

**BİÇİMLENDİRME SINIR DOĞRULARI TEKNİĞİ İLE KİLLERİN
BİÇİMLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE DEFORMASYON HIZININ
ETKİSİ**

Bekir IŞIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2005
ANKARA**

Bekir IŞIK tarafından hazırlanan BİÇİMLENDİRME SINIR DOĞRULARI
TEKNİĞİ İLE KİLLERİN BİÇİMLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE DEFORMASYON
HIZININ 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
BİÇİMLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE DEFORMASYON
HIZININ ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Bekir IŞIK

**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-Işını kırınımı analizi, diferansiyel termal analiz, termal gravimetrik analiz, kimyasal analiz ve tane iriliği dağılımı analizleri yapılarak belirlenmiştir.

Biçimlendirilebilirlik; maksimum deformasyon miktarı ile akma gerilimlerinin çarpımı olarak tanımlanır.

Bu çalışmada maksimum deformasyon miktarı basma deneyi ile metallere başarı ile uygulanan Biçimlendirme Sınır Doğruları (BSD) (Forming Limit Line) yöntemini killere uyarlanarak belirlenmiştir. BSD'lerinin elde edilmesinde kullanılan kil numuneler basit bir silindir kalıp içerisine konulan çamur haldeki kilin piston kullanılarak elle sıkıştırılması ile elde edilmiştir. Deneylerde silindirik numunelerin boy/çap L/D oranları 0,75, 1 , 1,25 ve 1,5 olarak alınmış ve iki değişik deformasyon hızı (5 ve 40mm/min) uygulanmıştır. BSD'ları kil numunelerin yanal yüzeylerine markalanan paralel çizgilerin (L_0) basma sonucunda daralması (L_0 / L_f) ve çapın çekme yönünde genişlemesinden elde edilen (D_f / D_0) oranların doğal logaritmalarının grafiğe geçirilmesi ile elde edilmiştir. BSD'lerinin çekme eksenini kestiği nokta maksimum deformasyon miktarı (MDM) olarak belirlenmiştir. Akma gerilimi ise basma deneyi ile

universal basma çekme cihazından elde edilen gerilim gerinim grafiklerinden % 0,2 ofset yöntemiyle sabit hızda (20 mm/min) belirlenmiştir.

MDM'larının nem ile değişimi, akma gerilimlerinin nem ile değişimi ve bu iki değer in çarpımlarından elde edilen değerlerin nem ile değişimi grafikleri farklı deformasyon hızlarında belirlenip optimum nem miktarı bulunmuştur.

Killerin optimum nem miktarı halen çok kullanılan ve çok eski bir yöntem olan Pfefferkorn plastiklik suyu yöntemiyle de belirlenmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Bilim Kodu : 710

Anahtar Kelimeler : Biçimlendirme Sınır doğrusu, Biçimlendirme, Pfefferkorn plastiklik suyu, Maksimum deformasyon miktarı, Killerin plastikliği, Gerilim, Gerinim, Akma noktası

Sayfa Adedi : 106

**Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Süleyman TEKELİ
Yrd. Doç. Dr. Bülent BARAN**

**DETERMINATION OF THE EFFECT OF DEFORMATION RATE ON
CLAY BY WORKABILITY FORMING LIMIT LINE (FLL) TECHNIQUE**

(M. Sc. Thesis)

Bekir IŞIK

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENE AND TECHNOLOGY

December 2005

ABSTRACT

In this study, three different clays with various mineral content, taken from ceramic factories shaping ceramic parts by slip casting and powder pressing, were used. The characteristic properties and mineral content of clays were determined by X-ray diffraction analysis, differential thermal analysis, thermal gravimetric analysis, chemical analysis and particular size distribution analysis. In the literature, the workability is defined as

Workability = Maximum Deformation Amount x Yield Strength

In the present study, for the determination of maximum deformation amount, Forming Limit Line (FLL) method, which is successfully practiced to metals under compression, was applied to clays. The clay specimens used to obtain FLLs were produced by pressing plastic state clay manually through a cylinder by means of a piston. Length/Dimension (L/D) ratios of cylindrical specimens used were 0,75, 1,00, 1,25 and 1,5 Two different deformation rates(5 and 40mm/min) were applied FLLs were obtained by plotting natural logarithmical values of the changes received from the dimension expansion in the tensile direction (D_f/D_0) and also the distance change in the compression direction during deformation (L_0/L_f), which were produced as a result of the deformation of parallel scratches marked on the side surfaces of specimens before

deformation. The point at which FLL intersects the tensile axis was evaluated as maximum deformation amount (MDA) The yield strength was also determined under compression from the strain-stress graphs by means of 0,2% offset method using tensile-compression test machine. Optimum moisture amounts were determined at different deformation rates by drawing the graphs as a function of the change of maximum deformation, yield strength and a combination of both values with moisture. Optimum moisture amount of clays was also determined by Pfefferkon water of plasticity method which is very old and mostly used method and the results were compared.

Science Code : 710

Key Words : Forming Limit Line, Workability, Pfefferkon Water of Plasticity, Forming Index, Clay Workability, Strain, Stress, Yield point.

Page Number : 106

**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 kapılarını açan 20001 K 120590 Nolu DPT Projesi desteğiyle kurulan Gazi Üniversitesi İleri Malzeme ve Boya Araştırma Merkezine (GİMBAM) deneysel çalışmalarında her zaman moral desteği veren G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Metin GÜRÜ'ye çok teşekkür ederim. Ve hiçbir zaman moral desteğini esirgemeyen sevgili eşim İlknur IŞIK 'a teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

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. TEZİ DAYANDIĞI KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Metallerde Plastik Şekillendirme Yöntemleri.....	4
2.1.1. Plastik şekil verme yöntemleri	4
2.1.2. Birim şekil değiştirme kavramı	7
2.1.3. Plastik deformasyonun temel ilkeleri.....	9
2.1.4. Plastik deformasyonu etkileyen faktörler.....	13
2.1.5. Dövülebilme kabiliyeti.....	18
2.2. Seramik Hammaddeleri.....	25
2.2.1. Plastik özellik taşıyan seramik hammaddeleri.....	25
2.2.2. Kuvars.....	29
2.2.3.Killerin şekillendirilmesinde rol oynayan kuvvetler.....	30
2.2.4. Killerin şekillendirilmesi.....	33

Sayfa

2.2.5. Plastikliğin tayini.....	41
2.2.6. Akma sınırı gerilimi belirleme yöntemleri	42
2.2.7. Killerin plastikliğine etki eden değişkenler.....	43
2.2.8. Plastiklik belirleme yöntemleri.....	43
3. MATERYAL VE METOT.....	49
3.1. Deneylerde kullanılan killer.....	49
3.2. Hammaddelerin Deneyler İçin Hazırlanması.....	49
3.3. Hammaddelerin Karakterizasyonu	49
3.3.1. Tane iriliği dağılımı ve elek analizi.....	50
3.3.2. Killerin DTA ve TGA analizi eğrileri.....	54
3.3.3. Killerin XRD analizi eğrileri.....	58
3.3.4. Deneylerde kullanılan killerin kimyasal analizi.....	64
3.4. Biçimlendirilebilirliğin Belirlenmesinde Yapılan Deneyler.....	64
3.4.1. Biçimlendirme sınır doğruları ve maksimum deformasyon miktarının belirlenmesi.....	64
3.4.2. Akma noktaları ve akmanın nem ile değişim grafiğinin elde edilmesi.....	67
3.4.3. Optimum nemin bulunması (Biçimlendirme göstergesi).....	68
3.4.4. Pfefferkorn plastiklik suyu.....	68
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	69
4.1. Biçimlendirme Sınır Doğrularına Deformasyon Hızının Etkisi	69
4.2 Akma Noktası Gösterimi.....	86
4.3. Maksimum Deformasyon Miktarı (ϵ^*).....	88

Sayfa

4.4.Akma Noktasının % Nem İle Değişimi.....	90
4.5. Biçimlendirme Göstergesinin Nemle Değişimi.....	92
4.6. Pfefferkorn Plastiklik Suyu.....	94
4.7. Tartışma.....	96
5. SONUÇLAR.....	102
KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİŞ.....	106

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ag, Cu ve Cd metallerinde saflık derecesinin kritik kayma gerilmesine etkisi.....	16
Çizelge 2.6. Çeşitli kil minerallerinin Atterberg Ps, Ss değerleri (a), (b) değişik yörelerden alınan minerallerle yapılan sonuçları göstermektedir.....	46
Çizelge 3.1. Hammaddelerin ön teknolojik incelenmesi	50
Çizelge 3.2. BSD eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan killerin 65 mesh altı tane iriliği dağılımının istatistiksel verilerinin karşılaştırılması.....	54
Çizelge 3.3. Tuvka kilinin XRD analizi değerlendirme tablosu.....	59
Çizelge 3.4. Türkmen kilinin XRD analizi değerlendirme tablosu.....	61
Çizelge 3.5. Pembe kaolenin XRD analizi değerlendirme tablosu.....	63
Çizelge 3.6. Killerin kimyasal analizi.....	64
Çizelge 4.1. Üç kilden elde edilen maksimum deformasyon miktarları.....	98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan yöntemler.....	5
Şekil 2.2. Çekme gerilmesi, kayma gerilmesi ve hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirmenin tanımı.....	8
Şekil 2.3. Uygulanan yüklemeye göre kristaldeki kayma düzlemini ve kayma doğrultusunu gösteren geometrik şekil.....	10
Şekil 2.4. Çeşitli kristal sistemlerindeki metallerin kritik kayma gerilmesinin sıcaklıkla değişimi.....	12
Şekil 2.5. Mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı.....	15
Şekil 2.6. Deformasyon hızının çekme eğrisine etkisinin şematik olarak gösterilmesi.....	17
Şekil 2.7. Az karbonlu bir çeliğin mühendislik çekme diyagramına sıcaklığın etkisi.....	18
Şekil 2.8. Kütlesel şekil verme işlemlerinde görülen çatlak örnekleri.....	19
Şekil 2.9. Silindirik bir parçanın yığılma deneyinin şematik gösterilişi.....	21
Şekil 2.10. Şekillendirme limit diyagramlarının elde edilmesi için kullanılan yığılma , haddeleme, eğme, düzlemsel şekil değişimli eğme deneyleri.....	21
Şekil 2.11. Farklı plastik şekil değiştirme işlemlerinde, plastik şekil değiştirme yolu.....	22
Şekil 2.12. Soğuk çekilmiş 1045 karbon çeliğine ait oda sıcaklığındaki şekillendirme limit diyagramı.....	22
Şekil 2.13. 1020 karbon çeliği ile 302 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığındaki Şekillendirme Limit Diyagramı.....	23
Şekil 2.14. Şekillendirme Limit Diyagramı yardımıyla durum değerlendirmesine ait örnek.....	24
Şekil 2.15. $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraederi.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 2.16. Şematik kaolinit strukturu.....	26
Şekil 2.17. Nakrit ve kaolinitin (a ve b) altıgen yaprakçıkları ve halloysitin (c) çubuk yapılı tanecikleri	26
Şekil 2.18. Montmorillonitin üç tabakalı struktur yapısı.....	27
Şekil 2.19. Kaolin mineralinin altıgen prizma şeklindeki görüntüsü ve yüzey yükleri.....	31
Şekil 2.20. Kaolin minerallerinin yüzey kenar etkileşmesi sonucu olan yapı.....	31
Şekil 2. 21. Killere yüzdürücü kimyasalların etkisi.....	32
Şekil 2.22. Kaolin süspansiyonunun viskozitesinin, pH'ının ve iletkenliğinin elektrolit miktarı ile değişimi.....	33
Şekil 2. 23. Nem miktarının değişimine göre seramik sanayinde şekillendirmede kullanılan çamur kıvamları.....	39
Şekil 2. 24. Killere uygulanan gerilim gerinim grafiklerinin nem miktarı ile değişimi.....	40
Şekil 2.25. Akma gerilimi (AG), kırılmaksızın deformasyon miktarı(d), % nem miktarı ilişkisi (n)	41
Şekil 2.26. Basma deneyi.....	42
Şekil 2.27. Bir silindirin eksenî yönünde basılması ile elde edilen gerilim gerinim eğrisi	42
Şekil 2.28. Pfefferkorn yöntemi ile plastiklik ölçümü.....	44
Şekil 2.29. Yüzey alanı ile plastiklik sayısının değişimi.....	46
Şekil 2.30. Linseis Plastiklik deneyi	48
Şekil 3.1. Tuvka kilinin 65 µm altının tane iriliği dağılımı.....	51
Şekil 3.2. Türkmen kilinin 65 µm altının tane iriliği dağılımı.....	52
Şekil 3.3. Pembe kaolen 65 µm altının tane iriliği dağılımı.....	53
Şekil 3.4 Tuvka kilinin DTA ve TGA eğrisi.....	55
Şekil 3.5. Türkmen kilinin DTA ve TGA eğrisi.....	56

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. Pembe kaolen kilinin DTA ve TGA eğrisi.....	57
Şekil 3.7. Tuvka kilinin XRD analizi grafiği.....	58
Şekil 3.8. Türkmen kilinin XRD analizi eğrisi.....	60
Şekil 3.9. Pembe kaolenin XRD analizi eğrisi.....	62
Şekil 4.1. Tuvka kilinin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (a-b).....	70
Şekil 4.1. Tuvka kilinin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (c-d).....	71
Şekil 4.1. Tuvka kilinin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (e-f).....	72
Şekil 4.2. Tuvka kilinin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (a-b).....	73
Şekil 4.2. Tuvka kilinin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (c-d).....	74
Şekil 4.2. Tuvka kilinin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (e-f).....	75
Şekil 4.3. Türkmen kilinin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (a-b).....	76
Şekil 4.3. Türkmen kilinin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (c-d).....	77
Şekil 4.3. Türkmen kilinin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (e).....	78
Şekil 4.4. Türkmen kilinin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (a-b).....	79
Şekil 4.4. Türkmen kilinin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (c-d).....	80
Şekil 4.4. Türkmen kilinin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (e).....	81
Şekil 4.5. Pembe kaolenin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (a-b).....	82

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Pembe kaolenin 5 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişimi (c-d).....	83
Şekil 4.6. Pembe kaolenin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişim (a-b).....	84
Şekil 4.6. Pembe kaolenin 40 mm/dak deformasyon hızındaki biçimlendirme sınır doğruları % nem miktarı ile değişim (c-d).....	85
Şekil 4.7. Tuvka kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi.....	86
Şekil 4.8. Türkmen kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi.....	87
Şekil 4.9. Pembe Kaolenin akma noktasının % nem oranına göre değişimi.....	87
Şekil 4.10. Tuvka kili için farklı hızlardaki maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi.....	88
Şekil 4.11. Türkmen kilinin için farklı hızlardaki maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi.....	89
Şekil 4.12. Pembe Kaolen için farklı hızlardaki maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi.....	89
Şekil 4.13. Tuvka kili için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi.....	90
Şekil 4.14. Türkmen kili akma gerilimlerinin % nem ile değişimi.....	91
Şekil 4.15. Pembe Kaolen için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi.....	91
Şekil 4.16. Farklı deformasyon hızlarında Tuvka kilinin biçimlendirme göstergesinin %nem ile değişimi	92
Şekil 4.17. Farklı deformasyon hızlarında Türkmen kilinin biçimlendirme göstergesinin %nem ile değişimi.....	93
Şekil 4.18. Farklı deformasyon hızlarında Pembe kaolen kilinin biçimlendirme göstergesinin %nem ile değişimi.....	93
Şekil 4.19. Tuvka kili Pfefferkorn plastiklik suyu.....	94
Şekil 4.20. Türkmen kili Pfefferkorn plastiklik suyu.....	95
Şekil 4.21. Pembe Kaolen Pfefferkorn plastiklik suyu.....	95

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan silindir ve piston.....	65
Resim 3.2. BSD testlerinde kullanılan numune.....	65
Resim 3.3. Markalama işlerinde kullanılan marka.....	65
Resim 3.4. Deformasyonun yapılması.....	66
Resim 3.5. Basma deneylerinde kullanılan test cihazı.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
P	Kuvvet
Σ	Çekme gerilmesi
M	Sürtünme katsayısı
c	Geometrik faktör
T	Deformasyon sıcaklığı
ϵ	Deformasyon miktarı
$\dot{\epsilon}$	Deformasyon hızı
ϵ^*	Bıçimlendirme göstergesi
S	Malzemenin metalurjik yapısı
E	Birim şekil değiştirme
ΔL	Şekil değiştirme miktarı
L_0	İlk boy
L_i	Şekil değiştirme sonundaki boydur.
V	Hacim
γ	Kayma birim şekil değişimi
τ	Kayma gerilmesi
G	Kayma modülü
$\tau_{\max}$	Maksimum kayma gerilmesi
E	Elastisite modülü
d	Atomlar arası mesafe
r	Çap
η	Viskozite
dv/dr	Kayma Hızı
h	Yükseklik

Simgeler**d****W****I****Açıklama**

Çap

Koninin ağırlığı + üstüne konulan ağırlık

Batma yüksekliği

Kısaltmalar**HMK****YMK****BG****MDM****BSD****AG****DTA****TGA****XRD****M yaş****M kuru****Açıklama**

Hacim merkezli kübik

Yüzey merkezli kübik

Biçimlendirme göstergesi

Maksimum deformasyon miktarı

Biçimlendirme sınır doğrusu

Akma gerilimi

Diferansiyel termal analiz

Termal gravimetri analizi

X Işınları Kırınımı analizi

Numunenin yaş ağırlığı

Numunenin kuru ağırlığı

1. GİRİŞ

Klasik seramik üretimi farklı mineral içerikleri ve özelliklerine 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 şekillendirilirler. Şekillendirilen çamur kurutulup ve ilk pişirimi yapıldıktan sonra 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. Genellikle metaller bir veya daha fazla deformasyon işlemleri ile şekillendirilir. Malzemelerin şekillendirilmesinde temel iki farklı 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 sünekliğinin 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 veya büzülme 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 (2,3,4). 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 özelliğine sahip üç farklı kil 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 yöntemi (BSD) uygulanmıştır. BSD yöntemi için numunelerin hazırlanmasında, tanecik yönlenmesini azaltmak için ekstrüder yerine basit bir silindir boru ve bir pistondan oluşan kalıp düzeneği kullanılmıştır. BSD yöntemi için numuneler, farklı nem içeriklerinde ve farklı boy/çap (L/D) oranlarında (0,75, 1, 1,25 ve 1,5) hazırlanan silindirik numunelerin ekvator bölgeleri çizilen üç adet 2,1 mm ölçüsündeki paralel çizgilerle markalanarak

numuneler üzerine çizilen çizgiler arasındaki uzaklık 1/50 verniyeli olan bir mikroskopla ölçülmüştür. Numuneler iki farklı basma hızı (5mm/dak-40mm/dak) ile universal basma çekme cihazında ilk çatlak oluşuncaya kadar deforme edilmiştir. Deformasyondan sonra basma gerinimleri çizilen çizgiler arasındaki uzaklık ve çekme gerinimleri ise çaptaki genişleme ölçülerek belirlenmiştir. Elde edilen değerlerin oranlarının doğal logaritması alınarak BSD doğruları elde edilmiştir (5).

BSD doğrularının Y eksenini kestiği nokta maksimum deformasyon (MDM) olarak tanımlanmıştır. Killerin akma gerinimleri 20mm/min basma hızında universal basma çekme cihazı kullanılarak ve % 0,2 offset yöntemiyle elde edilmiştir. BSD değerlerinden elde edilen MDM'nın nem ile değişimi, akma noktalarının nem ile değişimi ayrı ayrı çizilmiştir. Farklı hızlardaki MDM'larının akma noktaları ile çarpımı grafiği çizilip her kil için optimum nem değeri belirlenmiştir.

Bu çalışmanın ana amacı farklı deformasyon hızları ve boy/çap oranlarının 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 AŞTIRMASI

2.1. Metallerde Plastik Şekillendirme Yöntemleri

2.1.1. Plastik şekil verme yöntemleri

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

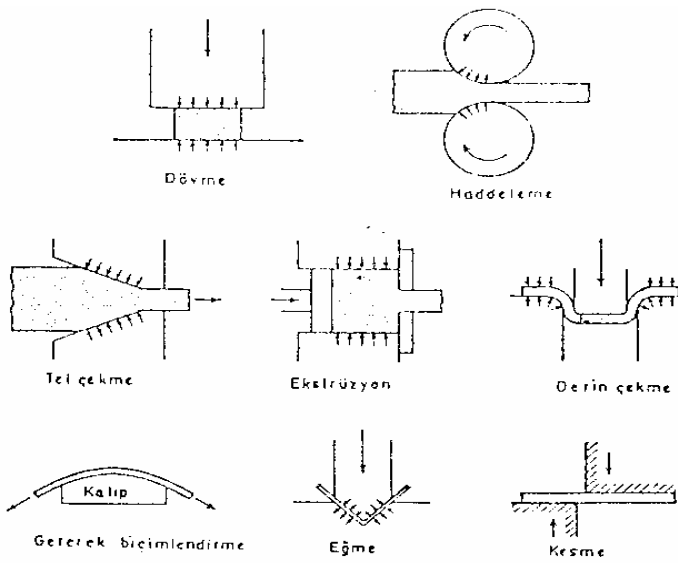
- a) Döküm
- b) Plastik şekil verme
- c) Talaşlı imalat
- d) Kaynak
- e) Toz metalurjisi

Şekillendirme yöntemlerinin seçiminde şekillenecek malzemenin son şekli, boyutları, boyut toleransları ve yapılması istenen parçanın sayısı önemli faktörlerdir.

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

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 metalik malzemenin kopması sağlanır. Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan bu yöntemler Şekil 2,1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. 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 yapıyorsa 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. Proseste uygulanan kuvvet malzemenin deformasyonunu sağlamalı fakat malzemenin çatlama veya kırılmasına sebep olmamalıdır.

Mekanik işlemlerde;

Uygulanan kuvvet (P)

Malzemenin deformasyon şartlarındaki mukavemeti (σ)

Malzeme ile takım arasındaki sürtünme katsayısı (μ)

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

Bu üç faktörü (σ , μ , C) etkileyen faktörler, dolaylı olarak uygulanan mekanik işleminde etkilerler. Bunlardan şekillendirilecek malzemenin deformasyon şartlarındaki mukavemetine(σ) etki eden faktörler; deformasyon sıcaklığı(T), deformasyon miktarı(ϵ), 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 (μ) sürtünme katsayısına etki eden başlıca faktörlerdir.

Şekillendirilecek malzemenin şekli ile ilgili geometrik faktörü (c) etkileyen faktörler ise; şekillenecek metalin mekanik işlem öncesi şekli, kalıbın şekli, metalin bu şekli alması için gereken akma durumudur. Örneğin bir metalde belirli bir miktarda bir kesit küçülmesi ekstrüzyonla veya haddeleme ile yapıldığında farklı kuvvetlerin uygulaması gerekmektedir. Bunun sebebi, geometrik faktörün bu işlemlerde farklı atıl kuvvetler oluşturmasıdır. Bu işlemlerde ekstrüzyon kalıbının şekli, haddelemede kullanılan merdanelerin çapı, farklı derecede şekillendirmeyi etkileyen geometrik faktörler olacaktır.

Mekanik işlemlerde kullanılan kuvvete (P) 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 (6).

2.1.2. Birim şekil değiştirme kavramı

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

$$e = \Delta L / L_0 = (L_i - L_0) / L_0 \quad [2.1]$$

e: Birim şekil değiştirme

ΔL : Şekil değiştirme miktarı

L_0 : İlk boy

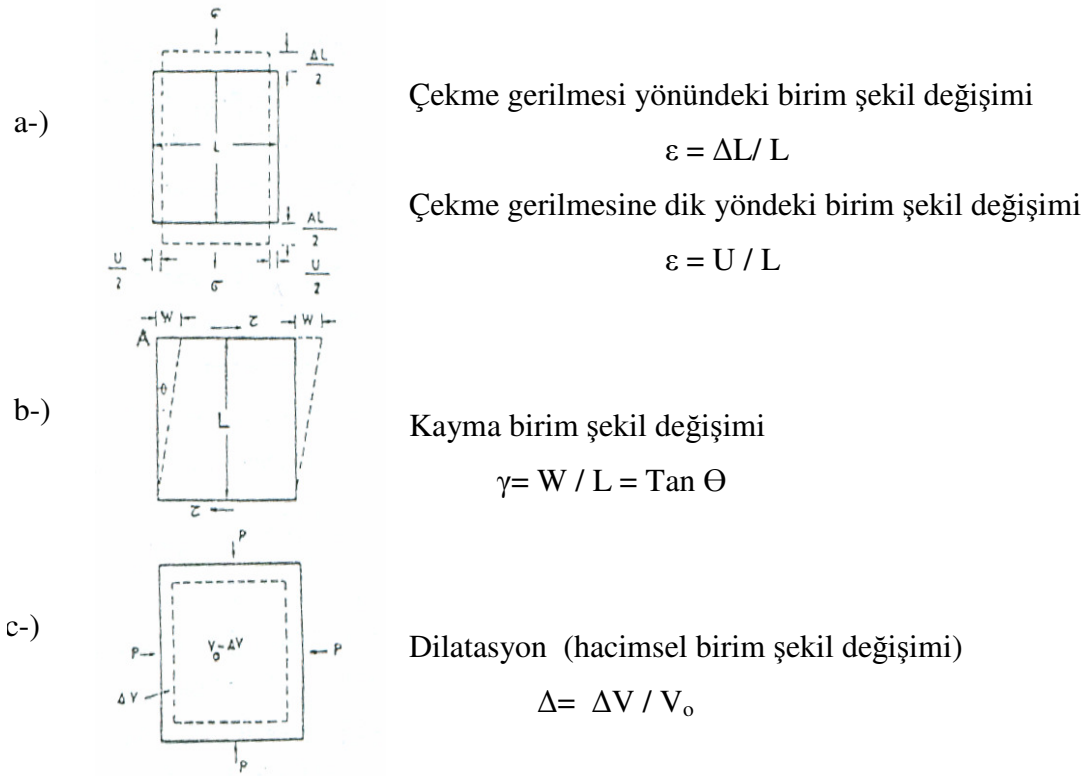
L_i : Şekil değiştirme sonundaki boydur.

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 2.2'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;

$$E = \epsilon = \int_{L_0}^{L_i} dL / L = \ln (L_i / L_0) \quad [2.2]$$

Bağıntısı ile gerçek birim şekil değiştirme (ϵ) 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 değişimi denir. Bir küpün bir yüzeyinde sadece kayma ile gerçekleşen şekil değişimi Şekil 2.2'b de görülmektedir.



Şekil 2.2. a- Çekme gerilmesi b- kayma gerilmesi ve c-hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirmenin tanımı

Uygulanan kayma gerilmesi sonucu A noktasındaki 90° lik açı, Θ kadar küçülmüştür. Kayma birim şekil değiştirmesi γ , 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 raydan cinsiden değerine eşittir. Dolayısı ile kayma birim şekil değiştirmesi genellikle dönme açısı olarak ifade edilir.

$$\gamma = W/L = \tan \Theta$$

[2.3]

Kenar uzunluğu L olan bir küpün altı yüzüne de P basıncı etkiğinde (hidrostatik basınç durumu) küpün hacminde (V_0) ΔV kadar bir küçülme olur. (Şekil2.2.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.

2.1.3. Plastik deformasyonun temel ilkeleri

Deformasyon mekanizmaları

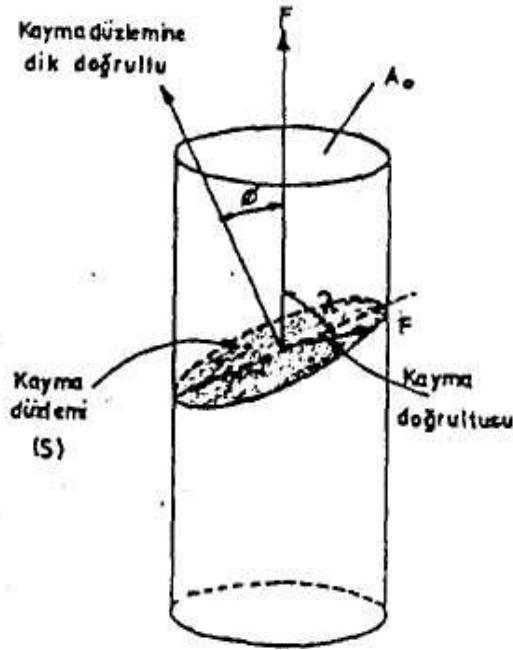
Metalik malzemelerin plastik deformasyonu en genel olarak belirli düzlemlerde ve doğrultularda atomların kayması ile gerçekleşir. Kaymanın kolaylıkla olamadığı durumlarda ise deformasyona ikizlenme katkıda bulunabilir. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında çok kristalli metalik malzemelerin deformasyonu ise, tane sınırlarının kayması veya atomların yayınma ile yer değiştirmesi yani yayınma sürünmesi mekanizmaları ile olur. Sonuç olarak, metalik malzemelerin deformasyon mekanizmaları,

- a) Kayma
- b) İkizlenme
- c) Tane sınırlarının kayması
- d) Yayınma sürünmesidir.

Metalik malzemelerin elastik veya plastik deformasyona karşı direnci atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden ileri gelmektedir. Plastik deformasyonu gerçekleştiren işlemler, metalik malzemelerin yapısındaki nokta, çizgi ve yüzey hataları gibi yapı hataları ile de ilgilidir (7).

Kritik kayma gerilmesi

Bir atom düzlemi üzerinde kayma için gereken kayma gerilmesine kritik kayma gerilmesi denir. Kayma, kayma düzlemine etki eden kayma gerilmesi etkisi ile olmaktadır. Deformasyon için kristale uygulanan kuvvetin meydana getirdiği gerilmelerin kayma düzlemine dik doğrultudaki bileşkeni kaymayı etkilemez. Kayma ancak kayma düzlemi üzerindeki kayma gerilmesinin kayma doğrultusundaki bileşkeni ile gerçekleşir.



Şekil 2.3. Uygulanan yüklemeye göre kristaldeki kayma düzlemini ve kayma doğrultusunu gösteren geometrik şekil

Kayma düzleminde, kayma doğrultusu boyunca kayma gerilmesi τ_r ;

$$\tau_r = F_1 / S \quad [2.4]$$

bağıntısı ile bulunabilir.

Burada; $F_1 = F$ kuvvetinin kayma doğrultusunda etki eden bileşeni

$S =$ Kayma düzlemi alanıdır.

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, $F_1 = F \cdot \cos\lambda$ değerindedir. $S = A_0 / \cos\theta$ 'dır.

Dolayısıyla kritik kayma gerilmesi τ_r ;

$$\tau_r = F_1 / S = F / A_0 \cdot \cos\lambda \cdot \cos\theta \quad [2.5]$$

Kristale tatbik edilen çekme gerilmesi, $\sigma_\epsilon = F / A_0$ olduğundan,

$$\tau_r = \sigma_\epsilon \cos\lambda \cos\theta \quad [2.6]$$

Yazılabilir.

Yukarıda bağıntıdan görüldüğü gibi kayma için gerekli gerilme λ ve θ 45° ye eşit olduğu zaman minimum seviyededir. Bu durumda kritik kayma gerilmesi malzemeye uygulanan çekme gerilmesinin yarısı değerindedir. Bütün diğer yönler için kritik kayma gerilmesi değeri daha küçüktür ve λ veya θ 90° 'ye yaklaştıkça sıfır değerine yaklaşır. Saf ve yapı hatası olmayan tek kristallerde, kritik kayma gerilmesi sabit çekme hızında ve sabit sıcaklıkta her malzeme sabit bir değere sahiptir. Bu kaide Schmid Kanunu olarak bilinir ve birçok malzemenin tek kristali için deneysel olarak da ispatlanmıştır.

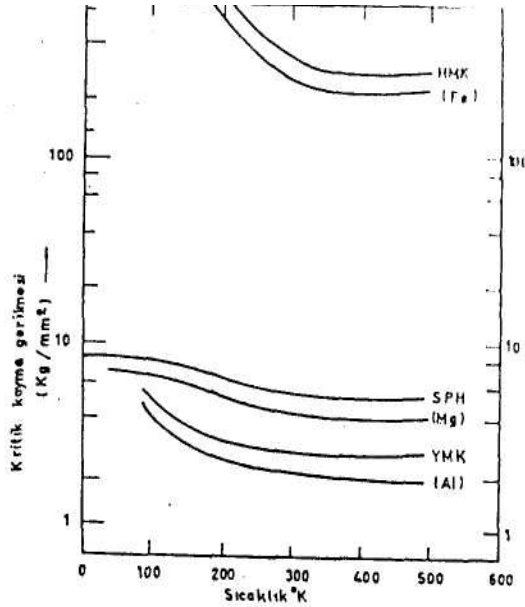
Kritik kayma gerilmesine etki eden faktörler

a) Kimyasal bileşim: Saf metallerde kalıntı elementlerinin miktarının yani metalin saflık derecesinin, alaşımlarda da alaşım elementlerinin miktarının kritik kayma gerilmesine etkisi çok fazladır. Saflığı azaltan kalıntı elementler, kristalin yapısının sertleşmesine sebep olurlar. Metallerin saflığı azaldıkça kritik kayma gerilmesi değerleri artar.

b) Dislokasyon yoğunluğu: Sabit bir dislokasyon yoğunluğuna sahip bir kristalde, dislokasyonların birbirleri ile kalıntı element atomları, arayer atomları ve atom boşlukları gibi kristal hataları ile karşılıklı ilişkisi söz konusu kristalin kritik kayma gerilmesini belirler.

Bu malzemenin kritik kayma gerilmesinin değeri, kristalde tek bir dislokasyonun kayması için gerekli olan gerilmeden fazla, fakat yapı hatası olmayan bir kristalde kayma için gerekli olan gerilmeden daha azdır. Bu sebeple, kristalde yapı hataları yoğunluğu azaldıkça kritik kayma gerilmesi azalır. Fakat kristal hataları yoğunluğu sıfır olduğunda, yani yapı hatası olmaması halinde ise kritik kayma gerilmesinin değeri aniden artar, özel yöntemlerle mikron çapında yapılan kılcal tek kristaller (whiskers) dislokasyonsuz ve diğer kristal hataları olmayan bir yapıya sahip olup, mukavemeti, yapı hatası olmayan bir malzemenin teorik mukavemetine çok yakındır.

c-)Sıcaklık: Sıcaklığın kritik kayma gerilmesine etkisi çeşitli kristal sistemlerindeki metaller için şekil 2.4’ de görülmektedir.



Şekil 2.4. Çeşitli kristal sistemlerindeki metallerin kritik kayma gerilmesinin sıcaklıkla değişimi

Sıcaklığın kritik kayma gerilmesine etkisi, düşük sıcaklıklarda çok daha fazladır. Hacim merkezli kübik sistemdeki metallerin (Fe,W) bütün sıcaklıklardaki kritik kayma gerilmesi, yüzey merkezli kübik sistemdeki (Al) ve sıkı paket hekzagonal sistemdeki metallerin (Mg) kritik kayma gerilmesinden çok daha yüksek değerlerdedir.

d) Deformasyon hızı: Deformasyon hızı da, kritik kayma gerilmesini etkilemektedir. Deformasyon hızı arttıkça kritik kayma gerilmesi de (τ_r) artar. Örneğin, oda sıcaklığında Cd tek kristali ile yapılan denelerde deformasyon hızı, $\epsilon = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ iken $\tau_r = 20 \text{ g/min}^2$ olarak bulunmuştur. Deformasyon hızı, $\epsilon = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ değerine artırıldığında, kritik kayma gerilmesi, $\tau_r = 45 \text{ g/min}^2$ değerine çıkmıştır.

