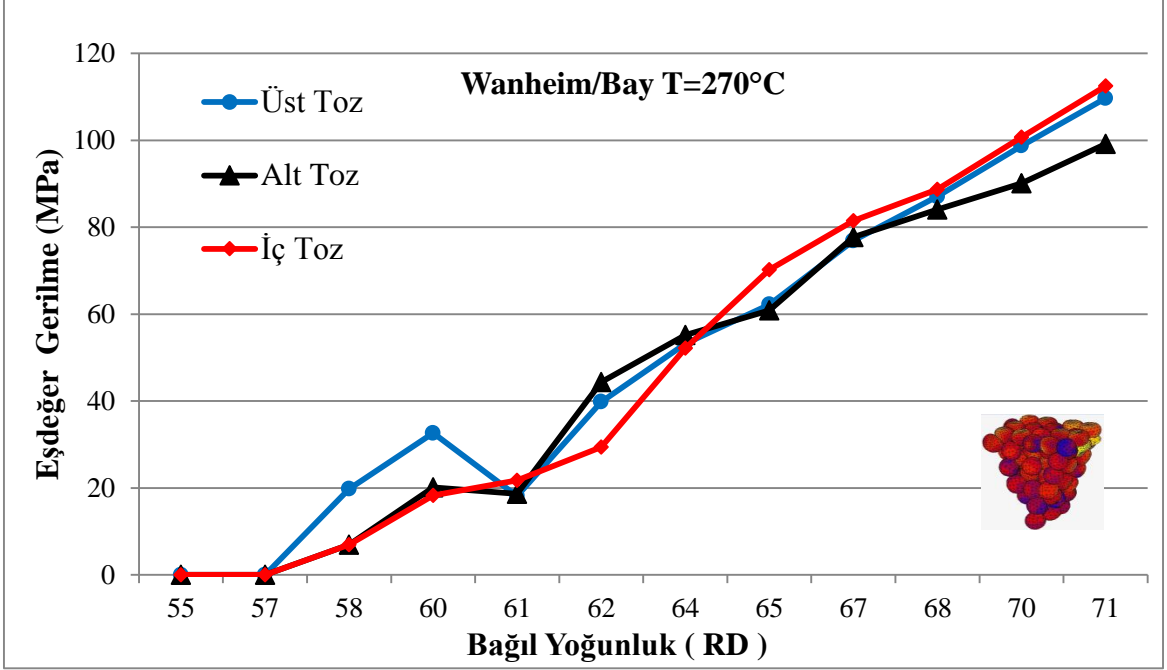
Wanheim/Bay sürtünme modelinin von Mises malzeme modeliyle yapılan 59770 saniye işlemci zamanlı MPFEM analizinde 250 MPa değerinde maksimum eşdeğer gerilme,

0,43 değerindeki eşdeğer birim şekil değiştirmeye karşılık meydana gelmiştir. Elemanlarda analiz sonunda homojen bir gerilme ve şekil değiştirme dağılımı görülürken gerilme değerleri 90-135 MPa arasında oluşmuştur (Şekil 3.51).



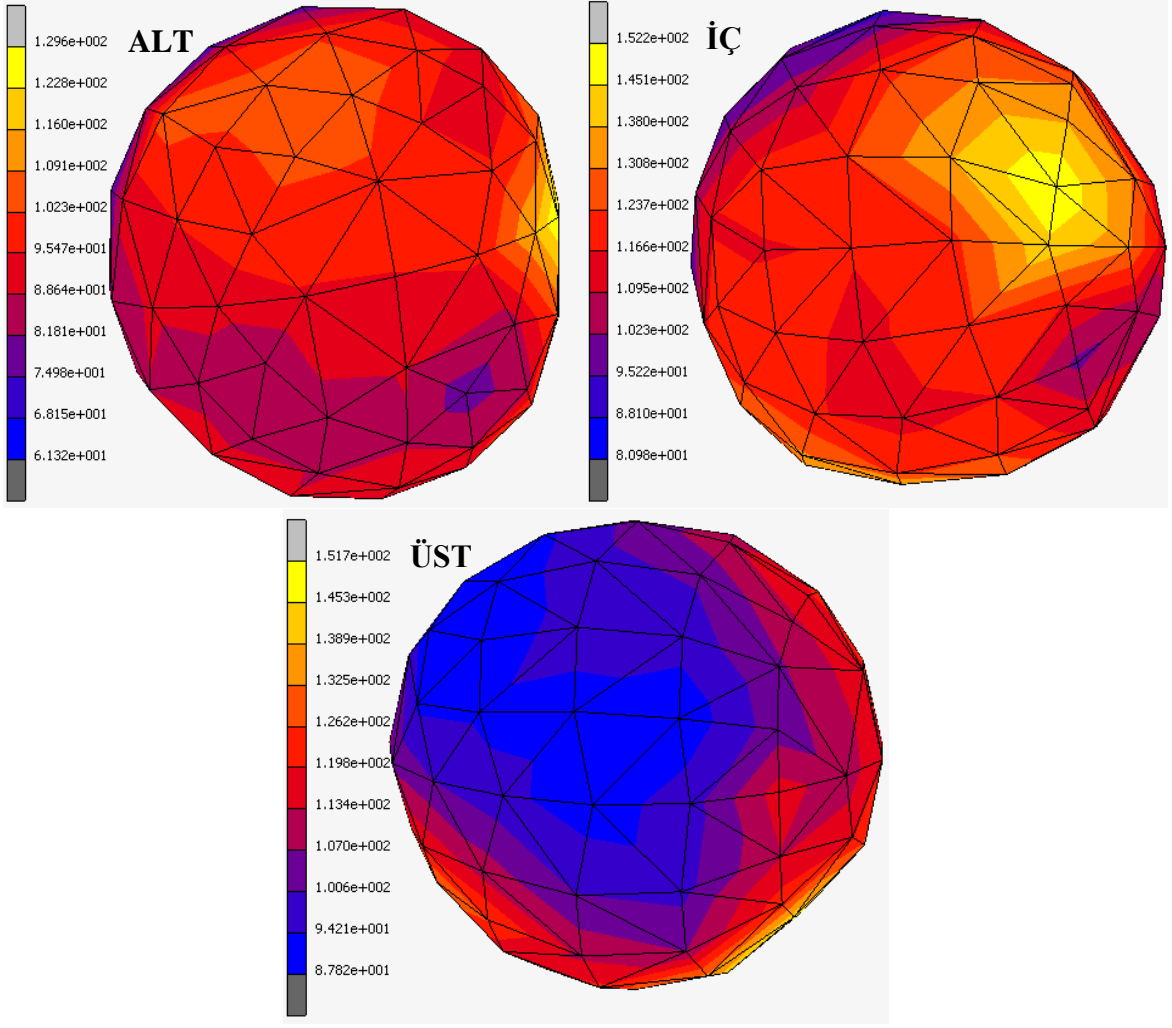
Şekil 3.51. 270°C ve Wanheim/Bay sürtünme modeli için MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 3.52 de verilmiş olan referans tozlara ait eşdeğer gerilme grafiklerinde görüldüğü üzere bağıl yoğunluğun bazı değerlerinde düzensiz artışlar olmasına rağmen değerler 100-110 MPa aralığında birbirlerine çok yakın bir şekilde sonuçlanmıştır. İlk defa olarak bu simülasyonda iç tozun eşdeğer gerilme değeri diğer iki tozdan fazla gerçekleşmiştir. Gerilme artışındaki düzensizlikler olarak bakıldığında yine iç tozda bu düzensizlikler diğer iki referans tozdan daha düşük düzeyde kalmıştır. Üst toza ait ortalama değer de iç toza çok yakın olmakla birlikte zimbaya yakın olan alt toz üzerinde yaklaşık 100 MPa değeri ile en düşük değer elde edilmiştir. Bağıl yoğunluğun bazı değerlerinde üç toz için oluşan değerler neredeyse çakışık olmasına rağmen alt toz gerilme grafiği bu bağıl yoğunluk değerinden sonra daha düşük eğimli bir yol izlemiştir. Eşdeğer gerilme değerlerinin bağıl yoğunluğun %57 değerinden sonra oluşması analiz esnasında yeniden yerleşme sürecinin uzun sürdüğünü göstermektedir.



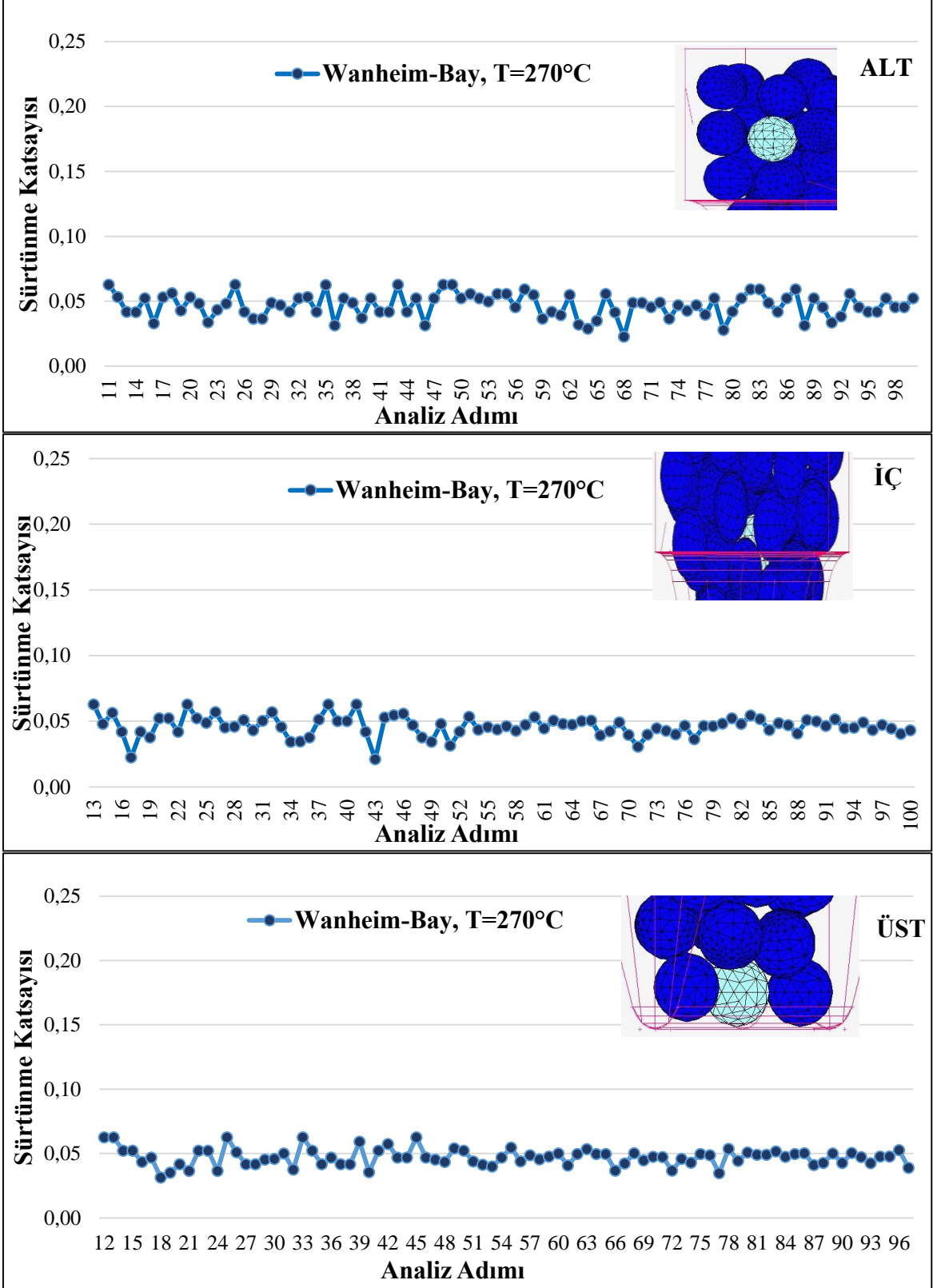
Şekil 3.52. 270°C ve Wanheim/Bay sürtünme modeli için MPFEM analizinden elde edilen referans tozların eşdeğer gerilme grafikleri

Referans tozlara ait şekil değişimi ve düğüm noktalarının gerilme grafikleri Şekil 3.53'te verilmiştir. Modelin yüzey elemanlarının neredeyse tamamı 90-135 MPa aralığında gerilemeye maruz kalmış olup ve hiçbir eleman 135 MPa eşdeğer gerilmenin üzerine çıkamamıştır. Eşdeğer gerilme değerlerindeki düzensiz artış eğilimi, düğüm noktalarının gerilme artışlarındaki dalgalanmalarda da karşımıza çıkmaktadır. Bazı düğüm noktalarına ait değerlerin düzensiz artışı, ortalama değer alınırken de ortaya çıkması düğüm noktalarının birçoğunda düzensiz artış eğilimi olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.53. 270°C ve Wanheim/Bay sürtünme modeli için MPFEM analizinde referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar

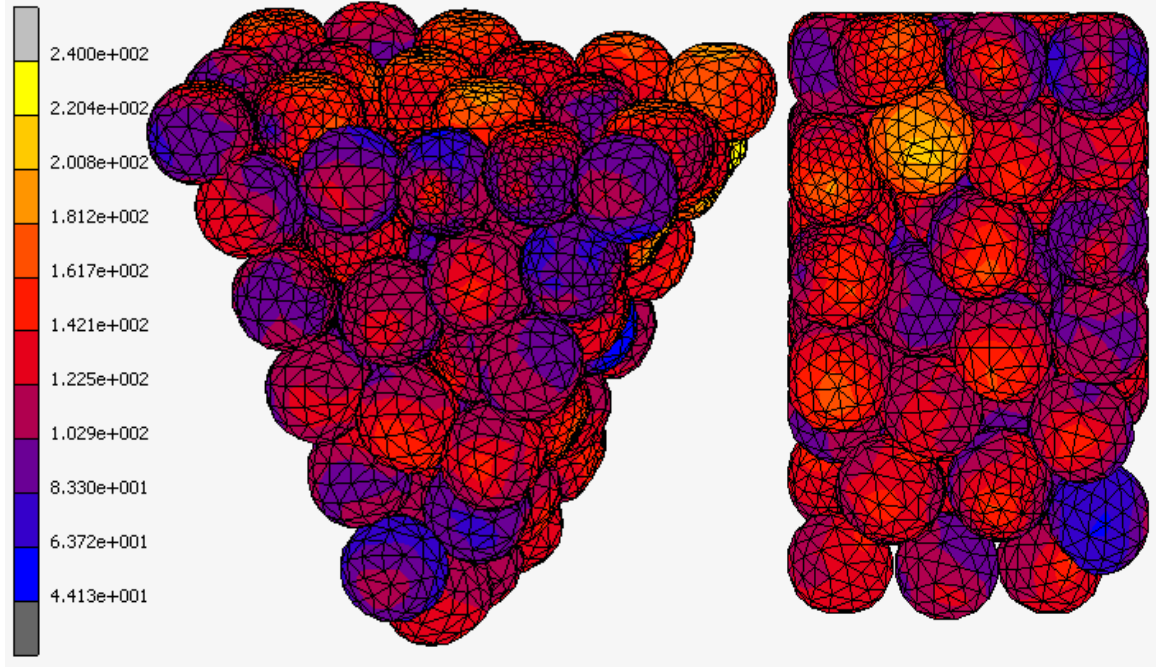
Wanheim/Bay sürtünme modeli kullanılarak referans tozlar için 270°C’de elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 3.54’te verilmiştir. Modelin genel davranışına uygun olarak analizin ilk adımlarında ve yeniden yerleşmenin tamamlandığı adımlarda sürtünme katsayısı 0,062 değerini almıştır. Yeniden yerleşme tamamlandıktan sonra sürtünme katsayısı analiz adımları boyunca dar bir aralıkta değişerek azalma eğilimi göstermiştir.



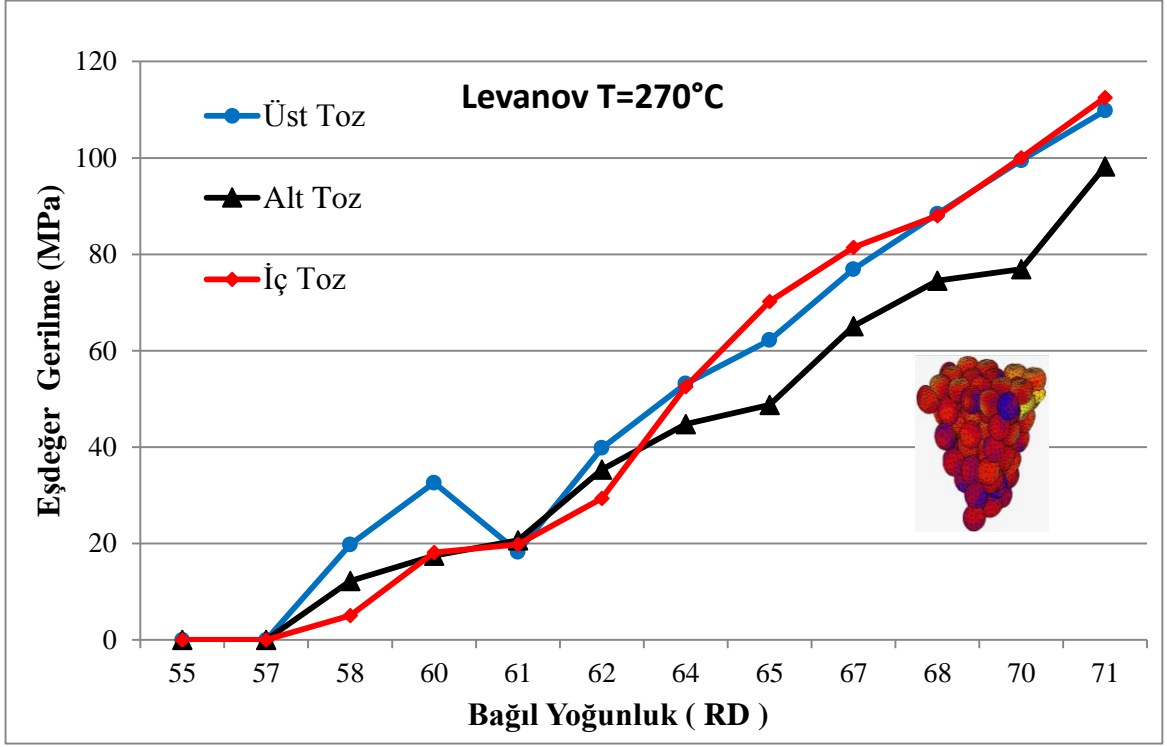
Şekil 3.54. Wanheim/Bay sürtünme modeli ve 270°C için MPFEM analizinde elde edilen referans tozlara ait sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimi

3.3.3.270°C’de Levanov Sürtünme Modelinden Elde Edilen Bulgular

59593 saniye işlemci süresinde tamamlanan Levanov sürtünme modelinin 270°C ısı analizinde 0,43 maksimum eşdeğer birim şekil değiştirmeye karşılık 240 MPa maksimum eşdeğer gerilme değeri hesaplanmıştır (Şekil 3.55). Wanheim/Bay modeliyle aynı şekil değişimi elde edilmesine karşılık 10 MPa daha düşük gerilme elde edilmiştir. Bu değer %4’lük bir farka karşılık gelmekte olup sürtünme gerilmesinin hesaplanma şeklinden kaynaklanmaktadır. Gerilme dağılımına bakıldığında, üst kısma yakın tozların temas bölgelerinde Wanheim/Bay modeline göre daha büyük gerilmelerin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.55. 270°C ve Levanov sürtünme modeli için MPFEM analizinde elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı



