

**DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK MALZEMELERDE HADDELEME YÖN
VE MİKTARININ İŞLENEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ**

133444

Halis YEŞİL

**DOKTORA TEZİ
(METAL EĞİTİMİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

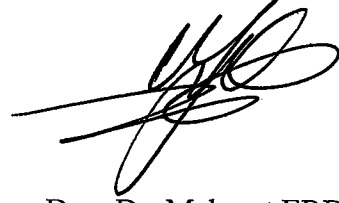
**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

133444

Kasım 2003

ANKARA

Halis YEŞİL tarafından hazırlanan DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK MALZEMELERDE HADDELEME YÖN VE MİKTARININ İŞLENEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN

Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Metal Eğitimi Bölümünde Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Fevzi ERCAN

Üye : Prof. Dr. Burhanettin İNEM

Üye : Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN

Üye : Doç. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL

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

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	viii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
EKLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Metal Kristallerinin Deformasyonu.....	4
2.2. Çok Kristalli Hacim Merkezli Kübik Metallerin Şekil Değiştirmesi (Deformasyonu).....	6
2.3. Pekleşme.....	14
2.3.1. Plastik deformasyon gerilmesi ve pekleşme ilişkisi.....	15
2.3.2. Pekleşme davranışı.....	16
2.4. Eş Yönlü Olmayan Çok Kristalli Metaller.....	18
2.4.1. Tercihli yönlenmenin gelişimi (tekstür).....	19
2.4.2. Mekanik fiberleşme yönlenmesi (tekstür).....	21
2.4.3. Haddeleme ve tane yönlenmesi.....	22
2.5. Mekanik Özelliklerin Yön Bağımlılığı.....	28
2.6. Düşük Karbonlu Çeliklerin Haddelenmesi.....	31
2.6.1. Hadde tezgahları ve merdane türleri.....	32

2.6.2. Merdane düzenleri	32
2.6.3. Soğuk haddeleme.....	33
2.6.4. Sıcak haddeleme	34
2.6.5. Haddelemede etkili kuvvetler ve geometrik ilişkiler.....	35
2.6.6. Haddeleme kuvvetlerinin hesaplanması	39
2.6.7. Haddeleme için gerekli gücün hesaplanması.....	40
2.6.8. Kalıntı gerilmeler.....	42
3. ÇELİKLERDE İŞLENEBİLİRLİK	43
3.1. İşlenebilirliğe Giriş	43
3.2. Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerde İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler	44
3.2.1. İş parçası malzemesinin etkisi	45
3.2.2. Sertlik ve dayanımın etkisi	47
3.2.3. Süneklik etkisi	48
3.2.4. Isıl iletkenlik.....	49
3.2.5. Talaş kaldırma sırasında oluşan pekleşme.....	49
3.2.6. İnküzyonlar (kalıntılar).....	50
3.2.7. Alaşım elementleri etkisi	51
3.2.8. Kolay işleme katkıları (katıklar).....	51
3.3. Kesme Kuvveti ve Takım Ömrü.....	53
3.4. Çeliklerde Soğuk Şekillendirmenin İşlenebilirlik Üzerine Etkisi	54
3.5. Sıcak Şekillendirmenin İşlenebilirlik Üzerine Etkisi	58
3.6. Yüzey Pürüzlülüğü	61
3.6.1. İdeal yüzey pürüzlülüğü	62
3.6.2. Doğal yüzey pürüzlülüğü.....	65

3.6.3. Mikroyapının yüzey pürüzlülüğüne etkisi	65
4. MATERYAL ve METOT	67
4.1. Malzeme	67
4.2. Haddeleme	67
4.2.1. Soğuk haddeleme.....	67
4.2.2. Sıcak haddeleme	68
4.3. Metalografi	68
4.3.1. Faz oranı ölçümü	68
4.3.2. Tane boyunun enine oranın belirlenmesi.....	69
4.3.3. Ferrit tane ve perlit koloni boyutlarının ölçümü.....	70
4.3.4. Perlit bantları arası mesafenin belirlenmesi.....	70
4.3.5. Perlit bantları kalınlığının ölçülmesi	71
4.4. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	71
4.4.1. Çekme deneyleri	71
4.4.3. Sertlik ölçümü.....	72
4.5. İşlenebilirlik Deneyleri	73
4.5.1. Sistem donanımı	73
4.5.2. Yük hücrelerinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	74
4.5.3. Tezgâh, kesici takım ve deney numuneleri	74
4.6. Sistemin Kalibrasyonu.....	75
4.7. Deneylerin Yapılışı.....	77
4.5. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü	81

5. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER SONUÇLARININ TARTIŞILMASI	82
5.1. Soğuk Haddelenmiş Numunelerde Mikroyapılar	82
5.2. Soğuk Haddelenmiş Numunelerde Mekanik Özellikler	86
5.2.1. Çekme özellikleri.....	86
5.2.2. Pekleşme davranışı	89
5.2.3. Sertlik özellikleri	94
5.3. Sıcak Haddelenmiş Numunelerde Mikroyapılar	95
5.4. Sıcak Haddelenmiş Numunelerde Mekanik Özellikler	100
5.4.1. Çekme özellikleri.....	100
5.4.2. Pekleşme davranışı	103
5.4.3. Sertlik özellikleri	106
6. İŞLENEBİLİRLİK SONUÇLARI VE TARTIŞMA	108
6.1. Soğuk Haddelenmiş Numunelerin İşlenebilirliği	108
6.1.1. Haddeleme doğrultusuna paralel kesme kuvvetleri.....	108
6.1.2. Haddeleme doğrultusuna dik kesme kuvvetleri.....	111
6.1.3. Haddeleme doğrultusuna çapraz kesme kuvvetleri	113
6.1.4. Talaş şekilleri.....	114
6.1.5. Tartışma	116
6.2. Soğuk Haddelenmiş Numunelerde Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri	118
6.3. Sıcak Haddelenmiş Numunelerin İşlenebilirliği.....	121
6.3.1. Haddeleme doğrultusuna paralel kesme kuvvetleri.....	123
6.3.2. Haddeleme doğrultusuna dik kesme kuvvetleri.....	124
6.3.3. Haddeleme doğrultusuna çapraz kesme kuvvetleri	125

6.3.4. Talaş şekilleri.....	127
6.3.5. Tartışma	127
6.4. Sıcak Haddelenmiş Numunelerde Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri	129
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR.....	135
EKLER.....	142
ÖZGEÇMİŞ.....	163



**DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK MALZEMELERDE HADDELEME YÖN VE
MİKTARININ İŞLENEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ**
(Doktora Tezi)

