

**BİÇİMLENDİRME SINIR DOĞRULARI TEKNİĞİ İLE  
KİLLERİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE  
YÜZEY KOŞULLARININ ETKİSİ**

**Mustafa KILINÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2005**

**ANKARA**

Mustafa KILINÇ tarafından hazırlanan BİÇİMLENDİRME SINIR DOĞRULARI  
TEKNİĞİ İLE KİLLERİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE YÜZEY  
KOŞULLARININ ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu  
onaylarım.

Doç. Dr. Süleyman TEKELİ

Yrd. Doç. Dr. Bülent BARAN

Tez Yöneticileri

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi  
olarak kabul edilmiştir.

Başkan : \_\_\_\_\_

Üye : \_\_\_\_\_

Üye : \_\_\_\_\_

Üye : \_\_\_\_\_

Üye : \_\_\_\_\_

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

# BİÇİMLENDİRME SINIR DOĞRULARI TEKNİĞİ İLE KİLLERİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE YÜZEY KOŞULLARININ ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa KILINÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2005

## ÖZET

Bu çalışmada, döküm ve presleme yöntemleri ile şekillendirme yapan seramik fabrikalarından alınan değişik mineral içeriğine sahip, üç farklı kil kullanılmıştır. Killerin mineral içerikleri ve karakteristik özellikleri X ışını kırınımı analizi, diferansiyel termal analiz, termal gravimetrik analiz, kimyasal analiz ve tane boyutu dağılımı analizleri yapılarak belirlenmiştir.

Biçimlendirilebilirlik; maksimum deformasyon miktarı ile akma geriliminin çarpımı olarak tanımlanır. Bu çalışmada akma gerilimi basma deneyi ile elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinden % 0,2 offset kuralı ile sabit hızda (20mm/min) belirlenmiştir.

Maksimum deformasyon miktarı ise basma deneyinin metallere başarı ile uygulanan biçimlendirme sınır doğruları (BSD), (Forming Limit Line) yöntemini killere uyarlayarak belirlenmiştir. BSD'nın elde edilmesinde kullanılan kil numuneler basit bir silindir kalıp içerisine konulan çamur haldeki kilin piston kullanarak elle sıkıştırılmasıyla elde edilmiştir.

Bu çalışmada, numunelerin boy/çap (L/D) ilişkisi sabit tutulup 1 olarak alınmış, yalnızca deformasyon sırasında basma deneyi numunelerinin değme

yüzeylerindeki sürtünme koşulları değiştirilmiştir. Numunelerin deformasyon sırasında basma kuvvetlerinin uygulandığı yüzeyler naylon, mazot ve zımpara kullanılarak farklı sürtünme koşulları oluşturulmuş ve ilk çatlak görülünceye kadar deformasyon gerçekleştirilmiştir. Böylece L/D ilişkisi yerine değişik yüzey koşullarının BSD'na etkisi ve elde edilen BSD'nın yaygınlığı araştırılmıştır. BSD'nın çekme eksenini kestiği nokta maksimum deformasyon miktarı (MDM) olarak belirlenmiştir.

MDM'nın nem ile değişimi, akma gerilimlerinin nem ile değişimi ve bu iki değerlerin çarpımlarından elde edilen değerlerin nem ile değişimi grafikleri farklı yüzey sürtünme koşullarında elde edilerek optimum nem miktarı her kil için ayrı ayrı belirlenmiştir.

**Bilim Kodu** : 710  
**Anahtar Kelimeler** : Biçimlendirme Sınır Doğrusu, Biçimlendirme, Yüzey koşulları, Maksimum Deformasyon Miktarı, Killerin Plastikliği, Gerilim, Gerinim, Akma Noktası  
**Sayfa** : 111  
**Tez Yöneticileri** : Doç. Dr. Süleyman TEKELİ  
Yrd. Doç. Dr. Bülent BARAN

**EFFECT OF SURFACE CONDITIONS ON THE WORKABILITY OF  
CLAYS BY FORMING LIMIT LINE (FLL) TECHNIQUE**

**(M.Sc.Thesis)**

**Mustafa KILINÇ**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**December 2005**

**ABSTRACT**

**In this study, three different clay with various mineral contents, taken from ceramic factories shaping ceramic parts by slip casting and die pressing, were used. The characteristic properties and mineral contents of clays were determined by X-ray diffraction analysis, differential thermal analysis, thermal gravimetric analysis, chemical analysis and particular size distribution analysis.**

**The workability is defined as maximum deformation amount x yield strength. In this study, the yield strength was determined from strain-stress graphs using 0,2 % Offset rule at a constant strain rate (20mm/min).**

**Maximum deformation amount determined by Forming Limit Line (FLL) method, which is successfully practiced to metals under compression, was applied to clays. The clay specimens used to obtain FLL were produced by pressing plastic state clay manually through a cylinder by means of a piston.**

**In this study, length/diameter, (L/D) ratio was kept constant and taken as 1. At the constant (L/D) ratio of 1, different friction surfaces were developed using diesel oil, nylon and sand paper at the surfaces exposed to compression loads during deformation and deformation was continued until the first crack was seen. Thus, instead of (L/D) ratio, the effect of different surface conditions on**

**FLL was investigated. The point at which FLL intersects the tensile axis was obtained as maximum deformation amount.**

**Optimum moisture amount of each clay was determined at different friction surface conditions by drawing the graphs as a function of the change of maximum deformation amount, yield strength and a combination of both values with moisture.**

**Science Code : 710**

**Key Words : Forming Limit Line, Formability, Surface Friction Condition, Maximum Deformation Amount, Clay Workability, Strain, Stress, Yield Point**

**Page Number : 111**

**Adviser : Assoc. Prof. Dr. Süleyman TEKELİ  
Assist. Prof. Dr. Bülent BARAN**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında emeği geçen değerli hocalarım Doç. Dr. Süleyman TEKELİ'ye ve Yrd. Doç. Dr. Bülent BARAN' a , deneysel çalışmalarında imkanlarını sunan 2001 K 120590 Nolu DPT Projesi desteğiyle kurulan Gazi Üniversitesi İleri Malzeme ve Boya Araştırma Merkezine (GİMBAM'a), deneysel çalışmalarında her zaman destek olan Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Metin GÜRÜ'ye ve çalışmalarında yardımcı olan mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ve, hiçbir zaman moral desteğini esirgemeyen sevgili eşim İlknur KILINÇ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEZİN DAYANDIĞI KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Killerin Kristal Yapıları.....	4
2.1.1. Temel kavramlar.....	4
2.1.2. Killerin kristal yapılarındaki temel yapı birimleri ve bazı minerallerin kristal yapıları.....	5
2.2. Killerin Şekillendirilmesi.....	10
2.2.1. Dökümle şekillendirme.....	14
2.2.2. Toz presleme yöntemleri.....	17
2.3. Killerin Şekillendirilmesinde Rol Oynayan Kuvvetler.....	20
2.4. Plastikliğin Tayini.....	23
2.5. Akma Sınırı Gerilimi Belirleme Yöntemleri.....	24
2.5.1. Koni batırma yöntemi.....	24
2.5.2. Ekstrüder.....	25
2.5.3. Basma deneyi.....	27



**Sayfa**

2.5.4. Burma deneyi.....	28
2.6. Killerin Plastikliğine Etki Eden Değişkenler.....	29
2.7. Plastiklik Belirleme Yöntemleri.....	29
2.7.1. Dolaylı yöntemler.....	29
2.7.2. Pfefferkorn yöntemi.....	30
2.7.3. Atterberg plastiklik deneyi.....	30
2.7.4. Rieke göstergesi.....	33
2.7.5. Vicat iğnesi yöntemi.....	33
2.7.6. Diğer özelliklere dayanan indirekt yöntemler.....	33
2.7.7. Bancroft deneyi.....	34
2.7.8. Direkt yöntemler.....	34
2.8. Metallerde Plastik Şekillendirme Yöntemleri.....	35
2.8.1. Plastik şekil verme yöntemleri.....	35
2.8.2. Birim şekil değiştirme kavramı.....	39
2.8.3. Plastik deformasyonda gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri .....	41
2.8.4. Kayma.....	43
2.8.5. Plastik deformasyonu etkileyen faktörler.....	46
2.8.6. Dövülebilme kabiliyeti.....	50
2.8.7. Biçimlendirme sınır diyagramı.....	56
3. MALZEME VE METOT.....	61
3.1. Deneylerde Kullanılan Killer .....	61
3.2. Hammaddelerin Deneyler İçin Hazırlanması.....	61
3.3. Hammaddelerin Karakterizasyonu.....	61
3.3.1. Tane boyutu dağılımı ve elek analizi.....	62

**Sayfa**

3.3.2. Killerin DTA ve TGA analizi eğrileri.....	66
3.3.3. Killerin XRD analiz sonuçları.....	69
3.3.4. Deneylerde kullanılan killerin kimyasal analizi.....	75
3.4. Biçimlendirilebilirliğin Belirlenmesinde Yapılan Deneyler .....	75
3.4.1. Biçimlendirme sınır doğruları ve maksimum deformasyon miktarının belirlenmesi.....	75
3.4.2. Akma noktaları ve akmanın % nemle değişim grafiğinin elde edilmesi.....	78
3.4.3. Optimum nemin bulunması (BG).....	79
3.4.4. Pfeefferkorn plastiklik suyu.....	79
4. DENEYSEL BULGULAR .....	80
4.1. Biçimlendirme Sınır Doğrularının (BSD) Gösterimi.....	80
4.2. Akma Noktasının Belirlenmesi.....	92
4.3. Maksimum Deformasyon Miktarları.....	94
4.4. Akma Noktası % Nem İle Değişimi.....	96
4.5. Biçimlendirme Göstergesinin % Nemle Değişim Grafiği.....	98
4.6. Pfeefferkorn Plastiklik Suyu.....	100
5. TARTIŞMA.....	102
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	107
6.1. Sonuç.....	107
6.2. Öneriler.....	108
KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	111

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Kil minerallerinde en çok bulunan anyon ve katyonların çapları ve çap oranları.....	4
Çizelge 2.2. Seramikte kullanılan minarelerdeki katyonların oksijene göre çap ilişkisi .....	5
Çizelge 2.3. Killerin şekillendirme yöntemlerinin basınç ve nem ile ilişkisi.....	11
Çizelge 2.4. Çeşitli kil minerallerinin Atterberg Ps,Ss değerleri (a), (b) değişik yörelerden alınan minerallerle yapılan sonuçları göstermektedir.....	32
Çizelge 3.1. Hammaddelerin ön teknolojik incelenmesi.....	62
Çizelge 3.2. Killerin 65 mesh altı tane boyutu dağılımının karşılaştırılması.....	66
Çizelge 3.3. Tuvka kilinin XRD analiz değerlendirme tablosu.....	70
Çizelge 3.4. Türkmen kilinin XRD analiz değerlendirme tablosu.....	72
Çizelge 3.5. Pembe kaolenin XRD analiz değerlendirme tablosu.....	74
Çizelge 3.6. Killerin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlıkça).....	75
Çizelge 4.1. Üç kilden elde edilen maksimum deformasyon miktarları.....	105

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Silisyumun tetrahedral yapısı.....	6
Şekil 2.2. Disilikat yapıları.....	6
Şekil 2.3. Metasilikat yapıları .....	6
Şekil 2.4. Metasilikat yapılarının birbirleriyle birleşmesinden oluşan tabakalar.....	7
Şekil 2.5. Alüminyum oktahedralinin kristal yapısı.....	7
Şekil 2.6. Gibbsite mineralinin kristal yapısı.....	8
Şekil 2.7. (a) Kaolen mineralinin kristal yapısı, (b) Kaolen minerali kristallerinin şematik görüntüsü, (c) Kaolen mineralinin elektron mikroskop görüntüsü.....	8
Şekil 2.8. Üç tabakalı mineral (2 Si Tetrahedrali + 1 Al Oktahedrali).....	9
Şekil 2.9. Üç tabakalı mineral yapının tekrarı.....	10
Şekil 2.10. Nem miktarının değişimine göre seramik sanayinde şekillendirmede kullanılan çamur kıvamları.....	12
Şekil 2.11. Killere uygulanan gerilim gerinim grafiklerinin nem miktarı ile değişimi.....	13
Şekil 2.12. Basit kalıp düzeneği.....	17
Şekil 2.13. İzositatik presleme için kullanılan lastik kılıf.....	19
Şekil 2.14. Kaolen mineralinin altıgen prizma şeklindeki görüntüsü ve yüzey yükleri.....	20
Şekil 2.15. Kaolen minerallerinin yüzey kenar etkileşmesi sonucu oluşan yapı(card house yapısı).....	21
Şekil 2.16. Killere yüzdürücü kimyasalların etkisi.....	22
Şekil 2.17. Kaolen süspansiyonunun viskozitesinin, pH'ının ve iletkenliğinin elektrolit miktarı ile değişimi.....	22
Şekil 2.18. Viskozitenin fiziksel gösterilişi.....	23

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.19. Akma gerilimi (AG), kırılmaksızın deformasyon miktarı(d), % nem miktarı ilişkisi (n).....	24
Şekil 2.20. Koni batırma yöntemi.....	25
Şekil 2.21. Ekstrüder basıncı ölçme yöntemi ile akma sınırı gerilimi değerinin bulunması.....	26
Şekil 2.22. İki değişik tane büyüklüğündeki kil için ekstrüder basıncına karşı % nem miktarının değişimi.....	26
Şekil 2.23. Basma deneyi.....	27
Şekil 2.24. Bir silindirin ekseni yönünde basılması ile elde edilen gerilim/gerinim eğrisi.....	27
Şekil 2.25. Burma deneyi.....	28
Şekil 2.26. Silindirik bir örneğin burma deneyinden elde edilen grafik.....	28
Şekil 2.27. Pfefferkorn yöntemi ile plastiklik ölçümü.....	30
Şekil 2.28. Yüzey alanı ile plastiklik sayısının değişimi.....	32
Şekil 2.29. Linseis plastiklik deneyi.....	35
Şekil 2.30. Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan yöntemler.....	37
Şekil 2.31. Çekme gerilmesi, kayma gerilmesi ve hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirme tanımı.....	40
Şekil 2.32. İdeal “Gerilme-birim şekil değiştirme” eğrileri.....	43
Şekil 2.33. Çeşitli kristal yapıları için kayma düzlem ve doğrultuları ile kayma sistemleri.....	44
Şekil 2.34. HMK sistemdeki bir kristalde kayma düzlemi üzerinde çeşitli yönlerdeki kayma.....	45
Şekil 2.35. Plastik deformasyon sonucu tek kristalin yüzeyinde oluşan kayma çizgileri ve kayma bantları.....	45
Şekil 2.36. Mühendislik ve gerçek “gerilme-birim şekil değiştirme” diyagramı.....	48
Şekil 2.37. Kütleli şekil verme işlemlerinde görülen çatlak örnekleri.....	51
Şekil 2.38. Silindirik bir parçanın yığılma deneyinin şematik gösterilişi.....	53

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.39. Şekillendirme limit diyagramlarının elde edilmesi için kullanılan yığıma, haddeleme, eğme, düzlemsel şekil değişimli eğme deneyleri.....	53
Şekil 2.40. Farklı plastik şekil değiştirme işlemlerinde, plastik şekil değiştirme yolu.....	54
Şekil 2.41. Soğuk çekilmiş 1045 karbon çeliğine ait oda sıcaklığındaki şekillendirme limit diyagramı.....	54
Şekil 2.42. 1020 karbon çeliği ile 302 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığındaki şekillendirme limit diyagramı.....	55
Şekil 2.43. Şekillendirme limit diyagramı yardımıyla durum değerlendirmesine ait örnek.....	56
Şekil 2.44. Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örnekleri.....	57
Şekil 2.45. Az karbonlu çeliğe ait biçimlendirme sınır diyagramı örneği.....	58
Şekil 2.46. Farklı malzemelere ait biçimlendirme sınır diyagramı.....	60
Şekil 2.47. Aynı kalınlığa sahip az karbonlu çelikte, akma gerilmesi ile biçimlendirme sınır diyagramının değişimi.....	60
Şekil 3.1. Tuvka kilinin 65 mesh altının tane boyutu dağılımı.....	63
Şekil 3.2. Türkmen kilinin 65 mesh altının tane boyutu dağılımı.....	64
Şekil 3.3. Pembe kaolen 65 mesh altının tane boyutu dağılımı.....	65
Şekil 3.4. Tuvka kilinin DTA ve TGA eğrisi.....	67
Şekil 3.5. Türkmen kilinin DTA ve TGA eğrisi.....	67
Şekil 3.6. Pembe kaolen DTA ve TGA eğrisi.....	68
Şekil 3.7. Tuvka kilinin XRD analiz sonuçları.....	69
Şekil 3.8. Türkmen kilinin XRD analiz sonuçları.....	71
Şekil 3.9. Pembe kaolenin XRD analiz sonuçları.....	73
Şekil 4.1. Tuvka kili biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları.....	85
Şekil 4.2. Türkmen kili biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları.....	88
Şekil 4.3. Pembe kaolen biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları.....	91

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.4. Tuvka kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi.....	92
Şekil 4.5. Türkmen kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi.....	93
Şekil 4.6. Pembe kaolenin akma noktasının % nem oranına göre değişimi.....	93
Şekil 4.7. Tuvka kili için maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi.....	94
Şekil 4.8. Türkmen kili için maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi.....	95
Şekil 4.9. Pembe kaolen için maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi.....	95
Şekil 4.10. Tuvka kili için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi.....	96
Şekil 4.11. Türkmen kili için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi .....	97
Şekil 4.12. Pembe kaolen için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi.....	97
Şekil 4.13. Tuvka kili için biçimlendirme göstergesinin % nemle değişim eğrisi.....	98
Şekil 4.14. Türkmen kili için biçimlendirme göstergesinin % nemle değişim eğrisi.....	99
Şekil 4.15. Pembe kaolen için biçimlendirme göstergesinin % nemle değişim eğrisi.....	99
Şekil 4.16. Tuvka kili için Pfefferkorn plastiklik suyu grafiği.....	100
Şekil 4.17. Türkmen kili için Pfefferkorn plastiklik suyu grafiği.....	101
Şekil 4.18. Pembe kaolen için Pfefferkorn plastiklik suyu grafiği.....	101

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan silindir ve piston.....	76
Resim 3.2. BSD testlerinde kullanılan numune.....	76
Resim 3.3. Markalama işlerinde kullanılan marka.....	76
Resim 3.4. Deformasyonun yapılması.....	76
Resim 3.5. Basma deneylerinin kullanılan test cihazı.....	77
Resim 3.6. Ölçüm işlemlerinin yapıldığı mikroskop.....	77



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağı sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
<b>P</b>	Kuvvet
<b>M</b>	Sürtünme katsayısı
<b>c</b>	Geometrik faktör
$\epsilon$	Deformasyon miktarı
$\epsilon_0$	Çekme gerinimi
$\epsilon_z$	Basma gerinimi
$\epsilon^*$	Maksimum deformasyon miktarı
$\dot{\epsilon}$	Deformasyon hızı
<b>S</b>	Malzemenin metalurjik yapısı
<b>e</b>	Birim şekil değiştirme
$\Delta L$	Şekil değiştirme miktarı
$L_0$	İlk boy
$L_i$	Şekil değiştirme sonundaki boydur
<b>V</b>	Hacim
$\gamma$	Kayma birim şekil değişimi
$\tau$	Kayma gerilmesi
<b>E</b>	Elastiklik modülü
<b>d</b>	Atomlar arası mesafe
<b>r</b>	Yarıçap

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>n</b>	Deformasyon sertleşmesi üssü
<b><math>\eta</math></b>	Viskozite
<b><math>\sigma</math></b>	Deformasyon şartlarındaki mukavemeti
<b><math>\mu</math></b>	Sürtünme katsayısı
<b>dv/dr</b>	Kayma hızı
<b>h</b>	Yükseklik
<b>K</b>	Malzeme sabiti
<b>W</b>	Koninin ağırlığı+üstüne konulan ağırlık
<b>I</b>	Batma yüksekliği

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>HMK</b>	Hacim merkezli kübik
<b>YMK</b>	Yüzey merkezli kübik
<b>BSD</b>	Biçimlendirme sınır doğrusu
<b>BG</b>	Biçimlendirme göstergesi
<b>MDM</b>	Maksimum deformasyon miktarı
<b>AG</b>	Akma gerilimi
<b>DTA</b>	Diferansiyel termal analiz
<b>TGA</b>	Termal gravimetri analizi
<b>XRD</b>	X ışını kırınımı analizi
<b>M<sub>yaş</sub></b>	Numunenin yaş ağırlığı
<b>M<sub>kuru</sub></b>	Numunenin kuru ağırlığı
<b>Psi</b>	Paund/inç <sup>2</sup>

## 1.GİRİŞ

Klasik seramik üretimi farklı mineral içeriği ve özelliklere sahip killerin kırılması, sulu olarak başka killerle belirli oranlarda karıştırılması ve öğütülmesi ile başlar. Hazırlanan ve yeterli miktarda su ve kimyasallarla karıştırılan karışımlar döküm, plastik şekillendirme ve presleme gibi yöntemlerle şekillendirilir. Şekillendirilen çamur kurutulup ve ilk pişirimi yapıldıktan sonra, artık sert ve kırılğan hale gelir. Sertleşen ve belirli bir dayanım kazanan ilk pişirimi yapılmış parçalar daha sonra sırlanır ve tekrar pişirilerek su geçirmez, estetik ve hijyenik hale gelir.

Seramik sektöründe ürünün özelliğine bağlı olarak farklı seramik hammaddelerinden yola çıkılır. Kullanılan hammaddelere göre farklı şekillendirme yöntemleri kullanılır. Farklı şekillendirme yöntemleri ile üretilen ürünler de farklı özellikler göstermektedir. Dökümden sıvamaya, şablon tornadan izostatik prese kadar çok farklı şekillendirme yöntemleri günümüzde kullanılmakta ve yeni şekillendirme yöntemleri ihtiyaca göre geliştirilmektedir.

Seramiklerin şekillendirilmesi de metallerin şekillendirilmesi kadar eskidir. Genellikle plastik haldeki seramik çamuru metallerin bir kısmında olduğu gibi kütle deformasyon işlemleri ile şekillendirilebilirler (kütle deformasyon işlemlerinde şekil değişimi parçanın kalınlık boyutlarında büyük değişikliklerle elde edilir). Metaller hem kütle deformasyonu hem de levha biçimlendirme işlemleri ile şekillendirilmektedir. Malzemelerin şekillendirilmesinde iki farklı temel değişken önemli rol oynamaktadır (1).

$$\text{Şekillendirilebilirlik} = f_1(\text{malzeme}) \times f_2(\text{işlem}) \quad [1.1]$$

Bu bağıntıda  $f_1(\text{malzeme})$  malzemenin gerçek sünekliğin bir ölçüsüdür ve çeşitli işlemler için geliştirilmiş biçimlendirme sınır kriterleri ile temsil edilir.  $f_2(\text{işlem})$  fonksiyonu ise iş parçasındaki muhtemel kırılma bölgelerindeki gerilim, gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık gelişimlerinden elde edilir. Kalıp tasarımı ön parça geometrisi, yağlama gibi işlem değişkenleri iş parçasındaki gerilim ve gerinimlerin

oluşumunu belirler. Gerilim ve gerinimlerin deformasyon boyunca izlediği çizgiler  $f_{2(\text{işlem})}$  değişkenlerine bağlı olarak değişirler.

Plastiklik malzemenin uygulanan gerilimlerle kolayca deforme olması ve uygulanan kuvvetler kalktığında şeklini koruyabilme özelliğidir.

Biçimlendirilebilirlik, belirli bir deformasyon işleminde kırılma olmadan elde edilebilecek deformasyon miktarıdır. Biçimlendirilebilirlik bir içsel (intrinsic) malzeme özelliği değildir. Malzeme ve işlem değişkenlerine bağlıdır. Biçimlendirilebilirlik genel olarak; maksimum deformasyon miktarı x akma noktası olarak formüle edilmektedir (2-4). Metallerde akma noktaları çok yüksek olduğundan kendi ağırlıklarıyla kendi kendilerini deforme edemeyecekleri için biçimlendirilebilirlik sadece maksimum deformasyon miktarına bağlıdır. Yani formülün ikinci kısmına gerek kalmamaktadır. Ancak killerde akma noktaları çok düşük olduğundan bir başka deyişle kendi ağırlıklarıyla bile deforme olduklarından biçimlendirilebilirlik tarifine akma noktası kavramı da ilave edilmiştir.

Bu çalışmada farklı şekillendirme yöntemleri uygulayan yer karosu ve sıhhi tesisat seramikleri üreten fabrikalardan alınan farklı mineral içeriğine ve plastiklik özelliğe sahip killer kullanılmıştır. Öncelikle killerin karakterizasyonu değişik analiz yöntemleri ile yapılmıştır. Hammaddeler bilyalı değirmende sulu olarak yüzdürücü (deflocculant) kullanmadan öğütülmüş ve elde edilen sulu süspansiyonlar alçı kalıplarda suyunu bırakıp plastik hale gelinceye kadar bekletilerek hazırlanmıştır. Pişmemiş plastik haldeki seramik çamurunun (nem miktarı: % 15-25) biçimlendirilebilirliğini (workability) belirlemede, metallere uygulanan biçimlendirme sınır doğruları (BSD) yöntemi uygulanmıştır. BSD yöntemi için numunelerin hazırlanmasında, tanecik yönlenmesini azaltmak için ekstrüder yerine basit bir silindir boru ve bir pistondan oluşan kalıp düzeneği kullanılmıştır. BSD tekniği için, sabit boy/çap ( $L/D=1$ ) oranında kesilen farklı nemdeki numuneler ekvator bölgelerine çizilen üç adet 2,1mm ölçüsündeki paralel çizgilerle markalanmıştır. Numuneler üzerine çizilen çizgiler arasındaki uzaklık 1/50 verniyeli olan bir mikroskopla ölçülmüştür. Silindirik numuneler sabit bir basma hızı ile

Universal basma cihazında ilk çatlak oluşuncaya kadar farklı yüzey sürtünme koşullarında deforme edilmiştir (nylon, mazot ve zımpara). Deformasyondan sonra basma gerinimleri çizilen çizgiler arasındaki uzaklık tekrar ölçülerek ve çekme gerinimleri ise çaptaki genişleme ölçülerek belirlenmiştir. Elde edilen değerlerin oranlarının doğal logaritması alınarak  $(\ln)$  BSD doğruları elde edilmiştir (5).

BSD doğrularının y eksenini kestiği nokta maksimum deformasyon miktarı (MDM) olarak tanımlanmıştır. Killerin akma gerinimleri Universal basma test cihazı kullanılarak ve % 0,2 offset yöntemiyle elde edilmiştir. BSD değerlerinden elde edilen MDM'nin nem ile değişimi, akma noktalarının nem ile değişimi ayrı ayrı çizilmiştir. Maksimum deformasyon miktarı x akma noktaları grafiği çizilerek her kil için optimum nem değeri belirlenmiştir. Buna ek olarak sabit deformasyon hızında elde edilen maksimum deformasyon miktarı x akma noktalarının nem oranına bağlı olarak değişimleri belirlenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı sabit deformasyon hızında farklı yüzey koşullarının, biçimlendirilebilirliğe etkisinin BSD yöntemi ile belirlenmesi olmuştur. BSD yöntemi ile elde edilen biçimlendirilebilirlik değerleri seramik fabrikalarında hala kullanılmakta olan ve çok iyi sonuçlar veren eski bir ampirik yöntem olan Pfefferkorn plastiklik suyu yöntemiyle mukayese edilmiştir.

## 2. TEZİN DAYANDIĞI KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Killerin Kristal Yapıları

#### 2.1.1. Temel kavramlar

Atomlar küresel şekilli parçacıklar olarak düşünüldüğünde bir bileşik içerisindeki atomların çapları arasındaki farklılıklar önem kazanmaktadır. Atomların oluşturdukları kristal yapılarda katyon ve anyonların çapları arasındaki oran önemlidir. Çizelge 2.1’de kil minerallerinde çoğunlukla bulunan kristal sistemindeki çap oranları verilmiştir. Bu çizelgede doğrudan bağlanmış atomların sayısı koordinasyon sayısı olarak verilmiştir. Bu sayılar kristalin paketlenme tipi ve kristal şeklinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eğer yapıda polarizasyon meydana gelmiş ise iyonlar küre yapısını kaybederek şekillerinde bir miktar değişme meydana gelmektedir.

Çizelge 2.1. Kil minerallerinde en çok bulunan anyon ve katyonların çapları ve oranları

Düzenli Çok Yüzlülerin Tipleri			
Çok yüzlü	Yüzey sayısı	Koordinasyon sayısı	Minimum çap oranı
Üçgen	2	3	0,155
Tetrahedral	4	4	0,255
Oktahedral	8	6	0,414
Küp	6	8	0,732
Dodekahedral	12	12 veya 14	>1,00

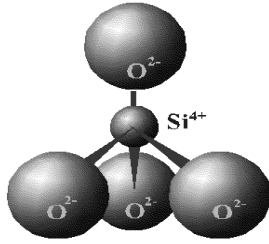
Çizelge 2.2. Seramikte kullanılan minarelerdeki katyonların oksijene göre çap ilişkisi

Phyllosilicate Minerallerdeki İyonlar								
En çok bulunan bileşenler			En çok bulunan bileşenler			Tabakalar arasında en çok bulunan katyonlar		
iyon	Çap (nm)	rc/ro	iyon	çap (nm)	rc/ro	iyon	çap (nm)	rc/ro
O <sup>2-</sup>	0,135	-	Ni <sup>2+</sup>	0,074	0,55	Na <sup>+</sup>	0,101	0,75
Si <sup>4+</sup>	0,040	0,30	Ti <sup>4+</sup>	0,060	0,44	K <sup>+</sup>	0,134	1,00
Al <sup>3+</sup>	0,055	0,41	Zn <sup>2+</sup>	0,057	0,42	Cs <sup>+</sup>	0,163	1,24
Fe <sup>2+</sup>	0,080	0,59	Mn <sup>2+</sup>	0,083	0,61	Ca <sup>2+</sup>	0,105	0,78
Fe <sup>3+</sup>	0,067	0,54	Mn <sup>3+</sup>	0,072	0,53	Ba <sup>2+</sup>	0,140	1,03
Mg <sup>2+</sup>	0,078	0,58	Mn <sup>4+</sup>	0,052	0,39	Sr <sup>2+</sup>	0,118	0,87
			Li <sup>+</sup>	0,076	0,56	H <sub>2</sub> O	0,145	
			Cr <sup>3+</sup>	0,065	0,48	NH <sup>4+</sup>	0,143	
			Cu <sup>+</sup>	0,095	0,70			

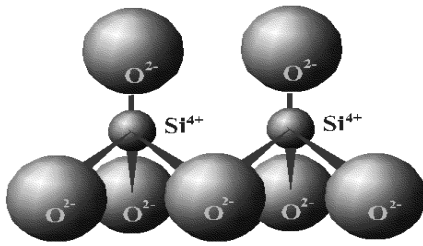
### 2.1.2. Killerin kristal yapılarındaki temel yapı birimleri ve bazı minerallerin kristal yapıları

Kristal yapılar incelendiğinde temel olarak beş değişik çok yüzlü şekil göze çarpmaktadır. Bu yapılardan sadece ikisi kil hammaddelerinde bulunmaktadır. Bunlardan ilki koordinasyon sayısı 4 olan anyon ve katyon atomları çap oranları  $> 0,255$  olan tetrahedral yapıdır. Bu yapıya örnek ortasında Si atomunun olduğu eşit uzunlukta dört oksijen veya hidroksil iyonları tarafından çevrelenen düzgün dört yüzlü bir yapı verilebilir.

Bu ortosilikat yapısı teorik olarak dört proton (hidrojen iyonu) ile nötr haldedir. Bu anyon alkalilerle veya toprak alkali iyonlarla kolaylıkla reaksiyona girebilme eğilimindedir. SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> anyonun şekli Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

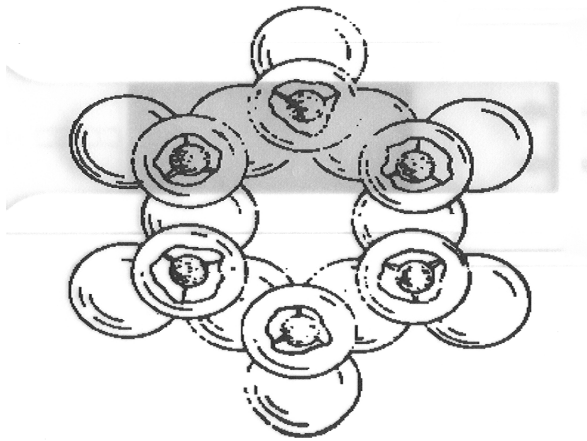


Şekil 2.1. Silisyumun tetrahedral yapısı



Şekil 2.2. Disilikat yapıları

Disilikat yapılarının üçünün bir araya gelmesi ile metasilikat adı verilen hegzagonal silikat tabakaları oluşmaktadır (Şekil 2.3).

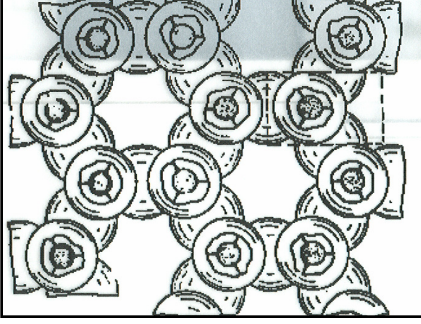


Metasilikat

Şekil 2.3. Metasilikat Yapıları

Metasilikat yapıları birbirleriyle iki ekseninde genişleyerek silika tabakalarını oluşturur.

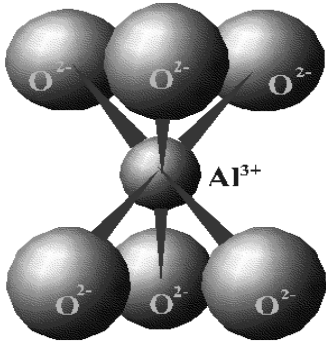




Şekil 2.4. Metasilikat yapılarının birbirleriyle birleşmesinden oluşan tabakalar

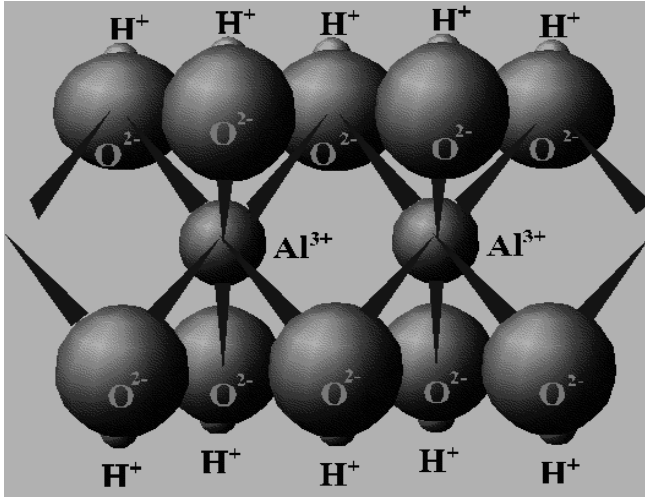
Tetrahedronların merkezlerinde çoğunlukla Si atomları bulunur. Bazen  $\text{Si}^{+4}$  atomlarının yerine  $\text{Al}^{+3}$  ve  $\text{Fe}^{+3}$  iyonları geçebilmektedir.

Diğer önemli bir yapı birimi Al oktahedral yapısıdır (Şekil 2.5). Al atomu Si atomundan daha büyük olduğundan (çapı 0,055 nm) oksijene göre çap oranı  $r_c / r_o = 0,055/0,135 = 0,41$ 'dir (Çizelge 2.2). Si atomunda olduğu gibi Al atomu dört oksijen atomu ile çevrilemez, bunun yerine altı oksijen atomu veya altı hidroksil molekülü gereklidir. Bu yapının üç boyutta kristalleşmesinden de korundum minerali oluşur.



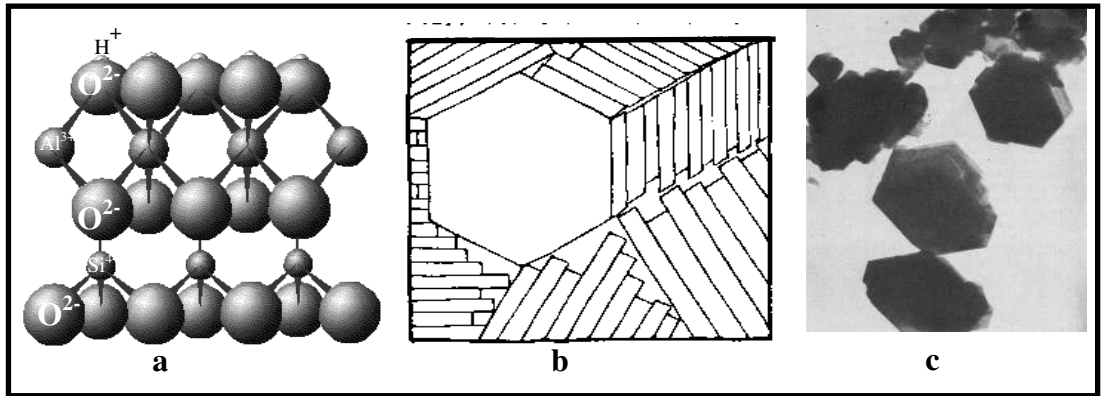
Şekil 2.5. Alüminyum oktahedralinin kristal yapısı

İkişer oksijeninin iki boyutta ortaklaşmasından gibbsite minerali (Şekil 2.6) ve üç oksijenin ortak kullanılmasından da hegzagonal dioktahedral tabaka oluşur (Şekil 2.7.a).



Şekil 2.6. Gibbsite mineralinin kristal yapısı

Düzenli yapıdaki kil minerallerinin bir çoğu bu altıgen şeklindeki hegzagonal Si yapı birimi ve Al oktahedral yapı birimlerinden oluşmaktadır. Eğer kil sadece bir Si tetrahedral tabakası ve bir de oktahedral tabakasından oluşmuşsa iki tabakalı mineralleri veya 1:1 minerallerini meydana getirir (Şekil 2.7). Kaolen minerali 1:1 mineral grubundandır (6).



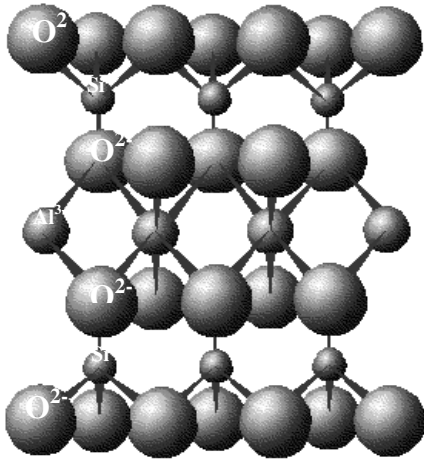
Şekil 2.7. Kalen minerali

- Kaolen mineralinin kristal yapısı (1 Si tetrahedral +1 Al oktahedral)
- Kaolen minerali kristallerinin şematik görünümü
- Kaolen mineralinin elektron mikroskop görüntüsü

Kristalin yapısı iki Si tetrahedral tabakasının arasına giren Al oktahedral tabakasından oluşmuşsa üç tabakalı mineralleri oluşturur (Şekil 2.8). Bu tür

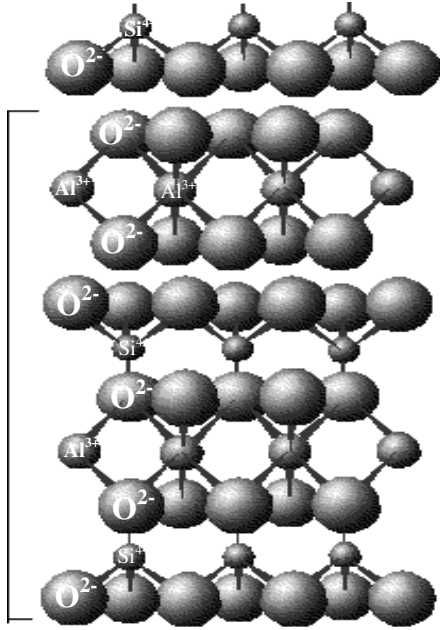
minerallerin diğeri bir ismi de 2:1 minerallerdir. Hem iki tabakalı minerallerde hem de üç tabakalı minerallerde oktahedral tabakalar 50-100 tabakaya kadar uzayabilir. Bu tabakalar arasında OH veya su molekülleri bulunmaktadır. Yapı birimlerinin arasındaki su tabakaları ne kadar fazla ise kil tabakaları birbirleri üzerinde daha kolay kayabileceğinden daha plastik özellik gösterecektir. Su tabakası ne kadar az olursa kayma o kadar zorlaşacak ve plastikiği azalacaktır.