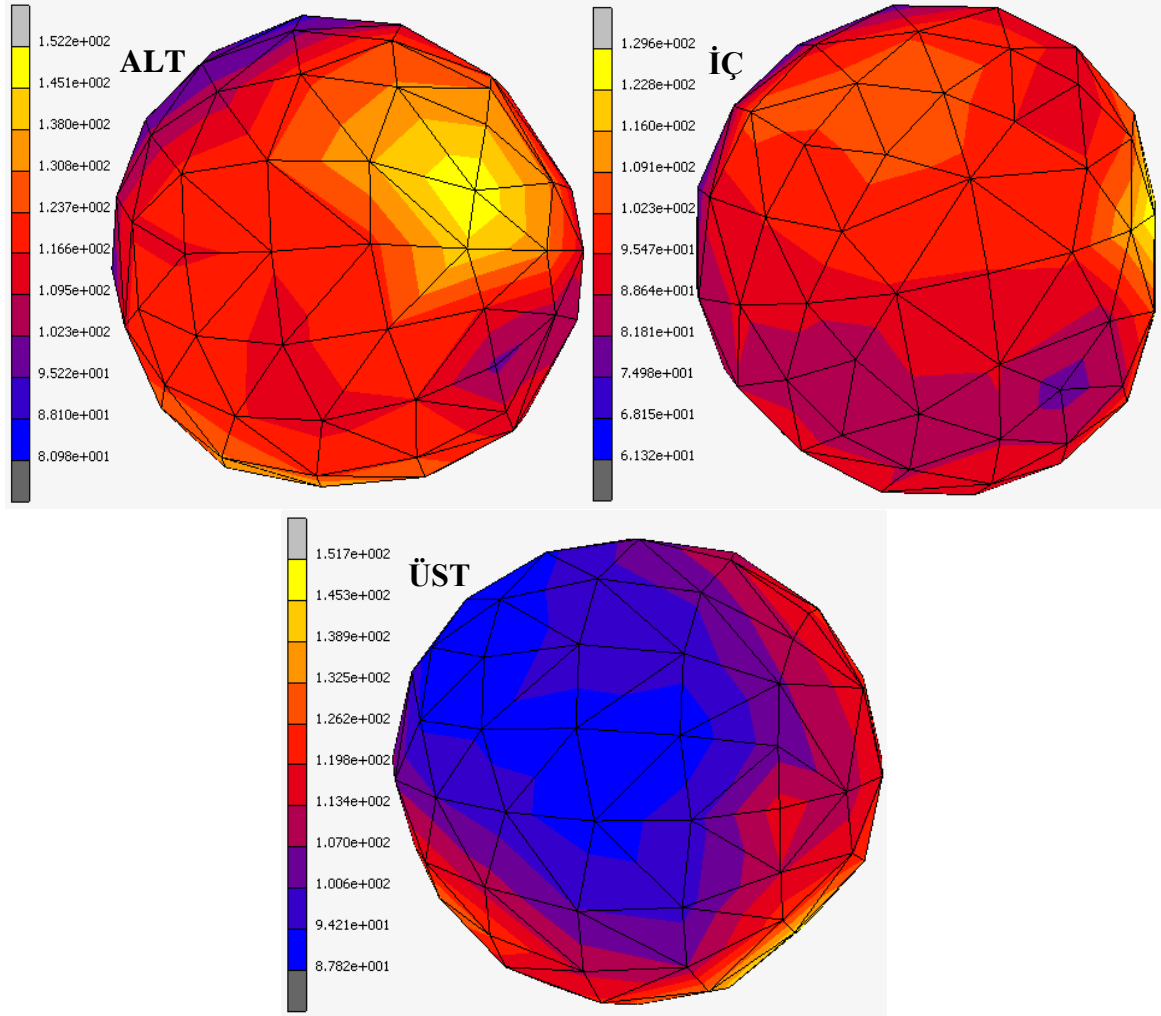
Şekil 3.56. 270°C ve Levanov sürtünme modeli için MPFEM analizinden elde edilen referans tozların eşdeğer gerilme grafikleri

Referans tozlardan elde edilen eşdeğer gerilme grafikleri Wanheim/Bay modeli ile paralellikler içermektedir. Tozlara etkiyen gerilme %57 bağıl yoğunluk değerinden başlamakta olup 95-100 MPa aralığındaki değerlere ulaşmışlardır. Bağıl yoğunluğun %61 değerinde üç toz aynı gerilmeye ve bağıl yoğunluğun %68-71 aralığında üst ve iç toz aynı gerilmelere maruz kalmış olsalar dahi eşdeğer gerilme artışları düzensiz bir eğilim içerisinde.

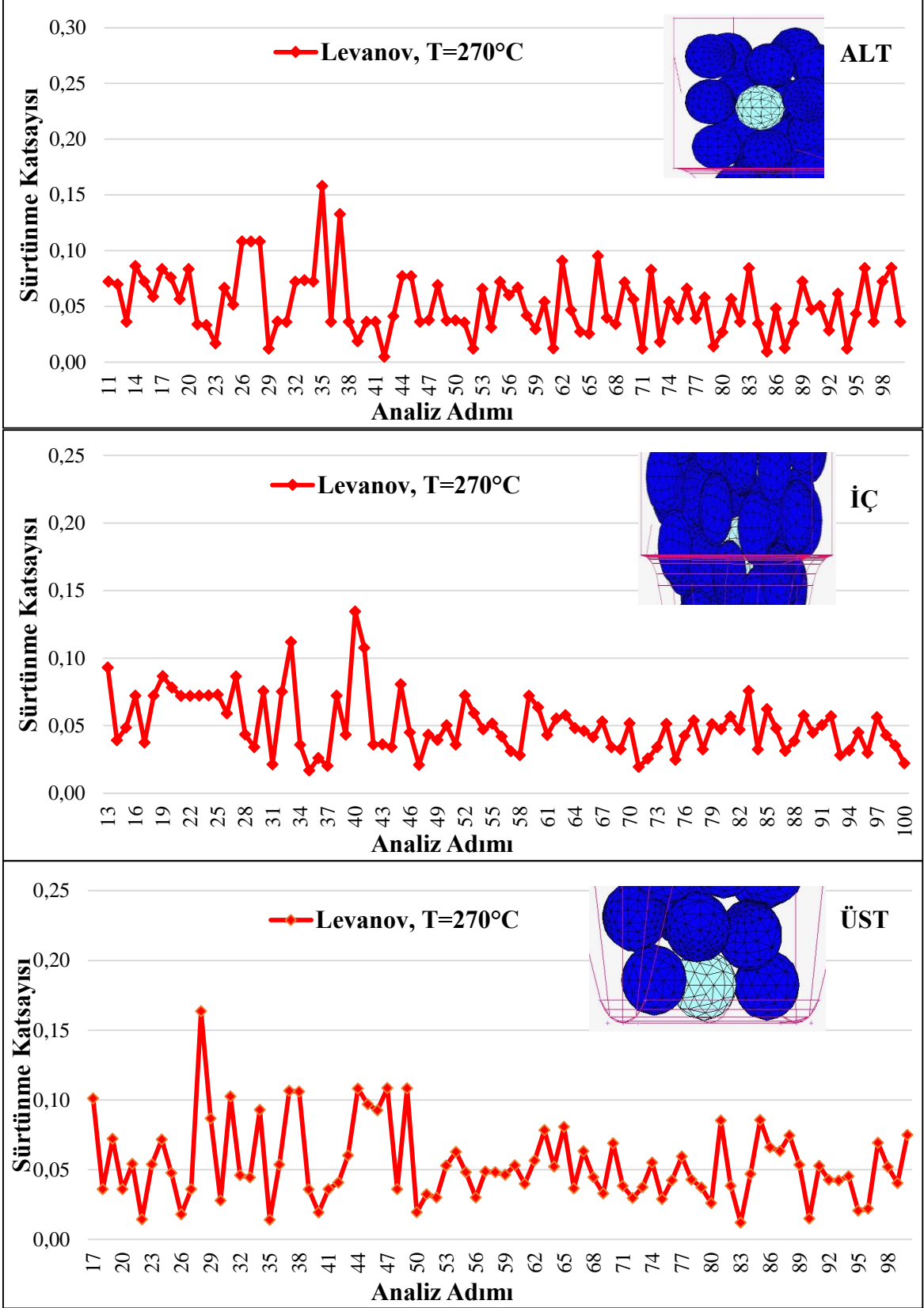
Şekil 3.57 ve Şekil 3.53 'deki gerilme dağılımları ve deformasyonlar karşılaştırıldığında Levanov ve Wanheim/Bay modellerinin benzer plastik deformasyonları ortaya koyduğu görülmüştür. Düğüm noktalarına ait gerilme grafiklerinin değişim eğilimleri de birbirlerine paraleldir.

Analizlerdeki yakınsama hassasiyeti açısından, bu analiz içerisinde 15 adet toz üzerinde yeniden ağ örgüsü oluşturma işlemiyle 676 adet eleman artırılarak toplam tetrahedral eleman sayısı 60732'ye çıkarılmıştır. Levanov sürtünme modeli kullanılarak yapılan ısıl analizler neticesinde oluşan sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3.58'de verilmiştir. Sürtünme katsayısının maksimumları genelde bağıl yoğunluğun %50 ile %55 değerleri arasında ortaya çıkmıştır. %55 bağıl yoğunluk değeri yeniden yerleşme sürecinin

tamamlandığı değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Modelin yapısı gereği sürtünme katsayısında oluşan azalma eğilimi yalnızca diğer tozlarla temas halinde bulunan iç toz üzerinde açıkça görülmektedir.



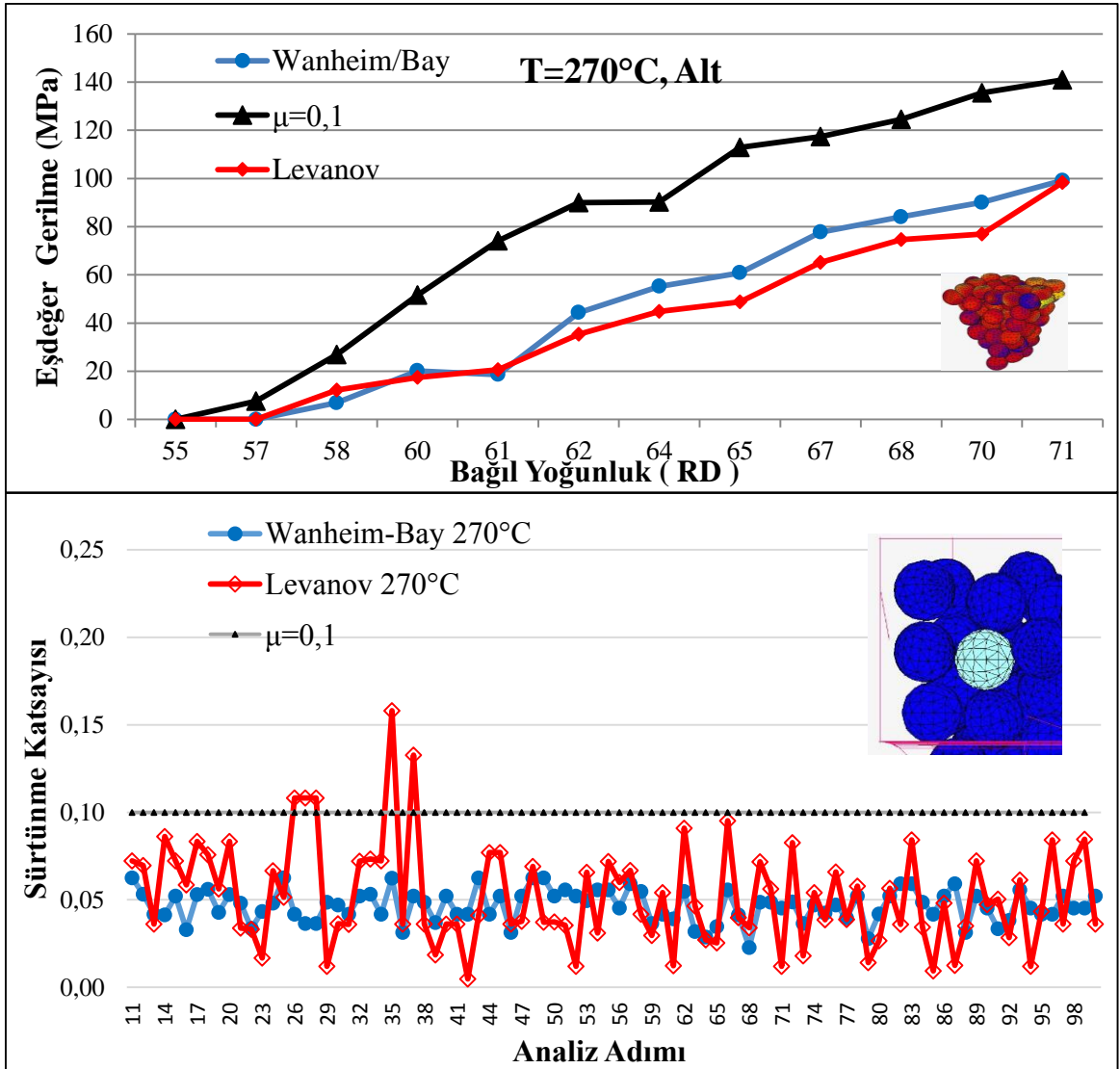
Şekil 3.57. 270°C ve Levanoz sürtünme modeli için MPFEM analizinde referans tozlarda elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonlar



Şekil 3.58. Levanov sürtünme modeli ve 270°C için MPFEM analizinde elde edilen referans tozlara ait sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimi

3.3.4. 270°C’de Sürtünme Modellerinin Karşılaştırılması

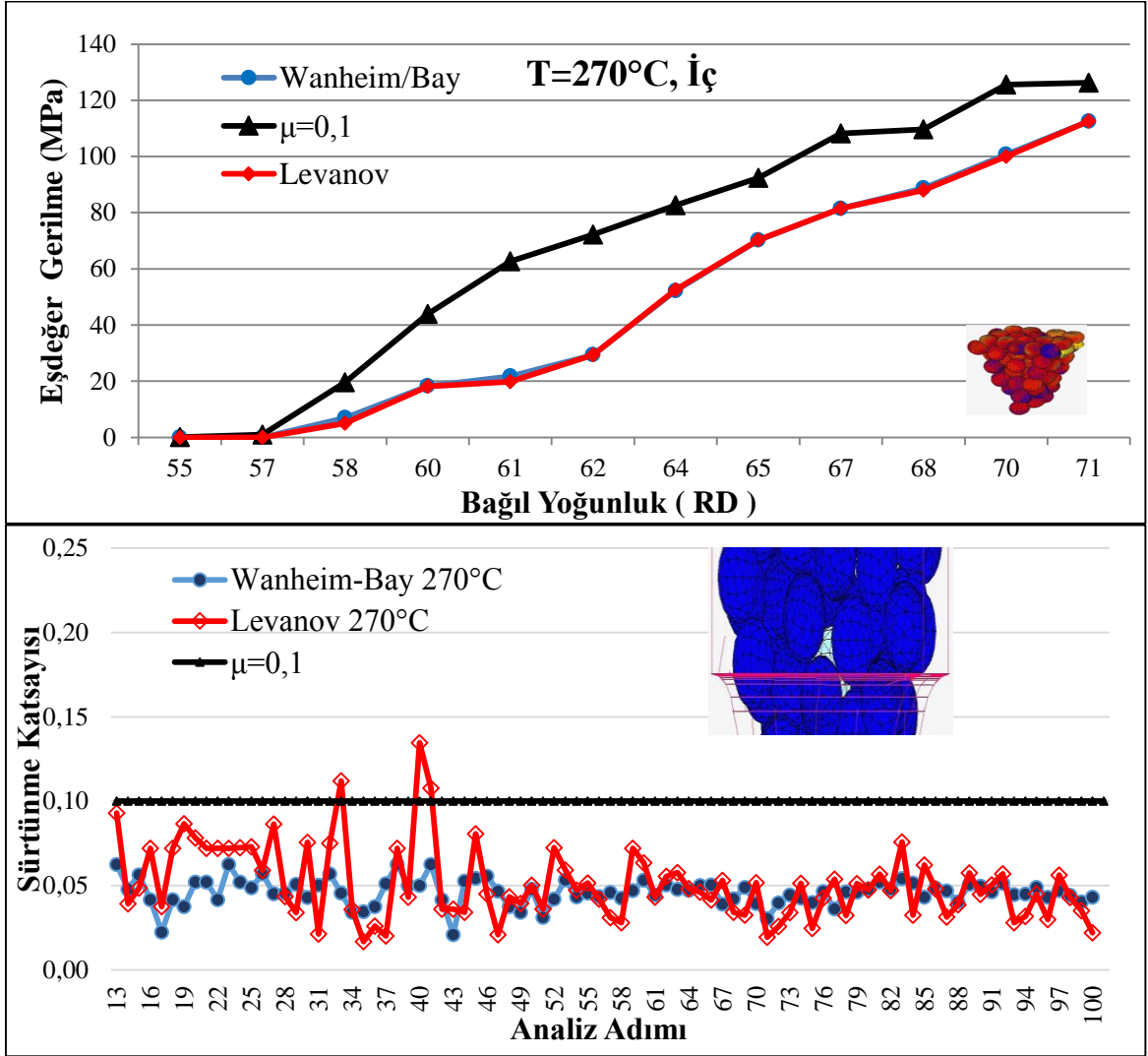
Bu bölümde ısıl analizlerden elde edilen gerilme değerleri ve sürtünme katsayıları önce referans tozlar üzerinden ardından da referans tozların sıcaklıkla değişimleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Grafiklerde, $\mu=0,1$ sabit sürtünme katsayısında Coulomb, Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modelleri bir arada sunulmuştur.



Şekil 3.59. Alt referans tozu üzerinde ısıl analizlerden elde edilen eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluğa ve sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimleri

Sırasıyla, alt, iç ve üst toza ait gerilme grafiklerinin verildiği Şekil 3.59, Şekil 3.60, Şekil 3.61’de sabit sürtünme katsayısı değerlerinin diğer modellerden yüksek olduğu

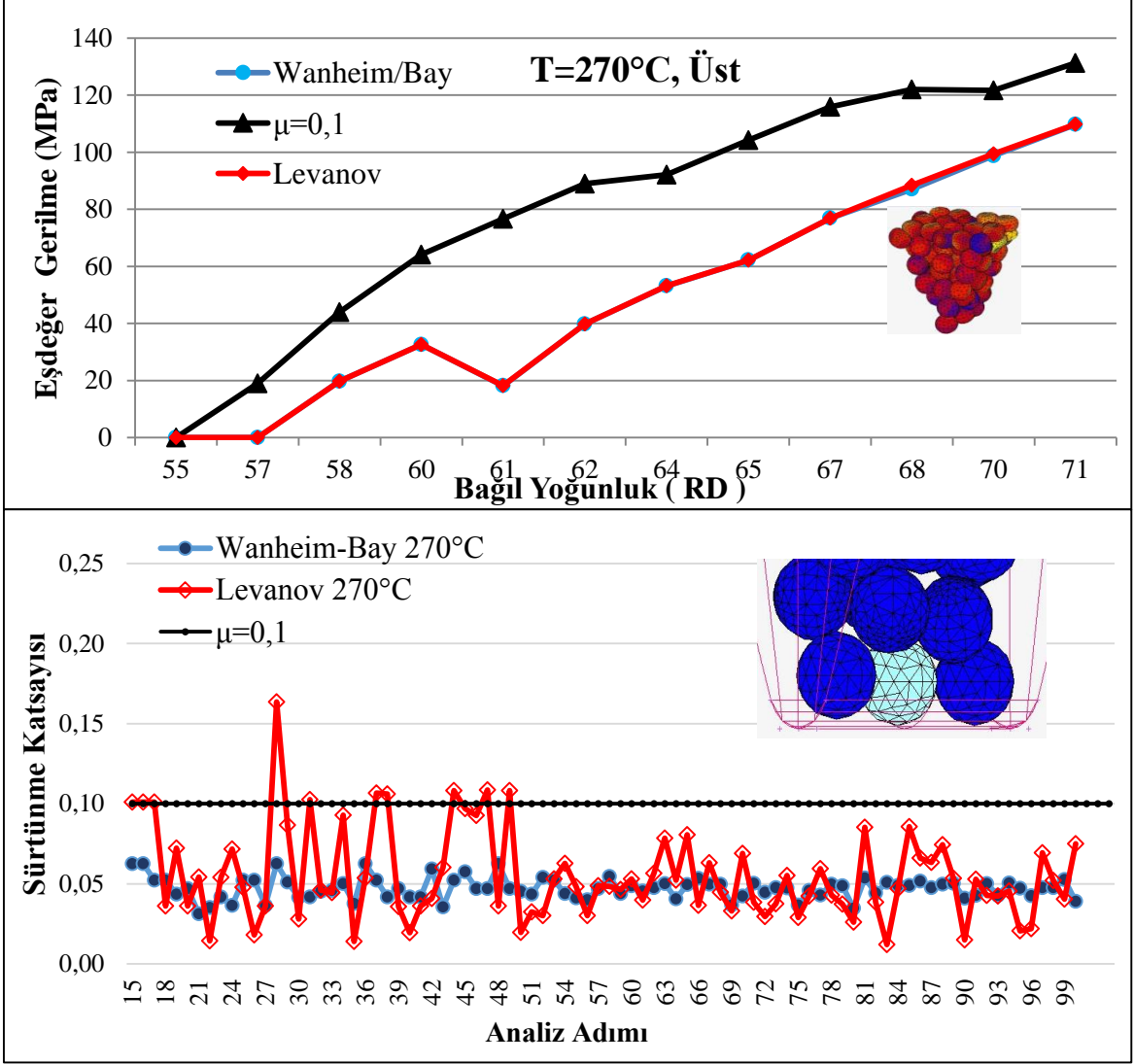
görülmüştür. $\mu=0,1$ sabit sürtünme katsayısında 125-140 MPa düzeyinde gerilmeler elde edilirken Wanheim/Bay ve Levanov modellerinde ise gerilmeler 100-110 MPa civarında kalmıştır. Bu gerilme değerleri de bağıl yoğunluğun %55-57 düzeylerinde hesaplanmaya başlamıştır.