2.1.4. Plastik deformasyonu etkileyen faktörler

Malzemenin yapısı ve mekanik özellikleri ile deformasyon şartları (sıcaklık, deformasyon hızı ve sürtünme durumu) malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetlerini 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 termo-mekanik geçmişine bağlıdır. Çeşitli mekanik ve ısı işlemleri 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 arayüz enerjisi ve arayüzün 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 tekstür de mekanik özelliklerin anizotropisine sebep olduğundan malzemenin plastik deformasyon özelliklerini etkiler.

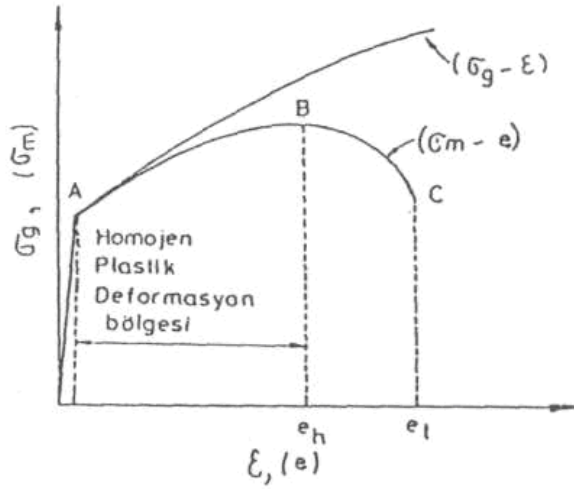
Malzeme yapısında bulunan metalik olmayan oksit, sülfür veya nitrür gibi kalıntılar (inklüzyonlar) genellikle plastik deformasyon kabiliyetini azaltır. Kalıntılar da ikinci faz tanelerinin etkilerine benzer şekilde deformasyonu etkilerler. Kalıntıların mukavemeti ve sünekliği yüksek ise ve de matris taneleri içinde küresel veya lifsel şekilde dağılmışlar ise genellikle zararsızdırlar.

Mekanik özellikler

Metalik malzemelerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşimine ve metalurjik yapılarına 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 vs.) tespit edilebilir.

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 2.5).



Şekil 2.5. 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;

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = d[(L-L_0)/L_0]/dt = 1/L_0 \times dL/dt = V/L_0 \quad [2.7]$$

bağıntısı ile bulunabilir.

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;

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

Şeklinde ifade edilir.

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

Gerçek deformasyon hızının, numune boyu ve çene hızı ile ilişkisini veren bağıntıya göre, çene hızı sabit iken, numune uzadıkça gerçek deformasyon hızının azalacağı, numune boyu kısaldıkça 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;

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{L} = \frac{L_0}{L} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{\dot{e}}{1+e} \quad [2.8]$$

Çeşitli mekanik deneylerde kullanılan deformasyon hızları çizelge 2,1’de verilmiştir.

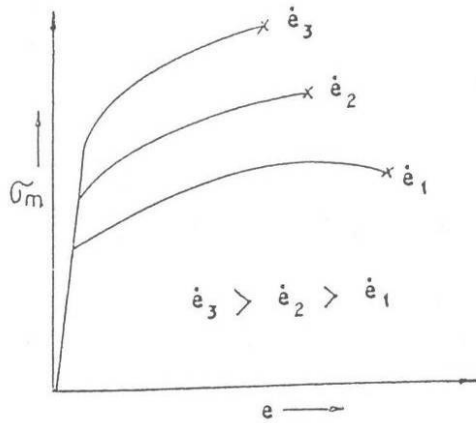
Çizelge. 2.1. Çeşitli deneylerde kullanılan deformasyon hızları

Deney Adı	Deformasyon Hızı (s^{-1})
Sürünme deneyi	$10^{-8} - 10^{-5}$
Hidrolik veya vidalı makinelerle statik çekme deneyi	$10^{-5} - 10^{-1}$
Dinamik çekme veya basma deneyi	$10^{-1} - 10^{-2}$
Darbe deneyi ve benzeri yüksek hız deneyimleri	$10^2 - 10^4$
Patlayıcılarla veya gazla sağlam aşırı hız darbesi	$10^4 - 10^8$

Deformasyon Hızının Mukavemete Etkisi

Deformasyon hızının mekanik özelliklere önemli ölçüde etkisi vardır. Deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar.

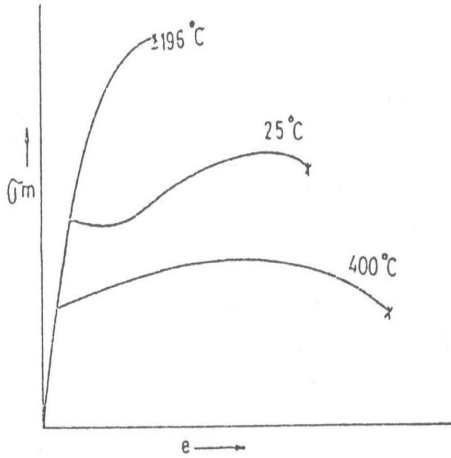
Farklı deformasyon hızları ($\dot{\epsilon}_3 > \dot{\epsilon}_2 > \dot{\epsilon}_1$) uygulanması halinde çekme eğrilerinin yukarıya doğru kaydımı, buna karşılık toplam birim şekil değiştirme miktarlarının azaldığı Şekil 2.6'da görülmektedir. Deformasyon hızının akma gerilmesine ve küçük birim şekil değiştirme miktarlarındaki plastik gerilmeye etkisi çekme mukavemetine etkisinden daha fazladır.



Şekil 2.6. Deformasyon hızının çekme eğrisine etkisinin şematik olarak gösterilmesi

Sıcaklık

Malzemelerin mekanik deneyler ile elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemetine, sürekliliğine ve kırılma özelliklerine deformasyon sıcaklığının etkisi fazladır. Deformasyon sıcaklığı artarken genellikle mukavemet azalır ve sürenlik artar. Sıcaklığa bağlı olarak oluşan çökelme, deformasyon yaşlanması veya yeniden kristalleşme gibi yapısal değişimler sıcaklık ile mekanik özellikler arasındaki bu genel ilişkiyi etkileyebilir. Az karbonlu bir çelikte sıcaklığa bağlı olarak çekme diyagramının değişimi Şekil 2,7'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Az karbonlu bir çeliğin mühendislik çekme diyagramına sıcaklığın etkisi

Sürtünme ve yağlama

Plastik deformasyon, deformasyonu gerçekleştirecek cihazda, kalıp veya bir alet ile iş parçasının teması sonucu gerçekleşmektedir. Temasta olan ve birbirlerine göre bağıl 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.

2.1.5. Dövülebilme kabiliyeti

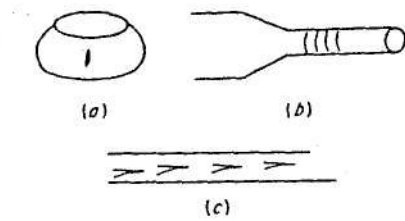
Kütlesel şekil değiştirme kabiliyeti

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. Biçimlendirilebilir saçların şekil değiştirme yeteneğini belirtmek için, kütlesel şekil değiştirme kabiliyeti 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 mikroböşluk 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 işlemini de en çok görülen çatlak tipidir. Bu tip çatlaklara örnek olarak silindirik malzemelerin sürtünmeli koşulda dövülmesi (Şekil 2.8.a) veya kalın yassı malzemelerin haddelenmesi sırasında, genişleyen yan yüzeylerde oluşan çatlaklar verilebilir.



Şekil 2.8. Kütlesel şekil verme işlemlerinde görülen çatlak örnekleri.

- a) Yığılma işlemi serbest yüzey çatlakları
- b) Ekstrüzyon işlemi aşırı sürtünmenin yol açtığı yüzey çatlakları
- c) Tel çekme veya ekstrüzyon işlemlerinde homojen olmayan şekil değiştirmenin yol açtığı iç çatlaklar

b) Kalıp temas yüzeyi çatlakları: Bu tür hatalara örnek olarak sürtünme kuvvetlerinin aşırı olduğu ekstrüzyon işlemleri verilebilir. Gerek çubuk ekstrüzyonunda, gerek geriye püskürtme işlemi ile kap veya tüp üretiminde, kalıp temas yüzeyinde sürtünmeler fazla ise ürünün yüzeyinde birbirine paralel olan çevresel çatlaklar oluşur (Şekil 2.8.b). Benzer çatlaklara köşeleri keskin veya çok küçük yarıçapa sahip kalıplarla dövme işleminde de rastlanır(8).

c) İç çatlaklar: Bu tür çatlaklara örnek olarak ekstrüzyon veya tel çekme işlemlerinde ürünün ortasında rastlanılan "ok ucu" şekline benzer çatlaklar verilebilir (Şekil 2.8.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.

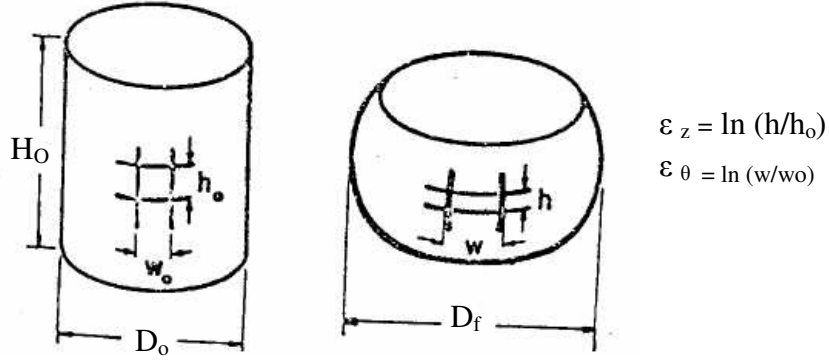
Plastik şekil verme uygulamalarında şekil değiştirme kabiliyeti sadece malzemenin sünekliliğine bağlı değildir. Bölgesel gerilme, şekil değiştirme hızı, sıcaklık ve malzemeye ait özellikler şekil değiştirme kabiliyetini birlikte etkileyen faktörlerdir. Plastik şekil değiştiren malzemede gerilme ve birim 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.

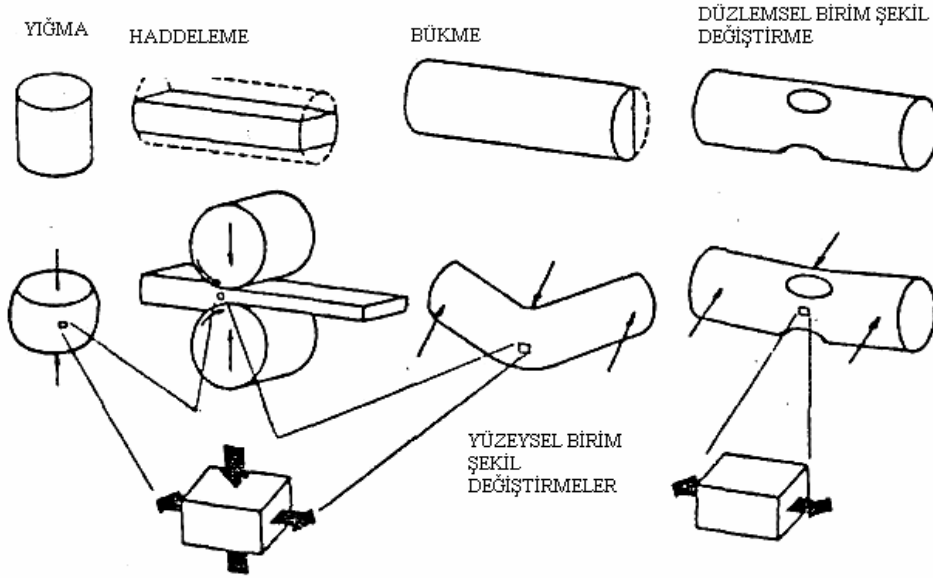
Şekil 9'da görüldüğü gibi yığılma esnasında, silindirin boyu kısılırken, serbest olan yan yüzeyi genişleyerek fıçı şeklini alır. Belirli bir şekil değiştirme oranında yüzeyde çatlama görülür. Şekil 2.10'da yüzeyde sünek kırılmanın oluşturulabileceği haddeleme, eğme gibi diğer deney türlerini şematik 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 2.11'den görüleceği gibi çekme-basma bölgesindedir. Ancak şeklin daha rahat incelenebilmesi için yatay eksen ters tarafa doğru yönlendirilmiştir.

Şekil 2.11 incelendiğinde, sürtünmesiz yığılma işleminde, birim şekil değiştirmenin (ϵ_z) çevresel birim şekil değiştirmenin (ϵ_θ) 2 katı olduğu görülür ve fıçılama olayı görülmez. Yığılmanın sürtünmeli koşulda yapılması durumunda, sürtünmesiz haldeki 1/2 eğimli doğrunun, yukarıya doğru yönelen eğri haline dönüştüğü görülür.

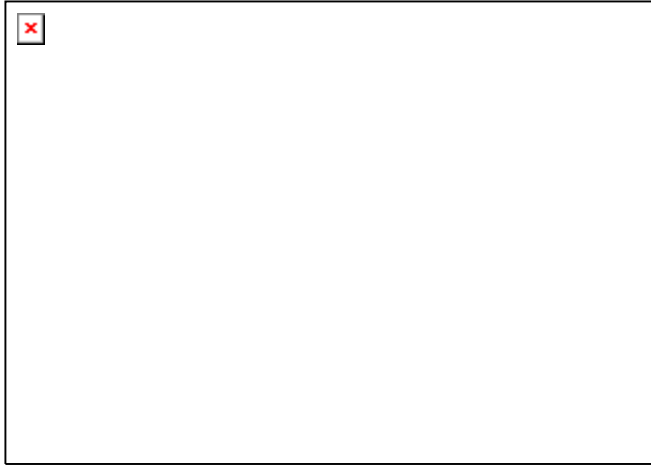
Yükseklik/çap (h/d) oranının küçülmesi ve beraberinde sürtünmenin artması fıçılama olayını, çevresel çekme gerilmesini ve $\varepsilon_z/\varepsilon_\theta$ oranını artırır.



Şekil 2.9. Silindirik bir parçanın yığılma deneyinin şematik gösterilişi

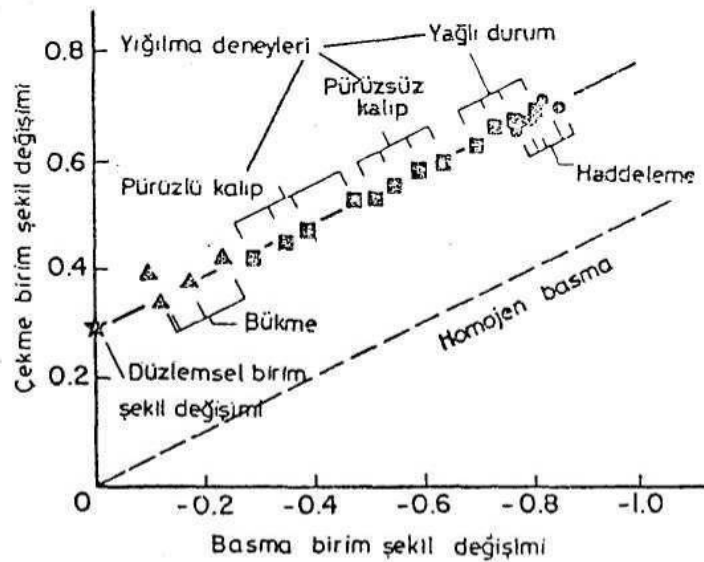


Şekil 2.10. Şekillendirme limit diyagramlarının elde edilmesi için kullanılan yığılma, haddeleme, eğme, düzlemsel şekil değişimli eğme deneyleri



Şekil 2.11. Farklı plastik şekil değiştirme işlemlerinde, plastik şekil değiştirme yolu

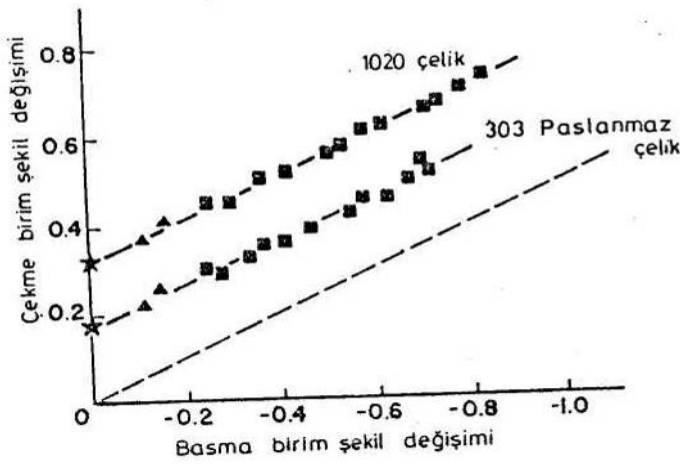
Aynı malzeme için farklı deney tür ve koşulları kullanılarak, değişik plastik şekil değiştirme yolu izlenir ve yüzeyde sünek kırılma elde edilinceye kadar işlem sürdürülür. Sünek kırılma durumuna ait noktalar birleştirildiğinde Şekil 2.12 ve 2.13'deki gibi farklı malzemelere ait Şekillendirme Limit diyagramları elde edilir. Elde edilen doğruların eğimi tümünde 1/2 değerinde olup sabittir. Ancak doğrunun ordinatı kestiği nokta, malzemedan malzemeye değişir.



Şekil 2.12. Soğuk çekilmiş 1045 karbon çeliğine ait oda sıcaklığındaki Şekillendirme Limit Diyagramı (9).

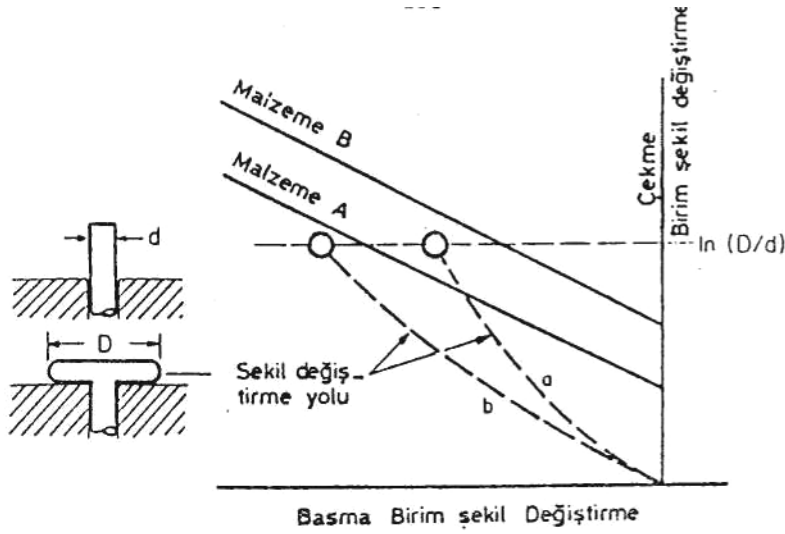
Şekillendirme Limit diyagramları, karmaşık kütleli şekil verme işlemlerinin incelenmesinde kullanılan oldukça yararlı bir araçtır. Plastik şekil verme işleminde bölgesel gerilmeleri doğrudan ölçmek mümkün değildir. Ancak iş parçasının farklı bölgelerindeki birim şekil değiştirmeleri, yüzeye çizilen ağlarla (kare veya daireler) gözle izlemek ve ölçmek mümkündür (10).

Uygun bağıntılar yardımı ile birim şekil değiştirme değerlerinden, o bölgede oluşan gerilmeleri de hesaplamak mümkündür.



Şekil 2.13. 1020 karbon çeliği ile 302 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığındaki Şekillendirme Limit Diyagramı (11).

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 2.14'de konuyla ilgili örnek verilmektedir.



Şekil 2.14. Şekillendirme Limit Diyagramı yardımıyla durum değerlendirmesine ait örnek (12).

Şekilden izleneceği gibi d çapında bir çubuktan, başlık çapı D olan bir cıvata taslağı dövülecektir. Çevresel çekme biçim şekil değiştirme (ϵ_θ) 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 (ϵ_z) çevresel çekme birim şekil değiştirmeye (ϵ_θ) oranla daha büyük olması sağlanır.

2.2. Seramik Hammaddeleri

2.2.1. Plastik özellik taşıyan seramik hammaddeleri

Mineroloji bilimi özlü seramik hammaddelerini üç büyük grup altında inceler:

- 1- Kaolin grubu
- 2- Montmorillonit grubu
- 3- İllit ve glimmer (alkali içeren grup) grubu

Kaolin Grubu

- a) Nakrit, dickit, kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- b) Anoksit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- c) Halloysit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- d) Allofan ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$)

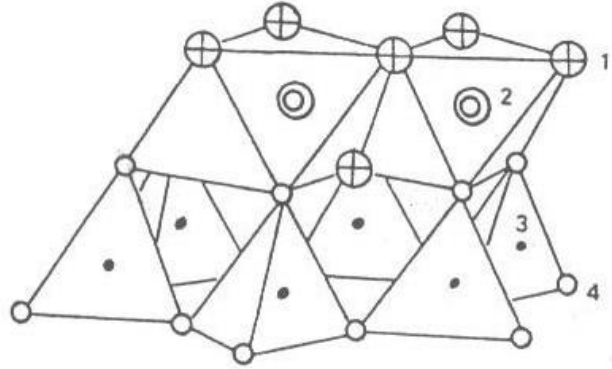
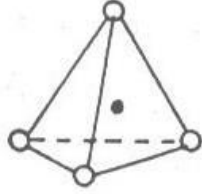
Kaolinit genellikle çoğu plastik seramik hammaddelerinin esas mineralidir. Su içeren bir alüminyum silikit olan kaolinit minerolojik olarak $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ gurubunda oluşur. Si_2O_5 grubu tipik olup, yaprak veya kat dokulu silikatların belirtisidir.

Tüm silikatların esas yapıtaşı, ortada silisyum iyonun bulunduğu dört oksijen iyonlu bir tetraeder (=dört yüzlü) yapıdır. Merkezdeki Si iyonu (+ 4 değ.) -2 değerli dört komşu oksijen iyonlarının birer negatif valansları ile birleşir. O iyonlarının arasına sığabilen Si iyonu, bozulmaz bir özellik gösteren $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraederini oluşturur (Şekil 2.15).

Kat dokulu silikatlarda bu $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraederi sekizgen (=oktaeder) dokulu ağda birleşir. Kaolinitin mineral yapısı Şekil 2.16'da görüldüğü gibi iki tabakalı olup, bu tabakalar tetraeder ve oktaeder tabakalarıdır.

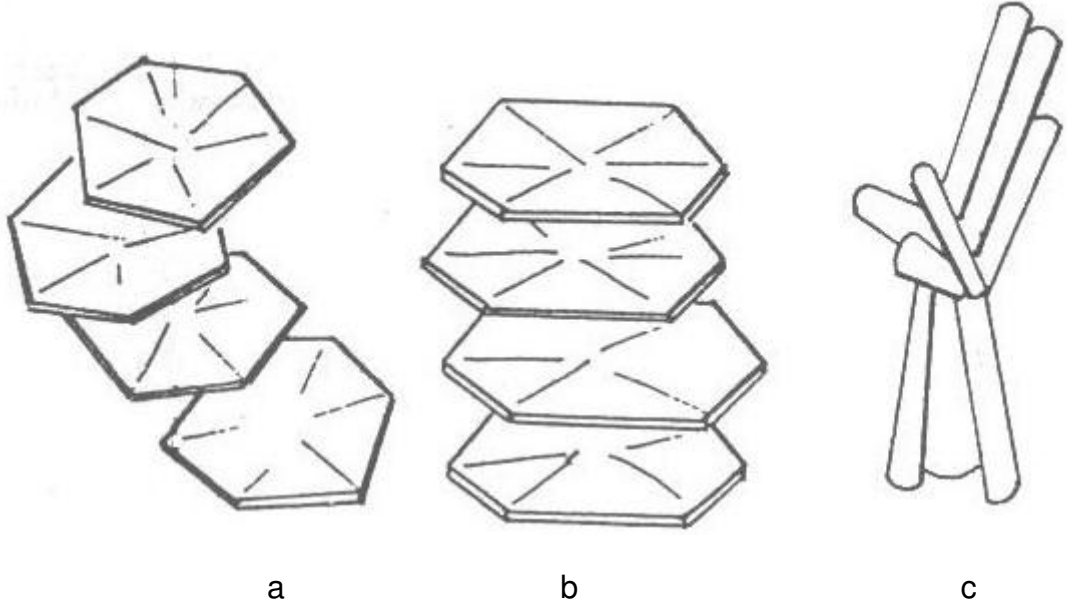


Şekil 2.15. $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraederi



Şekil 2.16. Şematik kaolinit strukturu
(1.OH, 2.AL, 3.Si, 4.O iyonları)

Kaolinit yaprakçıkları tam elâstik (=esnek) olmamakla birlikte, bükülebilir özellikler gösterir. Mohs'a göre sertlikleri 2-3 dolayındadır (13).

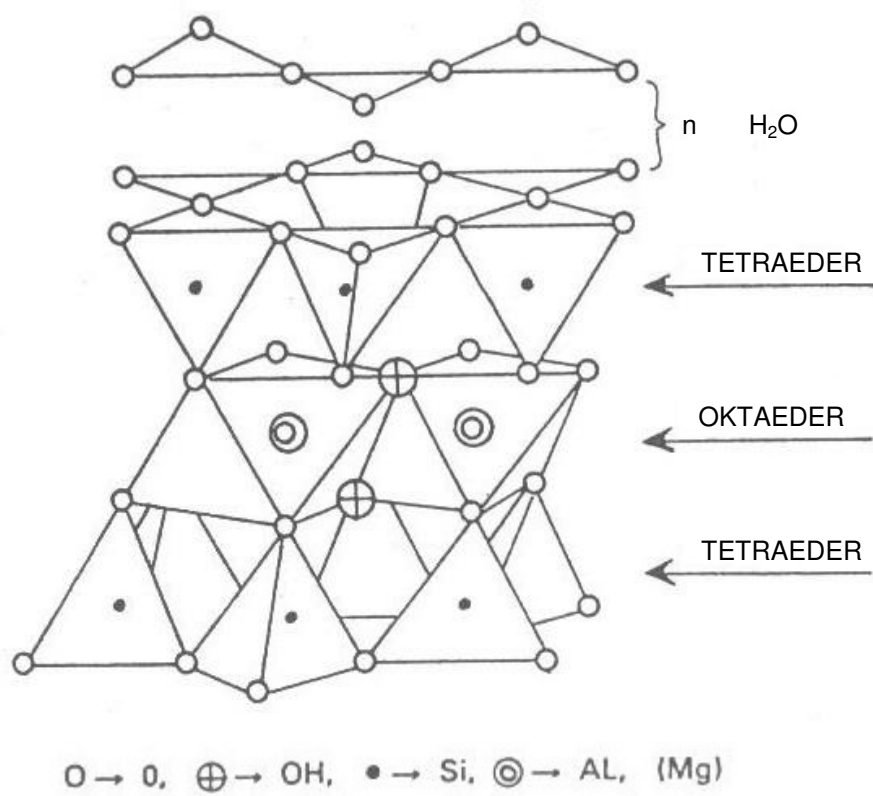


Şekil 2. 17. Nakrit ve kaolinitin (a ve b) altıgen yaprakçıkları ve halloysitin (c) çubuk yapılı tanecikleri

Sertliği Mohs olan Halloysit, diğer kil minerallerinin yaprak strukturuna karşın çubuk ve boru görünümlü yapıya sahiptir (Şekil 2.17).

Montmorillonit Grubu

Kuru haldeki Montmorillonit bünyesine su alarak ilk hacminin 16 katına kadar kristal iskeletini genişletebilir. Plastizitesi (=özlülüğü) ve absorpsiyon (=su emebilme) özelliği kaolinit, pyrophyllit ve talka oranla çok yüksektir. Yapısındaki Al, Fe ile yer değiştirdiği zaman nontronit, Mg ile yer değiştirdiği zaman da hektorit, saponit ve saukonit adları ile anılır. Montmorillonit 1, nontronit 2,5 Mohs sertliğine sahiptir. Kaolinitin iki tabakalı mineral yapısına karşın, montmorillonit kil minerallerinin özelliği, üç tabakalı mineral yapısında oluşlarıdır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Montmorillonitin üç tabakalı struktur yapısı

Montmorillonitin ideal formülü olarak $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ kabul edilirse, bunun %28,2 Al_2O_3 , %66,8 SiO_2 ve % 5 H_2O bileşiminde olduğu saptanır. Pişmiş durumda bu oran, %29,8 Al_2O_3 ve %70,2 SiO_2 olarak belirlenir.

Montmorillonitin doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. Yüksek oranla Al_2O_3 ve MgO ile oluşan formuna biedellit ve yüksek oranda Fe_2O_3 içeren formuna da montronit denir.

Genellikle bentonit formuna da sahip olan bu mineral emaye, sır ve çamurlarda plastiklik için kullanılır. Bentonitik yapısı kil mineralleri çok ince tanelidirler. %40 dolayında $<0,06$ mikron taneciğe sahiptir. Bu sayı kaolinlerde %0,5–1,5 killerde %5–20 arasındadır. Elektron mikroskopla yapılabilen gözlemlerde, kaolinitin iyi oluşmuş kristallerine karşın, montmorillonitin kristallerinin çok küçük, ince belirsiz şekiller ve zengin yüzeyler şeklinde olduğu izlenir. Montmorillonitlerin sulandırılması güç olup, diğer kil minerallerinin de kolaylıkla sulanmasına engel olurlar. Çok kuvvetli tiksotropi özelliği gösterirler.

İllit veya Glimmer Soylu Kil Mineralleri Grubu

Yüksek oranlı kil minerallerinin yer aldığı illitler, muskovit ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) ve biyotit ($K_2O \cdot 4MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$) olarak çok tanınan glimmerlerden oluşurlar. İllitler glimmerlere oranla daha az alkalili olup, daha fazla suludurlar. Hidratize glimmer artıkları olarak adlandırılırlar.

İllitler de, montmorillonit gurunda olduğu gibi, tetraeder-oktaeder-tetraederden oluşan üç tabakalı kil minerallerinin sınıfına girerler.

Glimmerlerin oluşumlarındaki zamana ve uzaklığa göre, bunlardan oluşan illetler de çok veya az ince taneli olurlar. Tuğla kiremit hammaddelerinin içinde bol bulunurlar ve kaklı yataklarda da çıkarlar. Mohs sertlikleri 2-3 arasındadır. İllitler kristal suyunu montmorillonitte olduğu gibi düşük sıcaklıkta, $100^\circ C$ dolayında kaybeder.

Glimmer soylu killerin en önemlilerinden biri olan vermikulit, yumuşak talk görünüşlü, bükülebilir. Yaprakçık dokusundan oluşan, bornz renkli bir kildir. En önemli özelliği, ani ısıtma sonucu, körük formu gibi patlayıp genişlemesidir. Bu özelliğinden dolayı yalıtım maddesi olarak kullanılır.

2.2.2. Kuvars

Yeryüzünün bilinebilen kısmının % 25 ini oluşturur. Oksijenden sonra dünyada en çok rastlanan silisyumun bir bileşimidir. Kimyasal formülü, SiO_2 'dir. Doğada kristal olarak dağ kristali, amethyst, kvarsit, kuvars ve kristal kuvars kumu olarak, amorf olarak ise flint ve sileks taşları, kizelgur şekillerinde bulunur. Kuvars kristali granit, gnays gibi ana kayaların içinde bulunabildiği gibi, bazen da tek başına, tanecik yapısında olarak damarlar şeklinde diğer mineraller ile karışmış olarak bulunur.

Ana kayaçlar içindeki kuvars tek başına dış etkenlerden etkilenmediği halde, ana kayanın doğa etkileri ile bozunması sonucu, açıkta kalan kuvars sularla yıkanıp sürüklenerek, başka bölgelerde tek başına çökebilir. Bu çökme işlemi çoğu zamanda ham kaolin ile birlikte olur ve bu olay da kaolinin içindeki "serbest kuvarısı" oluşturur.

Çöken kuvarstan kumtaşı, ganister, kuvarsit, kum vb. gibi maddeler oluşur. Bu maddelerin tanecik yapılarını, oluşan erozyonun niteliği büyük ölçüde etkiler. Kumtaşında oluşan tanecikler, silisyum dioksit, kalk. kil, demir oksit veya glimmer ile birbirlerine yapışmış durumdadırlar. Ganister ise çok ince taneli kumtaşı olup, aynı zamanda az miktarda kil de içerir. Flint, çok az su ve organik madde içeren kuvarstır. Genel olarak üzeri kalk ile kaplanmıştır. Kırığı karakteristik olarak midye kabuğu dokusunda ve siyah renklidir.

Diyatomit veya kizelgur olarak adlandırılan amorf silisyum, dioksit, yüksek porozitesi (= su emme yeteneği) ve düşük sıcaklık iletkenliği ile ilginç bir maddedir. Bu özelliklerinden yararlanarak diyatomitin özel seramik izolasyon (=yalıtım) çamurlarının yapımında yararlanılır. Silisyum dioksitin diğer formlarından olan kristobalit ve tridimit seyrek de olsa, doğada bulunabilirler. Hammadde ekonomisi açısından önemli değillerdir.

Doğadan ham kuvarsın çıkarılmasında, bilinen taş kırma yöntemleri uygulanır. Belli bir parça büyüklüğünde ön kırılması yapılan kuvars, beraberindeki yabancı

maddelerden kurtarılmak amacı ile yıkanır ve manyetik tutuculardan geçirilir. Ancak bu işlemlerden sonra kuvars istenen tane büyüklüğünde öğütülür.

Özellikle Amerikan seramik literatüründe, seramikte kullanılabilen tüm silisyum dioksit türlerine tek bir ad verilir (potteres flint). Singer'e göre bu hatalı bir adlandırmadır (14).

Kuvars kristali elektroteknik alanda önemli sayılan bir özelliğe sahiptir: Kristale uygulanan basınç ve çekme gibi mekanik etkiler, onun elektrik ile yüklenmesine neden olur. Bu mekanik etkilerin kaldırılması ile elektrik yükü de ortadan kalkar. Bu olay "piezoelektrik" konusunun kapsamına girer. Piezoelektriğin seramik ile olan ilgisi yalnızca kuvarsa bağlı bir özellik değildir. BaTiO₃ çıkış maddesi olarak alınarak geliştirilen seramiğe "piezoelektrik seramik" adı verilmektedir (15).

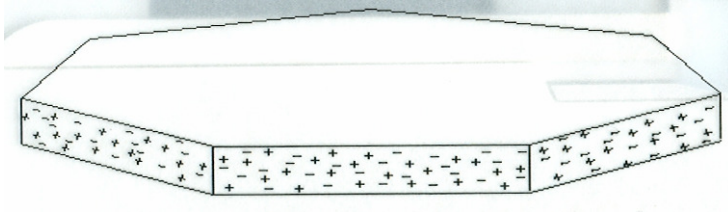
2.2.3.Killerin şekillendirilmesinde rol oynayan kuvvetler

Bir kil taneciği su içerisine daldırıldığında su içerisindeki çözünmüş olan iyonlar kil etrafında absorbe olurlar. Killerin iyonların absorpsiyonun temel nedenlerinden birisi kil taneciklerinin kristallerindeki atomların yer değişmesidir. 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 bütün bağların doymuş olduğunu gösterir. Eğer kristalleşme tam oluşmamış ya da kristal kusuru varsa kristallerin kırılmış kenarlarında yük eksikliği ya da doymamış bağlar ortaya çıkar. Bu da killerin kenarlarının (+) olmasına sebep olur.