Üç tabakalı minerallerden montmorillonit minerali suyu çok fazla çekebilme özelliğine sahip olduğu hatta o kadar çok su çekebilmektedir ki bazen şişen kil olarak da adlandırılmaktadır. Tabakalar arasında oluşan su filmi rahat hareket ettirme avantajına karşılık, böyle bir kil şekillendirildiğinde çok fazla küçülmektedir. Bu da şekillenen parçaların kontrolsüz deformasyona uğramasına sebep olmaktadır (7).



Şekil 2.8. Üç tabakalı mineral (2 Si Tetrahedrali + 1 Al Oktahedrali)

Üç tabakalı mineral yapı yüzlerce defa tekrarlandığında aşağıdaki kristal yapı ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.9). Eğer oktahedral tabakadaki iki değerli iyonların tamamı, olması gereken yerde bulunuyorsa bu minerallere trioktahedral mineraller, iki değerli iyonların olması gereken yerlerde üç değerli iyonlar bulunuyorsa bunlara da dioktahedral mineraller ismi verilir.



Şekil 2.9. Üç tabakalı mineral yapının tekrarı

Üfeldspatlı volkanik kayaçların kimyasal ve mekanik değişimleri ile oluşan killer hidratlaşmış alüminyum silikatlardır. Alüminyum yerine kısmen veya tümüyle magnezyum, demir ve benzeri iyonların geçmesiyle farklı kimyasal bileşimlerde ve farklı renklerde killer oluşur.

Çoğu killer, kristal yapıları birbirinden farklı; kaolen, montmorillonit, illit, vermukulit, halloysit, klorit, atapulgit ve sepiolit gibi birçok kil mineralinin karışımı halindedir. Ender olarak sepiolit gibi yalnızca bir kil minerali içeren türlere de rastlanmaktadır. Killer içinde doğal katkı olarak kil türünden olmayan kuvars, kalsit, dolomit, prit ve benzeri minerallerle bir miktar organik maddeler bulunabilir (8).

## 2.2. Killerin Şekillendirilmesi

Seramik üretiminde bir çok farklı şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunun sebepleri parçanın karışımlarının plastik ve akış özelliklerinin değişken olması, üretilecek seramiklerin boyutları ve kullanılacakları endüstrilerin çeşitli olması ve çok farklı müşteri taleplerinin olmasındandır. Kil su karışımının şekil alma kolaylığı su içeriğine göre değişmektedir. Bu yüzden su içeriği % 50 ise sulu bir çamur oluşur

ve bir sıvı gibi akar ve sadece 0,1 atmosfer basınçla kapların bütün hacimlerini doldurur. Su içeriği % 40'lara indiğinde aynı akışı sağlamak için basıncın 0,4 atm çıkması gerekir. % 35'lik sıvıda 1 atm ve % 30'luk çamurda ise 2,5 atm gereklidir. Daha kuru karışımlarda basıncın büyüyeceği açıktır. Aşağıdaki çizelgede bu ilişki gösterilmiştir (9).

Çizelge 2.3. Killerin şekillendirme yöntemlerinin basınç ve nem ile ilişkisi

Şekillendirme yöntemi	Uygulanan basınç (psi)	Su içeriği %	Kıvam
Döküm	0	25-30	Sıvı, koyu çamur
Plastik şekillendirme	5-50	12-20	Plastik çamur
Ekstrüder	50-10000	15-20	Plastik çamur
Kuru pres (bağlayıcı ve yağ ile)	1000-15000	5-10	Yarı kuru çamur
Toz pres	3000-20000	0-2	Kuru çamur
İzostatik pres	5000-100000	0-15	Kuru çamur

Çamurun kıvamı için sıvı, koyu çamur, plastik, yarı kuru ve kuru olarak adlandırılır. Sıvı ve koyu çamurdaki akış yerçekimi kuvvetlerin altında düşük basınçta gerçekleşir. Plastik ve yarı kuru halde akış belirli bir basınçta gerçekleşir, ancak yeni şekil oluştuktan sonra şeklini muhafaza etmesi gereklidir. Kuru halde akış gerçekleştirmek zordur.

Seramik malzemelerin şekillendirilmesine genel olarak bakılacak olursa hammadde karışımlarının kıvamlarının farklı farklı olduğu görülür. Başlıca killerin şekillendirilme yöntemleri;

a) Sıvı haldeki killerin şekillendirilmesi

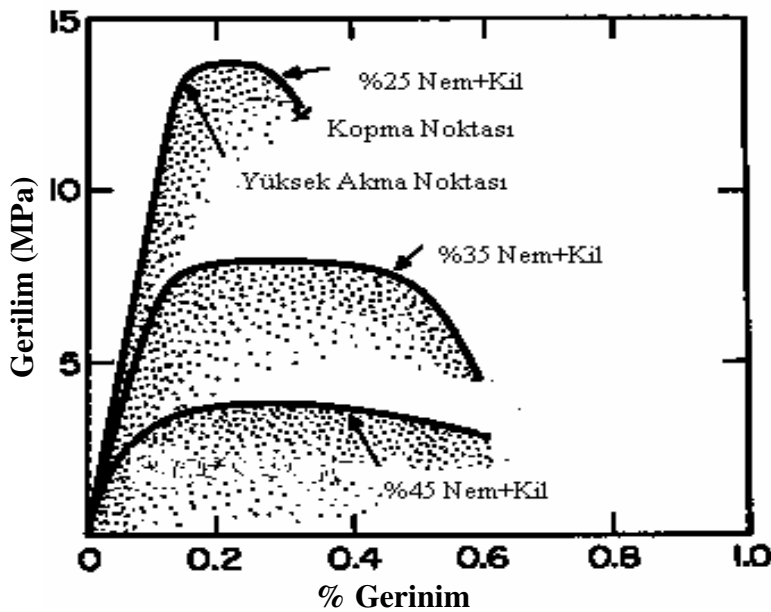
İçi boş döküm

İçi dolu döküm

b) Plastik haldeki killerin şekillendirilmesi



alınır ve kalıplar yüzlerce defa kullanılır. Kil miktarı arttıkça çamurun yoğunluğu artarken genel olarak içi boş ürünlerin dökümünde çamur yoğunluğu 1,650 kg/l, kapalı dökümler için 1,800 kg/l olan çamurlar kullanılmaktadır. Şekilde sulu süspansiyon ve döküm çamuru olarak gösterilen bu bölüm döküm için kullanılan kıvamı göstermektedir. Çamur yoğunluğu arttıkça çamur giderek balçık haline gelir. Hiçbir şekillendirmede kullanılmayan bu kıvamdaki çamurda reolojik ölçümler de çok zor yapılabilmektedir. Kil miktarı arttırıldıkça çamur artık sıvı özelliklerini kaybeder ve giderek katı özellikleri ağır basmaya başlar. Sıvı sınır denilen bu nokta Atterberg tarafından geliştirilen bir cihazla ölçülür ve bu nokta plastik şekillendirmede kullanılabilen çamurlarda başlangıç kıvamı olarak sayılabilir. Sıvı sınıra yakın nem miktarlarında hazırlanan çamur kolay deforme edilebilmesi yanında deformasyon kuvvetleri kaldırıldığında şeklini muhafaza edemeyecek kadar zayıf bir yapıya sahiptir. Ancak bu, kil miktarı giderek arttırıldığında şeklini de koruyabilme özelliği baskın olmaya başlar (Şekil 2.11). Başka bir deyişle akma noktaları giderek artar. Metallerin akma gerilimleri kendi ağırlıklarına göre çok yüksek olduğundan metaller için bu değer biçimlendirilebilirlikte önemli değildir. Ama killere çok düşük kuvvetlerle deforme olabildikleri için akma noktası şekillendirmede önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.11. Killere uygulanan gerilim-gerinim grafiklerinin nem miktarı ile değişimi

### 2.2.1 Dökümle şekillendirme

Döküm ve filter pres her ikisi de çamurdaki suyun uzaklaşmasına ve giderek daha sertleşen çamurların oluşması bakımından kollidal sistemlere dayanır. Filter preslemede sıvı basınçla uzaklaştırılırken dökümde tanecikler arasında oluşan kılcal borulardan kapiler tesirle suyun uzaklaşması sağlanır.

Geometrisi karışık parçalar için döküm yöntemi ile şekillendirme yapılmaktadır (lavabo, klozet v.s). Değişik kil karışımları su ve yüzdürücü (kimyasallar) ilavesi ile bilyeli değirmenlerde hazırlanan sulu kolloidal karşım belirli tane iriliğine getirilinceye kadar bilyeli değirmende öğütülür, elenir ve bir süre dinlendirilir. Elde edilen karışım hazırlanan alçı kalıpların içerisine dökülür. Belirli süreler alçı kalıp içerisinde bekletilen sulu kolloidal kil süspansiyonu giderek alçı kalıbın iç çeperlerine yapışır ve orada kabuk gibi bir tabaka oluşturur. Bekleme ile et kalınlığı daha da arttırılabilir. Yeteri kalınlığa ulaştığında kalıp ters çevrilerek çamur kalıptan boşaltılır. Elde edilen döküm alçı kalıp içerisinde bir süre daha bekletilerek kabuk gibi alçı kalıba yapışan çamurun alçı tarafından suyunun çekilmesi ve dökümün küçülmesi sağlanır. Küçülen ve suyu azalan çamur daha dayanıklı hale gelir. Böylece deforme etmeden kalıptan çıkması sağlanır. Döküm yöntemi ile şekillendirmede sulu olarak belirli bir yoğunlukta hazırlanan kolloidal süspansiyonların reolojik özellikleri büyük önem kazanmaktadır. Genellikle Bingham plastik türdeki çamurun (akışkanın) yoğunluğu, viskozitesi, bekleme ile viskozitesindeki artma (thixotropisi) ve yüzdürücü miktarı (deflocculant) önemli parametrelerdir.

Döküm için hazırlanan kalıplarda kullanılan malzeme alçıdan üretilmektedir. Alçının su çekme özelliği ve uzun süre bozulmadan saklanabilmesi, sulu süspansiyonlardaki kil tanelerinin alçı gözeneklerinin arasına rahatça girip çıkabilmesi, ucuz ve her yerde kolayca bulunabilmesi ve donunca genleşmemesi alçıyı hem kalıpcılıkta hem de seramik üretiminde vazgeçilmez yapan en önemli unsurlardır. Döküm, içi boş ve içi dolu ürünler için farklı kalıp tasarımı gerektirmektedir. İçi dolu dökümlerde daha yoğun süspansiyonlar kullanılmaktadır.



Dökümden beklenen özellikler;

- a) Taneciklerin dökümde oluşan kekte yani kimyasal ve minerolojik bileşiminin tane iriliğinin ve yoğunluğunun homojen dağılması
- b) Yaş mukavemetin olabildiğince yüksek olması
- c) Kalıptan kolayca çıkması
- d) Kopma haldeki mukavemetinin yüksek olması
- e) Bitimde yüzeyin temiz olması
- f) Kalıptan alındıktan sonra elle taşınabilecek dayanımda olması
- g) Pişirme ve kurumada homojen küçülme (tercihen küçük olması)

#### Dökümde kullanılacak killerin özellikleri

Dökümle şekillendirmede kullanılacak killerin diğer killerden farkı öncelikle belirli yüzdürücülerle viskozitesinin düşmesidir. Her kil döküm için elverişli değildir. İlave edilen yüzdürücü (deflocculantlar) kil taneciklerinin kimyasal yapısına etki ederek onlarla geçici bağlar kurabilmelidir.

#### Plastik çamurun şekillendirilmesi

Killerin en karakteristik özelliği plastikliğidir ve bu kıvamdaki çamur birçok ilkel şekillendirme işleminin de temelidir. Plastik kıvamdaki çamur model yapmada ve elle şekillendirme işlemlerinde ve çömlekçi tornasında şekillendirme işlemlerinde sanatsal çalışmalarda ve bazı çok büyük parçaların üretiminde hala kullanılmaktadır. Ancak bu tür üretim giderek azalmış artık yerini daha hızlı üretim yapan makinelere bırakmıştır. Şekillendirme metotlarındaki çeşitliliklere rağmen şekillendirme metotları kilin küçük kuvvetlerle deforme edilebilme yeteneğine ve deformasyondan sonra da şeklini koruyup sertleşmesi özelliğine bağlıdır. Farklı şekillendirme yöntemleri için farklı kıvamlarda ve sertlikte plastik çamur gereklidir. Yüksek su miktarı; kolay işlenebilirlik fazla küçülme ve buna bağlı olarak fazla kuruma kaybı anlamındadır. Çamuru elle hazırlama yerine makinelerde hazırlamak daha avantajlıdır. Bu yüzden daha kolay kuruyan ve istenilen kıvama getirilebilen killeri

kullanmak gerekmektedir. Plastik şekillendirme için belirli tipte ve oldukça yeni jeolojik orijinli killer kullanılmaktadır.

Yaş presleme veya yumuşak çamurun şekillendirmesine en iyi örnek çatı kiremitleri üretimi, ateş kili ve refrakter killerden yapılan tuğlaların üretimi sayılabilir. Bu şekillendirme işlemi beceri isteyen bir işlemdir. Bu işin ustası önceden hazırlanmış belirli bir miktar plastik haldeki çamuru alır ve alçı veya metalden yapılmış kalıp içerisine atar ve kalıbı sıkıştırır. Kilin kalıp içerisine çarpması ile kalıp içerisine iyice yayılması sağlanır. Şekillenen tuğla başlangıçta elle dokunulmayacak kadar yumuşaktır. Bu yüzden bir süre kalıp içerisinde bekletilerek kısmen kuruması sağlanır. Düz ve yuvarlak çatı kiremitleri de elde kalıplama ile şekillendirilmektedir. Kil ele yapışmayacak kıvama gelene kadar kıvamı ayarlanır. Kalıplar kumlanmıştır. Elle şekillendirildikten sonra kalıptan ayrılabilmesi bu sayede sağlanır. Düz şekilde şekillenen çamur daha sonra belirli bir miktar kalıpların üzerinde bekletilerek istenilen yuvarlak şekli alması sağlanır. Kuruma sırasında herhangi bir çarpılma olursa şekillenmiş kiremit daha yarı kuruyken düzeltiler. Kiremitler istenilen eğriliğe geldikten sonra tahta destekler arasında kurutulur.

Yarı katı kıvamdaki çamurun şekillendirilmesinde, yumuşak çamurun şekillendirilmesine kıyasla kalıptan çıkartılması sırasında ve belirli bir kuruluğa gelene kadar bir takım dezavantajları vardır. Daha sert kıvamda çamuru makine ile şekillendirmek için daha fazla enerji harcamak gerekir. Özellikle bu tip makinelerde kullanılan çamur biraz daha kıvamlıdır.

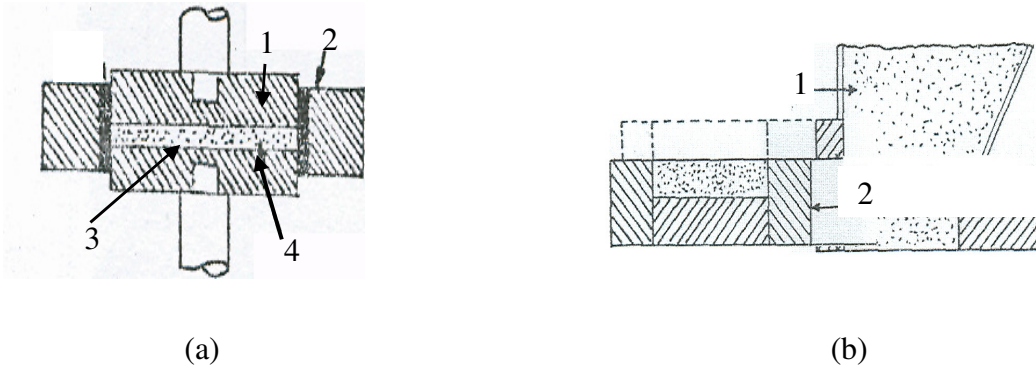
Bazı seramik karışımlar metal kalıplar arasına sıkıştırılarak şekillendirilir. Bu yöntemle şekillendirme geniş parçalara, krozelere ve izalatörlere uygulanmaktadır. Her preslemede yeterli çamur kalıplara girecek şekilde ölçülür. Kalıplar yağlanmaz ancak kalıptan daha hızlı çamurun uzaklaşması için hafifçe ısıtılır. Ram prosesing adı ile bilinen plastik şekillendirme işleminde karışım alçı kalıplar arasına sıkıştırılır ve suyun vakumla uzaklaştırılması sağlanır. Hem üst hem alt kalıba presleme işlemi bittikten sonra sıkıştırılmış hava üflenerek daha çabuk kurumayı sağlar.

## 2.2.2. Toz presleme yöntemleri

### Toz Presleme

Üç ana şekillendirme yönteminden biri de toz presleme yöntemleridir. % 5-10 nem içeren karışımlar yüksek basınçlarda çelik kalıplar kullanılarak şekillendirilirler. Genellikle refrakter tuğlalar ve elektrik izolatörleri bu yöntem ile şekillendirilmektedir. Toz pres için kullanılan karışımların genelde plastik şekillendirmede kullanılan karışımlardan farkı yoktur. Karışım; kurutulmuş filter pres keki istenilen nem değerine getirildikten sonra parçalanarak veya süspansiyon halindeki karışım püskürtmeli kurutucudan geçirilerek direkt olarak kullanılır.

Toz preslemede kullanılan kalıplar en çok dökme demir, çelik veya tungsten karbürden yapılmaktadır. Sertleştirilmiş çelik kalıplar talk içeren yapılar için oldukça yaygın kullanılmaktadır.



Şekil 2.12. Toz preslemede kullanılan kalıplar

- |                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| a) Basit bir kalıp düzeneği     | b) Kalıp doldurma düzeneği       |
| 1. Üst kalıp 2. Çerçeve         | 1. Toz silosu 2. Kalıp çerçevesi |
| 3. Preslenecek toz 4. Alt kalıp |                                  |

Alt ve üst baskı kalıpları kalıp çerçevesine tam uygun olmalıdır. Basınç tek üstteki kalıptan veya hem alt hem üstteki kalıplardan aynı anda yapılır. Basma işlemi bittikten sonra alt kalıp yukarı kaldırılarak preslenmiş parça kalıptan çıkarılır. Kalıba malzemenin seri olarak doldurulması için Şekil 2.12.b'de gösterilen düzenek kullanılmaktadır. Kalıp kutusunun içerisindeki malzeme miktarı kalıbın alt plakası ile

kontrol edilmektedir. Bazı özel işler için kalıba malzeme doldurma el ile de yapılmaktadır. Genellikle hidrolik ve mekanik pres olmak üzere iki tür pres kullanılmaktadır. Hidrolik presler mekanik preslere kıyasla daha seri çalışırlar. Mekanik preslerin mafsallı kollu ve vidalı olmak üzere çeşitleri vardır.

Preslenen parçalarda istenilen en önemli özellik preslenen parçanın her yerinde yoğunluğunun aynı olmasıdır. Yoğunluğun kalıplanmış parça içinde farklılaşması pişme sırasında eğilmelerin ve beklenmedik küçülmelerin oluşmasına neden olur.

Yoğunluğun düzgün olarak dağılmasında karışımın kolayca akabilme özelliği de önemlidir. Preslenen parçanın küçük boyutta ve basınç yönüne paralel olacak şekilde düzenlenmesi yoğunluğun her yerde aynı olmasını sağlar. Homojen yoğunluk elde etmek için preslemede kalıp duvarlarındaki sürtünmenin düşük olması da en önemli etkenlerden biridir. Bu yüzden preslerde kalıp kutusunun cidarları yağlanır. Seramik parçalarda düşük gözeneğe erişmek için yüksek basınçlar gereklidir. Böylece oldukça az pişme küçülmesi olan, düşük gözenekli malzemeler elde edilir. Basınç yüksek değerlere ulaştığında toz malzemenin içinde kalan hava tabakalaşmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden uygulanan basınç ancak belirli bir değere ulaşabilir. Ayrıca basınç azaldığında kil taneciklerinin sıralarındaki esnemenin dolaylı bazı çatlamlar oluşabilir. Basınç çatlakları basma süresi arttırılarak, basınç çok yavaş gevşetilerek veya maksimum basınca tekrar tekrar çıkarak azaltılabilir.

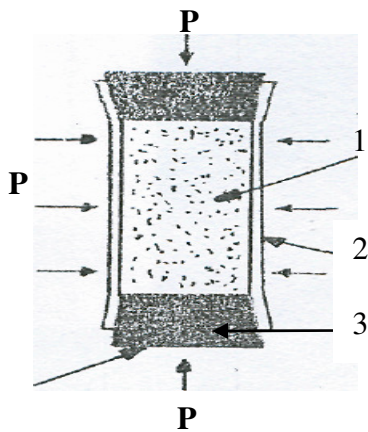
### Kuru presleme

Toz preslemeye çok benzemekle birlikte burada fark su miktarının % 1,5 veya daha az olması ve bir bağlayıcının veya yağın, bünye içinde kullanılmasıdır. Elde edilen malzemeler % 1 küçülmeye ve çok iyi elektriksel özelliklere sahiptir. Karışımlar hem kuru metotla hem de süspansiyon halde elde edilirler. Karışımın kalıbı tam bir şekilde doldurabilmesi için malzemenin yayılma ve akması özellikle önemlidir. Bu yüzden boyutları birbirine yakın püskürtmeli kurutucu kürecikleri daha çok kullanılır. Bağlayıcıdan istenilen başlıca özellikler şunlardır;

- a) Kalıplanan parçaya yüksek ham mukavemet vermelidir.
- b) Aşındırıcı olmamalıdır.
- c) Alkali içermemelidir.
- d) Düşük sıcaklıkta kolayca okside olmamalıdır.
- e) Kalıba yapışmamalıdır.
- f) Nem çekme özelliği olmamalıdır.
- g) Kolayca karışabilmelidir.

### İzostatik Presleme

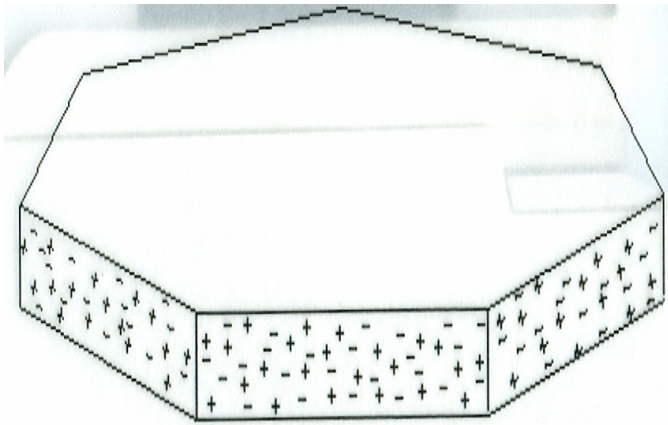
Bu yöntem preslenecek karışımın esnek bir kılıf içine konulması ve kılıf ile birlikte hidrostatik basınç altındaki sıvıya batırılmasını içerir. Parça her taraftan aynı basıncın etkisinde kalacağından parçanın her tarafında yoğunluk aynıdır ve tercihli yönelme oluşmaz. Bu yüzden parçada pişme sırasında eğrilme veya çatlama oluşmaz. Ayrıca, yüksek basınçlara çıkıldığından basınç çatlakları görülmez. Yöntemin tek mahsuru şeklin dış yüzeyinin hassas olarak şekillenememesidir. Preslenecek karışım Şekil 2.13'de görüleceği gibi lastik bir tüpe yerleştirilir. Hava bir enjektör ile boşaltılır. Lastik tüp gliserin veya yağ içine asılır ve 5-10 dakika içerisinde maksimum basınca çıkarılır.



Şekil 2.13. İzostatik presleme için kullanılan lastik kılıf  
1. Toz 2. Lastik tüp 3. Lastik tıpa

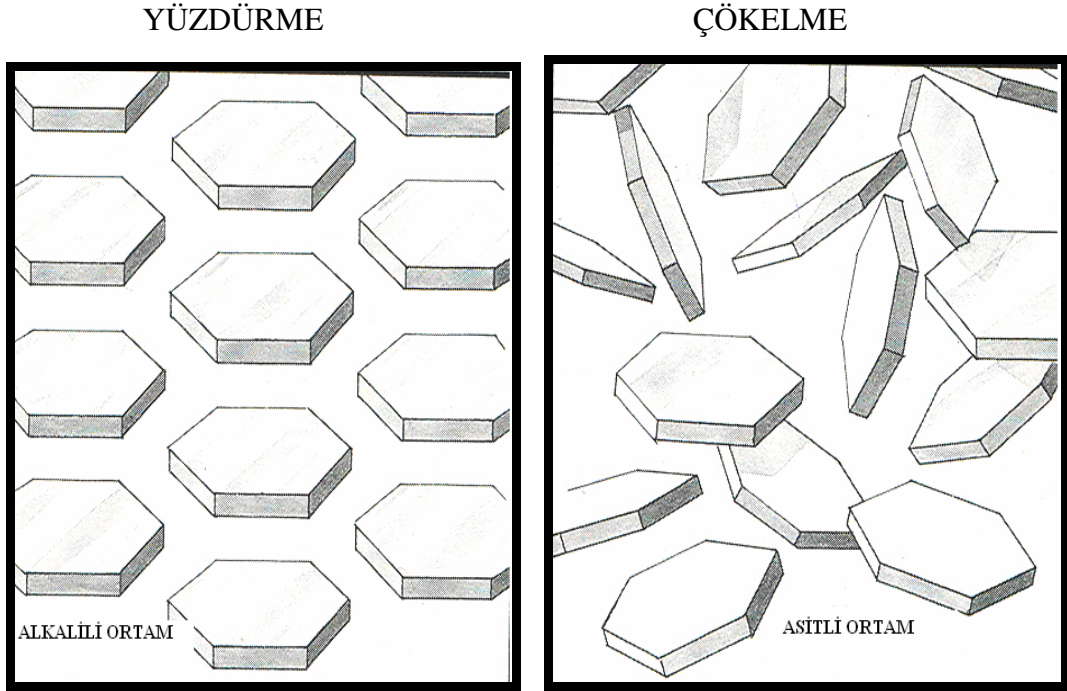
### 2.3. Killerin Şekillendirilmesinde Rol Oynayan Kuvvetler

Bir kil taneciği su içerisine daldırıldığında su içerisindeki çözülmüş olan iyonlar kil etrafında absorbe olurlar. Killerin iyonların absorpsiyonun temel nedenlerinden birisi kil taneciklerinin kristallerindeki atomların yer değişmesidir (iyon exchange capacity). Örneğin  $Al^{+3}$  iyonlarının yerine  $Mg^{+2}$  iyonlarının geçmesi sonucu oluşan yük eksikliği dışardan gelen iyonlarla karşılanabilmektedir. Killerin yüzey yükleri bu sebepten (-) değerlidir. Diğer bir sebep de kristal cisimler kristalleşirken eğer tam kristalleşme olmuşsa hep birbirine paralel ve aynı şablonda kırılırlar ve bu bütün bağların doymuş olduğunu gösterir. Eğer kristalleşme tam oluşmamışsa yada kristal kusuru varsa, kristallerin kırılmış kenarlarında yük eksikliği veya doymamış bağlar ortaya çıkar. Bu da killerin kenarlarının (+) olmasına sebep olur. Bu bağlar ancak ortamdaki aldıkları iyonların yükleri ile dengeye gelebilirler. Bu olay daha çok mineral kristallerinin kırılmış kenarlarında görülebilir. Her iki absorpsiyon mekanizması sonucu killerin iyon değiştirme kapasitesi olarak adlandırılan bir büyüklük elde edilir. Bir başka deyişle killer bu sebepten sanki bir mıknatıs tanesi gibi davranabilmektedirler (Şekil 2.14).



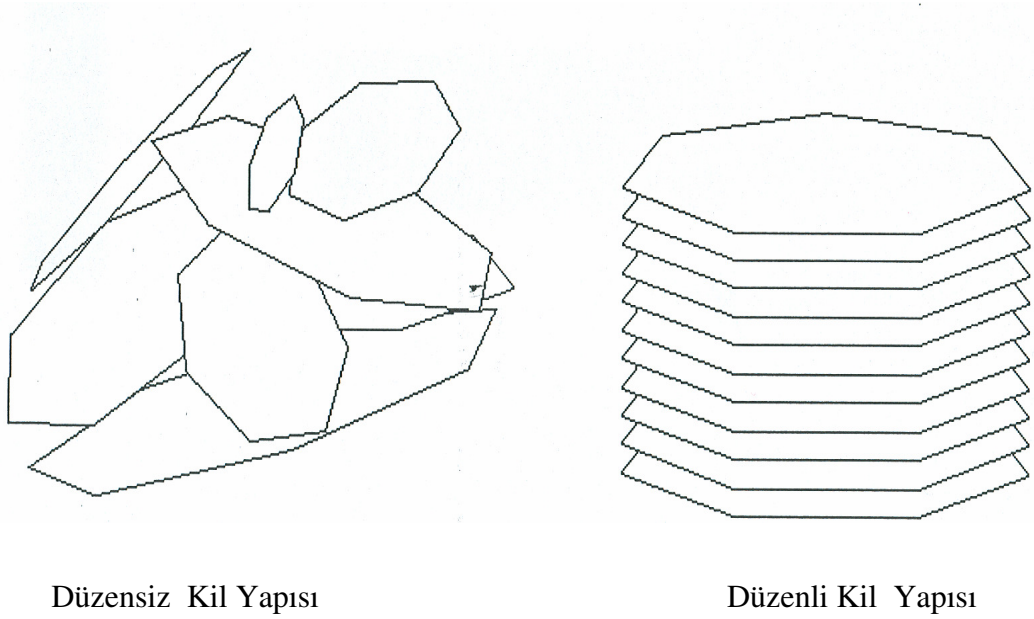
Şekil 2.14. Kaolen mineralinin altıgen prizma şeklindeki görüntüsü ve yüzey yükleri

Sulu süspansiyonda killerin yüzey yüklerinin büyüklüğüne göre kil tanelerinin birbirini çekmesi veya itmesi söz konusu olmaktadır. Bir başka deyişle killer süspansiyonlarda kenar yüzey etkileşmesi ile oluşan bir yapıdadır (Şekil 2.15).



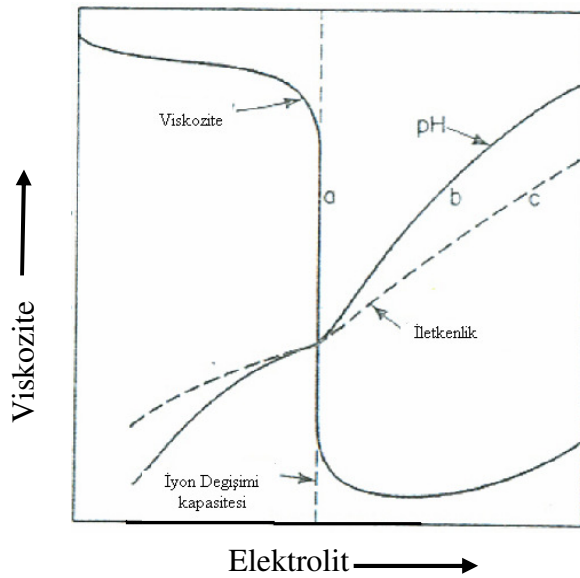
Şekil 2.15. Kaolen minerallerinin yüzey kenar etkileşmesi sonucu oluşan yapı (card house yapısı)

Bu yapı süspansiyon karıştırıldığında bozulmakta ve süspansiyonun viskozitesi düşmektedir. Ancak süspansiyon karıştırmaksızın bekletildiğinde tekrar yapı eski haline dönmekte ve yüzey kenar yapısı tekrar oluşmaktadır. Kil süspansiyonlarının viskozitesinin zamanla artmasına rheopeksi, azalması durumuna da tiksotropi denir. Dökümle şekillendirmede hazırlanan sulu süspansiyonun viskozitesi süspansiyonu kalıba dökerken ve kalıbın detaylarını doldurulması sırasında önemlidir. Alçı kalıpta döküm belirli bir kalınlık aldıktan sonra süspansiyon kalıptan daha fazla kalınlaşmaması için boşaltılır. Boşaltma sırasında süspansiyonun düzgün bir şekilde akması yine viskozitesi, rheopeksi veya tiksotropi ile ilgilidir. Bu yüzden dökümle şekillendirilecek killerin viskozitesi ve zamanla viskozitesindeki değişim önemli parametrelerdir (11). Süspansiyonların viskozitelerinin azaltılmasında kullanılan diğer önemli bir yöntem killerin yüzey yüklerinin değiştirilmesi ile yapılır. Bunun için yüzdürücü (deflocculant) olarak bilinen bazı kimyasallar ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  veya  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  karışımları) kullanılır. Bu süspansiyondaki killerin yüzey yüklerini değiştirerek belirli bir itme mesafesinde taneciklerin paralel tabakalar şeklinde durmasını sağlarlar (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Killere yüzdürücü kimyasalların etkisi

Böylece bir akma sırasında kil tanecikleri birbirine paralel halde bulduklarından hiç vakit kaybetmeden akma yönüne girebilmektedir. Bu da viskozitenin düşmesine sebep olmaktadır.

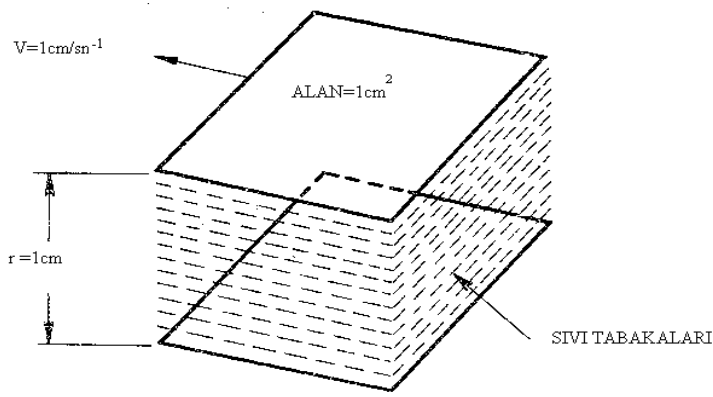


Şekil 2.17. Kaolin süspansiyonunun viskozitesinin, pH'ının ve iletkenliğinin elektrolit miktarı ile değişimi



Viskozite, fiziksel olarak moleküller arasındaki iç sürtünme olarak tarif edilir. Sıvıyı oluşturan moleküller arasındaki çekim ne kadar büyükse sıvı moleküllerinin birbiri üzerinden kayması o kadar zorlaşacaktır. Buna karşılık bu çekme kuvvetleri ne kadar az olursa sıvı molekülleri daha rahat hareket edecek ve birbiri üzerinde kolayca hareket edebilecektir (Şekil 2.18). Viskozite kısaca aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$\eta \text{ (viskozite) } = \tau \text{ (Kayma Gerilimi) } / (dv/dr) \text{ (Kayma Hızı) } \quad [2.1]$$

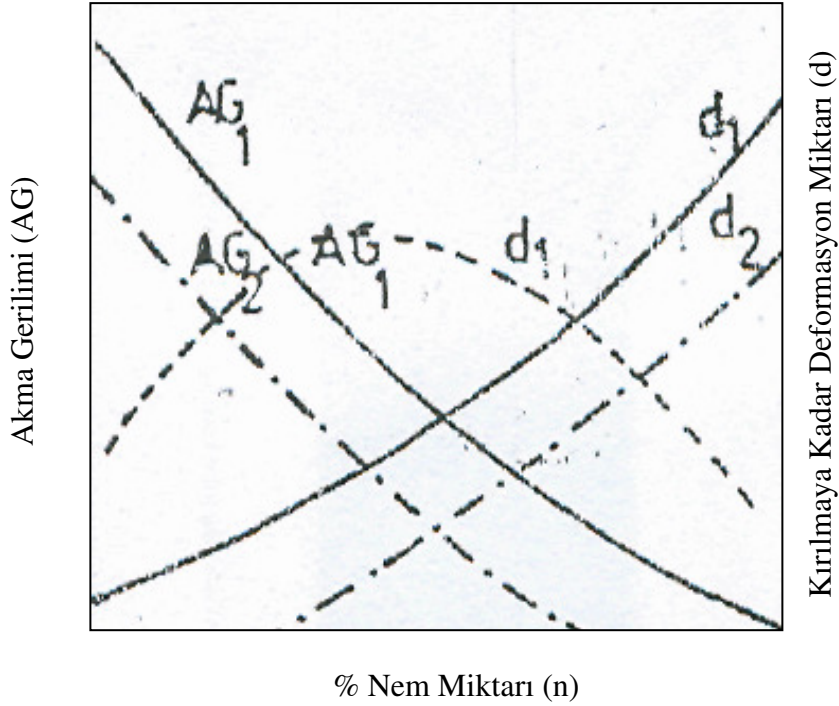


Şekil 2.18. Viskozitenin fiziksel gösterilişi

Süspansiyonlarda kayma yüzeye paralel kuvvetlerle oluşur. Bu yüzden plastik haldeki çamura uygulanan (ekstrüderde veya sıvama sırasında) kuvvetlerden (basınçtan) farklıdır.

#### 2.4. Plastikliğin Tayini

Plastiklik tanımına göre iki esas özelliğin açıklanması gereklidir. Akma sınırı gerilimi ve kırılmaksızın deformasyon miktarı. Öte yandan bir bünyenin kırılmaksızın deformasyon miktarı nem miktarı arttıkça artar. Herhangi bir plastik bünyenin, biçimlendirme işlemi için optimum nem değeri, oldukça küçük akma sınırı geriliminin elde edildiği nem ( $n_1$ ) ve en küçük bir deformasyonla kırıldığı nem ( $n_2$ ), değerleri arasındadır ( $n_1 > n_2$ ).



Şekil 2.19. Akma gerilimi (AG), kırılmaksızın deformasyon miktarı (d), % nem miktarı ilişkisi (n)

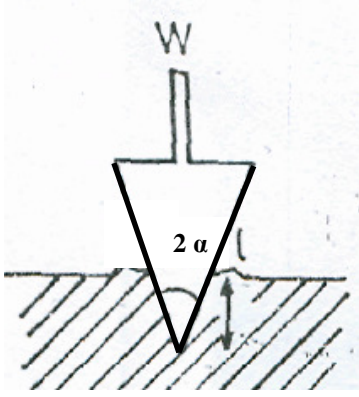
Şekil 2.19'da bünyenin akma gerilimi (AG), kırılmaksızın deformasyon miktarı (d) ve % neme göre aralarındaki ilişki görülmektedir. Düşük nem değerinde, akma sınırı gerilimi yüksek buna karşılık kırılmaksızın deformasyon miktarı düşüktür. En uygun nem miktarı ara yerdedir. Şekil 2.19'da (AG) ve (d) aynı boyuta sahip olmadığından, kesim noktasının fiziksel bir anlamı yoktur. Norton tarafından yapılan deneyler (AGxd)'nin bir maksimumdan geçtiğini göstermiştir (12). Başka bir bünyenin akma sınırı gerilimi AG<sub>2</sub> ve deformasyon miktarı d<sub>2</sub> ise, bu bünyenin daha düşük plastiklik gösterdiği söylenebilir.

## 2.5. Akma Sınırı Belirleme Yöntemleri

### 2.5.1. Koni batırma yöntemi

Koni batırma yönteminde  $2\alpha$  tepe açılı metal bir koni Şekil 2.20'de görüldüğü gibi W kuvveti ile (kendi ağırlığı + üzerine konulan ağırlık) çamura batırılır ve (I)

batma yüksekliği ölçülür. Koninin ölçülen yükseklik (I) kadar çamur içine girmesi için gerekli W ağırlığı I<sup>2</sup> ve akma gerilimi sınırı değeri ile orantılıdır.



Şekil 2.20. Koni batırma yöntemi

$$AG = W \cdot \cot \alpha / \pi \cdot I^2 \quad [2.2]$$

AG = Akma gerilimi sınır noktası

W = Koninin ağırlığı + üstüne konulan ağırlık

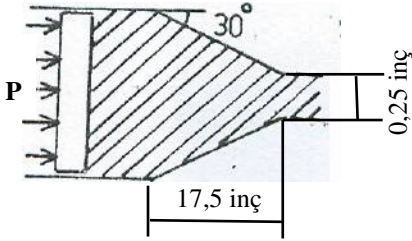
I = Batma yüksekliği

Burada (W) toplam yüke karşı koyan çamurun akma gerilimine yaklaşık olarak karşılık geldiği varsayılır. Bu yöntemle genelde AG değerininde üzerinde değerler elde edilir. Fakat α'nın küçük değerleri için oldukça iyi sonuçlar almak mümkündür. Pratik denetim amacı için koni batırma yöntemi basit akma sınırı gerilimi ve katılığın bulunmasında oldukça yararlanılan bir deney yöntemidir. Başlangıçta çok küçük bir alana yayıldığından gerilim büyüktür. Koni çamur içine battığında kuvvetin yayıldığı alan artacağından, gerilim giderek azalır.