Şekil 3.60. İç referans tozu üzerinde ısıl analizlerden elde edilen eşdeğer gerilmenin bağıl yoğunluğa ve sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimleri

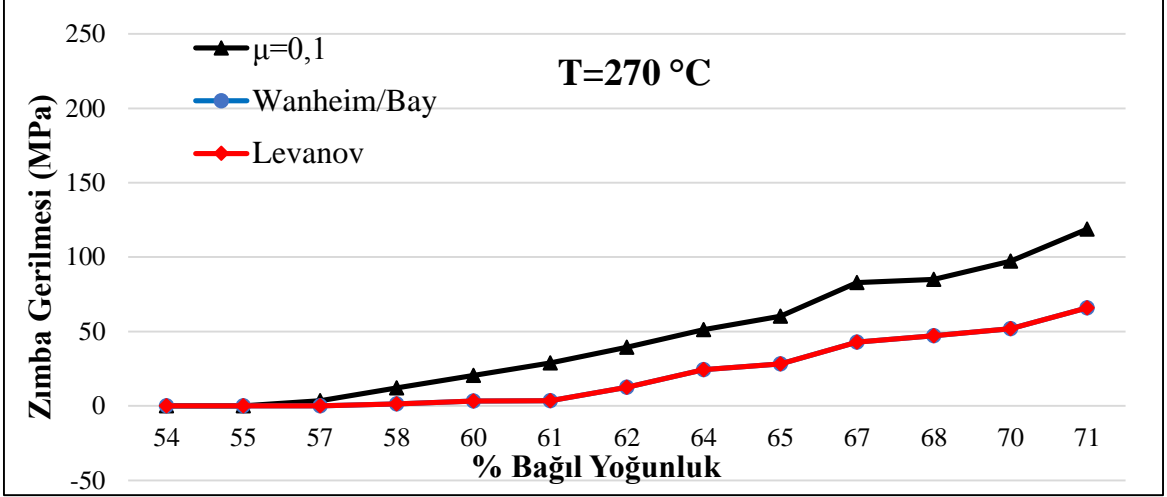
Yeniden yerleşmenin tamamlanmasının ardından gerilmelerin oluştuğu analiz adımlarından sonra gerilmeler doğrusal bir artış eğilimi içerisine girmişlerdir. Zımbaya yakın olan alt toz üzerinde oluşan eşdeğer gerilme değerlerinde model bazında farklılıklar

olsa da iç ve alt toz üzerinde Wanheim/Bay ve Levanov modelleri çakışık eğriler ile gerilmeyi ifade etmişlerdir.



Şekil 3.61. Üst referans tozu üzerinde ısıl analizlerden elde edilen eşdeğer gerilmenin bağlı yoğunluğa ve sürtünme katsayısının analiz adımına göre değişimleri

$\mu=0,1$ sabit sürtünme katsayısında elde edilen ortalama gerilmeler ile diğer modellerden elde edilen gerilmeler arasındaki ilişki, elde edilen sürtünme katsayılarıyla da desteklenmektedir. Wanheim/Bay ve Levanov modellerinden elde edilen sürtünme katsayıları değişkenlik göstermelerine rağmen 0,1 değerinin altında kalarak düşük sürtünme katsayısından düşük gerilme değerleri elde edilmiştir.

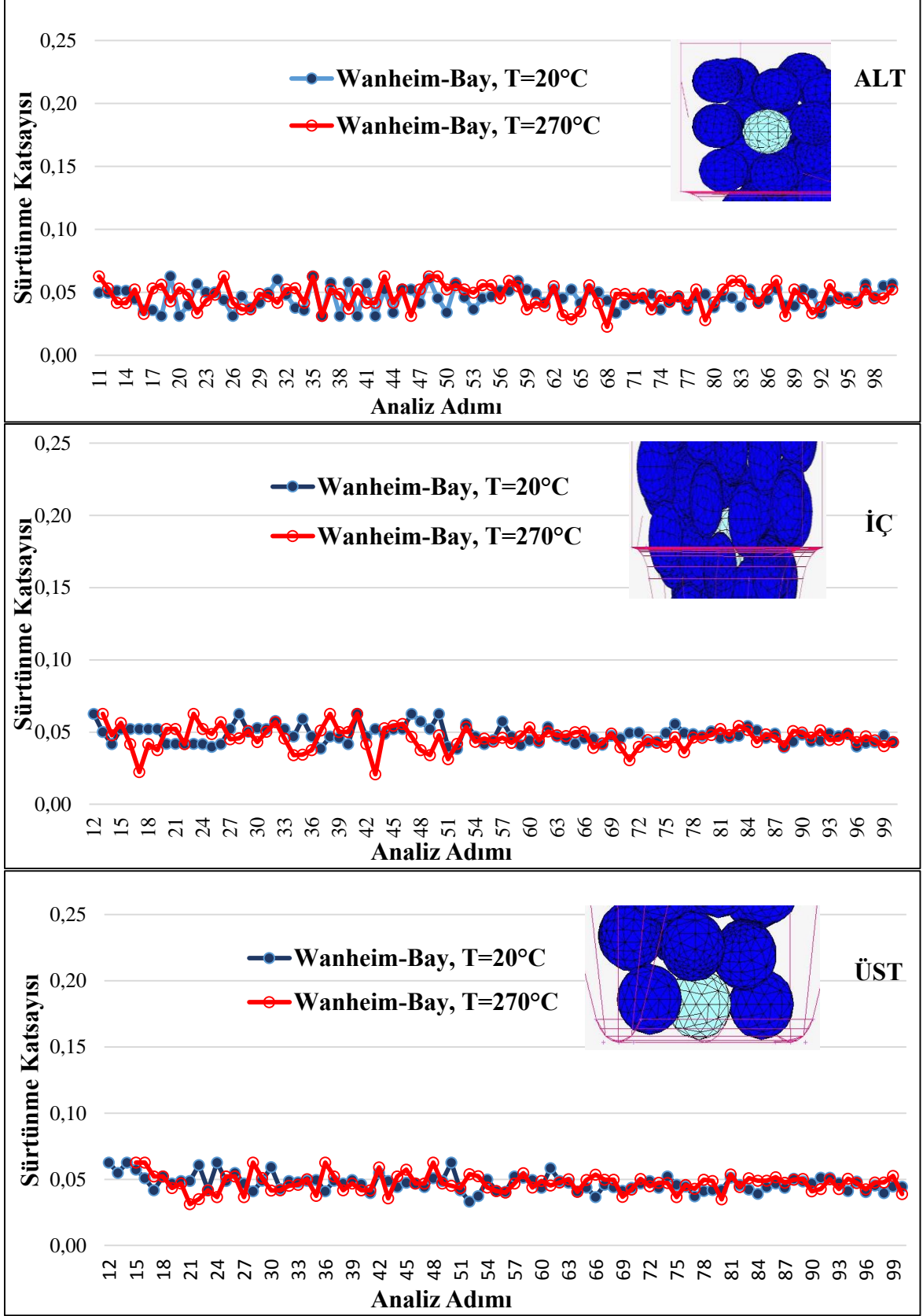


Şekil 3.62. 270°C’de yapılan analizlerde zımbada oluşan gerilmeler

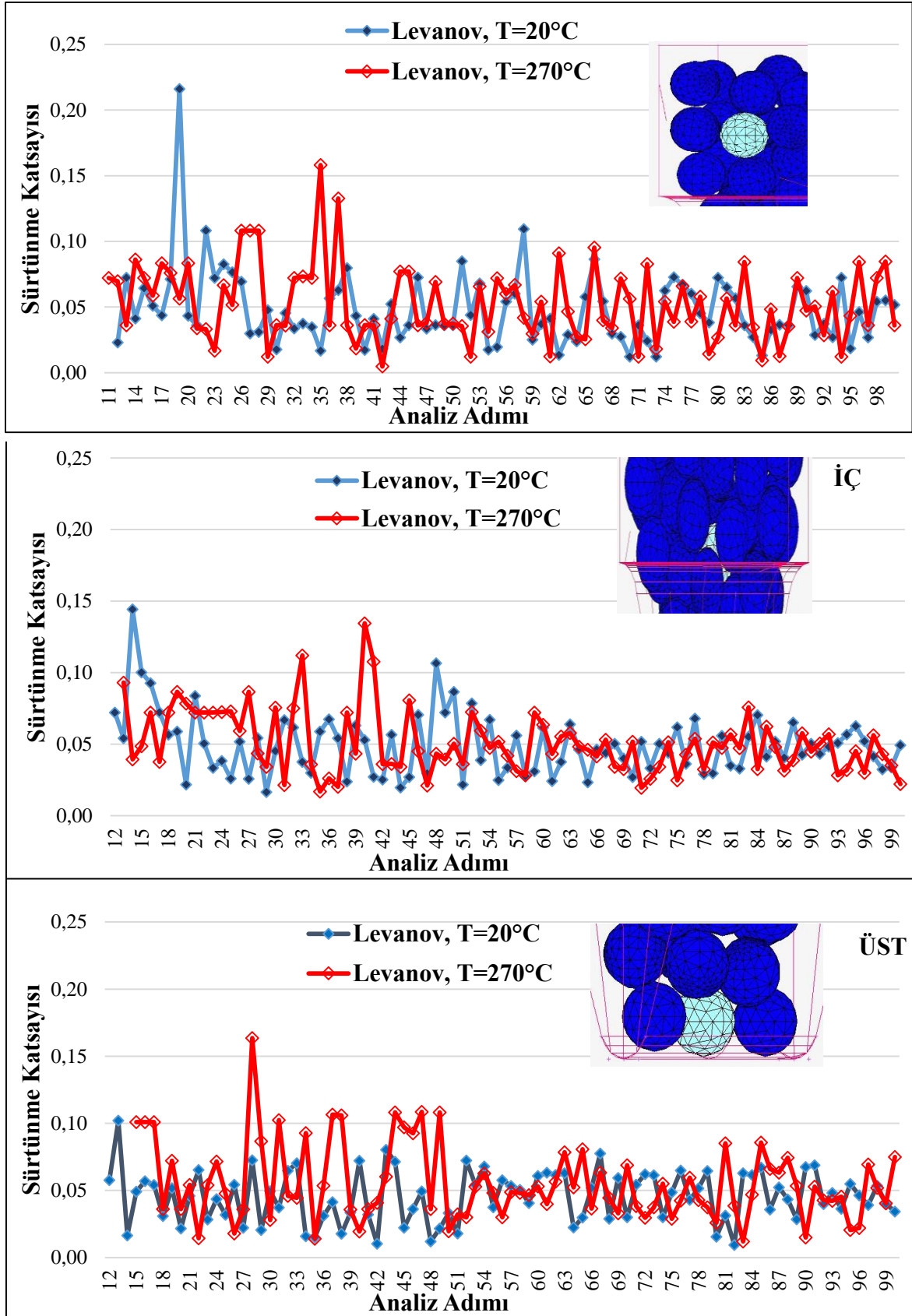
270°C’de elde edilen analiz sonuçlarında zımbaya gelen gerilmenin sabit sürtünme katsayısı için 120 MPa düzeyinde diğer modeller içinse 65 MPa değerinde olduğu görülmüştür (Şekil 3.62). 120 MPa gerilme değeri $\mu=0,1$ sabit sürtünme katsayısında tozlara etkiyen gerilmeye çok yakın olmasına rağmen Wanheim/Bay ve Levanov modellerinde elde edilen 65 MPa gerilme değeri tozlara etkiyen yaklaşık 100 MPa gerilme değerinden büyük oranda farklılık göstermektedir.

Temas alanı oranının fonksiyonu olan sürtünme modelleri ısıl analizler boyunca gösterdikleri paralelliği, zımbaya etkiyen gerilme grafiklerinin üst üste çakışması ile devam ettirmişlerdir.

Şekil 3.63 ve Şekil 3.64 Wanheim/Bay ve Levanov modellerinin oda sıcaklığındaki ve 270°C’deki analizlerinden elde edilen sürtünme katsayılarının grafiklerini göstermektedir. Wanheim/Bay modelinin her üç referans toz için farklı sıcaklık değerleri için yaklaşık aynı sonuçları verdiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Tozun konumuna göre maksimum sürtünme katsayısının elde edildiği değer birkaç analiz adım farklılaşmış olsa da başlangıç değeri, yeniden yerleşme sürecinde tekrar maksimum değere ulaşması ve aynı azalma eğiliminde olmaları açısından tozlar paralel davranışlar sergilemiştir. Wanheim/Bay sürtünme modelin de alt tozdan son adımda elde edilen sürtünme katsayısı 0,05, iç ve üst tozdan elde edilen sürtünme katsayısı değeri de 0,04 düzeyindedir.



Şekil 3.63. Wanheim/Bay sürtünme modeli için oda sıcaklığında ve 270 °C’de elde edilen sürtünme katsayısı değişim grafikleri



Şekil 3.64. Levanov sürtünme modeli için oda sıcaklığında ve 270 °C’de elde edilen sürtünme katsayısı değişim grafikleri

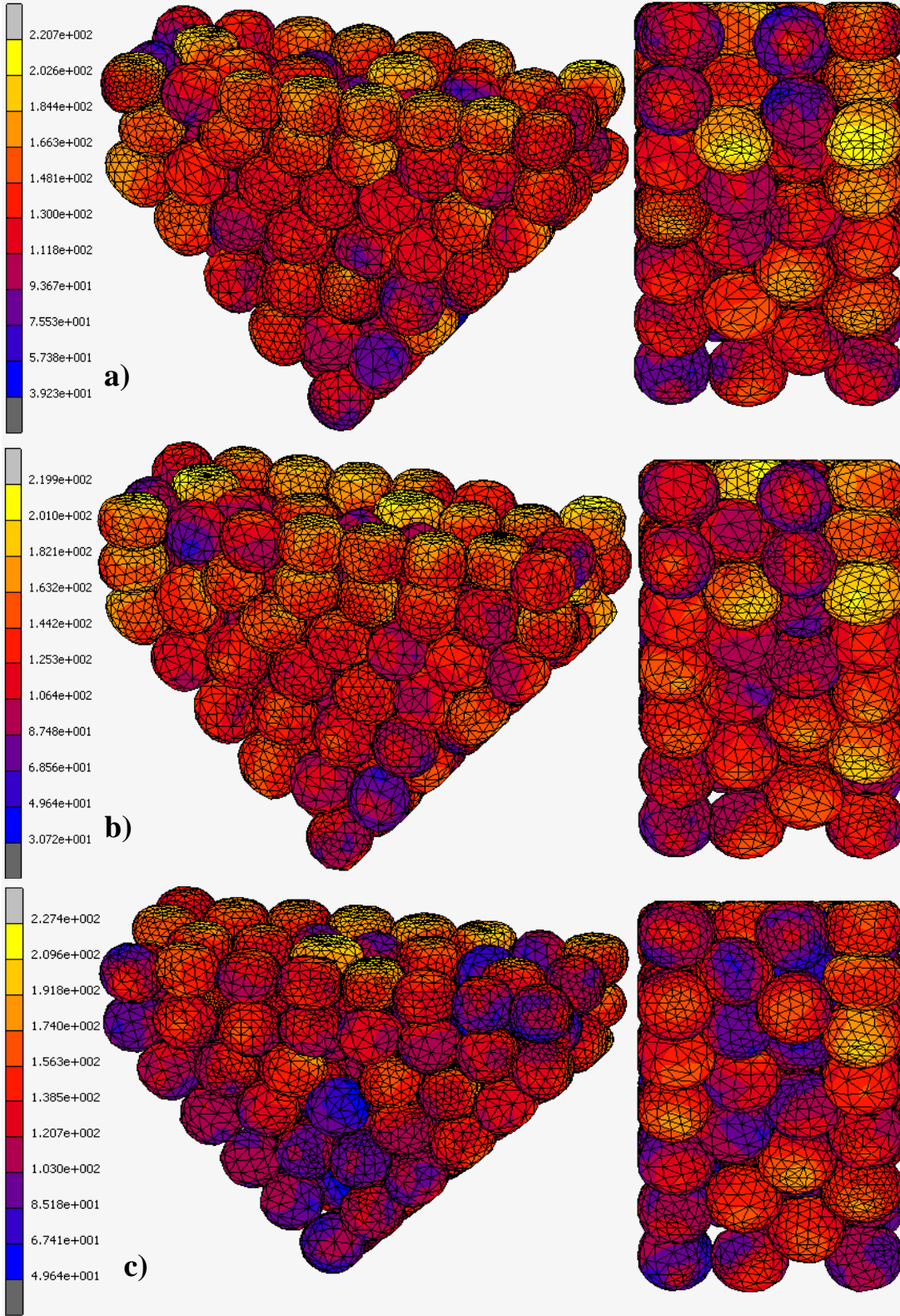
Levanov modelinde oda sıcaklığında maksimum değerlerin elde edilmesi, 270°C'ye göre daha önceki analiz adımlarında gerçekleşmiştir. Analizlerde bazı bağıl yoğunluk değerlerinde değerlendirme analizi olan 0,1 sabit sürtünme katsayısının üzerinde sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Referans tozlar üzerinde analiz sonucunda oda sıcaklığında elde edilen sürtünme katsayıları 0,05, 270°C'de 0,036 olarak elde edilmiştir.