Halis YEŞİL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2003

ÖZET

Bu çalışmada, düşük karbonlu St 44 çeliğinde haddeme yön ve miktarının işlenebilirlik üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla çelik, soğuk ve sıcak olarak farklı miktarlarda haddelenmiştir. Kesme kuvvetleri üç farklı kesme hızında vargel tezgahında dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. Numuneler takım malzemesi ve talaş derinliği sabit tutularak, haddeme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz yönde işlenmiştir. Haddeme sonucu oluşan tekstür ve mekanik fiber yapı ile meydana gelen anizotropik davranışın, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, soğuk haddelenmiş numunelerde, perlit bant aralığı ve perlit bant kalınlığındaki düşüşe bağlı olarak, üç ayrı yönde de kesme kuvvetlerinde düşüş ve artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde de artış gözlenmiştir. Sıcak haddelenmiş numunelerde, paralel ve dik doğrultuda haddeme miktarlarındaki artışla birlikte kesme kuvvetleri artmış ancak çapraz yöndeki işlemede aynı işleme şartları altında önemli değişiklik olmamıştır. % 11 sıcak haddelenmiş numunelerin kesme kuvvetleri başlangıç malzemesinden yüksek ancak aynı işleme şartlarında çapraz yönde düşüktür. Soğuk haddelenmiş numunelerde kesme kuvvetleri açısından optimum işlenebilirlik, haddeme doğrultusuna çapraz doğrultuda % 11 ile % 23 aralığında en düşük olduğu belirlenmiştir. Jaoul-Crussard analizi ile malzemelerin pekleşme davranışları belirlenmiştir. Soğuk haddelenmiş numunelerde artan pekleşme hızı, kesme

kuvvetlerini düşürürken, sıcak haddelenmiş numunelerde pekleşme hızı ile kesme kuvvetleri arasında doğrusal bir ilişki kurulamamıştır. Soğuk haddelenmiş numunelerde yüzey pürüzlülüğü sıcak haddelenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüklerine göre bir miktar daha iyidir. Sıcak haddelenmiş numunelerde ise yüzey pürüzlülük değerleri, başlangıç numunesine göre azalmamıştır. Artan mukavemet değerlerine karşın soğuk haddelemede tercihli yönlenme ve textür nedeni ile kesme kuvvetleri daha düşüktür.

Bilim Kodu : 710
Anahtar Kelimeler : Soğuk haddelenmiş çelik, Sıcak haddelenmiş çelik, İşlenebilirlik.
Sayfa Adedi : 163
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN

**EFFECTS OF THE RATE AND DIRECTION OF THE ROLLING ON THE
MACHINABILITY OF LOW-CARBON STEELS**

(Ph.D. Thesis)

Halis YEŞİL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

November 2003

ABSTRACT

In this study effects of rate and direction of rolling on the machinability of a low carbon St 44 steel have been investigated. For these purposes steels were subjected to cold and hot rolling at various rates. Cutting forces have been measured by means of a dynamometer, on a shaping machine at three different cutting speeds. The samples have been machined longitudinally, perpendicularly and diagonally with regard to rolling direction by keeping tool material and depth of cut constant. The effect of anisotropic behaviour resulting from the texture and mechanical fibre structure associated with rolling and rolling direction on cutting forces and surface roughness were examined. As a result, it was found that cutting forces of the cold rolled samples decreased with decrease in both the pearlite band thickness and pearlite band and width in 3 cutting directions and raised with increases of cutting speeds. Cutting forces of hot rolled samples increased with the rate of rolling in the longitudinal and perpendicular directions, but there was no considerable change in diagonal direction at the same cutting conditions. The 3 cutting forces in the 11 % hot rolled sample are higher than that of initial material, but lower in the transverse direction at the same machining conditions. With respect to cutting forces of cold rolled samples optimum rate of cold rolling was determined to be 11 %-23 % range in transverse rolling direction. Jaoul-Crussard analysis is employed to determine work hardening behaviour. Cutting forces of cold rolled samples

decreased with increasing work hardening rate but there is no linear correlation between cutting forces and rate of work hardening of hot rolled samples. Roughness of surface of cold rolled samples was relatively low compared to that of hot rolled samples.

Science code : 710

Key words : Cold rolled steel, hot rolled steel, machinability.