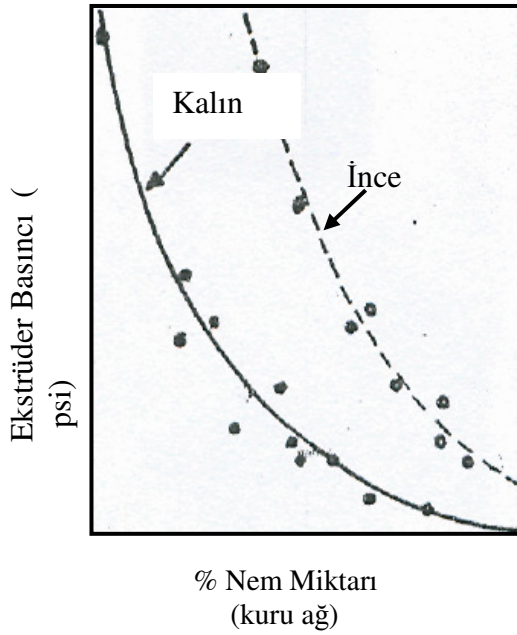
### 2.5.2. Ekstrüder

Plastik bir kili, basit bir piston ile ekstrüde edebilmek için gerekli basınç ekstrüder hızına, ekstrüder ağzının geometrisine, açıklığına ve kilin plastik özelliğine bağlıdır. Eğer ekstrüder hızı düşükse ekstrüder basıncı kilin akma sınırı gerilimi ile orantılı olacaktır.

Bu yöntemle mutlak akma sınırı gerilimi değerleri elde etmek için, ekstrüder ağzı geometrisi kil metal ara yüzeyi ve kilin reolojik özellikleriyle ilgili bir çok kabuller yapıldıktan sonra mümkün olabilir. Ancak bu yöntem göreceli değerler elde etmede oldukça pratiktir.



Şekil 2.21. Ekstrüder basıncı ölçme yöntemi ile akma sınırı gerilimi değerinin bulunması



Şekil 2.22. İki değişik tane büyüklüğündeki kil için ekstrüder basıncına karşı % nem miktarının değişimi

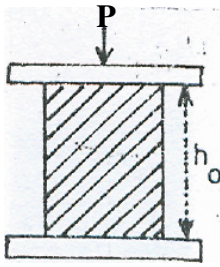
Şekil 2.22'de nem miktarının ekstrüder basıncına etkisi görülmektedir.

### 2.5.3. Basma deneyi

Akma gerilimi sınırı değerin bulunması silindirik numunenin paralel plakalar arasında sıkıştırmak için gerekli kuvvetin bulunmasına dayanır (Şekil 2.23). Basma hızı küçük olduğu zaman, viskoz kuvvetler ihmal edilebilir. Genel olarak uygulanan yöntem ortalama basma gerilimine,  $(W/S)$  ( $S$  kesit alan) karşılık gerilimin  $(h_0-h_f/h$  gerinim) bulunmasıdır.

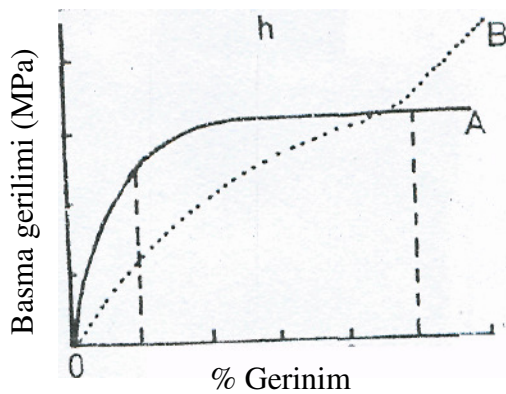
$h_0$ : Silindirin başlangıçtaki boyu

$h_f$ : Silindirin deneyden sonraki boyu



Şekil 2.23. Basma deneyi

Basma gerilimi ile basma gerinimi arasındaki ilişki Şekil 2.24'deki gibidir.

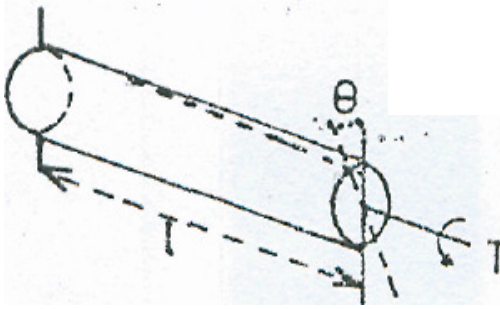


Şekil 2.24. Bir silindirin eksenî yönünde basılması ile elde edilen gerilim/gerinim eğrisi

Basma deneyinden elde edilen akma gerilimi kayma ile elde edilen akma geriliminden yaklaşık iki kat daha fazladır (13).

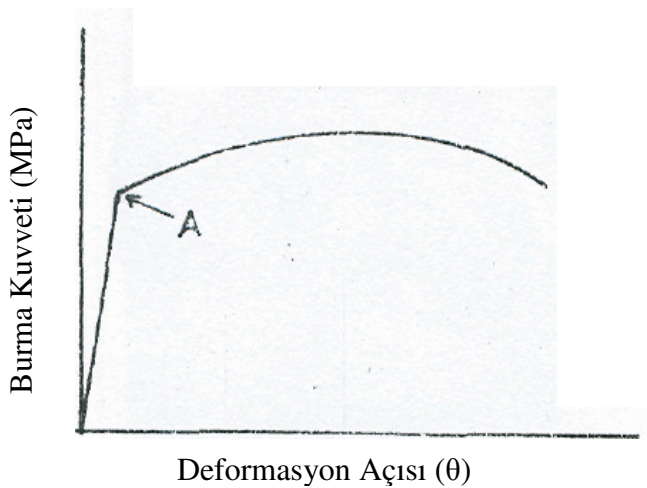
#### 2.5.4. Burma deneyi

Plastik bir kilden silindirik çubuk veya boruya Şekil 2.25'deki gibi bir burma gerilimi uygulandığında, belirli bir çevirme açısı meydana gelir. Uygulanan burma gerilimine karşılık çevirme açısı grafiğe çizildiğinde Şekil 2.26'dan elde edilir. Eğride belirli bir burma geriliminde keskin bir dönüm noktası vardır.



Şekil 2.25. Burma deneyi

Bu nokta akma gerilimi sınırı olarak verilebilir. Burma deneyi deney olarak diğer akma gerilimi tayin yöntemlerine göre, oldukça zor yapılabilmektedir.



Şekil 2.26. Silindirik bir örneğin burma deneyinden elde edilen grafik

## 2. 6. Killerin Plastikliğine Etki Eden Değişkenler

Bir çok killerde plastikliğin niteliği ve büyüklüğü karşılaştırıldığında çok farklı özellikler görülür. Bunlara etkiyen en önemli etkenler;

- a) Suyun veya ortamdaki diğer sıvıların katı taneciklerine etkisi ve taneciklerin bulunduğu kolloit ortamın etkisi
- b) Katı taneciklerin büyüklüğünün etkisi
- c) Tanecik büyüklüğü dağılımının etkisi
- d) Taneciklerin bileşimlerinin etkisi
- e) Taneciklerin şeklinin ve yapılarının etkisi
- f) Taneciklerin oluşturduğu toplanmaların etkisi
- g) Yüzey alanı ve moleküller arası çekimin etkisi
- ğ) Flokülant ve elektrolitlerin etkisi
- h) Bünye içinde taneciklerin yönlendirmelerinin etkisi
- ı) Kilin geçmişinin (oluşumu sırasında su ile temas süresi) etkisi
- i) Bünyenin yaşlandırılmasının etkisi

## 2.7. Plastiklik Belirleme Yöntemleri

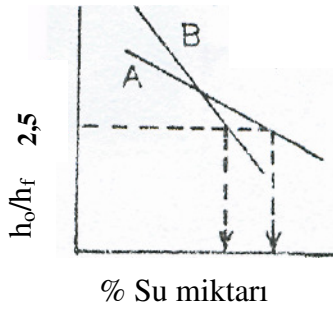
Killerin plastikliğini belirlemek için bugüne kadar birçok yöntem geliştirilmiştir.

### 2.7.1. Dolaylı yöntemler

Dolaylı yöntemler bünyedeki nem miktarının ölçülmesine dayanmaktadır. Kabaca, plastik bir kil bünyesindeki kil miktarı arttıkça veya ince kil miktarının oranının artması ile ölçülen değer plastiklikten çok, plastiklikle kabaca ilişkili bir değerdir. Bu deneylerin bir kısmı keyfi olarak kıvamı belirlenen bünyenin, neminin belirlenmesine dayanır. Yüksek oranda kil içeren veya ince taneli kil minerali ile yapılan deneylerde taneciklerin yüzey alanının artması ve buna karşılık yüzeyde tutulan su miktarının artması sonucu, plastiklik artar. Bu tip deneylerin en önemlilerinden birisi Pfefforkorn yöntemidir.

### 2.7.2. Pfefferkorn yöntemi

El ile şekillendirilen 4 cm yükseklik ve 3,3 cm çapındaki plastik kil üzerine 780 g ağırlığındaki bir diskin 10 cm'lik standart bir yükseklikten düşürülmesi ile yapılır . Deformasyon oranı, başlangıçtaki yükseklik ( $h_0$ ), son yükseklik ( $h_f$ ) ve nem miktarından hesaplanır. Deney değişik nem içeriğindeki bünyelerle yapılır. Pfefferkorn plastiklik suyu değeri, deformasyon oranının 2,5 olduğu % nem değeridir. Şekil 2.27'de görüleceği gibi elde edilen doğrunun eğimi büyük ise, yani su miktarındaki küçük bir değişime göre, ezilme yüksekliğindeki değişim büyük ise bünyenin kullanım alanı dar, su miktarındaki büyük değişime karşı ezilme yüksekliğindeki değişim küçük ise, bünyenin kullanım alanı genişir (14) .



Şekil 2.27. Pfefferkorn yöntemi ile plastiklik ölçümü

### 2.7.3. Atterberg plastiklik deneyi

Bu yöntem genellikle toprak bilimcileri tarafından uygulanmaktadır. Sıvı sınır ve plastik sınır olmak üzere iki nem değerinin bulunmasına dayanır.

Plastik sınır; kilden kırılmadan ancak 1/8 inç çapında çubukların yapılabildiği nem miktarıdır ( $P_s$ ).

Sıvı sınır; standart olarak tasarlanmış prinç bir kaba oldukça yumuşak kıvamdaki kil-su karışımı konulur. Kapta kil-su karışımına özel bıçakla (genişliği sabit) bir yarık açılır. Kap standart bir yükseklikten devamlı düşülerek yarığın belirli bir kenarının



kapanması sağlanır. Düşme sayısı, nem değerine karşı grafiğe geçirilir. 25 düşme sayısına karşı gelen nem değeri sıvı sınırıdır (Ss).

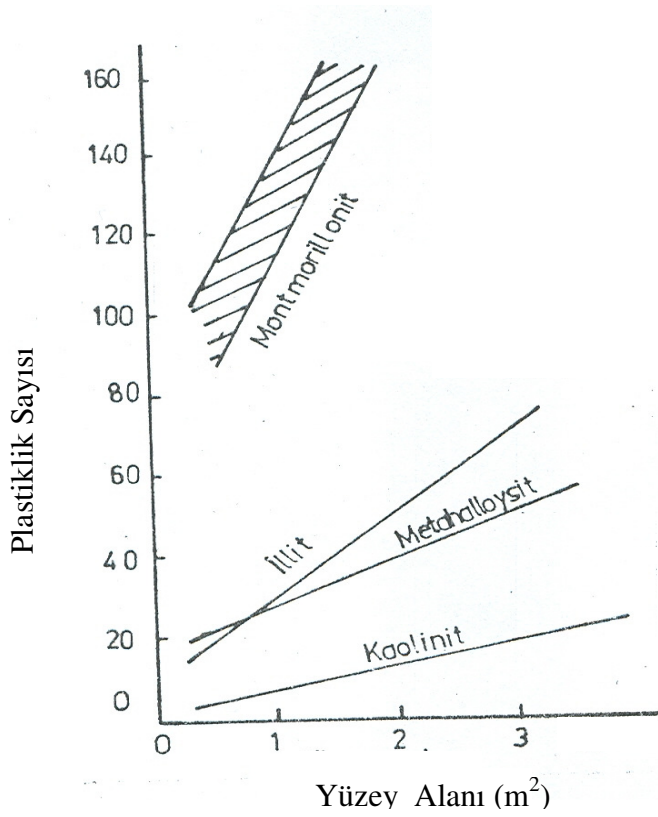
$$\text{Atterberğ Plastiklik Göstergesi} = S_s - P_s \quad [2.3]$$

Plastikliği yüksek killerin plastiklik göstergesi değeri büyüktür. Pulvarize edilmiş killere büyük basınç uygulandığında ancak tanecikler birbirini tutabilir. Bu kilin içindeki çok az nemden ileri gelir. Su miktarı arttıkça taneciklerin birbirini tutması için gerekli basınç azalır. En iyi şekil alabildiği nem değerine eriştikten sonra, bünye artık yapışmaya başlar. Su ilave etmeye devam edilirse, artık bünyenin kendi ağırlığını koruyamayacak duruma geldiği görülür.

Bu yöntem mekaniksel davranışlarla ilgili olmamakla beraber, pratik ve tekrarlanabilen sonuçlar elde edilebilmesi açısından standart bir deneysel yöntemdir. Atterberg sınırlarına birçok değişken etki eder. Taneciklerin çevresinde sabit bir film oluşturacağından plastik sınırın büyüklüğü, kilin taneciklerinin yüzey alanı (Şekil 2.28), belirli bir dereceye kadar değişebilir katyonların miktarına ve kilin özelliğine bağlıdır.

Sıvı sınırdaki taneciklerin çevresindeki su filminin kalınlığı maksimum büyüklüktedir. Bu yüzden serbest su miktarı fazladır (kurumada serbest su yüzeyi gibi davranması), floküle kaolinitler için hesaplanan maksimum su filmi kalınlığından çok daha büyüktür. Bu yüzden süspansiyonlarda su film olarak tutulamaz. Kil taneciklerinin oluşturduğu karton ev (house of card) yapısı içerisinde mekanik olarak tutulur.

Mekaniksel olarak tutulan suyun miktarı kil taneciklerinin birbiri arasında yaptıkları bağlara, yani flokülasyon derecesine bağlıdır. Örneğin Ca-kaolen, Na-kaolen göre daha büyük sıvı sınır değerine sahiptir. Tutulan suyun miktarı, tanecik büyüklüğüne bağlıdır. Tanecik büyüklüğü azaldıkça su tutma yeteneği artmaktadır.



Şekil 2.28. Yüzey alanı ile plastiklik sayısının değişimi

Montmorilit için bu etkenler bir dereceye kadar geçerlidir. Çeşitli kil minerallerinin Atterberg sonuçları Grim tarafından yapılan deneylerle bulunmuştur.

Çizelge 2.4. Çeşitli kil minerallerinin Atterberg  $P_s$ ,  $S_s$  değerleri (a), (b) değişik yörelerden alınan minerallerle yapılan sonuçları göstermektedir.

		$P_s$	$S_s$	$P_G$
Kaolen	(a)	36	58	22
	(b)	30	35	5
İllit	(a)	40	83	43
	(b)	44	95	51
	(c)	46	85	39
Montmorillonit	(a)	97	700	603
	(b)	81	117	36
Atapulgit	(a)	117	178	61
Halloysit		52	62	10

Bu bulgular saf minerallerle yapılan denemeler sonucunda elde edilmiştir. Gerçek değerler bu değerlere göre çok küçük olabilir.

#### **2.7.4. Rieke göstergesi**

Atterberg ve Pffeckorn yöntemlerinin seramik bünyelere uygulanabilmesi için ortaya atılmış bir göstergedir. Normal işleme şartlarındaki plastik sınır;  $RG = \text{Nem miktarı} \{(\text{Pffeckorn-Atterberg}) \text{ plastiklik suyu} \}$  olarak tanımlanmıştır. Seramik bünyeler için Rieke göstergesinin 10'dan küçük olması istenir. Nem miktarının sayısal değerinin malzemenin kıvamına göre bulunmasında çeşitli plastiklik göstergeleri kullanılmıştır.

#### **2.7.5. Vicat iğnesi yöntemi**

Bilinen bir ağırlığın basıncı ile, bünyeye vicat iğnesinin belirli bir sürede batma miktarının ölçülmesine dayanır. En iyi kıvamın 300 g'lık bir ağırlığın 5 dakikada, 4 cm batabildiği nem miktarı olduğu kabul edilmiştir. Bu yöntem kesit alanı 7 cm olan vicat iğnesinin, 4 cm derinliğe ½ dakikada batabilmesi için gerekli basıncın bulunmasına dayanır.

Russell ve Hanks'a göre en iyi kıvamın, silindirik bir örneğin tabanlarından bastırılarak akma sınırı gerilimini tayin etme deneyinde, 5 psi'lik akma değeri veren kıvamın en iyi işlenebilirlikte olduğudur.

#### **2.7.6. Diğer özelliklere dayanan indirekt yöntemler**

Kuru kırılma dayanımı ve kuruma küçülmesi seramikte oldukça çok kullanılan deneylerden biridir. Biçimlendirilen bünyenin kuru örneğinin, kuru kırılma dayanımının ve kuruma küçülmesinin bulunmasına dayanır. Çok plastik bünyelerden elde edilen çamur kurutulduğunda oldukça yüksek kuruma küçülmesi ve kuru kırılma dayanımı gösterir. Kil minerallerinin miktarının yüksek olması ve tanecik büyüklüğünün küçülmesi ile plastiklik ve kuru kırılma dayanımı artar. Kuru kırılma dayanımı ile plastiklik arasında genel olarak bir ilişki bulunmasına rağmen özellikle bünyelerde bu durum görülmeyebilir. İnce kil mineralinin yüzdesi yapışma

özelliğine, tanecik büyüklüğü de paketlenmeye etki eder. Kil giderek artan oranlarda kuvars ile karıştırılır. Kurutulan örneklerin kuru kırılma dayanımları ölçülür. Sonuçta plastiklik, sabit bir dayanım için % kuvars olarak verilir.

### **2.7.7. Bancroft deneyi**

Kilin optimum kıvamında bir pelet hazırlanır. 24 saat kurutulan örnek, su içine atılır. Su içinde dağılma süresi (4 dakika ile 3 saat), plastikliğin bir ölçüsü olarak alınır.

Kolloidal madde miktarı tayini; malahit yeşili (malachite green) veya başka bir boyanın, kilin belirli bir çözeltisi tarafından absorplanma miktarı, diğer bir dolaylı plastiklik belirleme yöntemidir.

### **2.7.8. Direkt yöntemler**

- a) Akma sınırı noktasının veya katılığın bulunması
- a) Akma sınırı noktasının üzerindeki gerilimlerde deforme olma yeteneğinin bulunması
- b) Kırışma ve çatlamanın başlangıcının belirlenmesi ile

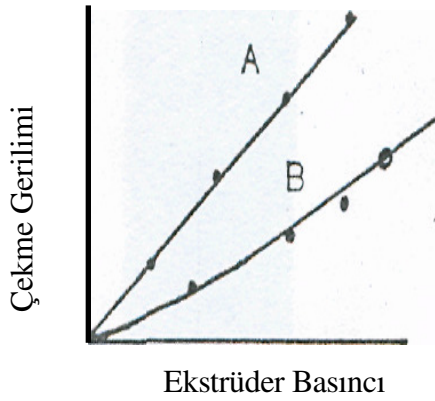
2 cm çapında küre şeklinde kalıplanmış deney örneği iki paralel levha arasında çatlak görülünceye kadar deforme edilir. Yükseklikteki azalma ile çatlağın oluştuğu yükün çarpımı plastiklik göstergesi olarak kullanılmıştır.

### **Grout deneyi**

Deformasyon miktarının bulunmasında silindirik örneklerden faydalanılmıştır. Silindirin çatlamsızın deformasyon miktarı plastiklik göstergesi olarak tanımlanmıştır.

### Linseis Deneyi

Standart bir ağızdan örneğin ekstrüde edilebilmesi için gerekli basıncın ve ekstrüde edilen parçanın kopma geriliminin ölçülmesine dayanır. Bu yöntemin dayandığı ilke, plastikliği yüksek malzemelerin, oldukça yüksek çekme gerilimine sahip olması ve aynı zamanda oldukça düşük kayma gerilimi göstermeleridir. Ekstrüder basıncı kayma gerilimine karşılık gelmektedir. Deney aynı örneklerin farklı nem değerlerinde yapılır ve ekstrüder basıncına karşılık çekme gerilimi grafiğe geçirilir.



Şekil 2.29. Linseis plastiklik deneyi

## **2.8. Metallerde Plastik Şekillendirme Yöntemleri**

### **2.8.1. Plastik şekil verme yöntemleri**

Metalik malzemelerin modern teknolojiye önemi, istenilen şeklin çeşitli yöntemlerle kolaylıkla verilebilmesidir. Metalik malzemelerin genel şekillendirme yöntemleri şöyle sıralanabilir;

- a) Döküm
- b) Plastik şekil verme (mekanik işlemler)
- c) Talaşlı imalat
- d) Kaynak
- e) Toz metalurjisi

Şekillendirme yöntemlerinin seçiminde şekillenecek malzemenin son şekli, boyutları, boyut toleransları ve yapılması istenen parçanın sayısı önemli faktörlerdir. Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi olan plastik şekil verme işlemlerinde, metalik malzemeye bir kuvvet tatbiki ile malzemenin plastik olarak şekil değiştirmesi sağlanır. Bu durum metalik malzemelerin çok iyi plastik şekil değiştirme özelliklerine sahip olmalarından ileri gelmektedir. Mekanik işlemler sonucunda malzemelerin genellikle mekanik ve fiziksel özellikleri değişir ve daha iyi özellikler kazanırlar. Mekanik işlemler bu özelliğinden dolayı bazı durumlarda sadece metalik malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek, istenen değerlere yükseltmek amacıyla da yapılır. Mekanik işlemlerin bu özelliğinden dolayı diğer şekillendirme yöntemlerinden önemli bir farklılığı vardır.

Plastik şekil verme işlemlerinde farklı uygulamalar için, haddeleme, dövme, ekstrüzyon, tel çekme, derin çekme, sıvama, eğme ve kesme gibi çeşitli işlemler geliştirilmiştir. Bununla beraber, bütün bu işlemler şekil verme işlemi sırasında uygulanan kuvvetin şekline veya tipine bağlı olarak birkaç bölüm içerisinde sınıflandırılabilir. Bu bölümler şunlardır;

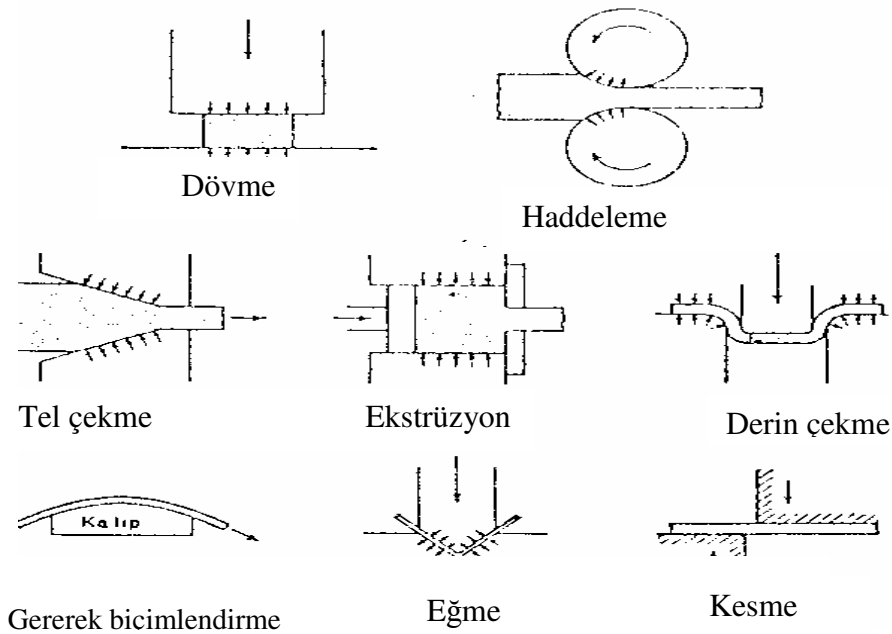
- a) Doğrudan basma işlemleri
- b) Dolaylı basma işlemleri
- c) Çekme işlemleri
- d) Eğme işlemleri
- e) Kesme işlemleri

Doğrudan basma işlemlerinde, kuvvet şekillenecek parçanın yüzeylerine uygulanır, malzeme basma yönüne dik yönlerde akarak şekil değiştirir. Bu türdeki işlemlere örnek olarak dövme ve haddeleme gösterilebilir.

Dolaylı basma işlemlerinde ise genellikle uygulanan çekme kuvvetinin etkisiyle malzemede oluşturulan basma kuvvetleri ile şekil değişimi sağlanır. Bu türdeki işlemlere örnek olarak tel çekme ve derin çekme verilebilir.

Uygulanan çekme kuvvetinin etkisiyle dönen bir kalıp üzerine metalik sacın sarılarak şekillendirildiği gererek şekillendirme yöntemi çekme işlemine en iyi örnektir.

Eğme işlemlerinde, eğme momenti etkisiyle yassı metalik malzemeler şekillendirilir. Kesme işlemlerinde ise, kesme kuvvetlerinin etkisiyle malzemenin kopması sağlanır. Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan bu yöntemler Şekil 2.30'da görülmektedir.



Şekil 2.30. Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan yöntemler

Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan tipik mekanik işlemler plastik şekillendirme işlemleri, hammadde olarak kullanılan ingot, blum veya takoz gibi döküm yöntemi ile kaba olarak şekillendirilmiş metalik bloklardan levha, sac veya çubuk gibi basit şekilli standart ürünleri elde etmek için yapılıyorsa bu işlemlere birinci dereceden plastik şekil verme işlemleri denir.

Plastik şekil verme yöntemlerinde en önemli problem malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olup, bu türdeki şekillendirme yöntemlerinde bu direncin üzerinde bir kuvvet uygulanması gerekmektedir.

İşlemlerle uygulanan kuvvet malzemenin deformasyonunu sağlamalı fakat malzemenin çatlama veya kırılmasına sebep olmamalıdır. Mekanik işlemlerde uygulanan kuvvet (P),

Malzemenin deformasyon şartlarındaki mukavemetine ( $\sigma$ )

Malzeme ile takım arasındaki sürtünme katsayısına ( $\mu$ )

Şekillendirilecek malzemelerin şekli ile ilgili geometrik faktörlere (c) bağlıdır.

Bu üç faktörü ( $\sigma$ ,  $\mu$ , c) etkileyen faktörler, dolaylı olarak uygulanan mekanik işlemi etkilerler. Bunlardan şekillendirilecek malzemenin deformasyon şartlarındaki mukavemetine ( $\sigma$ ) etki eden faktörler; deformasyon sıcaklığı (T), deformasyon miktarı ( $\epsilon$ ), deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ve malzemenin metalurjik yapısıdır (S).

Yüzeylerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzeylerdeki pas veya oksit tabakası, yüzeylerin pürüzlülüğü, sürtünmeyi azaltmak için kullanılan yağın cinsi, malzeme ile takım arasındaki ( $\mu$ ) sürtünme katsayısına etki eden başlıca faktörlerdir.

Şekillendirilecek malzemenin şekli ile ilgili geometrik faktörü etkileyen faktörler ise; şekillenecek metalin mekanik işlem öncesi şekli, kalıbın şekli, metalin bu şekli alması için gereken akma durumudur. Bu işlemlerde ekstrüzyon kalıbının şekli, haddelemede kullanılan merdanelerin çapı, farklı derecede şekillendirmeyi etkileyen geometrik faktörler olacaktır.

Mekanik işlemlerde kullanılan kuvvete etki eden faktörler, aynı zamanda şekillendirilen metalin, mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerdir. Örneğin, mekanik işlem sırasında, malzemenin mukavemetini etkileyen metalurjik yapısı, deformasyon sıcaklığı, deformasyon hızı gibi faktörler, aynı zamanda mekanik işlem sonucunda elde edilen malzemenin mukavemetini de etkiler.

Geometrik faktör (c) ise, malzemenin şekillendirilmesi sırasında meydana gelen hatalara sebep olan önemli bir faktördür.



### 2.8.2. Birim şekil değiştirme kavramı

Tek ekseninde ortalama birim şekil değiştirme, boyuttaki şekil değiştirme miktarının ilk boyuta oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$e = \Delta L / L_0 = (L_i - L_0) / L_0 \quad [2.4]$$

$\Delta L$  = Şekil değiştirme miktarı

$e$  = Birim şekil değiştirme

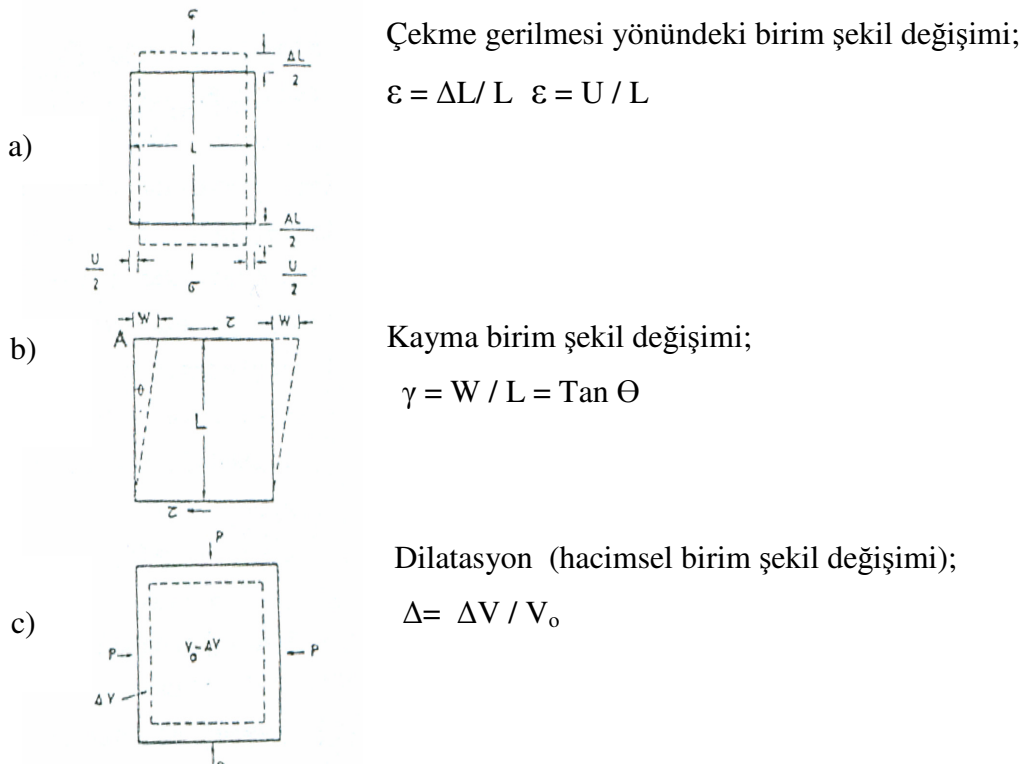
$L_0$  = İlk boy

$L_i$  = Şekil değiştirme sonundaki boydur.

Gerilmenin tanımına benzer olarak, herhangi bir noktadaki birim şekil değiştirme, şekil değiştirme miktarının ilk ölçü uzunluğuna oranının ilk ölçü uzunluğunun sıfıra yaklaşması durumundaki sınır değeridir. Şekil 2.31.a'da çekme gerilmesi etkisi ile bir cisimde meydana gelen birim şekil değişimi görülmektedir. Birim şekil değiştirmeyi boyuttaki değişimin ilk boyuta oranı yerine, tek eksenindeki boyut değişiminin o andaki boyuta oranı olarak tanımlamak daha doğru olup;

$$E = \epsilon = \int_{L_0}^{L_i} dL / L = \ln (L_i / L_0) \quad [2.5]$$

Bağıntısı ile gerçek birim şekil değiştirme ( $\epsilon$ ) belirlenebilir. Plastiklik ve metal biçimlendirme konularında gerçek birim şekil değiştirmeyi kullanmak daha faydalı olmaktadır. Elastiklik denklemlerinin geçerli olduğu çok küçük şekil değiştirmeler için her iki tanıma göre hesaplanan birim şekil değiştirme aynı değerleri vermektedir. Cisimde elastik şekil değişimleri sadece herhangi bir ekseninde şekil değişimi olarak kabul edilemez. İki çizgi arasındaki açının değişimi türünde de şekil değişimi söz konusu olabilir. Bir dik açıdaki açı değişimine kayma birim şekil değişmesi denir. Bir küpün bir yüzeyinde sadece kayma ile gerçekleşen şekil değişimi Şekil 2.31.b'de görülmektedir.



Şekil 2.31. Kayma gerilmesi

a) Çekme gerilmesi b) kayma gerilmesi ve c) hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirmenin tanımı

Uygulanan kayma gerilmesi sonucu A noktasındaki  $90^\circ$ 'lik açı,  $\Theta$  kadar küçülmüştür. Kayma birim şekil değiştirmesi  $\gamma$ , w öteleme miktarının iki düzlem arasındaki L mesafesine oranıdır. Burada W/L oranı, aynı zamanda cismin dönme açısının tanjantına eşittir. Elastik deformasyonlarda olduğu gibi, açı çok küçük ise, açının tanjantı açının radyan cinsinden değerine eşittir. Dolayısı ile kayma birim şekil değiştirmesi genellikle dönme açısı olarak ifade edilir.

$$\gamma = W/L = \text{Tan } \Theta \quad [2.6]$$

Kenar uzunluğu L olan bir küpün altı yüzüne de P basıncı etkilediğinde (hidrostatik basınç durumu) küpün hacminde ( $V_0$ )  $\Delta V$  kadar bir küçülme olur (Şekil 2.31.c). Hidrostatik basınç etkisiyle bir cisimde meydana gelen birim şekil değişimi, dilatasyon (hacimsel birim şekil değişimi) olarak bilinir ve  $\Delta = \Delta V/V_0$  şeklinde ifade edilir.

### 2.8.3. Plastik deformasyonda gerilme birim şekil değiştirme ilişkileri

Plastik deformasyonun değişik türleri, plastiklik teorisindeki matematiksel formülleri elastiklik teorisine oranla daha karmaşık hale sokmakta ve plastiklik analizlerini zorlaştırmaktadır. Örneğin elastik deformasyon, gerilme ve şekil değiştirme hallerinin sadece ilk ve son durumlarına bağlı olmasına rağmen, plastik deformasyon sonuca varmak için izlenen yükleme yoluna bağlıdır. Ayrıca, plastik deformasyonda gerilme ile şekil değiştirme arasında, elastik deformasyonda olduğu gibi doğrusal bir ilişki yoktur. Deformasyon sertleşmesi olayını basit bağıntılarla plastiklik teorisine uyarlamak oldukça zordur. Buna rağmen plastiklik teorisi mekanikte önemli bir alan olup, mühendislikte önemli problemlerin çözümünü kolaylaştıran teorilerin geliştirilmesini sağlamıştır.

Plastiklik teorisi, bir çok değişik tipte problemin çözümünde kullanılmaktadır, örneğin dizayn konularında, malzemede akma olayına meydan vermeden bir cisme uygulanabilecek maksimum yükün tayininde kullanılmaktadır. Gerilmeler cinsinden ifade edilen akma kriteri tüm gerilme halleri için geçerlidir. Tasarımcı, istendiğinde, akma gerilmesinin ötesindeki küçük plastik deformasyonların uygulanacağı durumlarda da plastiklik teorisinden faydalanabilir. Örneğin titreşimli aşınma, sıkı geçme olayları gibi.

Metallerin plastik şekil değiştirme mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için de plastiklik teorisinden faydalanılmaktadır. Bu alanda dikkatler, kristal yapıya sahip katılardaki hatalar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Metalürjik değişkenlerin, kristal yapının ve kafes hatalarının, plastik deformasyon üzerindeki etkileri en önemli konulardır (15).

#### Malzemelerin plastik davranışına ait tipik örnekler

Basit bir çekme deneyi sonunda elde edilen veriler ile çizilen gerçek gerilme  $\sigma_g$ , gerçek birim şekil değiştirme  $\epsilon$ , eğrileri plastiklik çalışmalarında çok faydalıdır. Malzemelere ait tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelenerek bunların ideal

malzemelere ait teorik gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden hangisi ile bağdaştırılabileceğine karar verilir. Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisine genellikle plastik akış eğrisi adı verilir. Çünkü bu eğri, belirli bir deformasyon oranı için metalin plastik olarak akışını sağlayacak gerekli gerilmeleri belirtmektedir. Plastik akış eğrisi matematiksel olarak;

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n$$

[2.7]

Şeklindeki bir denklem ile ifade edilebilir.

n: Deformasyon sertleşmesi üssü

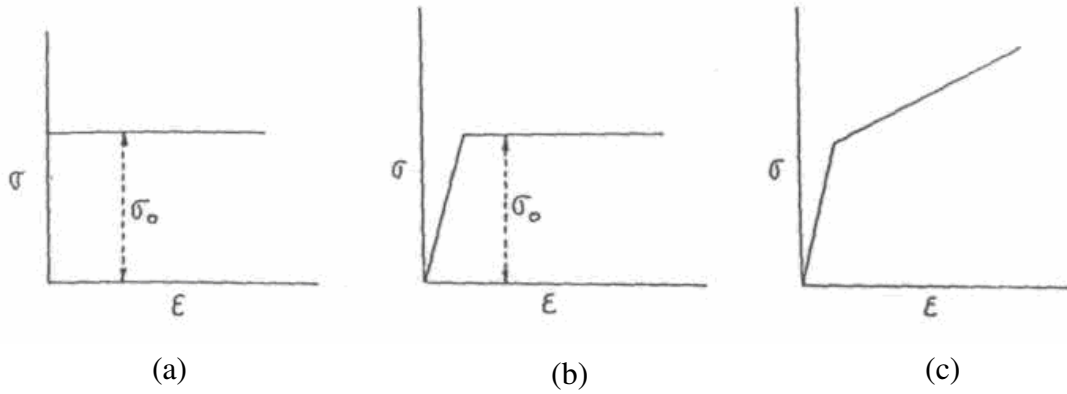
K: Malzeme sabiti

$\varepsilon = 1$  için bulunan gerilmeye eşdeğerdır. Denklem sadece, plastik deformasyonun başladığı akma noktası ile boyun verme olayının başladığı maksimum yük noktası arasındaki homojen deformasyon bölgesinde geçerlidir. Denklem, basitliğine rağmen, plastiklik teorisi denklemlerinde kullanıldığında, matematiksel karmaşıklıklara neden olmaktadır. Bu nedenle, fiziksel gerçeklerden fazla uzaklaşmadan, matematiksel işlemleri basitleştirecek ideal gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerine başvurulmaktadır.

Şekil 2.32.a'da rijit ve mükemmel plastik bir malzemeye ait ideal gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini görölmektedir. Böyle bir malzemedede,  $\sigma$  akma gerilmesine ulaşıncaya kadar hiçbir plastik şekil değiştirme olmaz, malzeme tamamen rijittir. Ancak  $\sigma_a$  değerinde malzeme plastik şekil değişimine başlar ve deformasyon sertleşmesi olmaksızın, plastik şekil değiştirme sabit gerilme altında devam eder. Böyle bir ideal duruma, büyük oranda soğuk deformasyona uğramış sünek malzemelerde karşılaşılr.

Şekil 2.32.b'de elastik bölgeye sahip, mükemmel plastik bir malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini göstermektedir. Bu ideal duruma ise, büyük miktarlarda akma uzaması gösteren az karbonlu çeliklerde yaklaşılmaktadır.

Daha gerçekçi bir yaklaşıma ait ideal gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.32.c’de görülmektedir. Bu eğride elastik ve plastik davranış bölgelerinin her ikisi birer lineer doğru parçası ile gösterilmiştir. Bu son şık bile, diğer ikisine oranla daha karmaşık matematik işlemlere yol açmaktadır (16).