Bu bağlar ancak ortamdan 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

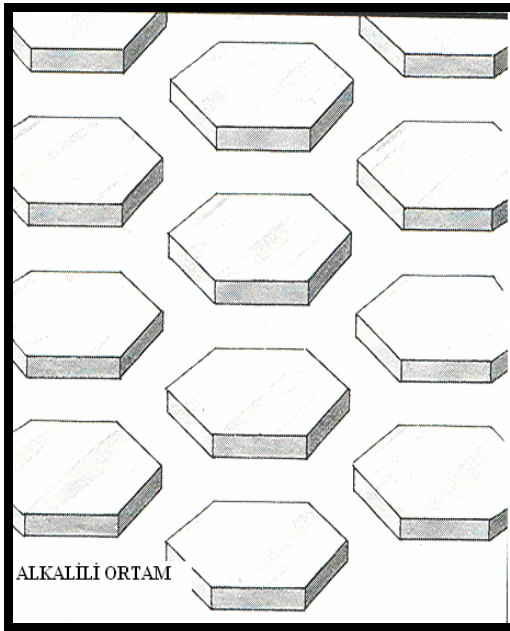
adlandırılan bir büyüklük elde edilir. Bir başka deyişle killer bu sebepten sanki bir mıknatıs tanesi gibi davranabilmektedirler (Şekil 2.19).



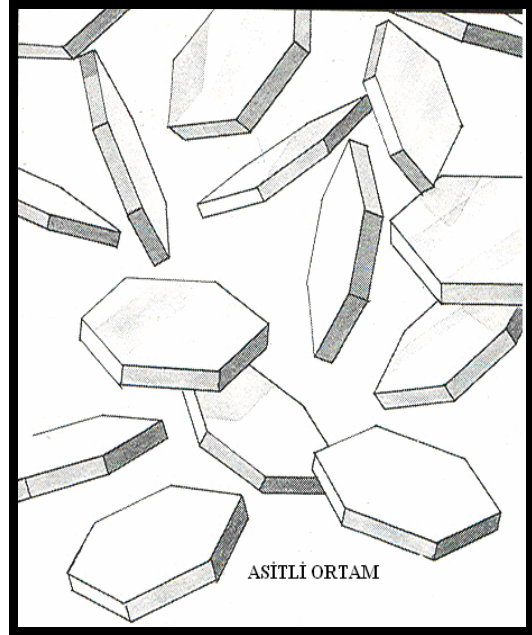
Şekil 2.19. Kaolin mineralinin altıgen prizma şeklindeki görüntüsü ve yüzey yükleri

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 yapıdır (Şekil 2.20).

YÜZDÜRME



ÇÖKELME



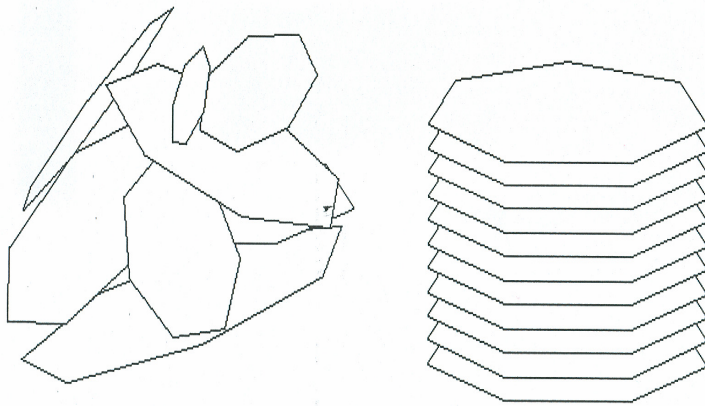
Şekil 2.20. Kaolin minerallerinin yüzey kenar etkileşmesi sonucu olan yapı

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 artması rheoexy azalması durumuna da thixotropy 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, rheoexy veya thixotropy ile ilgilidir. Bu yüzden dökümle şekillendirilecek killerin viskozitesi ve zamanla viskozitesindeki değişim önemli parametrelerdir (16).

Süspansiyonların viskozitelerinin azaltılmasında kullanılan diğer önemli bir yöntem de killerin yüzey yüklerinin değiştirilmesi ile yapılır. Bunun için yüzdürücü olarak bilinen bazı kimyasallar (Na_2SiO_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 2.21).

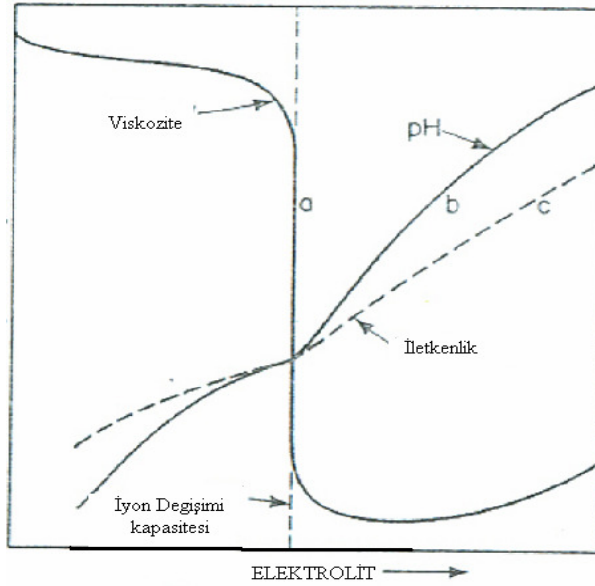


Düzensiz Kil Yapısı

Düzenli Kil Yapısı

Şekil 2.21. Killere yüzdürücü kimyasalların etkisi

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



Şekil 2.22. Kaolin süspansiyonunun viskozitesinin, pH'ının ve iletkenliğinin elektrolit miktarı ile değişimi

2.2.4. Killerin şekillendirilmesi

Seramik çamurunun şekillendirilmesinde çeşitli yöntemler uygulanır. Şekillendirme yönteminin seçiminde rol oynayan önemli etkenler vardır. Örneğin, seramik ürünün çamurunun bileşim ve yapısı, kullanma alanı ve amacı üretimin sayısal verimliliği, yeni çamur teknolojilerinden yararlanma olanakları ve ürünün biçimsel yapısıdır.

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, 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.

Şekillendirme yöntemleri başlıca 4 grup altında toplanır.

- Kuru
- Yarı yaş
- Deri sertliği
- Yaş şekillendirme yöntemleri

Kuru yöntem ile şekillendirme

Adından da anlaşıldığı gibi, şekillendirilecek olan çamurun kuru şekilde olması gerekmektedir. Kuru çamur hazırlamada bugün seramik endüstrisinde belli başlı üç yöntem uygulanmaktadır;

- a) Sıvı çamurun püskürtmeli kurutucularda belli bir rutubete kadar kurutulması
- b) Fitler presten çıkan plâstik çamur pidelerinin kurutma odalarında, belli bir neme, kadar kurutulduktan sonra delikli kollerganglarda istenilen tane büyüklüğünde öğütülmesi
- c) Gene plastik çamur pidelerin, makarna çıkışlı preslerden geçirdikten sonra, kurutma tüneline belli bir rutubete kadar kurutulması ve sonuçta delikli kollerganglardan geçirilerek öğütülmesi ile granüle (= tanecikli) pres çamuru elde edilir.

Çoğu zaman, presleme işleminde kullanılacak olan kuru granüle çamur, şekillendirilecek malzemenin türüne, şekline ve şekillendirmede kullanılan presin türüne göre, su ile az veya çok rutubetlendirilir, bazı özel yadlarla karıştırılır. Prensip olarak kuru şekillendirmenin uygulandığı bazı seramik ürünler vardır. Örneğin, büyük ölçü birliğine sahip olması istenen yer ve duvar karoları, zımpara taşları, bazı elektro porselen parçalar gibi. Son yıllarda geliştirilen özel hidrolik presler aracılığı ile tabak, kâse, köşeli tabak gibi sofraya eşyaları da kuru olarak preslenebilmektedir

Şekillendirme suyunun azlığı nedeni ile kuru olarak şekillendirilmiş parçaların kuru küçülmeleri çok küçük olur. Bu da toplu küçülmeyi etkilediğinden, üretilen parçaların mümkün olduğu kadar istenen boyutlarda fırından çıkması sağlanır. Şekillendirme suyunun az olması, bazı kurutma avantajlarını da getirir. Kurutma süresi ve kurutma hatalarının çok az oluşu gibi.

Kuru preslemede çok çeşitli preslerden yararlanılır. Her birinin çalışma prensibi ve basıncı ile kullandıkları yerler farklıdır. Seramik endüstrisinde en çok kullanılan pres

türleri şunlardır; Hidrolik, dirsekli, vidalı, fırıksiyon, döner tablalı, isostatik preslerdir.

İster mekanik, ister hidrolik, hangi yöntemle kuvvet üretilirse üretilsin, isostatik presler hariç preslerde genellikle şekillendirme iki tabla arasında yapılır. Presleme hatalarının başında, basıncın preslenen malzemenin her tarafına aynı olmaması gelir. Özellikle et kalınlığı derinlemesine fazla olan mallarda, alt bölgelerde iyi bir sıkışmanın olmadığı görülür. Bu hata sonucu, üretilen malın kururken ve pişerken çatladığı ve deforme olduğu görülür. Pres çamurunun rutubetinin her tarafta aynı olmaması da şekillendirme hatalarına yol açar. Presleme sırasında basıncın malın her tarafına çok eşit dağıtabildiği isostatik (veya hidrostatik) presler vardır. Sıvıların kendilerine yapılan basıncı, her tarafa aynı şekilde iletmesi prensibinden yararlanılarak geliştirilen bu preslerde üretilen basınç, çamurun her tarafına aynı eşit basıncı yaptığından, elde edilen ürün hatasız olur. Soğuk ve sıcak izostatik presleme yöntemleri vardır.

Yarı yaş yöntem ile şekillendirme

Bir adı da plastik şekillendirme olan bu yöntem için gerekli plastik çamur, kaba seramik endüstrisinde çift burgulu karıştırıcılarda hazırlanır. İnce seramik endüstrisinde sıvı çamur fitler preslerde suyundan uzaklaştırılır. Her iki yöntemde de çamurun homojenize edilmesi ve gerekiyorsa havasının alınması gerekir. Bu işlem için vakumsuz veya vakumlu pres karıştırıcılardan yararlanılır. Plastik şekillendirmenin çeşitli türleri vardır. Bu türlerin birbirinden farklı olması, şekillendirilecek parçaların sayısına, boyutlarına, kullanma alanlarına ve şekillendirildikten sonra, olması istenen şekillerine bağlıdır.

a) Serbest el ile şekillendirme: Seri üretimi gerektirmeyen parçalar elle şekillendirilebilir. Pano, heykel v.b. gibi parçalar, plastik çamur ve bazı yardımcı aletler kullanılarak elle şekillendirilir.

b) Tornada el ile şekillendirme: Öncelikle çömlekçi ürünlerinin, yani saksı, güveç, vazo ve diğer tüm rotasyon (=döner) ürünlerin yapılmasında tornalardan yararlanılır. İnsan gücü ve motor gücü ile dönen torna türleri vardır. Tornada üretilen parçalarda, şekillendirici olarak insan eli kullanılıyorsa, ölçü sapmaları ortaya çıkar.

c) Kalıplar arasında basarak şekillendirme: Bu yöntem plastik çamur, alçı veya metal kalıplar arasında çeşitli presler ile basılarak şekillendirilir. Şekillendirilebilen parçaların arasında kalınlığı çok fazla olmayan malzemeler gelir. Örneğin, kulplar, özel rölyefli kaplama plâkaları, bazı ateş tuğlası türleri, kiremitler v.b. gibi.

Kiremit üretiminde, revolver pres adı ile tanımlanan döner silindirik presler kullanılır. Bu preslerde kalıp görevi yapan iki parçalı alçı kalıplarının alt parçaları, "malta haçı" denen özel döndürme sistemi ile dönen beş yüzeyli silindirde, tek olan üst parçası da, üst baskı tablasındadır.

Kiremit çamuru, özel ağızlık takılmış preslerden, yassı dikdörtgen pideler şeklinde çıkar. Bir bant aracılığı ile presin önüne gelen pideler, ya insan eli ile veya otomatik olarak kalıplara yerleştirilirler. Silindir bir basamak dönerek çamuru üst pres tablasının altına getirir ve burada alt ve üst kalıplar arasında kiremit preslenerek şekillendirilir.

d) Ağızlıklı preslerde şekillendirme: İnşaat türü seramik malzemenin en hızlı ve hatasız üretildiği ağızlıklı pres olarak tanımlanan, plastik çamur şekillendirme makinelerinin vakumlu ve vakumsuz çalışan türleri vardır. Çalışma prensibi sonsuz dişli bir burgu aracılığı ile sıkıştırılan plâstik çamurun, makinenin daralan ağız kısmına takılan istenen kesiti veren ağızlıklardan şekillenerek çıkması esasına dayanır.

Deri sertliğinde şekillendirme

Bu yöntem ile şekillendirmede kullanılacak olan çamurun daha önce bir ön şekillendirmesinin yapılması gerekir. Ön şekillendirme, alçı kalıplar içinde olabildiği

gibi, vakum preslerden çamurun sucuk şeklinde çekilmesi ile de yapılabilir. Ön şekillendirilmesi yapılmış bir plastik çamurun deri sertliği kıvamına gelinceye dek rutubeti ve sıcaklığı ayarlanabilir odalarda bekletilerek sertleştirilmesi gerekir.

Belli bir sertliğe gelen çamur kütlesi, yatay veya düşeye tornalara takılır. Şekillendirilmesi gereken formun negatifini taşıyan bir şablon üzerinde hareket edebilen bir bıçak, dönmekte olan deri sertliğindeki çamurun üzerinde, şablondaki izleri uygulayarak yontma işlemi yapar. Bu işlemde bıçak şablon üzerinde el ile dolaştırılabildiği gibi, programlı şablon ve bıçaklarla otomatik olarak da yapılabilir. Bu yöntemle üretilen parçaların başında, alçak ve yüksek gerilim izolatörleri gelir.

Yaş Yöntem ile Şekillendirme

Bu yöntemde kullanılan çamur, "döküm çamuru" adı verilen akışkan bir çamurdur. Döküm yolu ile şekillendirme, en çok kullanılan bir şekillendirme yöntemidir. Diğer şekillendirme yöntemleri ile üretilemeyen her türlü parça dökümle şekillendirilebilir. Örneğin, karışık parça ve şekillerden oluşan sağlık gereçleri, tornada şekillendirilemeyen yuvarlak olmayan parçalar, pres kalıplarının yapılması zor ve pahalı olan parçaları, alçı kalıp üzerine sıvamakla şekillendirilemeyen simetrik olmayan tabaklar, bazı özel ateş tuğlaları, çaydanlık, kâse gibi sofraya takımları parçaları, biblo, vazo ve diğer süs eşyaları, lavabo, klozet, küvet gibi sağlık gereçleri parçalarının şekillendirilmesinde döküm yöntemi kullanılır. Yaş yöntemle şekillendirilmede kalıp olarak, alçıdan yapılan, tek veya çok parçalı alçı kalıplar kullanılır. Kalıp şekline getirilmiş alçı maddesinin gözenekli oluşu nedeni ile kalıpta oluşan su emme yeteneği, kalıbın içine dökülen döküm çamurunun suyunu emerek, şekillendirme işlemini, herhangi bir yardımcı alet olmaksızın sürdürür. Kalıpta şekillendirme için gerekli kalınlık sağlandığı zaman, kalıp içindeki çamur geri boşaltılır. Böylelikle kalınlık alma işlemi durmuş olur. Kalıp içinde henüz yaş ve belli bir yumuşaklığa sahip olan çamurun, kalıp tarafından sürekli suyu emildiğinden, şekillendirilen parça bir süre sonra kalıptan alınacak kadar sertleşir.

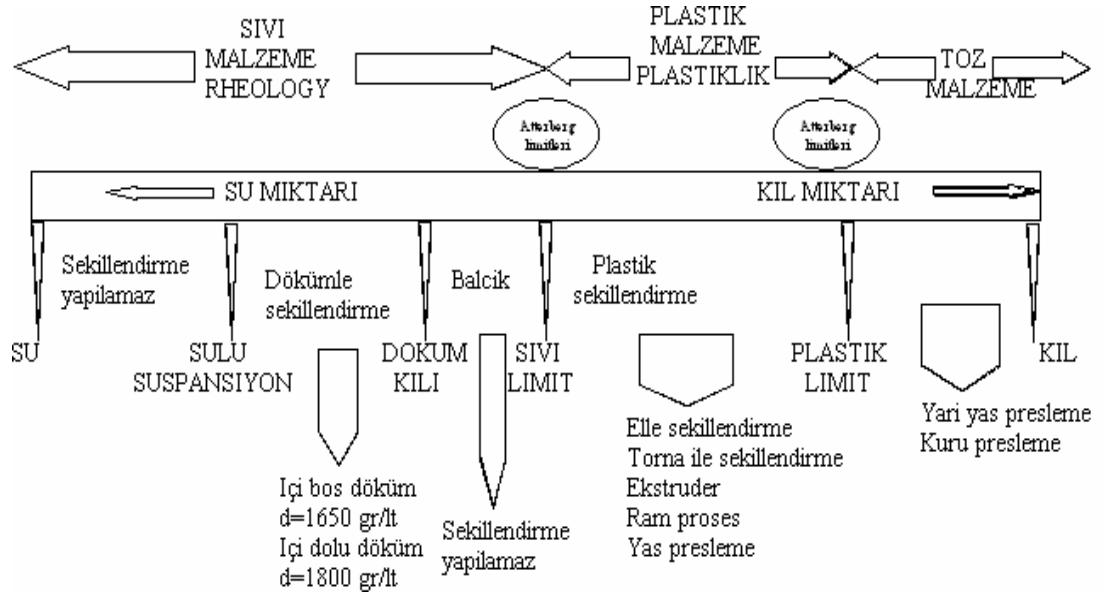
Yaş yöntemle şekillendirmede en önemli aşamayı, şekillendirmede kullanılacak olan döküm çamurunun hazırlanması oluşturur. Çok önemli bazı temel bilgilere sahip olmakla başarılı bir döküm çamuru hazırlanabilir. Bu temel bilgiler şunlardır;

- a) Çamuru oluşturacak hammaddelerin kimyasal, fiziksel, mineralojik ve reolojik özelliklerini bilmek gereklidir. Yani kimyasal olarak bileşimi, fiziksel olarak tane yapısı ve tane büyüklüğü, mineralojik olarak içerdiği mineraller ve kristal yapısı, reolojik olarak akışkan olabilme yeteneği ve bunu sağlayan etkenler,
- b) Döküm çamurunda olması istenen mineralojik yapının, çamuru, oluşturacak olan tüm, hammaddelerin kimyasal bileşiminden hesaplanması,
- c) Çamura katılacak olan suyun oranı, fiziksel ve kimyasal yapısı,
- d) En uygun elektrolitin seçimi, kullanılacak elektrolitin katkı oranı,
- e) Döküm çamurunu oluşturan sert ve suda dağılmayan maddelerin öğütme süresi, tüm çamurun tane büyüklüğü,
- f) Döküm çamurunun litre ağırlığı ve viskozitesi.

Döküm çamurlarında istenen akışkanlığı, fazla su kullanmaksızın elde etmek gerekir. Fazla sulu (% 50'nin üzerinde) bir döküm çamuru kalıpları ıslatır, kalıptan çıkma süresini uzatır ve kalıp içinde çatlar. Bu nedenlerle döküm, çamurunda akıcılığı, suyu arttırarak elde etmek olanaksızdır. Su belli bir oranda (max %40) kalmalı bunun yerine "elektrolit" denilen ve "taneciklerin elektrik yüklerine etki ederek, onları hareketlendiren kimyasal maddeler kullanmalıdır. Bu maddelerden bazıları şunlardır; Amonyak, kalsine soda, sodyum hidroksit, sucamı (sodyum silikat) humus ve tanik asit gibi. Diğer şekillendirme yöntemlerinde olduğu gibi, döküm çamuru ile şekillendirmede de bazı hatalar ortaya çıkar. Bu hatalar çamurun yapısından gelebildiği gibi, çalışma şeklinde de gelebilir. Çamurdan gelen hataların en sık rastlananları şunlardır; litre ağırlığının çok düşük, yani döküm çamurunun çok sulu olması, istenen tiksotropide olmaması, çamurun çok fazla veya az öğütülmesidir(17).

Genel olarak klasik seramikte döküm için akabilecek kadar %30-35 su içeren kıvamdaki süspansiyonlar kullanılırken, sıvama ile şekillendirme için %15-25 ve pres için % 5-6 nem içeren çamurlar kullanılmaktadır. Şekil 2.23'de saf suya yavaş

yavaş kilin karıştırılmasından elde edilen karışımların kıvamları, bunların nem içerikleri ve bunların seramikte hangi şekillendirmelerde kullanıldığı gösterilmiştir.



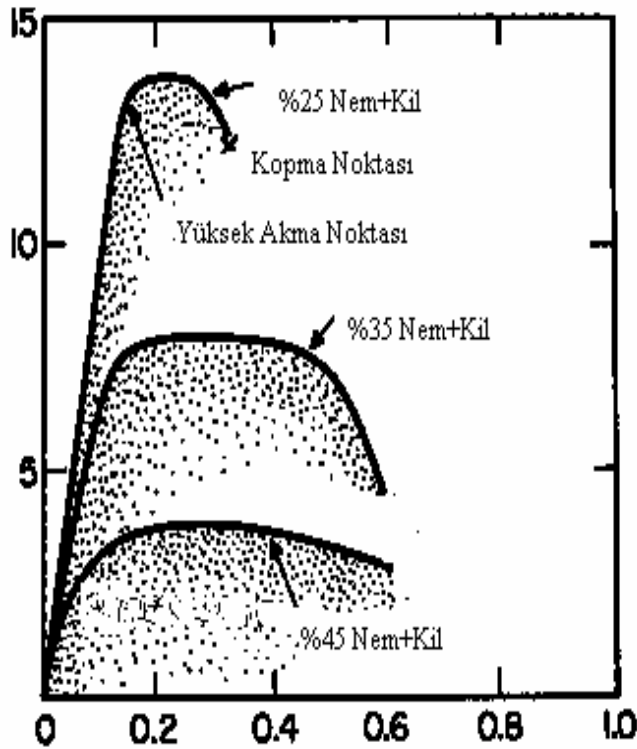
Şekil 2.23. Nem miktarının değişimine göre seramik sanayinde şekillendirmede kullanılan çamur kıvamları.

Şekil 2.23'e göre çok sulu süspansiyonlar kullanılarak dökümle şekillendirme yapılamamaktadır. Kullanılan kalıplar alçı olduğundan ve alçının suyu çekme özelliği çok sulu süspansiyonlarda giderek azalır. Kalıplar bir iki dökümden sonra suya doyar ve artık suyu çekemez hale gelirler. Alçı kalıplarla günde en az 8-10 döküm alınır ve kalıplar yüzlerce defa kullanılır. Kil miktarı arttıkça çamurun yoğunluğu artarken genel olarak içi boş ürünlerin dökümünde çamur yoğunluğu 1,650 kg/lt, kapalı dökümler için için 1,800 kg/lt olan çamurlar kullanılmaktadır.

Şekilde sulu süspansiyon ve döküm çamuru olarak gösterilen bu bölüm döküm için kullanılan kıvamını göstermektedir. Çamur yoğunluğu arttıkça çamur giderek balçık haline gelir. Hiçbir şekillendirmede kullanılamayan bu kıvamdaki çamurda reolojik ölçümlerde çok zor yapılabilmektedir. Kil miktarı arttırıldıkça çamur artık sıvı özelliklerini kaybeder ve giderek katı özellikleri ağır basmaya başlar.

Sıvı limit denilen bu nokta Atterberg tarafından geliştirilen bir cihazla ölçülür ve bu nokta plastik şekillendirmede kullanılabilecek çamurlarında başlangıç kıvamı olarak sayılabilir. Sıvı limite 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 2.24).

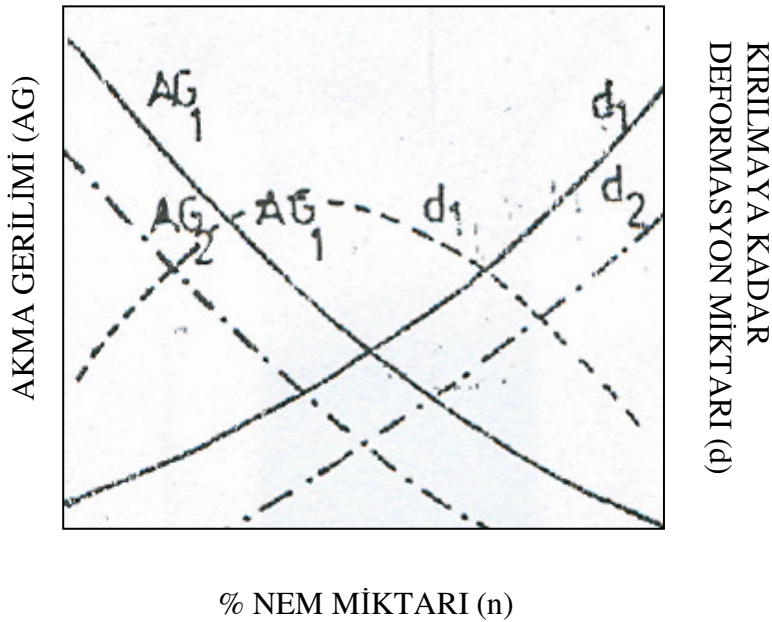
Başka bir deyişle akma noktaları giderek artar. Metallerin akma gerilimleri kendi ağırlıklarına göre çok yüksek olduğundan metaller için bu değer biçimlendirilebilirlikte önemli değildir. Ama killere çok küçük kuvvetlerle deforme olabildikleri için akma noktası şekillendirmede önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.24. Killere uygulanan gerilim gerinim grafiklerinin nem miktarı ile değişimi

2.2.5. Plastikliğin tayini

Pastiklik 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 2.25. Akma gerilimi (AG), kırılmaksızın deformasyon miktarı(d), % nem miktarı ilişkisi (n)

Şekil 2.25'de bünyenin akma gerilimi (AG), kırılmaksızın deformasyon miktarı(d) her ikisi de % neme göre aralarındaki ilişki görülmektedir. Düşük nem değerinde, akma sınırı gerilimi yüksek buna karşılık kırılmaksın deformasyon miktarı düşüktür. En uygun nem miktarı ara yerdedir, Şekil 2.25'de (AG) ve (d) aynı boyuta sahip olmadığından, kesim noktasının fiziksel bir anlamı yoktur.

Norton tarafından yapılan deneyler (AGxd)'in bir maksimumdan geçtiğini göstermiştir. Başka bir bünyenin akma sınırı gerilimi AG₂ ve deformasyon miktarı d₂ ise, bu bünyenin daha düşük plastiklik gösterdiği söylenebilir (18).

2.2.6. Akma sınırı gerilimi belirleme yöntemleri

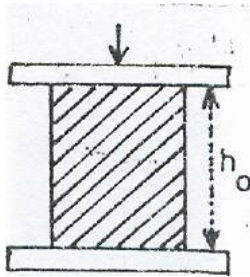
Akma sınırı gerilimini belirlemede; basma deneyi, koni batırma yöntemi, ekstruder ve burma deneyi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Basma deneyi

Akma gerilimi sınırı değerin bulunmasında silindirik numunenin paralel plakalar arasında sıkıştırmak için gerekli kuvvetin bulunmasına dayanır. (Şekil2.26) Basma hızı küçük olduğu zaman, viskoz kuvvetler ihmal edilebilir. Genel olarak uygulanan yöntem ortalama basma gerilimine, (W/S) (S kesit alan) karşılık gerinimin (h_0-h_f/h) gerinim) bulunmasıdır.

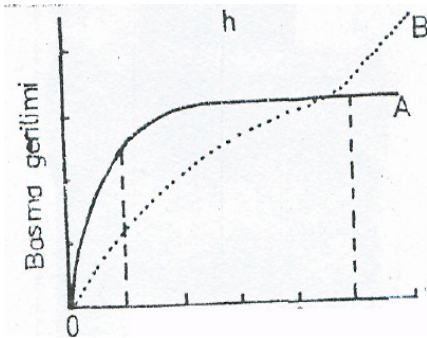
h_0 : Silindirin başlangıçtaki boyu

H_f : Silindirin deneyden sonraki boyu



Şekil 2.26. Basma deneyi

Basma gerilimi ile basma gerinimi arasındaki ilişki Şekil2.27'deki gibidir.



Şekil 2.27. 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 (19).

2.2.7. Killerin plastikliğine etki eden değişkenler

Birçok 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 taneciklerinin büyüklüğünün etkisi
- c) Tanecik büyüklüğü dağılımının etkisi
- d) Taneciklerin birleşimlerinin etkisi
- e) Taneciklerin şeklinin ve yapılarının etkisi
- f) Taneciklerin oluşturduğu toplanmaların etkisi
- g) Yüzey alanı ve moleküller arası çekimin etkisi
- h) Flokülant ve elektrolitlerin etkisi
- ı) Bünye içinde taneciklerin yönelmelerinin etkisi
- k) Kilin geçmişinin (oluşumu sırasında su ile temas süresi) etkisi
- l) Bünyenin yaşlandırılmasının etkisidir.

2.2.8. Plastiklik belirleme yöntemleri

Killerin plastikliğini belirlemek için bugüne kadar birçok yöntem geliştirilmiştir.

İndirekt yöntemler

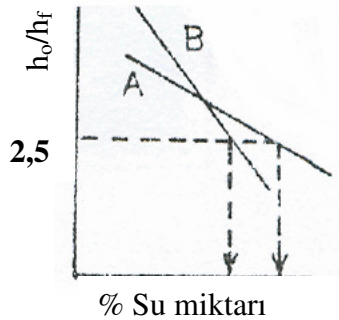
İndirekt yöntemler bünyedeki nem miktarının ölçülmesine dayanmaktadırlar. Kabaca, plastik bir kil bünyesindeki kil miktarı arttıkça veya ince kil miktarının oranının artması ile ölçülen değer plastiklikten çok, plastiklikle kabaca ilişkili bir değerdir. Bu deneylerin bir kısmı keyfi olarak kıvamı belirlenen 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 Pfefferkorn yöntemidir.

Pfefferkorn yöntemi

El ile şekillendirilen 4cm yükseklik ve 3.3cm çapındaki plastik kil üzerine 780 gr 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 2.28'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 geniştir (20).



Şekil 2.28. Pfefferkorn yöntemi ile plastiklik ölçümü

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. (Ps) 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)

Atterberg Plastiklik Göstergesi= Ss - Ps

[29]

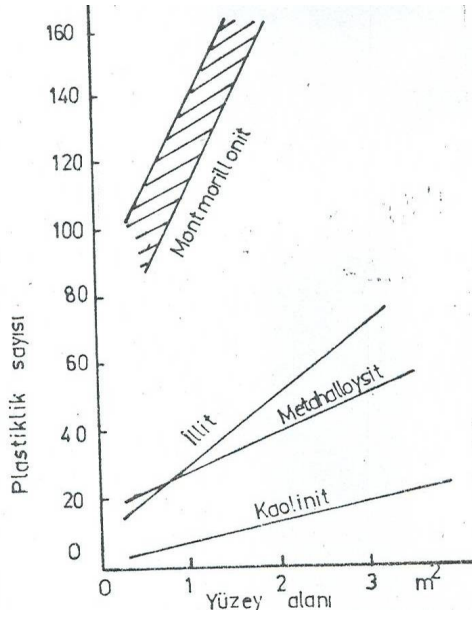
Plastikliği yüksek killerin plastiklik göstergesi değeri büyüktür. Pulvarize edilmiş killere büyük basınç uygulandığında ancak tanecikler birbirini tutabilir. Bu, kilin içindeki, çok az nemden ileri gelir.

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 alanına (Şekil 2.29), belirli bir dereceye kadar da 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 yapısı içerisinde mekanik olarak tutulur.

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



Şekil 2.29. 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 2.2).

Çizelge 2.2. Çeşitli kil minerallerinin Atterberg Ps, Ss değerleri (a), (b) değişik yörelerden alınan minerallerle yapılan sonuçları göstermektedir.

		Ps	Ss	PG
Kaolinit	(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	(a)	52	62	10

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

Rieke göstergesi

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

Direkt yöntemler

Plastikliğin direkt olarak Ölçülmesi;

- a) Akma sınırı noktasının veya Katılığın (firmness) bulunması,
- b) Akma sınırı noktasının üzerindeki gerilimlerde deforme olma yeteneğinin bulunması,
- c) Kırışma ve çatlamanın başlangıcının belirlenmesi ile

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

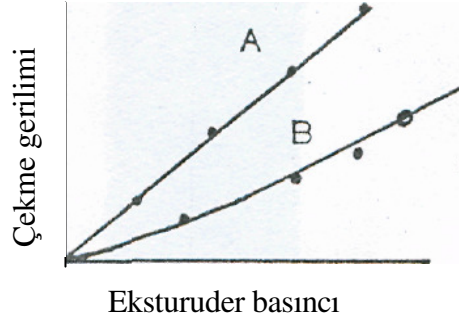
Grout deneyi

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

Linseis deneyi

Standart bir ağızdan numunenin ekstrude edilebilmesi için gerekli basıncın ve ekstrude 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. Ekstruder basıncı kayma

gerilimine karşılık gelmektedir. Deney aynı örneklerin farklı nem değerlerinde yapılır ve ekstruder basıncına karşılık çekme gerilimi grafiğe geçirilir.



Şekil 2.30. Linseis plastiklik deneyi

3.MATERYAL VE METOT

3.1. Deneylerde Kullanılan Killer

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.

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 kalıplara 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, suda dağılma durumu, kum durumu, kuruma durumu, plastikliği, pişme durumu ve rengidir. Ön teknolojik incelemede alınan sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmiştir. Hammaddeleri daha detaylı karakterize etmek için elek analizi ve tane iriliği 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 tesbit edilmiştir.