Page number : 163

Adviser : Assoc. Prof. Mehmet ERDOĞAN



TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında, deneylerin yapılması, yazımı ve yorumu aşamalarında desteğini sürdüren danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN'a, işlenebilirlik deney hazırlıkları, yapımı ve yorumu aşamasında destek veren Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e ve malzemelerin temini konusunda gösterdiği çabadan dolayı Ankara GAMA A.Ş. adına Barbaros TUNCER'e, malzemelerin soğuk haddelenmesi sırasında gerekli desteği sağlayan Prof. Dr. Levon ÇAPAN'a ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Laboratuvarı personeline, malzemelerin sıcak haddelenmesi için gerekli yardımı sağlayan AYGÜNSAN Demir-Çelik ve Hadde Şirketi adına İsmail AYGÜN'e, çekme deneyleri için Ankara TÜRK TRAKTÖR A.Ş.'ye, çalışmaların maddi yönünü destekleyen Gazi Üniversitesi Araştırma Fon Başkanlığına, Dinamometre düzeneğinin kurulması sırasında katkılarından dolayı Yard. Doç. Dr. İhsan KORKUT'a, işlenebilirlik deneylerinin hazırlık aşamasında yardımları için Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN ve Öğretim Görevlisi Halil GÖREN ve Teknisyen Metin KÖKTÜRK'e, kalibrasyon işlemleri, işlenebilirlik deneylerinin yapılması ve verilerin değerlendirilmesi aşamasında yeterli desteği için Arş. Gör. Abdullah KURT'a, yine işlenebilirlik deneylerini yapılması ve yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi işlemlerinde yardımlarından dolayı Yard. Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ ve Arş. Gör. Halil DEMİR'e, metalografik çalışmalar için Yard. Doç. Dr. Kadir KOCATEPE, Arş. Gör. Bülent BOSTAN ve Arş. Gör. Ahmet GÜRAL'a, metalografik verilerin analizinde değerli katkılarından dolayı Arş. Gör. Dilek PINAR'a, şekillerin çizimlerine katkı sağlayan Arş. Gör. Hakan GÜRÜN, Arş. Gör. İsmail ŞAHİN ve Arş. Gör. Adem ACIR'a, metalografik numunelerin kesimi için yardım sağlayan Ö.E. MEM Müdürü Remzi ÖZKAYA'ya, bazı kaynakların temininde verdiği destekten dolayı Yard. Doç. Dr. A. Osman KURT ve Yard. Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a, ve bu tezin yazım aşamasında değerli katkıları için eşime teşekkürü bir borç bilirim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Soğuk şekillendirme ile üretilen yaygın bazı yönlenmeler	23
Çizelge 3.1. İşlenebilirliğin değerlendirilmesi için deney metotları.....	44
Çizelge 3.2. Katkı elemanlarının işlenebilirlik üzerine etkileri	51
Çizelge 3.3. Malzeme mekanik özellikleri, ısı iletkenlik, pekleşme, inklüzyon ve kolay işleme katkıları ve bunların artan değerlerinin genel işlenebilirlik üzerine etkileri.....	53
Çizelge 3.4 Bazı malzemelerde takım ömrüne bağlı olarak, İşlenebilirlik İndeksi...	53
Çizelge 4.1. St 44 çeliğin kimyasal bileşimi (Ağırlık %)	67
Çizelge 4.2. Yük hücresinin kalibrasyon verileri	76
Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan değişkenler	78
Çizelge 4.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri.....	81
Çizelge 5.1. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerin çekme özellikleri ve metalografik ölçüm sonuçları	87
Çizelge 5.2. Soğuk haddelenmiş numunelerde haddeme doğrultusuna paralel ve dik deformasyon aşamalarına göre eğim, kesişme ve gerçek gerinim değerleri.....	92
Çizelge 5.3. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerin çekme özellikleri ve metalografik ölçüm sonuçları	100
Çizelge 5.4. Sıcak haddelenmiş numunelerde haddeme doğrultusuna paralel ve dik deformasyon aşamalarına göre eğim, kesişme ve gerçek gerinim değerleri.....	104
Çizelge 6.1. Soğuk haddelenmiş numunelerde haddeme doğrultusuna bağlı olarak Asıl kesme kuvveti (Fc) değerlerindeki değişim.....	109
Çizelge 6.2. Soğuk haddelenmiş numunelerde haddeme doğrultusuna bağlı olarak teorik ve ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Ra (µm).....	118
Çizelge 6.3. Sıcak haddelenmiş numunelerde haddeme doğrultusuna bağlı olarak Asıl kesme kuvveti (Fc) değerlerindeki değişim.....	122

Çizelge 6.4. Sıcak haddelenmiş numunelerde haddeleme doğrultusuna bağlı olarak teorik ve ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri R_a (μm).....	129
--	-----



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tel ve levha tercihli yönlenmesinin (tekstür) sistematik gösterilmesi: teldeki fiber yönlenme (a) ve levhadaki levha yönlenmesi (b).....	20
Şekil 2.2. Metal için sıcak şekillendirme çekme-uzama eğrileri : (a) dinamik toparlanma (b) dinamik toparlanmadan sonra yeniden kristalleşme.....	25
Şekil 2.3. Haddelemeye etki eden kuvvetler	36
Şekil 2.4. Haddeleme deformasyon bölgesindeki temas yüzeyi boyunca merdanelerin dönme hızına göre malzemenin geçiş hızının değişmesi	36
Şekil 2.5. Bir hadde tezgahının karakteristik elastik ve plastik eğrileri	38
Şekil 2.6. Haddeleme kuvvetinin toplandığı kabul edilen (a) mesafesi	41
Şekil 3.1. Dik kesme sırasında temel parametreler	49
Şekil 3.2. Soğuk çekmenin takım ömrüne etkisi. İş parçası 1" (25,4 mm) AISI 1016 çeliği. İşleme şartları: 0.73 m/s (1,44 m/s) kesme hızı ile çoklu işleme operasyonları	56
Şekil 3.3. Soğuk dövmenin delik delmedeki takım ömrüne etkisi.....	58
Şekil 3.4. Rusya’da üretilen, işlenebilirliği iyi çeliklerin sınıflandırılması.....	61
Şekil 3.5. M sistemine göre yüzey pürüzlülüğü profili, (a) yüzeyin oluşması, (b) işlenmiş yüzeyden kesit f, ilerleme	63
Şekil 3.6. Yuvarlak köşeli kesici uç ile işlemede ideal yüzey pürüzlülüğü	64
Şekil 4.1. Mikroyapı fotoğrafları için numunelerin hazırlanması	69
Şekil 4.2. TS 138 EN10002-1’e göre hazırlanan çekme numuneleri	72
Şekil 4.3. Sertlik ölçümü için dilimlenmemiş bloğun boyutları	72
Şekil 4.4. Yük hücrelerinin konumları	74
Şekil 4.5. Asıl kesme kuvvetine (F_C) ait kalibrasyon eğrisi ve denklemi	77
Şekil 4.6. Vargel için Pillar Tip hızlı geri dönüş mekanizması diyagramı	79

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. % 11 oranında soğuk haddelenmiş numunede 9 m/min hız ve 0,254 mm/min ilerlemede haddeleme doğrultusuna dik kesme kuvvetleri.....	80
Şekil 5.1. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak ferrit tanelerinde boyun ene oranındaki değişim.....	83
Şekil 5.2. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak perlit kolonilerinde boyun ene oranındaki değişim.....	84
Şekil 5.3. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak perlit bantları arası mesafedeki değişim	84
Şekil 5.4. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak yüzey (y) bölgesinde perlit bant kalınlıklarındaki değişim.....	85
Şekil 5.5. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak akma dayanımındaki değişim.....	87
Şekil 5.6. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişim.....	88
Şekil 5.7. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak % uzamadaki değişim	89
Şekil 5.8. Başlangıç numunesinin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi	90
Şekil 5.9. Başlangıç numunesinin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi	91
Şekil 5.10. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizleri.....	91
Şekil 5.11. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizleri	93
Şekil 5.12. Başlangıç numunesi (% 0), % 11 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel ve dik Jaoul-Crussard analizleri.....	93
Şekil 5.13. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak sertlikteki değişim.....	95

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak ferrit tanelerinde boyun ene oranındaki değişim.....	98
Şekil 5.15. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak perlit kolonilerinde boyun ene oranındaki değişim.....	98
Şekil 5.16. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak perlit bantları arası mesafedeki değişim	99
Şekil 5.17. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak yüzey (y) bölgesinde perlit bant kalınlıklarındaki değişim.....	99
Şekil 5.18. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak akma dayanımındaki değişim.....	101
Şekil 5.19. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişim	101
Şekil 5.20. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak % uzamadaki değişim.....	102
Şekil 5.21. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizleri	105
Şekil 5.22. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizleri ...	105
Şekil 5.23. Başlangıç numunesi (% 0), % 11 ve % 27 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel ve dik Jaoul-Crussard analizleri	106
Şekil 5.24. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak sertlikteki değişim	107
Şekil 6.1. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim.	110
Şekil 6.2. İşleme yönüne göre kesici takımın şematik mikroyapı ile temas ilişkisinin temsili: haddeleme doğrultusuna paralel (a), dik (b) ve çapraz (c)	111