Şekil 2.32. İdeal “gerilme-birim şekil değiştirme” eğrileri

- a) Rijit ve mükemmel plastik malzeme
- b) Elastik bölgeye sahip mükemmel plastik malzeme
- c) Lineer iki bölgeli malzeme

#### 2.8.4. Kayma

Kristal yapıdaki malzemelerde en önemli deformasyon mekanizması olan kayma atom düzlemlerinden birinin komşu atom düzlemi üzerinde kayması ile gerçekleşir. Kayma, belirli kristallografik düzlemlerde ve belirli kristallografik doğrultularda dislokasyonların hareketi ile olur.

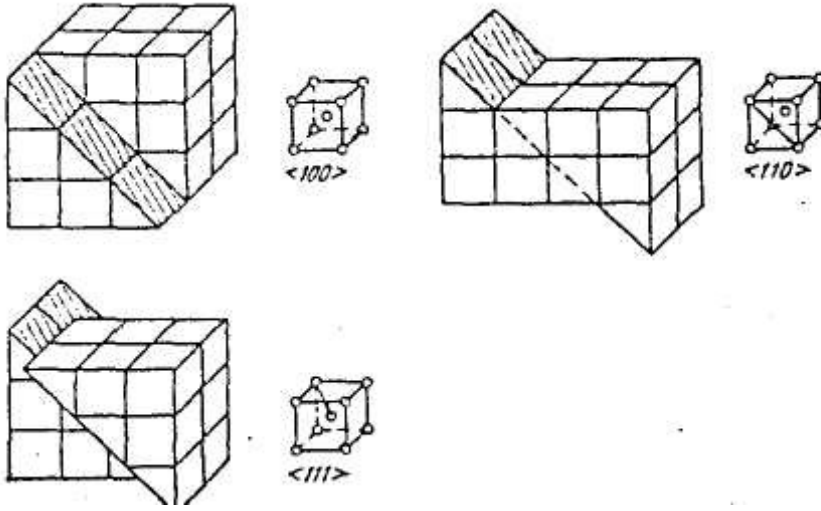
Diğer bir deyişle, kayma atom yoğunluğu en fazla olan düzlemlerde (kayma düzlemi) ve kayma düzlemi üzerinde atomların en sık buldukları doğrultularda (kayma doğrultusu) dislokasyonların hareketi ile meydana gelmektedir.

Şekil 2.33’de çeşitli kristal yapısındaki metaller için kayma düzlem ve doğrultuları ile kayma sistemi sayıları verilmiştir.

Yapı	Kayma düzlemi	Kayma doğrultusu	Toplam kayma sistemi sayısı	Gösterim
YMK (Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, $\gamma$ Fe,...)	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
HMK ( $\alpha$ Fe, W, Mo, $\beta$ princi)	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
$\alpha$ Fe, Mo, W, Na	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
$\alpha$ Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	
SDH (Cd, Zn, Mg, Ti, Be,...)	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
Ti	{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
Ti, Mg	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	
NaCl, AgCl	{110}	$\langle 110 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

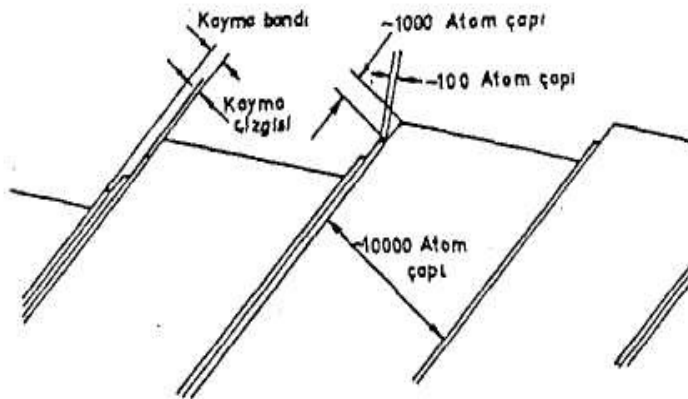
Şekil 2.33. Çeşitli kristal yapılar için kayma düzlem ve doğrultuları ile kayma sistemleri (17).

Bir atom düzleminin bitişik bir atom düzlemi üzerinde kayması sonucu kristalin bir kısmı, bitişik kısma göre bu iki kısmı ayıran kayma düzlemi içindeki bir kayma doğrultusu boyunca ötelenmektedir. Ötelenme miktarı, yani atomların yer değiştirmeleri atomlar arası mesafenin tam katıdır (Şekil 2.34).



Şekil 2.34. HMK sistemdeki bir kristalde kayma düzlemi üzerinde çeşitli yönlerdeki kayma

Plastik deformasyona uğrayan tek kristalin yüzeyinde bir veya birden fazla ince paralel çizgiler oluşmaktadır. Elektron mikroskobu ile yapılan araştırmalarda, bu kayma çizgilerinin atom düzlemlerinin birbirlerine göre 20-500 atom çapı mertebesinde yer değiştirmeleri sonucu oluştuğu ve bir çok kayma çizgisinin bir arada oluşumu ile de kayma bantlarının meydana geldiği görülmüştür (Şekil 2.35). Kristalin kayma bantları arasında kalan kısmının ise sadece elastik deformasyona uğradığı saptanmıştır.



Şekil 2.35. Plastik deformasyon sonucu tek kristalin yüzeyinde oluşan kayma çizgileri ve kayma bantları

### 2.8.5. Plastik deformasyonu etkileyen faktörler

Malzemenin yapısı ve mekanik özellikleri ile deformasyon şartları (sıcaklık, deformasyon hızı ve sürtünme durumu) malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunlar dışında, deformasyonda uygulanan hidrostatik basınç, malzemedeki kalıntı gerilmeler ve şekillenecek malzemenin geometrik şekli gibi faktörler de plastik deformasyonu etkilerler. Plastik deformasyonu gerçekleştirecek gerilmeyi ve/veya yapılabilecek deformasyon oranını etkileyen faktörler şunlardır.

#### Malzeme yapısı

Malzemenin yapısı, kimyasal bileşimi ile termomekanik geçmişine bağlıdır. Çeşitli mekanik ve ısı işlemlerle malzeme yapısını değiştirmek mümkündür. Malzemenin mukavemeti, sünekliği, kırılma şekli gibi deformasyon kabiliyetini belirleyen özellikleri malzeme yapısına bağlıdır. Genel olarak tek fazlı malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti çok fazlı malzemelerden daha fazladır. Tek fazlı malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti de ergime sıcaklığı arttıkça azalır. Çok fazlı malzemelerde fazların şekli, dağılımı, mekanik özellikleri, fazlar arasındaki arayüzey enerjisi ve arayüzeyin bağı plastik deformasyon kabiliyetini etkileyen önemli faktörlerdendir.

Metalik malzemelerde plastik deformasyonu etkileyen malzeme yapısı ile ilgili önemli faktörlerden birisi de tane boyutudur. Küçük taneli malzeme yüksek kırılma tokluğu ve süneklik özelliklerine sahip olmasına karşın mukavemetinin yüksek olması nedeniyle plastik deformasyon için daha büyük gerilme uygulanmasını gerektirir. Malzemenin üretiminde kullanılan plastik deformasyon veya ısı işlem sırasında tanelerin kristallografik açıdan tercihli yönelmesi sonucunda oluşan yapı mekanik özelliklerin anizotropisine sebep olduğundan malzemenin plastik deformasyon özelliklerini etkiler. Malzeme yapısında bulunan metalik olmayan oksit, sülfür veya nitrür gibi kalıntılar genellikle plastik deformasyon kabiliyetini azaltır. Kalıntılar da ikinci faz tanelerinin etkilerine benzer şekilde deformasyonu



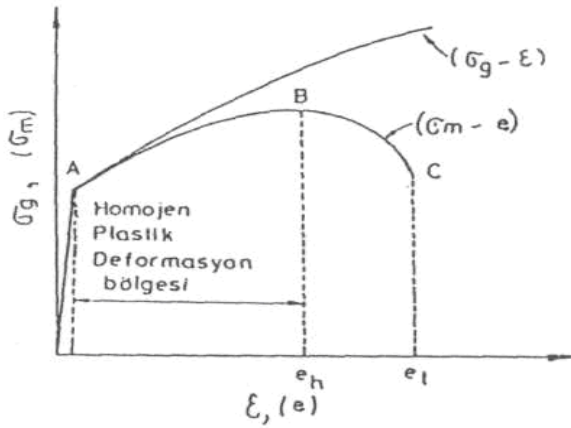
etkilerler. Kalıntıların mukavemeti ve sünekliği yüksek ise ve de matris taneleri içinde küresel veya lifsel şekilde dağılmışlar ise genellikle zararsızdırlar. Eğer kalıntılar çok küçük, küresel tanecikler halinde, homojen olarak malzeme yapısında dağılmışlarsa zararsız olmaları yanında dağılma sertleşmesinde olduğu gibi malzemenin mukavemetinin artmasına da sebep olurlar.

Kırılgan kalıntılar ince bir film halinde tane sınırlarında toplandıklarında çok zararlıdırlar. Deformasyon sırasında şekil değiştirebilen kalıntılar, deformasyonun en fazla olduğu doğrultuda yönlenermek mekanik fiberleşmeye sebep olabilirler.

### Mekanik özellikler

Metalik malzemelerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşime ve metalurjik yapıya bağlıdır. Mekanik işlemlerde gerekli olan gerilme, malzemenin deformasyon şartlarındaki mukavemetine, uygulanabilecek deformasyon oranı ise malzemenin deformasyon şartlarındaki sünekliğine bağlıdır. Malzemelerin mekanik özellikleri; çekme, basma, burma vs. gibi mekanik deneylerle saptanabilir. Çekme deneyi uygulamada mekanik özelliklerden mukavemet ve sünekliğin belirlenmesi amacıyla en fazla kullanılan deneydir.

Çekme deneyi ile elastik özellikler (elastiklik modülü, elastiklik sınırı, rezilyans vs.) ve plastik özellikler (akma gerilmesi, çekme mukavemeti, % uzama, kesit daralması, tokluk gibi) tespit edilebilir. Bunun dışında deformasyon şartlarında (sıcaklık ve deformasyon hızı) yapılan deneylerden elde edilen "gerilme-birim şekil değiştirme" eğrilerinin şekli, mekanik işlem sırasında malzemenin deformasyon özellikleri hakkında fikir verir. Çekme deneyinden elde edilen "gerilme-birim şekil değiştirme" eğrisinden malzemenin deformasyon sertleşmesi hızı, deformasyon sertleşmesi üssü, üniform birim şekil değiştirme gibi plastik deformasyonda önemli mekanik özellikleri de belirler (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. Mühendislik ve gerçek “gerilme-birim şekil değiştirme” diyagramı

### Deformasyon hızı

Malzemelerde uygulanan deformasyon hızı, mühendislik deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ve gerçek deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. Bunlardan mühendislik deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ), çekme veya basma deneyinde cihazın çene hızı ile doğru orantılıdır. Mühendislik deformasyon hızı, numune boyuna ve çene hızına bağlı olarak bulunabilir.

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = d[(L-L_0)/L_0]/dt = 1/L_0 \times dL/dt = V/L_0 \quad [2.8]$$

Burada;  $L_0$  = Numunenin deformasyon öncesi ölçü uzunluğu

$L$  = Numunenin deformasyon sonrası ölçü uzunluğu

$V$  = Çene hızı ( $V = dL/dt$ )

Gerçek deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ise, birim zamanda meydana gelen gerçek birim şekil değiştirme miktarını gösterir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L}$$

Çene hızının ( $V$ ) birimi mm/sn, mm/min ve cm/min. alınırsa, mühendislik ve gerçek deformasyon hızlarının birimi  $sn^{-1}$ ,  $min^{-1}$  ve  $saat^{-1}$  olarak bulunur.

Gerçek deformasyon hızının, numune boyu ve çene hızı ile ilişkisini veren bağıntısına göre, çene hızı sabit iken, numune uzadıkça gerçek deformasyon hızının azalacağı, numune boyu kısaltıkça gerçek deformasyon hızının artacağı anlaşılmaktadır. Gerçek deformasyon hızı numune boyunun etkisini gösterdiğinden, mühendislik deformasyon hızına göre daha doğru sonuç vermektedir, söz konusu hızları arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir..

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{L} = \frac{L_0}{L} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{\dot{e}}{1+e}$$

### Sıcaklık

Malzemelerin mekanik deneyler ile elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemetine, sünekliğine ve kırılma özelliklerine deformasyon sıcaklığının etkisi fazladır. Deformasyon sıcaklığı artarken genellikle mukavemet azalır ve süneklik artar. Sıcaklığa bağlı olarak oluşan çökme, deformasyon yaşlanması veya yeniden kristalleşme gibi yapısal değişimler sıcaklık ile mekanik özellikler arasındaki bu genel ilişkiyi etkileyebilir.

### Sürtünme ve yağlama

Plastik deformasyon, deformasyonu gerçekleştirecek cihazda, kalıp veya bir alet ile iş parçasının teması sonucu gerçekleşmektedir. Temasta olan ve birbirlerine bağlı olarak harekette bulunan iki parçanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık yükselişi ile enerji kaybı meydana gelir. Bu olayların etkisini azaltmak için alınması gereken önlemlerin en önemlisi yağlamadır. Sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olayları inceleyen bilim dalına triboloji denmektedir.

Genel anlamda sürtünme, birbirleri ile temas eden ve bağlı olarak hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir.

Sürtünme katsayısı arttıkça iş parçasının deformasyon kabiliyeti azalır. Sürtünmeyi azaltmak için yağlama yapılır. Mekanik işlemlerde yağlamanın etkilerini şöyle sıralayabiliriz;

- a) Sürtünmeyi azaltır
- b) Aşınmayı kısmen veya tamamen önler
- c) Deformasyon için uygulanması gereken kuvveti azaltır
- d) İş parçasının deformasyon oranını artırır
- e) Parça yüzeyinin düzgün çıkmasını sağlar
- f) Sürtünme nedeniyle oluşması muhtemel yüzey hatalarını azaltır
- g) Takımın aşınmasını azaltarak ömrünü artırır
- ğ) Parça ile takım arasında ısı yönünden yalıtıklık sağlar
- h) Adyabatik ısınmayı önleyerek parça ve takımını soğutur

### **2.8.6. Dövülebilme Kabiliyeti**

#### Kütlesel şekil değiştirme kabiliyeti

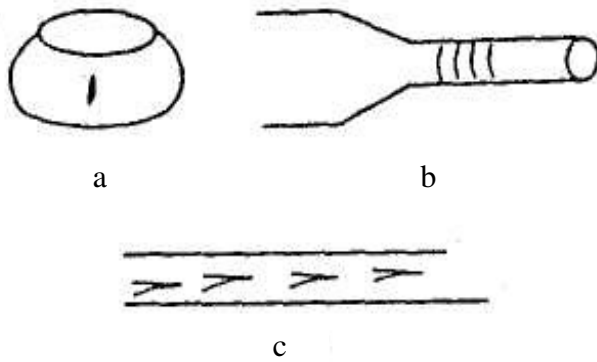
Plastik şekil verme işlemleri kütlesel şekil verme işlemleri ve saç biçimlendirme işlemleri olarak iki gruba ayrıldığında, kütlesel şekil verme işlemleri dövme, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme gibi mekanik işlemleri içerir. Saç biçimlendirme işlemleri; derin çekme, sıvama ve gererek şekillendirme işlemlerini içerir. Biçimlendirilebilme (formability) saçların şekil değiştirme yeteneğini belirtmek için, kütlesel şekil değiştirme kabiliyeti (workability) ise kütlesel şekil değişimine uğrayan malzemeler için kullanılmaktadır.

Kütlesel şekil değiştirme kabiliyeti, bir kütlesel şekil verme işleminde malzemede kırılma olmadan yapılabilen en fazla şekil değiştirme miktarı olarak tanımlanır. Kütlesel şekil değiştirme kabiliyeti, malzemeye, işlem değişkenlerine ve ürünün şekline bağlıdır, örneğin belirli bir malzemenin ekstrüzyon işlemindeki kesit

daralması çekme işlemine göre çok fazladır. Tel çekme işlemindeki çekme gerilmeleri, şekillendirilen malzemede sünek kırılmayı başlatan mikro boşluk oluşumuna sebep olmaktadır. Ekstrüzyon işleminde ise basma gerilmeleri bu olayı geciktirmektedir. Kütlesel şekil verme işlemlerinde malzemelere genellikle basma gerilmeleri uygulanmaktadır. Kütlesel şekil verme işlemini sınırlayan olay sünek kırılmadır.

Kütlesel şekil verme işlemleri sırasında üç tip kırılma oluşmaktadır;

a) Serbest yüzey çatlakları: Kütlesel şekil verme işleminde en çok görülen çatlak tipidir. Bu tip çatlaklara örnek olarak silindirik malzemelerin sürtünmeli koşulda dövülmesi (Şekil 2.37.a) veya kalın yassı malzemelerin haddelenmesi sırasında, genişleyen yan yüzeylerde oluşan çatlaklar verilebilir.



Şekil 2.37. Kütlesel şekil verme işlemlerinde görülen çatlak örnekleri

- Yığılma işleminde serbest yüzey çatlakları
- Ekstrüzyon işleminde aşırı sürtünmenin yol açtığı yüzey çatlakları
- Tel çekme veya ekstrüzyon işlemlerinde homojen olmayan şekil değiştirmenin yol açtığı iç çatlaklar

b) Kalıp temas yüzey çatlakları: Bu tür hatalara örnek olarak sürtünme kuvvetlerinin aşırı olduğu ekstrüzyon işlemleri verilebilir. Gerek püskürtme işlemi ile kap veya tüp üretiminde, kalıp temas yüzeyinde sürtünmeler fazla ise ürünün yüzeyinde birbirine paralel olan çevresel çatlaklar oluşur (Şekil 2.37.b). Benzer çatlaklara köşeleri keskin veya çok küçük yarıçapa sahip kalıplarla dövme işleminde de rastlanır.

c) İç çatlaklar: Bu çatlaklara örnek olarak ekstrüzyon veya tel çekme işlemlerinde ürünün ortasında rastlanılan ok ucuna benzer çatlaklar verilebilir (Şekil 2.37.c).

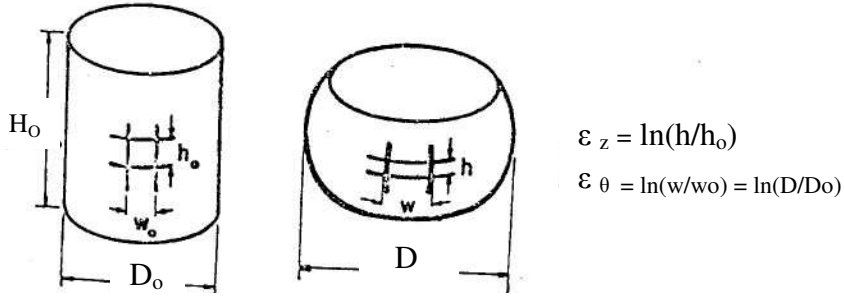
Bu tür iç çatlaklara bazen dövme işlemlerinde de rastlanabilir. Yukarıda sözü edilen tüm çatlak türlerine ikincil çekme gerilmelerinin bölgesel olarak hızlı artışı neden olmaktadır.

Plastik şekil verme uygulamalarında şekil değiştirme kabiliyeti sadece malzemenin sünekliliğine bağlı değildir. Bölgesel gerilme, şekil değiştirme hızı, sıcaklık ve malzemeye ait özellikler şekil değiştirme kabiliyetini birlikte etkileyen faktörlerdir. Plastik şekil değiştiren malzemedeki gerilme ve birim şekil değiştirme her noktada eşit değildir. Kalıp tasarımı, iş parçası geometrisi, yağlama durumu, işlem parametreleri ile birlikte, malzemedeki bölgesel gerilme ve birim şekil değiştirmeyi belirlerler. Plastik şekil değiştirme işleminin başarıyla sürdürülebilmesi için bu parametrelerin kontrol edilmesi gerekir.

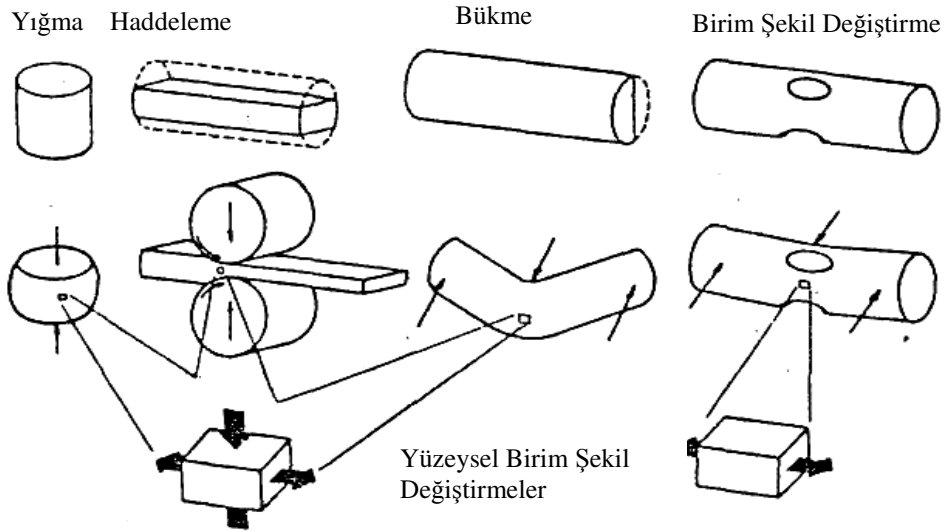
Şekillendirme limit diyagramlarının elde edilebilmesi için farklı gerilme ve birim şekil değiştirme koşullarının sağlanabileceği bir deney türüne gerek vardır. Silindirik bir numunenin yığılma işlemi bu amaç için uygulanan en yaygın deney türüdür. Şekil 2.38'de görüldüğü gibi yığılma esnasında, silindirin boyu kısalırken, serbest olan yan yüzeyi genişleyerek fıçı şeklini alır. Belirli bir şekil değiştirme oranında yüzeyde çatlama görülür. Şekil 2.39'da yüzeyde sünek kırılmanın oluşturulabileceği haddeleme, eğme gibi diğer deney türlerini şematik olarak göstermektedir. Parça yüzeylerine hassas olarak çizilen kare veya dairelerin, işlem öncesi ve işlem sonrası boyutları ölçülerek, birbirine dik iki yöndeki birim şekil değiştirme oranları hesaplanır. Bu deneylerde yüzeydeki birim şekil değiştirmeler Şekil 2.39'da görüleceği gibi çekme veya basma bölgesindedir. Ancak şeklin daha rahat incelenebilmesi için yatay eksen ters tarafa doğru yönlendirilmiştir.

Şekil 2.40' incelendiğinde, sürtünmesiz yığılma işleminde, birim şekil değiştirmenin ( $\epsilon_z$ ) çevresel birim şekil değiştirmenin ( $\epsilon_\theta$ ) 2 katı olduğu görülür ve fıçılama olayı görülmez. Yığılmanın sürtünmeli koşulda yapılması durumunda, sürtünmesiz haldeki

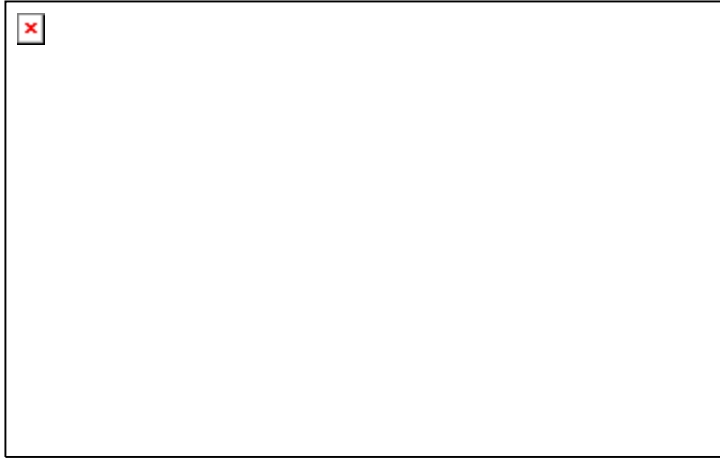
$\frac{1}{2}$  eğimli doğrunun, yukarıya doğru yönelen eğri haline dönüştüğü görülür. Yükseklik/çap ( $h/d$ ) oranının küçülmesi ve beraberinde sürtünmenin artması fiçilaşma olayını, çevresel çekme gerilmesini ve  $\epsilon_z/\epsilon_\theta$  oranını artırır.



Şekil 2.38. Silindirik bir parçanın yığılma deneyinin şematik gösterilişi

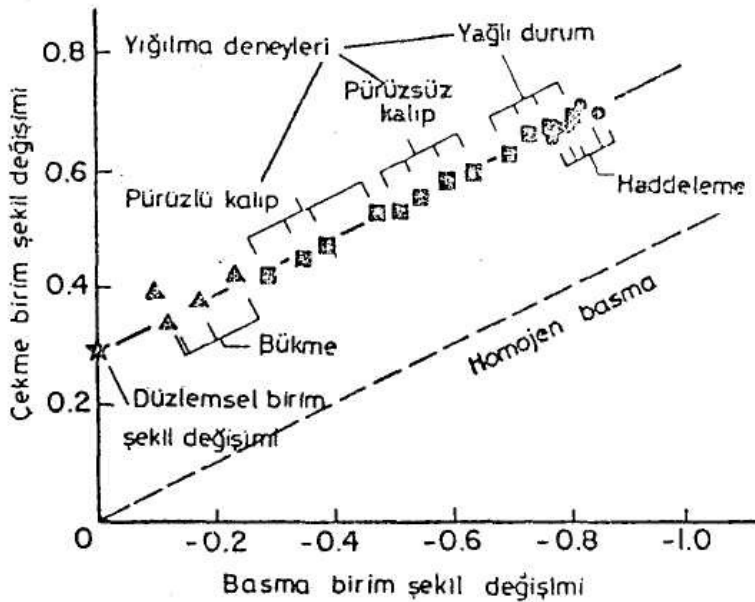


Şekil 2.39. Şekillendirme limit diyagramlarının elde edilmesi için kullanılan yığılma, haddeleme, eğme, düzlemsel şekil değişimli eğme deneyleri (18).



Şekil 2.40. Farklı plastik şekil değiştirme işlemlerinde, plastik şekil değiştirme yolu

Aynı malzeme için farklı deney ve koşullar kullanılarak, değişik plastik şekil değiştirme yolu izlenir ve yüzeyde sünek kırılma elde edilinceye kadar işlem sürdürülür. Sünek kırılma durumuna ait noktalar birleştirildiğinde Şekil 2.41. ve Şekil 2.42'deki gibi farklı malzemelere ait şekillendirme limit diyagramları elde edilir. Elde edilen doğruların eğimi tümünde  $\frac{1}{2}$  değerinde olup sabittir. Ancak doğrunun ordinatı kestiği nokta, malzemedен malzemeye değişir.

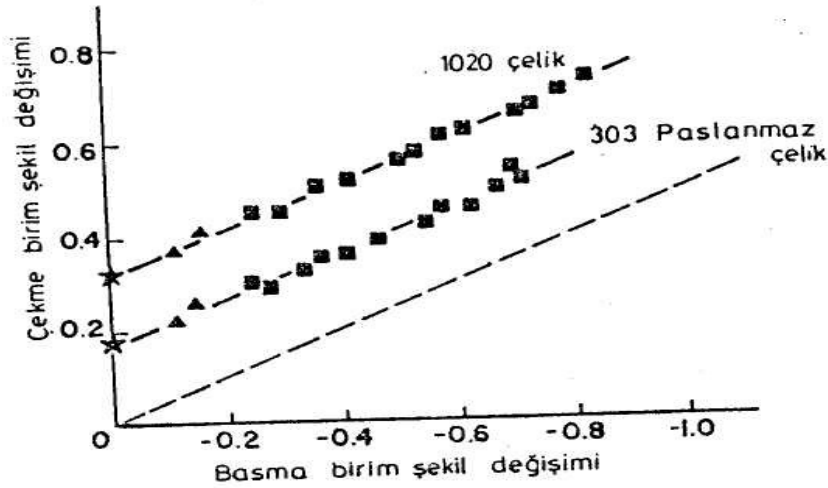


Şekil 2.41. Soğuk çekilmiş 1045 karbon çeliğine ait oda sıcaklığındaki şekillendirme limit diyagramı (19-20).

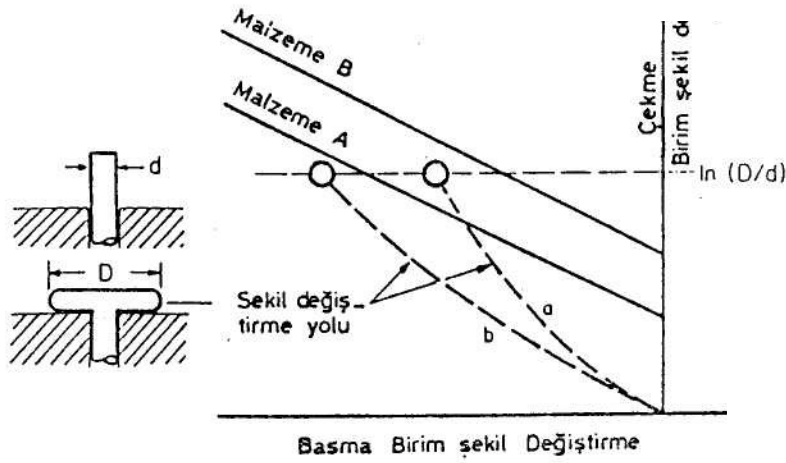


Şekillendirme limit diyagramları, karmaşık kütleli şekil verme işlemlerinin incelenmesinde kullanılan oldukça yararlı bir araçtır. Plastik şekil verme işleminde bölgesel gerilmeleri doğrudan ölçmek mümkün değildir. Ancak iş parçasının farklı bölgelerindeki birim şekil değiştirmeleri, yüzeye çizilen ağlarla (kare veya daireler) gözle izlemek ve ölçmek mümkündür. Uygun bağıntılar yardımı ile birim şekil değiştirme değerlerinden, o bölgede oluşan gerilmeleri de hesaplamak mümkündür.

Karmaşık plastik şekil verme işlemlerinde, izlenen plastik şekil verme yolu, şekillendirme limit diyagramı üzerine taşınarak durum değerlendirilmesi yapılabilir. Plastik şekil değiştirme yolu, parça son şekline varmadan, şekillendirme limit diyagramını kesiyorsa, parçada sünek çatlama beklenmelidir. Çatlamayı önlemek için ya daha kaliteli bir malzeme kullanılmalı veya işlem parametreleri değiştirilerek, plastik şekil değiştirme yolunun şekillendirme limit diyagramını kesmemesi sağlanmalıdır. Şekil 2.43'de konuyla ilgili örnek verilmektedir.



Şekil 2.42. 1020 karbon çeliği ile 302 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığındaki şekillendirme limit diyagramı (21).



Şekil 2.43. Şekillendirme limit diyagramı yardımıyla durum değerlendirmesine ait örnek (22)

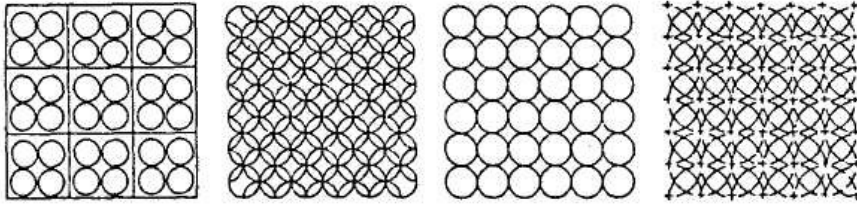
Şekilden izleneceği gibi  $d$  çapında bir çubuktan, başlık çapı  $D$  olan bir cıvata dövülecektir. Çevresel çekme biçim şekil değiştirme ( $\epsilon_\theta$ ) değeri  $\ln (D/d)$  dır. Bu iş için A malzemesi kullanılacak ve plastik şekil değiştirme yolu olarak a eğrisi izlenecek olursa, parçada çatlama beklenebilir. Aynı plastik şekil değiştirme yolunu izleyerek, çatlama önlenmek istenirse, plastik çekil değiştirme kabiliyeti daha yüksek olan bir B malzemesine gerek vardır. Malzemeyi değiştirmek mümkün değilse, işlem parametreleri değiştirilerek, plastik şekil değiştirme yolu olarak b'ye benzer yol izlenir ve A malzemesine ait diyagramla kesişmesi önlenir, örneğin daha iyi bir yağlama uygulanarak, aksenal basma birim şekil değiştirmenin ( $\epsilon_z$ ) çevresel çekme birim şekil değiştirmeye ( $\epsilon_\theta$ ) oranla daha büyük olması sağlanır.

### 2.8.7. Biçimlendirme sınır diyagramı

Metalik sacların biçimlendirme işlemi genellikle karmaşık bir işlemdir. Bükme, gererek biçimlendirme ve derin çekme işlemleri parçaya beraber uygulanır. Bu nedenle malzemenin çekme deneyi yardımı ile bulunan değişik mekanik özellikleri ( $\sigma_a$ ,  $\sigma_c$ ,  $\epsilon_T$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $R$ ) tek başlarına biçimlendirebilirle özelliklerini daha iyi belirlemek amacıyla, gererek biçimlendirme işlemine benzediği için Erichsen veya Olsen deneyi, derin çekme işlemine benzediği için Swift deneyi kullanılmaktadır. Erichsen

veya Olsen deneyinde elde edilen tümseğin yüksekliği, Swift deneyinde ise derin çekme oranı sınırı ölçü olarak kullanılır.

Yukarıda belirtilen deneyler, belirli koşullar altında gerçekleştirilmektedir. Laboratuvar koşulları endüstriyel koşullardan farklıdır. Dolayısıyla bu deneyler kullanılan malzemenin bu şartlar altındaki davranışı hakkında bilgi verir. Başka bir ifadeyle, söz konusu deneyler malzeme sınıflandırma ve seçme konusunda yararlı olurlar. Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için, plastik şekil değiştirme analizlerine gerek vardır. Bu amaçla, metalik sac yüzeyine, elektrokimyasal yolla, Şekil 2.44'deki örneklere benzer şekilde dairelerden oluşan bir ağ çizilir.



Şekil 2.44. Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örnekleri

Deney numunesinin boyutlarını, yağlama yöntemini ve yağlayıcı türünü değiştirerek, çekme, Erichsen, Swift veya benzeri deneylerle, plastik şekil değiştirme işlemi için farklı gerilme durumları oluşturulur. Bu gerilme koşulları altında malzemede boyun verme veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme işlemi sürdürülür.

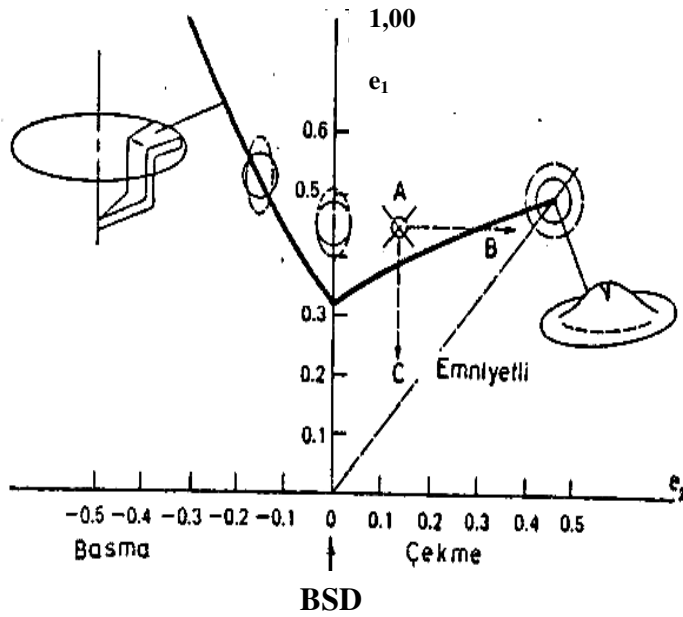
Deney sonrası değerlendirme için boyun verme bölgesindeki, çatlak bölgesindeki veya çatlağın bitişiğindeki birinci ve ikinci komşu daire seçilir. Ancak bu seçim başlangıçta kesin yapılır ve tüm analizler için hep aynı bölgedeki daire değerlendirilir.

Biçimlendirme işlemi sonunda başlangıç daire çapında ( $D_0$ ) ya büyüme olur (dengeli iki eksenli çekme gerilmesi durumunda) veya daire elipse dönüşür (Şekil 2.45). Şekil değiştirmiş dairenin  $D_1$ , en büyük eksen ile  $D_2$  en küçük eksen ölçülerek, en büyük ( $e_1$ ) ve en küçük ( $e_2$ ) birim şekil değiştirme miktarları bulunur;

$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad [2.9]$$

$$e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad [2.10]$$

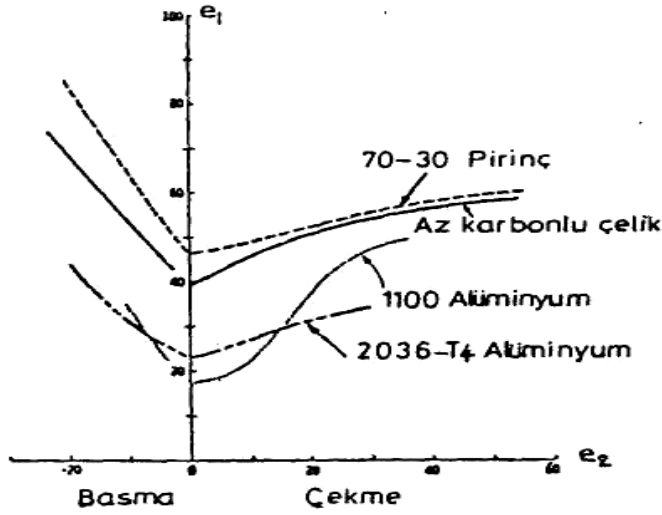
Değişik deneylerde, değişik koşullar için bulunan değerler bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 2.44'de görülen biçimlendirme sınır diyagramı (BSD) elde edilir. biçimlendirme sınır diyagramının üst bölgesi tehlikeli bölge, alt bölgesi emniyetli bölgedir. Diyagram ayrıca çekme-çekme veya çekme-basma tipi şekil değiştirme türlerinin bulunduğu iki bölgeye ayrılır. Çekme-çekme bölgesinde ( $e_2$ ) pozitif işaretlidir ve bu bölgeye ait ilk çalışmalar Keeler tarafından gerçekleştirilmiştir. Çekme- basma bölgesinde ( $e_2$ ) negatif işaretlidir ve bu bölge ile ilgili ilk çalışmalar Goodwin tarafından yapılmıştır. Biçimlendirme sınır diyagramı, Keler - Goodwin diyagramı olarak da adlandırılır. Biçimlendirme sınır diyagramında  $e_2$ 'nin sıfır olduğu nokta, düzlemsel şekil değiştirmeyi belirleyen noktadır. Farklı malzemelerin birbiriyle karşılaştırılmasında bu noktaya ait değerler kullanılır.