Çizelge 3.1. Hammaddelerin ön teknolojik incelenmesi

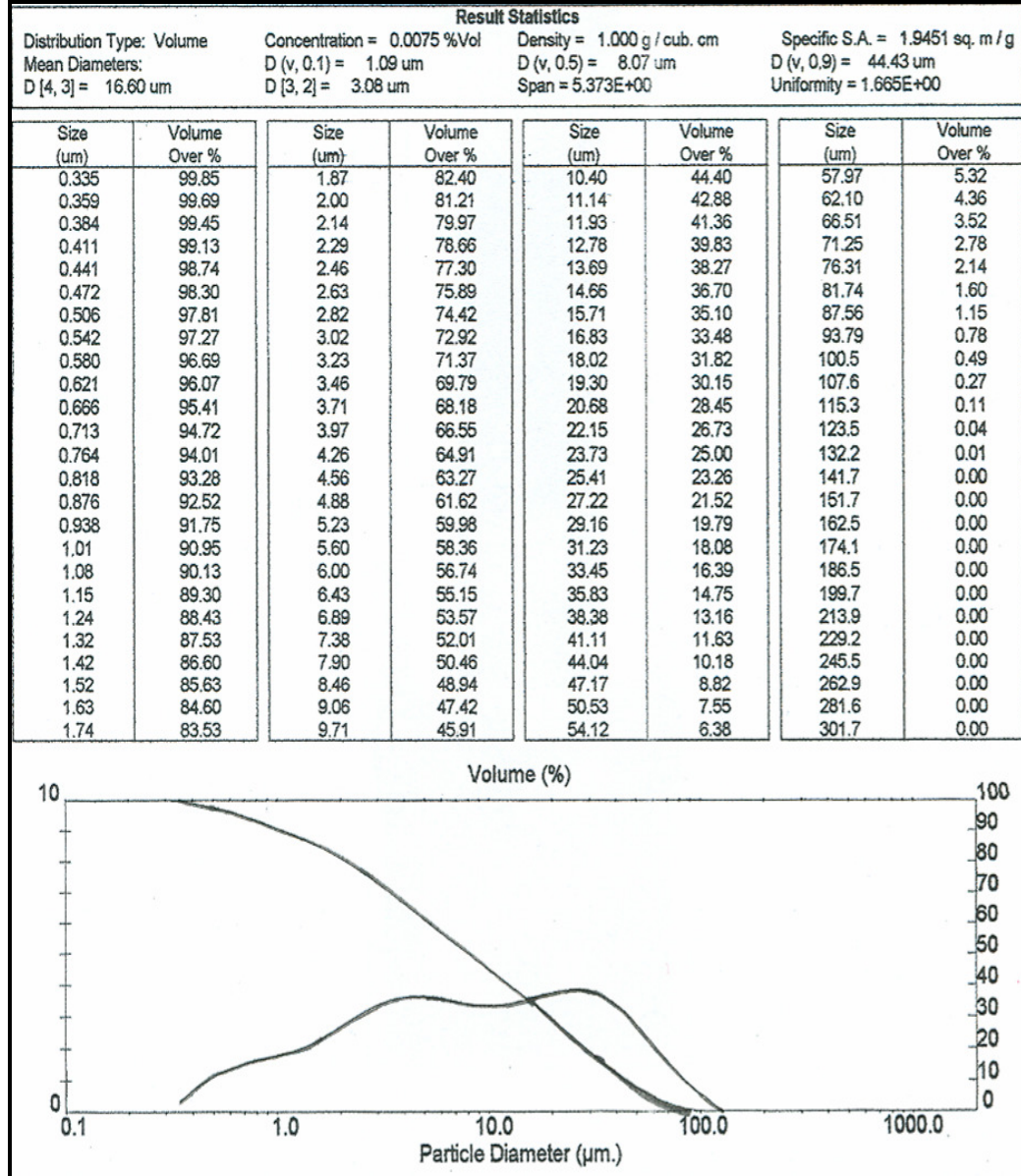
	Tuvka Kili	Türkmen Kili	Pembe Kaolen
Hammaddenin görünüşü	Bej, beyaz renkte	Bej renkte	Pembe bej renkte
Safsızlıklar	Beyaz	Homojen safsızlık yok	Homojen safsızlık yok
Seyreltik HCl ile tepkimesi	Gaz çıkışı var	Gaz çıkışı var	Gaz çıkışı yok
Suda dağılma durumu	Suda kısmen dağılıyor	Suda tamamen dağılıyor	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 sinterlenme	Bej renkte sinterleme	Beyaz renkte pişme

3.3.1. Tane iriliği dağılımı ve elek analizi

65 mesh altı killerin tane iriliği dağılımları Malvern Instrument Master Sizer cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde dağıtıcı olarak saf su kullanılmıştır.

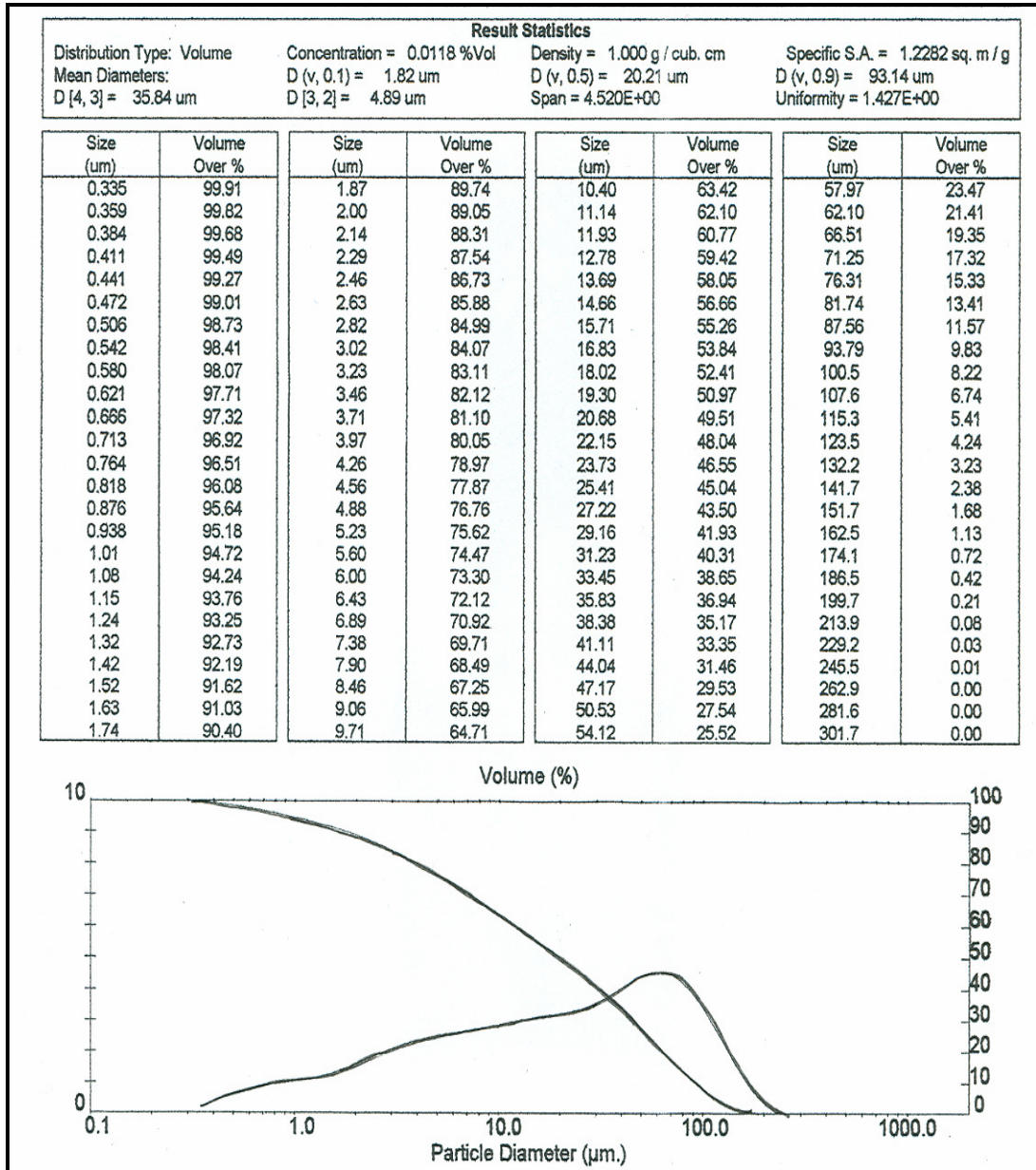
Bilyeli değirmende öğütülen Tuvka kilinin elek analizi yapıldığında bütün tanelerin 65 mesh altına geçtiği görülmüştür. 65 mesh (0,208 mm) elek altının tane iriliği dağılımı sonuçları Şekil 3.1'de verilmiştir. İstatiksel dağılım eğrisi iki değişik tane iriliğinde tepe noktası göstermektedir. Bu sonuçlara göre Tuvka kilinin iki değişik yapıda mineral içerdiği istatiksel dağılım eğrisindeki iki tepenin bulunmasından anlaşılmıştır. Birbirinden farklı karakterde mineraller içeren kilin ortalama tane iriliğinin %10'u 1,09 μm , % 50 sinin 8,09 μm ve %90'ının da 44,43 μm altında ve hacimsel olarak ortalama tane iriliğinin 16,60 μm olduğu kümülatif eğriden

belirlenmiştir. Tane iriliği küçüldükçe plastiklik özellik artar. Bu yüzden kilin iki farklı karakterde kil içermesi plastikliğini negatif olarak etkileyecektir.



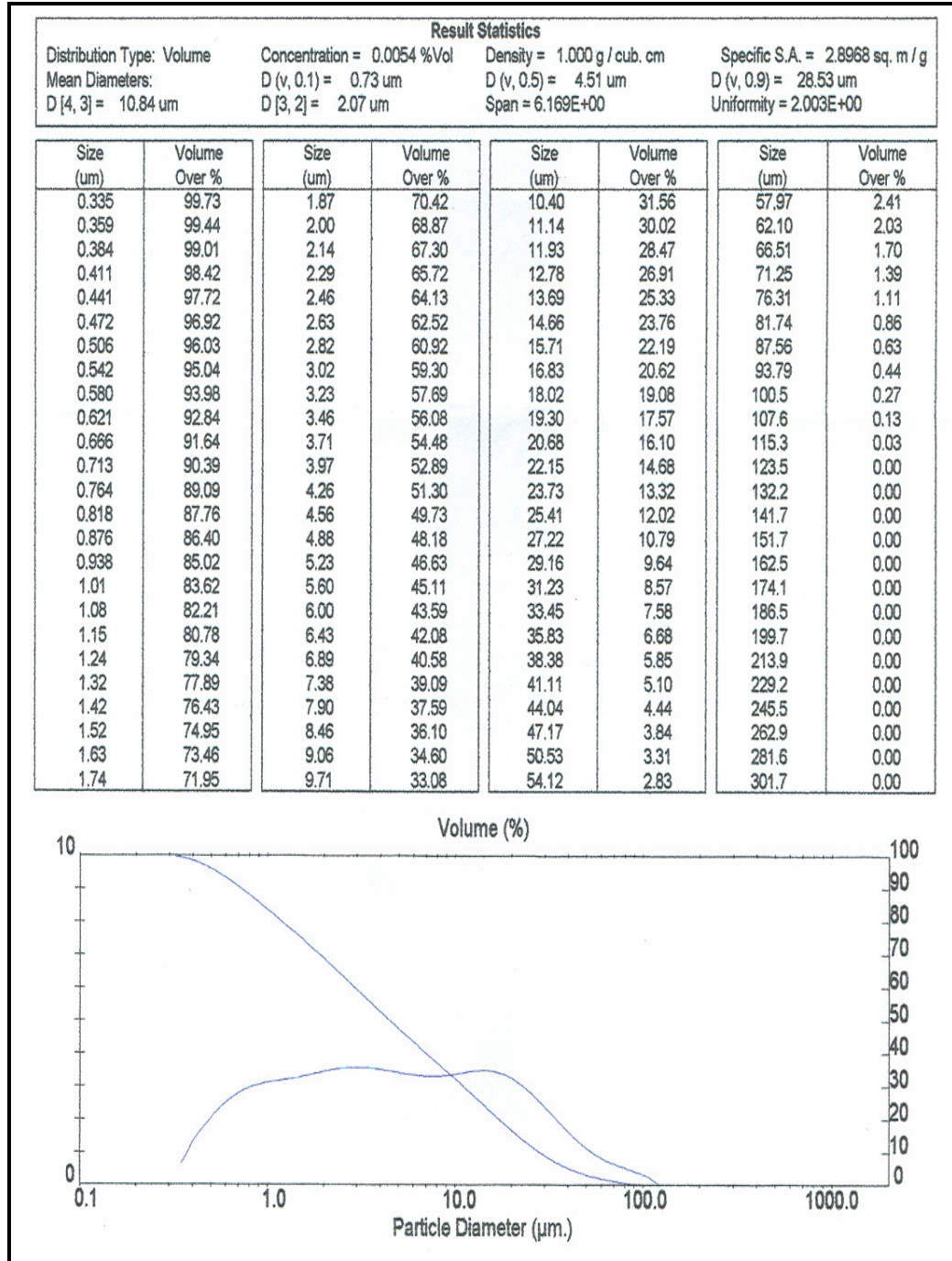
Şekil 3.1.Tuvka kilinin 65 mesh altının tane iriliği dağılımı

Türkmen kilinin 65 mesh elek altının tane iriliği dağılımı Şekil 3.2' de verilmiştir. Buna göre %10'unun tane iriliğinin 1,82 μm , % 50'sinin 20,21 μm ve % 90'ının 93,14 μm olduğu istatistiksel verilerden belirlenmiştir. Hacimsel olarak ortalama tane iriliği ise 35,84 μm dur. Tuvka kiline göre Türkmen kili daha iri tanelidir.



Şekil 3.2. Türkmen kilinin 65 mesh altının tane iriliği dağılımı

Pembe kaolenin 65 mesh elek altının tane iriliği dağılımı Şekil 3.3 de verilmiştir. Buna göre kilin %10'unun 0,73 μm , %50 sinin 4,51 μm ve % 90'ının 28,53 μm olduğu ve hacimsel ortalama tane iriliğinin 10,84 μm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Pembe Kaolen 65 mesh μm altının tane iriliği dağılımı

Deneyleerde kullanılan killerin tane iriliği istatistiksel sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.2’de verilmiştir.

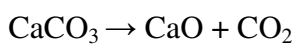
Çizelge 3.2. Killerin 65 mesh altı tane iriliği dağılımının karşılaştırılması

Killer	Tuvka (μm)	Türkmen (μm)	Pembe Kaolen (μm)
%10 unun tane iriliği (μm)	1,09	1,82	0,73
% 50 sinin tane iriliği (μm)	8,07	20,21	4,51
% 90 nının tane iriliği (μm)	44,43	93,14	28,53
Hacimsel ortalama tane iriliği (μm)	16,64	35,84	10,84

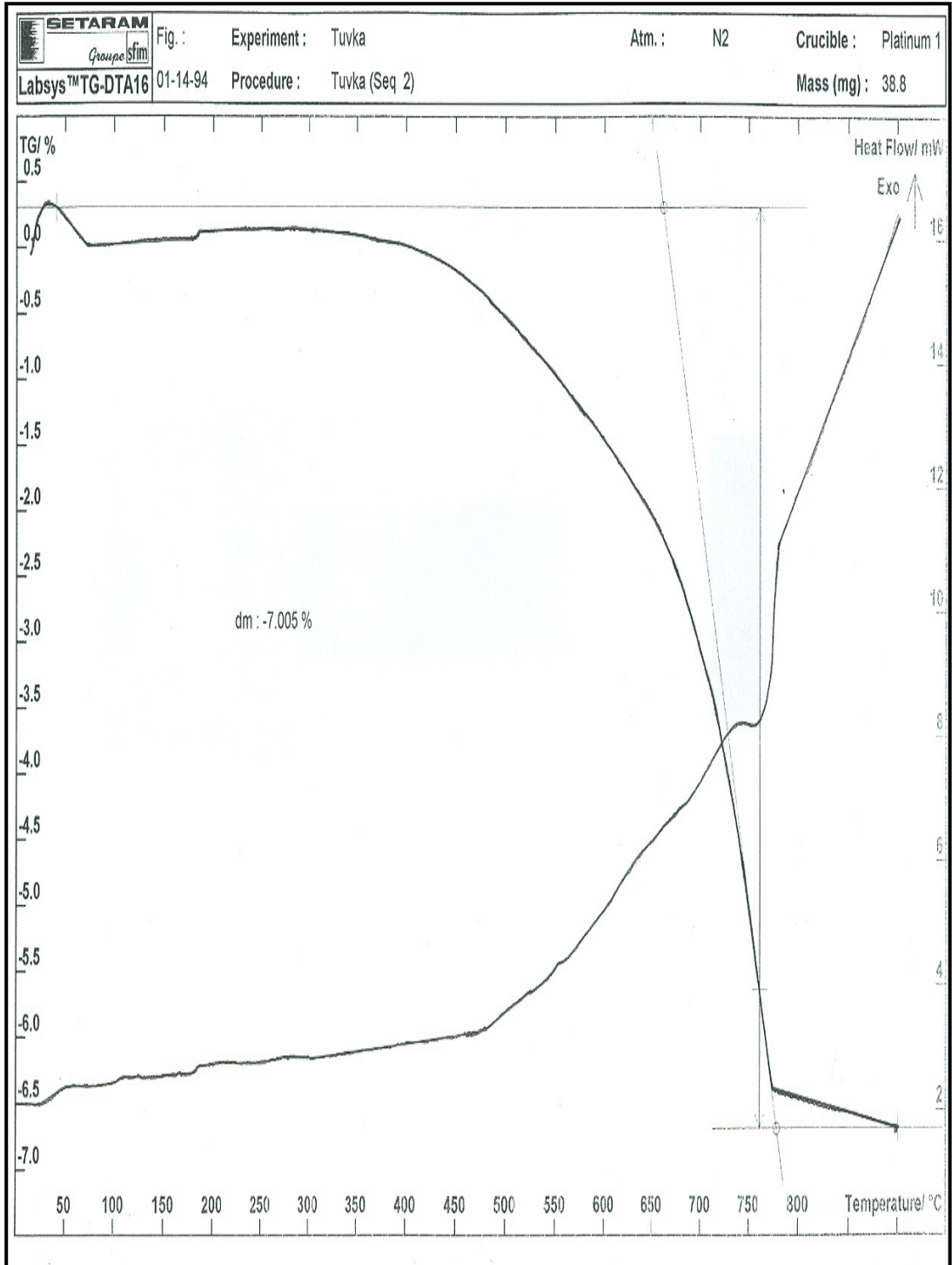
3.3.2. Killerin DTA ve TGA analizi eğrileri

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.

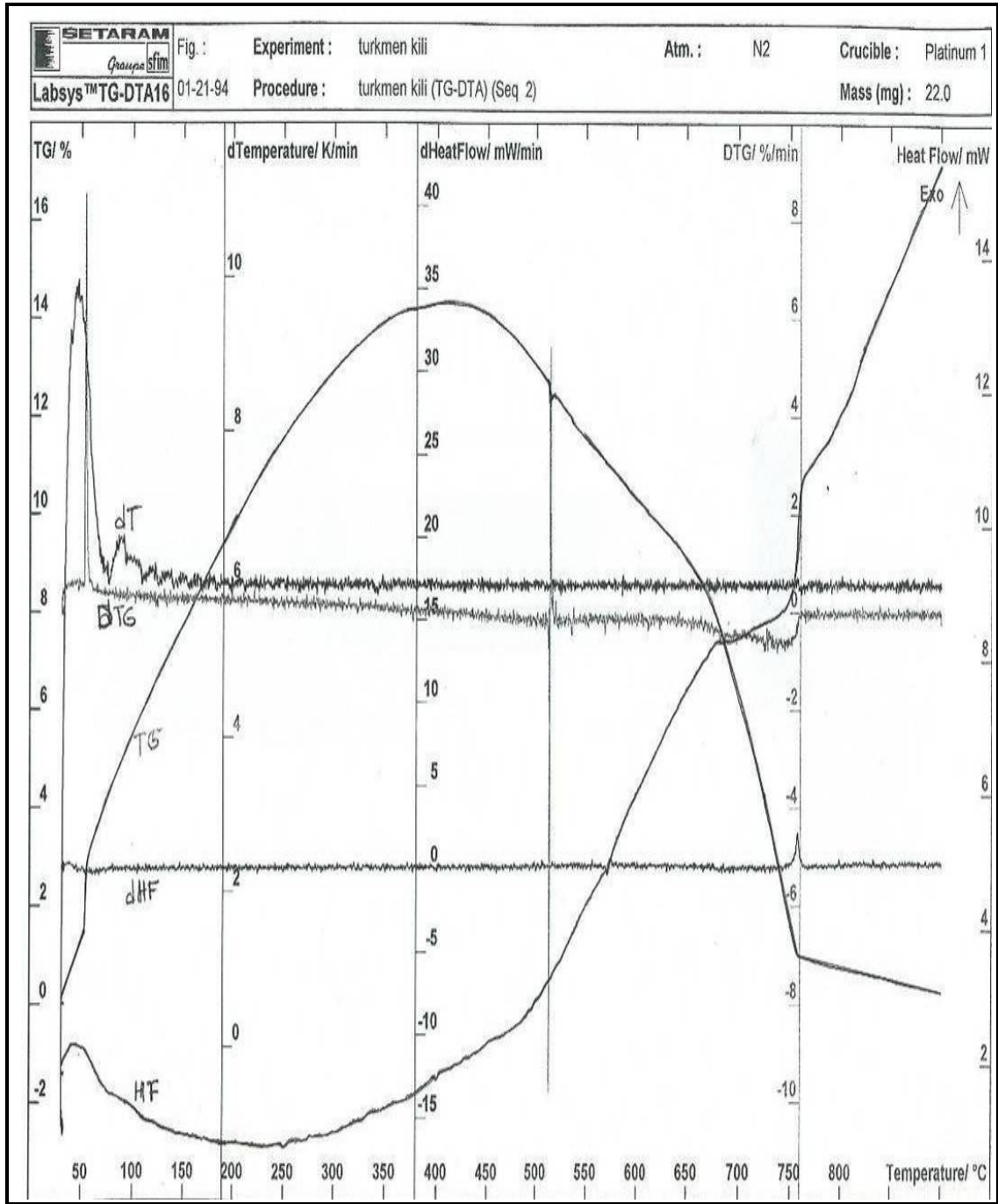


[3.1]



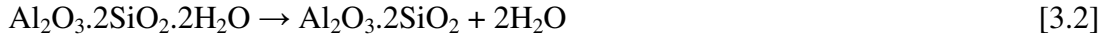
Şekil 3.4 Tuvka kilinin DTA ve TGA eğrisi

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.



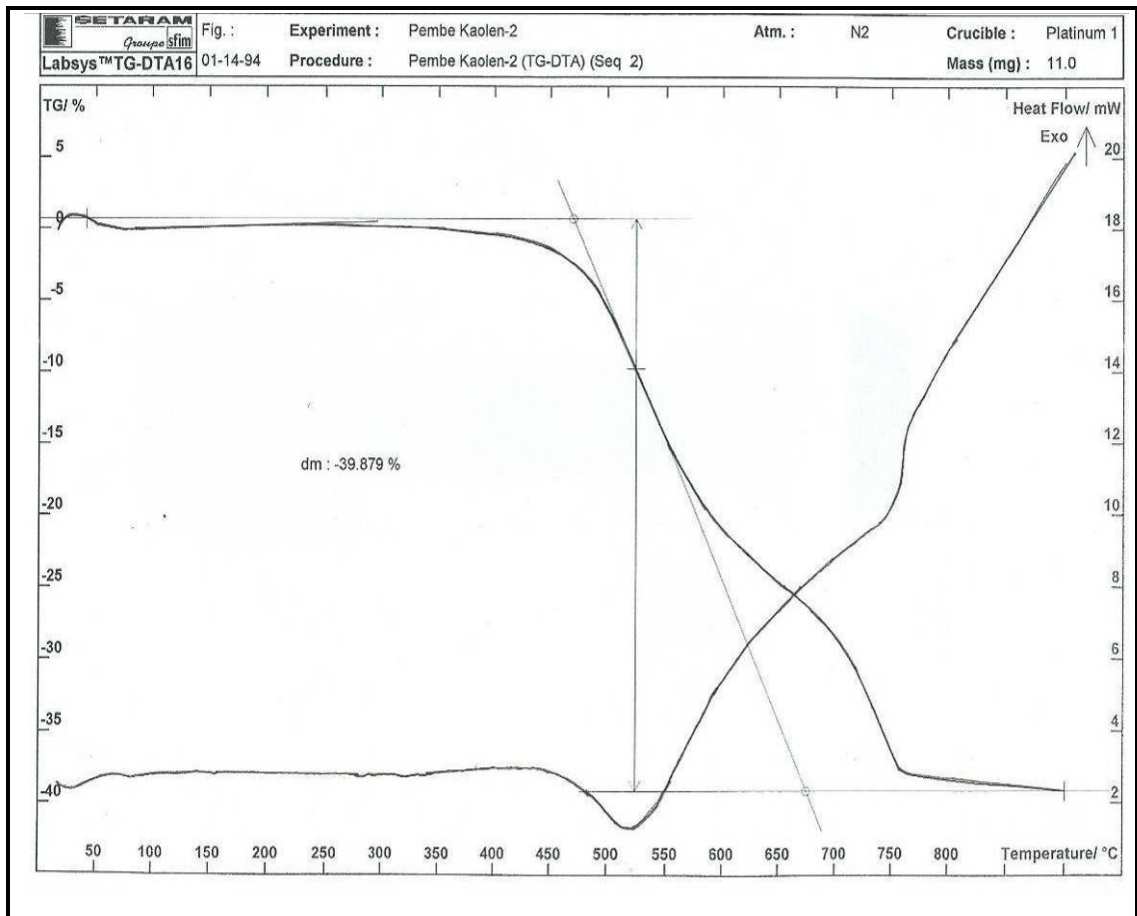
Şekil 3.5. Türkmen kilinin DTA ve TGA eğrisi

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 kütle kaybına sebep olan endotermik tepkimenin kaolinit içerisindeki suyun uzaklaşmasından doğan kaolin metakaolin tepkimesi olduğu belirlenmiştir.



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.



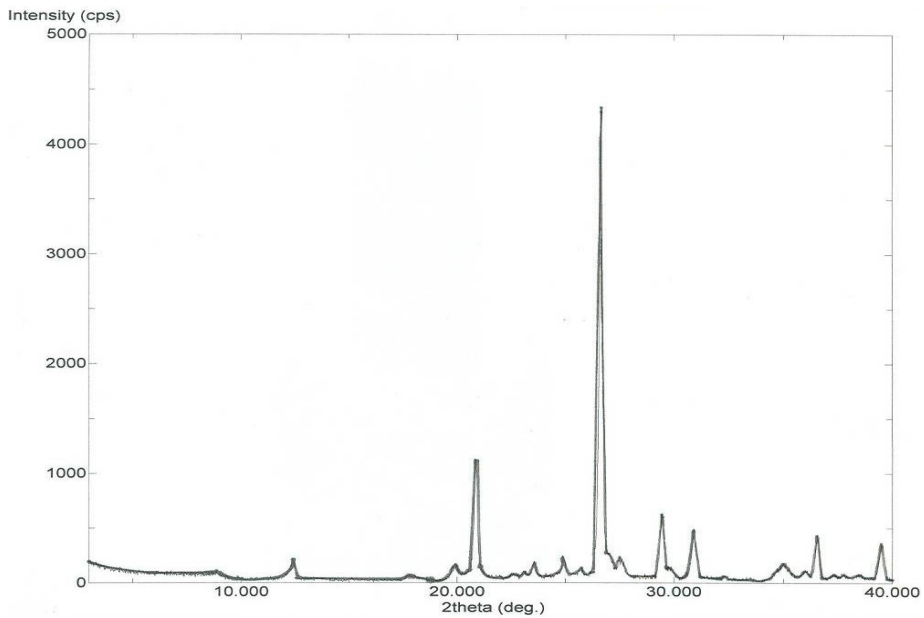
Şekil 3.6. Pembe kaolin kilinin DTA ve TGA eğrisi

Türkmen ve Tuvka killerin DTA ve TG analiz sonuçlarının kalsit ve Pembe kaolen'in ise kaolen ve kalsit içerdiği belirlenmiştir. DTA ve TG analizi 1100°C'a kadar yapılabilsaydı hammadde içerisindeki kaolinitin müllite dönüşme pikleri de görülebilirdi.



3.3.3. Killerin XRD analizi eğrileri

Killerin XRD analizleri Philips marka (Cu katot 40 kV – 40 mA) 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 (21). 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.



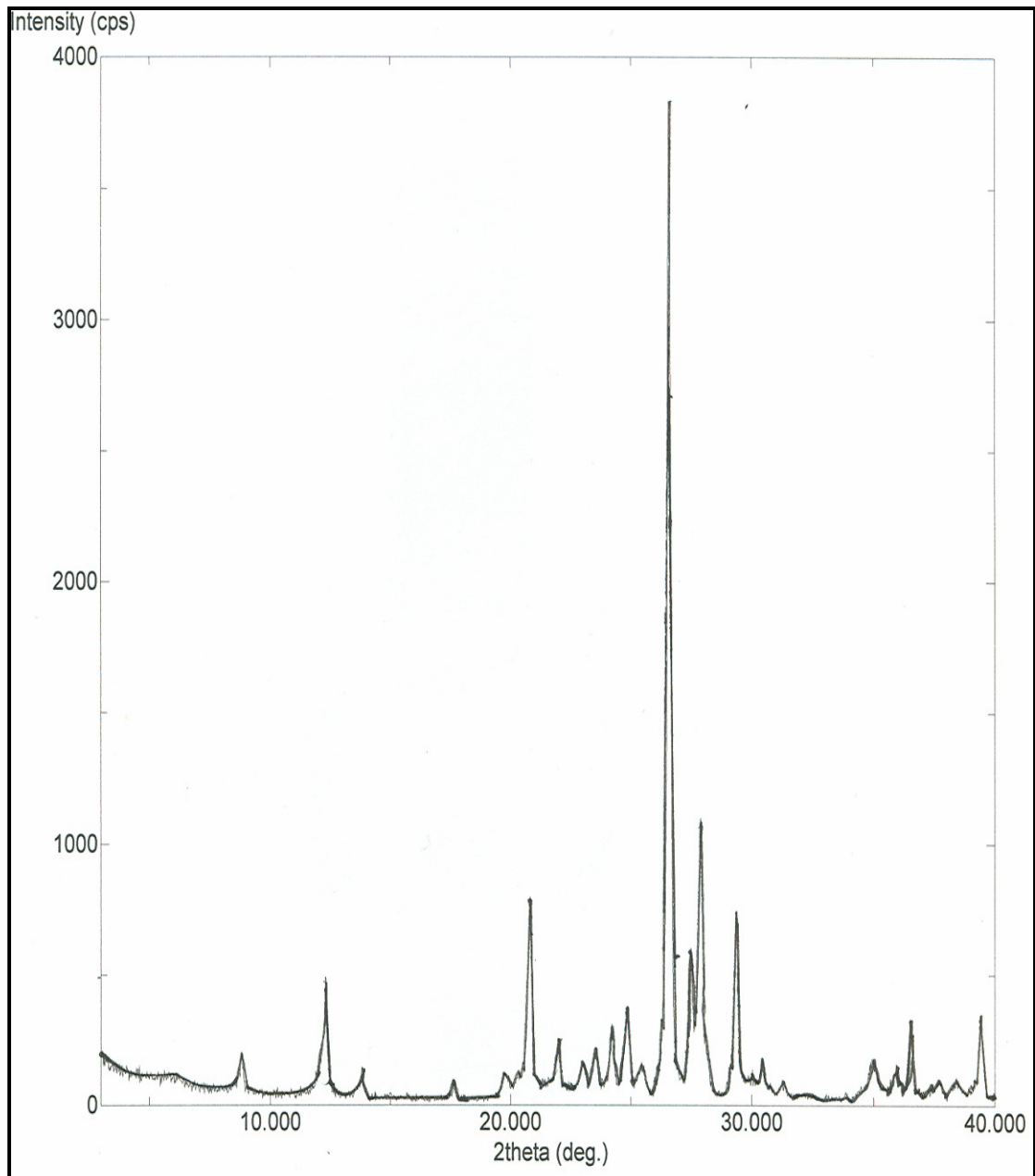
Şekil 3.7. Tuvka kilinin XRD analizi grafiği

Çizelge 3.3. Tuvka kilinin XRD analizi değerlendirme tablosu

		ASTM Standat Değerleri						
	KUARS							
2 θ	26,5	20,82	39,44	36,52				
d	3,34	4,26	2,28	2,458				
I/I ₀	100	35	12	12				
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ	26,5	20,8	39,5	36,6				
d	3,36	4,26	2,27	2,45				
I/I ₀	100	21,2	8	10				
	KAOLİNİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	24,80	12,30	19,80	38,42	34,94	35,80	37,66	
d	3,58	7,18	4,48	2,341	2,56	2,50	2,38	
I/I ₀	100	100	80	90	80	80	80	
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ	24,80	12,40	19,80		35	35,80		
d	3,58	7,13	4,43		2,56	2,50		
I/I ₀	5,6mm %100	4,8mm %86	4mm %71		4mm %71	2,4 %43		
	İLLİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	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 ₀	100	95	90	90	45	40	40	40
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ		26,50						29,5
d		3,36						3,05
I/I ₀		100						14,4
	KALSİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	29,44	48,64	23,08	43,22	39,48			
d	3,03	1,87	3,85	2,09	2,28			
I/I ₀	100	34	29	27	18			
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ	29,5	S.D.	23,6	S.D.	39,5			
d	3,025		3,76		2,279 4			
I/I ₀	14,4mm %100		4mm %28		8mm %56			
	MONTMOR İLLONİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	6,40	19,93	28,30	35,44				
d	13,8	4,45	3,15	2,53				
I/I ₀	100	30	10	5				
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ		19,8		35				
d		4,43		2,56				
I/I ₀		4mm		4mm				

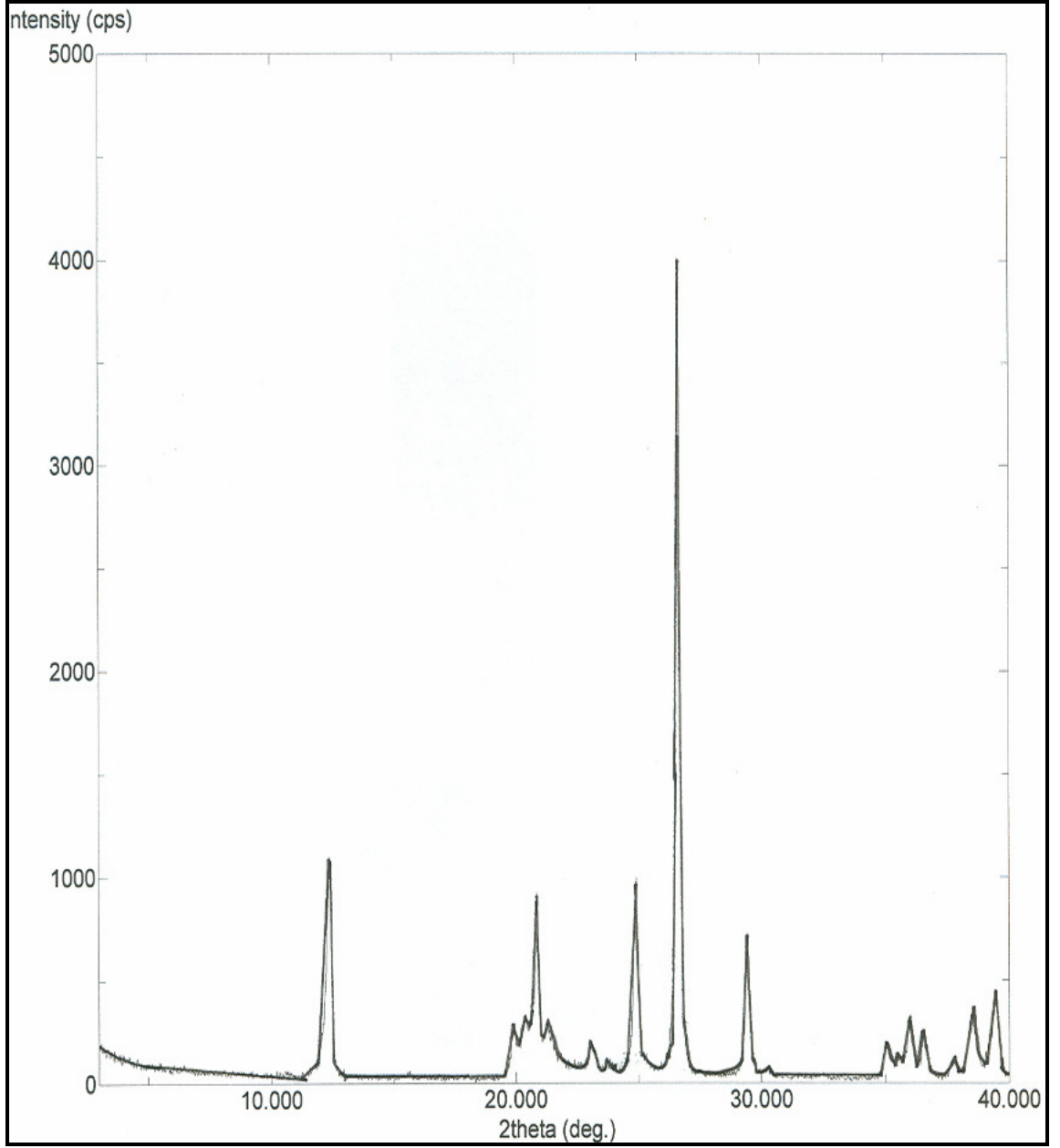
Tuvka kilinin ana mineralinin kuvars ve kaolinit ve yan minerallerinin illit, montmorillonit ve kalsit olduğu belirlenmiştir.