3.4. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

3.4.1. Deney Kalıbı Modeliyle Yapılan Sayısal Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

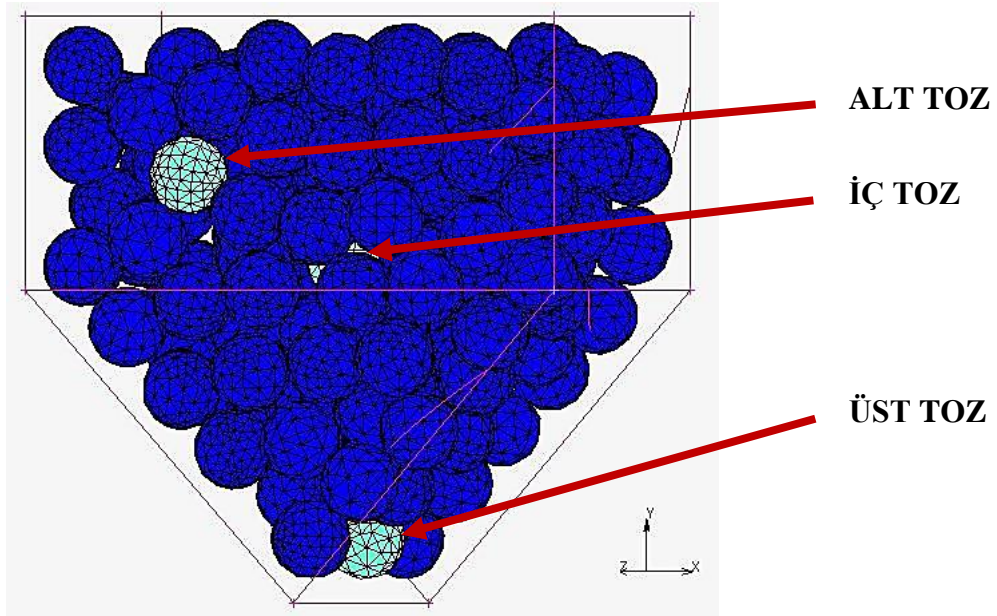
Sayısal analizlerin oda sıcaklığında yapılmış olmasına karşın tozların bağlanmama problemi sebebiyle, deneyler yalnızca 270°C'de yapılmıştır. Tez çalışmasının bu kısmında, $\mu=0.1$ sabit sürtünme katsayısında, Wanheim/Bay ve Levanov sürtünme modelleri için yeni kalıp ile yapılan sayısal analizlere ait bulgular verilmiştir. 270°C analizlerinde kullanılan von Mises malzeme parametreleri bu analizler için de kullanılmıştır.

Şekil 3.65 te modellere ait eşdeğer gerilme dağılımları verilmiştir. $\mu =0,1$ sabit sürtünme katsayısı ile yapılan analiz yaklaşık 43 saatte tamamlanmıştır. Bu analiz esnasında kalıp içerisindeki 130 elastik-plastik tozdan 29 tanesi yeniden ağ örgüsü oluşturma işlemine tabi tutulmuştur. Bu esnada eleman sayısı 7248 artarak 100084 sayısına ulaşmıştır. Maksimum eşdeğer gerilme değeri ise 221 MPa olarak elde edilmiştir. İkinci olarak Wanheim/Bay sürtünme modelinde yaklaşık 60 saatte tamamlanan analiz sonucunda 220 MPa maksimum eşdeğer gerilme hesaplanmıştır. 24 toz tanesi üzerinde yapılan yeniden ağ örgüsü işlemiyle 2430 tetrahedral eleman sayısı artışı oluşmuştur. Son olarak, Levanov sürtünme modeli ile yapılan analizde ise, 29 toz tanesi üzerinde oluşan yeniden ağ örgüsü eleman sayısında artışa neden olmamıştır. Levanov modeliyle 55 saat süren analiz sonucunda maksimum eşdeğer gerilme 227 MPa olarak elde edilmiştir.



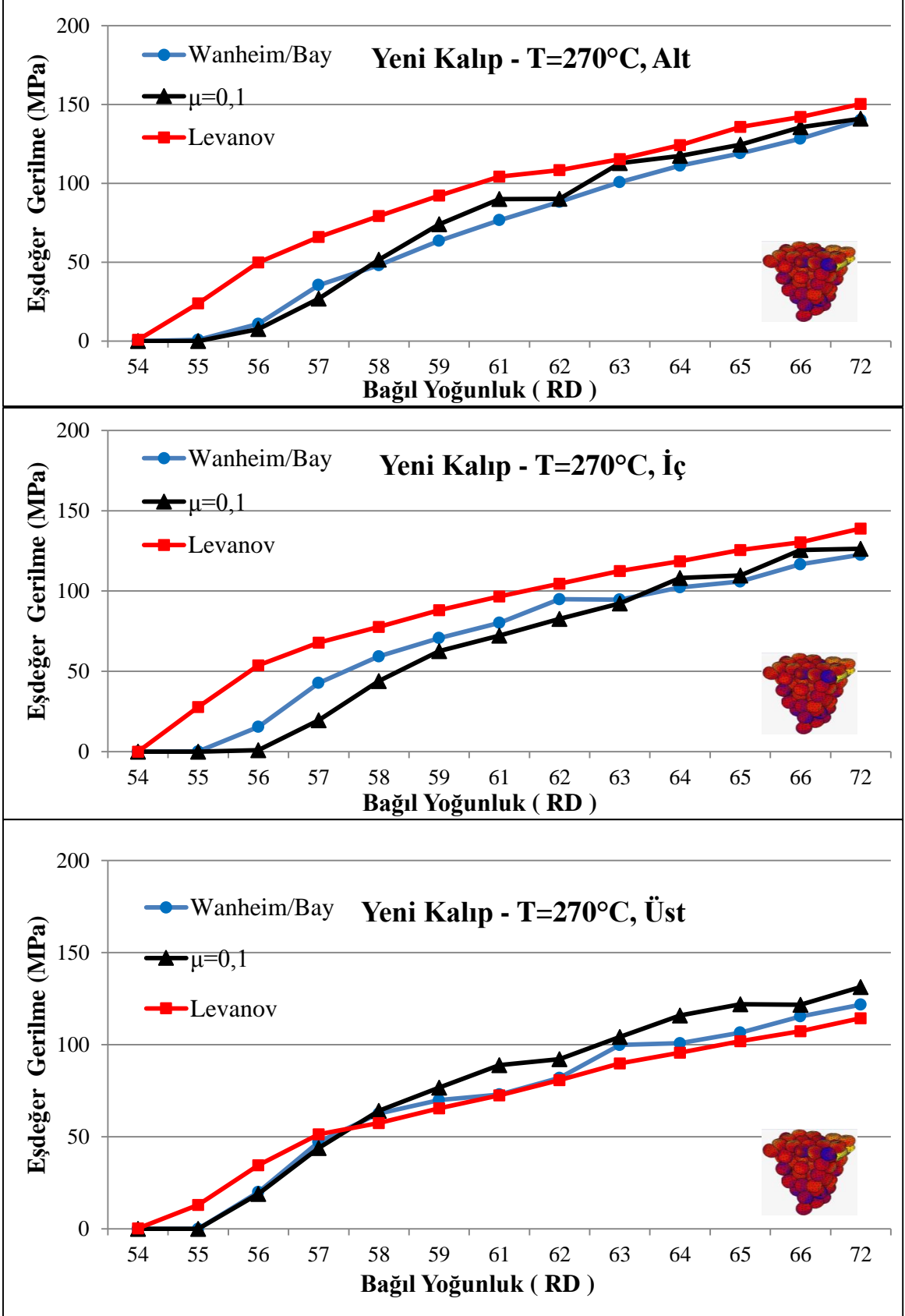
Şekil 3.65. Yeni kalıp modelin MPFEM analizinde a) $\mu=0,1$ b) Wanheim/Bay ($f=0,3$) ve c) Levanov ($f=0,3$) sürtünme modelleri için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımları

Şekil 3.66 da gösterilen alt, iç ve üst referans tozlarının konumları, kullanılan ilk MPFEM modeldeki referans tozlara eşdeğer konumda olacak şekilde seçilmiştir. Tekrar hatırlanırsa; alt toz kalıpla ve diğer tozlarla temas halinde zimbaya yakın bir konumdan, üst toz kalıpla ve diğer tozlarla temas halinde zimbadan en fazla uzaklıktaki bir konumdan ve iç toz yalnızca diğer tozlarla temasta olacak bir konumdan seçilmiştir. Seçilen bu tozları oluşturan 201,115 ve 215 adet düğüm noktasından elde edilen eşdeğer gerilme değerlerinin ortalamalarından oluşturulan grafikler Şekil 3.67’de verilmiştir.



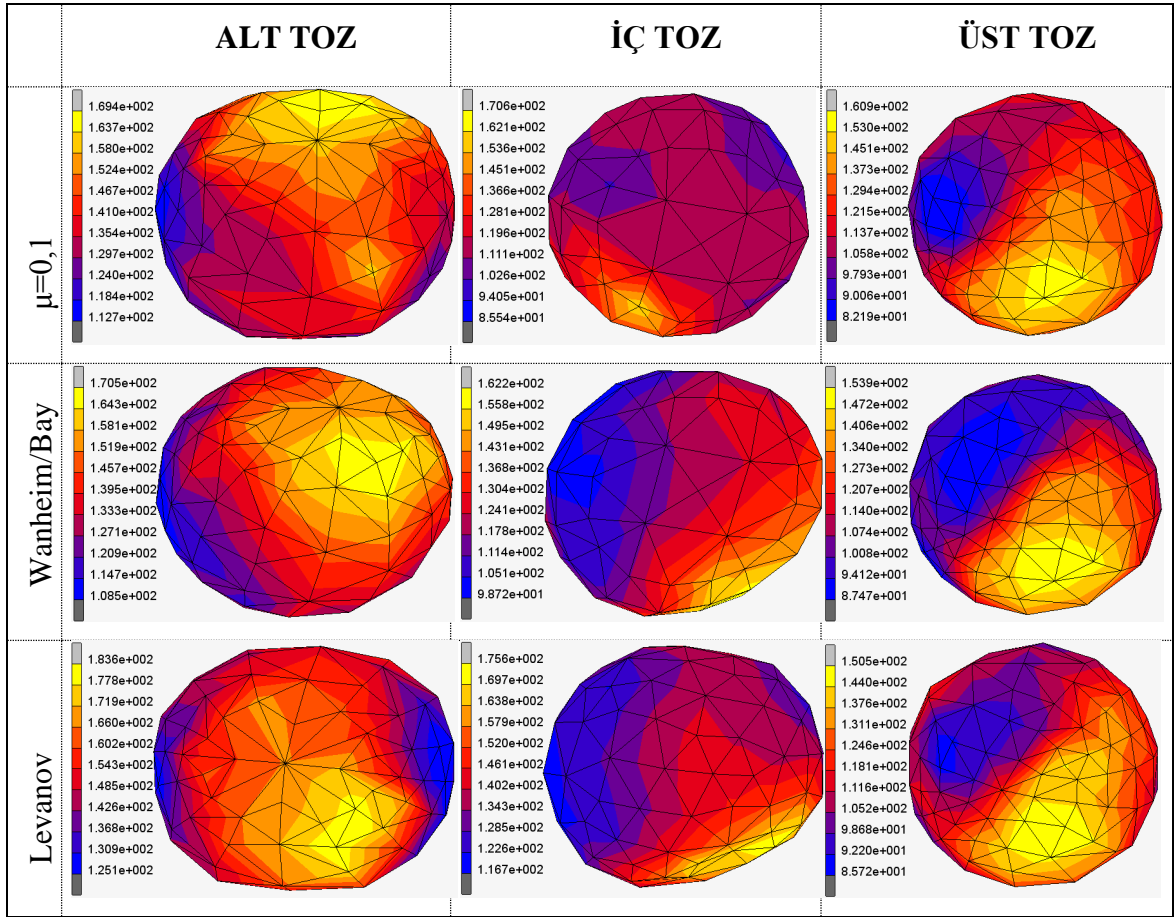
Şekil 3.66. Yeni kalıp MPFEM modelinde seçilen referans tozlar

Şekil 3.67 de bağıl yoğunluğun değişimine göre verilen eşdeğer gerilme grafikleri incelendiğinde, $\mu=0,1$ analizlerinin diğer iki sürtünme modelinden daha yüksek eşdeğer gerilme değerleri ile sonuçlandığı görülmektedir. Levanov ve Wanheim/Bay modelleri %72 bağıl yoğunluk değerine ulaşılan kadar birbirlerine paralel sonuçlar ortaya koymuşlardır. Levanov sürtünme modeliyle yapılan analizlerde, gerilme değerleri bağıl yoğunluğun %54 değerinde elde edilmeye başlanırken diğer iki sürtünme modelinde gerilme değerleri bağıl yoğunluğun %55 değerinde ortaya çıkmaya başlamıştır. Gerilme artış eğilimleri, bu tez çalışmasının ilk MPFEM sonuçlarıyla kıyaslandığında daha düzgün bir artış içerisinde olduğu görülmüştür. Yeni kalıp modelin geometrik düzensizliği ilk kalıptan daha az olduğundan gerilme artış eğilimlerinin de daha düzenli olduğu sonucuna varılmıştır.



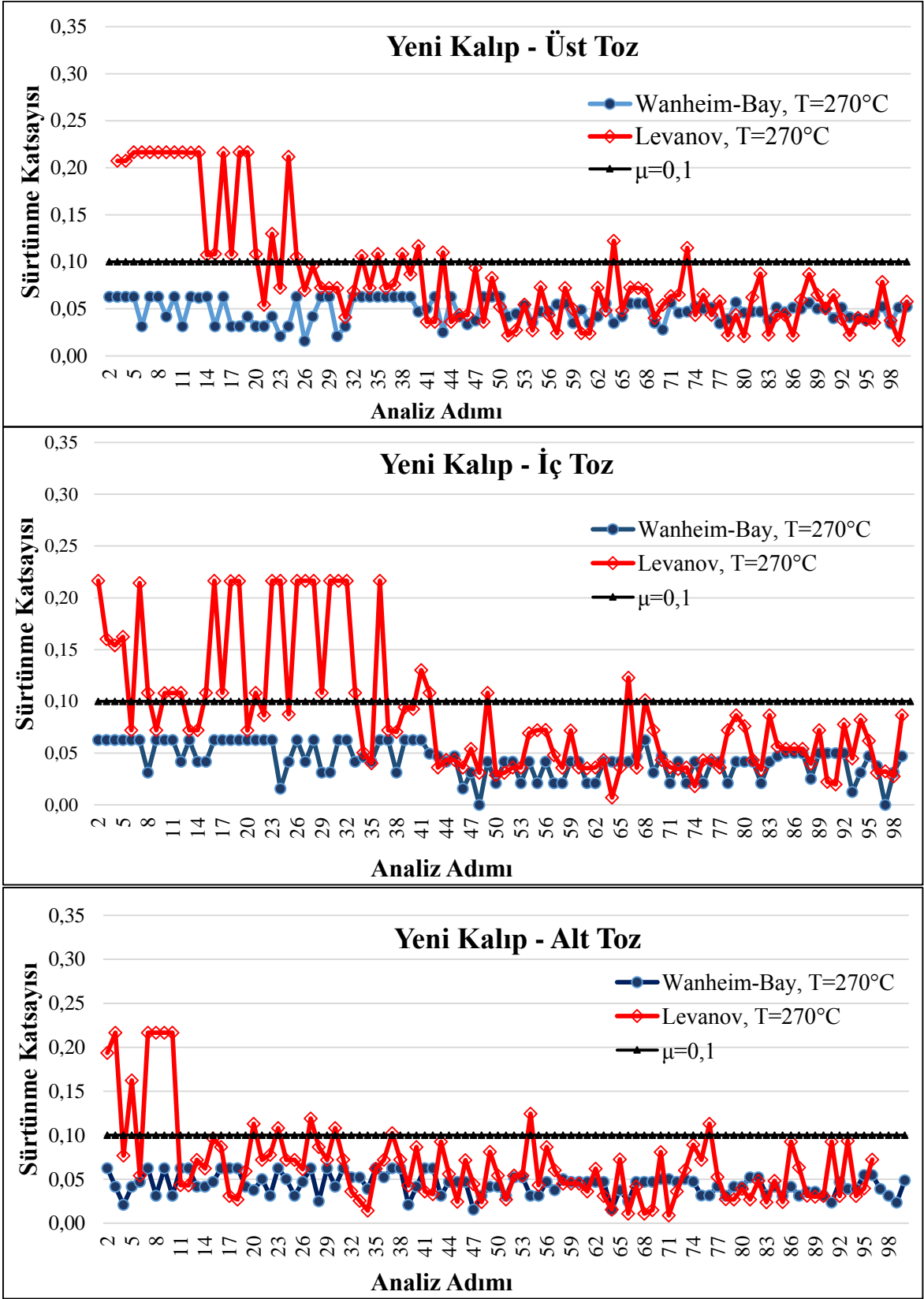
Şekil 3.67. Yeni kalıp modelin MPFEM analizinde elde edilen referans tozlara ait eşdeğer gerilme değerleri

Referans tozların, son analiz adımıdaki şekil değiştirmiş görüntüleri Şekil 3.68’de verilmiştir. Tozlarda elde edilen şekil değişimleri modeller arasında büyük farklılıklar göstermemektedir. Yalnızca Levanov modeliyle yapılan analizde zımbaya yakın olan alt toz üzerinde, zımbadan kaynaklanan etki tek yönlü olarak tozu sıkıştırma eğilimi göstermiştir. Diğer taraftan üst tozun kalıba temas eden elemanlarında 160 MPa’ın üzerinde gerilmeler hesaplanmıştır. İç toz üzerinde ise zımbaya yakın elemanlarda elde edilen gerilmeler kalıbın üst kısmına yakın elemanlarda elde edilen gerilmelerden daha düşüktür.



Şekil 3.68. Yeni kalıp ile MPFEM analizinde referans tozların eşdeğer gerilme dağılımı ve deformasyonu

Farklı sürtünme modelleri kullanılarak elde edilen gerilmelerin yanı sıra yeni kalıp model kullanılarak yapılan bu MPFEM analiz için de sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bu sürtünme katsayılarının analiz boyunca değişimleri Şekil 3.69’da verilmiştir.



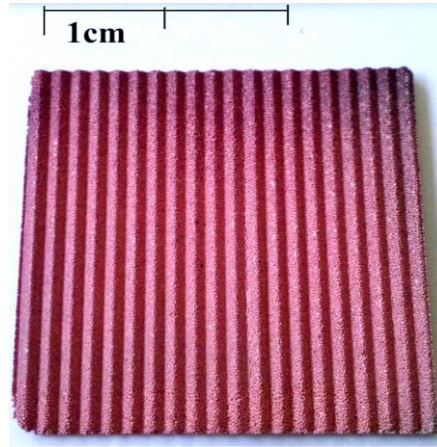
Şekil 3.69. Yeni kalıp modeli ile elde edilen sürtünme katsayıları

Sürtünme katsayısı değerleri Levanov modelinde 0,216, Wanheim/Bay modelinde ise 0,062 değerinden başlayıp malzeme preslendikçe azalma eğilimi göstermiştir. Wanheim/Bay modelinde analiz sonunda 0,05 sürtünme katsayısı, üç referans toz içinde ortalama bir değer olarak karşımıza çıkmıştır. Levanov modelinden elde edilen sürtünme katsayıları başlangıçtan itibaren çok fazla değişkenlikler göstermiş olsa da analiz sonunda 0,07 değeri sürtünme katsayısı olarak hesaplanmıştır.

Bu aşamada yapılacak olan deneylerde zımbaya belirli bir basma kuvveti uygulanacağından, sayısal analizlerde hesaplanan kuvvet değeri önem taşımaktadır. Sabit sürtünme katsayılı analizde zımbaya 105 N, Wanheim/Bay analizinde 106 N ve Levanov analizinde 105 N kuvvet uygulandığı ve bu kuvvetlerin zımbanın yüzey alanı olan 0,975 mm²'ye bölünmesiyle zımbaya uygulanan basınçlar elde edilmiştir. Hesaplamalar neticesinde yaklaşık 110 MPa zımba basıncı ile deneylerin yapılmasına karar verilmiştir.

3.4.2. Deneylerden Elde Edilen Bulgular

110 MPa zımba basıncı ile numuneler üretilip bu numunelerin gözenekliliği ve tozların şekil değişimleri incelenmiştir. 270°C'de yapılan deneylerden elde edilen bir numune Şekil 3.70'de verilmiştir.