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna dik işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim.....	112
Şekil 6.4. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim.....	113
Şekil 6.5. Başlangıç numunesi, % 11, % 15, % 19, % 23 ve % 27 oranında soğuk olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz yönde ve üç ayrı kesme hızında talaş şekilleri ve talaş yarıçapları, r (mm).	115
Şekil 6.6. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemedeki yüzey pürüzlülükleri	119
Şekil 6.7. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna dik işlemedeki yüzey pürüzlülükleri.....	120
Şekil 6.8. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemedeki yüzey pürüzlülükleri	121
Şekil 6.9. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim.	123
Şekil 6.10. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna dik işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim.	124
Şekil 6.11. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim.	125
Şekil 6.12. Başlangıç numunesi, % 11, % 13, % 17, % 23, % 26 ve % 34 oranında sıcak olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz yönde ve üç ayrı kesme hızında talaş şekilleri ve talaş yarıçapları, r (mm).	126
Şekil 6.13. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemedeki yüzey pürüzlülükleri	130

Şekil**Sayfa**

- Şekil 6.14. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna dik işlemedeki yüzey pürüzlülükleri..... 131
- Şekil 6.15. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemedeki yüzey pürüzlülükleri..... 132



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Şekil 5.1. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 15 (c), % 19 (d), % 83 (e) ve % 87 (f) oranında soğuk olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel mikroyapıları, Dağlama : % 3 Nital, Büyütme : x100	82
Şekil 5.2. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 15 (c), % 19 (d), % 83 (e) ve % 87 (f) oranında soğuk olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik mikroyapıları, Dağlama : % 3 Nital, Büyütme : x100	83
Şekil 5.3. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 13 (c), % 17 (d), % 83 (e) % 86 (f) ve % 34 (g) oranında sıcak olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel mikroyapıları, Dağlama : % 3 Nital, Büyütme : x100	96
Şekil 5.4. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 13 (c), % 17 (d), % 83 (e) % 86 (f) ve % 34 (g) oranında sıcak olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik mikroyapıları, Dağlama : % 3 Nital, Büyütme : x100	97

EKLERİN LİSTESİ

Ek	Sayfa
Ek-1. Ferrit tane ve perlit koloni boyunun enine oranı.....	142
Ek-2. Perlit bantları arası mesafedeki değişim.....	148
Ek-3. Çekme deney sonuçları.....	149
Ek-4. Malzemelerin sertlik ölçüm değerleri.....	150
Ek-5. Soğuk haddelenmiş numunelerin pekleşme davranışı.....	152
Ek-6. Sıcak haddelenmiş numunelerin pekleşme davranışı.....	157



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simge ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Simgeler	Açıklama
cs	Çift kurs
E	Elastik modül
Fa	İlerleme
Fc	Asıl kesme kuvveti
m/s	Metre/saniye
min	Dakika
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri
rpm	Devir/dakika
T	Sıcaklık
T _M	Metalin ergime sıcaklığı
V	Vanadyum
W	Wolfram (Tungsten)
α	Ferit
σ	Gerilme
ϵ	Gerinim
μm	Mikromilim

Kısaltmalar	Açıklama
ERDEMİR	Ereğli Demir Çelik Fabrikaları
HMK	Hacim merkezli kübik
SPH	Sıkı paket hegzagonal
J.C.	Jaoul-Crussard
YMK	Yüzey merkezli kübik
BUE	Yığıntı talaş

1. GİRİŞ

Günümüzde imalat sektöründe talaşlı imalat, mamul işçiliğinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Talaşlı imalatın veya en genel anlamda işlenebilirliğin; takım ömrü, yüzey kalitesi, talaş kaldırma kolaylığı ve miktarı, kesme kuvveti gibi temel parametrelerini etkileyen en temel özelliği, malzemenin yapısı ile ilgili olanıdır (1, 2).

Kristal yapıya sahip metal malzemelerde, haddeleme veya soğuk çekme işlemi ile tercihli kristolografik yönlenme sonucu eş yönlü olmayan yapı oluşmaktadır. Haddeleme veya soğuk çekme işlemi sırasında, tercihli kristolografik yönlenmenin yanı sıra malzemenin mikroyapısı, şekil değiştirme yön ve miktarına bağlı olarak değişikliğe uğramaktadır. Orijinal yapı içerisinde bulunan ikinci faz taneleri ve inklüzyonlar şekil değiştirme (deformasyon) yönünde uzamakta ve yine mikroyapıdaki bu değişimden dolayı eş yönlü olmayan özelliğe sahip mekanik fiber (bantlı) yapı ortaya çıkmaktadır (3).

Çelik malzemelerin büyük bir çoğunluğu haddeleme veya soğuk çekme işleminden sonra piyasaya arz edilmektedir. Bu nedenle, malzeme mikroyapıları tercihli kristolografik yönlenmeye ve bantlı yapıya sahip bulunmaktadır. Deformasyon sonucu akma ve çekme dayanımı, sertlik artmakta, süneklik düşmektedir (4-7). Haddeleme doğrultusunda tanelerin uzaması ve dönmesi ile yönlenmiş yapı oluşmaktadır (4, 8). Deformasyon sırasında sünek faz ferritin deforme olması ile perlit bantları arası mesafe daralmakta, ferritin sertliğinin perlitin sertliğine yaklaşması ile perlit bantları ve MnS inklüzyonları deforme olmaktadır (3).

Karbonlu çeliklerin sıcak haddelenmesi ile mikroyapıdaki bantlı malzeme yapısı bozulmakta ve yeniden kristalleşme sonucu eş eksenli tane yapısı oluşmaktadır. Tavlama süresine bağlı olarak tane irileşmesi meydana gelmektedir. Belirgin eş yönlü olmayan özellikler azalmakta ve akma ve çekme dayanımı, sertlik düşmekte ve süneklik artmaktadır (1, 6, 7).

Mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler ile malzemenin mekanik özellikleri de şekil değiştirme yön ve miktarına bağlı olarak eş yönlü olmayan davranış göstermektedir (1-3). Bu durumda, bantlı malzeme yapısında; haddelme yönüne paralel bantlar boyunca talaş kaldırma ile bantlara dik ve çapraz yönde talaş kaldırmanın, malzemenin işlenebilirliği üzerinde etkili olacağı düşünülebilir. Ancak, literatürde bu konuda yapılan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır (3, 9-11).

İşleme sırasında kesici takım, malzeme ve işleme şartları gibi üç temel parametreden malzemenin eş yönlü olmayan özellikleri işlenebilirlik üzerinde etkili olmaktadır (1, 12-16). Haddelme sonucu malzemenin pekleşmiş yapısı, işleme sırasında kayma (kesme) bölgesinde pekleşme hızını düşürmekte, birinci kesme bölgesinde takım-talaş temas alanını azaltmak suretiyle kesmeyi kolaylaştırmakta, yığıntı talaş (BUE) eğilimini azaltmak suretiyle kesme kuvvetlerini düşürmekte ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmektedir.

Kurşun ilave edilmiş ve yeniden kükürt katılmış AISI 12L14 çeliklerinde bitmiş yüzey kalitesi açısından işlenebilirliğin; talaş kaldırma deneyinde perlit bantlarının genişlik ve sürekliliği ile iyileştiği görülmüştür. Aynı durumun matkap ömrüne etkisinin olmadığı, talaş kaldırma deneyinde bantlı yapının sürekliliği ile azalan yüzey pürüzlülüğü ve yığıntı talaş oluşumunun daha kararlı olması, çentik aşınma boyuna atfedilmektedir (11).

Bu çalışmada, soğuk ve sıcak haddelme yön ve miktarının, işlenebilirlik parametrelerinden, asıl kesme kuvveti (F_c) ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi araştırılmıştır. Yüksek oranda soğuk haddelme için uygun ve ERDEMİR tarafından üretilen ve piyasada yapı çeliği olarak yaygın şekilde kullanılan düşük karbonlu St 44 çeliği kullanılmıştır. Bu çelik, % 11, 15, 19, 23, 27 oranlarında 5 kategoride soğuk ve % 11, 13, 17, 23, 26, 34 oranlarında 6 kategoride sıcak olarak haddelenerek işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır.

Soğuk ve sıcak olarak haddelenmiş numunelerin; haddelme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz işlenmesi vargel tezgahında yapılmış ve bu esnada oluşan kesme

kuvvetleriyle yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Numunelerin akma ve çekme dayanımı, sertlik ve çekme eğrilerinden Jaoul-Crussard analizi yapılarak elde edilen pekleşme davranışları ve mikroyapı özellikleri ile işlenebilirlik arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Literatürde vargel tezgahında yapılan bir işlenebilirlik çalışmasına rastlanmamıştır. Bu tezgahın seçilmesi, kesme kuvvetlerinin haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz olarak doğrudan ölçülebilmelerinden dolayıdır.

Dünyadaki metal üretiminin % 90'ını çelikler ve bu miktarın yaklaşık % 77'sini de düşük karbonlu çelikler oluşturmaktadır (17). Düşük karbonlu çeliklerin büyük bir bölümü haddelenerek piyasaya sürülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, düşük karbonlu çeliklerin işlenmesinde haddeleme sonucu mikroyapıda meydana gelen değişme yöne bağlı özellikler işlenebilirlik açısından önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, haddeleme yön ve miktarının işlenebilirlik özelliklerinden kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin genel eğiliminin ortaya konması amaçlanmıştır.

Buradan elde edilecek sonuçların St 44 çeliğinin bileşimine yakın, aynı işlemlere tabi tutulmuş diğer çeliklerin işlenebilirlik özelliklerine de ışık tutması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Metal Kristallerinin Deformasyonu

Günümüzde fiziksel metalürjideki özellikler tek metal kristallerinin özellikleri incelenerek elde edilmiştir. Bu özellikler, ilk olarak normal çok kristalli metalin mekanik veya fiziksel özelliklerinin belirlenmesinin esasını oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu özelliklerin çok kristalli metallerin davranışlarını incelemekten önce anlaşılması gerekir. Ayrıca, çok kristalli numunelerde bazı konuların çalışılması, sonuçların yorumlanması karmaşık olduğu için zordur. Bu durum özellikle plastik deformasyon için geçerlidir. Bu zorluklar esas olarak bütün mekanik özelliklerin, atomların diziliş doğrultusuna (yönüne) göre değişmesinden diğer bir deyişle, eş yönlü olmayan (anizotropik) özelliklerden kaynaklanmaktadır.

1920-1935 yılları arasında tek metal kristalleri üzerine yapılan çalışmalar, pek çok özelliğin kristal içerisindeki doğrultuya bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Örneğin bütün tek kristalli yapıları metallerde elastik ve plastik özellikler eş yönlü değildir. Kübik ve kübik olmayan metaller akma, en büyük çekme dayanımı ve boyca uzama gibi özellikler doğrultuya bağlı olarak sık sık önemli ölçüde değişiklik sergilemektedir. Çinko, kadmiyum gibi sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıları metallerde belirgin eş yönlü olmayan davranış oluşturmaktadırlar (4). Levha metaller çoğunlukla soğuk ve sıcak haddeleme gibi üretim işlemlerinden sonra önemli ölçüde plastik eş yönlü olmayan davranış sergilemektedir. Metaller için plastik eş yönlü olmayan davranışın öncelikli kaynağı yüksek gerinimlerde bir dereceye kadar yönelme veya tercihli kristalografik yönelmeden kaynaklanmaktadır (5).

Bu değişkenlerin çoğu, çok kristalli metallerde kristaller rasgele düzenlendiğinde özellikler üzerinde daha az etkili olmaktadır. Bu durumda topluluktaki (agrega) özellikler ortalama bir değerde, bütün doğrultularda sabit olmaktadır. Buna karşın, pratikte metaller nadiren rasgele kristal topluluklarına sahiptir ancak, yönelme veya

tercihli yönlenmeye sahip olan bazı tanelerin dışında da az veya çok düzeyde eş yönlü olmayan özellikler sergilemektedirler (4).

Genel olarak tek fazlı malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti çok fazlı malzemelerden fazladır. Çok fazlı malzemelerde fazların şekli, dağılımı, mekanik özellikleri, fazlar arasındaki ara yüzey enerjisi ve ara yüzey bağı plastik deformasyon kabiliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Tane boyutunun küçülmesi deformasyon gerilmesini artırırken; oksit, nitrür ve sülfür gibi kalıntılar da (inklüzyonlar) deformasyon kabiliyetini azaltmaktadır.