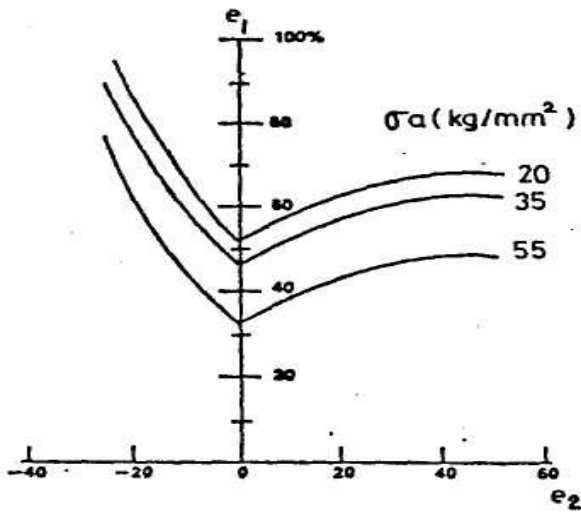
Şekil 2.45. Az karbonlu çeliğe ait biçimlendirme sınır diyagramı örneği

Başarılı bir biçimlendirme işlemi için malzeme özellikleri, kalıp geometrisi ve yağlama işleminin beraberce uyum sağlaması gerekir. Bu uyum seri üretime geçilmeden önce deneme üretimi aşamasında sağlanmalıdır. Bu çalışma esnasında biçimlendirme sınır diyagramından faydalanılır. Yüzeyine dairesel ağ çizilmiş metalik sac şekillendirilir ve kritik bölgelerde şekil değiştirme analizi yapılır. Sınır eğrisine yakın değerlerin bulunması, seri üretimde çatlama ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Bu durumda, biçimlendirme işlemi güvenli bölgeye çekecek önlemler alınmalıdır. Örneğin iki eksenli çekme gerilmesinin hakim olduğu gerek biçimlendirme işlemine uğramış bir parçada, plastik şekil değiştirme miktarları biçimlendirme sınır eğrisinin üst bölgesinde kalıyorsa A noktası malzemede çatlama olur (Şekil 2.45). Çatlamayı önlemek için ya küçük şekil değiştirme miktarını ( $e_2$ ) artırma (B noktası) veya büyük şekil değiştirme miktarını azaltma (C noktası) yoluna gidilir. Küçük şekil değiştirme miktarını ( $e_2$ ) artırmak için malzemenin bu yöndeki hareketi sınırlandırılır. Bunun için örneğin, sıkıştırma kalıbına girintili çıkıntılı şekil verilerek veya bu bölgedeki sürtünme artırılarak malzeme hareketi zorlaştırılır. Büyük şekil değiştirme miktarını azaltmak için biçimlendirme derinliğini azaltma veya bölgesel incelme olayını önleme yoluna gidilebilir. Bölgesel incelmeyi önlemek için, erkek kalıbın bu bölge ile temas eden kısmında sürtünme artırılarak şekil değiştirme miktarı azaltılır. Yukarıda belirtilen çareler söz konusu örnek için geçerlidir. Her olay için önce bir şekil değiştirme analizi yapılır, daha sonra çözüm yoluna gidilir. Genelde zımba veya erkek kalıp kuvvetini azaltacak önlemler, biçimlendirme işleminin güvenli bölgede kalmasına katkıda bulunacaktır. Belirli bir kalıp tasarımı ile koşulları değiştirerek, biçimlendirme işlemi güvenli bölgeye çekmek mümkün değilse, daha kaliteli malzeme seçimine, gidilir. Bunun tersine, deneme çalışmaları sonunda biçimlendirme işlemine ait veriler, BSD'nin çok altında bulunuyorsa, daha düşük kalitede malzeme kullanımına geçilerek, maliyet açısından ekonomi sağlanır. Şekil 2.46'da farklı malzemelere ait biçimlendirme sınır diyagramlarını vermektedir. Aynı malzeme için mekanik özelliklerin değişmesi de biçimlendirme sınır diyagramlarını etkilemektedir.

Aynı kalınlıkta fakat farklı akma gerilmelerine sahip az karbonlu çelikler ait biçimlendirme sınır diyagramlarını Şekil 2.47 vermektedir.



Şekil 2.46. Farklı malzemelere ait biçimlendirme sınır diyagramı



Şekil 2.47. Aynı kalınlığa sahip az karbonlu çelikte, akma gerilmesi ile biçimlendirme sınır diyagramının değişimi

### **3. MALZEME VE METOT**

#### **3.1. Deneylerde Kullanılan Killer ve Diğer Malzemeler**

Bu çalışmada üç farklı kil kullanılmıştır. Tuvka ve Türkmen isimli killer Altın Çini yer ve duvar karosu fabrikasından (Kütahya) ve Pembe kaolen ise Eskişehir (ESVİT) Vitrikiye fabrikasından temin edilmiştir.

Ayrıca basma deneylerinde numune yüzeylerinde farklı yüzey koşulları oluşturmak için naylon, mazot ve 240 numaralı su zımparası kullanılmıştır.

#### **3.2. Hammaddelerin Deneyler İçin Hazırlanması**

Fabrikaların hammadde stoklarından alınan killer cevher halinde iken çeneli ve merdaneli kırıcılardan geçirilip boyutları küçültülmüştür. Temin edilen bu killer daha sonra 50 kg kapasiteli bilyeli değirmende sulu olarak 6 saat süre ile öğütülmüş ve 65 mesh (0,208 mm) elekten geçirilmiştir. Alınan sulu süspansiyon bir süre plastik kovalarda bekletilmiş ve hammaddelerin çökmesi sağlanmıştır. Berrak hale gelen su, zaman zaman dekante edilerek hacminin azalması sağlanmıştır. Daha sonra alçı havuzlara alınan konsantre kil su karışımları belirli bir nem kıvamına gelinceye kadar bekletilmiştir. Ele alınacak kıvama gelen çamurlar daha sonra ağzı sıkıca kapatılabilen naylon torbalara alınarak kullanılıncaya kadar saklanmıştır.

#### **3.3. Hammaddelerin Karakterizasyonu**

Biçimlendirilebilirlik testlerinde kullanılan hammaddelerin karakterizasyonu için ön teknolojik incelemeler yapılmıştır. Ön teknolojik incelemede uygulanan deneyler hammaddenin görünüşü, safsızlıkların mikroskopta görüntüsü, seyreltik HCl ile tepkimesi suda dağılma durumu, kum durumu, kuruma durumu, plastikliği, pişme durumu ve rengidir. Ön teknolojik inceleme ve elek analizi Gazi Üniversitesi Mesleki Eğitim Fakültesi Seramik Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Ön teknolojik incelemede alınan sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Hammaddeleri daha detaylı karakterize etmek için elek analizi ve tane boyutu dağılımı, diferansiyel termal analiz (DTA), termal gravimetri analizi (TGA), X ışınları kırınımı analizi (XRD) ve kimyasal analiz yöntemleri kullanılmıştır. Böylece hammadde içerisinde bulunan mineraller kesin olarak tespit edilmiştir. Hammaddelerin DTA, TGA ve XRD analizleri Ankara Etibank Genel Müdürlüğü laboratuvarında, kimyasal analiz ve tane boyutunun belirlenmesi de Eskişehir Toprak Seramik Fabrikası laboratuvarında yapılmıştır.

Çizelge 3.1. Hammaddelerin ön teknolojik incelenmesi

	Tuvka Kili	Türkmen Kili	Pembe Kaolen
Hammaddenin görünüşü	Bej , beyaz renkte	Bej renkte	Pembe bej renkte
Safsızlıklar	Beyaz	Homojen safsızlık yok	Homojen safsızlık yok
Seyreltik HCl ile tepkimesi	Gaz çıkışı var	Gaz çıkışı var	Gaz çıkışı yok
Suda dağılma durumu	Suda kısmen dağılıyor	Suda tamamen dağılıyor	Suda dağılıyor
Kum durumu	Dekante edildikten sonra az kumlu	Dekante edildikten sonra az kumlu	Dekante edildikten sonra çok kum var
Plastikliği	Plastik	Plastik	Az plastik
Kuruma Durumu	Çatlamadan kurudu	Çatlamadan kurudu	Çatlamadan kurudu
Pişme durumu 1000°C de	Bej renkte sinterleme	Bej renkte sinterleme	Beyaz renkte pişme

### 3.3.1. Tane boyutu dağılımı ve elek analizi

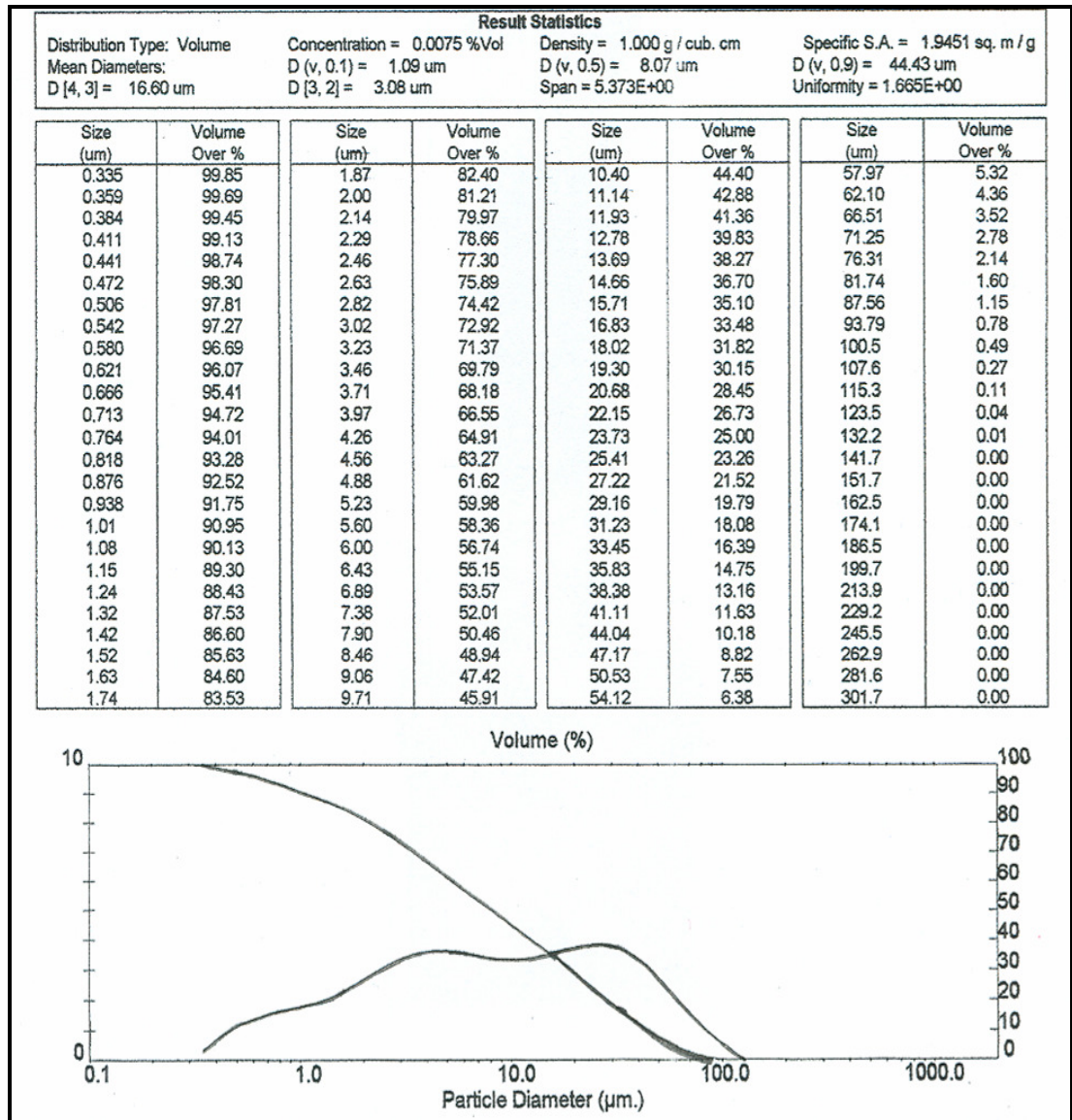
65 mesh elek altı killerin tane boyutu dağılımları Malvern Instrument Master Sizer cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneylede dağıtıcı olarak saf su kullanılmıştır.

Bilyalı değirmende öğütülen Tuvka kilinin elek analizi yapıldığında bütün tanelerin 65 mesh altına geçtiği görülmüştür. 65 mesh (0,208 mm) elek altı tane boyutu dağılımı sonuçları Şekil 3.1’de verilmiştir. İstatiksel dağılım eğrisi iki değişik tane boyutunda tepe noktası göstermektedir.



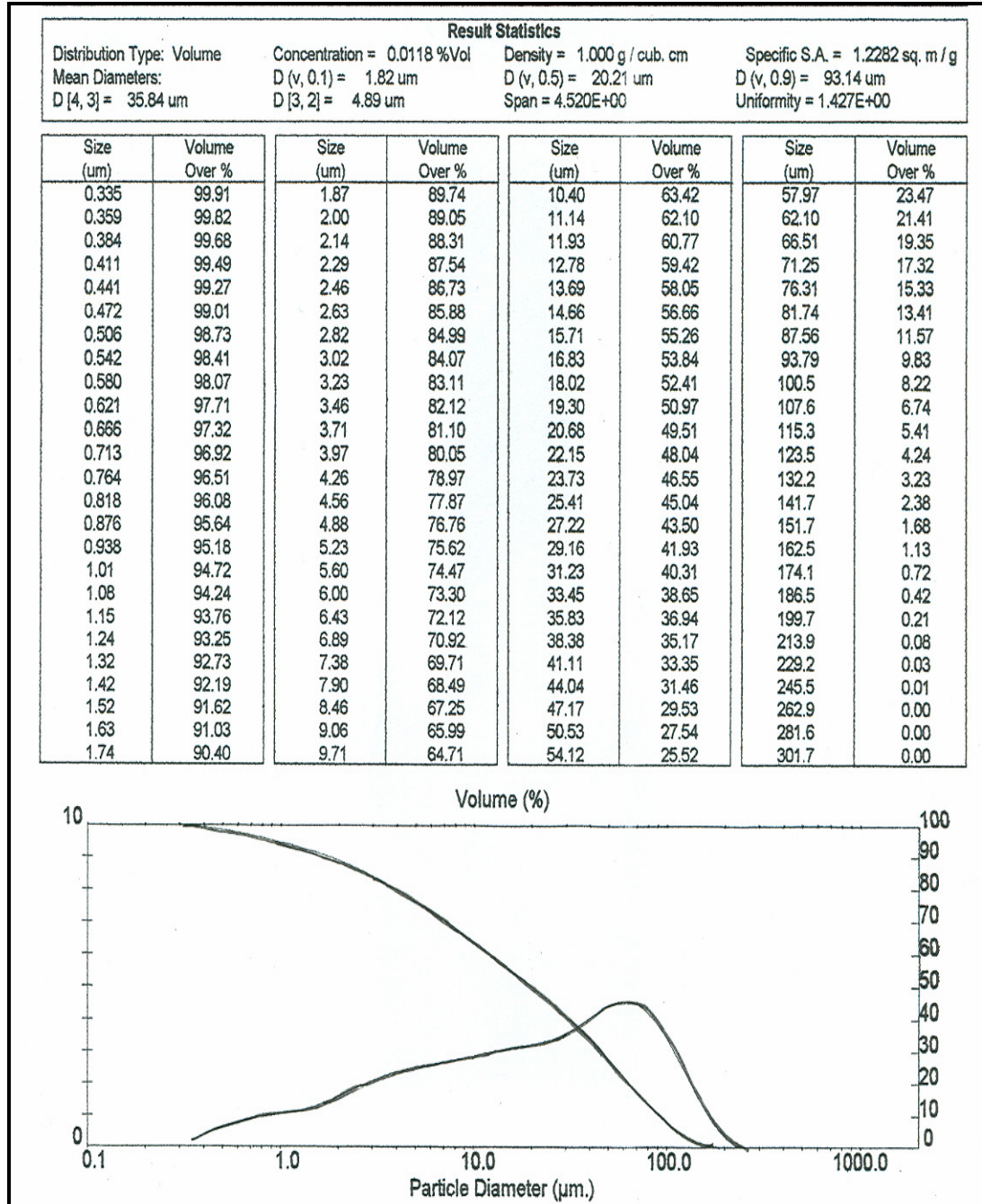
Bu sonuçlara göre Tuvka kilinin iki değişik yapıda mineral (kaolen ve kuvars) içerdiği istatistiksel dağılım eğrisindeki iki tepenin bulunmasıyla anlaşılmıştır.

Birbirinden farklı karakterde mineraller içeren kilin ortalama tane boyutunun % 10'u 1,09  $\mu\text{m}$ , % 50'si 8,07  $\mu\text{m}$  ve % 90'ın da 44,43  $\mu\text{m}$  altında ve hacimsel olarak ortalama tane boyutunun 16,60  $\mu\text{m}$  olduğu kümülatif eğriden belirlenmiştir. Tane boyutu küçüldükçe plastiklik özelliği artar. Bu yüzden kilin iki farklı karakterde kil içermesi plastikliğini negatif olarak etkileyecektir.



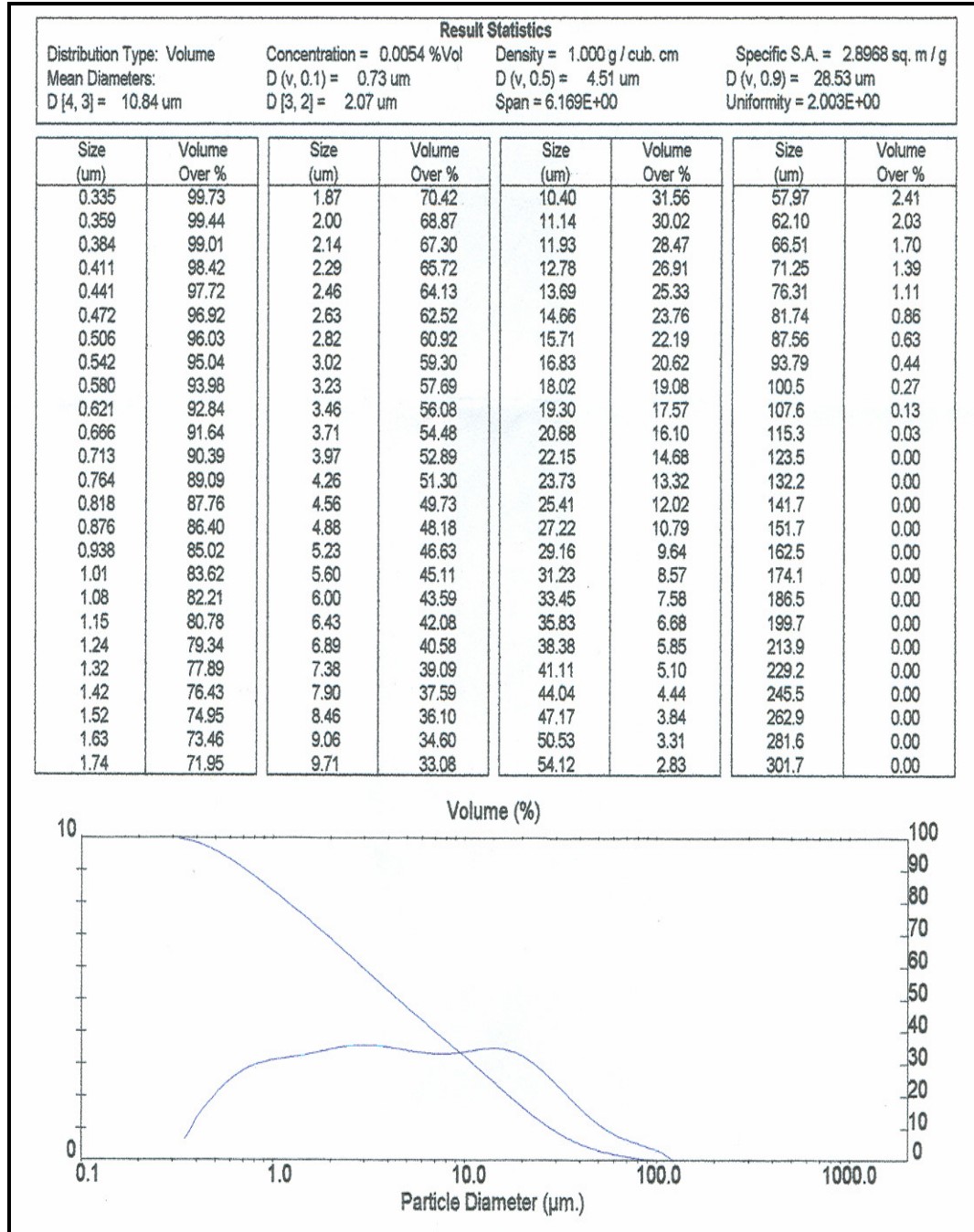
Şekil 3.1. Tuvka kilinin 65 mesh altının tane boyutu dağılımı

Türkmen kilinin 65 mesh elek altının tane boyutu dağılımı Şekil 3.2 de verilmiştir. Buna göre kilin tane boyutu % 10'u 1,82  $\mu\text{m}$ , % 50'si 20,21  $\mu\text{m}$  ve % 90'ın 93,14  $\mu\text{m}$  altı olduğu istatistiksel verilerden belirlenmiştir. Hacimsel olarak ortalama tane boyutu ise 35,84  $\mu\text{m}$ 'dir. Tuvka kiline göre türkmen kili daha iri tanelidir.



Şekil 3.2. Türkmen kilinin 65 mesh altının tane boyutu dağılımı

Pembe kaolenin 65 mesh elek altının tane boyutu dağılımı Şekil 3.3'de verilmiştir. Buna göre kilin tane boyutu % 10'u 0,73  $\mu\text{m}$ , % 50'si 4,51  $\mu\text{m}$  ve % 90'ın 28,53  $\mu\text{m}$ 'nin altı olduğu ve hacimsel ortalama tane boyutunun 10,84  $\mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Pembe kaolen 65 mesh altının tane boyutu dağılımı

Deneyleerde kullanılan killerin tane boyutu istatikseld sonuçları karşılaştırmalı olarak izelge 3.2’de verilmiştir.

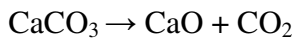
Çizelge 3.2. Killerin 65 mesh altı tane boyutu dağılımınının karşılaştırılması

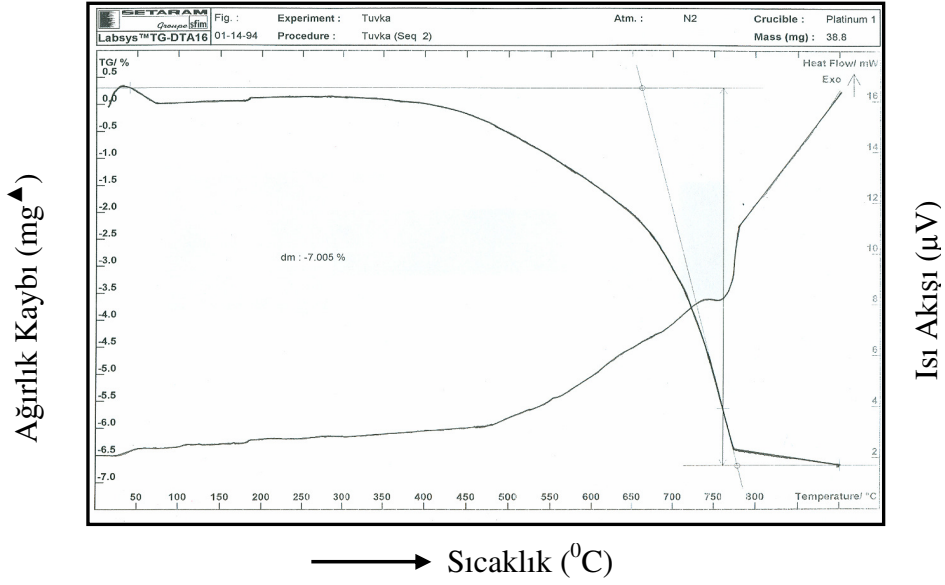
Killer	Tuvka Kili (μm)	Türkmen Kili (μm)	Pembe Kaolen (μm)
% 10’un tane boyutu (μm)	- 1,09	- 1,82	- 0,73
% 50’nin tane boyutu (μm)	- 8,07	- 20,21	- 4,51
% 90’ın tane boyutu (μm)	- 44,43	- 93,14	- 28,53
Hacimsel ortalama tane boyutu	16,60	35,84	10,84

### 3.3.2. Killerin DTA ve TGA analizi eğrileri

Killerin DTA ve TGA analizleri Dupont marka test cihazında yapılmıştır. BSD doğruları belirlenen killerin DTA ve TGA eğrileri Tuvka kili için şekil 3.4, Türkmen kili için şekil 3.5 ve Pembe kaolen için şekil 3.6’da verilmiştir.

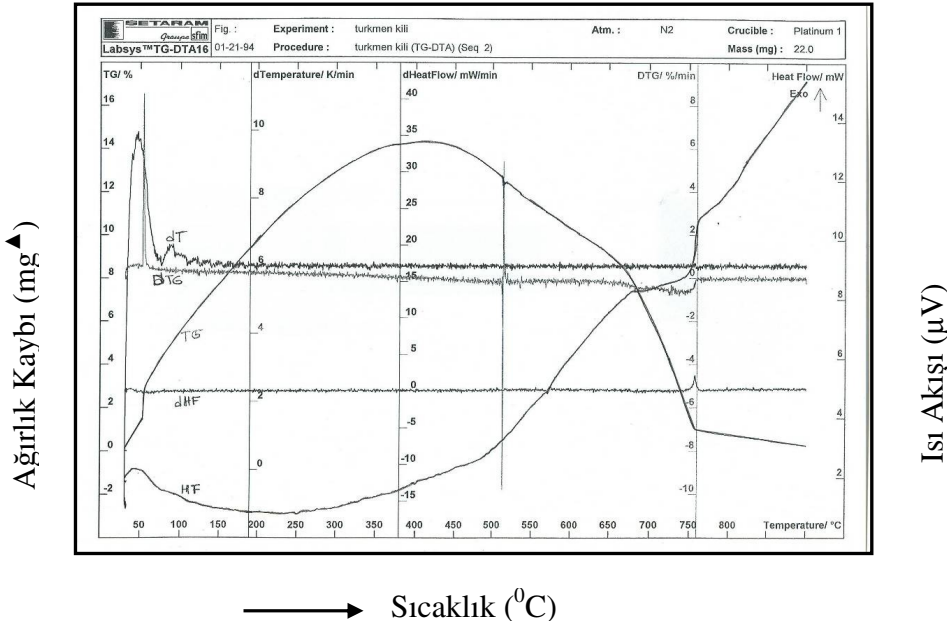
Buna göre Tuvka kili 750 °C’de başlayıp 780 °C’de biten ve en şiddetli tepkimesini % 7,005’lik kütle kaybı ile 750 °C’de yapan endotermik bir reaksiyon içermektedir. Bu reaksiyon kilin içerisindeki kalsitten kaynaklanmaktadır.





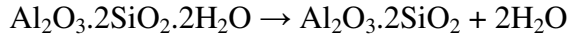
Şekil 3.4. Tuvka kilinin DTA ve TGA eğrisi

Türkmen kilinin DTA ve TGA eğrisi incelendiğinde 650 °C’de başlayıp 760 °C’de biten ve en şiddetli değerini 750 °C’de gösteren endotermik tepkime Türkmen kilinin de içerisindeki kalsitin kalsinasyon tepkimesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



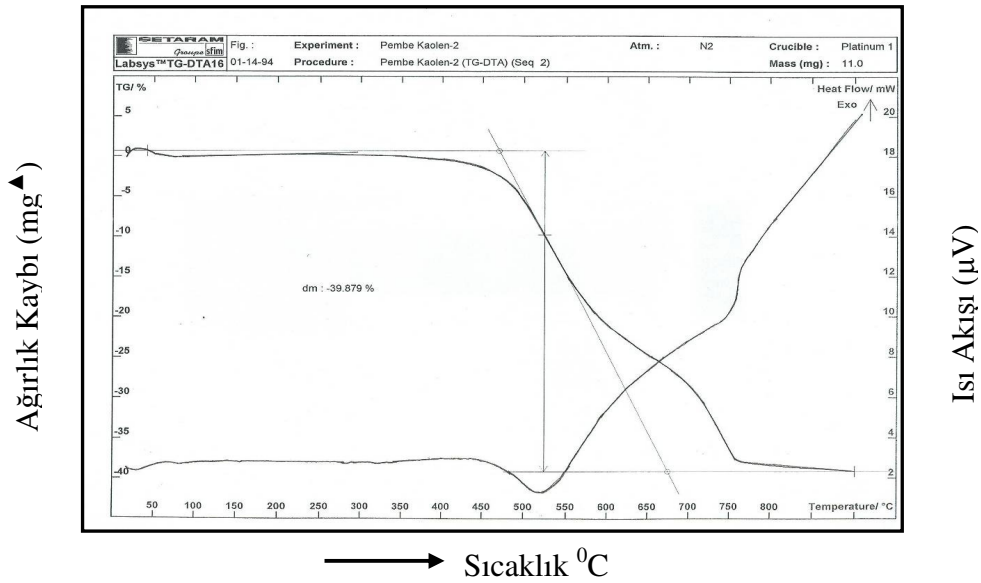
Şekil 3.5. Türkmen kilinin DTA ve TGA eğrisi

Pembe kaolinin DTA ve TGA analizinde 450 °C’de başlayıp 600 °C’de biten ve en şiddetli değerine 550 °C’de ulaşan ve yaklaşık % 20’lik kütle kaybına sebep olan endotermik tepkimenin kaolen içerisindeki suyun uzaklaşmasından doğan kaolenin metakaolen tepkimesi olduğu belirlenmiştir (21).



Buna ek olarak 700 °C’de başlayıp 760 °C’de biten ve 750 °C’de en şiddetli değerine ulaşan ve yaklaşık %19’luk kütle kaybına sebep olan endotermik tepkimenin mineral içerisindeki kalsitten kaynaklandığı belirlenmiştir.

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  Tepkimeler sonucu toplam kütle kaybı % 39,879’ dur.



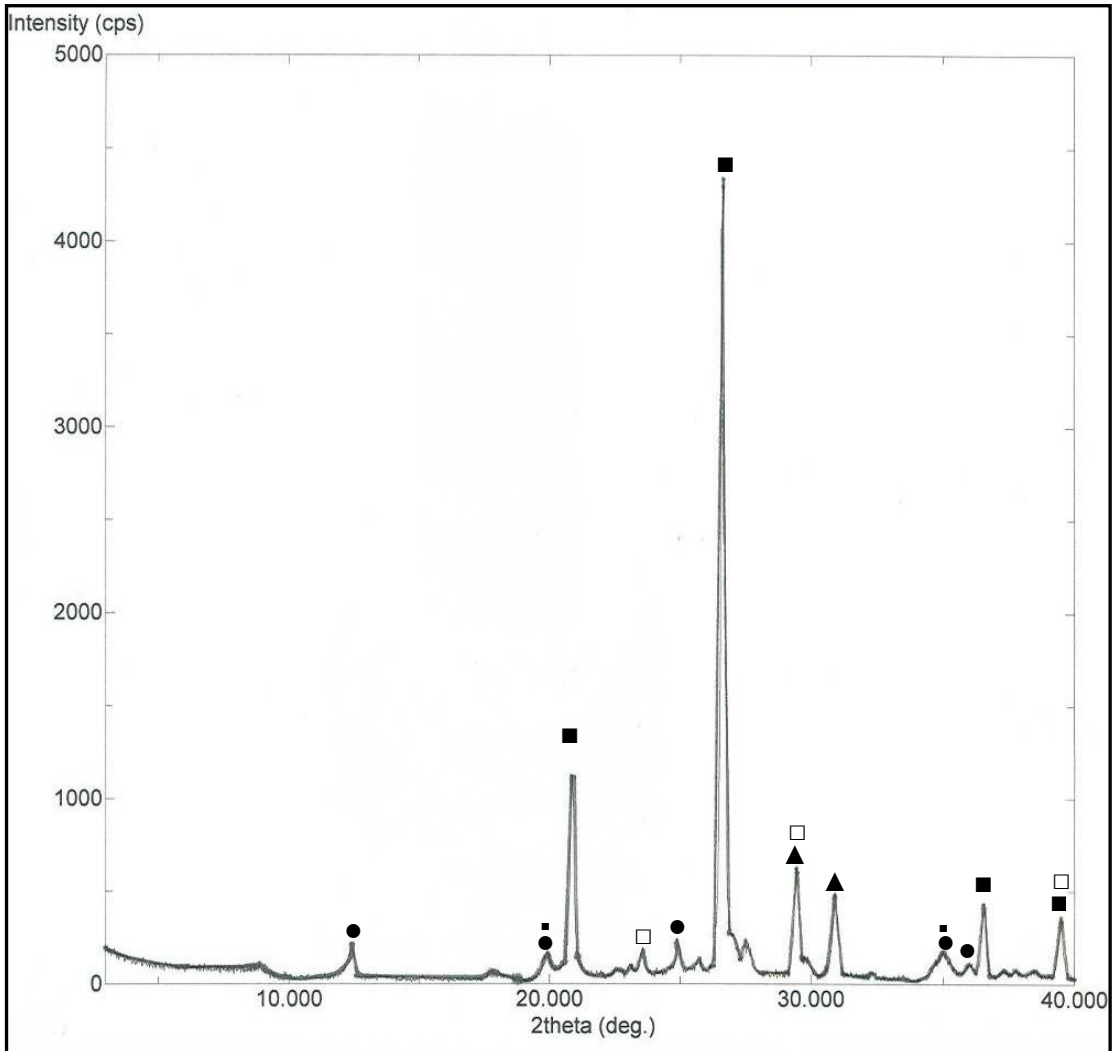
Şekil 3.6. Pembe kaolinin DTA ve TGA eğrisi

DTA ve TGA analizi 1100 °C’ ye kadar yapılabilseydi hammadde içerisindeki kaolenin müllite dönüşüm tepkimeleri de görülebilirdi .



### 3.3.3. Killerin XRD analiz eğrileri

Killerin XRD analizleri Philips marka (Cu katot 40kV-40mA) test cihazında yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 3.7-3.9'da verilmiştir. Killerin XRD analizlerinin değerlendirilmesi ASTM X-ışını toz kırınım veri kartları ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Buna göre minerallerin XRD grafiklerindeki en yüksek şiddette pik veren  $d$  değerleri standartlardaki değerlerle kıyaslanmıştır. Ayrıca killerin XRD analiz değerlendirme tabloları Çizelge 3.3-3.5'de verilmiştir (23).



Şekil 3.7. Tuva kilinin XRD analiz sonuçları

■: Kuvars ●: Kaolen ▲: İllit □: Kalsit ▫: Montmorillonit

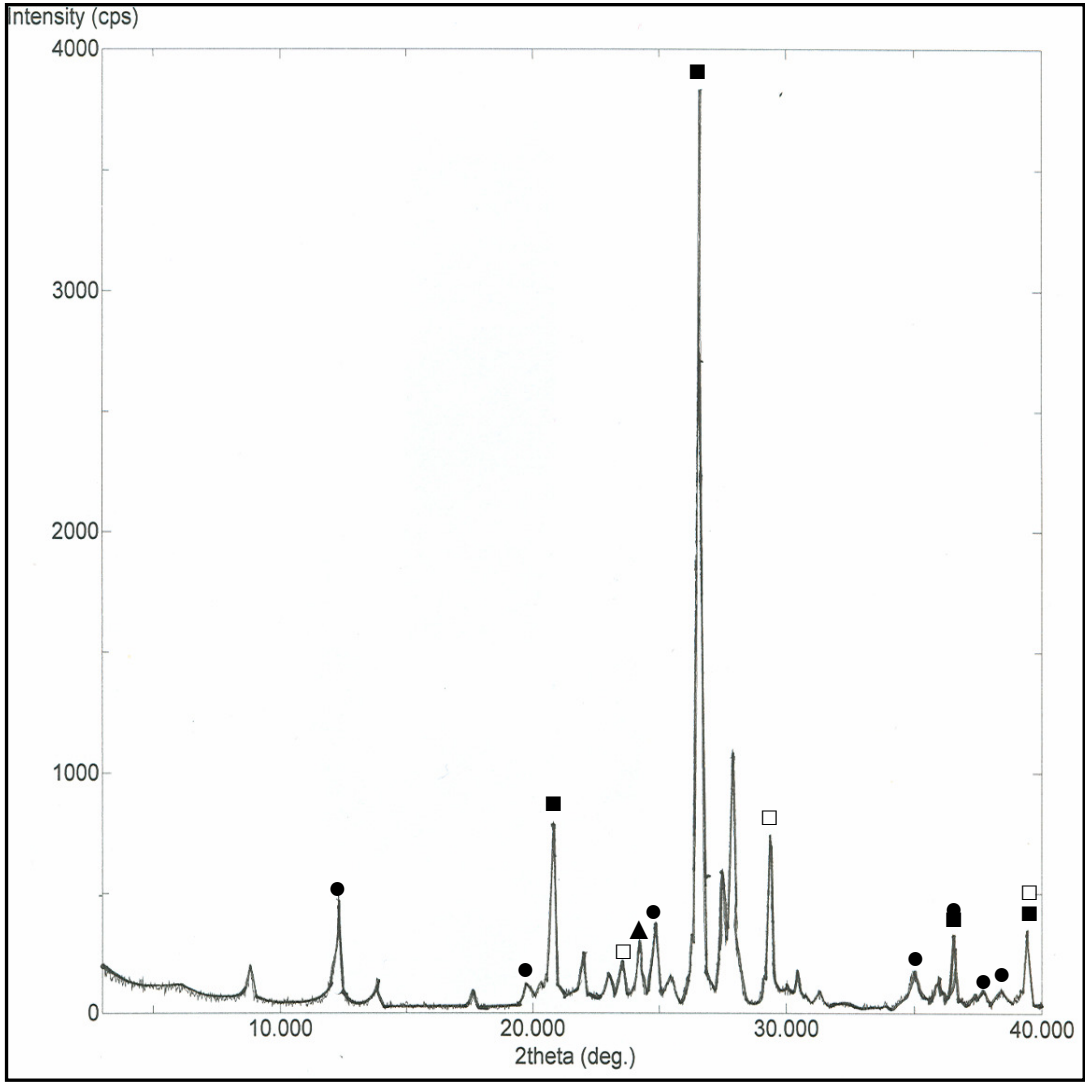
Çizelge 3.3. Tuvka kilinin XRD analiz değerlendirme tablosu

	<b>KUVARS</b>	<b>ASTM Standat Değerleri</b>						
2 $\theta$	26,5	20,82	39,44	36,52				
d	3,34	4,26	2,282	2,4583				
I/I <sub>0</sub>	100	35	12	12				
	<b>Grafikte Bulunan Değerler</b>							
2 $\theta$	26,5	20,8	39,5	36,6				
d	3,3606	4,2669	2,2794	2,453				
I/I <sub>0</sub>	100	21,2	8	10				
	<b>KAOLEN</b>	<b>ASTM Standat Değerleri</b>						
2 $\theta$	24,80	12,30	19,80	38,42	34,94	35,80	37,66	
d	3,58	7,18	4,48	2,341	2,565	2,502	2,386	
I/I <sub>0</sub>	100	100	80	90	80	80	80	
	<b>Grafikte Bulunan Değerler</b>							
2 $\theta$	24,80	12,40	19,80		35	35,80		
d	3,5870	7,1320	4,43		2,56	2,502		
I/I <sub>0</sub>	5,6mm %100	4,8 86	4 71		4 71	2,4 43		
	<b>İLLİT</b>	<b>ASTM Standat Değerleri</b>						
2 $\theta$	8,92	26,58	19,90	38,00	18,01	22,96	33,79	29,44
d	9,9	3,35	4,45	2,36	4,92	3,87	2,65	3,09
I/I <sub>0</sub>	100	95	90	90	45	40	40	40
	<b>Grafikte Bulunan Değerler</b>							
2 $\theta$		26,50						29,5
d		3,36						3,05
I/I <sub>0</sub>		100						14,4
	<b>KALSİT</b>	<b>ASTM Standat Değerleri</b>						
2 $\theta$	29,44	48,64	23,08	43,22	39,48			
d	3,03	1,87	3,85	2,09	2,28			
I/I <sub>0</sub>	100	34	29	27	18			
	<b>Grafikte Bulunan Değerler</b>							
2 $\theta$	29,5	S.D.	23,6	S.D.	39,5			
d	3,025		3,766		2,279			
I/I <sub>0</sub>	14,4 / 100		4 / 28		8 / 56			
	<b>MONTMORİLLONİT ASTM Standat Değerleri</b>							
2 $\theta$	6,40	19,93	28,30	35,44				
d	13,8	4,45	3,15	2,53				
I/I <sub>0</sub>	100	30	10	5				
	<b>Grafikte Bulunan Değerler</b>							
2 $\theta$		19,8		35				
d		4,43		2,56				
I/I <sub>0</sub>		4 / ?		4 / ?				



Tuvka kilinin ana mineralinin kuvars ve kaolen, yan minerallerinin illit, montmorillonit ve kalsit olduğu belirlenmiştir.