Şekil 3.70. Deneylerden elde edilen bir numunenin görüntüsü

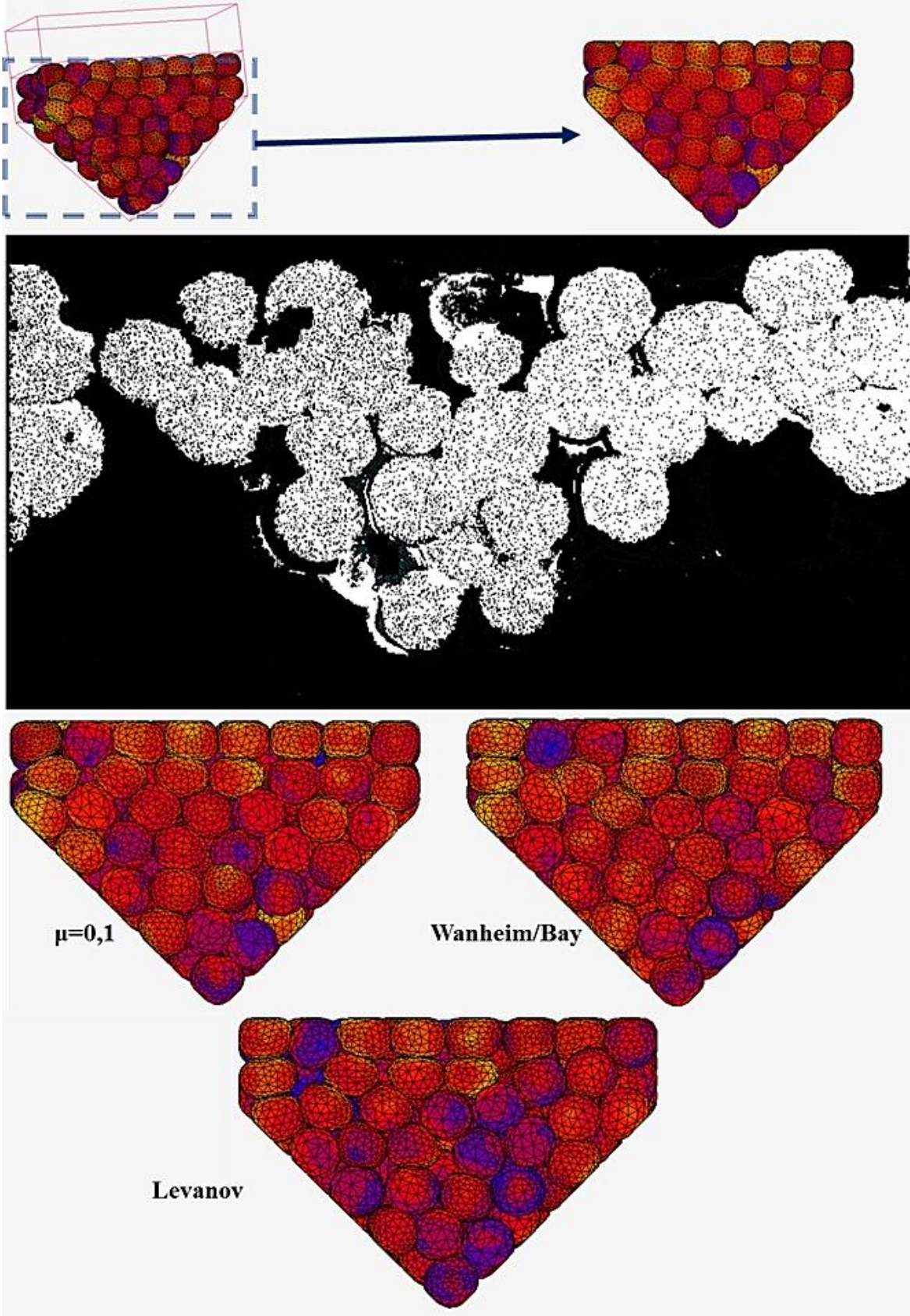
Numunelerin SEM ve optik mikroskop yöntemi ile mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir. Alınan SEM resimleri, ImageJ v.1.45s (National Institutes of Health, USA)

görüntü analiz yazılımı ile incelenerek bağıl yoğunlukları hesaplanmıştır. Yazılım, SEM resimlerini ikili renk (binary) gruplarında düzenleyerek, bu renklerin kapladığı alanların birbirlerine oranı üzerinden bağıl yoğunluklarını ortaya koymaktadır. 110 MPa altında gerçekleştirilen deneyde elde edilen farklı numune görüntüleri incelendiğinde, bağıl yoğunluğun %70,3-75,6 arasında değerler aldığı ImageJ yazılımı ile hesaplanmıştır. Bağıl yoğunluğun bu şekilde bir aralık içerisinde hesaplanmasının ilk nedeni kalıp içerisinde zımbaya yakın alt bölge ile zımbadan uzak olan üst bölgenin farklı yoğunluk göstermesidir. İlave olarak, numunelerin SEM görüntüleme işlemine hazırlanırken tabii tutuldukları yüzey işlemleri esnasında bazı tozların yüzeyden kopmalarıdır. Şekil 3.71’de bağıl yoğunluk değeri %70,3 olan ve kalıp kesitinin önden görünüşünün SEM görüntüleri ile sayısal analizlerde elde edilen kesit görüntüleri karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde verilmiş olan SEM görüntüsünde, bazı bölgelerden tozların kopmuş olduğu görülmektedir.

SEM görüntüleri ve sayısal analizlere ait gerilme dağılımı görüntüleri karşılaştırılırken dikkate alınması gereken önemli bir nokta da, sayısal analizlerde zımbanın en alt noktada bulunduğu andaki görüntüler değerlendirilmiş olup deneysel çalışmalarda ise, zımbanın tamamen numunenin üzerinden kaldırılmış durumdaki görüntüleri incelenmiştir. SEM görüntülerinde zımba ile kalıp üst yüzeyi arasındaki doğrultu boyunca 6-7 adet toz bulunduğu görülürken sayısal analizlerde de ilgili doğrultuda aynı sayıda toz bulunmaktadır. Benzer şekilde kalıp kesitinin daraldığı bölgede ise ancak iki adet tozun bulunduğu hem SEM hem de sayısal analiz görüntülerinde tespit edilmiştir.

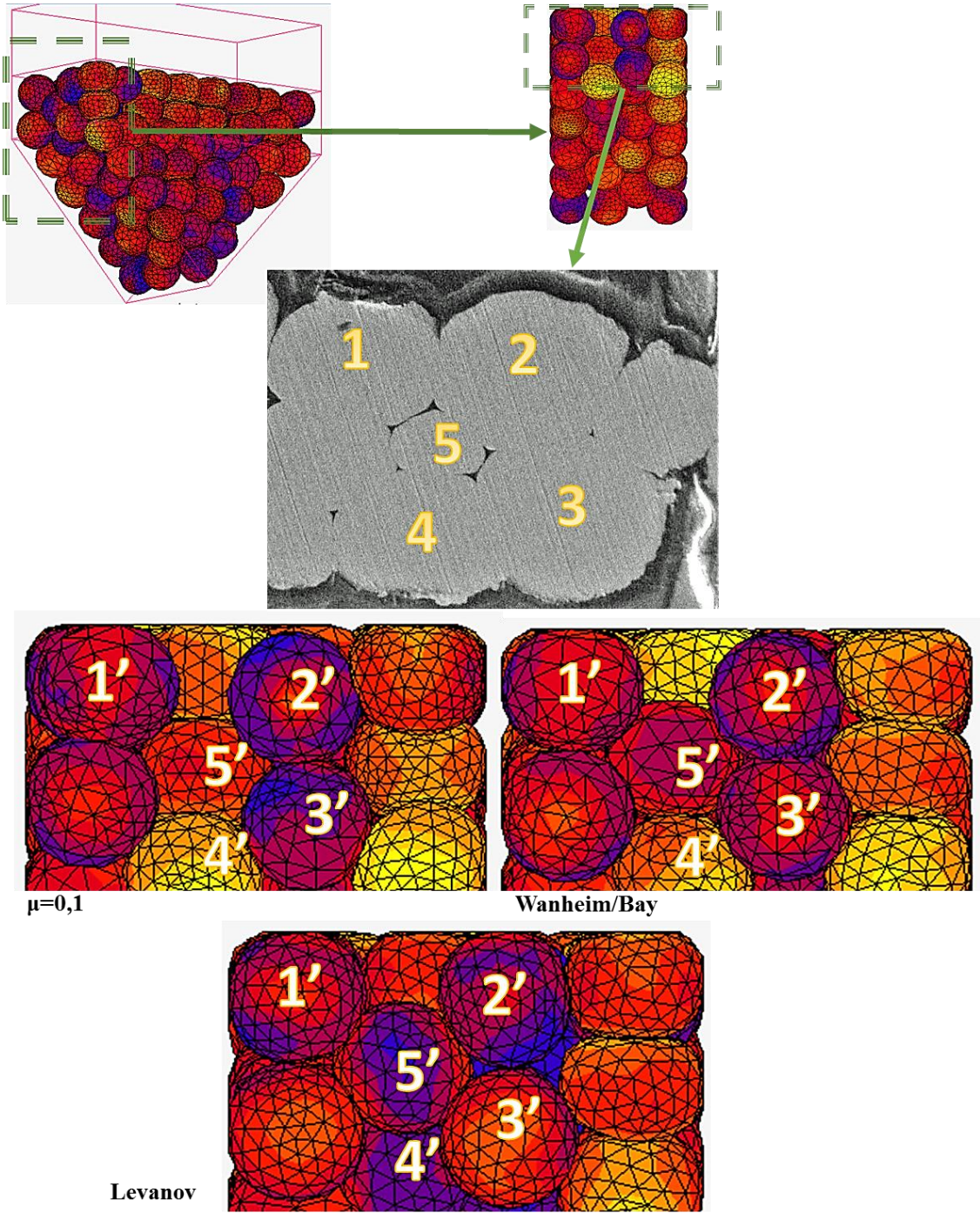
Şekil 3.71’deki SEM görüntülerinde tozların kalıpla temasta olmadığı ve zımbadan uzak bölgelerdeki tozlarda deformasyonların daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Bu durumda temas noktalarında aşırı gerilmeler oluşmayacağından benzer gerilme dağılımlarına sahip Levanov modelinin sayısal analizlerinden elde edilen görüntüler ile SEM görüntülerinin bu noktada uyumlu olduğu söylenebilir.

Görüntülerde bazı toz çaplarının küçük görünmesi, incelenen kesitten biraz daha arkada kalmış olan tozların yalnızca bir kısmının bu kesitte görünmesinden kaynaklanmaktadır. Bu şekilde küçük çaplı olarak görünen tozların sayıca fazlalığı, proses esnasında tozların kolaylıkla yeniden yerleştiğini, boşlukların doldurulduğunu ve buna bağlı olarak gerilmenin de homojen dağılım gösterdiğini ifade etmektedir. Sayısal analiz görüntüleri incelendiğinde ise, $\mu=0,1$ ve Wanheim/Bay analizlerinin daha homojen dağılım içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.71. Kalıp kesitinin SEM ve sayısal analiz görüntüleri

Şekil 3.72’de ise, sayısal analizlerden elde edilen kalıp kesitinin sol yan görüntüsü, aynı bölgenin SEM görüntüsü ile birlikte verilmiştir. Kalıp kesitinin daraldığı ve bu nedenle gerilmelerin maksimuma ulaştığı bölgenin incelenmesi amacıyla bu görüntüden elde edilen bulgular verilmiştir.



Şekil 3.72. Kalıbın sol yan kesitinin SEM ve sayısal analiz görüntüleri

Şekil 3.72’de verilmiş olan SEM görüntüsünden kalıbın bu bölgesinde bağlı yoğunluğun yaklaşık %75 olduğu İmageJ yazılımı ile hesaplanmıştır. Zimbaya yakın olan bu bölgede beklenen aşırı gerilme artışları $\mu=0,1$ ve Wanheim/Bay analizlerinde görülmektedir. 4’ numaralı toz incelendiğinde Levanov modelinde bu tozun diğer modellere kıyasla daha az gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir. Levanov modelinde bu dağılımın görülme nedeni analiz başlangıcında sürtünme katsayısının 0,216 değerinden başlayarak azalmasıdır. Benzer durumla $\mu=0,4$ analizinde karşılaşılmış ve yüksek sürtünme katsayılı analizlerde gerilmenin homojen dağılmadığı görülmüştür. Kesitin daraldığı bölge içinde $\mu=0,1$ ve Wanheim/Bay modellerinin homojen dağılım nedeniyle deneylerle daha uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu söylenebilir.

2 ve 3 numaralı tozlar 2’ ve 3’ numaralı tozlar ile kıyaslandığında incelenen kesite SEM ve analiz görüntülerinde üst üste iki adet toz yerleştiği görülmektedir. Şekil 3.71 ve 3.72’de kesitte bulunan toz sayılarının irdelenmesinde sonucu görülen benzerlik sayısal çalışmaların deneysel çalışmalarla uyumlu olduğunun bir göstergesidir.

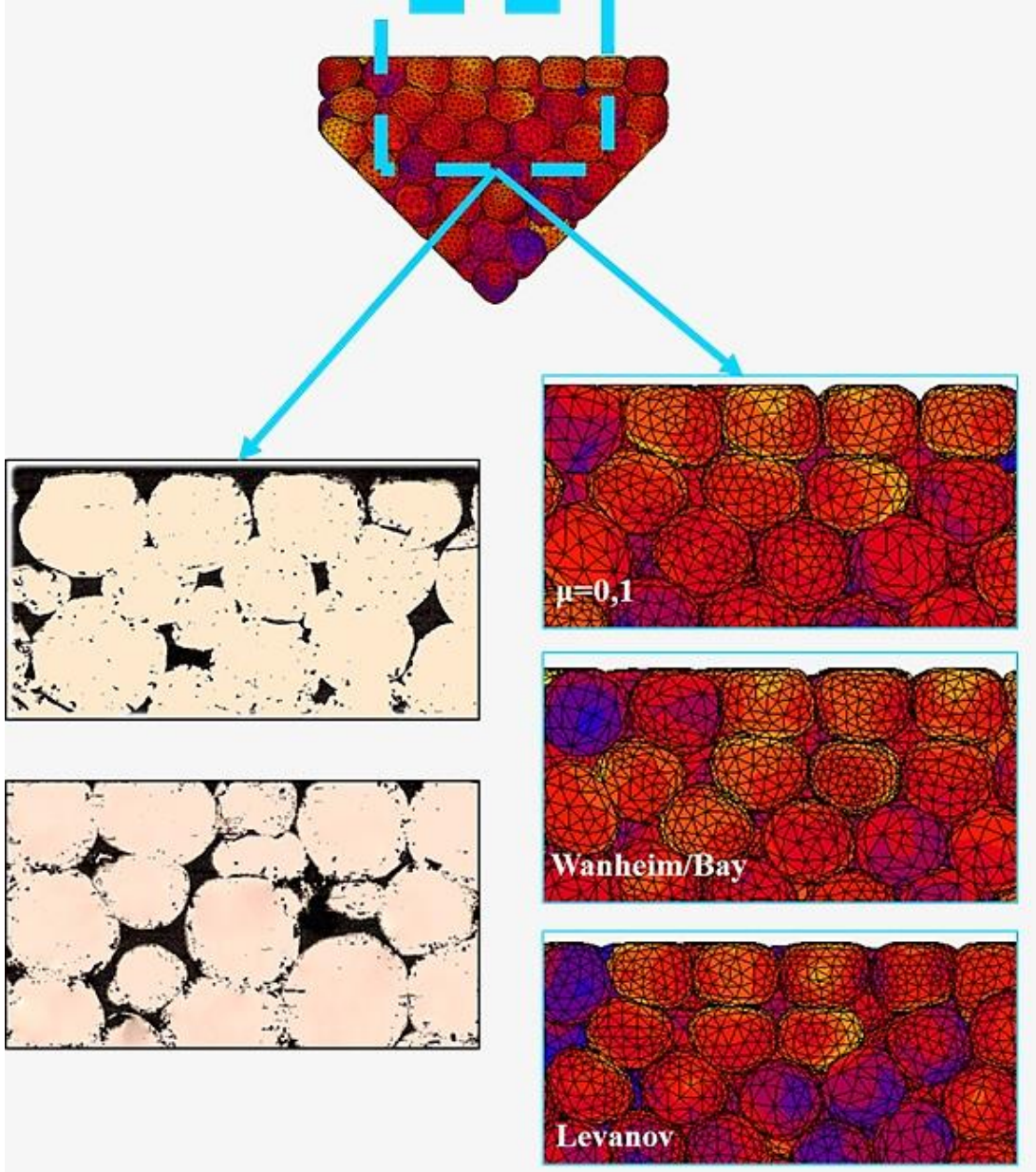
SEM görüntülerindeki 1 numaralı toz ile sayısal analizlerdeki 1’ numaralı tozlar kıyaslandığında, hiçbir sürtünme modelinde SEM görüntülerinde olduğu kadar aşırı deforme olmuş bir toz olmadığı görülmektedir. Diğer taraftan sayısal analiz görüntülerinin tümü incelendiğinde 1 numaralı toz kadar deforme olmuş tozlar Wanheim/Bay modelinde görülebilmektedir.

5 numaralı toz ile 5’ numaralı tozlar karşılaştırıldığında ise, Levanov modelinde 5’ numaralı tozun incelenen kesitte olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra Wanheim/Bay ve $\mu=0,1$ analiz görüntülerinde işaretlenmiş olan 5’ numaralı tozun deformasyon miktarı SEM görüntüleri ile daha uyumludur. 5 numaralı toz çevresindeki beş adet toz ile temasta olup 5’ numaralı tozlar çevrelerindeki altı adet tozla temasta olduğundan tam bir uyumdan söz etmek mümkün olmamaktadır.

Uygulanan gerilme değerinin akma gerilmesinin 1,3 katından fazla olması durumunda Coulomb modelinin uygun olmayacağı, Wanheim/Bay modelinin daha iyi sonuçlar vereceğine dair Wanheim vd. (1974) çalışmasında ortaya konulan sonucun, bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal bulgularla uyum gösterdiği söylenebilir.