Plastik deformasyon için gerekli kritik kayma gerilmesi; kimyasal bileşim, dislokasyon yoğunluğu, sıcaklık ve deformasyon hızına bağlıdır (7). Soğuk plastik şekil değiştirme ile bir metale, aynı anda hem istenilen şeklin verilmesi hem de dayanım kazandırılması için pek çok teknik kullanılmaktadır. Şekil değiştirme miktarı kontrol edilerek bu işlemler gerçekleştirilebilmekte ve pekleşme miktarı kontrol edilebilmektedir (18).

Haddeleme gibi deformasyon işlemlerinde, tanelerin hem tercihli bir doğrultu ve hem de tercihli bir düzlemde yönlenmesi gözlenmektedir. Malzemenin yapısında bulunan ikinci faz veya inklüzyonlarda yönlenmekte veya haddeleme doğrultusunda uzamaktadırlar. Sadece sert inklüzyonlar şekil değiştirmemektedirler (18).

Metalik malzemelerin plastik deformasyonu genel olarak belirli düzlemlerde ve doğrultularda dislokasyonların kayması ile gerçekleşmektedir. Kaymanın kolaylıkla olmadığı durumlarda ise ikizleme ile deformasyon oluşmaktadır. Düşük deformasyon hızları ve yüksek sıcaklıklarda çok kristalli malzemelerin deformasyonu, tane sınırlarının kayması ve atomların yayınması ile meydana gelmektedir. Pratik kayma gerilmesi teorik kayma gerilmesinin $1/10$ 'u kadardır ve bu durum malzemedeki kristal hatalarından ileri gelmektedir (6).

Kayma, atom yoğunluğunun en fazla olduğu kayma düzlemlerinde ve kayma düzlemleri üzerinde atomların en sık bulundukları kayma doğrultularında

dislokasyon hareketleri ile oluşmaktadır. Plastik deformasyona uğrayan tek kristalli malzeme yüzeyinde atomların birbirine göre 20-500 atom çapı kadar yer değiştirmesi sonucu kayma çizgileri ve bunların bir araya gelmesi ile kayma bantlarının oluştuğu ve kayma bantları arasında kalan kısmın sadece elastik deformasyona uğradığı gözlenmiştir (6).

Deformasyon sonucu oluşan kristalografik yönlenme, deformasyonu etkileyen kayma ve ikizleme sistemlerine bağlıdır. Ayrıca deformasyon miktarı ve malzeme akış geometrisi de etkili olmaktadır. Deformasyon yönünde kalıntılar, boşluklar ve ikinci fazın yönlenmeleri ile oluşan mekanik fiberleşme mekanik özelliklerde eş yönlü olmayan davranış neden olmaktadır. Haddelenmiş yassı çekme sırasında, ürünlerde kalınlık yönündeki kesit daralması en az, genişlik yönünde orta ve haddeleme yönünde ise en fazladır (6).

Az karbonlu çeliklerde derin çekilebilirlik kabiliyeti de sac yüzeyinde tanelerin $\{111\}$ düzleminde yönlenmesi ile arttırılabilmektedir.

2.2. Çok Kristalli Hacim Merkezli Kübik Metallerin Şekil Değiştirmesi (Deformasyonu)

Düşük sıcaklıklarda (yeniden kristalleşme sıcaklığının altında) metallerde plastik veya kalıcı şekil değiştirme çoğunlukla dislokasyonların hareketi ile oluşur. Plastik şekil değiştirmeyi arttırmak için genellikle gerilmeyi yükseltmek gerekir bu, esnada soğuk şekil değiştirme sertleşmesi veya pekleşme meydana gelmektedir. Pekleşme çok sayıda dislokasyonların etkileşmesinden meydana gelmektedir. Dislokasyonlar katılaşma sürecinde oluşan çizgisel boyutta atomik dizilimdeki hatalardan veya genellikle gerilme etkisi altında etkin hale gelen dislokasyon üretici kaynaklarından ortaya çıkmaktadır.

Malzemelerin yapısı ve mekanik özellikleri ile deformasyon şartları (sıcaklık, deformasyon hızı ve sürtünme durumu) malzemelerin plastik deformasyon

özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunların dışında deformasyonda uygulanan hidrostatik basınç, malzemedeki kalıntı gerilmeler, malzemenin geometrik şekli (levha veya çubuk) plastik deformasyon üzerinde etkilidir (6).

Kristal yapılarda düşük sıcaklıklarda şekil değiştirme için kayma ve ikizleme olmak üzere iki temel mekanizma vardır. Kaymada atomlar,. Bu öteleme miktarı, atomlar arası mesafenin tam katı, ikizlemede ise bir kesri kadar ötelenir. Kayma atomların en yoğun olduğu düzlem ve doğrultularda meydana gelir (19). Yüksek sıcaklıklarda bu iki mekanizmaya ilaveten tane sınırlarının kayması ve yayınma sürünmesi ile deformasyon meydana gelmektedir (6).

Bir atom düzlemi üzerinde kaymanın başlaması için gereken kayma gerilmesi, kritik kayma gerilmesidir (7). Kritik kayma gerilmesi; kimyasal bileşim, dislokasyon yoğunluğu, sıcaklık ve deformasyon hızından etkilenmektedir. Metalin azalan saflığı, ikinci fazın kristalleri sertleştirmesi sebebi ile kritik kayma gerilmesini düşürmektedir. Katı eriyik alaşımlarda çözen ve çözünen atomlar arasındaki çap farkının artması kritik kayma gerilmesinin artmasına sebep olmaktadır (18).

Sabit bir dislokasyon yoğunluğuna sahip bir kristalde dislokasyonların birbirleri ile, inklüzyonlar, atom boşlukları, ara yer atomları ile etkileşimi kritik kayma gerilmesini arttırır. Yapı hataları kritik kayma gerilmesini arttırmakla birlikte yapı hatalarının tamamen ortadan kalkması kaymayı aşırı şekilde zorlaştırır. Mikron çapında kılcal tek kristalli (whiskers) kusursuz yapıda mukavemetin, teorik mukavemete çok yakın olduğu görülmüştür (19, 20).

Sıcaklığın artması kritik kayma gerilmesini düşürmektedir. HMK metallerin (Fe,W) bütün sıcaklıklardaki kritik kayma gerilmesi YMK alüminyum ve SPH magnezyumdan daha yüksektir (6). Genellikle, düşük sıcaklıklarda ve ortam sıcaklıklarında, HMK metal kristalleri, $\{110\}$ $\langle 111 \rangle$ sisteminde kayma eğiliminde olmakla beraber, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek indeks düzlemleri harekete geçebilmektedir (4).