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



şekil 3.8. Türkmen kilinin XRD analizi eğrisi

Pembe Kaolenin ana minerallerinin kuvars, kaolinit ve yan mineralinin de kalsit olduğu belirlenmiştir.



şekil 3.9. Pembe kaolenin XRD analizi eğrisi

Çizelge 3.5. Pembe kaolenin XRD analizi değerlendirme tablosu

		ASTM Standat Değerleri						
	KUARS							
2 θ	26,5	20,82	39,44	36,52				
d	3,34	4,26	2,28	2,45				
I/I ₀	100	35	12	12				
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ	26,5		39,4	36,5				
d	3,36		2,27	2,46				
I/I ₀	116mm %100		12mm	7mm				
	KAOLİNİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	24,80	12,30	19,80	38,42	34,94	35,80	37,66	
d	3,58	7,18	4,48	2,34	2,56	2,50	2,38	
I/I ₀	100	100	80	90	80	80	80	
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ	24,80	12,4	19,80	39,4	35,00	36,00	36,5	
d	3,58	7,13	4,48					
I/I ₀	29,5 %90	32,5 %100	8,5 %26					
	İLLİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	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 ₀	100	95	90	90	45	40	40	40
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ								
d								
I/I ₀								
	KALSİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	29,44	48,64	23,08	43,22	39,48			
d	3,03	1,87	3,85	2,09	2,28			
I/I ₀	100	34	29	27	18			
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ	29,5	S.D	23,02	S.D.	39,4			
d	3,025		3,86					
I/I ₀	21mm %100		6mm %29					
	MONTMORİLLONİT	ASTM Standat Değerleri						
2 θ	6,40	19,93	28,30	35,44				
d	13,8	4,45	3,15	2,53				
I/I ₀	100	30	10	5				
		Grafikte Bulunan Değerler						
2 θ		19,93	27,8	35,7				
d								
I/I ₀								

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 (Na_2O , K_2O) belirlenmesi için alev fotometresi ve diğer oksitlerin (CaO , MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3) belirlenmesi için atomik absorpsiyon spektrometresi kullanılmıştır. Killerin kimyasal analizleri Toprak Seramik Fabrikası (Eskişehir) laboratuvarlarında yapılmıştır. Çizelge 3.6'da killerin kimyasal analizleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Killerin kimyasal analizi

	Türkmen kili	Tuvka Kili	Pembe Kaolen
SiO_2	66,44	65,81	61,33
Al_2O_3	13,80	12,59	20,32
Fe_2O_3	0,67	0,94	0,32
TiO_2	0,34	0,14	--
CaO	5,94	6,15	5,22
MgO	0,36	1,29	0,07
Na_2O	1,98	0,07	0,17
K_2O	2,31	3,17	0,17
A.Za	7,53	9,04	11,51
TOPLAM	99,37	99,20	99,33

3.4. Biçimlendirilebilirliğin Belirlenmesinde Yapılan Deneyler

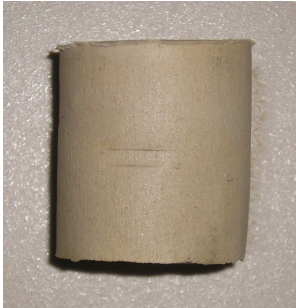
3.4.1. Biçimlendirme sınır doğruları ve maksimum deformasyon miktarının belirlenmesi

BSD eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan numunelerin hazırlanmasında ilk olarak homojen olarak yoğrulan killerin alçı kalıp üzerinde farklı sürelerde bekletilmesi ile başlanmıştır. Bu şekilde farklı nem içerikli numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra farklı nem içerikli çamurlar çapı 25 mm olan silindir kalıp içerisine doldurulup bir piston yardımıyla sıkıştırılıp silindir şeklinde şekillendirilmiştir (Resim 3.1).

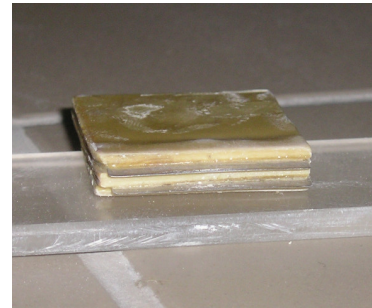


Resim 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan silindir ve piston

Elde edilen silindirik numunelerin boyları; L/D oranları 0,75 , 1 , 1,25 , 1,5 olacak şekilde kesilmiştir(21). Hazırlanan numunelerin (Resim 3.2) ekvator bölgeleri Resim 3.3'de görülen bir marka yardımı ile üç ayrı yerden markalanmıştır. Markalama çizgileri arasındaki mesafe 2,1 mm'dir.



Resim 3.2. BSD testlerinde kullanılan numune



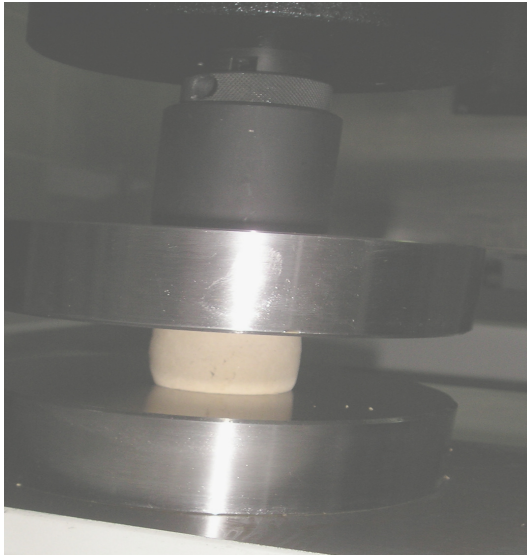
Resim 3.3. Markalamada kullanılan marka

Markalama işleminden sonra numuneler basma cihazının çeneleri arasına konularak farklı deformasyon hızlarında (5 ve 40mm/min) ilk çatlak görülünceye kadar deforme edilmiştir(Resim 3.4). Deformasyon işleminden sonra numuneler basma cihazının çeneleri arasından alınıp çaptaki değişim miktarı 1/50 verniyeli kumpas,

markalama çizgileri arasındaki değişimler ise 1/50 hassasiyeti verniyeli olan bir mikroskopta ölçülmüştür. Daha sonra numunelerin yaş ağırlıkları 0,01 hassasiyetli terazi ile tartılıp $100 \pm 0,5$ °C'de sabit tartıma gelinceye kadar (yaklaşık 3 saat) kurutulmuştur. Sabit tartıma gelen numunelerin kuru ağırlıkları (M_{kuru}) tartılarak numunelerin % nem miktarı aşağıdaki formülle bulunmuştur.

$$\% \text{ Nem Miktarı} = (M_{yaş} - M_{kuru}) / M_{yaş} \times 100 \quad [3.4]$$

Basma deneylerinde Shimatzu marka 500 kg'lık test cihazı kullanılmıştır.(Resim 3.5)



Resim 3.4. Deformasyonun yapılması



Resim 3.5. Basma deneylerinde kullanılan test cihazı

Çekme gerinimi;

$$(\epsilon_{\theta}) = \ln (D_f / D_o) \quad [3.5]$$

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

Basma gerinimi ise;

$$(\epsilon_z) = \ln (l_0/l_f) \quad [3.6]$$

Formülü yardımı ile bulunmuştur. Burada l_0 ilk boy, l_f ise deformasyon sonrası markalama çizgileri arasındaki mesafedir. Ölçümler üç markalanmış çizgi için yapılmış ve ortalaması alınmıştır.

Elde edilen veriler y eksenini çekme gerinimi, x eksenini de basma gerinimi olacak şekilde grafiğe geçirilerek her nem aralığı ve deformasyon hızı için BSD'ları elde edilmiştir. BSD'nın y eksenini kestiği noktalar ekstrapolasyonla bulunmuştur. Farklı deformasyon hızlarında yapılan deneylerden elde edilen miktarı (ϵ^*) % nem miktarına karşılık grafiğe geçirilerek maksimum deformasyon miktarının nem ile değişimi elde edilmiştir.

3.4.2. Akma noktaları ve akmanın nem ile değişim grafiğinin elde edilmesi

Akma noktalarının belirlenmesinde Shimadzu marka 500 kg'lık Universal test cihazı kullanılmıştır. (Resim 3.5) Akma noktasının belirlenmesinde kullanılan numuneler, daha önce BSD eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan numuneler gibi hazırlanmıştır. Fakat numune L/D oranlarının ve deformasyon hızının farklı olmasının akma noktasını etkilemeyeceği bilindiğinden L/D oranı 1, deformasyon hızı da 20mm/min seçilmiştir. Akma noktalarının belirlenmesinde numunede ilk çatlak görülünceye kadar değil akma noktası bilgisayar ekranından görülünceye kadar deformasyona devam edilmiştir. Farklı nem içerikli deforme edilmiş numunelerin yaş ağırlıkları ($M_{yaş}$) 0,01 hassasiyetindeki elektronik terazi ile tartılmıştır. Daha sonra bu numuneler 100 ± 5 °C'de sabit tartıma gelinceye kadar (yaklaşık 3 saat) kurutulmuştur. Sabit tartıma gelen numunelerin kuru ağırlıkları (M_{kuru}) tartılarak numunelerin % nem miktarı Eş. 3.4 kullanılarak bulunmuştur.

Universal test cihazından elde edilen eğrilere % 0,2 ofset kuralı uygulanmış ve akma noktaları belirlenmiştir.

3.4.3. Optimum nemin bulunması (Biçimlendirme göstergesi)

Biçimlendirilebilirlik akma gerilimi ile maksimum deformasyon miktarının çarpımından elde edilmiştir. Farklı deformasyon hızlarında elde edilen 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 Eş. 3.4 kullanılarak bulunmuştur. Y eksenini ezilme yüksekliği ve X eksenini % nem miktarı olacak şekilde grafiğe geçirilmiştir. Y eksenindeki 16 mm'den elde edilen doğruya çizilen çizginin X eksenindeki izdüşümü bulunup, bu değer optimum nem miktarı olarak tespit edilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

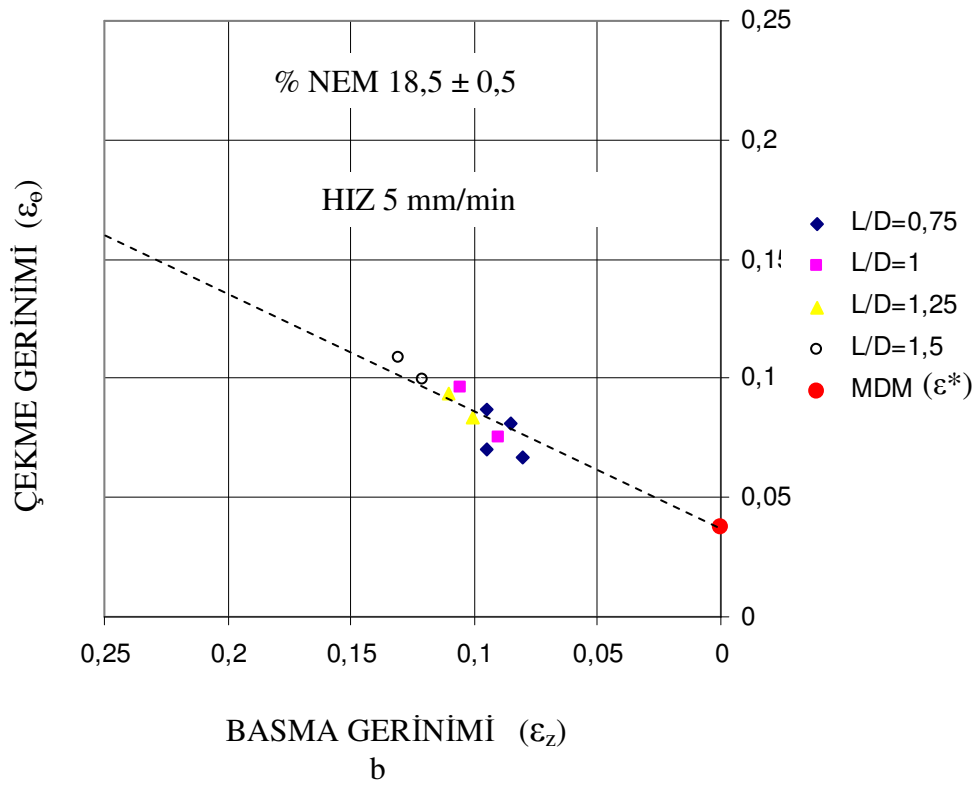
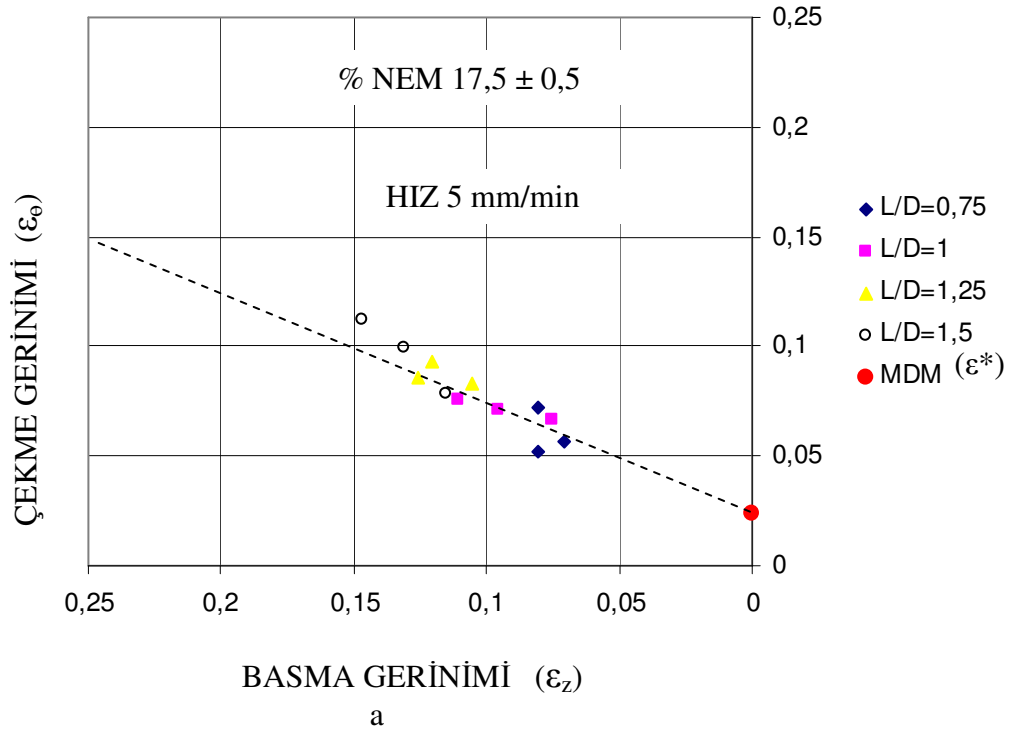
4.1. Biçimlendirme Sınır Doğrularına Deformasyon Hızının Etkisi

Farklı deformasyon hızlarında basılan numunelerin BSD'lerinin % nem oranına bağlı değişimleri Tuvka kili için Şekil 4.1.-4.2 (a-f) Türkmen kili için Şekil 4.3.- 4.4. (a-e) ve Pembe kaolen için Şekil 4.5.-4.6.(a-d)'de verilmiştir.

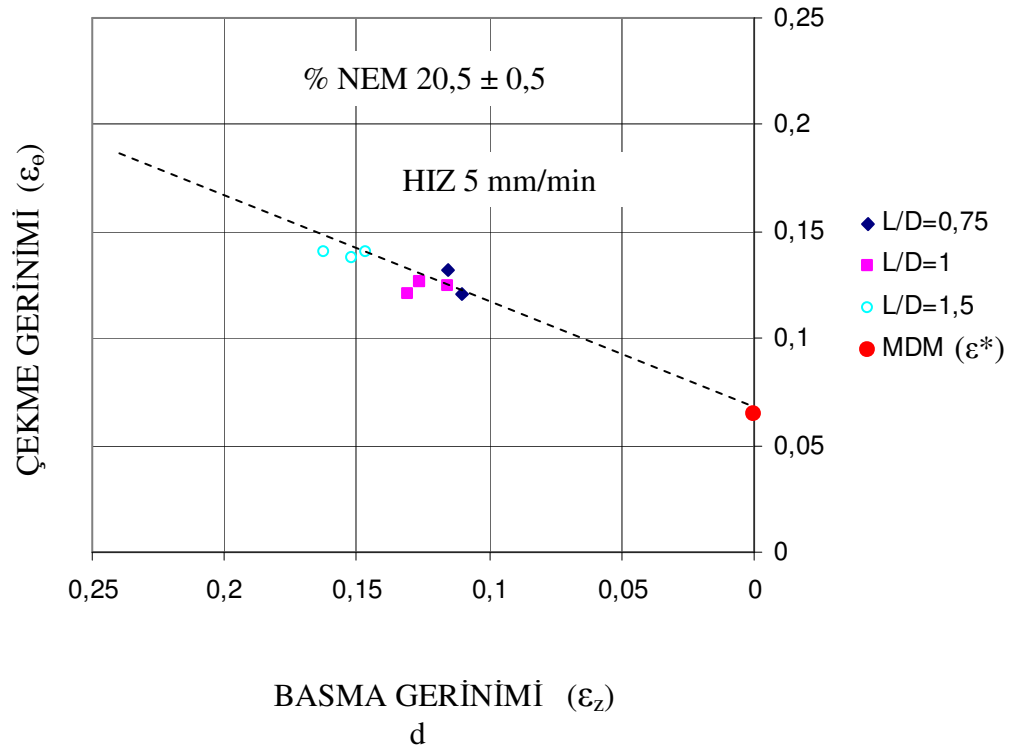
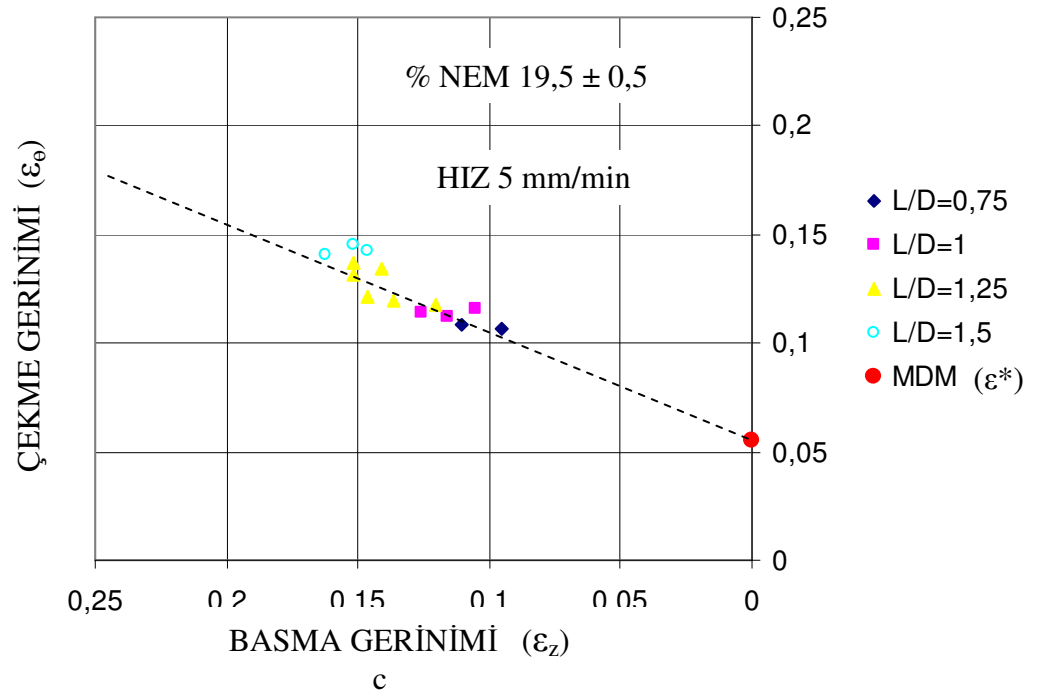
Basma deneylerinde deformasyon hızı 5 ve 40 mm/min seçilmiş ve numunelerin boylarının L/D oranları 0,75 , 1 , 1,25 ve 1,5 olarak alınmıştır.

Şekillerde görüleceği gibi BSD'rı için elde edilen noktalara en uygun doğru çizme (Linear curve fitting) yöntemi uygulanmış ve çizilen doğruların eğiminin 1/2'ye çok yakın olduğu görülmüştür. BSD'nın çekme gerinimini (ϵ_0), kestiği nokta MDM (ϵ^*) olarak tanımlanmıştır.

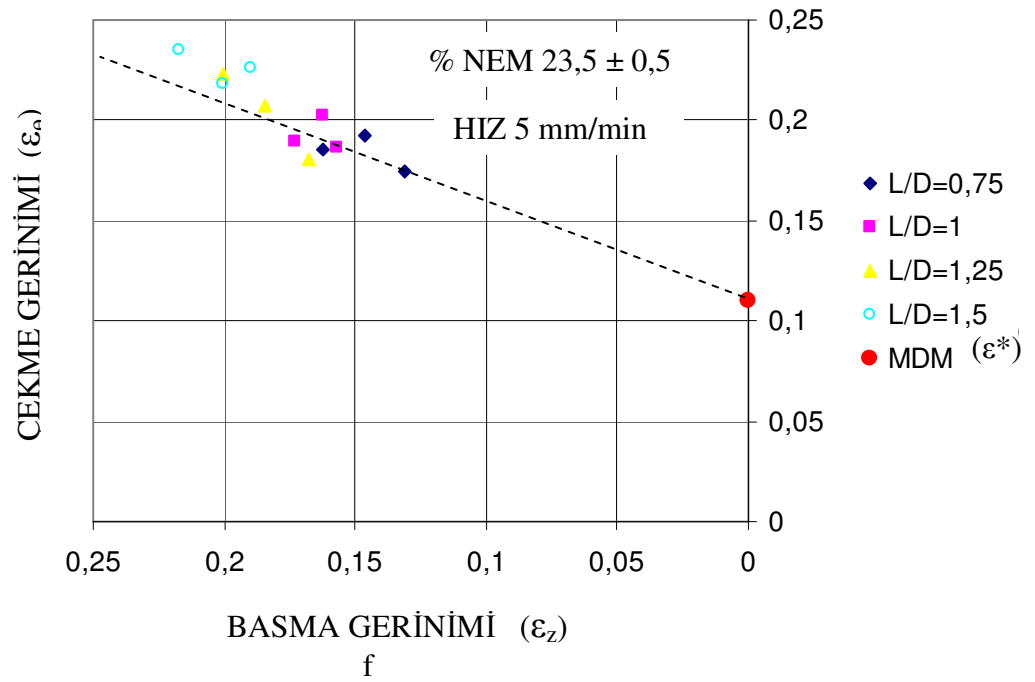
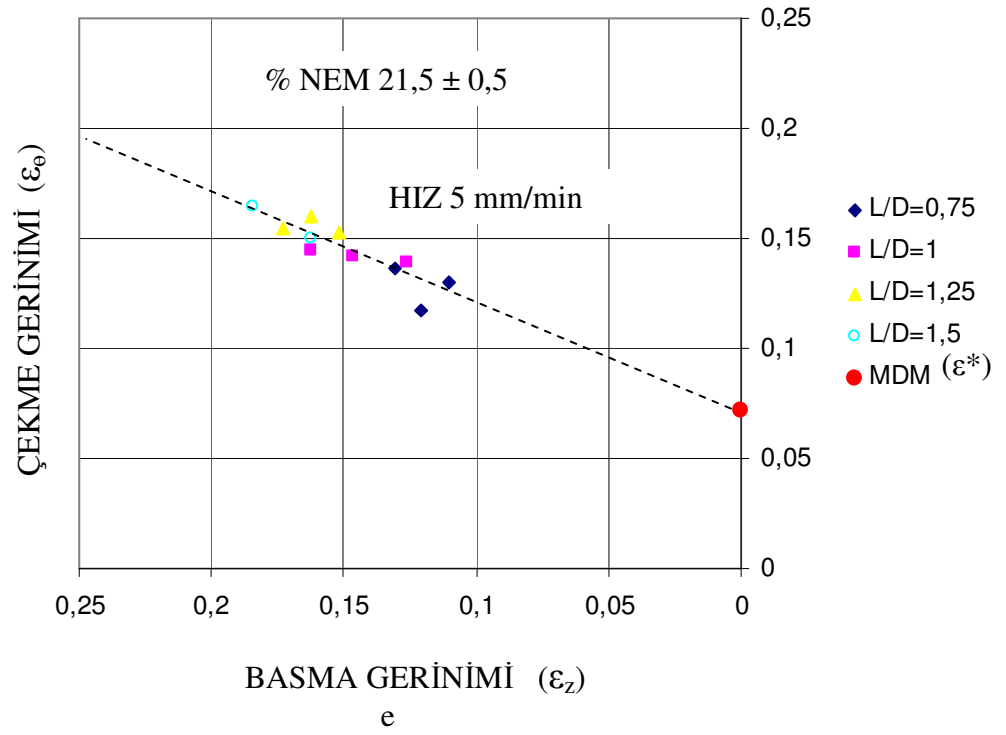
BSD grafiklerinden görüldüğü gibi deformasyon hızları şekillendirilebilirliği etkilemiştir. Deformasyon hızlarındaki artışla MDM artmıştır. Ayrıca % nem miktarındaki artış ile tüm şartlarda maksimum deformasyon miktarı da artmıştır.



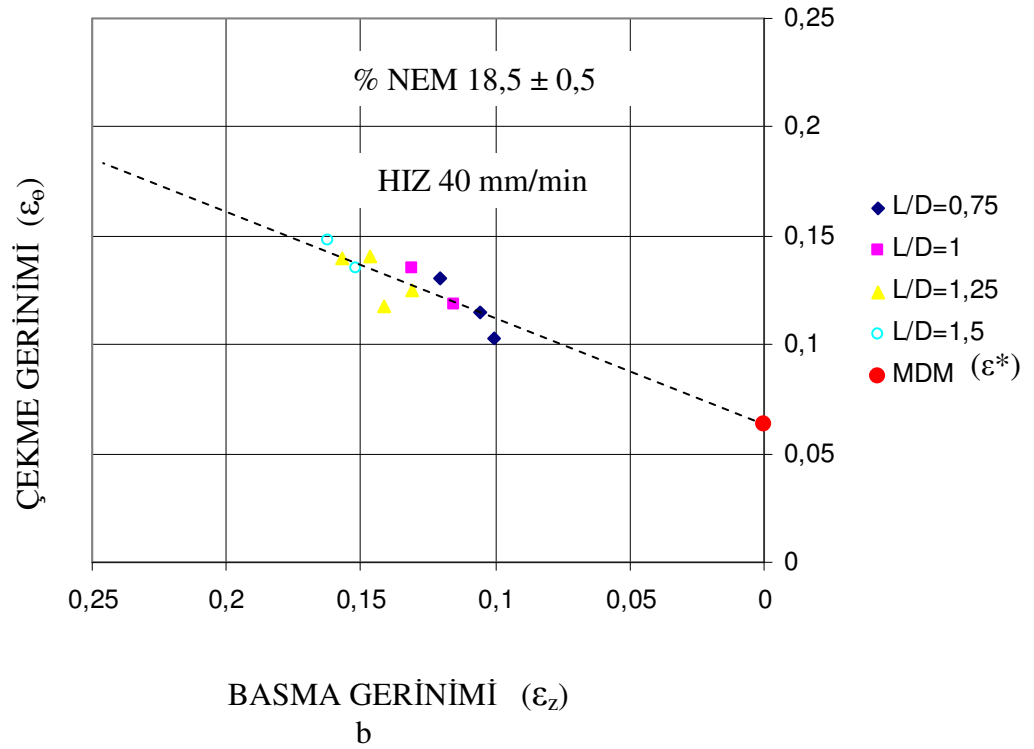
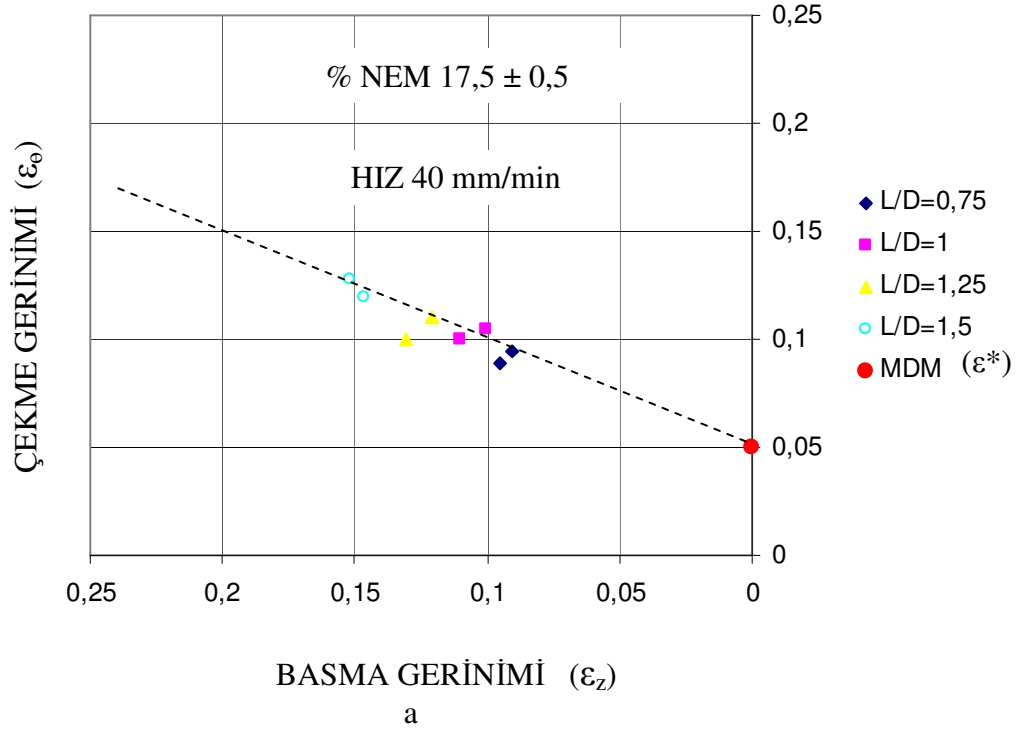
Şekil 4.1. Tuvka kilinin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (a-b)



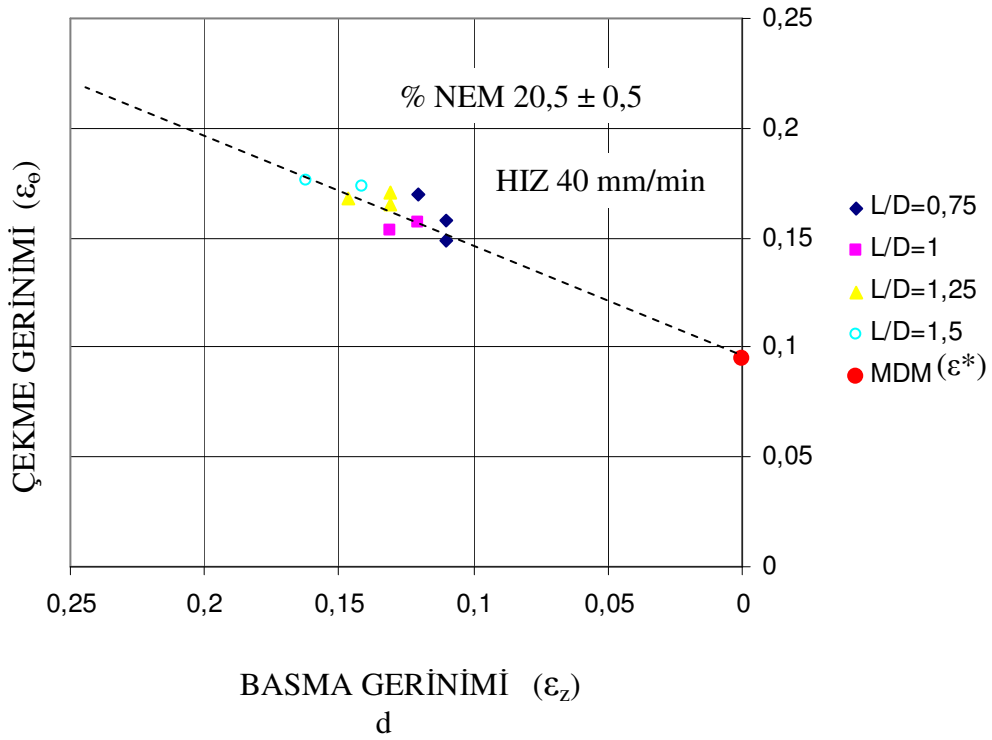
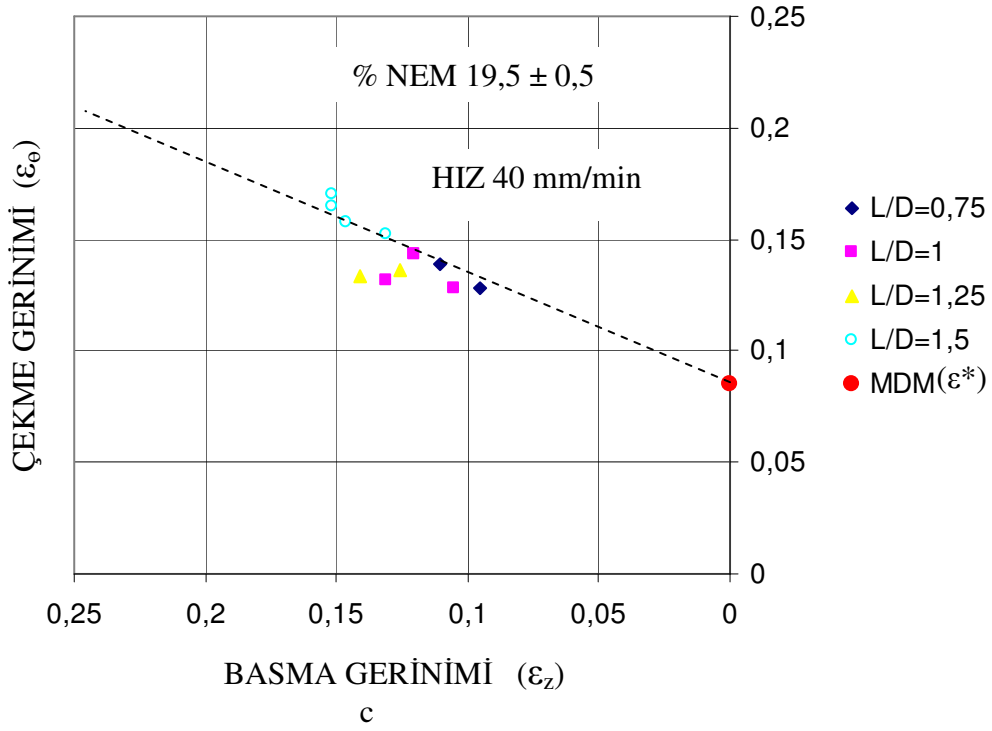
Şekil 4.1. (Devam) Tuvka kilinin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (c- d)