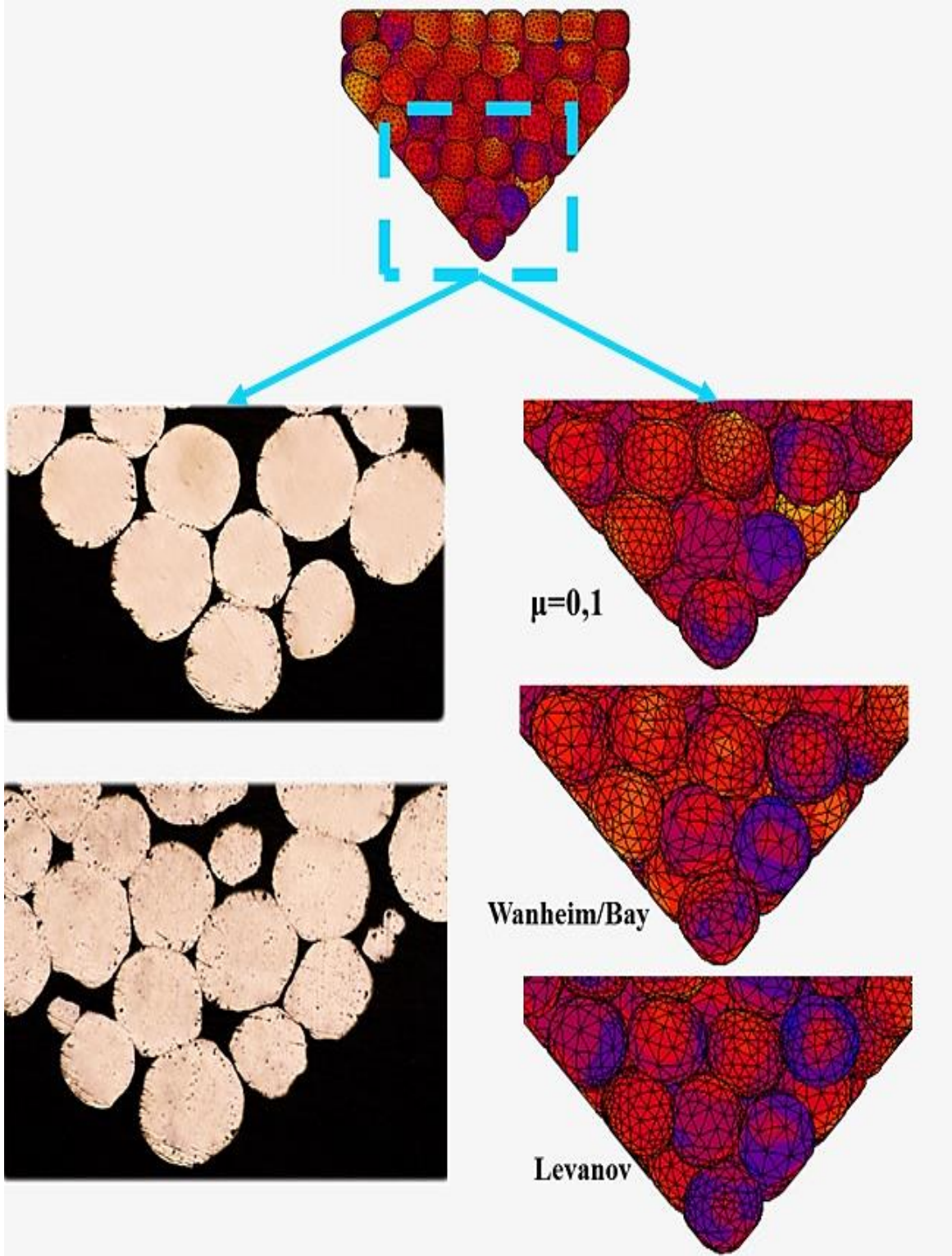
Şekil 3.73’te ise, kalıbın zimbaya yakın alt bölgesine ait optik mikroskop görüntüleri ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Optik mikroskop görüntülerinde, kalıp ile temasta olan tozların özellikle temas bölgelerinde deforme oldukları, deformasyon etkisinin

üst kısımlara doğru ilerledikçe azaldığı görülmektedir. Tozların aralarında kalan boşlukların incelenmesinde de optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile uyumu görülmüştür. Alt bölgede, sürtünme modellerine göre sayısal analiz sonuçları arasında belirgin farklar bulunmamasına rağmen Wanheim/Bay modelinin gerilme dağılımı, optik mikroskop görüntülerindeki dağılımla paralellik içerisinde olduğu söylenebilir.



Şekil 3.73. Zimbaya yakın bölgenin optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırılması

Kalıp üst bölgesinin optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırıldığı Şekil 3.74'te, Levanov modeline ait gerilme dağılımı sonucundaki deformasyonların optik mikroskop görüntüleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Levanov modelinde, kalıbın üst kısmındaki tozlar üzerindeki mavi renkli tetrahedral elemanların fazla olması gerilmenin, dolayısıyla da deformasyonun bu elemanlarda daha az olduğunu ifade etmektedir. Benzer şekilde optik mikroskop görüntülerinde kalıbın üst bölgesindeki tozların aşırı deforme olmadıkları görülmüştür. Bu yaklaşımla Levanov modelinin bu bölgedeki deformasyonu daha başarılı bir şekilde analiz ettiği sonucuna varılmıştır. Üst bölgenin optik mikroskop görüntüleri ile gerilme dağılımlarının değerlendirilmesinde, Wanheim/Bay modeline ait gerilme dağılımında $\mu=0.1$ analizine kıyasla daha fazla mavi renkli tetrahedral eleman olması da, Wanheim/Bay modelinin Coulomb sabit sürtünme modelinden daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir.



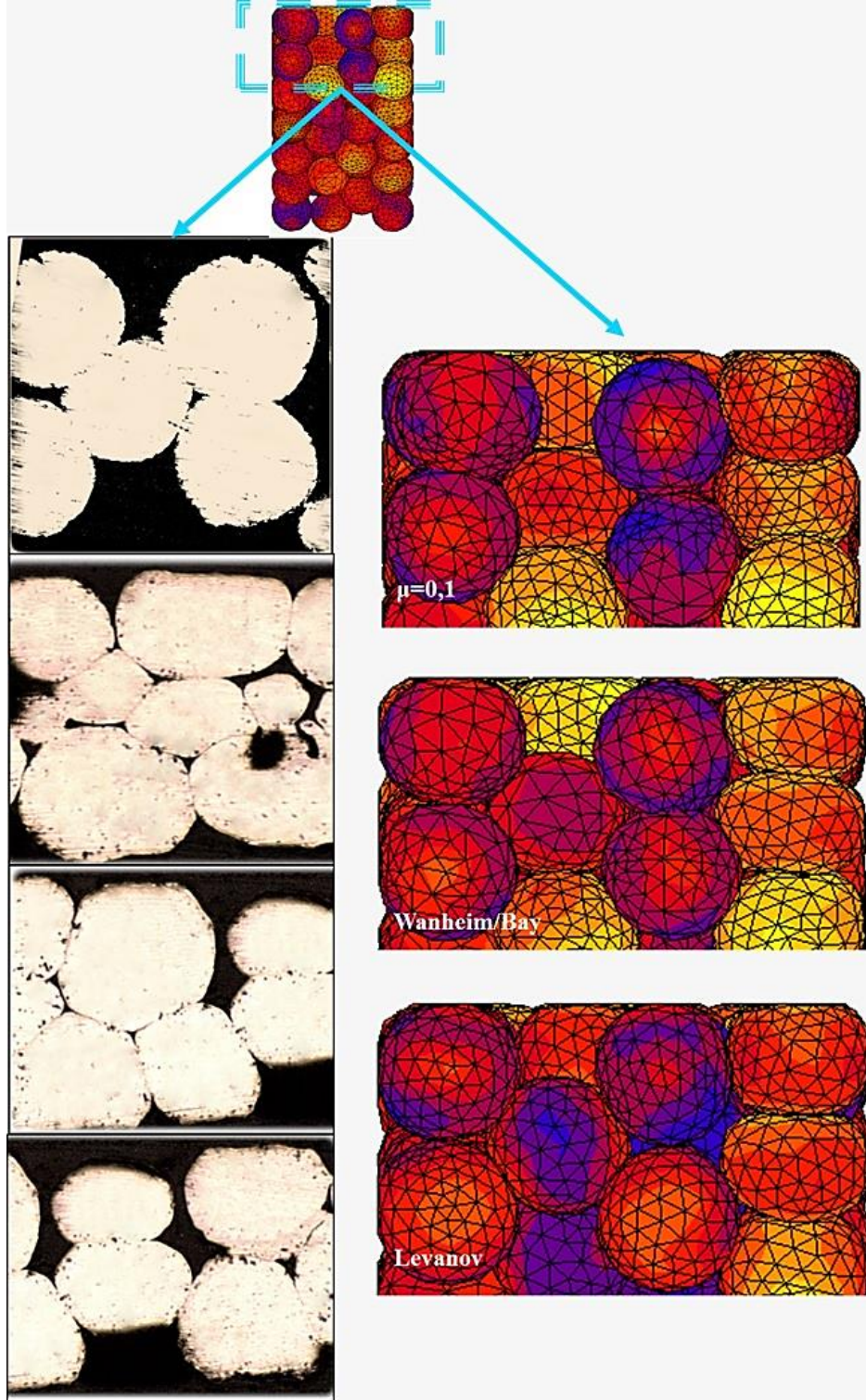
Şekil 3.74. Kalıp üst bölgesinin optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırılması

Son olarak, zimba ile kalıbın daralmaya başladığı kesit arasında kalan bölgenin sol yandan bakış açısıyla elde edilen optik mikroskop görüntüleriyle sayısal analiz görüntüleri Şekil 3.75'te karşılaştırılmıştır. Bu bölge daha önce Şekil 3.72'de ayrıntılı olarak incelenmiş olup optik mikroskop görüntüleriyle alınan örnek sayısının ve dolayısıyla sonuçların güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Proses esnasında yeniden yerleşmelerin tamamlanarak, analiz sonucunda zimba ile kalıbın daralmaya başladığı kesit arasında ancak iki adet toz bulunduğu Şekil 3.75'teki farklı örneklerde görülmektedir. Bu durum, analiz için seçilen kontrol hacmi ile deneysel sonuçlar arasındaki uyumu ifade ettiğinden sayısal sonuçların güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Aynı yaklaşımla, Şekil 3.71'deki SEM görüntüsünde kalıbın üst kısmında toz görünmemesine karşın, ortaya konulan uyum Şekil 3.74'teki görüntülerle desteklenmiştir. Şekil 3.74'te kalıbın üst kısmına yerleşmiş tek bir tozun ardından gelen sırada üç tane toz ve bir sonraki sırada bulunan dört tane tozun varlığı hem optik mikroskop hem de sayısal analiz görüntülerinde karşımıza çıkmaktadır.

Bağlı yoğunluğun, kalıbın üst ve alt bölgeleri arasında farklılık gösterebildiğine dair ortaya konulan bulguya ilave olarak, bağlı yoğunluğun numune boyunca aynı kesit içerisinde dahi farklı değerler alabileceği Şekil 3.75'te görülmektedir. Aynı kesite ait dört farklı optik mikroskop görüntüsünün bazı bölgelerinde, tozlar aşırı sıkışık ve deformasyona uğramış olmalarına rağmen, bazı bölgelerinde çok az deforme olmuş ve aralarında boşluklar kalacak şekilde konumlandıkları Şekil 3.75'te verilmiştir.

Farklı numune görüntüleriyle farklı kontrol hacimleri arasında benzerlikler bulunabileceği açıktır. Buna karşın Şekil 3.75'teki optik mikroskop görüntülerinin genelinde tozların aşırı deforme oldukları da görülmektedir. Sayısal analiz sonuçlarına ait görüntülerde maksimum-minimum deformasyon sarı-mavi renk arasındaki dağılımla ifade edildiğinden mavi renkli elemanların az olduğu, sarı ve sarıya yakın renklerin ağırlıklı olduğu Wanheim/Bay modeline ait sonuçların optik mikroskop görüntüleriyle daha uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.75. Zımba ile kalıbın daralmaya başladığı kesit arasında kalan bölgenin sol yandan optik mikroskop görüntülerinin sayısal analiz görüntüleri ile karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Metal tozu presleme prosesinin sayısal modellenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasında elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Çoklu parçacık sonlu elemanlar analizi (MPFEM), kalıp içerisindeki tozların yeniden yerleşme sürecini, tozlar arası etkileşimi ve temas gerilmelerini analiz çıktısı olarak verebildiğinden sürekli ortam analizinden prosesi gerçekçi modellemesi açısından daha üstün bir yöntemdir. Mikromekanik analizin sağladığı mikro boyutlu hassas hesaplamaları yaparken ayrık eleman yönteminde olduğu gibi elastik davranışı analize dahil etmek için ilave algoritmalara ihtiyaç duymamaktadır.

2. İncelenen malzeme modelleri arasında Mohr-Coulomb, Modifiye Cam-Clay ve Shima-Oyane malzeme modelleri sürekli ortam analizlerinde hızlı ve literatürle paralel sonuçlar vermesine karşın gerilme dağılımlarına bakıldığında MPFEM analizinde von Mises malzeme modelinin daha uygun sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

3. Mohr-Coulomb ve MCC malzeme modelleri ile yapılan analizlerde hem gerilme davranışı hem de gerilme değerleri açısından her iki modelleme yaklaşımında (sürekli ortam ve çoklu parçacık) birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

4. Daha öncede belirtildiği gibi Mohr-Coulomb malzeme modeli iç sürtünme açısına göre hesap yapmaktadır. İlâveten, bu çalışmaya göstermiştir ki Shima-Oyane malzeme modeli ile yapılan sürekli ortam analiz sonuçları, en uygun analiz yaklaşımı olan von Mises malzeme modelinin çoklu parçacık analiz sonuçlarına en yakın değerleri vermektedir. Buradan yola çıkılarak Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modelini sürekli ortam analizleri için bir adım öne çıkarmaktadır.

5. Deneysel çalışmalarda, zımbadan uzak olan üst bölgedeki tozlarda diğer bölgelere göre daha az deformasyon oluştuğu ve numunenin kalıptan çıkarılması esnasında üst bölgede kopmalar olabildiği görülmüştür. Aynı zamanda, alt ve iç referans tozlarda daha fazla deformasyon olması, numunenin kalıptan sorunsuz çıkmasına yardımcı olmaktadır. Kalıbın genelinde oluşan deformasyonun homojen olabilmesi için kalıbın alt ve üst noktalarından eş zamanlı olarak preslenmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.

6. Wanheim/Bay sürtünme modelinden oda sıcaklığı ve 270°C’de elde edilen değerleri birbirlerine çok yakın sonuçlanmıştır. Levanov sürtünme modelinde ise 270°C

değerleri Wanheim/Bay modelinin 270°C değerlerine paralellik göstermektedir. Wanhem/Bay modelinden oda sıcaklığında ortalama 0,05 sürtünme katsayısı elde edilirken 270°C’de bu değer 0,04’e düşmektedir. Levanov sürtünme modeli 270°C’de 0,04 sürtünme katsayısı ortaya koymasına rağmen oda sıcaklığında tozların konumundan etkilenecek farklılık göstermektedir.

7. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular göstermiştir ki, tozların fazla deforme olduğu alt ve iç bölgede Wanheim/Bay ve $\mu=0,1$ sabit sürtünme katsayılı analizin sonuçları birbirleriyle uyumluyken, tozların az deforme olduğu üst bölgede Levanov modeliyle elde edilen sayısal bulgular deneylerden elde edilen bulgularla uyumludur. Wanheim/Bay sürtünme modeliyle hem oda sıcaklığında hem de ısıl analizlerde yapılan sayısal analiz çalışmalarından elde edilen bulgular kendi içinde uyumlu olduğundan ve deneysel çalışmalardan elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri bu modele 270 C’deki sayısal analizler sonuçlarına benzer olduğundan, presleme işleminin sayısal analizleri için Wanheim/Bay sürtünme modelinin kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Levanov sürtünme modelinin ise, bağıl yoğunluğun fazla arttırılmadığı ısıl analizlerde kullanılması uygun olacaktır. Amonton-Coulomb sürtünme modelinin kullanımı içinse, presleme işlemini modelleyen doğru sabit sürtünme katsayısının seçilmesi gerekmektedir.

8. Sabit sürtünme katsayısının $\mu=0,4$ alındığı MPFEM analizlerinden elde edilen gerilme değerleri, sürekli ortam analizlerinden elde edilen gerilme değerlerine yaklaştığından literatürde belirtildiğinin aksine sürekli ortam analizlerinde sürtünmenin ihmal edilemeyeceği, bilakis en üst değer olan $\mu=0,577$ ’ye yakın olacak şekilde gerilme değerlerinin hesaplandığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan bu tip analizlerde malzeme hacminin tamamı eleman olarak tanımlandığından temas yüzey alanı gereksiz yere artırılmış olmaktadır.

9. Sürtünme analizlerinden, oda sıcaklığındaki ve ısıl analizler için en uygun olan sürtünme faktörünün 0,3 olduğu belirlenmiştir. Daha büyük sürtünme faktörleri başlangıç durumundaki sürtünme katsayısını arttırdığından ve presleme devam ettikçe sürekli yeni düğüm noktaları temasa gelip bu yüksek sürtünme katsayısını ortaya koyacağından analizler modelin genel eğiliminden uzaklaşacaktır. Daha küçük seçilmesi durumunda ise gerilme ile fazla değişmeden başlangıçtan itibaren sabit sürtünme katsayısı eğilimi gösterecektir.

10. von Mises malzeme modeli ile yapılan analizler göstermiştir ki kalıbın geometrik süreksiz bölgelerinde ortaya çıkan eşdeğer gerilmeler kalıp içerisindeki ortalama eşdeğer gerilmelerin 2-2,5 katına kadar çıkabilmektedir.

11. Sabit sürtünme katsayısı artıka malzemenin kalıbın alt kısmında sıkışmış olmasından dolayı, sürtünme katsayısı yüksek malzemelerin preslenmesi için eksen üzerinde zıt yönde hareket eden çift zımba kullanmak daha iyi sonuçlar vereceği söylenebilir.

12. $\mu=0,25$ Coulomb sürtünme katsayısı değeri, sürtünme davranışı açısından kritik bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürtünme katsayısının 0,1, 0,25 ve 0,4 olduğu von Mises malzeme modeliyle yapılan MPFEM analizlerinde referans tozlarda meydana gelen deformasyonlar incelendiğinde, sürtünme katsayısının 0,1 ve 0,25 olduğu sonuçlar arasında farklar olmasına rağmen sürtünme katsayısının 0,25 ve 0,4 olduğu sonuçlar arasında neredeyse fark görülmemektedir.

13. Mikro boyutta metal tozu presleme prosesini gerçekçi olarak modellenmesini sağlayan MPFEM yaklaşımında gerekli yüksek işlemci kapasitesi, uzun model hazırlama ve analiz süreleri maliyeti arttıran unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

5. ÖNERİLER

Metal tozu presleme prosesinin Çoklu Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemiyle von Mises, Modifiye Cam-Clay, Mohr-Coulomb ve Shima-Oyane malzeme modelleri ve Wanheim/Bay, Levanov ve Coulomb sürtünme modellerinin üç boyutlu olarak analiz edildiği bu çalışma sonucunda aşağıdaki öneriler yapılabilir.

1. Bu çalışmada 200 µm çapında bakır tozları kullanılarak presleme süreci modellenmiştir. Standart çap değerinin dışında iki ya da daha fazla çap değerinde tozların karışımı şeklinde modellemeler yapılabilir.

2. Bakır tozları ile modellenen bu analizlere ilave olarak farklı malzemelerin karışımı şeklinde kompozit malzeme analizleri çalışılabilir. Bu anizotropik malzeme çalışması, matris malzemenin büyük çaplı küreler, ikincil malzemenin daha küçük çaplı küreler olarak modellenmesi ile kompozit çalışmalar yapılabilir.

3. Yapılmış olan 270°C çalışmalarına paralel olarak tozların yapışmasını sağlayarak malzeme mukavemetinin arttıran sinterleme işlemine ait modellemeler yüksek sıcaklıklarda çalışılabilir.

4. Quasistatic olarak yapılan analizlere statik sürtünme modelleri tanımlanmış olup, toz miktarının fazla tutulabildiği bir modelde dinamik sürtünme modelleri ile presleme prosesi analizleri çalışılabilir.

5. Farklı deformasyon hızlarından yeniden yerleşme sürecinin ne şekilde etkileneceğinin araştırılması endüstriyel süreçlerde kalite ve üretim hızı üzerinden optimum bir değer ortaya koyabilir.