Sıcaklık, normal olarak oda sıcaklığında akma noktası sergileyen, çok kristalli demirin çekme-uzama eğrisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Deformasyon sıcaklığı düşürüldüğünde, üst akma noktası belirgin şekilde yükselir, düşen akma ve akma uzama bölgesinin her ikisi de giderek genişler. HMK metallerdeki bu genel gözlem, molibden, niobyum ve tantal için de doğrulanmıştır (4).

Daha düşük sıcaklıklarda, numunede önceden var olan dislokasyonlar, ara yer atomlarının yoğun atmosferi ile sıkıca kilitlenirler. Yeni dislokasyonlar üretmek ve bunları atom düzlemlerinin bir ucunda diğer ucuna hareket ettirmek için önemli ölçüde büyük gerilmeye ihtiyaç duyulmakta, bu sebeple sıcaklık bağımlılığı, sürtünme gerilmesinden dolayı büyük ölçüde artmaktadır. Sürtünme gerilmesi sıcaklığa bağlı olarak düşmektedir (6). Diğer bir deneysel çalışmada (4), sürtünme gerilmesinin % 0,001-0,03 aralığında karbon ve azot ara yer konsantrasyonu ile belirgin bir şekilde arttığı gösterilmiştir.

Deformasyon sıcaklığı oda sıcaklığı üzerine çıktığında, üst ve alt akma noktası ve akma uzama bölgesi yavaş yavaş kaybolmakta ve bunun yerini bir eğri görünümü almaktadır. Demir üzerine yapılan bir araştırmada çekme-akma çizgisinin testere dişi görünüm aldığı sıcaklık aralığında, dislokasyon yoğunluğunun oda sıcaklığındaki deforme edilenden bir kat fazla olduğu belirlenmiştir (4).

Çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için en iyi yol benzeş sıcaklık olarak bilinen ($^{\circ}\text{K}$) cinsinden T/T_M (deformasyon sıcaklığı/metalin ergime sıcaklığı) dır. Benzeş sıcaklıkta plastik gerinim için sıcaklığın elastisite modülüne etkisi dikkate alındığında (σ/E) oranı karşılaştırılır. Küçük taneli malzemelerde $0,4 T_M$ 'nin üzerindeki sıcaklıklardaki yapılan deformasyon işlemlerinde süper plastik davranış gözlenmektedir (6).

Gerilme etkisiyle tanelerin iki veya daha fazla parçaya ayrılması, çok az veya hiçbir plastik deformasyona uğramaksızın olduğunda gevrek kırılma, plastik deformasyon sonucu oluyorsa sünek kırılma ile meydana gelir. Sıcaklığın artmasıyla tane içinden

kırılmadan, tane sınırlarındaki zayıflama nedeniyle tane sınırı boyunca kırılmaya geçiş olmaktadır.

Artan deformasyon hızı ile birlikte kritik kayma gerilmesi artmaktadır. Oda sıcaklığında kadmiyum tek kristalli numunelerde yapılan deneylerde bu durum doğrulanmıştır (6).

HMK metallerin deformasyonu YMK ve SPH metallerden farklı olarak deformasyonun başlangıcında iki veya daha fazla kayma düzleminin birden kaymasıdır (6). HMK tek kristallerin akma veya kritik kayma gerilmesi, özellikle düşük sıcaklıklarda önemli ölçüde sıcaklığa bağlıdır (6, 7). Düşük sıcaklıklar ve yüksek gerinim hızlarında, α demirde kayma $\{110\}$ düzlemlerinde sınırlı olmaktadır ve oda sıcaklığı ve üzerinde uygun düzlem ve doğrultularda kurşun kalem tipi (pencil glide) kayma daha baskındır (4).

HMK kristallerde sıcaklığa karşı duyarlılık, ara yer impuritelerine ve sıcaklık bağımlı Peierls-Nabarro kuvvetine atfedilmektedir. Conrad, Peierls-Nabarro kuvvetinin aşırı sıcaklık bağımlılığına neden olan etkin bir kontrol mekanizması olduğunu gözlemiştir (4).

Tek kristalli HMK alkali metal sodyum, potasyum, demir ve molibden üzerinde yapılan araştırmalarda; kusursuz kayma düzlemlerinin deformasyon sıcaklığına bağlı olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklıkta $\{112\}$ düzlemi ve orta sıcaklıkta $\{110\}$ düzleminin hakim olduğu, yüksek sıcaklıkta $\{123\}$ düzlemlerinin deformasyona iştirak ettiğini ancak her bir durumda $\langle 111 \rangle$ doğrultusunun hiç değişmediği gözlenmiştir (4).

Deformasyonun ilerleyen aşamalarında, kritik kayma gerilmesi değerine ulaşan diğer kayma düzlemlerinin harekete geçmesi ile kayma düzlemlerinin birbirini etkilemesi kritik kayma gerilmesinin değerini artırmaktadır ve buna gizli pekleşme denilmektedir (7).

Taylor ve Elam, HMK metal kristalinin (α demir) deformasyonu üzerindeki çalışmalarında, kaymanın her zaman en sıkı paket doğrultusunda, $\langle 111 \rangle$ bölgesine ait pek çok farklı düzlemlerde $\langle 111 \rangle$ doğrultusunda olduğu gözlemlemiştir (4).

Fahrenhorst ve Schmid, benzer çalışmada kaymanın $\{123\}$ kayma düzlemi ve bir $\langle 111 \rangle$ kayma doğrultusunda olduğunu bulmuşlardır. Barrett, Ansel ve Mehl, 77°K ve 770°K sıcaklık aralığında α demir ve silisyum ferrit kristallerinde bütün kayma izlerinin $\{110\}$, $\{112\}$ ve $\{123\}$ düzlemlerinde olduğunu ve her durumda $\langle 111 \rangle$ kayma doğrultusunun değişmediğini gözlemlemiştir (4).

Opsinkı ve Smoluchowski, düzlem seçiminin maksimum kaydırma gerilmesi kriteri ve $\{110\}$, $\{112\}$ ve $\{123\}$ tipindeki düzlemlerin tercih edilebileceği yönlenmeleri gösteren temel stereografik üçgene bölünmesi ile belirleneceği sonucuna varmışlardır (4).