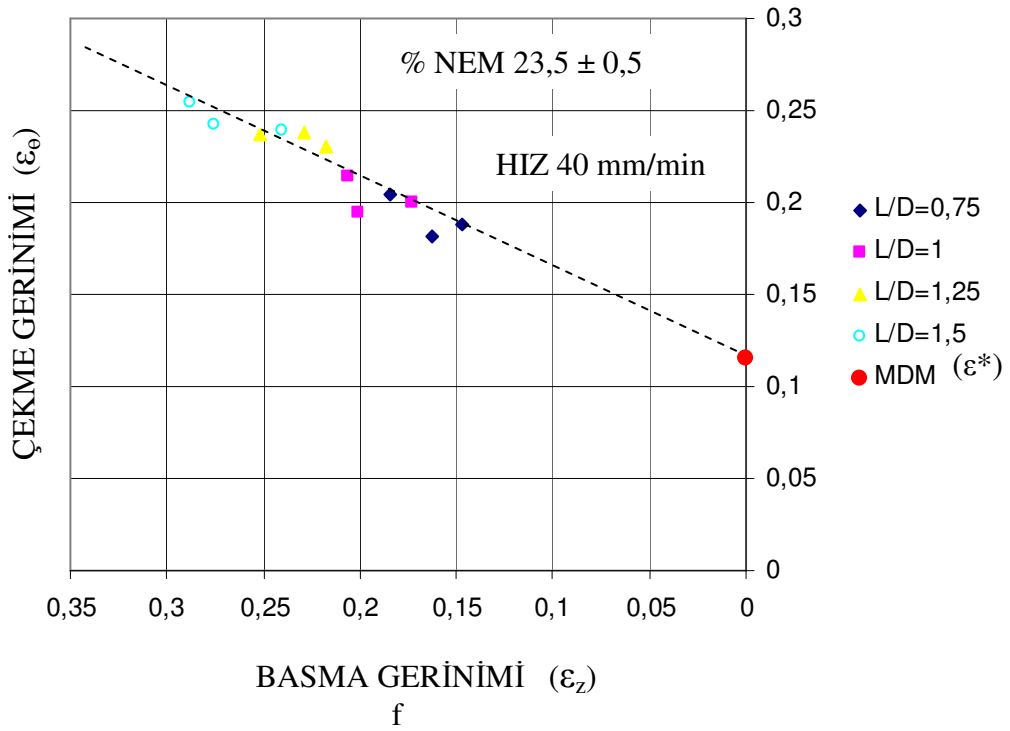
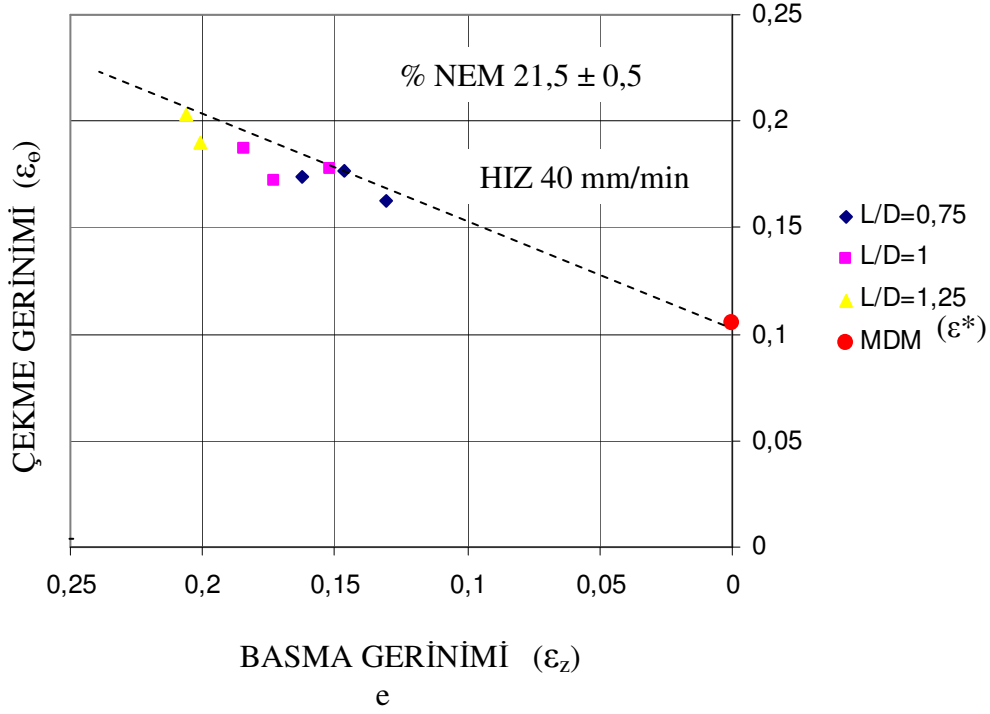
Şekil 4.1. (Devam) Tuvka kilinin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (e-f)



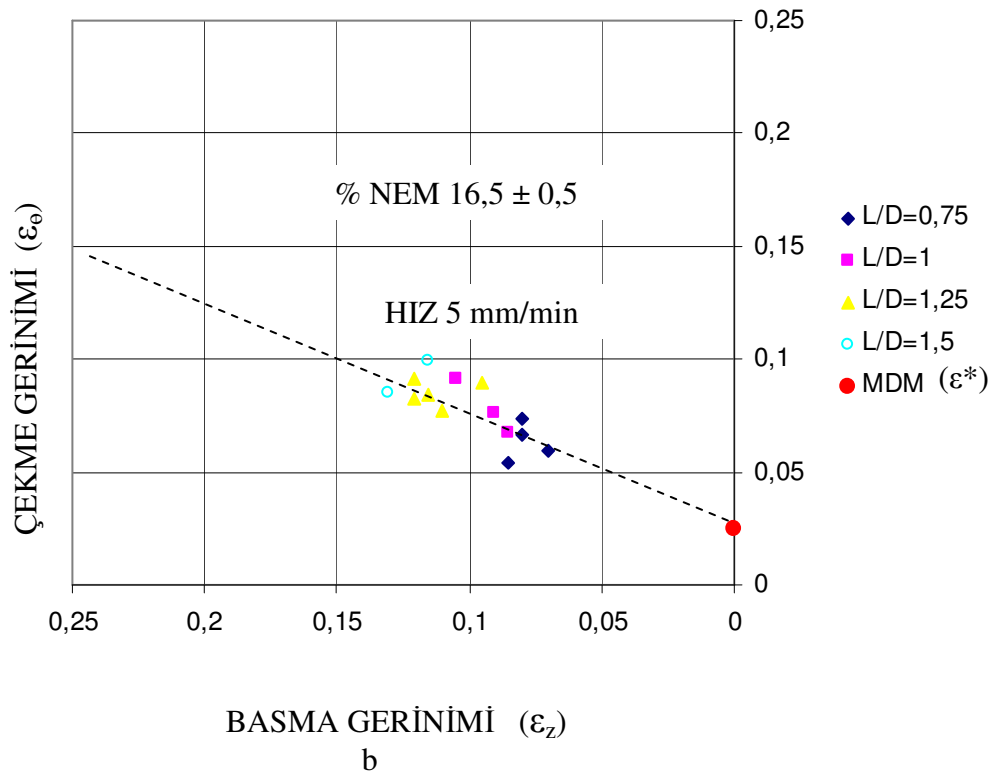
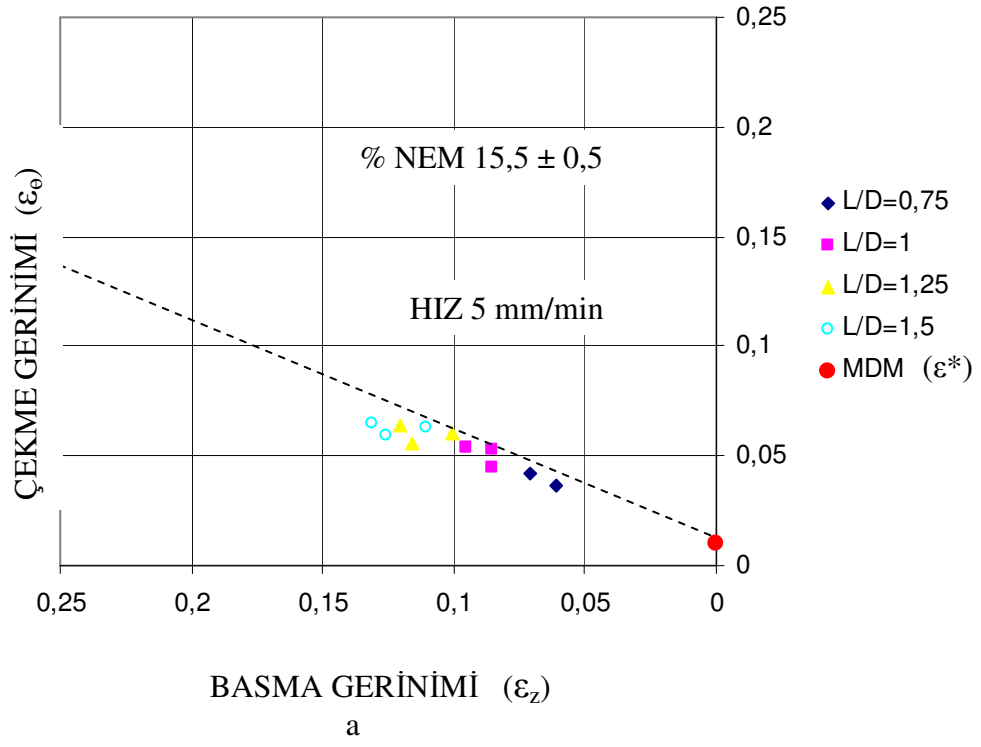
Şekil 4.2. Tuvka kilinin 40 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (a-b)



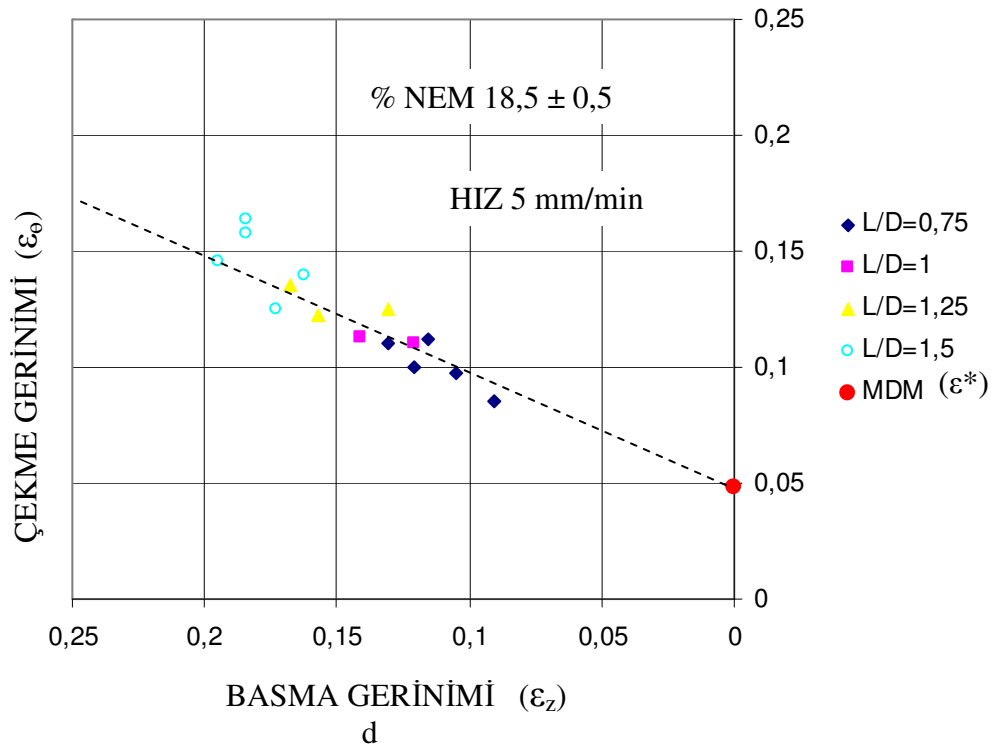
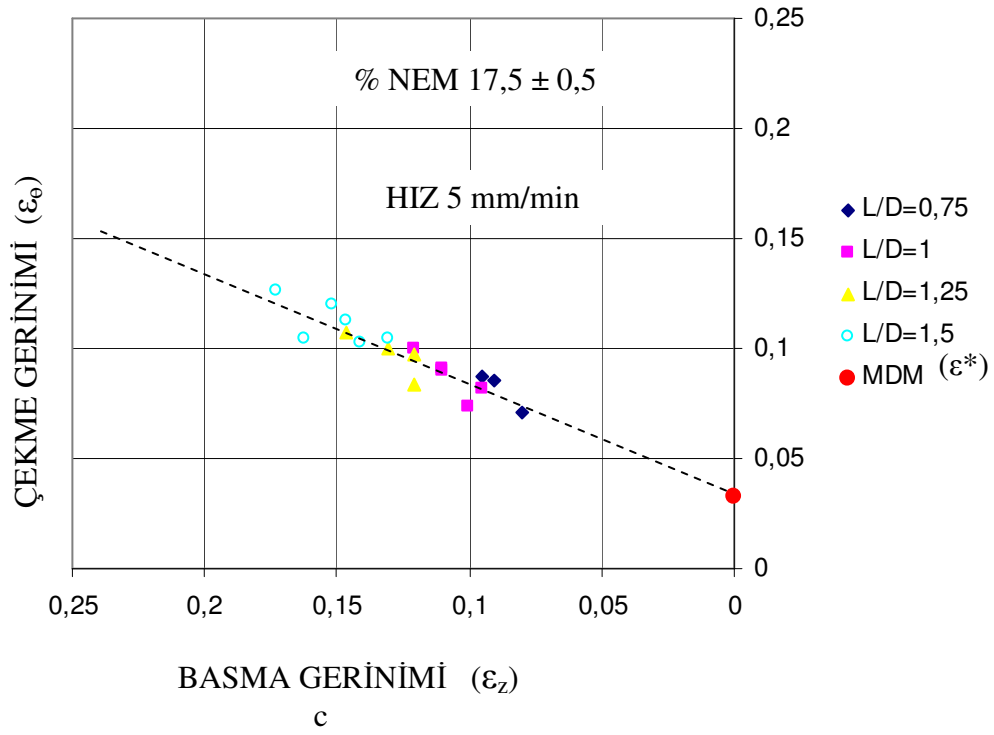
Şekil 4.2.(Devam) Tuvka kilinin 40 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun $\% \text{ nem}$ miktarı ile değişimi (c-d)



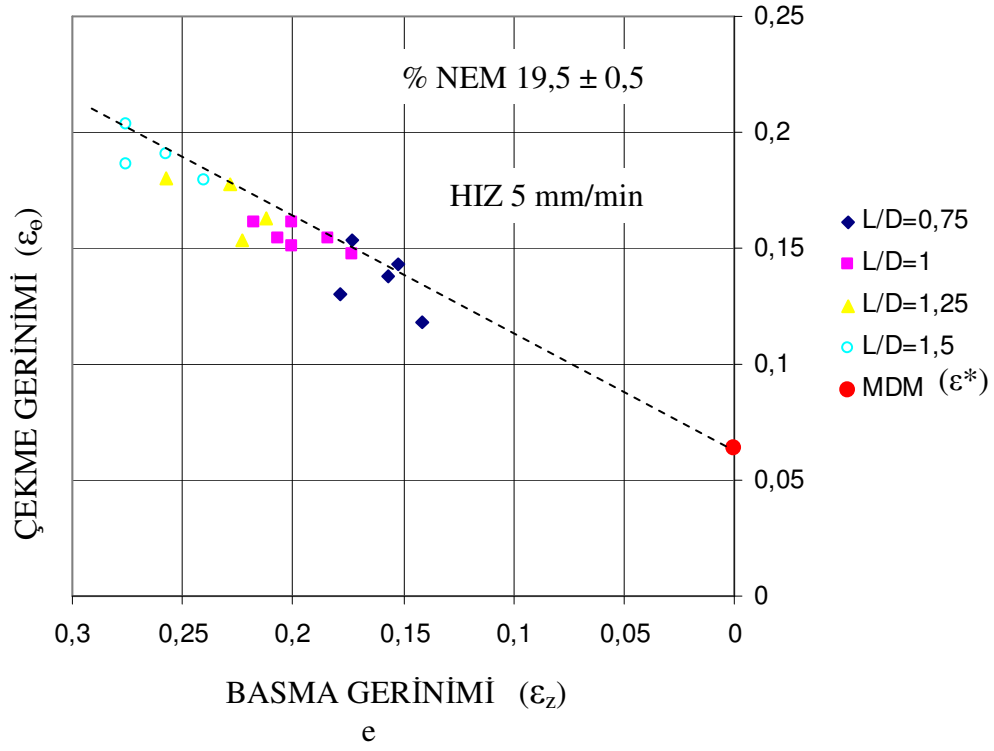
Şekil 4.2.(Devam) Tuvka kilinin 40 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (e-f)



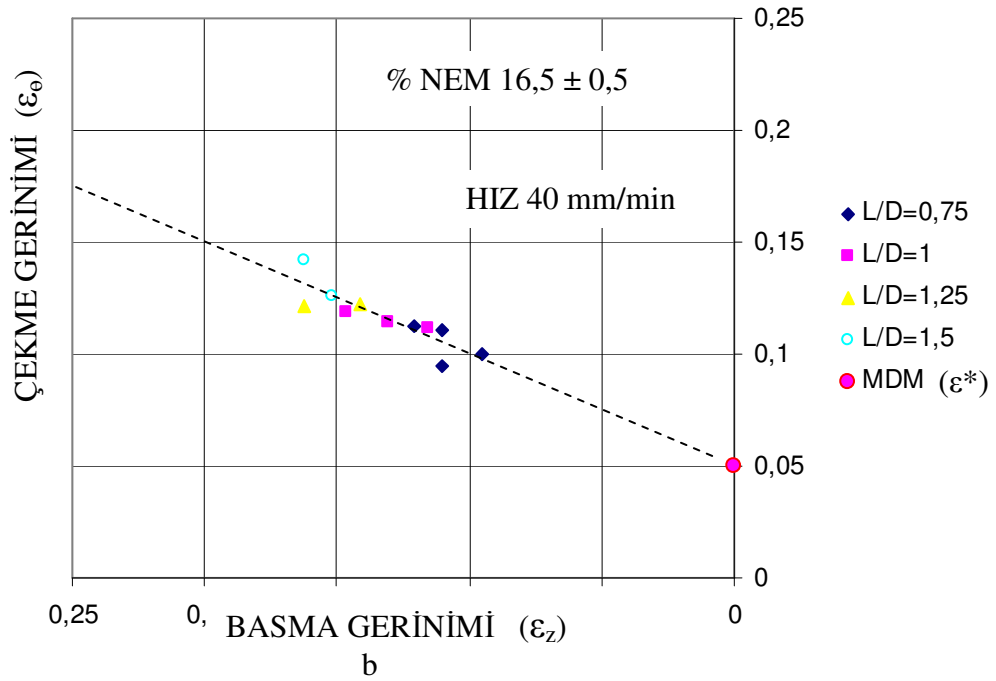
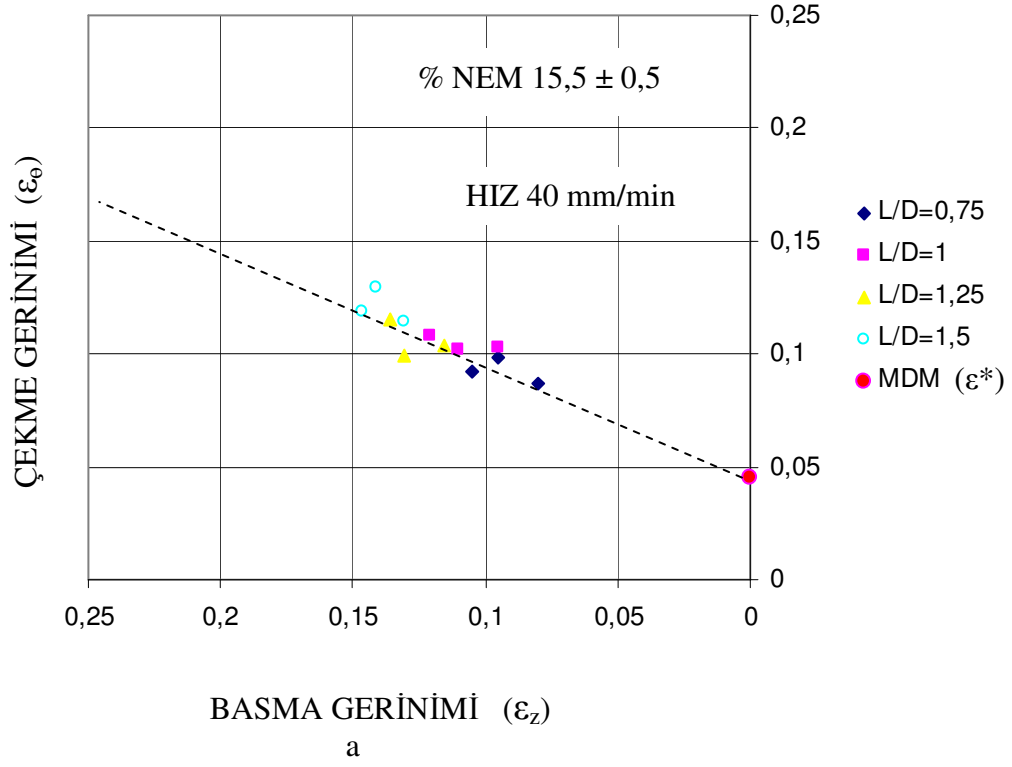
Şekil 4.3. Türkmen kılının 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (a-b)



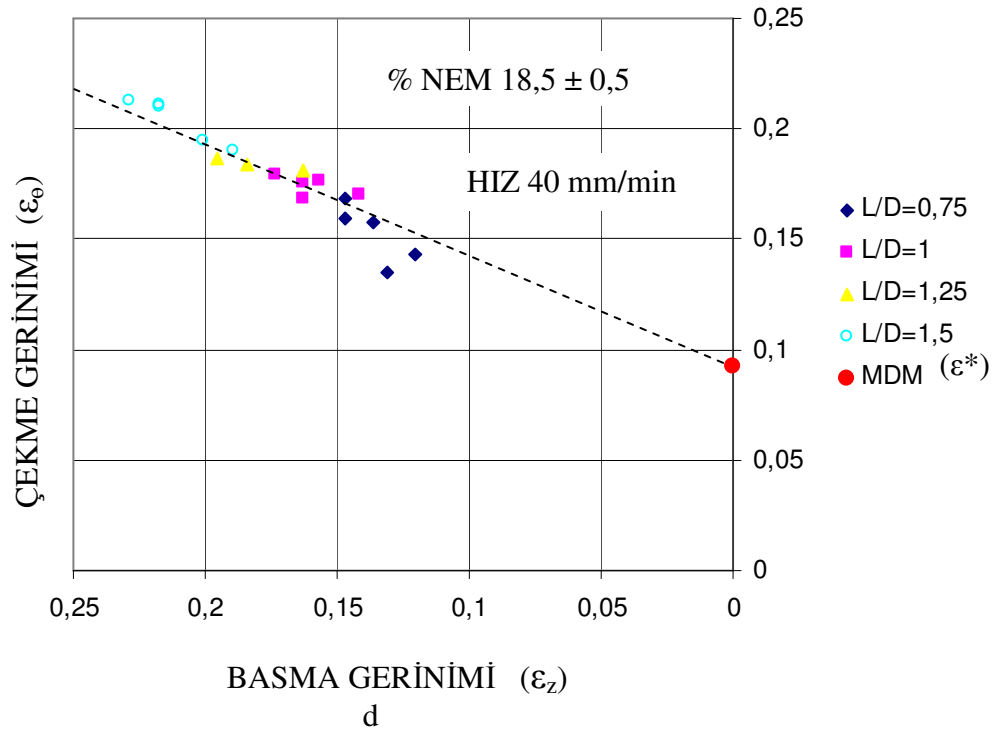
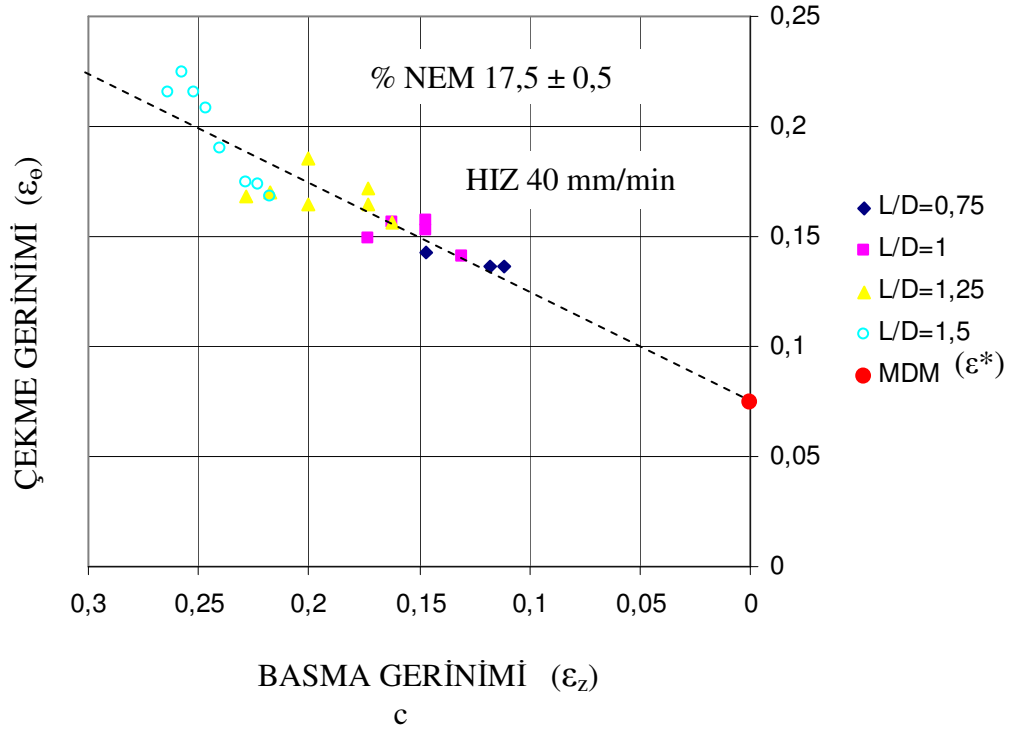
Şekil 4.3.(Devam) Türkmen kilinin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (c-d)



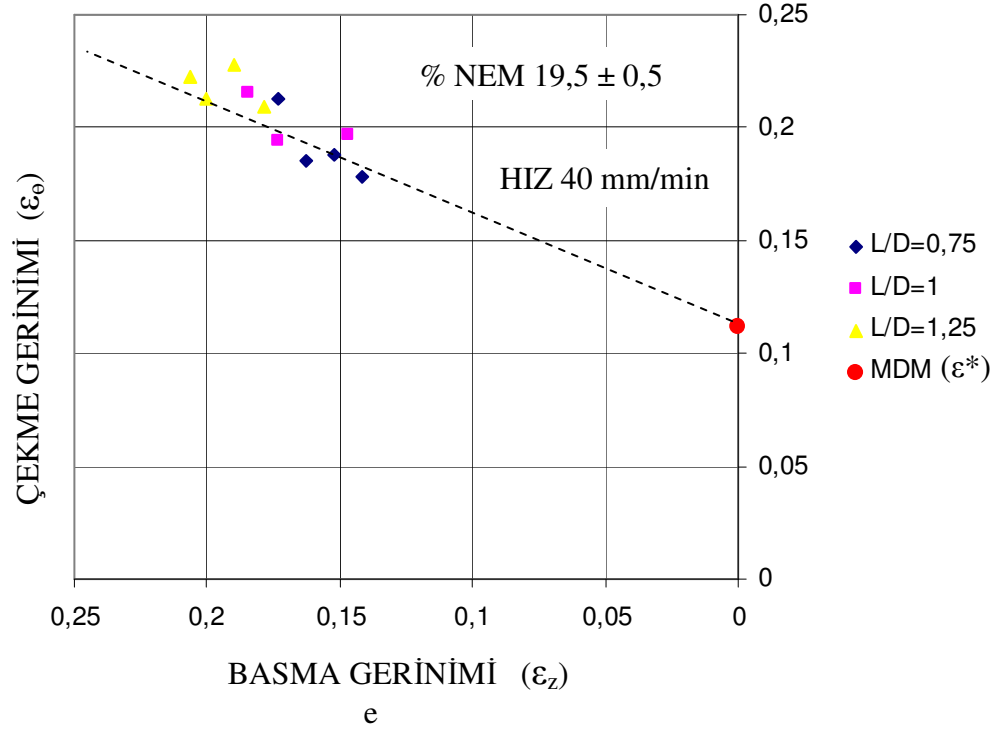
Şekil 4.3.(Devam) Türkmen kilinin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (e)



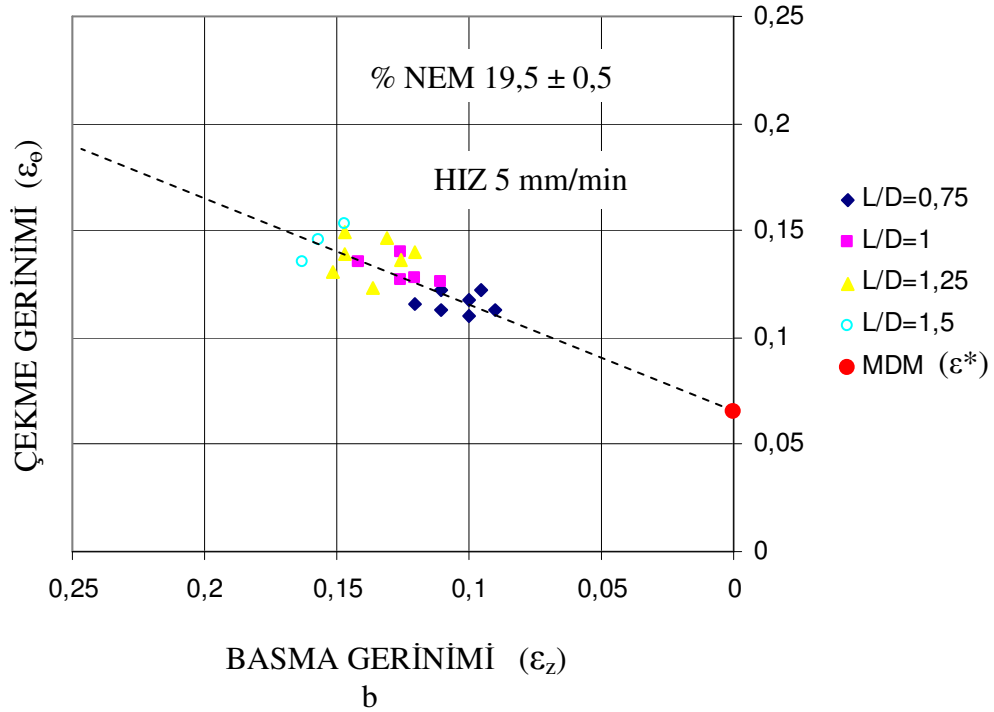
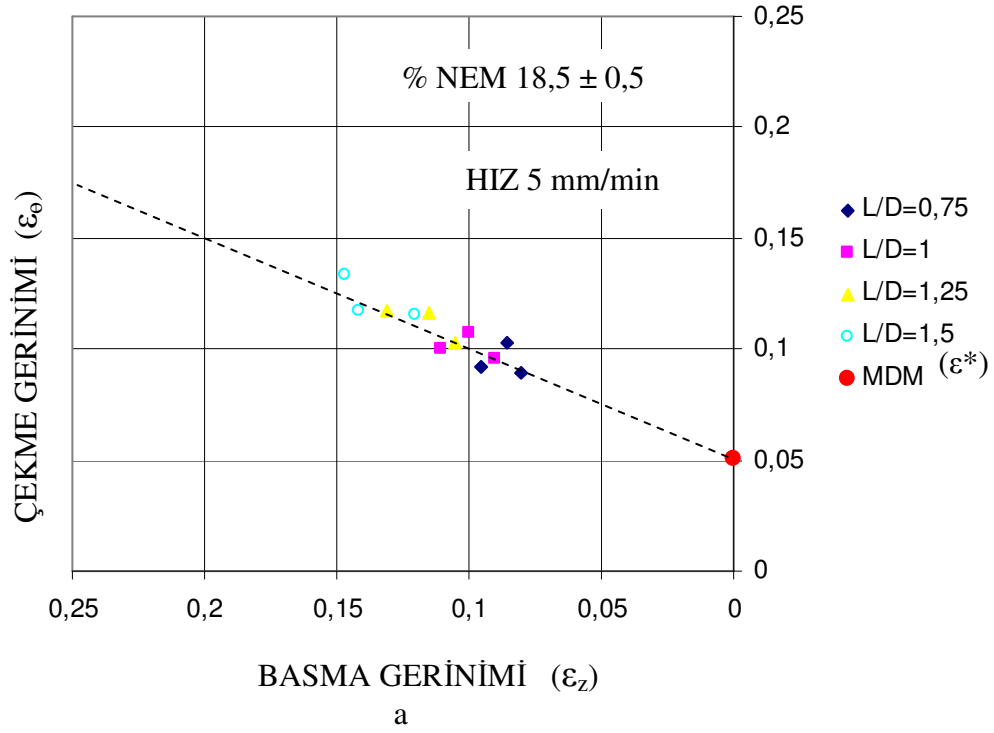
Şekil 4.4. Türkmen kilinin 40 mm/ min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (a-b)