6. KAYNAKLAR

- Agostinetti, P., Dal Bello, S., Dalla Palma, M., Heinemann, B., Nocentini, R., Zauner, C., Langer, H. ve Klammer, J., 2011. Investigation of the Thermo-mechanical Properties of Electro-Deposited Copper for ITER, Journal of Nuclear Materials, 417, 1-3, 924-927.
- Altan, T., Oh, S., ve Gegel, H., 1983. Metal Forming Fundamentals and Application, ASM, Washington.
- Al-Qureshi, H.A. ve Klein, A.N., 2005. On the Mechanics of Cold Compaction for Powder Metallurgy, Journal of Materials Processing Technology, 166, 135-143.
- Al-Qureshi, H.A., Soares, M.R.F., Hotza, D., Alves, M.C. ve Klein A.N., 2008. Analysis of the Fundamental Parameters of Cold Die Compaction of Powder Metallurgy, Journal of Materials Processing Technology, 199, 417-424.
- Alves, L.M.M., Martins, P.A.F. ve Rodrigues J.M.C., 2006. A New Yield Function for Porous Materials, Journal of Materials Processing Technology, 179, 36-43
- Attaway, S.W., Heinstein, M.W. ve Swegle, J.W., 1994. Coupling of Smooth Particle Hydrodynamics with the Finite Element Method, Nuclear Engineering and Design, 150, 199-205.
- Aubertin, M. ve Li, L., 2004. A Porosity-Dependent Inelastic Criterion for Engineering Materials, International Journal of Plasticity, 20, 2179-2208.
- Avlonitis, B., Kalaitzidou, K. ve Streator, J., 2014. Investigation of Friction Statistics and Real Contact Area by Means of a Modified OFC Model, Tribology International, 69, 168-175.
- Azhdar, B., Stenberga, B. ve Kari, L., 2006. Determination of Dynamic and Sliding Friction, and Observation of Stick-Slip Phenomenon on Compacted Polymer Powders During High-Velocity Compaction, Polymer Testing, 25, 1069-1080.
- Bejerano, A., Riera, M.D. ve Prado, J.M., 2003. Simulation of The Compaction Process of A Two-Level Metallurgical Part, Journal of Materials Processing Technology, 143, 34-40.
- Bera, B., 2013. Coefficient of Static Friction of Elastic-Plastic Micromechanical Surface Control, International Journal of Engineering Research and Applications, 3, 2,687-692.
- Bhushan, B., 2007. Nanotribology and Nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS Materials and Devices, Microelektronik Eng., 84, 387-412.

- Bier, W. ve Hartmann, S., 2006. A Finite Strain Constitutive Model For Metal Powder Compaction Using a Unique and Convex Single Surface Yield Function, European Journal of Mechanics A/Solids, 25, 1009–1030.
- Bier, W., Dariel M.P., Frage, N., Hartmann, S. ve Michailov, O., 2007. Die Compaction of Copper Powder Designed For Material Parameter Identification, International Journal of Materials Sciences 49, 766-777.
- Bierwisch, C., Kraft, T., Riedel, H. ve Moseler, M., 2009. Three-Dimensional Discrete Element Models for the Granular Statics and Dynamics of Powder in Cavity Filling, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 57, 10-31.
- Bilgili, E. ve Capece, M., 2011. Quantitative Analysis of Multi-Particle Interactions During Particle Breakage: A Discrete Non-Linear Population Balance Framework, Powder Technology, 213, 162-173.
- Callari, C., Auricchio, F. ve Sacco, E., 1998. A Finite-Strain Cam Clay Model in the Framework of Multiplicative Elasto-Plasticity, International Journal of Plasticity, 14, 12, 1155-1187.
- Cameron, I.M. ve Gethin, D.T., 2001. Exploration of Die Wall Friction for Powder Compaction Using a Discrete Finite Element Modeling Technique, Modeling and Simulations in Materials Science and Engineering, 9, 289-307.
- Campbell, J., Vignjevic, R. ve Libersky, L., 2000. A Contact Algorithm for Smoothed Particle Hydrodynamics, Computer Methods Applied Mechanical Engineering, 184, 49-65.
- Cedergren, J., Sorensen, N.J. ve Bergmark, A., 2002. Three Dimensional Analysis of Compaction of Metal Powders, Mechanics of Materials, 34, 43-59.
- Champion, Y., 2013. Competing Regimes of Rate Dependent Plastic Flow in Ultrafine Grained Metals, Materials Science & Engineering A, 560, 315-320.
- Chen, Y., Imbault, D. ve Doremus, P., 2007. Numerical Simulation of Cold Compaction of 3D Granular Packings, Materials Science Forum, 534-536, 301-304.
- Chung, Y.C. ve Ooi, J.Y., 2011. Linking of Discrete Element Modelling With Finite Element Analysis For Analysing Structures in Contact With Particulate Solid, Powder Technology, 217, 107-120.
- Chtorou, H., Guillot, M. ve Gakwaya, A., 2002. Modeling of the Metal Powder Compaction Process Using the Cap Model. Part I. Experimental Material Characterization and Validation, International Journal of Solids and Structures, 39, 1059-1075.
- Chumachenko, E.N., Portnoi, V., Paris, L. ve Billaudeau, T., 2005. Analysis of the SPF of a Titanium Alloy at Lower Temperatures, Journal of Materials Processing Technology, 170, 448-456.

- Cocks, C.F., 2001. Constitutive Modeling of Powder Compaction and Sintering, Progress in Materials Science, 46, 201-229.
- Cora, O.N., Usta, Y. ve Koc, M., 2009, Micro-Manufacturing of Micro-Scale Porous Surface Structures For Enhanced Heat Transfer Applications: An Experimental Process Optimization Study, Journal of Micromechanics and Microengineering, 19, 045011, 12.
- Cora, O.N., 2004. Friction Analysis in Cold Forging, M.S. Thesis, Middle East Technical University, Ankara/Turkey.
- Cozza, R.C., 2013, A Study on Friction Coefficient and Wear Coefficient of Coated Systems Submitted Micro-Scale Abrasion Tests, Surface&Coatings Technology, 215, 224-233.
- Cundall, P.A., 1971. A Computer Model For Simulating Progressive Large Scale Movements In Blocky Rock Systems. In: Proceedings of The Symposium of The International Society For Rock Mechanics, Nancy, France. 1, II-8.
- Cundall P.A. and Strack, O., 1979. A Discrete Numerical Model For Granular Assemblies. Géotechnique; 29, 47-65.
- Cunningham, J.R., Sinka, I.C. ve Zavalingos, A., 2004. Analysis of Tablet Compaction.I. Characterization of Micromechanical Behavior of Powder and Powder/Tooling Friction, Journal of Pharmaceutical of Sciences, 93, 8.
- Deb Nath, S.K., 2014. Elastic, Elastic-Plastic Properties of Ag, Cu and Ni Nanowires by The Bending Test Using Molecular Dynamics Simulations, Computational Materials Science, 87, 138-144.
- Diarra, H., Mazel, V., Boillon, A., Rehault, L., Busignies, V., Bureau, S. ve Tchoreloff, P., 2012. Finite Element Method (FEM) Modelling of the Powder Compaction of Cosmetic Products: Comparison Between Simulated and Experimental Results, Powder Technology, 224, 223-240.
- Eberhardt, E., Stead, D. ve Coggan, J.S., 2004. Numerical Analysis of Initiation and Progressive Failure in Natural Rock Slopes – the 1991 Randa Rockslide. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41:69-87.
- Engel, U., 2006. Tribology in Microforming, Wear, 260, 265-273.
- Frenning, G., 2008. An Efficient Finite/Discrete Element Procedure for Simulating Compression of 3D Particle Assemblies, Computer Methods Applied Mechanical Engineering, 197, 4266-4272.
- Gethin, D.T., Ransing, R.S., Lewis, R.W., Dutko, B. ve Crook, A.J.L., 2001. Numerical Comparison of a Deformable Discrete Element Model and an Equivalent Continuum Analysis For The Compaction of Ductile Porous Material, Computers and Structure, 79, 1287-1294.

- Gethin, D.T., Lewis, R.W. ve Ransing, R.S., 2003. A Discrete Deformable Element Approach For The Compaction of Powder Systems, Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 11, 101-114.
- Gethin, D.T., Yang, X.-S. ve Lewis, R.W, 2006. A Two Dimensional Combined Discrete and Finite Element Scheme for Simulating the Flow and Compaction of Systems Comprising Irregular Particulates, Computational Methods Applied Mechanical Engineering. 195, 5552–5565.
- Gingold, R.A. ve Monaghan, J.J., 1977. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars, Monthly Notices Royal Astronomical Society, 181, 375-389.
- Guerin, J.D., Bartys, H., Dubois, A. ve Oudin, J., 1999. Finite Element Implementation of a Generalized Friction Model: Application to an Upsetting-Sliding Test, Finite Element Analysis and Design, 31, 193-207.
- Guo, Y., Wu, C.-Y., Kafui, K.D. ve Thornton, C., 2011. 3D DEM/CFD Analysis of Size-Induced Segregation During Die Filling, Powder Technology, 206, 177-188.
- Gustafsson, G., Häggblad, H.A., Oldenburg, M., P., 2007. Smoothed Particle Hydrodynamic Simulation of Iron Ore Pellets Flow, AIP Conference Proceedings, 908, 1483, 10.1063/1.2741018.
- Gustafsson, G., Häggblad, H.A., Jonsén, P., 2013. Multi-Particle Finite Element Modelling of The Compression of Iron Ore Pellets with Statistically Distributed Geometric and Material Data, Powder Technology, 239, 231-238.
- Han, L.H., Elliott, J.A., Bentham, A.C., Mills, A., Amidon, G.E. ve Hancock, B.C., 2008. A Modified Drucker- Prager Cap Model For Die Compaction Simulation of Pharmaceutical Powders, Int. Journal of Solids and Structures, 45, 3088-3106.
- Han, K., Feng, Y.T. ve Owen, D.R.J., 2005. Sphere Packing With A Geometric Based Compression Algorithm, Powder Technology, 155, 33-41.
- Haliti, R., 2011. Estimation of Cam Clay Model Parametres of CU Triaxial Tests Results, Journal of International Environmental Application & Science, 6, (3): 389-400.
- Hallström, J., 2000. Influence of Friction on Die Filling in Counterblow Hammer Forging, Journal of Materials Processing Technology, 108, 21-25.
- Hangai, Y., Zushida, K., Fujii, H., Ueji, R., Kuwazuru, O. ve Yoshikawa, N., 2013. Friction Powder Compaction Process For Fabricating Open-Celled Cu Foam by Sintering-Dissolution Process Route Using NaCl Space Holder, Materials Science&Engineering A, 585,468-474.

- Hangai, Y., Zushida, K., Kuwazuru, O. ve Yoshikawa, N., 2014. Large-Scale Aluminium Foamplate Fabricated by Enhanced Friction Powder Compaction Process Based on Sintering and Dissolution Process, Journal of Materials Processing Technology, 214, 1721-1727.
- Harthong, B., Jerier, J.-F., Doremus, P., Imbault, D. ve Donze, F.-V., 2009. Modeling of High-Density Compaction of Granular Materials by Discrete Element Method, International Journal of Solids and Structures, 46, 3357-3364.
- Hartmann, S. ve Bier, W., 2008. High-Order Time Integration Applied to Metal Powder Plasticity, International Journal of Plasticity, 24, 17–54.
- Hassanpour, A. ve Ghadiri, M., 2004. Distinct Element Analysis and Experimental Evaluation of The Heckel Analysis of Bulk Powder Compression, Powder Technology 141, 251– 261.
- Heisserer, U., Hartman, S., Düster, A., Bier, W., Yosibash, W. ve Rank, E., 2007. p-FEM For Finite Deformation Powder Compaction, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 45, 7825, 4, 368.
- Henderson, R.J., Chandler, H.W., Akisanya, A.R., Chandler, C.M. ve Nixon, S.A., 2001. Micro-mechanical Modeling of Powder Compaction, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 49, 739-759.
- Höhner, D., Wirtz, S., Kruggel-Emden, H. ve Scherer, V., 2011. Comparison of The Multi-Sphere and Polyhedral Approach to Simulate Non-spherical Particles Within The Discrete Element Method: Influence on Temporal Force Evolution for Multiple Contacts, Powder Technology, 208, 643-656.
- Höhner, D., Wirtz, S., ve Scherer, V., 2012. A Numerical Study on The Influence of Particle Shape on Hopper Discharge Within The Polyhedral and Multi-Sphere Discrete Element Method, Powder Technology, 226, 16-28.
- Iwashita, K. ve Oda, M., 2000. Micro-Deformation Mechanism of Shear Banding Process Based on Modified Distinct Element Method, Powder Technology, 109, 192–205.
- James, P.J., 1977. Particle Deformation During Cold Isostatic Pressing of Metal Powders, Powder Metallurgy, 20, 199–204.
- Jerier, J.K., Richefeu, V., B., Imbault, D. ve Donze, F.V., 2010. Packing Spherical Discrete Elements For Large Scale Simulations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199, 1668-1676.
- Jerier, J.K., Harthong, B., Richefeu, V., Chayreyre, B., Imbault, D., Donze, F.V. ve Doremus, P., 2011. Study of Cold Powder Compaction By Using the Discrete Element Method, Powder Technology, 208, 537-541.

- Jiang, S.Q., Tan, Y.Q., Zhang, H., Yang, D.M. ve Zhang, G.F., 2013. DEM Simulation of the Mechanical Properties of SiC Ceramic Under Pre-stressing, In proceedings of 2nd International Conference on Particle-Based Methods II - Fundamentals and Applications, 383-390.
- Johnson, G.R., 1994. Linking of Lagrangian Particle Methods to Standard Finite Element Methods for High Velocity Impact Computations, Nuclear Engineering and Design, 150, 265-274.
- Jonsén, P. ve Haggblad, H.-A., 2005. Modelling and Numerical Investigation of The Residual Stress State in a Green Metal Powder Body, Powder Technology, 155, 196-208.
- Jonsén, P., Pålsson, B. ve Häggblad, H.-Å., 2011. Modelling of Internal Stresses in Grinding Charges; In proceedings of Particle-based Methods – Fundamentals and Applications Conference 2011; Oñate, E. & Owen, D. R. J. (eds.). Barcelona: CIMNE, 757-768 12.
- Joun, M.S., Moon, H.G., Choi, I.S., Lee, M.C. ve Jun, B.Y., 2009. Effects of Friction Laws on Metal Forming Processes, Tribology International, 42, 311-319.
- Kalpakjian, S., 2010. Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th Ed., Pearson Education, New Jersey.
- Karishna, B.V., Vebugopal, P. ve Rao, K.P., 2004. Interferences on Plastic Properties and Coefficient of Friction During Simultaneous Compression Deformation of Dissimilar Sintered Powder Metallurgical Preforms, Materials Science and Technology, 20, 323.
- Keshavarz, Sh., Khoei, A.R. ve Khaloo, A.R., 2008. Contact Friction Simulation in Powder Compaction Process Based on The Penalty Approach, Materials and Design, 29, 1199-1211.
- Khan, A.S. ve Huang S., 1995. Continuum Theory of Plasticity, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Khoei, A., 2010. Computational Plasticity in Powder Forming Processes, Elsevier, Cornwall.
- Khoei, A., 2002. Numerical Simulation of Powder Compaction Processes Using an Inelastic Finite Element Analysis, Materials and Design, 23, 523-529.
- Khoei, A., Azami, A.R. ve Azizi, S., 2007. Computational Modelling of 3D powder Compaction Processes, J. of Materials Processing Technology, 185, 166-172.
- Khoei, A., Shamloo, A. ve Azami, A.R., 2006. Extended Finite Element Method in Plasticity Forming of Powder Compaction with Contact Friction, International Journal of Solids and Structures, 43, 5421-5448.
- Khoei, A., ve Lewis, R., 2002. H-Adaptive Finite Element Analysis for Location Phenomena with Reference to Metal Powder, Finite Element in Analysis and Design, 38, 503-519.

- Khoei, A., Biabanaki, S.O.R., Vafa, A.R., Yadegaran, I. ve Keshavarz, Sh., 2009. A New Computational Algorithm For Contact Friction Modelling of Large Plastic Deformation in Powder Compaction Process, International Journal of Solids and Structures, 43, 287-310.
- Khoei, A.R. ve Mousavi, S.M.T., 2010. Modeling of Large Deformation – Large Sliding Contact via The Penalty X-FEM Technique, Computational Materials Science, 48, 471-480.
- Khoei, A., Biabanaki, S.O.R. ve Parvaneh, S., 2013. 3D Dynamic Modeling Of Powder Forming Processes Via A Simple And Efficient Node-To-Surface Contact Algorithm, Applied Mathematical Modelling, 37, 443-462.
- Kim, H.S., Estrin, Y., Gutmanas, E.Y. ve Rhee, C.K., 2001. A Constitutive Model For Densification of Metal Compacts: The Case of Copper, Materials Science and Engineering A, 307, 67-73.
- Kim, K.T. ve Cho, J.H., 2001. A Densification Model for Mixed Metal Powder Under Cold Compaction, International Journal of Mechanical Sciences, 43, 2929–2946.
- Kodama, M., Bharadwaj, R., Curtis, J., Hancock, B. ve Wassgren, C., 2009. Force Model Considerations For Glued-Sphere Discrete Element Method Simulations, Chemical Engineering Science, 64, 3466-3475.
- Kozicki, J. ve Donzé, F.V., 2008. A New Open-Source Software Developed for Numerical Simulations Using Discrete Modeling Methods, Computational Methods Applied Mechanics Engineering. 197, 4429–4443.
- Krok, A., Peciar, M. ve Fekete, R., 2014. Numerical Investigation Into The Influence of The Punch Shape on The Mechanical Behavior of Pharmaceutical Powders During Compaction, Particuology, xxx(2014)xxx xxx
- Kruyt, N.P., Agnolin, I., Luding, S. ve Rothenburg, L., 2009. Micromechanical Study of Elastic Moduli of Loose Granular Materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 58, 1286–1301.
- Kwon, Y.S., Chung, S.H., Sanderow, H.I., Kim, K. ve German, R.M., 2004. Numerical Analysis and Optimization of Die Compaction Process. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ 37-50.
- Kumar, N. ve Shukla, M., 2012. Finite Element Analysis of Multi-Particle Impact on Erosion in Abrasive Water Jet Machining of Titanium Alloy, Journal of Computational and Applied Mathematics, 236, 4600-4610.
- Labra, C., Oñate, E., Zárate, F. ve Rojek, J., 2013. Modelling and Simulation of The Effect of Blast Loading on Structures Using an Adaptive Blending of Discrete and Finite Element Methods; Particle-Based Methods II: Fundamentals and Applications: Proceedings of the II Int. Conference on Particle-Based Methods; 457-465.

- Larsson, P.L., 2008. Similarity Methods For Analysing Indentation Contact Problems-Advantages and Disadvantages, Journal of Materials Processing Technology, 202, 15-21.
- Lee, S.C. ve Kim, K.T., 2007. A Study on The Cap Model For Metal and Ceramic Powder Under Cold Compaction, Materials Science and Engineering A, 445-446, 163-169.
- Lee, K.H., Lee, J.M. ve Kim, B.M., 2009. Densification Simulation of Compacted Al Powders Using Multi-Particle Finite Element Method, Transaction Nonferrous Metals Society of China, 19, 68-75.
- Levanov, A.N., 1997. Improvement of Metal Forming Processes by Means of Useful Effects of Plastic Friction, Journal of Materials Processing Technology, 72, 314-316
- Lewis, R.W., Gethin, D.T., Yang, S.X. ve Rowe, R.C., 2005. A Combined Finite-Discrete Element Method For Simulating Pharmaceutical Powder Tableting, International Journal For Numerical Methods in Engineering, 62, 853-869.
- Liu, M., Shao, J. ve Li, H., 2013. Numerical Simulation of Hydro-Elastic Problems with Smoothed Particle Hydrodynamics Method, Journal of Hydrodynamics, 25(5), 673-682.
- Lucy, L.B., 1977. A Numerical Approach to the Testing of Fusion Process, Astronomical Journal, 88, 1013-1024.
- Marc 2012. Volume A (Theory and User Information), MSC Software Corporation, SantaANA CA, 92707 USA.
- Malone, K.F. ve Xu, B.H., 2008. Determination of Contact Parameters For Discrete Element Method Simulations of Granular Systems, Institute of Particle Science and Engineering, Science Direct, Particuology, 6, 521-528.
- Marketos, G. ve Bolton, M.D., 2009. Compaction Bands Simulated in Discrete Element Models, Journal of Structural Geology, 31, 479-490.
- Martin, C., Bouvard, D. ve Shima, S., 2003. Study of Particle Rearrangement During Powder Compaction By Discrete Element Method, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 51, 667-693.
- Martin, C.L., 2004. Elasticity, Fracture and Yielding of Cold Compacted Metal Powders, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 52, 1691-1717.
- Martin, C., ve Bouvard, D., 2006. Discrete Element Simulations of the Compaction of Aggregated Ceramic Powders, The American Ceramic Society, 89, 11, 3379-3387.
- McCarthy, J.J., Jasti, V., Marinack, M. ve Higgs, C.F., 2010. Quantitative Validation of The Discrete Element Method Using an Annular Shear Cell, Powder Technology, 203, 70-77.