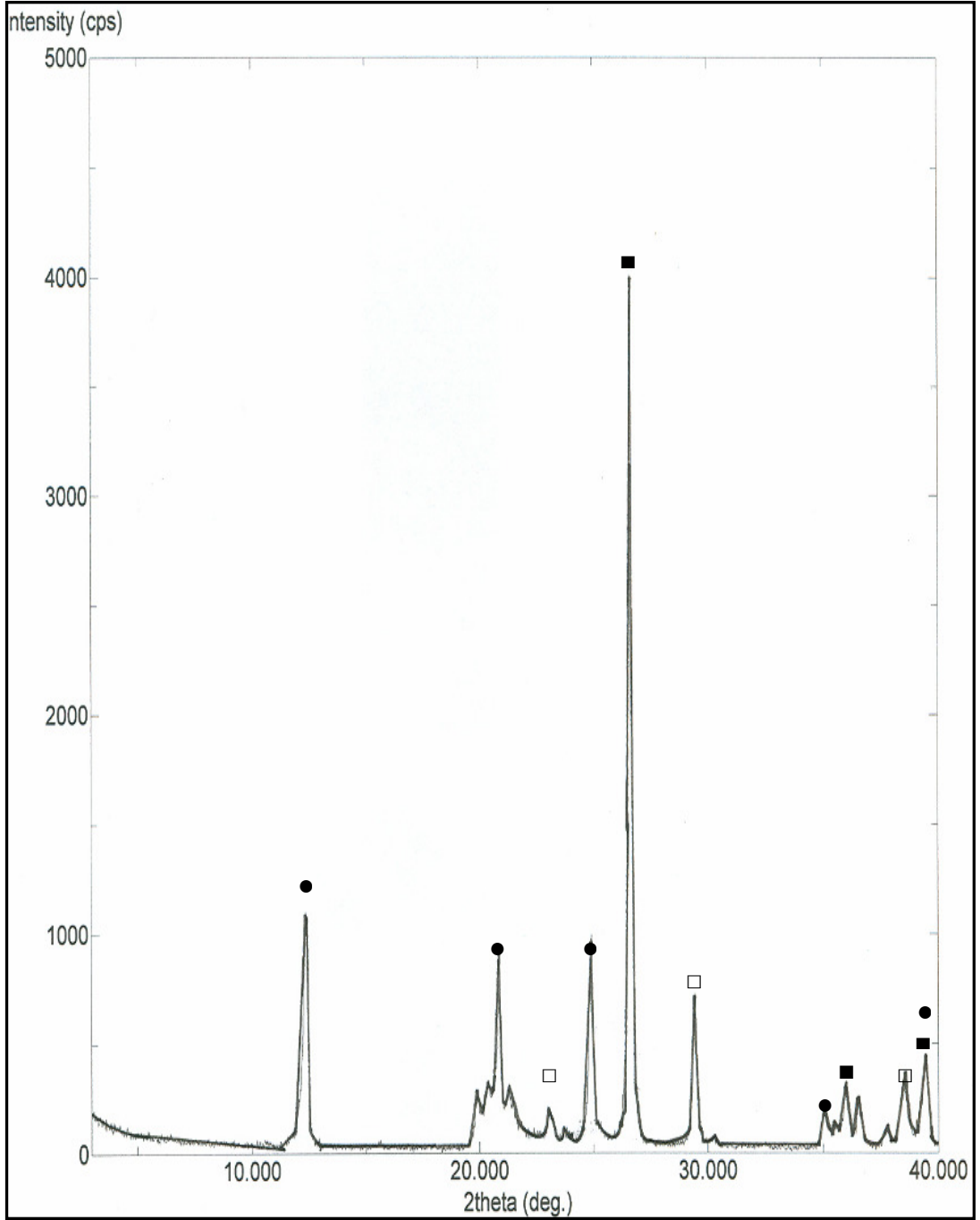
Türkmen kilinin XRD analiz sonuçlarına göre ana minerallerinin kuvars ve kaolen, yan minerallerinin montmorillonit ve kalsit olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Türkmen kilinin XRD analiz sonuçları  
■: Kuvars ●: Kaolen □: Kalsit



Pembe kaolenin ana minerallerinin kuvars, kaolen ve yan mineralinin de kalsit olduğu belirlenmiştir.



şekil 3.9. Pembe kaolenin XRD analiz sonuçları

■: Kuvars ●: Kaolen □: Kalsit



### 3.3.4. Deneylerde kullanılan killerin kimyasal analizi

Killere ilk önce standart silikat analizi için asitte çözme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen çözelti daha sonra alkali metal oksitlerin ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) belirlenmesi için alev fotometresi ve diğer oksitlerin ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) belirlenmesi için atomik absorpsiyon spektrometresi kullanılmıştır. Çizelge 3.6'da killerin kimyasal analizleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Killerin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlıkça)

	Türkmen kili	Tuvka kili	Pembe kaolen
$\text{SiO}_2$	66,44	65,81	61,33
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13,80	12,59	20,32
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,67	0,94	0,32
$\text{TiO}_2$	0,34	0,14	--
$\text{CaO}$	5,94	6,15	5,22
$\text{MgO}$	0,36	1,29	0,07
$\text{Na}_2\text{O}$	1,98	0,07	0,17
$\text{K}_2\text{O}$	2,31	3,17	0,17
ATEŞ ZAYIATI	7,53	9,04	11,51
TOPLAM	99,37	99,20	99,33

### 3.4. Biçimlendirilebilirliğin Belirlenmesinde Yapılan Deneyler

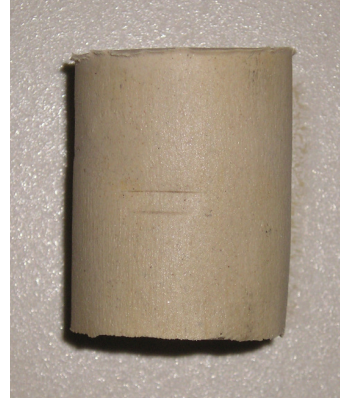
#### 3.4.1. Biçimlendirme sınır doğruları ve maksimum deformasyon miktarının belirlenmesi

BSD ve akma gerilimleri deneyleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İleri Malzeme ve Boya Araştırma Merkezinde yapılmıştır. BSD'nin belirlenmesinde, kullanılan numunelerin hazırlanması homojen olarak yoğrulan çamur killerin alçı kalıp üzerinde farklı sürelerde bekletilmesi ile başlamıştır. Bu şekilde farklı nem içerikli çamurlar hazırlanmıştır. Daha sonra farklı nem içerikli çamurlar çapı 25 mm olan silindir kalıp içerisine doldurulup bir piston yardımıyla

sıkıştırılıp, silindir şekline getirilmiştir. Bu serbest boydaki numuneler L/D oranı 1 (L = 25 mm) olacak şekilde kesilmiştir.

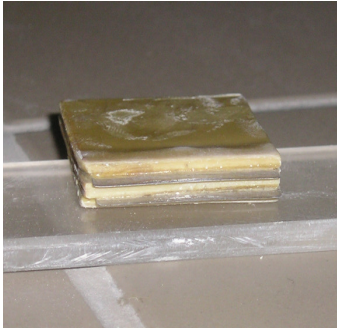


Resim 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan silindir ve piston

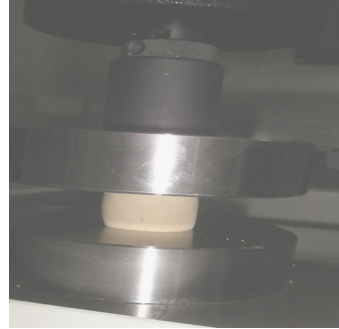


Resim 3.2. BSD testlerinde kullanılan numune

Hazırlanan numunelerin (Resim 3.2) ekvator bölgelerine (Resim 3.3) üç ayrı yerden markalama yapılmıştır. Her bir marka arasındaki mesafe 2,1mm'dir.



Resim 3.3. Markalamada kullanılan marka



Resim 3.4. Deformasyonun yapılması

Markalama işleminden sonra numune yüzeyleri farklı yüzey koşulları oluşturacak şekilde naylon, mazot veya zımpara kağıdıyla kaplanıp basma cihazının çeneleri arasında konularak 20 mm/min hızla ilk çatlak görülünceye kadar deforme edilmiştir (Resim 3.4). Basma deneylerinde Shimadzu marka 500 kg'lık test cihazı kullanılmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.5. Basma deneylerinde kullanılan test cihazı

Basma deneyi sonunda numuneler basma cihazının çeneleri arasından alınıp çaptaki değişim miktarı 1/50 hassasiyette kumpas, markalama çizgileri arasındaki değişimler Resim 3.6'da görülen ve 1/50 hassasiyette verniyeli olan bir mikroskopta ölçülmüştür.



Resim 3.6. Ölçüm işlemlerinin yapıldığı mikroskop

$$\text{Çekme gerinimi } (\epsilon_{\theta}) = \ln (D_f/D_o) \quad [3.1]$$

formülü yardımı ile bulunmuştur. Burada  $D_o$  ilk çap  $D_f$  ise basmadan sonraki çaptır.

$$\text{Basma gerinimi } (\epsilon_z) = \ln (L_o/L_f) \quad [3.2]$$

formülü yardımı ile bulunmuştur. Burada  $L_o$  markanın ilk mesafesi,  $L_f$  deformasyon sonrası markalanan yerin mesafedir. Deformasyon sonrası markalanmış yerlerin ortalaması alınarak  $L_f$  bulunmuştur. Elde edilen veriler y eksenini çekme gerinimi, x eksenini de basma gerinimi olacak şekilde grafiğe geçirilerek her nem aralığı için BSD elde edilmiştir. BSD'nin y eksenini kestiği noktalar ekstrapolasyonla bulunmuştur. Maksimum deformasyon miktarını ( $\epsilon^*$ ) gösteren bu değerler % nem miktarına karşılık grafiğe geçirilerek maksimum deformasyon miktarının nem ile değişimi elde edilmiştir.

#### 3.4.2. Akma noktaları ve akmanın % nemle değişim grafiğinin elde edilmesi

Akma noktasının belirlenmesinde Resim 3.5'de görülen Shimadzu Universal test cihazı kullanılmıştır. Akma noktasının belirlenmesinde kullanılan numuneler, daha önce BSD'nin belirlenmesinde kullanılan numuneler gibi hazırlanmıştır. Fakat yüzey koşullarının farklı olması akma noktasını etkilemeyeceği bilindiğinden yüzey koşulları değiştirilmemiştir. Akma noktalarının belirlenmesinde numunede ilk çatlak görülünceye kadar değil akma noktası bilgisayar ekranından görülünceye kadar devam edilmiştir. Numuneler 20 mm/min hızda deforme edilmiştir.

Farklı nem içerikli deforme edilmiş numunelerin yaş ağırlıkları ( $M_{yaş}$ ) 0,01 mg hassasiyetindeki elektronik terazi ile tartılmıştır. Daha sonra bu numuneler  $100 \pm 5$  °C'ye ayarlanmış etüvde sabit tartıma gelinceye kadar (yaklaşık 3 saat) kurutulmuştur. Sabit tartıma gelen numunelerin kuru ağırlıkları ( $M_{kuru}$ ) tartılarak numunelerin % nem miktarı aşağıdaki eşitlikle belirlenmiştir.

$$\% \text{ Nem miktarı} = (M_{yaş} - M_{kuru}) / M_{yaş} \times 100 \quad [3.3]$$



Universal test cihazında elde edilen eğrilere % 0,2 offset kuralı uygulanmış ve akma noktaları belirlenmiş ve akma noktasının % nem ile değişimi grafiğe geçirilmiştir.

### **3.4.3. Optimum nemin bulunması (Biçimlendirme Göstergesi)**

Biçimlendirilebilirlik, maksimum deformasyon miktarı ile akma geriliminin çarpımından elde edilmiştir. Maksimum deformasyon miktarının neme göre değişimi ve akma geriliminin nem ile değişimi ayrı ayrı çizildikten sonra, bunların çarpımlarının nem ile değişim eğrileri çizilmiştir. Elde edilen çan eğrisinin tepe noktası optimum nem miktarını vermiştir.

### **3.4.4. Pfefferkorn plastiklik suyu**

Pfefferkorn plastiklik suyunun belirlenmesi için 40 mm yüksekliğinde  $h_0$ , 33 mm çapında (D) ve değişik nem içeriğine sahip numuneler özel bir silindir ve piston kullanarak hazırlanmıştır. Elde edilen silindirik numuneler dik bir şekilde Pfefferkorn aparatına yerleştirilmiş ve 10 cm yükseklikten 780 g'lık bir kütle numune üzerine düşürülmüştür. Ezilen numunelerin % nem miktarları Formül 3.6 kullanılarak bulunmuştur. Y eksenini ezilme yüksekliği ve x eksenini % nem miktarı olacak şekilde grafiğe geçirilmiştir. Y eksenini üzerindeki 16 mm'den elde edilen doğruya çizilen çizginin x eksenini üzerindeki izdüşümü bulunup, bu değer optimum nem miktarı olarak tespit edilmiştir.

## 4. DENEYSEL BULGULAR

### 4.1. Biçimlendirme Sınır Doğruları (BSD)'nin Gösterimi

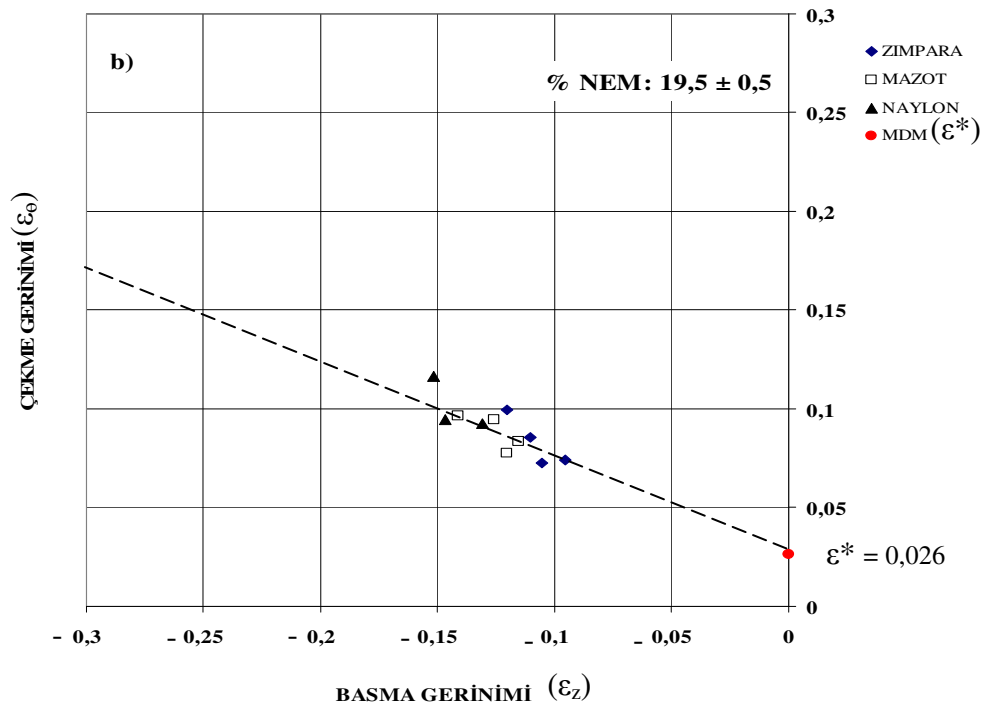
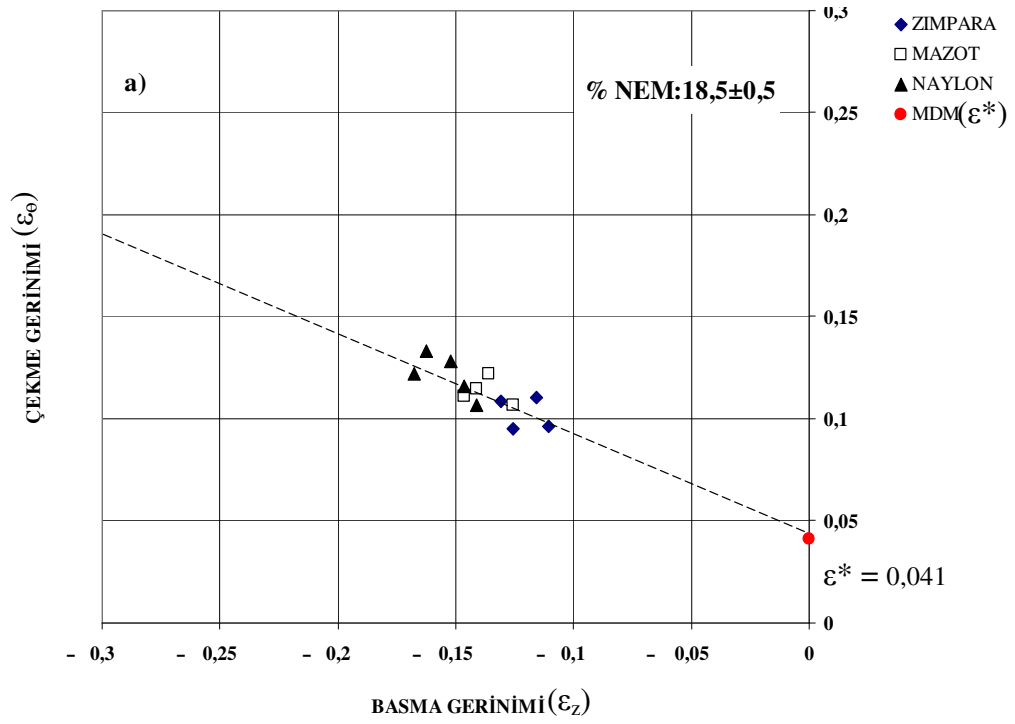
Şekil 4.1.(a-h)'de Tuvka, Şekil 4.2.(a-f)'de Türkmen ve Şekil 4.3.(a-e)'de Pembe kaolen killere farklı yüzey koşulları (naylon, mazot ve zımpara kağıdı) oluşturularak üretilen numunelerin test edilmesi ile elde edilen biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranına bağlı değişimleri görülmektedir.

Yüzey koşulları seçilirken dikkate alınan noktalar sürtünme koşullarını değiştirerek şekillendirilebilirliğe ve maksimum deformasyon miktarını nasıl etkilediğini ortaya çıkartabilmektir. Metallerde başarı ile uygulanan bu yöntemin, killere de uygulanıp veya uygulanamayacağını araştırmaktır.

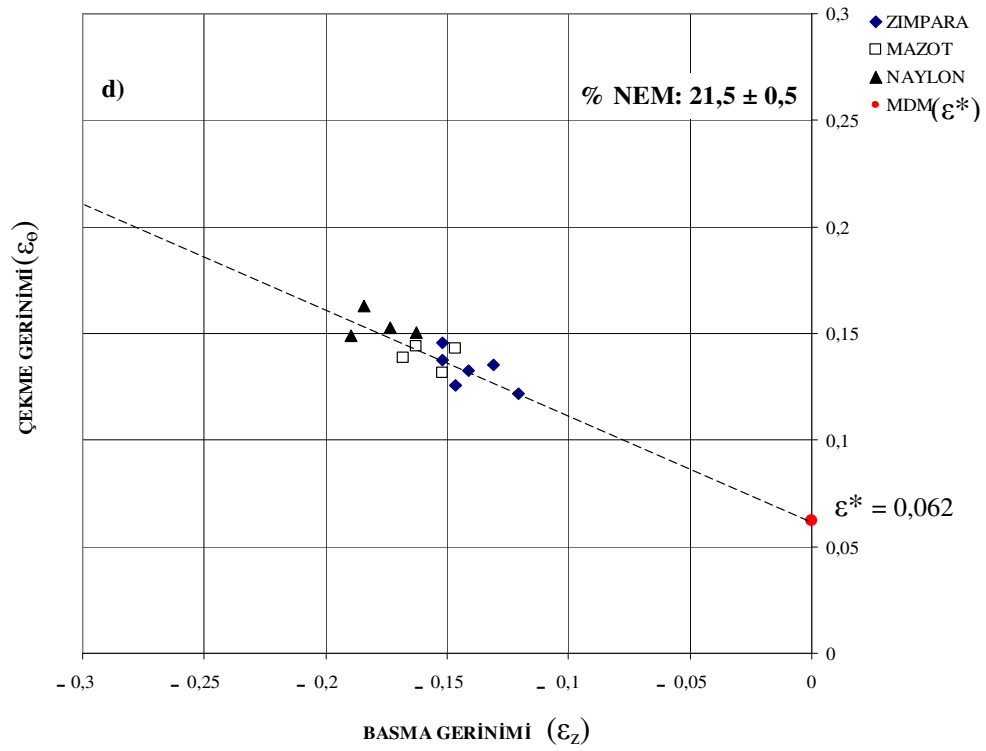
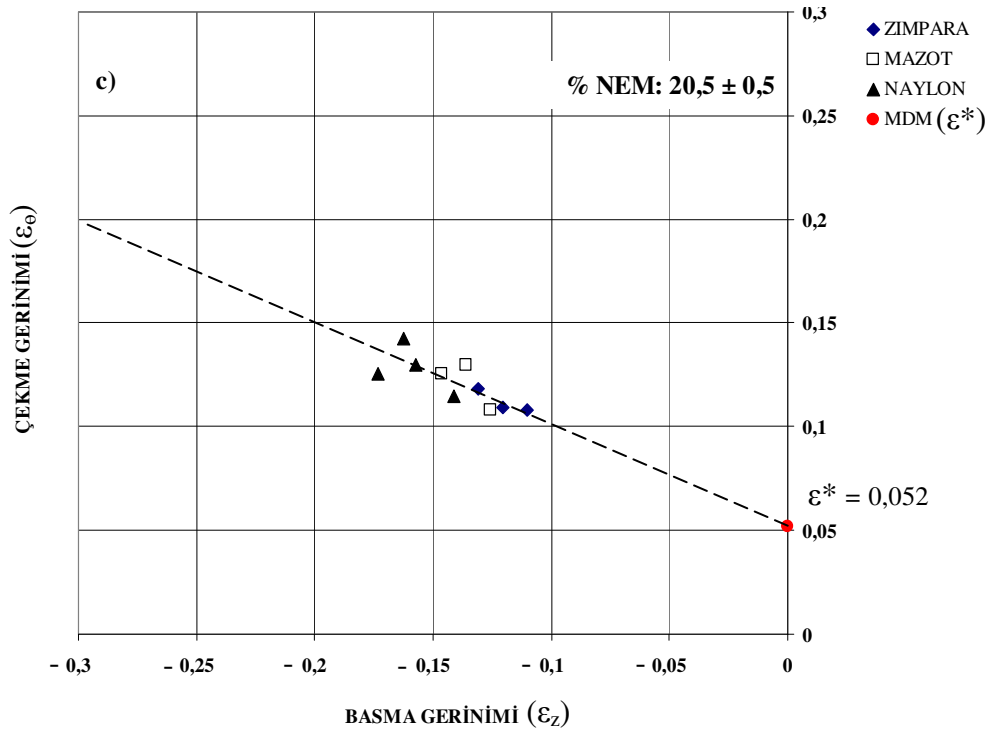
Basma deneylerinde basma hızı 20 mm/min ve numunelerin L/D = 1 oranı sabit tutulmuştur.

Şekillerde görüleceği gibi BSD'ri için elde edilen noktalara en uygun doğru çizme yöntemi uygulanmış ve çizilen doğruların eğiminin -1/2'ye çok yakın olduğu görülmüştür. BSD'nin Basma gerinimi ( $-\epsilon_z$ ), çekme gerinimini ( $\epsilon_0$ ) ve çekme gerinimini (y eksenini) kestiği nokta MDM ( $\epsilon^*$ ) olarak tanımlanmıştır.

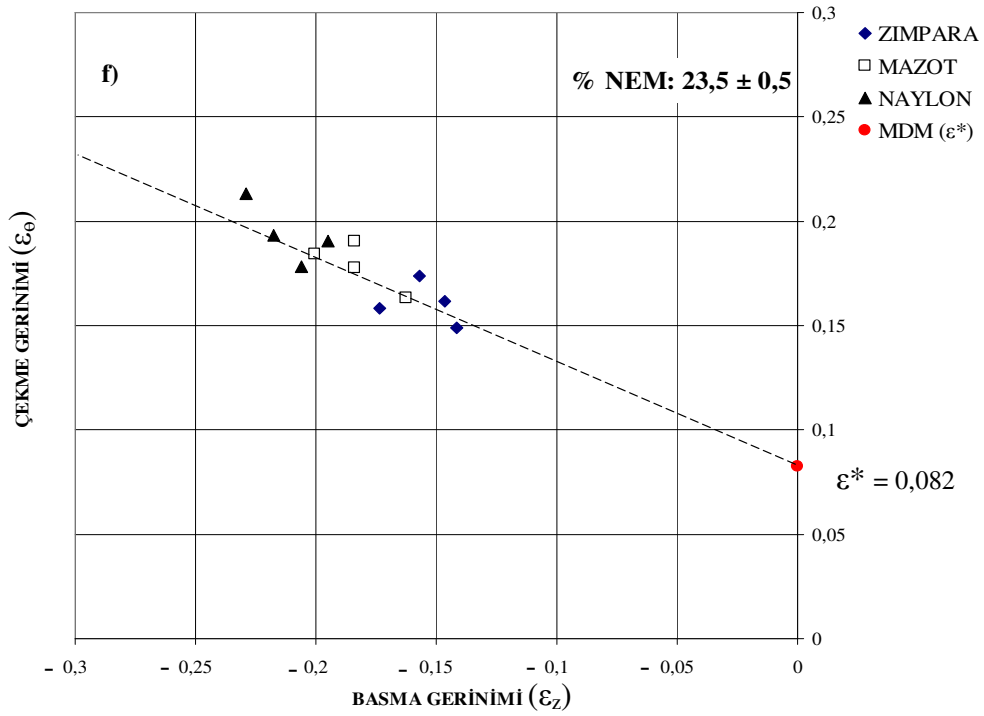
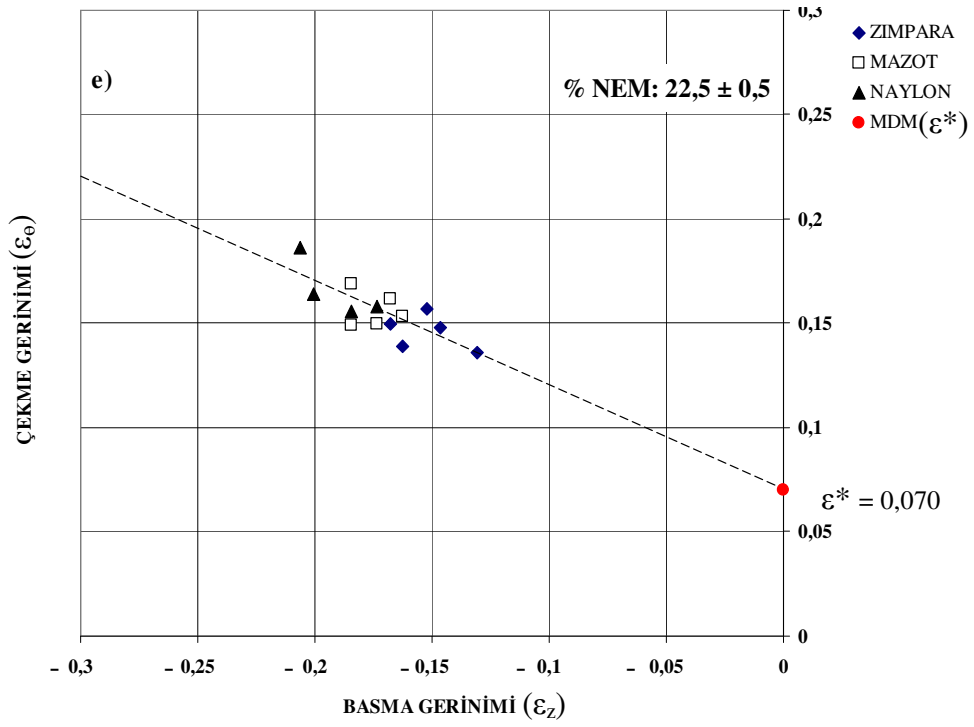
BSD grafiklerinden görüldüğü gibi yüzey koşullarının değiştirilmesi şekillendirilebilirliği etkilemiştir.



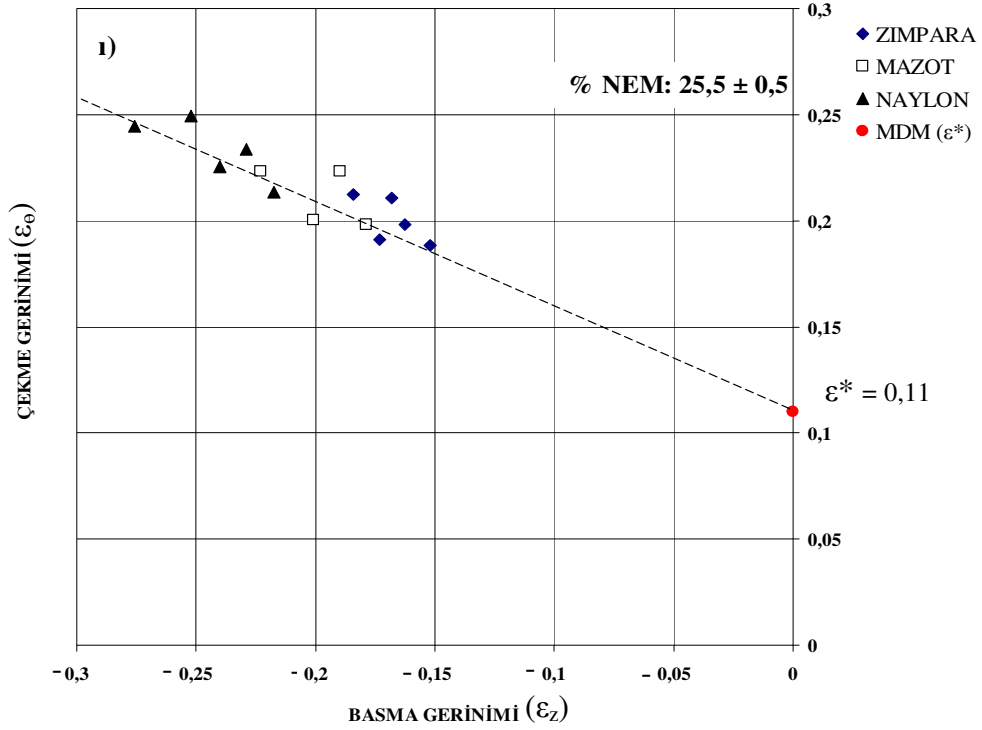
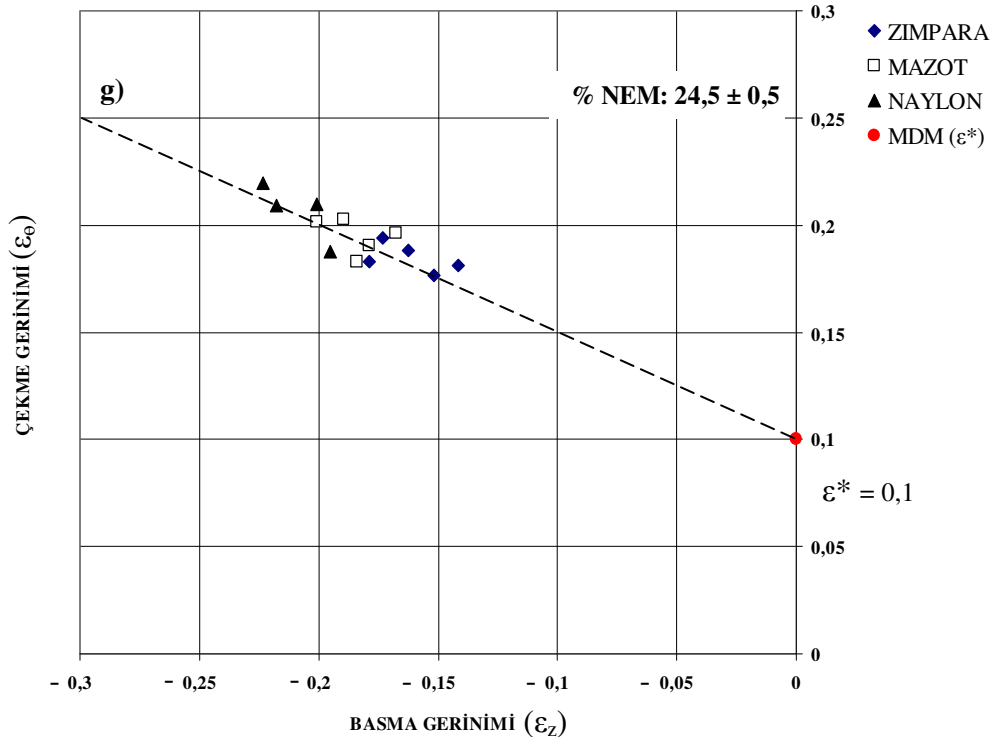
Şekil 4.1 (a, b). Tuvka kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları



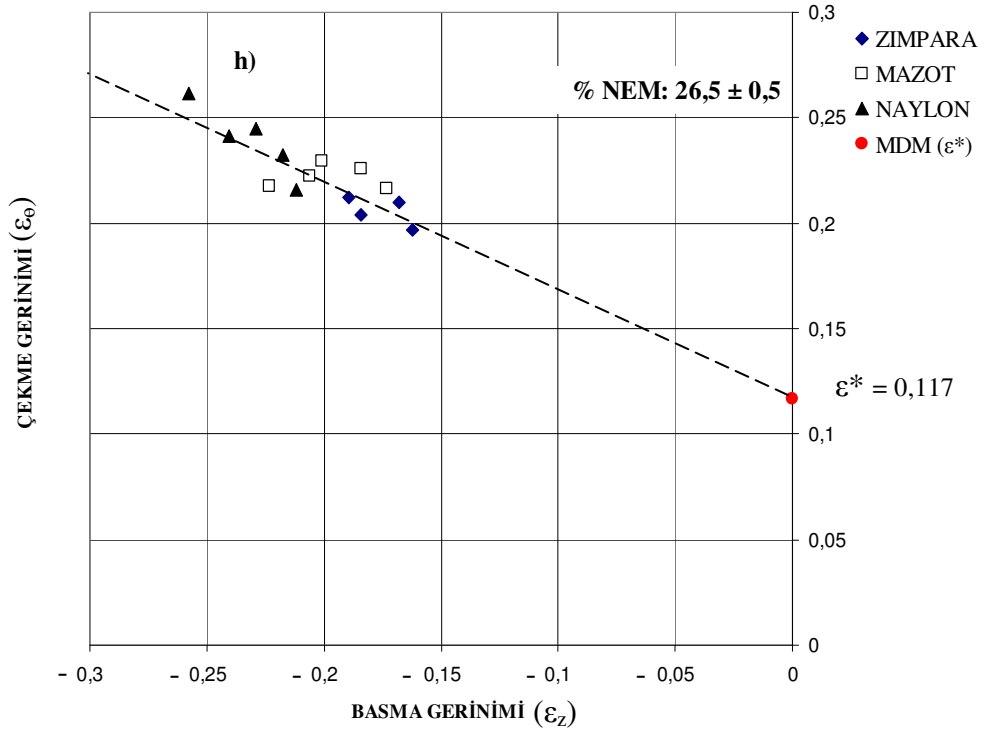
Şekil 4.1 (c, d). Tuvka kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı



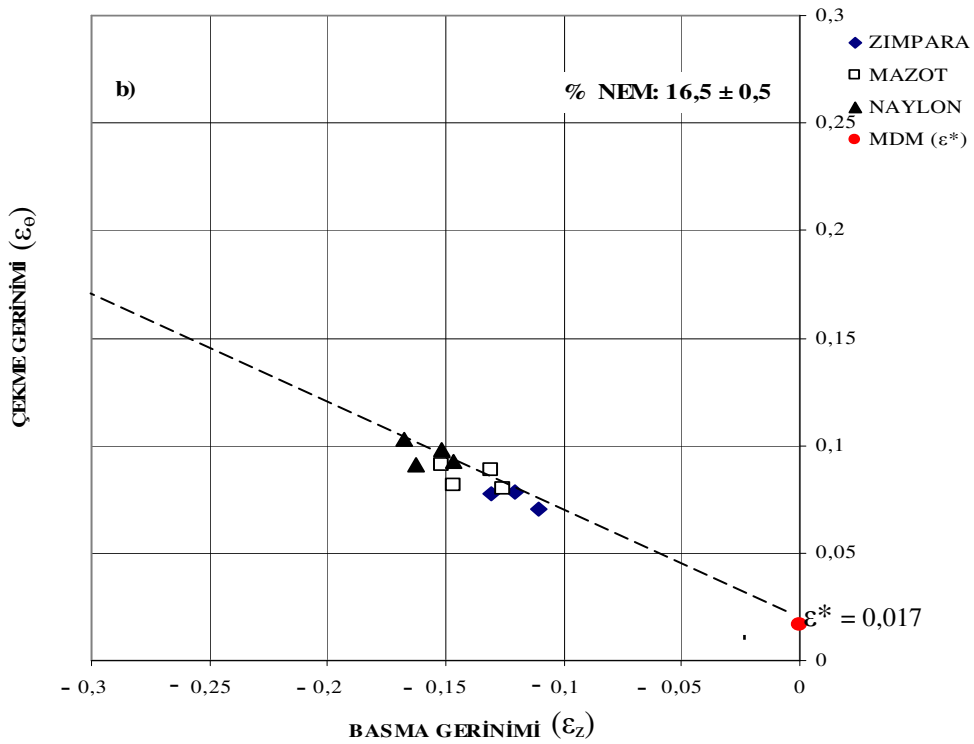
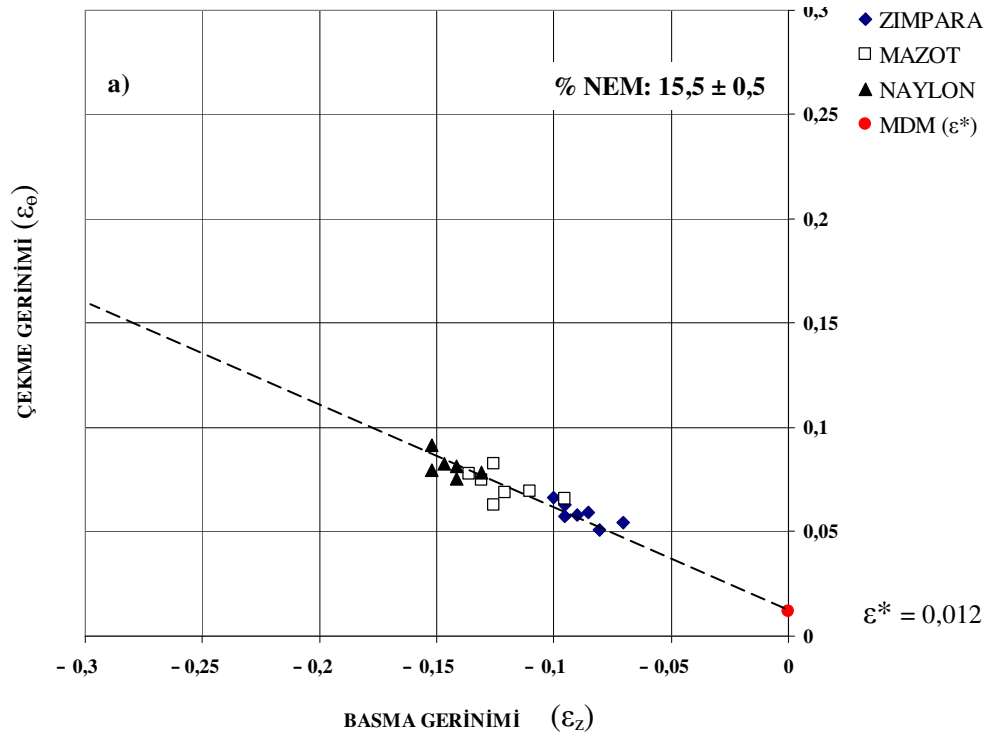
Şekil 4.1 (e, f). Tuvka kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı



Şekil 4.1 (g, ı). Tuvka kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı

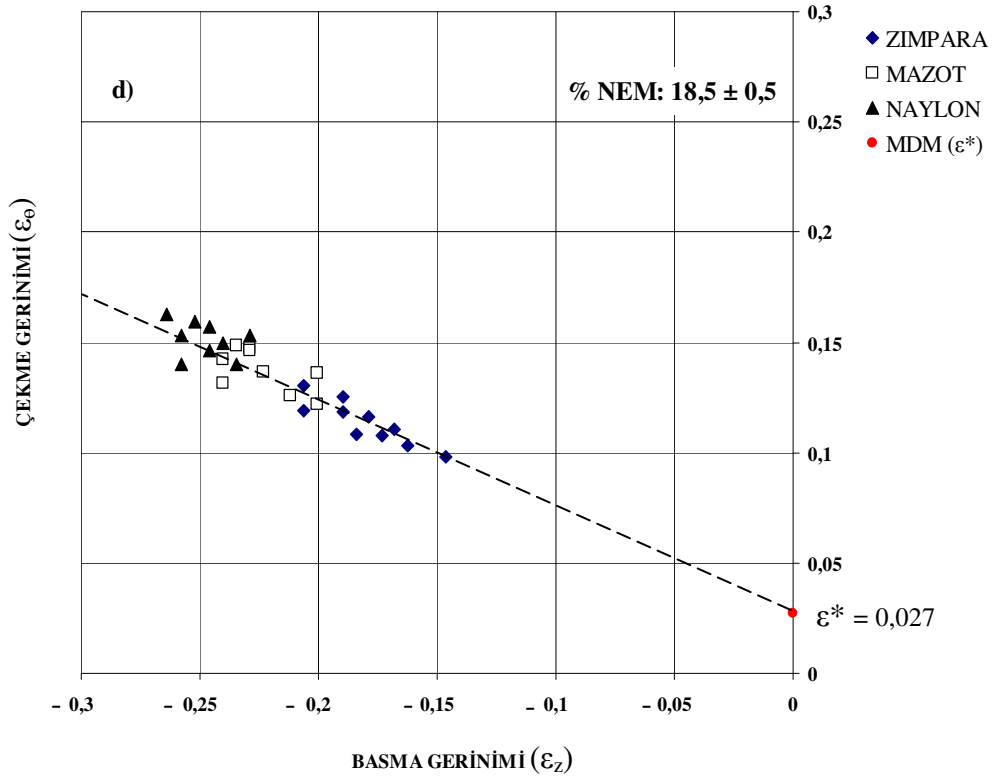
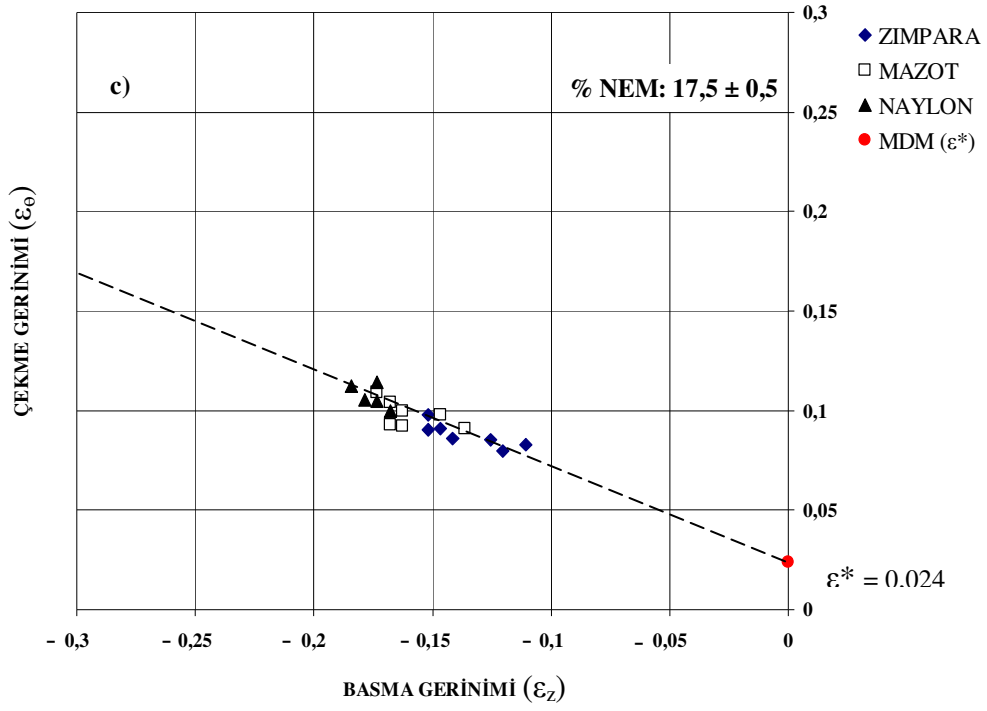


Şekil 4.1 (h). Tuvka kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı

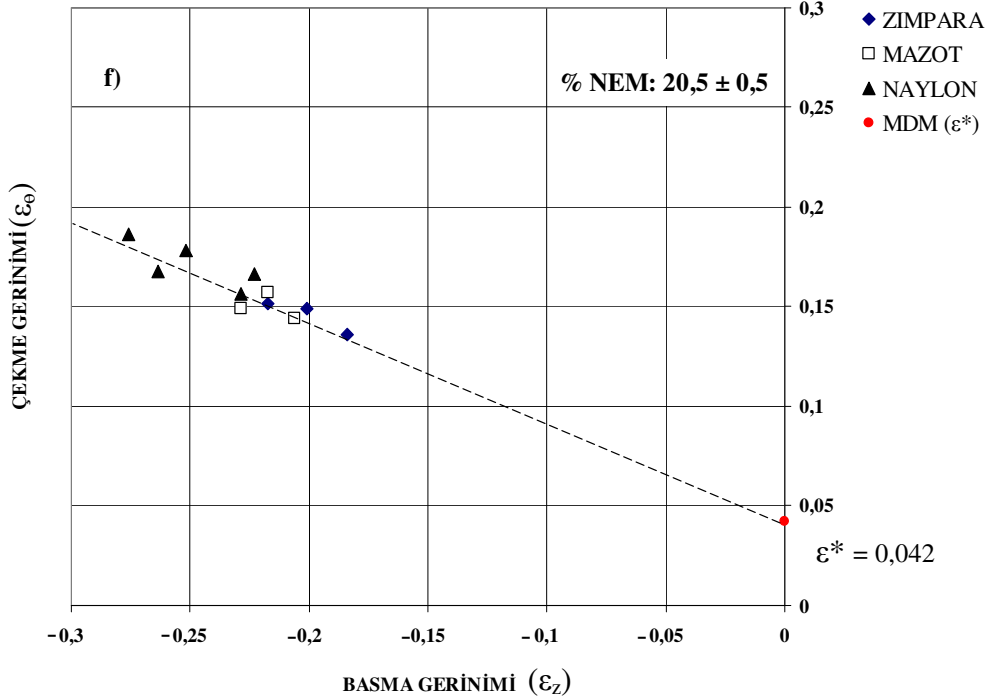
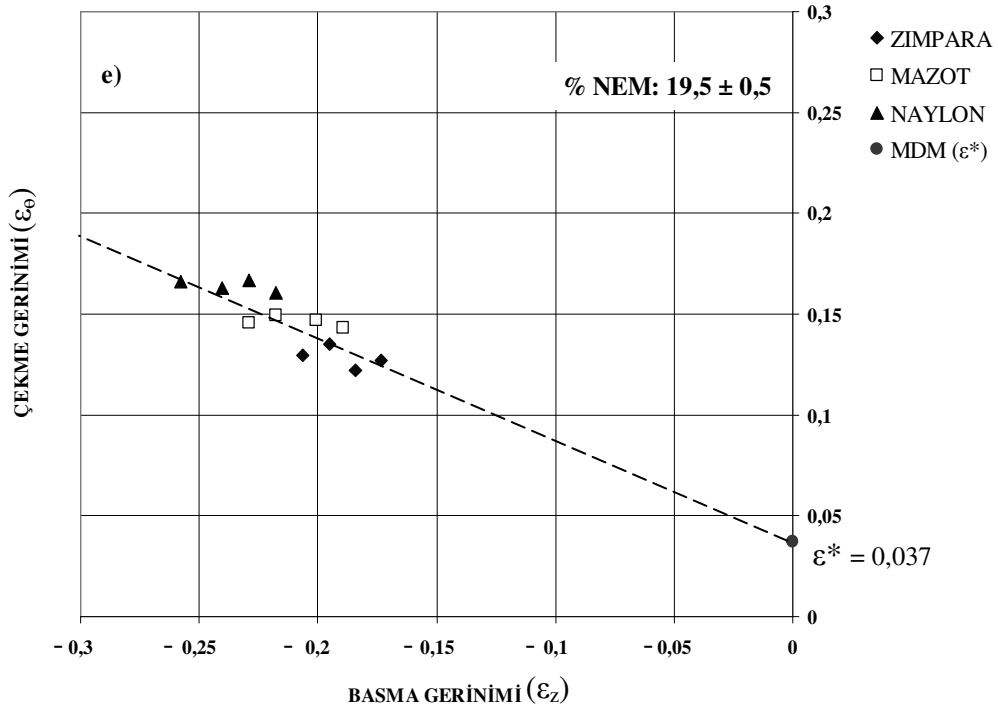


Şekil 4.2 (a, b). Türkmen kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları

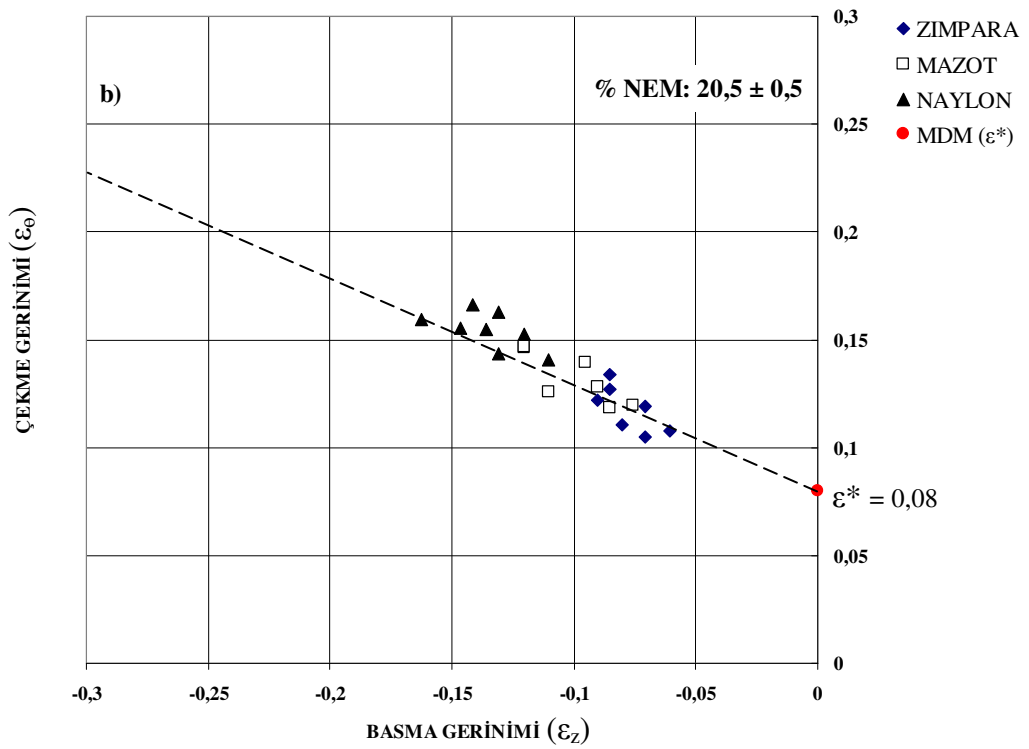
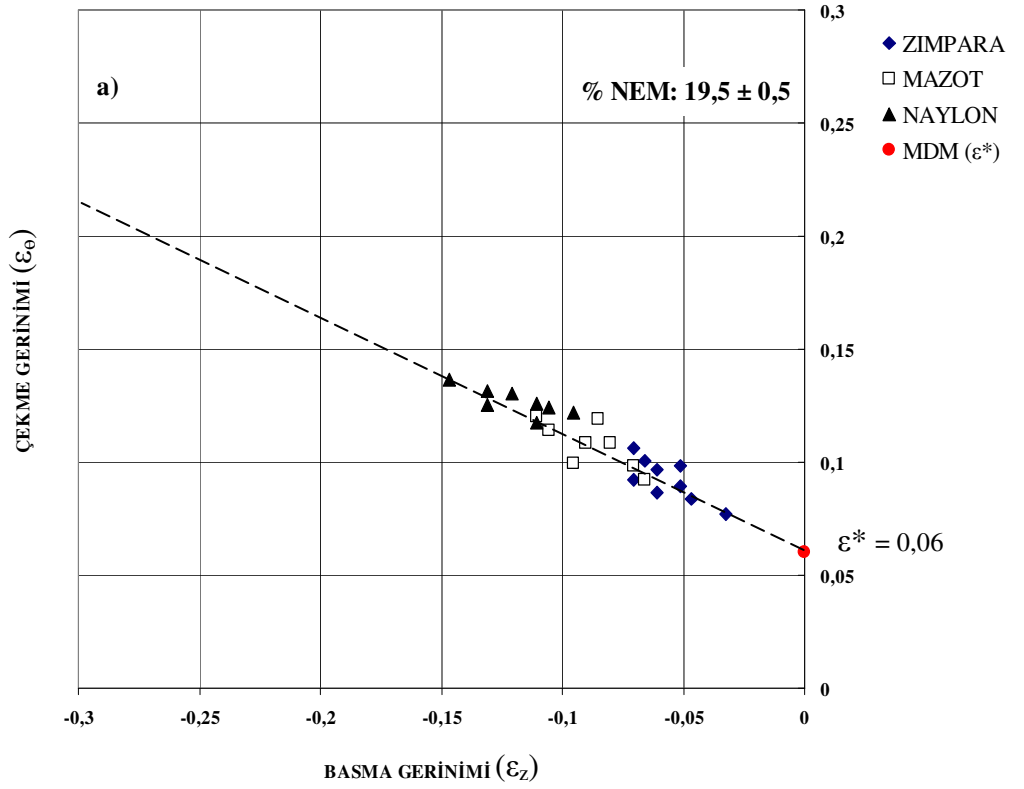




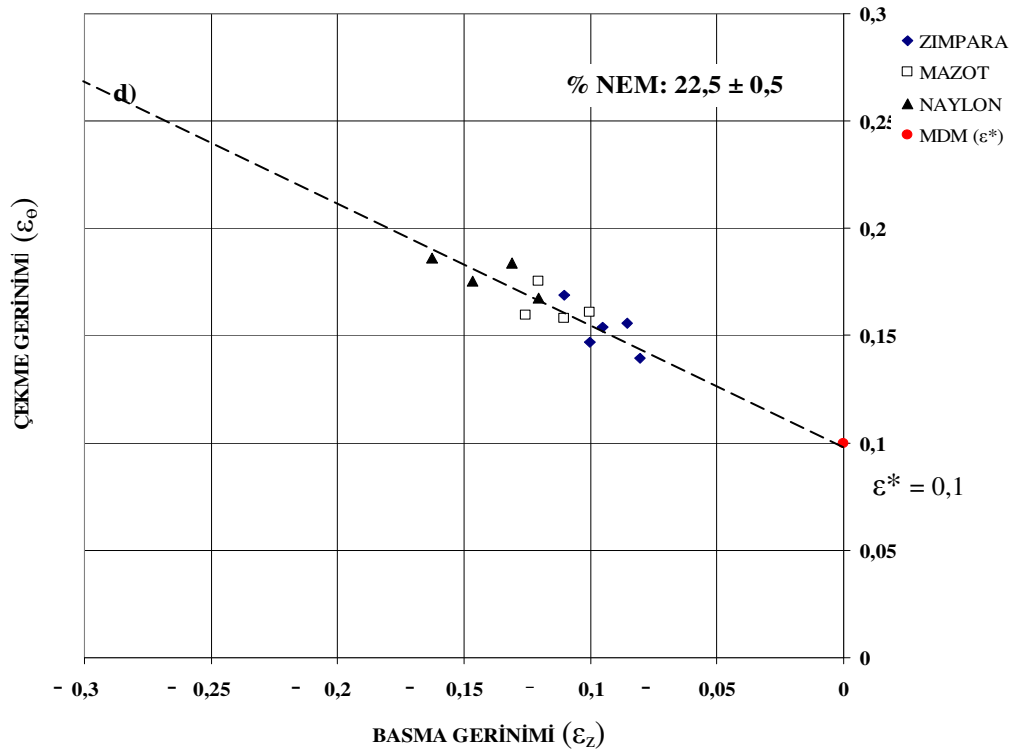
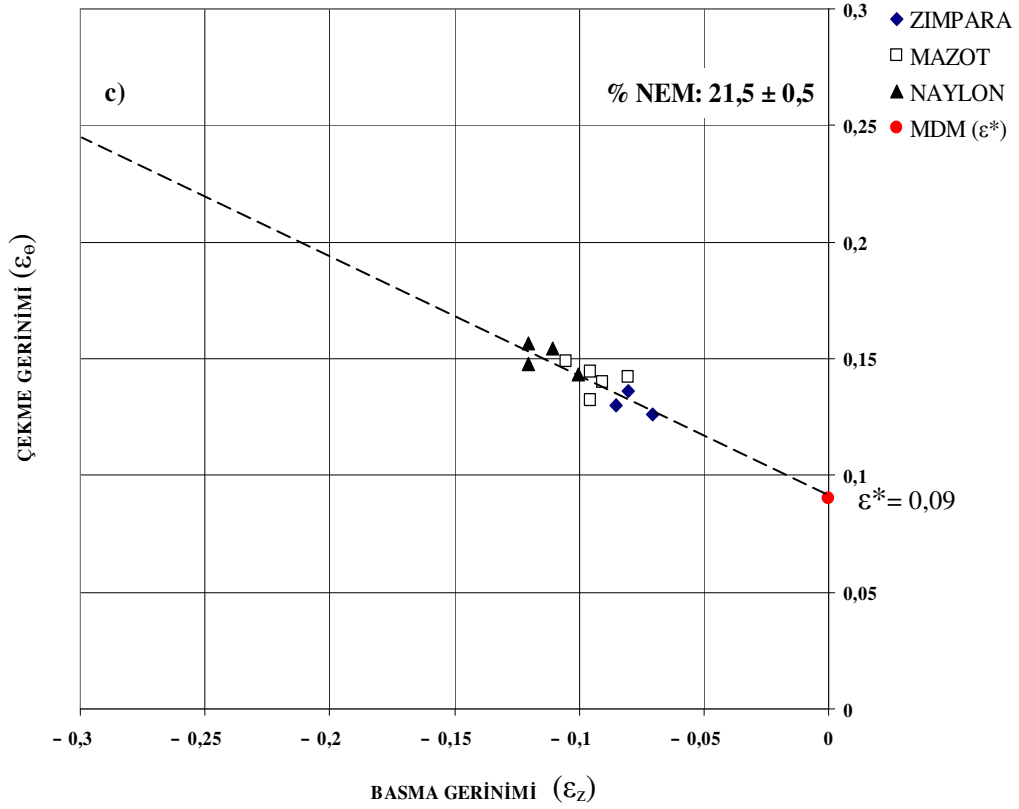
Şekil 4.2 (c, d). Türkmen kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı



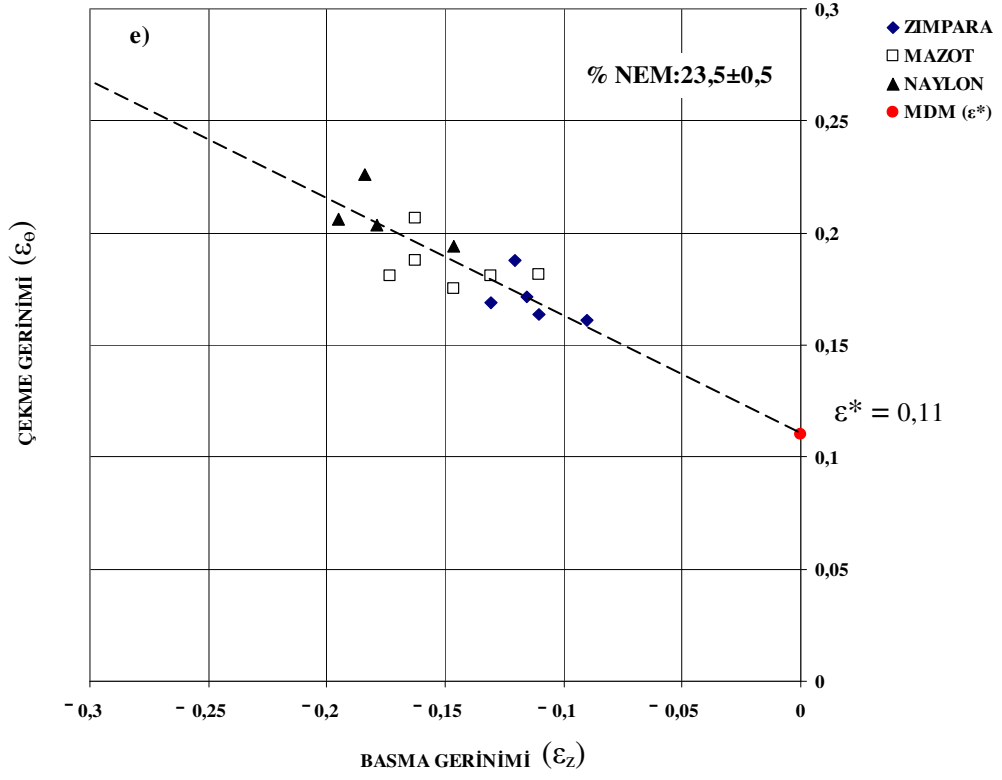
Şekil 4.2 (e, f). Türkmen kilinin biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı



Şekil 4.3 (a, b). Pembe kaolen biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları



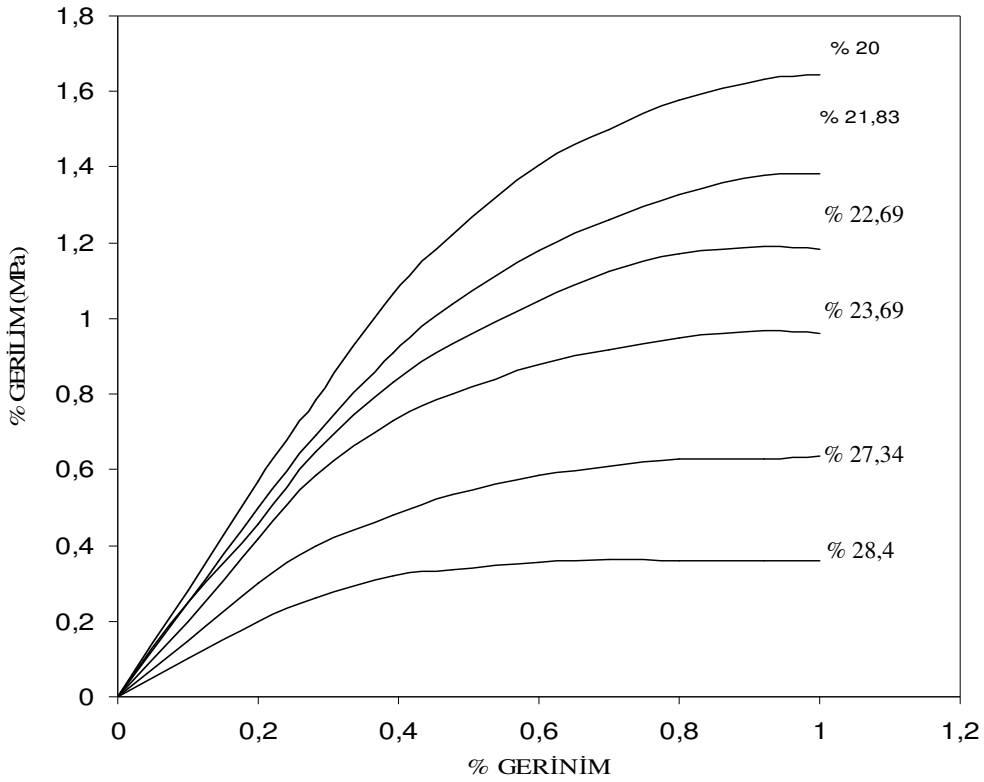
Şekil 4.3 (c, d). Pembe kaolen biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı



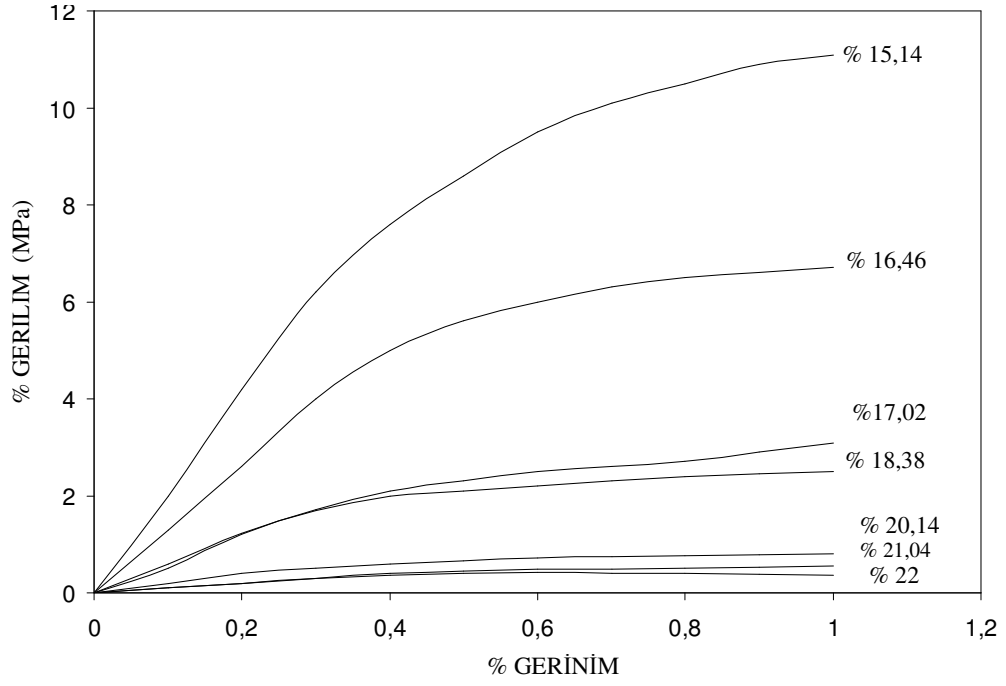
Şekil 4.3 (e). Pembe kaolen biçimlendirme sınır doğrularının % nem oranları devamı

#### 4.2 Akma Noktasının Belirlenmesi

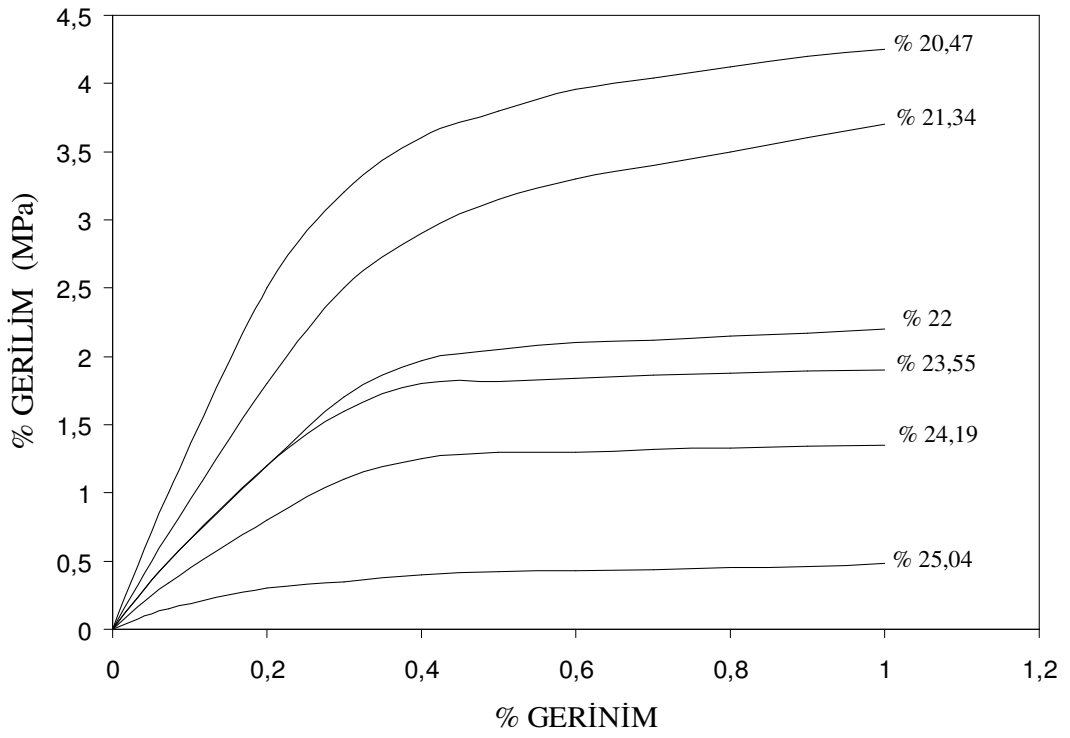
Tuvka kili, Türkmen kili ve Pembe kaolenin farklı % nem oranlarındaki akma gerilimleri sırayla Şekil 4.4- 4.6'da verilmiştir. Akma gerilimleri; Tuvka kili için % 19,67-28,40; Türkmen kili için % 15,14-22 ve Pembe kaolen için % 20,47-25,04 % nem aralığında bulunmuştur. Akma gerilimleri basma cihazında 20 mm/min'lik bir sabit hızda, numune yüzeylerinin sürtünme koşullarını değiştirmeden elde edilmiştir. Elde edilen gerilim/gerinim eğrilerine % 0,2 Offset kuralı uygulanarak akma gerilim değeri belirlenmiştir. Tüm şekillerde görüleceği gibi % nem oranındaki artışla akma gerilim değerleri düşmüştür. Ayrıca % nem oranındaki artışla deformasyon sertleşmesi azalmıştır.



Şekil 4.4. Tuvka kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi



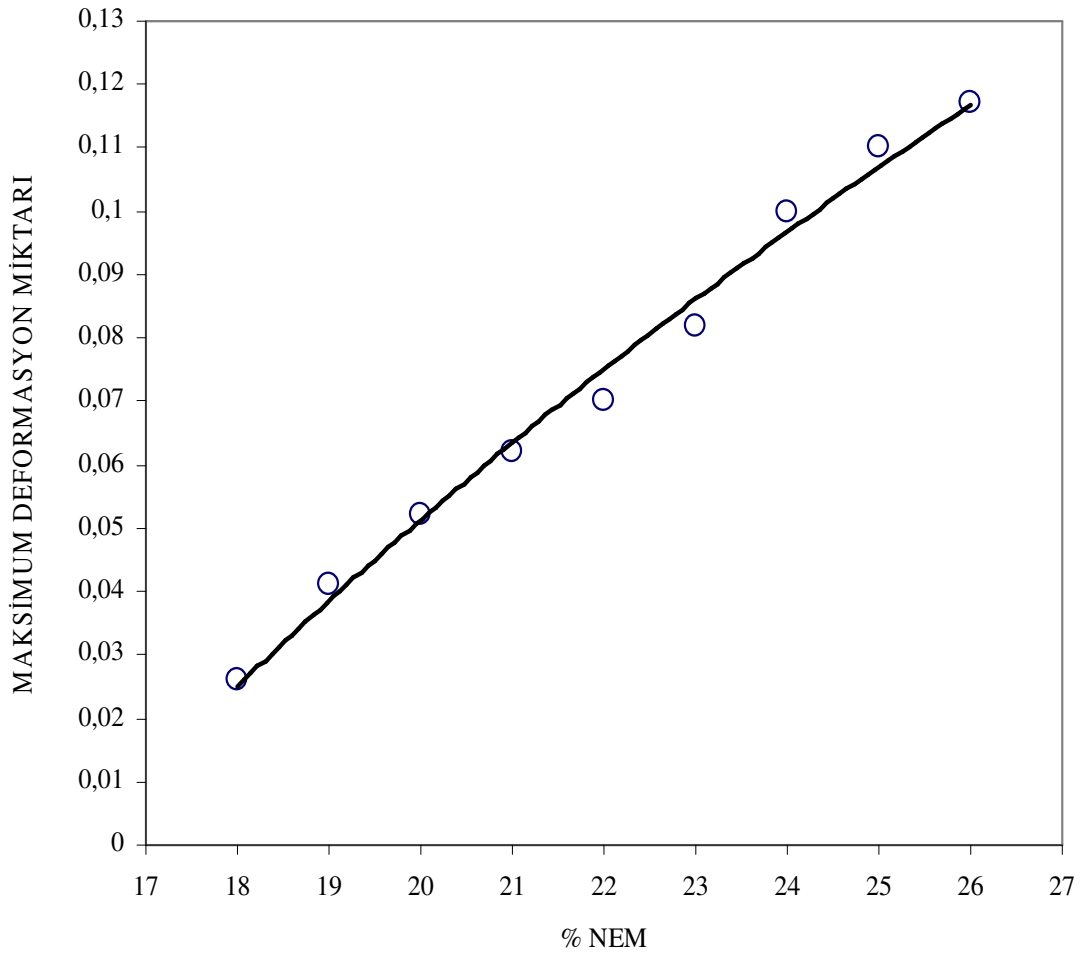
Şekil 4.5. Türkmen kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi



Şekil 4.6. Pembe kaolenin akma noktasının % nem oranına göre değişimi

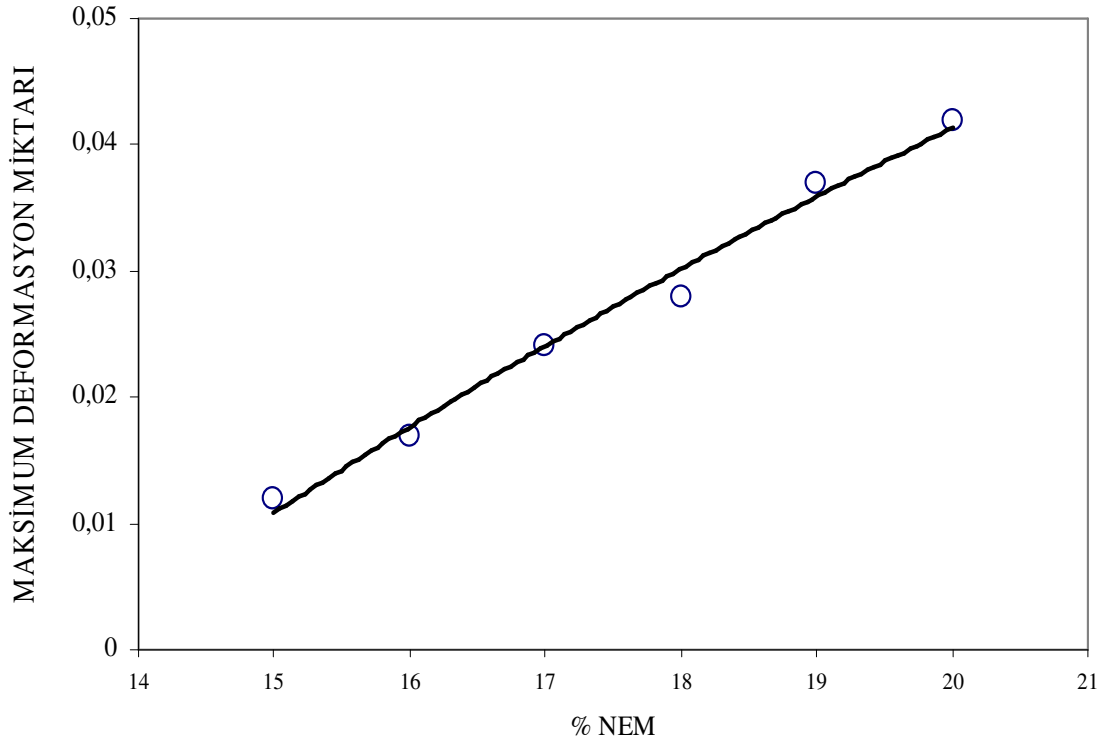
### 4.3. Maksimum Deformasyon Miktarı ( $\epsilon^*$ )

Şekil 4.1- 4.3'lerden elde edilen BSD'nın y eksenini kestiği MDM ( $\epsilon^*$ ) değerlerinin nem ile değişimlerini kullanılarak sırasıyla Tuvka kilinin Şekil 4.7, Türkmen kilinin Şekil 4.8 ve Pembe kaolen için Şekil 4.9'da sırayla maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimleri elde edilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi maksimum deformasyon miktarının % nem orandaki artışla artmaktadır.