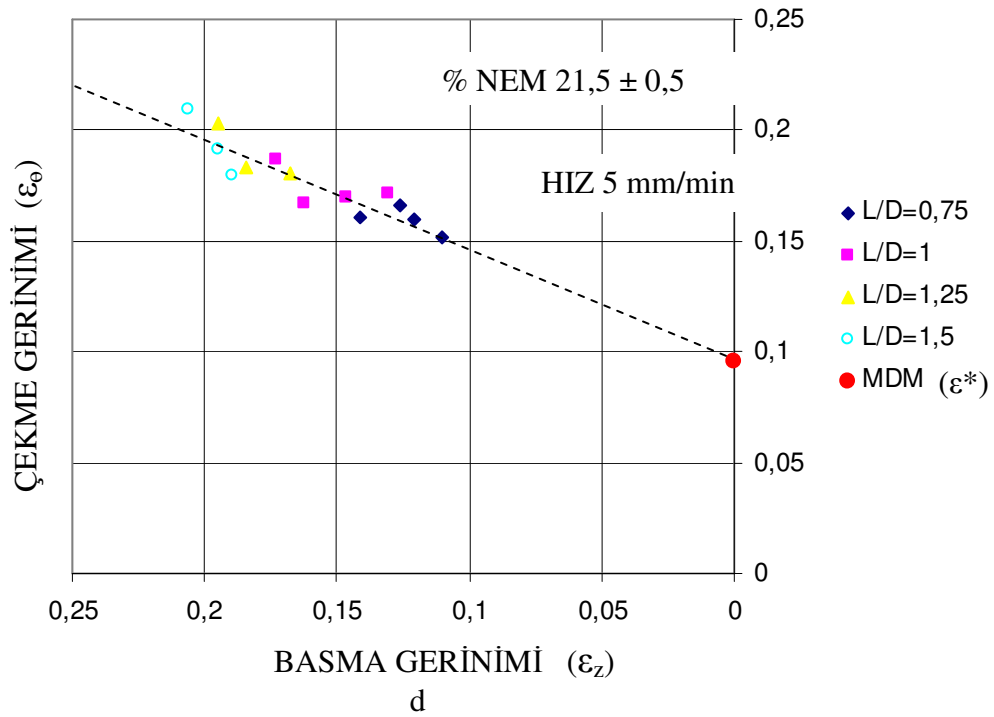
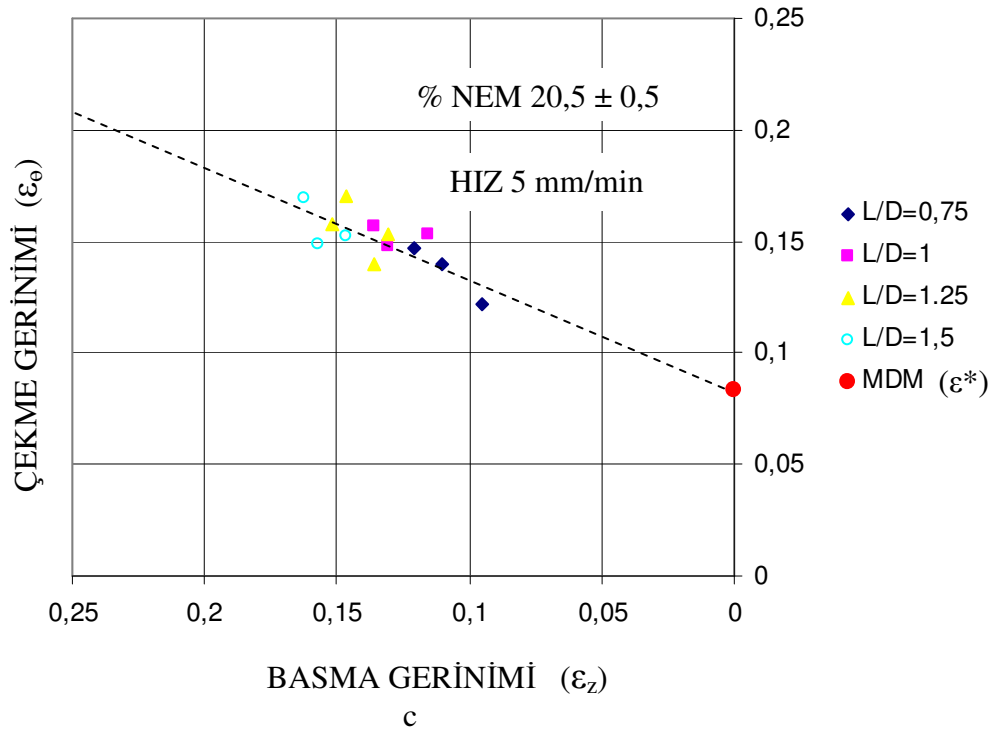
Şekil 4.4.(Devam) Türkmen kilinin 40 mm/ min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun $\%$ nem miktarı ile değişimi (c-d)



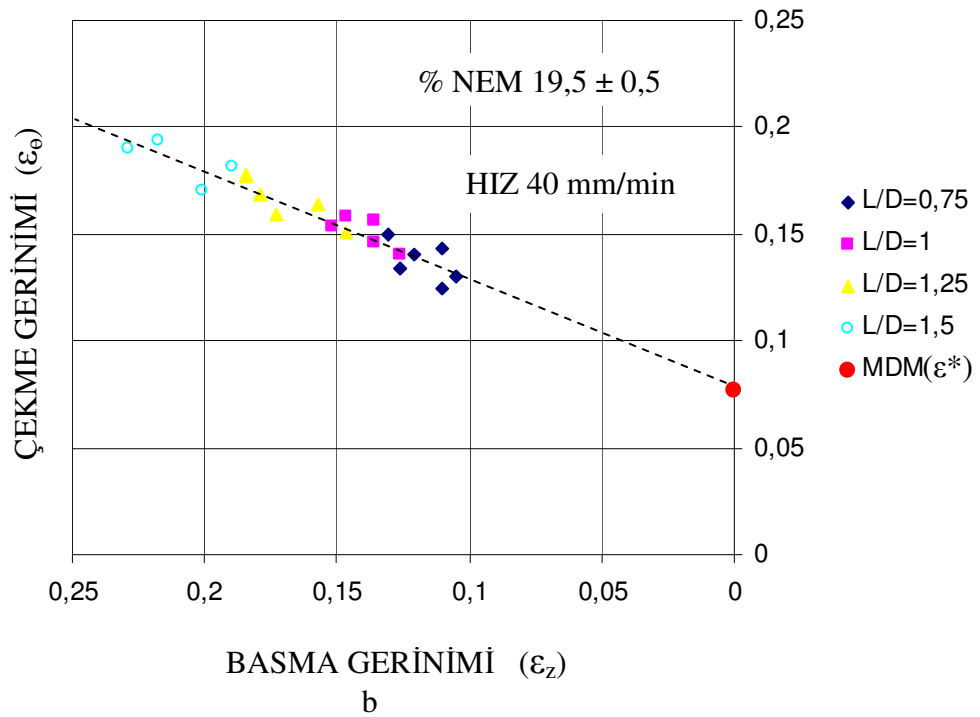
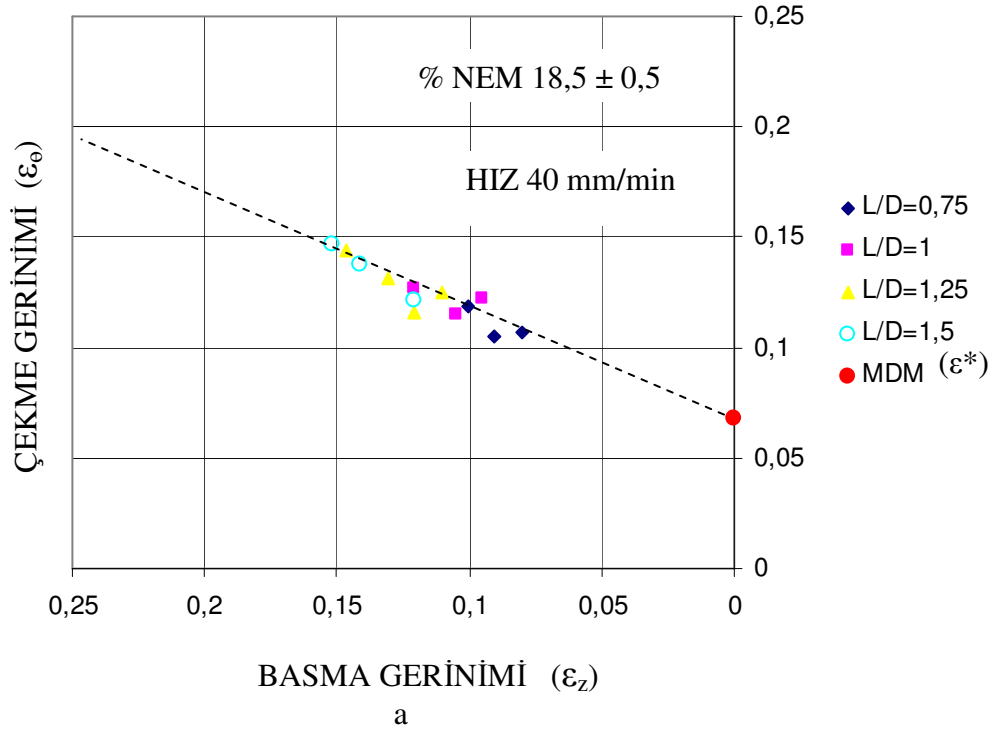
Şekil 4.4.(Devam) Türkmen kilinin 40 mm/ min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (e)



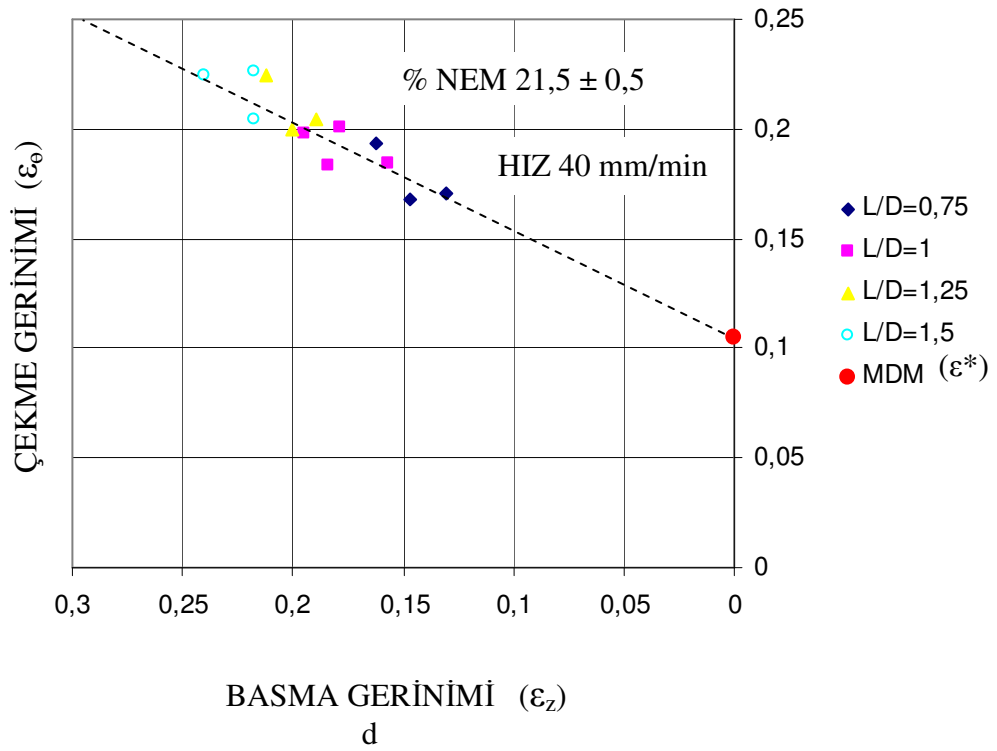
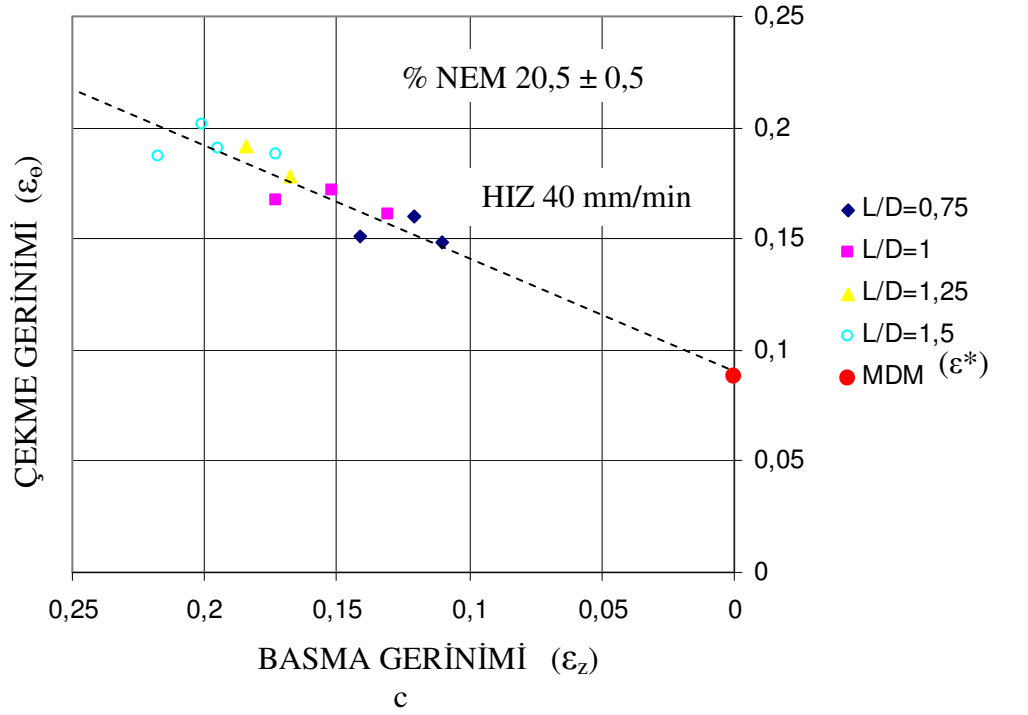
Şekil 4.5. Pembe kaolenin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (a-b)



Şekil 4.5.(Devam) Pembe kaolenin 5 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun % nem miktarı ile değişimi (c-d)



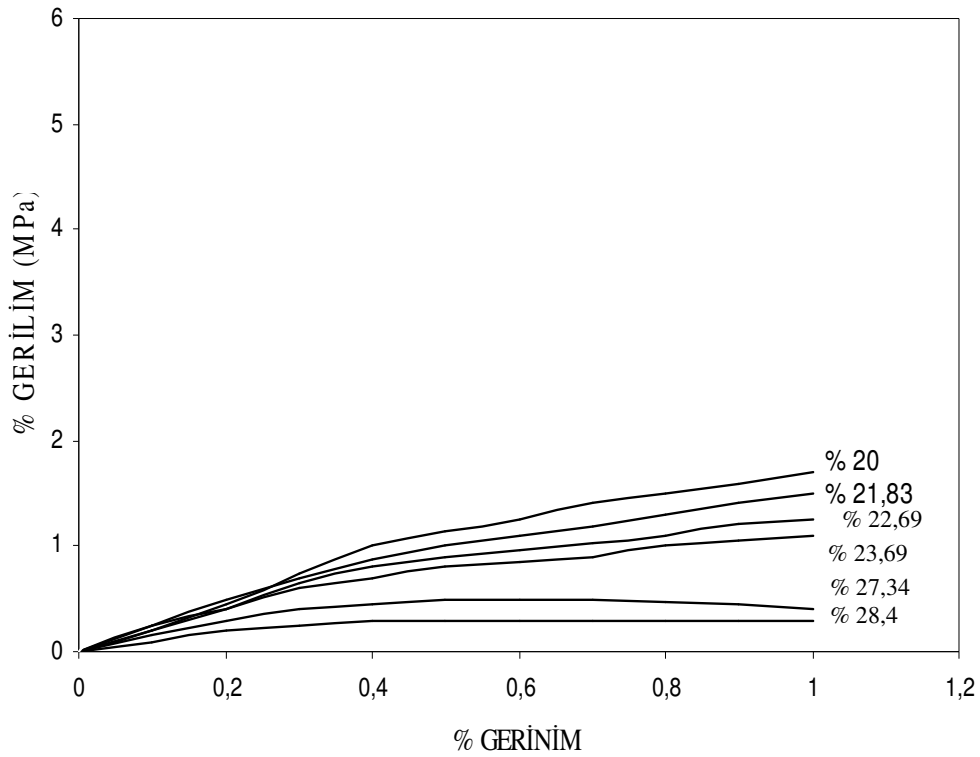
Şekil 4.6. Pembe kaolenin 40 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun $\% \text{ nem}$ miktarı ile değişimi (a-b)



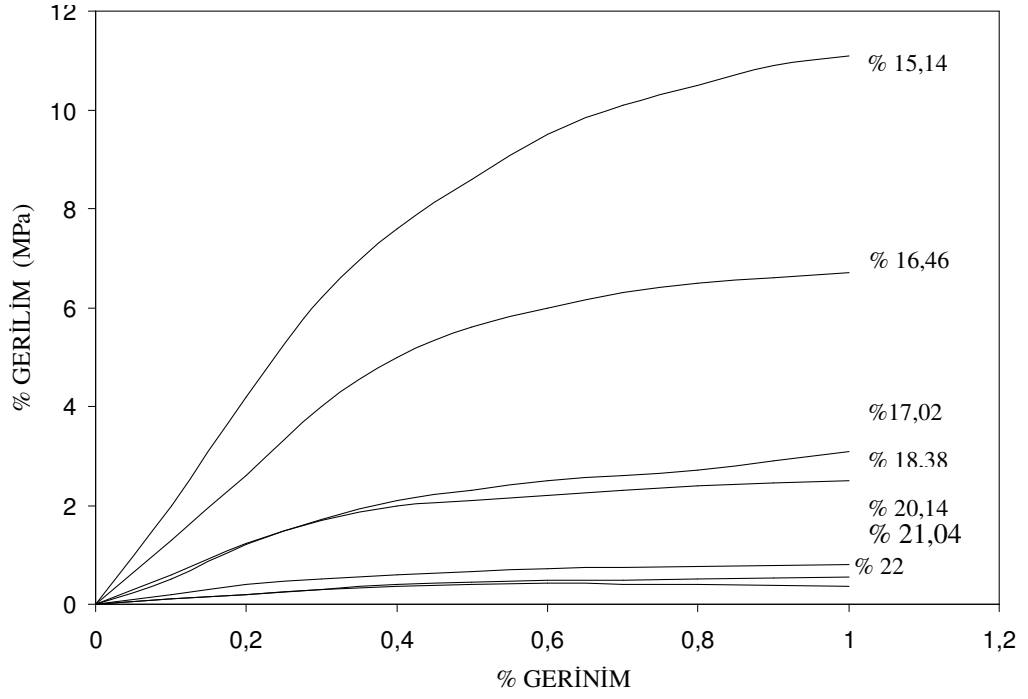
Şekil 4.6.(Devam) Pembe kaolenin 40 mm/min deformasyon hızında biçimlendirme sınır doğrusunun $\%$ nem miktarı ile değişimi (c-d)

4.2. Akma Noktası Belirlenmesi

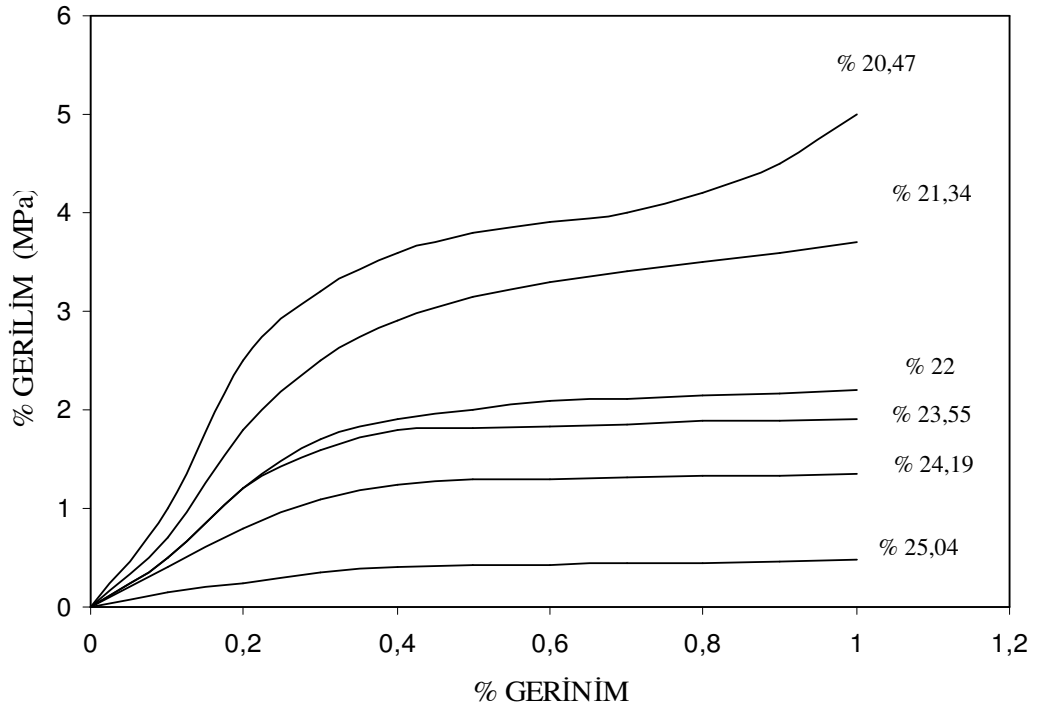
Tuvka, Türkmen killeri ve Pembe Kaolenin farklı % nem oranlarındaki ve 20mm/min deformasyon hızlarındaki akma gerilimleri sırayla Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir. Akma gerilimleri; Tuvka kili için % 19,67–28,40, Türkmen kili için % 15,14–22 ve Pembe Kaolen için % 20,47–25,04 % nem aralığında tespit edilmiştir. Elde edilen gerilim/gerinim eğrilerine % 0,2 offset kuralı uygulanarak akma gerilim değeri belirlenmiştir. Tüm şekillerden görüleceği gibi % nem oranındaki artışla akma gerilim değerleri düşmüştür. Ayrıca % nem oranındaki artışla deformasyon sertleşmesi azalmıştır.



Şekil 4.7. Tuvka kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi



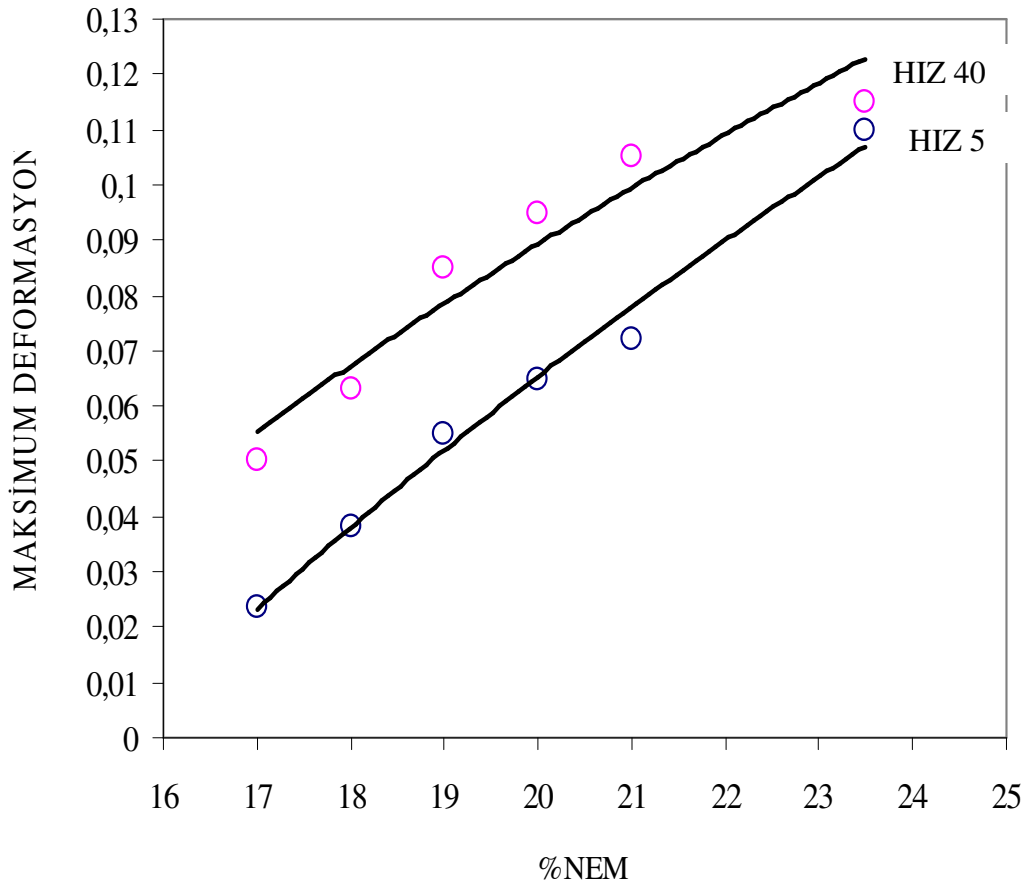
Şekil 4.8. Türkmen kilinin akma noktasının % nem oranına göre değişimi



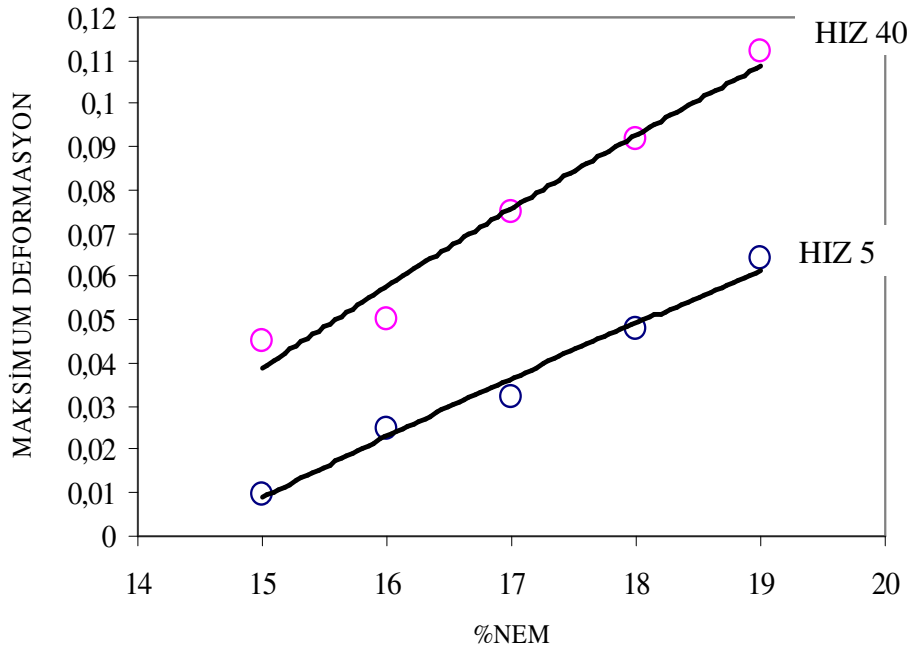
Şekil 4.9. Pembe Kaolenin akma noktasının % nem oranına göre değişimi

4.3. Maksimum Deformasyon Miktarı (ϵ^*)

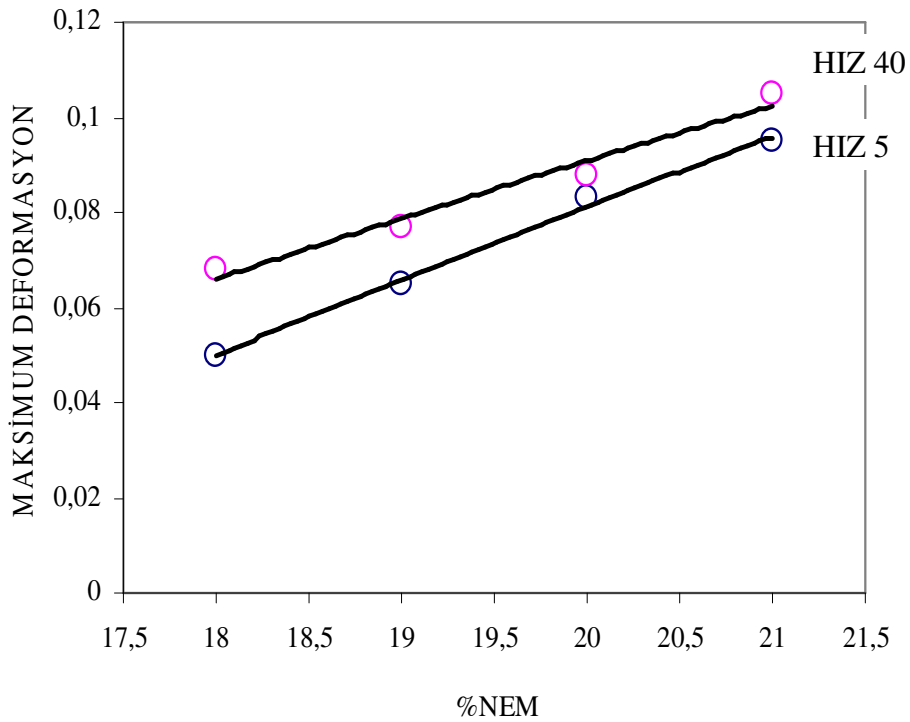
Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'daki BSD'ları kullanılarak maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi Tuvka kilinin Şekil 4.10, Türkmen kili için Şekil 4.11 ve Pembe Kaolen için Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekillerden maksimum deformasyon miktarının deformasyon hızındaki ve % nem orandaki artışla arttığı görülmektedir.



Şekil 4.10. Tuvka kili için farklı deformasyon hızlarındaki maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi



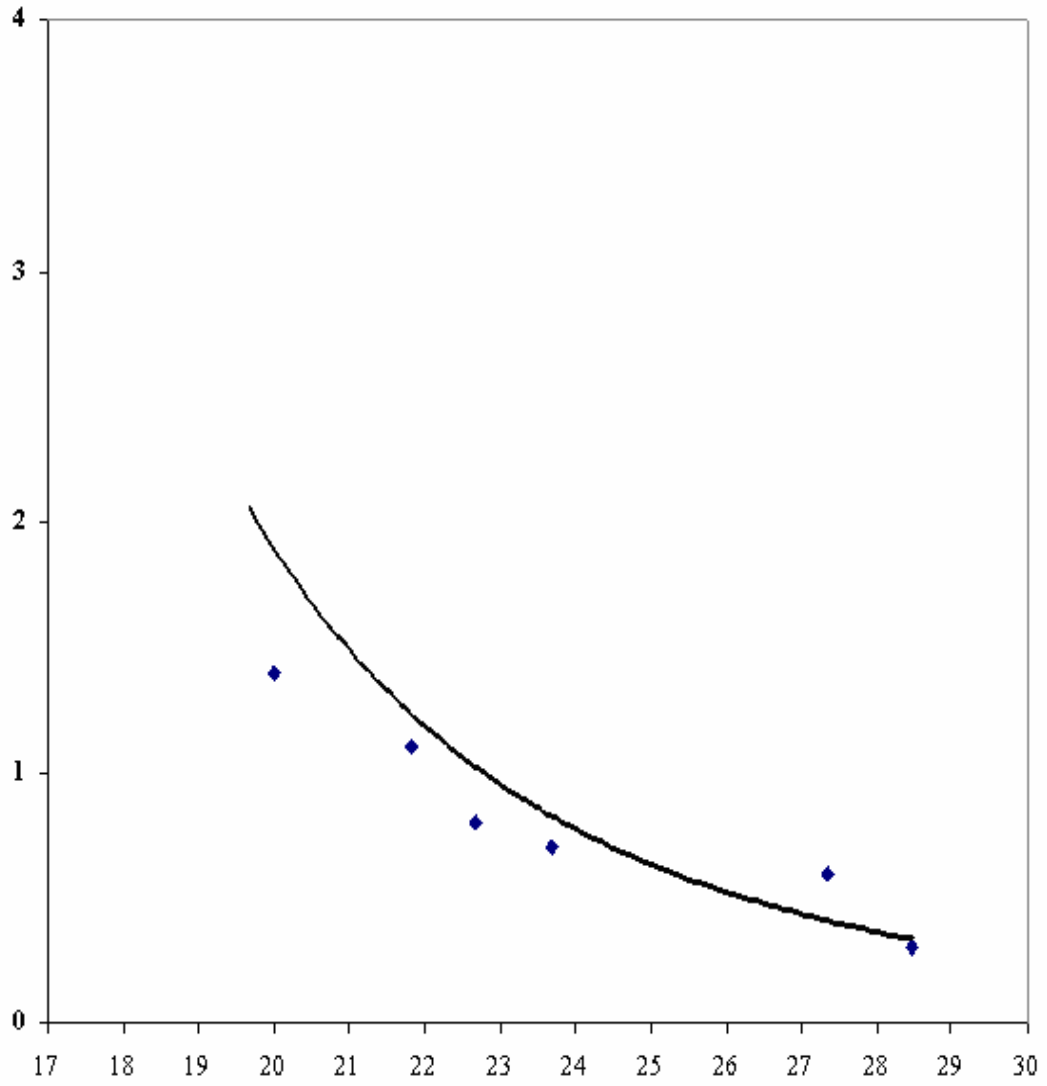
Şekil 4.11. Türkmen kili için farklı deformasyon hızlarındaki maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi



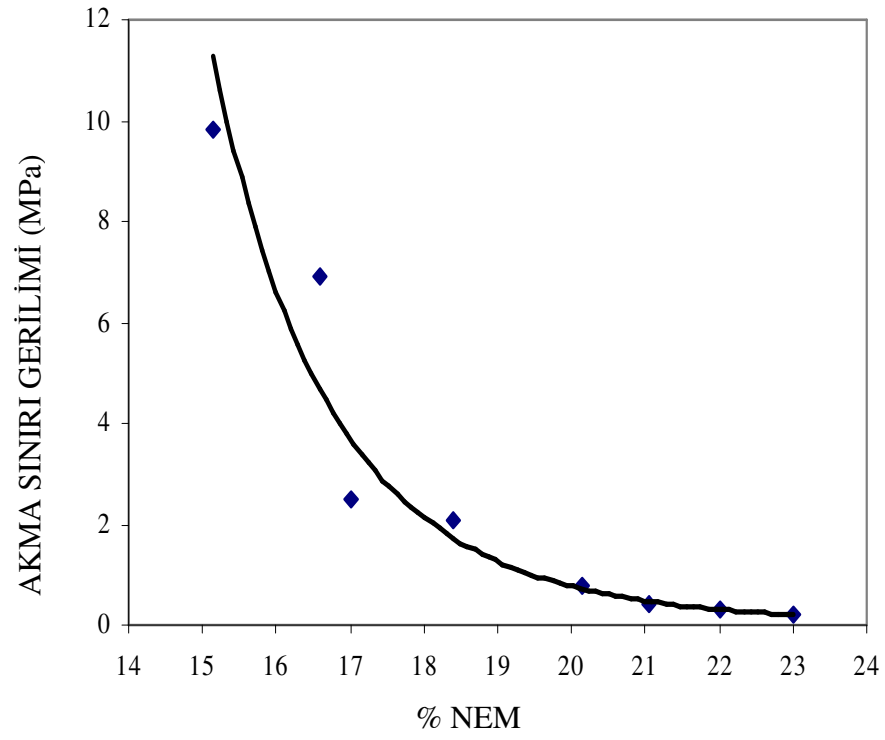
Şekil 4.12. Pembe Kaolen için farklı deformasyon hızlarındaki maksimum deformasyon miktarının % nem oranı ile değişimi

4.4. Akma Noktasının % Nem İle Değişimi

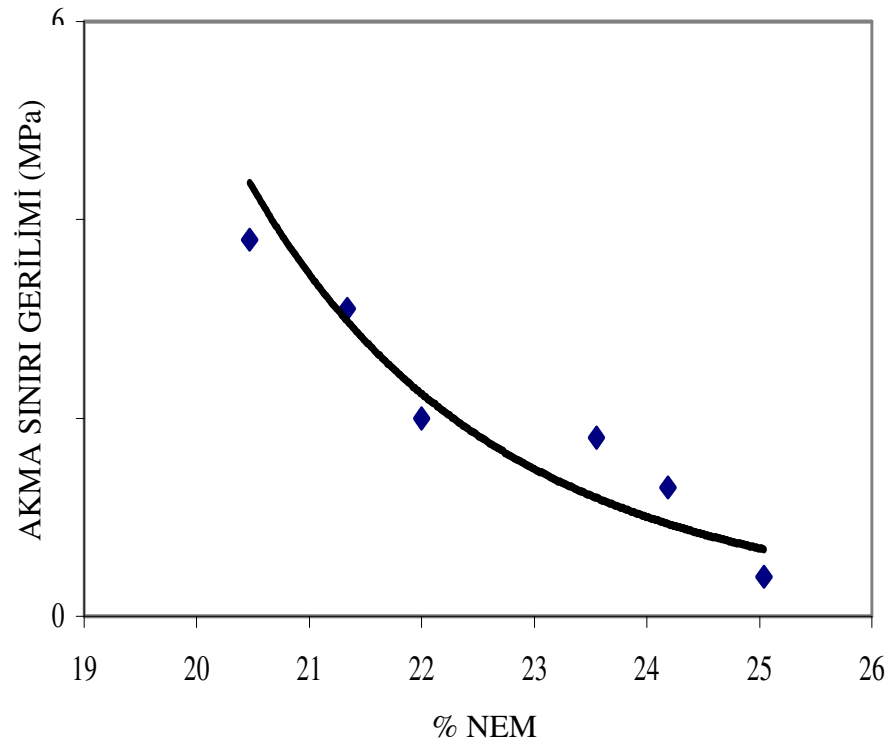
Tuvka, Türkmen kili ve Pembe Kaolen için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi sırasıyla Şekil 4.13- 4.15’de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi akma gerilimleri tüm killer için % nem oranındaki artışla azalmıştır.