- Mittal, B. ve Puri, V.M., 2006. Rate-Dependent Elasto-Viscoplastic Constitutive Model For Industrial Powders. Part 2: The Model Evaluation, Particulate Science and Technology, 24, 39-57.
- Munjiza, A., Owen, D.R.J. ve Bicanic, N., 1995. A Combined Finite-Discrete Element Method in Transient Dynamics of Fracturing Solids, Engineering Computations, 12, 2, 145-174.
- Munjiza, A., 2004. The Combined Finite-Discrete Element Method, John Wiley&Sons, Ltd., London.
- Munjiza, A., 2008. Modelling Fracture and Fragmentation Using Open Source FEM/DEM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2, 1007-1030.
- Narayanasamy, R., Ponalagusamy, R. ve Subramanian K.R., 2001. Generalised Yield Criteria of Porous Sintered Powder Metallurgy Metals, Journal of Materials Processing Technology, 110, 182-185.
- Navarro, V., Candel, M., Barenca, A., Yustres, A. ve Garcı́a B., 2007. Optimisation Procedure for Choosing Cam Clay Parameters, Computers and Geotechnics, 34, 524–531.
- Nor, S.S.M., Rahman, M.M., Tarlochan, F., Shahida, B. ve Ariffin, A.K., 2008. The Effect of Lubrication in Reducing Net Friction in Warm Powder Compaction Process, Journal of Materials Processing Technology, 207, 118-124.
- Nwose, E.N., Pei, C. ve Wu, C.Y., 2012. Modelling Die Filling With Charged Particles Using DEM/CFD, Particuology, 10, 229-235.
- Oger, L. ve Savage, S.B., 1999. Smoothed Particle Hydrodynamics for Cohesive Grains, Computer Methods Applied Mechanical Engineering, 180, 169-183.
- Ortiz, M. ve Pandolfi, A., 2004. A Variational Cam-Clay Theory for Plasticity, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 193, 2645–2666.
- Park, J., 2007. A Yield Function for Copper Powder in Compaction, Journal of Materials Processing Technology, 187-188, 672-675.
- Pavier, E. ve Doremus, P., 1999. Triaxial Characterizations of Iron Powder Behaviors, Powder Metallurgy, 42, 4, 345-352.
- Peng, L., Lai, X., Lee, H.-J., Song, J.-H. ve Ni, J., 2010. Friction Behavior Modelling and Analysis in Micro/Meso Scale Metal Forming Process, Materials Design, 31, 1953-1961.
- Peric, D. ve Ayari, M., 2002. On the Analytical Solutions For the Three-Invariant Cam-Clay Model, International Journal of Plasticity, 18, 1061-1082.

- Petersen, S.B., Martins, P.A.F. ve Bay, N., 1997. Friction in Bulk Metal Forming: A General Friction Model vs. The Law of Constant Friction, Journal of Materials Processing Technology, 66, 186-194.
- Pokorska, I, 2008. Viscoplastic Properties of Pure Iron, Copper and Aluminum Powders, Powder Metallurgy, 51, 4, 361-367.
- Procopio, A.T., Zavalingos, A. ve Cunningham J.C., 2003. "Analysis of The Diametrical Compression Test and The Applicability to Plastically Deforming Materials", Journal of Materials Science, 38, 3629-3639.
- Procopio, A. ve Zavalingos, A., 2005. Simulation of Multi-Axial Compaction of Granular Media From Loose to High Relative Densities, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53, 1523-1551.
- Radchenko, A.K., 2004. Mechanical Properties of Unsintering Pressings. I. Phenomenological Relations For Unsintered Pressing Strength, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 43, 9-10.
- Ransing, R.S., Gethin, D.T., Khoei, A.R., Mosbah, P. ve Lewis, R.W., 2000. "Powder Compaction Modeling Via Discrete and Finite Element Method", Materials and Design, 21, 263-269.
- Redanz, P., 1999. Numerical Modeling of The Powder Compaction of a Cup, Journal of Mechanics and Solids, 18, 399-413.
- Renouf, M., Massi, F., Fillot, N. ve Saulot, A., 2011. Numerical Tribology of a Dry Contact, Tribology International, 44, 834-844.
- Sakaue, T., ve Yoshimaru, K., 2005. Study of Fine Copper Powder For Electrodes of Chip Devices, Carts Asia, 11-13.
- Schmutz, J.-E., Fuchs, H. ve Hölscher, H., 2010. Measuring Wear by Combining Friction and Dynamic Force Microcopy, Wear, 268, 526-532.
- Senthilvela, T., Raghukandan, K. ve Venkatraman A., 2003. Modelling of Process Parameters on the Working of P/M Copper Preforms, Journal of Materials Processing Technology 142, 767-772.
- Shamsi, M.M.M. ve Mirghasemi, A.A., 2012. Numerical Simulation of 3D Semi-Real-Shaped Granular Particle Assembly, Powder Technology, 221, 431-446.
- Shilko, E.V., Smoli A.Y., Astafurov S.V. ve Psakhie S.G., 2011. Development of Discrete Element Approach to Modeling Heterogeneous Elastic-Plastic Materials and Media, II International Conference on Particle –Based Methods-Fundamentals and Applications, PARTICLES, 403-413.

- Shima, S., Kotera, H. ve Ujie, Y., 1995. A Study of Constitutive Behaviour of Powder Assembly by Particulate Modeling, Materials Science Research International, 1, 3, 163-168.
- Shima, S.; ve Oyane, M.; 1976. "Plasticity Theory for Porous Metals", International Journal of Mechanical Science, 18, 285-291.
- Shuang, W., Zhoushun, Z. ve Shan, Z., 2010. Numerical Simulation of Particle Flow for High Velocity Compaction Based on Discrete Element Method, American Institute of Physics 978-0-7354-0778.
- Sinha, T., Curtis, J.S., Hancock, B.C. ve Wasgreen, C., 2010. A Study on The Sensitivity of Drucker-Prager Cap Model Parameters During The Decompression Phase of Powder Compaction Simulations, Powder Technology, 198, 315-324.
- Sinka, I.C., Cunningham, J.C. ve Zavaliangos, A., 2003. The Effect of Wall Friction in The Compaction of Pharmaceutical Tablets With Curved Faces: A Validation Study of the Drucker-Prager Cap Model, Powder Technology 133, 33– 43.
- Sinka, I.C., Cunningham, J.C. ve Zavalingos, A., 2004. "Analysis of Tablet Compaction. II.Finite Element Analysis of Density Distributions in Convex Tablets", Journal of Pharmaceutical Sciences, 93, 8, 2040-2053.
- Sinka, I.C., 2007. Modelling Powder Compaction, KONA (Hosokawa Powder Technology Foundation, Japan), 254-22.
- Skrinjar, O. ve Larsson, P., 2004. On Discrete Element Modelling of Compaction of Powders With Size Ratio, Computational Materials Science, 31, 131-146.
- Sofuoglu, H. ve Rasty, J., 2000. Flow Behavior of Plasticine Used in Physical Modeling of Metal Forming Processes, Tribology International, 33, 523-529.
- Soroush, A., Ferdowsi, B., 2011. Three Dimensional Discrete Element Modeling of Granular Media Under Cyclic Constant Volume Loading: A Micromechanical Perspective, Powder Technology, 212, 1-16.
- Song, Y., Li. Y., Zhou, Z., Zheng, Z., ve Chen, P., 2010. Improved Model And 3D Simulation of Densification Process For Iron Powder, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20, 1470-1475.
- Storåkers, B., Fleck, N.A. ve McMeeking, R.M., 1999. The Viscoplastic Compaction of Composite Powders, Journal of Mech.Phys.Solids, 47, 785–815.
- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S. ve Liu, M.D., 2010. Modified Structured Cam Clay: A Generalized Critical State Model for Destructured, Naturally Structured and Artificially Structured Clays, Computers and Geotechnics, 37, 956-968.

- Sugino, T. ve Yuu, S., 2002. Numerical Analysis of Fine Powder Flow Using Smoothed Particle Method and Experimental Verification, Chemical Engineering Science, 57, 227-237.
- Sun, X.-K. ve Kim K.T., 1997. Simulation of Cold Die Compaction Densification behavior of Iron and Copper Powders by Cam Clay Model, Powder Metallurgy, 40, 3, 193.
- Sun, X.K., Chen, S.J., Xu, J.Z., Zhen, L.D. ve Kim, K.T., 1999. Analysis of Cold Compaction Densification Behaviour of Metal Powders, Materials Science and Engineering A, 267, 43-49.
- Sweeney, S.M. ve Martin, C.L., 2003. Pore Size Distributions Calculated From 3-D Images of DEM-Simulated Powder Compacts, Acta Materialia, 51, 16, 3635-3649.
- Szarf, K., Combe G., ve Villard, P., 2011. Polygons vs. Clumps of Discs: A Numerical Study of The Influence of Grain Shape on The Mechanical Behaviour of Granular Materials, Powder Technology, 208, 279-288.
- Tan, X., 2002. Comparison of Friction Models in Bulk Metal Forming, Tribology International, 35, 385-393.
- Tanner, A.B. ve McDowell, D., 1999. Deformation, Temperature and Strain Rate Sequence Experiments on OFHC Cu, International Journal of Plasticity, 15, 375-399.
- Tien, Y.-M., Wu, P.-L., Huang, W.-H., Kuo, M.-F. ve Chu, C.-A., 2007. Wall Friction Measurement and Compaction Characteristics of Bentonite Powders, Powder Technology, 173, 140-151.
- Tomov, B., Minev, R., Radev, R. ve Gagov, V., 2003. About Input Data Selection for The FEM Analysis of Bulk Forming, Journals of Materials Processing Technology, 133, 199-202
- Veganzones, M., Camacho, A.M., Garcia-Prada, J.C. ve Sebastian, M.A., 2014. Contact Pressure Profiles in Axisymmetric Compression Considering Friction and Geometrical Factors, Procedia Engineering, 69, 72-80.
- Vlachos, N. ve Chang, I.T.H., 2011. Investigation of Flow Properties of Metal Powders From Narrow Particle Size Distribution to Polydisperse Mixtures Through an Improved Hall-Flowmeter, Powder Technology 205, 71-80.
- Vyal, E.Y. ve Laptev, A.M., 2002. Strength of Unsintered Powder Compacts With Axial and Radial Loading, Powder Metallurgy and Powder Ceramics, 41, 5-6.
- Wang, X., Liu, K. ve Changfu, Y., 2011. Drag Force Model Corrections Based on Nonuniform Particle Distributions in Multi-Particle Systems, Powder Technology, 209, 112-118.

- Wang, C., Shan, D., Guo, B., Xu, J. ve Zhang, H., 2013. Effect of Nano-Crystals at Surfaces Induced by Ion Beam Irradiation on The Tribological Behavior in Microforming, Vacuum, 89, 267-270.
- Wang, C., Guo, B., Shan, D., Zhang, M. ve Bai, X., 2014. Tribological Behaviors in Microforming Considering Microscopically Trapped Lubricant at Contact Interface, Int.J.Adv.Manuf. Tech., 71, 2083-2090.
- Wanheim, T., Bay, N. ve Petersen, A.S., 1974. A Theoretically Determined Model for Friction in Metal Working Processes, Wear, 28, 251-258.
- Wiacek, J., Molenda, M., Horabik, J. ve Ooi, J., 2011. Influence of Grain Shape and Intergranular Friction on Material Behavior in Uniaxial Compression: Experimental and DEM Modeling, Powder Technology, 217, 435-442.
- Xin, X.J. , Jayaramana, P., Daehn, G.S. ve Wagoner, R.H., 2003. Investigation of Yield Surface of Monolithic and Composite Powders by Explicit Finite Element Simulation, International Journal of Mechanical Sciences, 45, 707–723.
- Yamakawa, Y., Hashiguchi, K. ve Ikeda, K., 2010. Implicit Stress-Update Algorithm For Isotropic Cam-Clay Model Based on the Subloading Surface Concept at Finite Strain, International Journal of Plasticity, 26, 634-658.
- Zavalingos, A., Dec, R.T. ve Komarek, R.K., 2003. Analysis of Powder Processing in the Roller Press Using Finite Element Modeling, XXII Int. Mineral Processing Congress.
- Zavalingos, A., 2002. Constitutive Models For The Simulation of P/M Processes, The International Journal of Powder Metallurgy, 38, 2, 27-37.
- Zhang, B., Jain, M., Zhao, C., Bruhis, M., Lawcock, R. ve Ly, K., 2010. Experimental Calibration of Density-Dependent Modified Drucker-Prager/Cap Model Using an Instrumented Cubic Die For Powder Compact, Powder Technology, 204, 27-41.
- Zhang, X., Krabbenhoft, K., Pedroso, D.M., Lyamin A.V., Sheng, D., Vicente da Silva, M. ve Wang, D., 2013. Particle Finite Element Analysis of Large Deformation and Granular Flow Problems, Computers and Geotechnics, 54, 133-142.
- Zheng, W., Wang, G., Zhao, G., Wei, D. ve Jiang, Z., 2013. Modeling and Analysis of Dry Friction in Micro-Forming of Metals, Tribology International, 57, 202-209.
- Zohdi, T.I., Kachanov, M. ve Sevostianov, I., 2002. On Perfectly Plastic Flow in Porous Material, International Journal of Plasticity 18, 1649–1659.
- Zouain, N., Pontes, I. ve Vaunat, J., 2010. Potentials for Modified Cam Clay Model, European Journal of Mechanics A/Solids, 29, 327-336.

7.EKLER

Ek-1

MIBODY(1)	Kullanıcı eleman ya da düğüm noktası numarası
MIBODY (2)	Elemanın kenar numarası,
MIBODY (3)	Elemanın kenarındaki düğüm noktası numarası
MIBODY (4)	program eleman ya da düğüm noktası numarası
X	Sürtünmenin hesaplandığı temas noktası güncel koordinatları
FN	Normal Gerilme
VREL(1)	Birinci teğet doğrultusundaki kayma hızı
VREL(2)	İkinci teğet doğrultusundaki kayma hızı
TEMP(1)	Temas noktası sıcaklığı
TEMP(2)	Temas noktası voltajı
YIEL	Temas noktasındaki akma gerilmesi
TIME	Zaman
INC	Adım Numarası
NSURF	Sürtünme hesaplarının yapıldığı kenara temas halindeki yüzey
O2OR3	İki boyutlu analiz için 2, üç boyutlu analiz için 3
FRIC	Sürtünme katsayısı ya da faktörü

Ek-2

```

subroutine ufric(mibody,x,fn,vrel,temp,yiel,fric,time,inc,nsurf)
implicit real*4 (a-h,o-z)
dimension mibody(4),x(2),vrel(1),temp(2)
c-----
c Wanheim/Bay Sürtünme Modeli
c Tn:          Sürtünme Gerilmesi  MPa
c k:          Saf Kaymada Akma Gerilmesi  MPa
c sigma:      Eşdeğer Akma Gerilmesi  MPa
c f:          Sürtünme Faktörü
c qp, Tnp:    Sürtünme Faktörüne bağlı parametreler
c-----
OPEN (3,FILE='model1_stres_10.TXT')
if(inc.eq.1) then
FRIC=0.1d0
else
yiel=30.89d0
ys=yiel/dsqrt(3.0d0)
sigma=yiel
f=0.3d0
A=1.0d0+dasin(1.0d0)+acos(f)+dsqrt(1.0d0-f**2.0d0)
B=dsqrt(3.0d0)*(1+(dsqrt(1.0d0-f)))
qp=(sigma)*(A/B)
D=1.0d0-(dsqrt(1.0d0-f))
Tnp=ys*D
if(fn.le.qp) then
Tn=ys*D*((fn/sigma)/(A/B))
else
Tn=ys*(D+(f-D)*(1.0d0-exp((D*((A/B)-(fn/sigma))/((A/B)*(f-D))))))
end if
FRIC=abs(Tn/fn)
end if
if (mibody(1).gt.8608.and.mibody(1).lt.9083) then
Ek-2'nin devamı
WRITE (3,*) 'inc:', inc
WRITE (3,*) 'mb:', mibody
WRITE (3,*) 'fr:', fric
WRITE (3,*) '--'
else if (mibody(1).gt.39362.and.mibody(1).lt.39853) then
WRITE (3,*) 'inc:', inc
WRITE (3,*) 'mb:', mibody
WRITE (3,*) 'fr:', fric
WRITE (3,*) '--'
else if (mibody(1).gt.56503.and.mibody(1).lt.57020) then
WRITE (3,*) 'inc:', inc
WRITE (3,*) 'mb:', mibody
WRITE (3,*) 'fr:', fric
WRITE (3,*) '--'

```

```
end if  
return  
end
```

Ek-3

```

      subroutine ufric(mibody,x,fn,vrel,temp,yiel,fric,time,inc,nsurf)
      implicit real*4 (a-h,o-z)
      dimension mibody(4),x(2),vrel(1),temp(2)
c-----
c  Levanov Sürtünme Modeli
c  Tn:           Sürtünme Gerilmesi  MPa
c  k:           Saf Kaymada Akma Gerilmesi  MPa
c  sigma:       Eşdeğer Akma Gerilmesi  MPa
c  f:           Sürtünme Faktörü
c  qp, Tnp:     Sürtünme Faktörüne bağlı parametreler
c-----
      OPEN (3,FILE='levo_mod1_7.TXT')
      if(inc.eq.1) then
      FRIC=0.1d0
      else
      yiel=30.89d0
      ys=Yiel/sqrt(3.0d0)
      sigma=yiel
      f=0.3d0
      Tn=ys*f*(1.0d0-(dexp((-1.25d0)*abs(fn/sigma))))
      FRIC=abs(Tn/fn)
      end if
      if (mibody(1).gt.8608.and.mibody(1).lt.9083) then
      WRITE (3,*) 'inc:', inc
      write (3,*) 'mb:', mibody
      write (3,*) 'fr:', fric
      WRITE (3,*) '--'
      else if (mibody(1).gt.39362.and.mibody(1).lt.39853) then
      WRITE (3,*) 'inc:', inc
      write (3,*) 'mb:', mibody
      write (3,*) 'fr:', fric
Ek-3'ün devamı
      WRITE (3,*) '--'
      else if (mibody(1).gt.56503.and.mibody(1).lt.57020) then
      WRITE (3,*) 'inc:', inc
      write (3,*) 'mb:', mibody
      write (3,*) 'fr:', fric
      WRITE (3,*) '--'
      end if
      return
      end

```

ÖZGEÇMİŞ

31/07/1976 tarihinde Almanya'nın Nürnberg kentinde doğmuş olan Faruk Güner ilk öğrenimine Trabzon İskenderpaşa İlkokulunda başladı. Trabzon Anadolu Lisesindeki orta öğrenimini tamamladıktan sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 1999 yılında mezun oldu. Askerlik hizmetini TSK Eğitim Doktrin Komutanlığında 273. Kısa dönem çavuş olarak 2000 yılında yaptı. 2000-2007 yılları arasında özel sektörde çalıştıktan sonra 2007 yılında yüksek lisans eğitimine Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde başladı. Yüksek lisans çalışmalarını, T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'nın SAN-TEZ projeleri kapsamında "Çay Fabrikalarında Yaş Çay Taşımada Kullanılacak Olan Vakumlu Sistemin, Prototipinin Tasarlanması, İmalatı ve Performans Özelliklerinin İncelenmesi" isimli projede tamamladı. Doktora çalışmalarına başladığı 2010 yılında "Akıllı Boyler" isimli Teknogirişim projesini aldı. Evli ve iki çocuklu olan Faruk Güner 2010 yılında başladığı Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümündeki öğretim görevliliğine devam etmektedir.