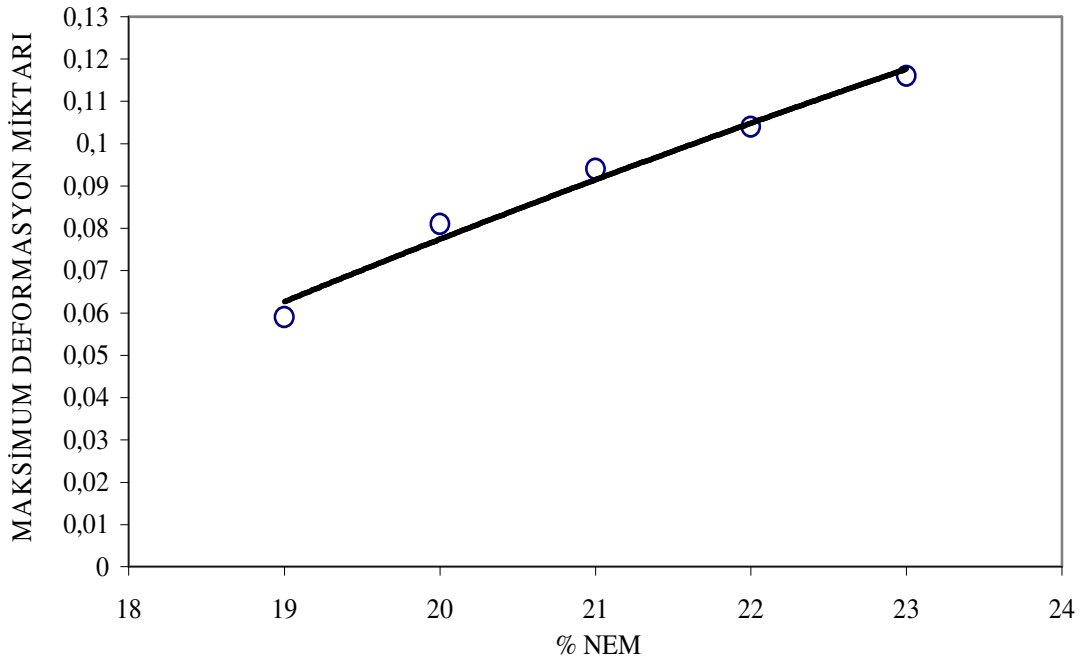


Şekil 4.7. Tuvka kili için maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi





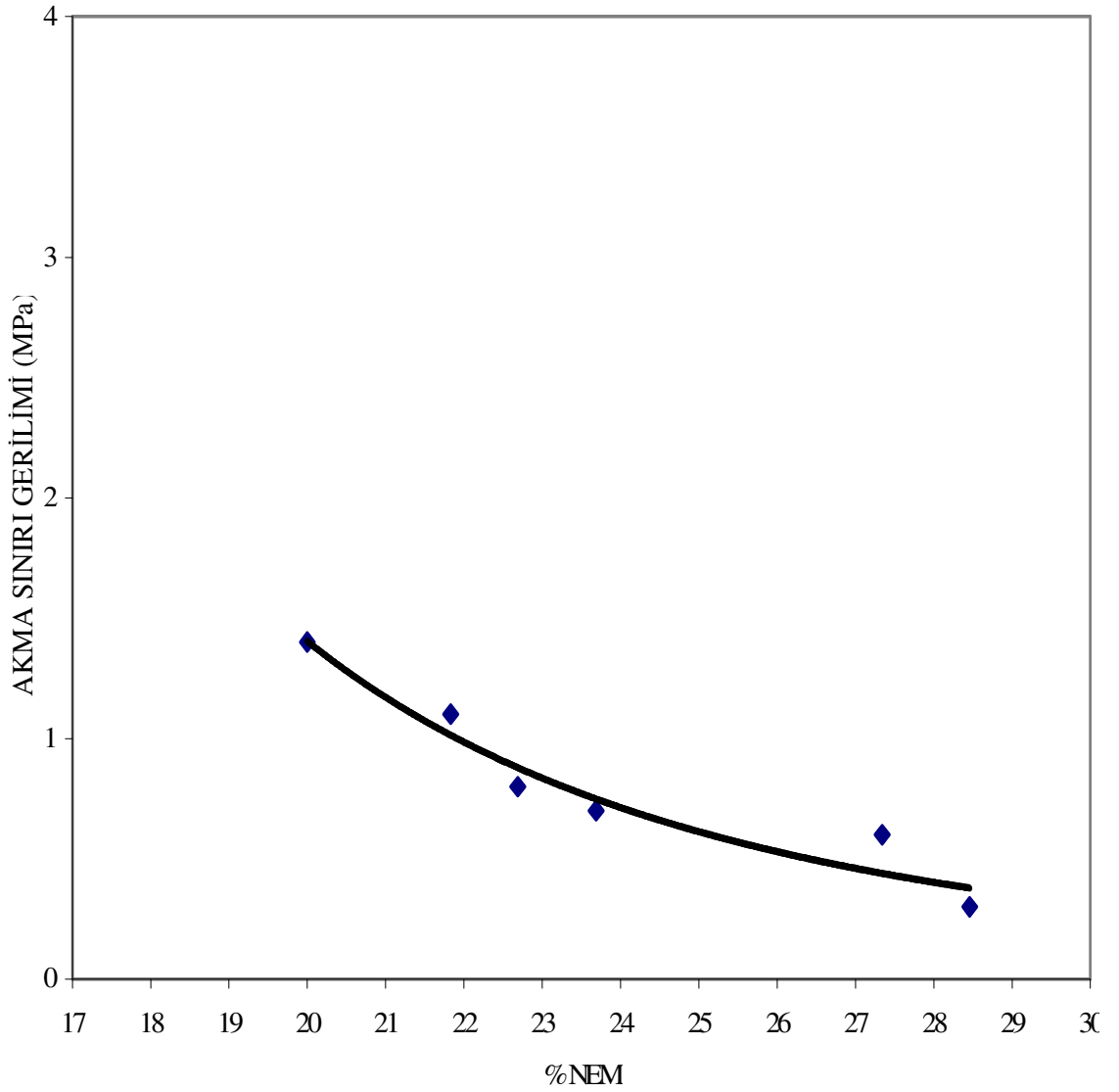
Şekil 4.8. Türkmen kilinin için maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi



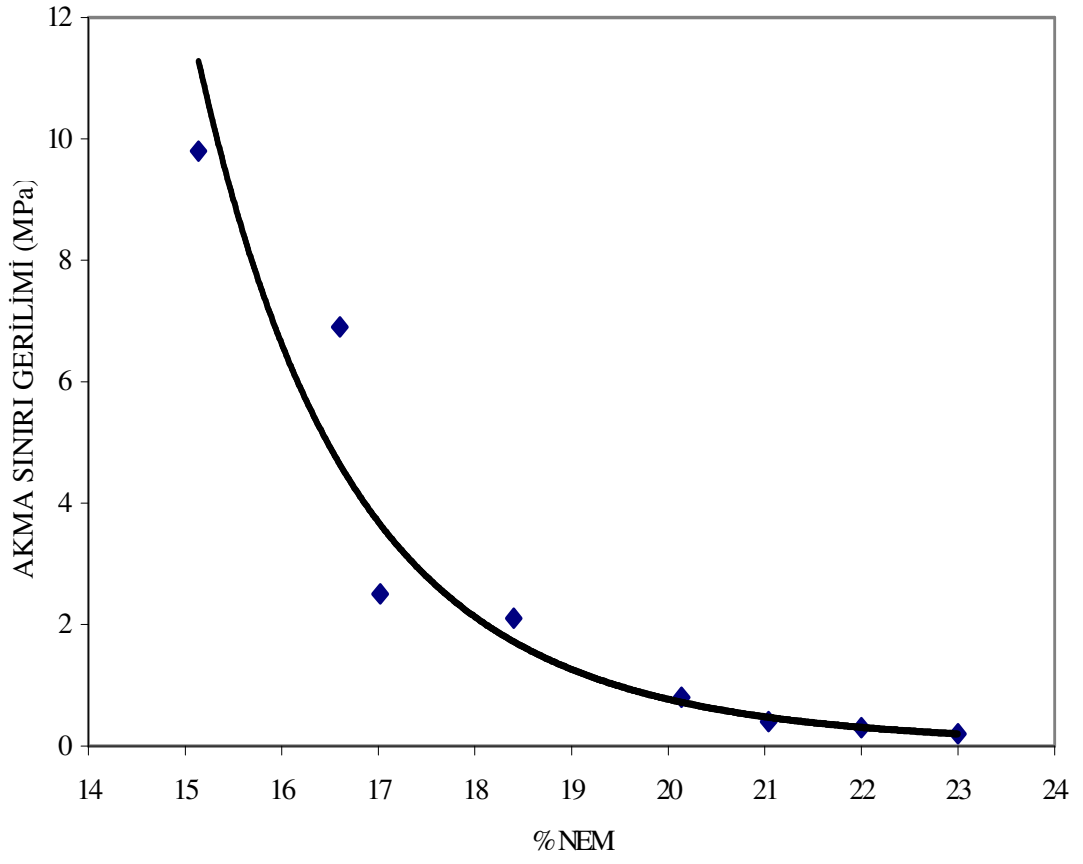
Şekil 4.9. Pembe kaolen için maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi

#### 4.4. Akma Noktası % Nem İle Değişimi

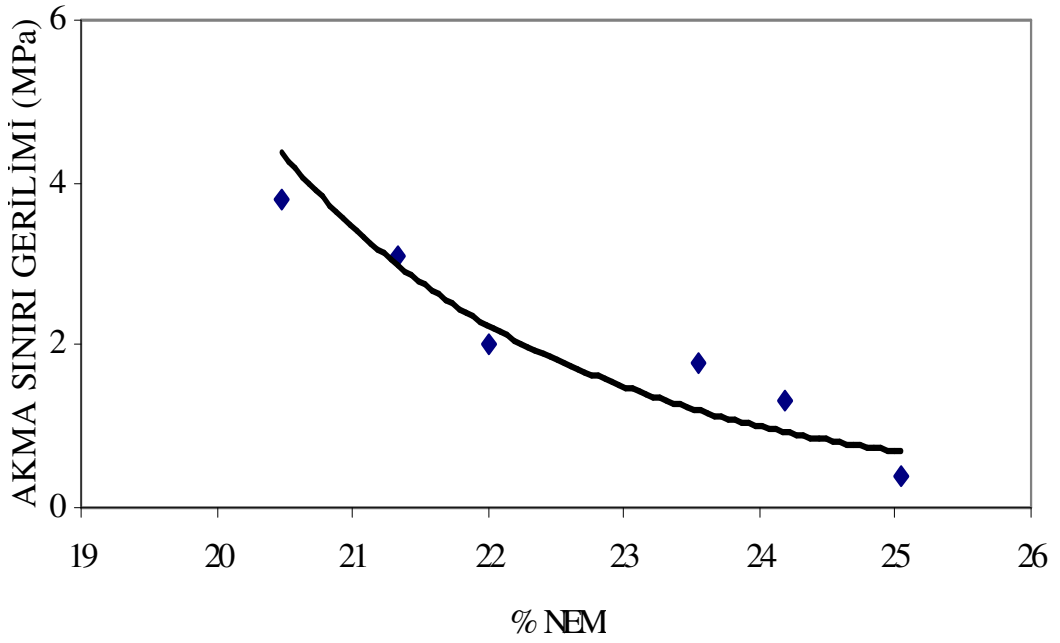
Tuvka kili, Türkmen kili ve Pembe kaolen için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi grafikleri Şekil 4.10-4.12'de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi akma gerilimleri tüm kiler için % nem oranındaki artışla azalmıştır.



Şekil 4.10. Tuvka kili için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi



Şekil 4.11. Türkmen kili akma gerilimlerinin % nem ile değişimi

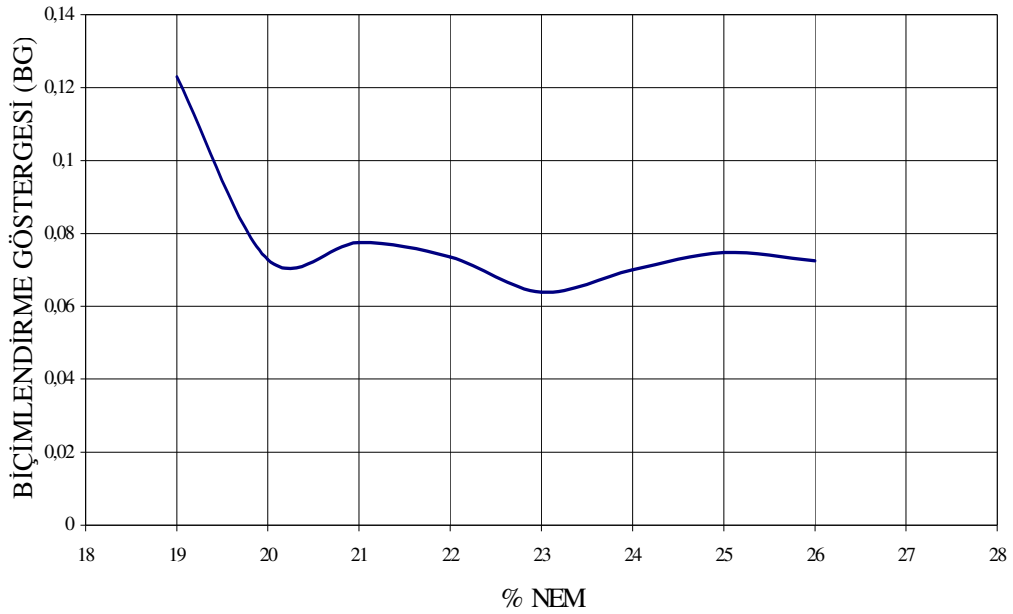


Şekil 4.12. Pembe kaolen için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi

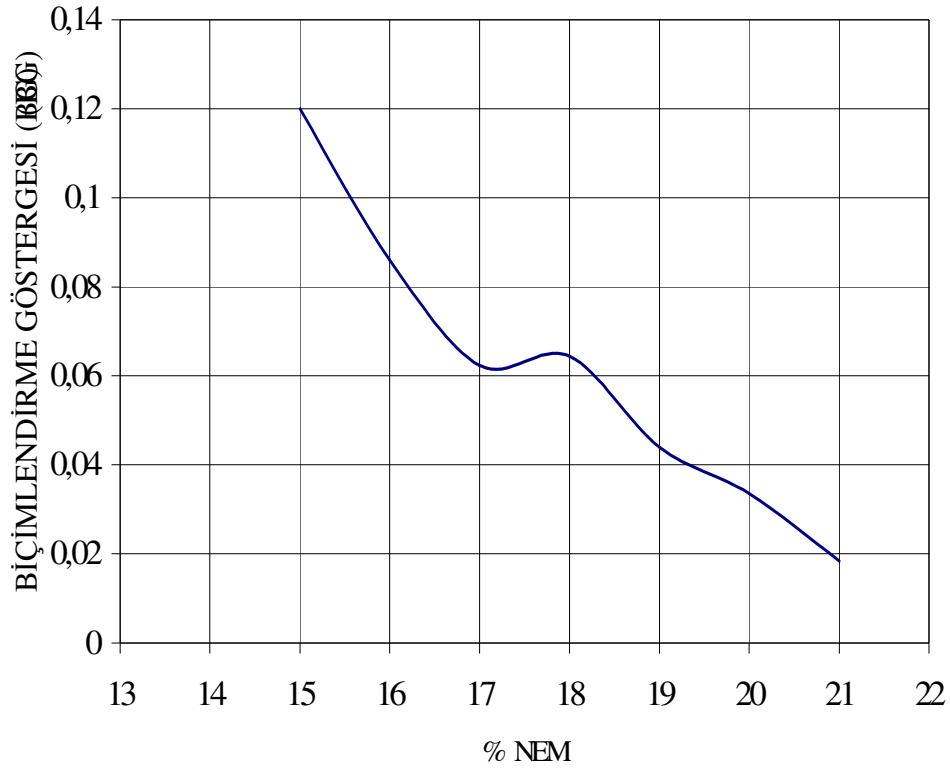
#### 4.5. Biçimlendirme Göstergesinin % Nemle Değişim Grafiği

Bölüm 3.4.3’de belirtildiği gibi biçimlendirme göstergesi (BG) maksimum deformasyon miktarı (MDM) ile akma geriliminin (AG) çarpılmasıyla bulunur. BG’nin % nem ile değişim grafiği Tuvka kili için Şekil 4.13, Türkmen kili için Şekil 4.14 ve Pembe kaolen için Şekil 4.15’de verilmiştir.

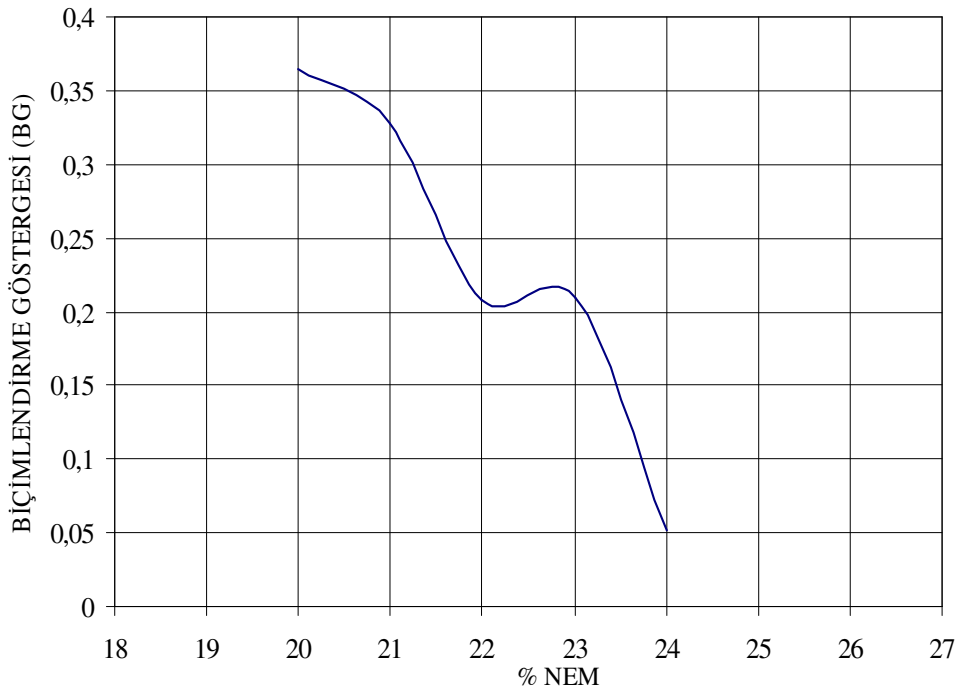
Şekil 4.13’de ve 4.15’de elde edilen eğriler Şekil 2.19’daki gibi tipik beklenen BG eğrisine benzememektedir. Fakat Şekil 4.14’deki Türkmen kili beklenen çan eğrisini sergilemiştir.



Şekil 4.13. Tuvka kili biçimlendirme göstergesinin % nemle değişim eğrisi



Şekil 4.14. Türkmen kili biçimlendirme göstergesinin % nemle değişim eğrisi

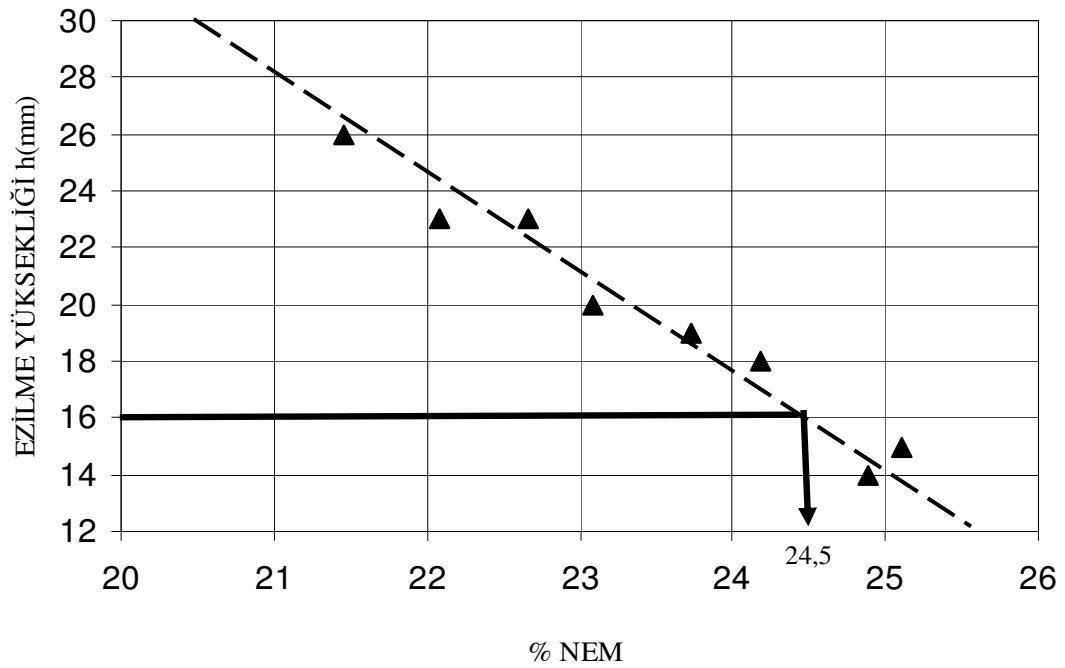


Şekil 4.15. Pembe kaolen biçimlendirme göstergesinin % nemle değişim eğrisi

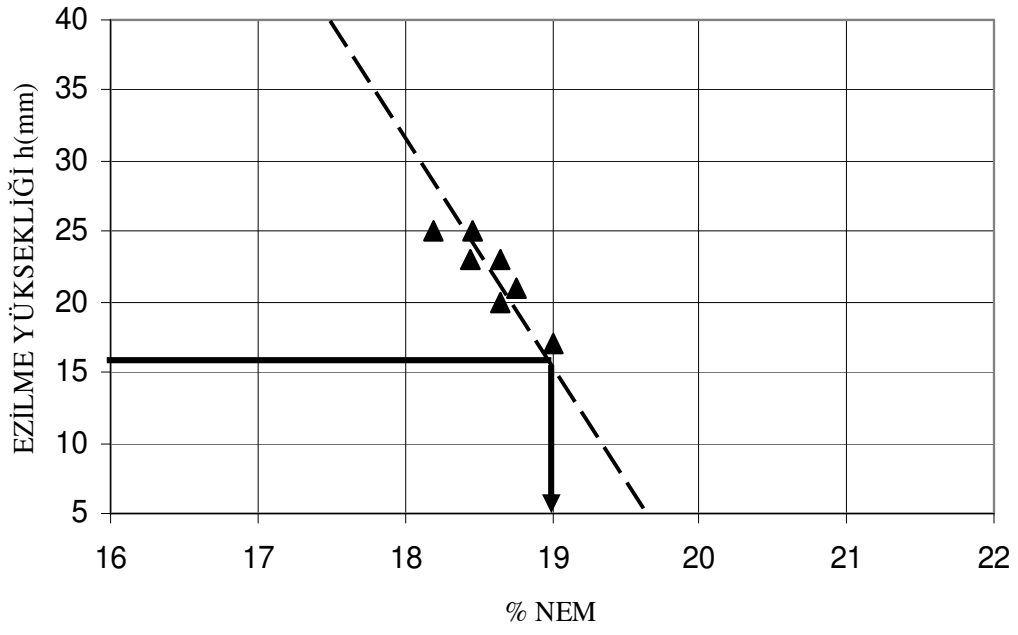
#### 4.6. Pfefferkorn Plastiklik Suyu

BSD tekniğinin metallere sonra killere uygulanması ve sonuçların kıyaslanması amacıyla seramik sektöründe çok kullanılan Pfefferkorn plastiklik suyu denemesi yapılmış ve sonuçları Tuvka kili için Şekil 4.16, Türkmen kili için Şekil 4.17 ve Pembe kaolen için Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu şekillerdeki ezilme yüksekliğinin y eksenininin 16 mm'den x eksenine paralel çizilen çizginin % nem eksenindeki izdüşümü optimum nem miktarını vermiştir.

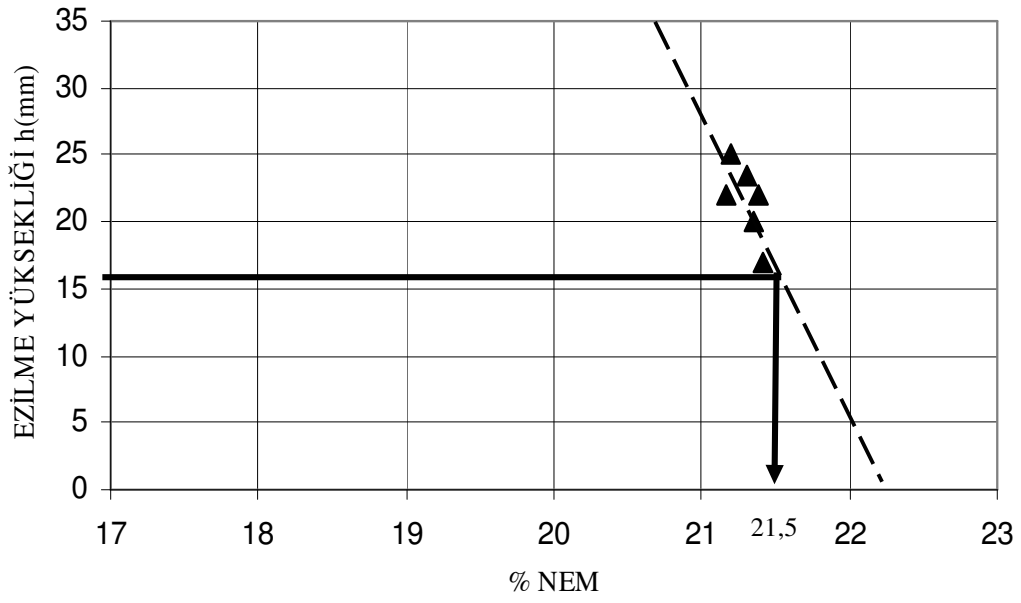
Bu değerler Tuvka kili için % 24,5; Türkmen kili için % 19 ve Pembe kaolen için % 21,5 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.16. Tuvka kili Pfefferkorn plastiklik suyu grafiği



Şekil 4.17. Türkmen kili Pfefferkorn plastiklik suyu grafiği



Şekil 4.18. Pembe kaolen Pfefferkorn plastiklik suyu grafiği

## 5. TARTIŞMA

Deneyleerde kullanılan killerin karakteristik özellikleri, mineral içerikleri ve teknolojik özellikleri Şekil 3.1-3.9 ve Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Buna göre Pembe kaolen ana minerali kuvars, kaolen olan ve az miktarda kalsit içeren bir kildir. Bu kilin plastiklik özelliği düşük olduğu için dökümle şekillendirmede plastiklik özelliği fazla olan diğer killere birlikte kullanılabilir. Reolojik özellikleri ile öne çıkan Pembe kaolen işlevsel olarak dökümde dolgu görevini yapabilir. Tane boyutunun % 90’ı 28,53 µm küçük olup ortalama tane boyutu 10,84 µm’ dir. Bu kilde tane boyutunun dağılım eğrisine bakıldığında iki tepe noktası dikkati çekmektedir (Şekil 3.3). Bu iki farklı tane boyutu (2,07 µm ve 10,84 µm) kildeki farklı yapılardaki mineralleri göstermektedir. Ortalama tane boyutu diğer killere göre oldukça küçüktür. Tane boyutu ve dağılımının oldukça küçük olması plastiklik için iyi bir avantaj olmasına karşılık mineral içeriğinde plastik özellik taşımayan kuvars ve kalsit’in varlığı biçimlendirilebilirlik için gerekli olan plastikliği önlemektedir. Teorik kaolendeki % SiO<sub>2</sub> ile Pembe kaolendeki % SiO<sub>2</sub> miktarı kıyaslandığında Pembe kaolen’de % 14,80 SiO<sub>2</sub> fazlalığı bulunmaktadır (teorik kaolende % 46,5; Pembe kaolen’de ise % 61,33 SiO<sub>2</sub> vardır). Bu fazlalık Pembe kaolen içerisinde serbest SiO<sub>2</sub> olarak bulunur. Bu da Pembe kaolen’in plastikliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Pembe kaolen BSD doğrularının bulunmasında % 19-23 ve akma gerilimlerinin bulunmasında % 20-25 çok dar bir nem aralığında çalışma imkanı vermiştir. Pfefferkorn plastiklik suyu için çizilen grafikteki (Şekil 4.18) doğrunun eğiminin dik olması da bu düşünceyi doğrulamaktadır. Nem miktarındaki sabit değişmeye karşılık deformasyondaki değişim (h) değeri bu kilin çok dar bir aralıkta kullanılabileceğini göstermektedir.

Tuvka kilinin ana mineralinin kaolen ve kuvars, yan minerallerinin de kalsit, montmorillonit ve illit olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.7). Kimyasal analizdeki % K<sub>2</sub>O’in 3,17 olması illitin varlığını doğrulamaktadır. Tuvka kilinde bulunan % SiO<sub>2</sub>’in 65,81 olması kaolene bağlanamayan serbest kuvarsın göstergesidir. % 6,15 yüksek oranda CaO içeren Tuvka kilinin tane boyutu dağılımı eğrileri



incelendiğinde Pembe kaolen'deki gibi iki tepe noktası görülmektedir. İki farklı mineral içeren Tuvka kilindeki farklı tanecik boyutu 1,3  $\mu\text{m}$  ve 12  $\mu\text{m}$ 'dur (Şekil 3.1). Tane boyutu olarak Pembe kaolene göre daha iri boyuta sahip olan Tuvka kili montmorillonit ve illit içeriği sebebiyle daha plastik bir kildir.

Türkmen kilinin ana minerali kaolen ve kuvars yan mineralleri de montmorillonit ve kalsittir. Plastik özellik gösteren bu kil tane boyutu dağılımı bakımından daha homojen tanecikler içermektedir (ortalama tane boyutu 35,84  $\mu\text{m}$ ). Hem Pembe kaolen hem de Tuvka kilinde daha boyutu büyük tanelere sahip olması ve serbest  $\text{SiO}_2$  içermesine rağmen bu kil plastiklik özelliği göstermektedir. Montmorillonit minerali plastikliği arttıran üç tabakalı bir mineral olup tabakalar arasında tutulan su filmi kalınlaştıkça plastiklik özelliği artmaktadır. Serbest kuvars ve kalsit su tutma özelliği olmadığından plastikliği düşürmektedir. Tuvka ve Türkmen killeri ile presle şekillendirme yapan tesislerde diğer killerin presleme sonrası ham dayanımlarını artırmak için yapılara katılabilir.

Killerin maksimum deformasyon miktarını belirlemede metallere uygulanan BSD tekniği killere de başarı ile uygulanmıştır.

Zımpara gibi sürtünme katsayısı yüksek olan yüzey koşullarında şekillendirilebilirlik düşük elde edilmiştir. Bunun aksine naylon gibi sürtünme katsayısı düşük yüzey koşullarında yüksek şekillendirilebilirlik elde edilmiştir. Mazot kullanıldığında ise değerler genel olarak zımpara ile naylon arasında olup bazen de yapışmadan dolayı zımpara ile naylon bölgelerinde de değerler elde edilmiştir. Diğer bir deyişle yüzey koşullarının değiştirilmesi biçimlendirme sınır doğrusu üzerindeki veri noktalarını orjin noktasına yaklaştırarak veya uzaklaştırarak yaymıştır. Ayrıca %nem miktarındaki artış ile maksimum deformasyon miktarı artmıştır.

İdeal BSD'nın eğimlerinin  $-\frac{1}{2}$  olması gerekir. Bu çalışmada da tüm killer için BSD'nın eğimlerinin  $-\frac{1}{2}$ 'ye çok yakın olduğu görülmüştür. Metale yapılan basma deneylerinde kullanılan numunelerin değme yüzeyleri sürtünme koşulları yağlanarak

veya pürüzlendirilerek silindirik numunelerin bombeleşme miktarları değiştirilebilmekte ve buna bağlı olarak da BSD'nin yaygınlığı artırılabilir.

Metallerden farklı olarak killerin nem değerleri BSD'nı bulmada önemli rol oynamaktadır. Killerin % nem değerleri  $\pm 0,5$  sapma ile çizilebilmiştir. Killerin yüzey sürtünme koşullarına bağlı olarak killer değme yüzeylerine yapışabilmektedir. Buda BSD'daki veri noktalarının birbirinin içine girmesine sebebiyet vermektedir.

Eğimi  $-1/2$  olan BSD'nın orjine yakın bölgelerde veriler elde edilememiştir. Metallerde çok özel geometrisi olan numuneler kullanılarak veya eğme deneyi ile bu bölgelerde veriler elde edilebilmektedir. Killerde numune hazırlama güçlüğü yüzünden bu tip numuneler hazırlanamamaktadır. Eğimi  $-1/2$  olan BSD'nı oluşturan noktaların elde edilmesinde iki farklı yöntemden birincisi hazırlanan numunelerin boy/çap (L/D) oranlarını değiştirmek, ikincisi ise basma deneyi sırasında killerin değme yüzeyinin sürtünme koşullarını değiştirerek yapılabilmektedir. Bu çalışmada L/D oranı 1 sabit tutulup (L= 25 mm) yalnızca yüzey koşulları değiştirilmiştir.

Bu çalışmadan önce ön deneyler olarak basma yüzeyleri vazelin ve gliserin gibi malzemelerle yağlanmıştır. Ancak bu maddelerin sürtünmeyi azaltmasına karşılık killerin içine yayındığı gözlenmiş ve bu sebepten maddeler kullanılamamıştır. Bunun yerine killerle etkileşmeyen ve kil içerisinde yayınmayan naylon, mazot ve 240 numara su zımparası kullanılmıştır.

Bu araştırmada akma gerilimleri de basma deneyleri sonuçlarından elde edilmiştir. Gerilim gerinim eğrilerinin belirlenmesinde numunelerin değme yüzeyleri parlatılmış metal yüzeylerdir. Bu yüzeylerin sürtünme koşullarının değiştirilmesi düşünülmemiştir. Ayrıca akma gerinimlerinin ölçülmesinde 5 mm/min ve 40 mm/min hızlarda denemeler yapılmıştır. Ancak denemeler sonucu elastik bölgede çok belirgin bir değişme gözlenmemiştir. Kullanılan killerin akma sınırları plastik bölgeye oldukça keskin bir geçişle iyi bir belirginlik göstermiştir (Şekil 4.4-4.6). Elastik modülün su miktarı arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Her üç kil için deformasyon sertleşmesi nem miktarı ile önemli değişme göstermektedir.

Her üç kilden elde edilen minimum ve maksimum deformasyon miktarları ( $\epsilon^*$ ), oldukça düşük düzeydedir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Üç kilden elde edilen maksimum deformasyon miktarları

Hız (mm/min)		Tuvka Kili	Türkmen Kili	Pembe Kaolen
20	En düşük ( $\epsilon^*$ )	0,026	0,012	0,059
20	En yüksek ( $\epsilon^*$ )	0,117	0,042	0,116

Killerde görülen bu düşük maksimum deformasyon değerler kil taneciklerin arasındaki oldukça düşük çekimden ileri gelmektedir. Killerin kırılmaya karşı dayanımları oldukça düşüktür ve buda düşük biçimlendirme değerlerini vermektedir. Tuvka kili, Türkmen kili ve Pembe kaolen'in Şekil 4.4-4.6'daki akma gerilimlerinin % nem miktarı ile azaldığı buna karşılık Şekil 4.7-4.9'daki maksimum deformasyon miktarının % nem miktarı ile arttığını göstermektedir. Böylece biçimlendirilebilirlik göstergesi olarak tanımlanan bu iki değer çarpımı belirli bir maksimumdan geçen çan şeklinde bir eğri oluşturmaktadır. Oluşan çan eğrileri her üç kilde de oldukça yayvan ve tepe noktaları çok az belirgindir. Biçimlendirilebilirlik düzeyleri çok az olan bu killerden Türkmen kilinde tek bir çan oluşmasına karşılık Tuvka ve Pembe kaolen'de iki farklı çan eğrisi oluşmaktadır (Şekil 4.13 ve Şekil 4.15). Bu killerin tek bir minerale dönüşmeyip farklı karakterde minerallerin bulunmasının bir sonucudur. Metallerde gözlenmeyen bu durum killer için dikkat çekicidir. Çan şeklinde belirlenen biçimlendirilebilirlik göstergesinin maksimum noktası belirli bir kil için en uygun (optimum) nem miktarı vermektedir. Biçimlendirilebilirlik eğrisinin bir maksimumdan geçerek çan şeklinde bir eğri oluşturması daha önceki pek çok araştırmacının sonuçları ile uyum içerisindedir. Bu eğrinin belirlenmesinde BSD tekniğinin kullanılmasının uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Optimum nem miktarları iki tepe yapan killer için, optimum nem aralığı olarak verilmiştir.

Tuvka kili için optimum nem aralığı % 21-25, Türkmen kili için optimum nem % 18 ve Pembe kaolen için optimum nem aralığı %20-23 olarak belirlenmiştir.

Pfefferkorn plastiklik suyu deneyinden elde edilen optimum nem değerleri Tuvka kili, Türkmen kili ve Pembe kaolen için Şekil 4.15-4.17'de verilmiştir. Buna göre Tuvka kilinin optimum nem değeri % 24,5; Türkmen kilinin optimum nem değeri % 19 ve Pembe kaolen için optimum nem değeri % 21,5 olarak bulunmuştur. Bu değerler BSD tekniği ile oluşturulan çan eğrilerinden elde edilen optimum nem miktarları ile uyum içerisindedir.

Bu çalışmada maksimum deformasyon miktarının bulunmasında özel alet gerektirmeyen, her türlü laboratuvarında kolaylıkla yapılabilecek basit bir deney yönteminin killere uygulayarak diğer araştırmacıların bulguları ile uyum içindeki, biçimlendirilebilirlik göstergesinin elde edilebilmesidir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

1. Bu çalışma sonucu metallerin biçimlendirilebilirliğini belirlemede kullanılan biçimlendirme sınır doğruları (BSD) tekniği killerin biçimlendirilebilirliğini belirlemede de kullanılabileceği gösterilmiştir.
2. Elde edilen BSD'nın eğimi - ½ olan bir doğru olup y eksenine yakın bölgelerde veri elde edilememektedir. Metallerde eğme deneyi veya özel geometrisi olan numunelerle elde edilen orjine yakın veri noktaları, killerde örnek yapma güçlülüğü sebebiyle denenmemiştir.
3. Basma deneyi sırasında kilin deforme edilerek, değme yüzey koşulları değiştirildiğinde BSD'nın yaygınlığı artmaktadır.
4. Zımpara gibi sürtünme katsayısı yüksek olan yüzey koşullarında şekillendirilebilirlik düşük elde edilmiştir. Bunun aksine naylon gibi sürtünme katsayısı düşük yüzey koşullarında yüksek şekillendirilebilirlik elde edilmiştir. Mazot kullanıldığında ise değerler genel olarak zımpara ile naylon arasında olup bazen de yapışmadan dolayı zımpara ile naylon bölgelerinde değerler elde edilmiştir.
5. Killerin değme yüzeyine yapışması nem miktarı ile artmaktadır. Bu da elde edilen BSD'da sapmalara neden olmaktadır.
6. Killerin nem miktarını sabit tutmak mümkün olmadığından nem değerleri  $\% \pm 0,5$  sapma ile BSD ve akma gerilimleri elde edilebilmiştir.
7. Yüzey sürtünme koşullarını değiştirmek için gliserin, vazelin ve stearik asit denenmiş ancak kil içerisinde yayıldığı için vazgeçilmiştir.

8. Tuvka ve Pembe kaolen iki farklı tane boyutuna sahip mineraller içerdiğinden BG' nin nem ile değişim değerleri iki farklı tepe noktası gösteren çan eğrilerinden oluşmaktadır. Bu yüzden optimum nem değerleri için sabit bir nem değeri değil, bir nem aralığı bulunmuştur. Türkmen kili daha homojen yapıda tane iriliğine sahip minerallerden oluştuğundan değeri çan eğrisinin tepe noktasından bulunmuştur. Biçimlendirilebilirlik için optimum nem değerleri veya aralıkları Tuvka kili için % 21-25, Türkmen kili için % 18 ve Pembe kaolen için % 20-23'tür.
9. BSD tekniği kullanılarak elde edilen optimum nem değerleri seramik sanayinde çok kullanılan ampirik sonuçları olan Pfefferkorn plastiklik suyu deneyi ile elde edilen nem değerleri ile uyum içerisindedir

## 6.2. Öneriler

1. BSD tekniği Atterberg limitleri içerisinde çok farklı plastiklik özelliğine sahip olan killeri için denenmelidir. Oldukça saf mineral içeriğine sahip killere yapay ilaveler yapılarak (kuvars) BSD tekniği denenmelidir.
2. BSD tekniği farklı şekillendirme yapan fabrikalardan alınacak, çok farklı yüzey ve kristal özelliği olan mineraller için denenmelidir.
3. BSD tekniği Pfefferkorn plastiklik suyu tayininde olduğu gibi pratik ve her laboratuvar ortamında uygulanacak şekilde getirilmelidir.
4. BSD tekniği ile biçimlendirilebilirlik testi, tane boyutu ve dağılımı daha dar tutulan killere de denenmelidir.
5. BSD tekniği kullanılarak biçimlendirilebilirlik analizi yapılabilir. Böylece killerin hangi şekillendirme için daha uygun olduğu belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

1. Ertürk, T., “Kütle deformasyon ve levha biçimlendirme işlemlerinde deformasyon sınırları ve biçimlendirme analizi”, Üçüncü Ulusal Metalurji Kongresi Bildiriler Kitabı, *ODTÜ*, Ankara, 659-82 (1978).
2. Whitaker, H., “Effect of particle size on plasticity of kaolinite”, *J. Am. Cer. Soc.*, 22: 16-23 (1939).
3. Henry, E. C., “Measurement of workability of ceramic bodies for plastic molding process”, *J. Am. Cer. Soc.*, 26: 37-39 (1943).
4. Moore, F., “Two instruments for studying the plasticity of clays”, *J. Sci. Instrum.*, 40: 228-231 (1963).
5. Baran, B., “Killerin biçimlendirilebilirliğinin basma deneyi ile tayini”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi*, Ankara, 72-75 (1982).
6. Worrall, W. E., “Clays And Ceramic Raw Materials”, *Applied Science*, 14-18 (1975).
7. Yong, B. N. and Warkentin, B. P., “Soil Properties And Behaviours”, *Elsevier*, New York, 26-32 (1975).
8. Sarıkaya, Y. and Ender, E., “Temel Üniversite Kimyası”, *Hacettepe Taş Kitapçılık*, Ankara, 342 (1984).
9. Singer, S. and Singer, F., “Industrial Ceramics”, *Chapman and Hall*, London, 716- 771 (1979).
10. Can, R. W., Haasen, P. and Kramer, E. J., “Materials Science And Technology, 17And ed.”, *VCH Publishers Inc*, New York, 153-187 (1996).
11. Moore, F., “Rheology Of Ceramic Systems”, *Maclaren and Sons Ltd*, London, 23-27 (1965).
12. Norton, F. H., “Fine Ceramics Technology And Applications”, *Mc Graw Hill*, New York, 42-50 (1972).
13. Ribeiro, M. J., Ferreira, J. M. and Labrincha, J. A., “Plastic behavior of different ceramic pastes processes”, *Ceramic International*, 31: 515-19 (2005).

14. Velden, V. D. and Apeldoorn, J. H., “Analysis of The Pfefferkorn test”, *Ceramic International*, 30: 532-42 (1979).
15. Van Vlack, L. H., “Elements of Materials Science”, *Addisson-Wesley*, London, 2-6 (1964).
16. Kayalı, E. S. and Ensari, C., “Metale Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, *Ofse Atelyesi*, İTÜ, 43 (1991).
17. Temel, S., “Malzeme Bilgisi ve Muaynesi”, *Derya Kitabevi*, Trabzon, 61 (2000).
18. Suh, S. K. and Kuhn, H. A., “Anisotropy of ductile fracture in hot-rolled steel plates complementary results from bend tests”, *Metallurgical Transactions A*, 6A: 2157-9 (1975).
19. Ertük, T., “Anisotropy of bulk forming limits in hot-rolled steel bars”, *Metallurgical Transactions A*, 12A: 743-748 (1981).
20. Ertürk, T., Otto, W. L. and Khun, H. A., “Anisotropy of ductile fracture in hot-rolled steel plates an application of the upset test”, *Metallurgical Transactions A*, 15 : 1883-86 (1974).
21. Macenzie, R. C., “Differential Thermal Analysis”, *Academik Pres*, London, 517-18 (1970).
22. Carrol, C., “Clay Minerals Guide To Their X-Ray İdentification”, *Geo. Soc. of America*, Colorado, 3 (1970).
23. Baran, B., Ertürk, T., Sarıkaya, Y. and Alemdaroğlu, T., “Workability test methot for metals applied to examine a workability measure (plastic limit) for clays”, *Ceramic International*, Applied Clay Science, 20: 53-63 (2001).



## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa KILINÇ, 1971 yılında Kırıkkale’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini doğduğu ilde tamamladı. Lisans eğitimini ise 1993 yılında Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’nde tamamladı. 2003 yılında Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda , Yüksek Lisans eğitimine başladı. Evli iki çocuk babası olan Mustafa KILINÇ, halen ANKARA’da bulunan Atatürk Anadolu Teknik, Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi’nde Metal İşleri öğretmeni olarak görev yapmaktadır.