Şekil 4.13. Tuvka kili için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi



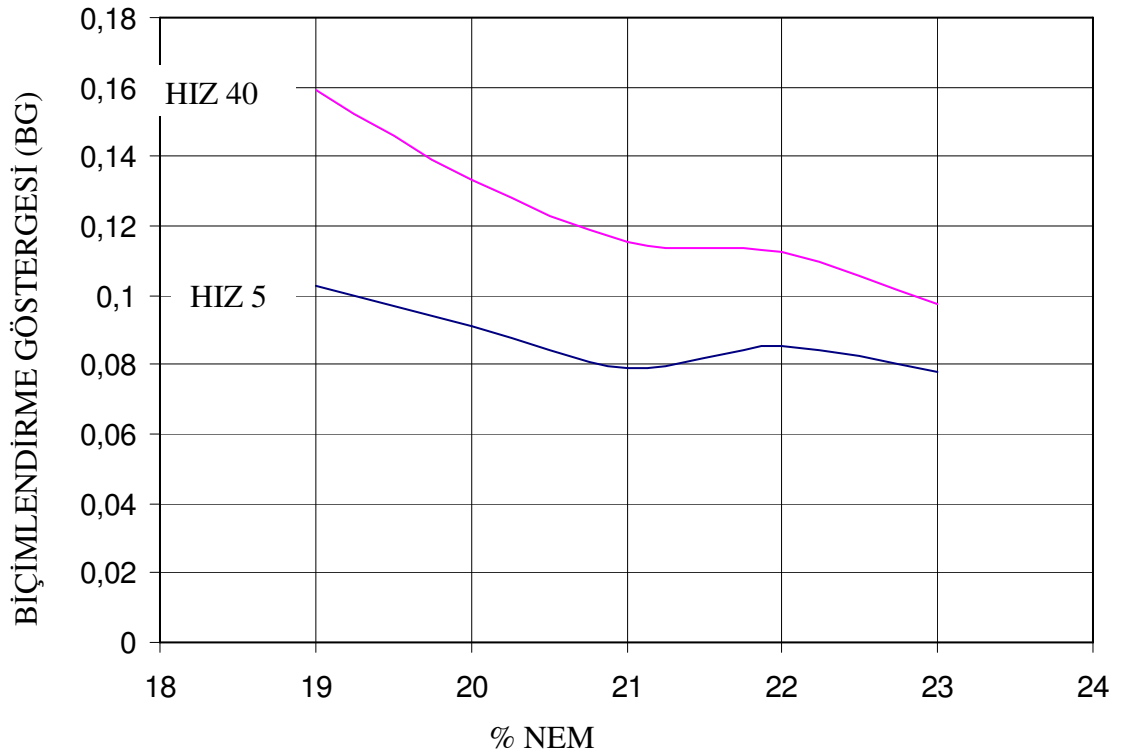
Şekil 4.14. Türkmen kili akma gerilimlerinin % nem ile değişimi



Şekil 4.15. Pembe Kaolen için akma gerilimlerinin % nem ile değişimi

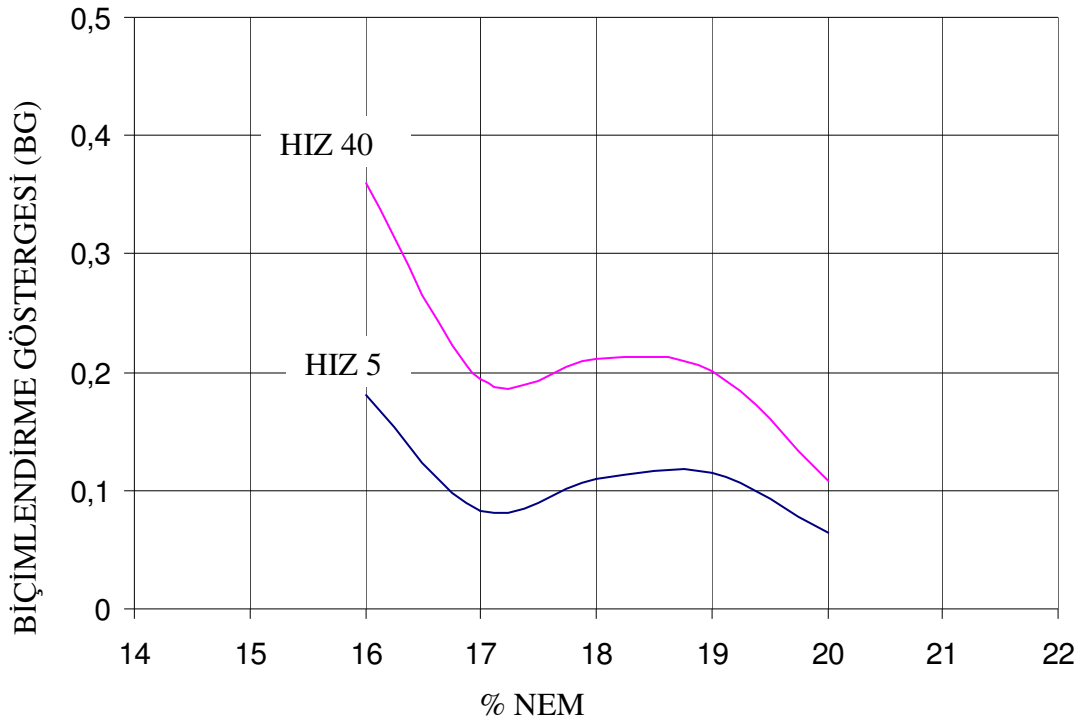
4.5. Biçimlendirme Göstergesinin Nemle Değişimi

Bölüm 3.4.3’de belirtildiği gibi Biçimlendirme göstergesi (BG) maksimum deformasyon miktarı (MDM) ile akma geriliminin (AG) çarpılmasıyla bulunur. Farklı deformasyon hızlarında deneysel olarak elde edilen BG’lerin % nem ile değişik grafikleri Tuvka kili için Şekil 4.16, Türkmen kili için Şekil 4.17 ve Pembe Kaolen için Şekil 4.18’de verilmiştir. Tüm killeri için deformasyon hızındaki artış biçimlendirilebilirliği artırmıştır.

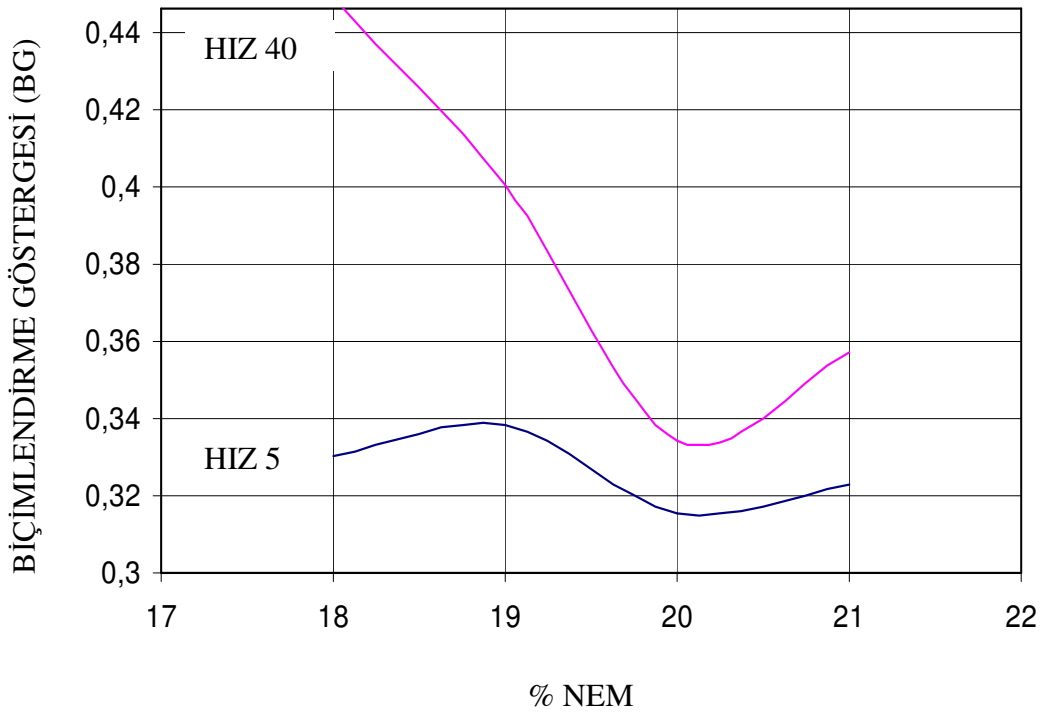


Şekil 4.16. Farklı deformasyon hızlarında Tuvka kilinin biçimlendirme göstergesinin %nem ile değişimi

Çalışılan nem aralığında Tuvka kili ve Pembe kaolen için Şekil 2.41’deki gibi tipik beklenen eğri elde edilememiştir. Fakat Türkmen kilinde tipik çan eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 4.17. Farklı deformasyon hızlarında Türkmen kilinin biçimlendirme göstergesinin %nem ile değişimi

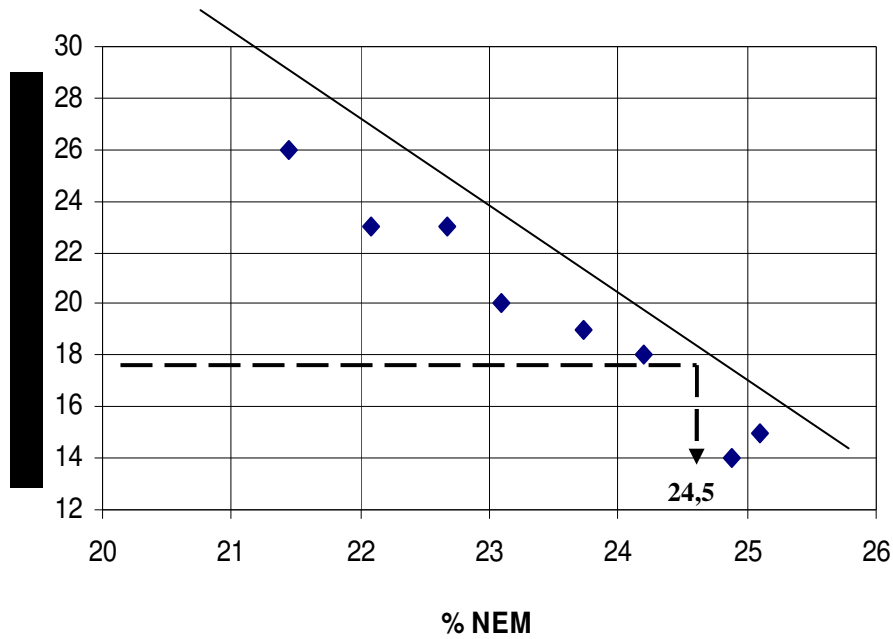


Şekil 4.18. Farklı deformasyon hızlarında Pembe kaolen kilinin biçimlendirme göstergesinin %nem ile değişimi

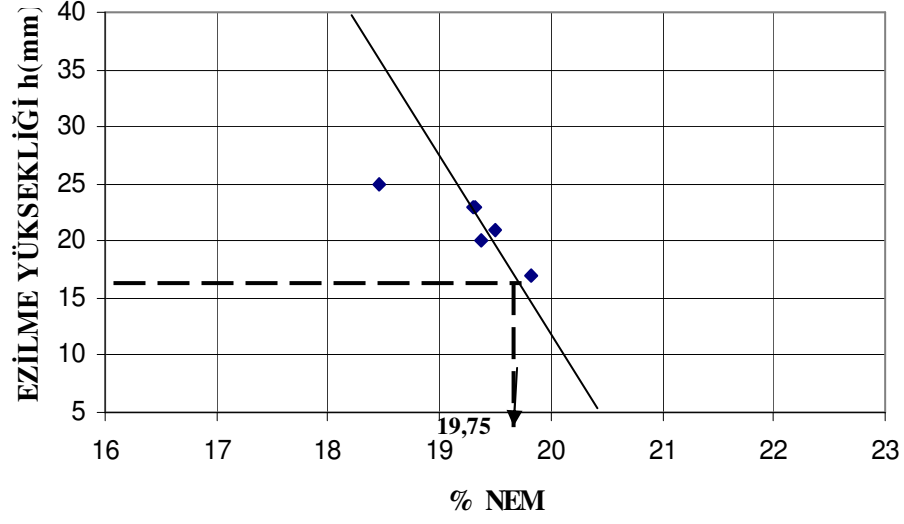
4.6. Pfefferkorn Plastiklik Suyu

BSD tekniğinin metallere sonra killere uygulanması ve sonuçların kıyaslanması amacıyla seramik sektöründe çok kullanılan Pfefferkorn plastiklik suyu denemesi Tuvka kili için Şekil 4.19, Türkmen kili için Şekil 4.20 ve Pembe Kaolen için Şekil 4.21’de verilmiştir. Bu şekillerdeki ezilme yüksekliğinin y ekseninin 16.mm’den x eksenine paralel çizilen çizginin % nem eksenindeki izdüşümü optimum nem miktarını vermiştir.

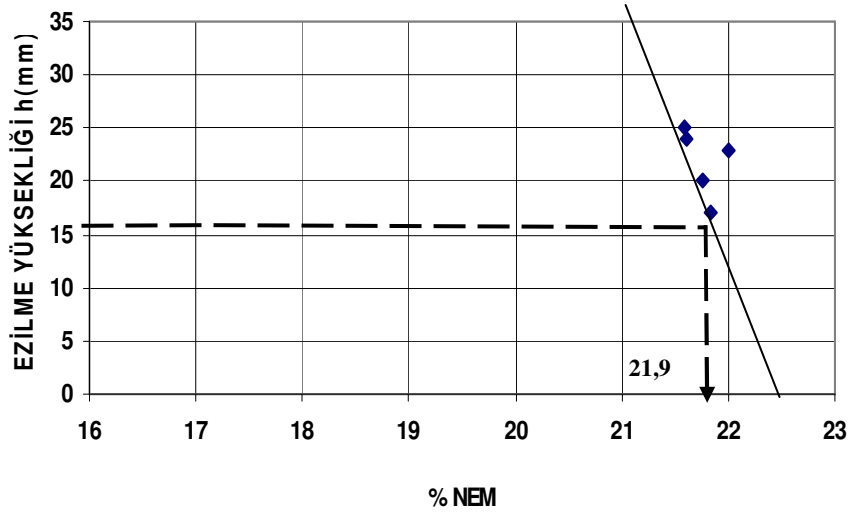
Bu değerler Tuvka kilinin optimum nem değeri % 24,5 Türkmen kilinin optimum nem değeri % 19,75 ve Pembe Kaolenin optimum nem değeri % 21,9 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.19. Tuvka kili Pfefferkorn plastiklik suyu



Şekil 4.20. Türkmen kili Pfefferkorn plastiklik suyu



Şekil 4.21. Pembe Kaolen Pfefferkorn plastiklik suyu

4.7. Tartışma

Deneylerde 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 ve 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 iriliğinin % 90 ‘ı 28,53 mikrondan küçük olup ortalama tane iriliği 10,84 mikrondur. Bu kilde tane iriliğinin dağılım eğrisine bakıldığında iki tepe noktası dikkati çekmektedir (Şekil 3.3). Bu iki farklı tane iriliği (2,07 ve 10,84 mikron) kildeki farklı yapılarındaki mineralleri göstermektedir. Ortalama tane iriliği diğer killere göre oldukça küçüktür. Tane iriliği ve dağılımının oldukça küçük olması plastiklik için iyi bir avantaj olmasına karşılık mineral içeriğinde plastik özellik taşımayan kuvars ve kalsitin varlığı biçimlendirilebilirlik için gerekli olan plastikliği önlemektedir.

Teorik kaolendeki % SiO_2 ile Pembe Kaolendeki % SiO_2 miktarı kıyaslandığında Pembe Kaolende % 14,80 SiO_2 fazlalığı bulunmaktadır (teorik kaolende % 46,5, Pembe Kaolende % 61,33 SiO_2 vardır). Bu fazlalık Pembe Kaolen içerisinde serbest SiO_2 olarak bulunur. Bu da Pembe Kaolenin plastikliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Pembe Kaolen BSD doğrularının bulunmasında % 17–20 ve akma gerilimlerinin bulunmasında % 20–25 çok dar bir nem aralığında çalışma imkânı vermiştir. Pfefferkorn plastiklik suyu için çizilen grafikteki (Şekil 4.21) doğrunun eğiminin dik olması da bu düşüncüyü doğrulamaktadır. Nem miktarındaki sabit değişmeye karşılık deformasyondaki değişim (h) değeri bu kilin çok dar bir aralıkta kullanılabileceğini göstermektedir.

Tuvka kilinin Ana mineralinin kaolinit ve kuvars yan minerallerinin de kalsit, montmorillonit ve illit olarak belirlenmiştir (Şekil3.7).

Kimyasal analizdeki K_2O 3,17 olması illitin varlığını doğrulamaktadır. Tuvka kilinin SiO_2 oranında 65.81 olması kaolinite bağlanamayan serbest kuvarsın göstergesidir.

% 6,15 yüksek oranda CaO içeren Tuvka kilinin tane iriliği dağılımı eğrileri incelendiğinde Pembe Kaolendeki gibi iki tepe noktası görülmektedir. İki farklı mineral içeren Tuvka kilindeki farklı tanecik çapları 1,3 ve 12 mikrometredir (Şekil 3.1). Tane iriliği olarak Pembe Kaolene göre daha iri tanelere sahip olan Tuvka kili montmorillonit ve illit içeriği sebebiyle daha plastik bir kildir.

Türkmen kilinin ana minerali kaolinit ve kuvars yan mineralleri de montmorillonit ve kalsittir. Plastik özellik gösteren bu kil tane iriliği dağılımı bakımından daha homojen tanecikler içermektedir (ortalama tane iriliği 16,60 mikron). Hem Pembe Kaolenden hem de Tuvka kilinden daha iri tanelere sahip olması ve serbest 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.

Metallere uygulanan BSD tekniği killere de başarı ile uygulandığı bu çalışmada görülmüştür. İdeal BSD'nın eğimlerinin $-1/2$ olması gerekir. Bu çalışmada tüm killeri için BSD'nın eğimlerinin $-1/2$ ye çok yakın olduğu görülmüştür. Bu killerin yüzeye yapışma eğiliminden ve nem miktarının sabit olmamasından ileri gelmektedir. Basınçla nemli killerin yüzeye daha çok yapışması söz konusu olmaktadır. Şekil 4.1-4.6'dan görüleceği gibi killeri için veri noktalarındaki sapma metallere kıyasla fazla olmakla birlikte ϵ_θ - ϵ_z arasında kesin bir doğrusal bağıntının olduğu görülmektedir. L/D oranlarının değiştirilmesi ile elde edilen BSD doğruları çok keskin bir şekilde birbirinden ayrılmamıştır. BSD' rı literatürde belirtildiği gibi (1-5) ya numunenin basma yüzeylerindeki yüzey koşullarının ya da L/D oranının değiştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu çalışmada BSD'nın belirlenmesinde yüzey sürtünme koşulları değiştirilmemiş ancak L/D oranları değiştirilerek sürtünmeli veya

sürtünmesiz koşullar elde edilmiştir. Örneğin L/D'nin 0,75 olmasında elde edilen BSD eğrisi, zımpara kullanılarak elde edilen BSD eğrisi ile çakıştığı gözlenmiştir (1–5).

Genellikle BSD'larının orijine yakın bölgelerinde veriler edilememektedir, ya çok özel geometrisi olan numuneler kullanılarak veya eğme deneyi ile bu bölgelerde veriler elde edilebilmektedir. Örneğin metaller için kolayca hazırlanabilecek flanşlı örnekler killer için kolay hazırlanamamaktadır. Fakat bu çalışmada orijine yakın bölgelerde veri elde edilebilmesi için kırılma gerinimleri BSD'nın uzantısı üzerine düşeceği varsayılarak y eksenine extrapole edilmiştir. Böylece, BSD'sundan ekstrapole edilerek elde edilen düzlemsel gerinim süneklikleri biçimlendirme göstergesinin belirlenmesinde maksimum deformasyon miktarı olarak kullanılmıştır. Ayrıca düzlemsel gerinim sünekliğinin maksimum deformasyon değerleri olarak tanımlı belirli bir nem miktarında malzemenin biçimlendirilebilirlik sınırlarının kolayca saptanmasına olanak sağlayacaktır.

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

Çizelge 4.1. Üç kilden elde edilen maksimum deformasyon miktarları

Hız mm/dak		Tuvka Kili	Türkmen Kili	Pembe kaolen
5	En düşük(ϵ^*)	0,023	0,0098	0,050
5	En yüksek (ϵ^*)	0,072	0,032	0,095
40	En düşük(ϵ^*)	0,050	0,045	0,068
40	En yüksek (ϵ^*)	0,115	0,092	0,105

Metalik malzemelerde düzlemsel gerinim sünekliği karbon çelikleri için 0,30–0,55, tek fazlı pirinçte 0,50–0,60 olup ticari saflıktaki alüminyumda 0,75'e kadar çıkabilmektedir. Öte yandan, ısıtıl işlem uygulanabilir Al alaşımlarında biçimlendirilebilirlik düşük (yaklaşık 0,15–0,25) olup bu çalışmada kullanılan

killerden elde edilen değerlere yakındır. Killerde görülen bu düşük biçimlendirme düzeyleri kil tanecikleri arasındaki düşük çekim kuvvetlerinden ileri gelmektedir.

Bu araştırmada akma gerilimleri yüzey koşulları değiştirilmeden basma deneyleri sonuçlarından elde edilmiştir. Akma noktalarının belirlenmesinde farklı deformasyon hızlarında (5 - 40mm/min) denemeler yapılmış, ancak akma geriliminin çok belirgin bir değişme göstermediği gözlenmiştir. Bu sebeplerden aynı nem içeriğinde örnek yapma güçlüğü de dikkate alınarak akma gerinimlerinin belirlenmesinde 20 mm/min olan deformasyon hızı seçilmiştir.

Kullanılan killerin akma sınırları belirgin olup kolayca tespit edilmiştir. Şekil (4.7, 4.8, 4.9.) Tuvka ve Türkmen killerinde (Şekil 4.7, 4.8) deformasyon sertleşmesi % nem miktarı ile önemli değişme göstermezken Pembe kaolinde % nem miktarı arttıkça deformasyon sertleşmesi bir miktar artmıştır (Şekil 4.9).

Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9 da gösterilen veri noktaları akma gerilimlerinin nem miktarı ile düştüğünü, buna karşılık maksimum deformasyon miktarının arttığını göstermektedir. Böylece biçimlendirilebilirlik göstergesi olarak tanımlanan bu iki değer çarpımı belirli bir maksimumdan geçen çan şeklinde bir eğriyi oluşturmaktadır. Çan şeklinde belirlenen biçimlendirilebilirlik göstergesinin maksimum noktası belirli bir kil için en uygun (optimum) nem miktarı ve akma gerilimini vermektedir. Biçimlendirilebilirlik eğrisinin bir maksimumdan geçerek çan şeklinde bir eğri oluşturması daha önceki pek çok araştırmacının sonuçları ile uyum içindedir. Bu BG'nin belirlenmesinde BSD tekniğinin kullanılmasının sıhhatli bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Deformasyon hızının artması ile maksimum deformasyon miktarı her üç kilde de artmıştır. Buna bağlı olarak MDM değerleri de artmıştır. Bir başka deyişle killerin işlenebilirliğini arttırmak için deformasyon hızının artırılması gerekmektedir. Bunun sebebi, su ile karıştırılan killerin plastik halde iken yapısı, değişik kalınlıklarda binlerce irili ufaklı kapiler boruların oluşturduğu bir ağa benzetilebilir. Bu yapı içerisinde suyun hacimsel olarak akış hızı (dV/dT); suyu akmaya zorlayan yürütücü

kuvvete doğru, akışa karşı duran etkenlere de ters orantılı olarak bağlıdır. Burada suyu akmaya zorlayan etken, kurutum prosesinde sıcaklık veya şekillendirme işleminde basınçtır. Örneğin kurutma prosesi sırasında sıcaklıktan dolayı parçanın içerisinde ve dış yüzeyindeki nem gradienti veya deformasyon sırasında uygulanan basınca ve basıncın uygulanma süresine bağlı olarak nem farklılığı oluşabilmektedir. Bu akışı önleyen faktörler ise L ve η dir.

$$dV/dT = \{ k(C_2 - C_1) \cdot p \} / L \cdot \eta \quad [4.1]$$

dV/dT = Hacimsel akış hızı

k = Birçok faktöre bağlı katsayı

$(C_2 - C_1)$ = Nem gradienti (Yaş ve kuru yüzey arasında oluşan nem farkı)

C_2 = Bombeleşen yüzeydeki nem miktarı

C_1 = Kilin en iç bölgesindeki nem miktarı

p = Geçirgenlik

L = Suyun aktığı yolun uzunluğu

η = Belirli bir sıcaklıkta çamurun içerisindeki suyun viskozitesi

Plastik haldeki su yavaş hızla deforme olduğunda; p değeri yani yapının gözenekliliği oluşan basma ve çekme kuvvetlerinin etkisi ile bir miktar değişmektedir. Ancak p değerindeki bu değişim ayrı bir araştırma konusu olmakla birlikte burada sabit olduğu varsayılmıştır. C_2 bombeleşen yüzeydeki nem miktarı ve C_1 de parçanın en iç bölgelerindeki nem miktarı olarak değerlendirildiğinde nem miktarları arasındaki fark uygulanan basınçla ve basıncın uygulanma süresi ile orantılı olarak değişebilmektedir. Uygulanan basıncın tatbik süresi arttıkça tanecikler arasındaki suyun hareketlenmesi dışarıdan içeriye doğru yayılması mümkün olacaktır ve yüzeydeki su filimi kalınlıkları giderek azalacaktır. Bu da deformasyon miktarını azaltacak veya yüzeydeki kırılmaları artıracaktır. Tersine hızlı deformasyon uygulandığında ise; yani ani basınçtan dolayı suyun hareketi çok fazla olamayacaktır. Yüzeydeki su içlere çekilmek için zaman bulamayacaktır. Bu da taneçikler arasındaki su filminin kalınlıklarında herhangi bir değişiklik meydana getirmeyecektir. Hızlı deforme edilmiş ve yavaş deforme edilmiş parçalar arasındaki

en önemli fark yavaş deformasyonda denge söz konusu olup her yerde eşit su filmi kalınlığı oluşabilmesi hızlı deformasyonda ise film kalınlıklarının dengesiz heterojen olmasıdır. Bu da hızlı deformasyon sırasında taneciklerin su filmlerinden dolayı daha fazla birbiri üzerinde kayabilmesine yani daha çok deformasyonu kaldırabilmesine imkân tanıyacaktır. Elde edilen BG eğrilerinin hız ile değişimi bunu doğrulamaktadır.

Biçimlendirilebilirlik göstergelerinin nemle değişiminden beklenen çan eğrileri her üç kilde de oldukça yayvan ve çok az belirgindir. Biçimlendirilebilirlik düzeyleri çok az olan bu killerden Türkmen kilinde tek bir çan oluşmasına karşılık Tuvka ve Pembe kaolende iki farklı çan oluşmaktadır Şekil 4.17 Buna karşılık Tuvka ve Pembe kaolen için çizilen biçimlendirme göstergeleri eğrilerinde iki farklı çan gözlenmiştir (Şekil 4.16, 4.18). Bu killerin tek bir mineralden oluşmayıp farklı karekterde minerallerin bulunmasının bir sonucudur. Metallerde gözlenmeyen bu durum killer için dikkat çekicidir. Optimum nem miktarları iki tepe yapan killer için optimum nem aralığı olarak verilmiştir. Tuvka kili için Optimum nem aralığı %20–22, Türkmen kili için optimum nem % 18,5 ve Pembe kaolen için nem aralığı %19–21 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın orjinalliğini bu eğrinin belirlenmesinde maksimum deformasyon miktarını bulmada özel alet gerektirmeyen, her türlü laboratuarda kolaylıkla yapılabilecek basit bir deney yönteminin killere uygulanarak diğer araştırmacıların bulguları ile uyuşum içindeki biçimlendirilebilirlik göstergesinin elde edilebilmesidir.

5. SONUÇLAR

1. Bu çalışma sonucu metallerin biçimlendirilebilirliğini belirlemede kullanılan BSD tekniği killerin biçimlendirilebilirliğini belirlemede de kullanılabileceği gösterilmiştir.
2. BSD'nın killer için elde edilmesinde kilin nem miktarı ve deforme edildiği yüzeylere yapışma koşulları metallerdeki kadar keskin sonuçların alınmasına etki etmektedir.
3. Deformasyon hızının artması maksimum deformasyon miktarını arttırmaktadır.
4. Deformasyon hızını artmasıyla optimum nem miktarı değişmemektedir.
5. Farklı karakterde farklı minaral içeriğine sahip killer için bir optimum nem değeri yerine optimum nem aralığı belirlenmelidir.
6. Killerin akma gerinimleri nem miktarının artması ile azalmaktadır. Elastik deformasyon miktarlarında da nem miktarı arttıkça gerilim ekseninden uzaklaşmaktadır.
7. BSD'nın elde edilmesinde numunelerin temas ettiği deformasyon yüzeylerine yapışma nem miktarındaki $\pm 0,5$ değişme küçük sapmalara sebep olmuştur.
8. L/D oranındaki değişme ile sürtünmeli koşullarda ve sürtünmesiz koşullarda veri noktaları elde edilebilmiştir. Ancak metallerdeki gibi birbirleriyle kesin ayrımlar gözlenememiştir.
9. Killerin akma gerinimlerinin bulunmasında pembe kaolende deformasyon sertleşmesinin Tuvka ve Türkmen killerine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.
10. Pembe kaolenin plastik bölgedeki nem aralığı %20,47 - %25,04 Türkmen kilinin %15,14 - %22 ve Tuva kilinin %19,67 - %28,40' dır. Bu aralık diğer killere göre çok dardır.
11. Her üç kil için BSD'nın elde edilmesinde de nem aralığı oldukça düşüktür. Pembe kaolen için % 18,5 – 21,5, Türkmen kili için %15,5 – % 19,5, Tuvka kili için %17,5 - %24,5 nem aralığıdır. Bu sonuç pfefferkorn plastiklik suyunun ölçülmesinde elde edilen doğruların dikliğiyle ve dar nem aralığında veri noktaları elde edilmesiyle uyumaktadır.
12. Her üç kilinde 5mm/min hızda elde edilen BG'nin nemile değişimi 40mm/min hızda elde edilenlere göre daha büyük değişimler göstermektedir.

13. Optimum nem aralığı Pembe kaolen %18,5 - %21, Tuvka kilinin %20 - %22, Türkmen kilinin %18,5' dir.

KAYNAKLAR

1. Ertürk, T., “Kütle deformasyon ve levha biçimlendirme işlemlerinde defomasyon sınırları ve biçimlendirme analizi” , Üçüncü Ulusal Metalurji Kongresi Bildiriler Kitabı., **ODTÜ**, Ankara, 659-82 (1978).
2. H. Whitaker., “Effect of particle size on plasticity of kaolinite”, **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. Kayalı, E.S., Ensari, C., “Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları”, **Ofset Atelyesi** , **İTÜ**, 43 (1991).
7. R .W. K. Honeycombe., “The plastic deformation of metals” , **Edwart Arnold Ltd.** , London , 64 (1974).
8. B. Avitzur., “Metal Forming” , **Mc Graw-Hill Comp.** , New York, 95 (1968).
9. Suh, S. K, Kuhn, H. A., “Anisotropy of ductile fracture in hot-rolled steel plats complementary results from bend tests, **Metallurgical Transactions A**, 6A: 2157-9 (1975).
10. Ertük, T., “Anisotropy of bulk forming limits in hot-rolled steel bars”, **Metallurgical Transactions A**, 12A: 743-748 (1981).
11. Ertürk, T, Otto W. L. and Khun, H. A. , “Anisotropy of ductile fracture in hot-rolled steel plats-an application of the upset test”, **Metallurgical Transactions A**, 15 : 1883-86 (1974).
12. S .Altıntaş; Biçimlendirme Sınır Diyagramı ve Kullanımı, 8. Metalurji Sempozyumu, İstanbul , Ekim 1984.
13. Grim, E. R., “Applied Clay Minerology” , **Mc Craw Hill**, New York, 8-34 (1962)
14. Singer, F., Singer, S., “Industrial Ceramics” , **Chapman and Hal**, London, 93-98 (1979).
15. Salmang, H., “Ceramic Physical and Chemical Fundamentals” , **Butterworts**, London, 353-359 (1961).

16. Moore, F., “Rheology of ceramic systems”, *Maclaren and Sons Ltd*, London, England, 23-27 (1965).
17. Arcasoy, A., “Seramik Teknolojisi”, *Marmara Üniversitesi Yayın No: 457*, İstanbul 74-81 (1994).
18. Norton, F. H., “Fine Cramics Technology” , *Mc Graww Hiill*, New York, 42-50 (1972).
19. Ribeiro M. J., Ferreira, J. M., “Labrincha j.a.plastic behavior of different ceramic pastes processet”, *Ceramic International*, 31: 515-19 (2005).
20. Van DerVelden, J.H, Apeldoorn, “Analysis of the Pfefferkorn Test”, *International* 532-42 (1979).
21. Baran, B., Ertürk, T., Sarıkaya, Y. and Alemdaroğlu, T., “Workability test methot for metals appled to examine a workability measure (plastic limit) for clayss”, *Ceramic International*, Applied clay sience, 20: 53-63 (2001).

ÖZGEÇMİŞ

Bekir IŞIK, 1968 yılında Çankırı’da doğdu. İlk orta ve lise eğitimini İstanbul’ da tamamladı. 1990 yılında Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünü tamamladı. 1991 yılında Milli Eğitim Bakanlığında Metal İşleri Öğretmeni olarak göreve başladı. Halen Abidin paşa endüstri meslek lisesinde bu görevini sürdürmektedir. 2003 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde, Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.