Heckler ve Granzow, Düşük karbonlu kaynar ve söndürülmüş çeliklerde soğuk haddeleme ve yeniden kristalleşme yönlenmelerinin oluşumunu incelemiştir (21). Artan kesit daralması ile aynı anda haddeleme doğrultusuna paralel $\{100\}$ $\langle 001 \rangle$ den $\{111\}$ $\langle 011 \rangle$ 'e bileşenler içeren kısmi bir $\langle 001 \rangle$ fiber eksen ve dik doğrultuya paralel $\langle 111 \rangle$ fiber ekseninin oluştuğunu gözlemiştir. % 60 kesit daralmasındaki en kuvvetli bireysel yönlenme bileşeni $\{111\}$ $\langle 110 \rangle$, % 80 kesit daralmasında $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ 'a dönmüştür.

Maddin ve Chen, molibden ve niobyum kristallerinin normal olarak $\{110\}$ $\langle 111 \rangle$ sistemi üzerinde kaydığını gözlemlemiştir. Bir HMK kristalin çekme-uzama eğrisinin başlangıç kısmı genellikle; karbon, azot veya oksijen atomları gibi impuritelere dolay, süreksiz akma göstermez. Niobyumda, akma noktasından sonraki çekme-uzama eğrisinin impuritelere duyarlı olduğu gözlenmiştir (4). Karbon azot ve oksijen gibi ara yer impuritelere yoğunlaşmalarının belirgin akma noktasına sebep olduğu bilinmektedir.

Çeşitli YMK ve HMK saf metallerin çekme-uzama eğrileri mukayese edildiğinde, çoğu HMK eğrilerinin YMK metallere göre, daha aşağıda olduğu ve pekleşme hızlarının önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür. YMK metaller gibi HMK metallerin de çekme-uzama eğrileri tane boyutuna duyarlıdır. İnce taneli malzeme, daha yüksek akma noktası ve daha büyük pekleşme hızı göstermektedir. Tek kristallilerin çekme-uzama eğrileri çok kristallilere göre genellikle daha düşük gerilme seviyelerini kapsamaktadır. Belirgin akma noktası bölge saflaştırılmış metal kullanılarak ortadan kaldırılabilir (4).

HMK metal kristallerinin en genel çekme-uzama davranışları parabolik eğri şeklindedir. Ancak, bu davranışından sıkça saptığı görülmüştür (4). Çekme-uzama eğrisi kristal yönlenmesine duyarlıdır. Jaoul ve Gonzalez, sadece az yönlenmiş demir kristallerinde üç aşama pekleşmeyi bulmuşlardır ve tek sistem üzerinde kayma olduğunda üç aşamalı eğri gözlenmiştir ancak, bir parabolik çekme-uzama eğrisi birden çok sistem üzerinde kristallerin deformasyonu sonucu ortaya çıkmıştır (4).

Çok kristalli demirde akma noktası, özellikle numunelerin eksenel yüklenmesine dikkat edilirse, çok belirgin olabilmektedir (4) ve bazı durumlarda, uygulanan gerilmeye göre, % 50 kadar düştüğü gözlenmiştir. Tek kristallilerde olduğu gibi, belirgin akma dayanımı, gerdirme gerinimi veya Lüders bantlarının geçilmesiyle numuneye doğru yayılan plastik deformasyonda bir akma uzama bölgesi ile takip edilmektedir.

Çok kristalli demir, tek kristallilerde olduğu gibi gerinim yaşlanması sergilemektedir. Deney sıcaklığı yükseldiğinde, belirgin akma noktası ve akma uzaması bölgesinin yerini testere dişli bir çekme uzama eğrisinin alması, bazen dinamik yaşlanma (Portevin-Le Chatelier) durumuna atfedilmektedir. Düşük sıcaklık aralığında, karbon ve azot atomları kayan dislokasyonları tutmak için yeterli hızda difüz etmekte ve dislokasyon kilitlenmesine sebep olmaktadır. Uygulanan gerilmenin artırılması bu kilitlenmeyi çözerek veya yeni dislokasyonların çekirdeklenmesi ile bu durum aşılmaktadır (4).

Genellikle çekme-uzama eğrisinin tamamı, küçülen tane boyutu ile üst ve alt akma noktalarının her ikisi de yükseldiğinde, gerilme yükselmektedir. Daha büyük tane boyutlarında, yüksek gerilme yoğunluklu dislokasyonların yığılmaları nedeniyle ve kilitlenme daha az etkili olmakta ve Lüders bantları, düşük akma gerilmesinin küçük değerlerinde büyüme eğilimi göstermektedir. Tane boyutu büyük olduğunda, sadece üst ve alt akma gerilmesi düşmekte aynı zamanda, akmanın düşmesi daha az belirgin veya ortadan kalkma eğilimindedir (4).

Akma gerilmesini etkileyen temel mekanizmalar; ara yer atomlarının dislokasyon atmosferleri, dislokasyonlar üzerindeki ince çökelekler ve dislokasyonların hareketlerine karşı Peierls-Nabarro kuvveti şeklinde açıklanmaktadır (4).

Tek kristalli metallerde, üst akma noktası ile ilgili gerilmedeki ani düşüşte kilitlenmiş dislokasyonların rol oynadığı eriyik atom ve dislokasyon etkileşimlerinin bir sonucu olduğu bilinmektedir (4).

Çok kristalli HMK metallerin tek kristallere göre daha çok belirgin olan akma noktaları, tane sınırlarının hareketli dislokasyonların malzeme içerisine ilerlemesini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Tek kristalde akmanın sadece bir merkezini oluşturmak gerekirken, çok kristalde akma her tanede ayrı ayrı olmalıdır (4). Genel olarak bütün HMK çok kristallilerde taneler arası etkileşim zayıf olmaktadır (22).

Demirde genellikle dislokasyonlar eriyik atom atmosferinden daha çok, ince çökelekler tarafından kilitlenmektedir. Bu nedenle, dislokasyonlar Cottrell modeline göre kurtulamamaktadır. Molibden ve tungstende eriyik atomlardan daha çok çökeltilerin dislokasyonları kilitlediğini göstermektedir. Diğer karşı görüş, çok kristalli demirde, dislokasyon yığılmalarının çok yaygın olmadığıdır. Diğer taraftan Cottrell, demirde yaşlandırma uygulamaları yoğunlaştırıldığında, zayıftan kuvvetliye geniş bir aralıkta kilitlenmenin elde edilebildiğini değerlendirmiştir (4).

HMK kübik kristalde kayma doğrultusu daima $\langle 111 \rangle$ sıkı paket doğrultusunda ve $\frac{1}{2}a\langle 111 \rangle$ en kısa kafes vektöründe meydana gelmektedir. Diğer HMK metallerde kayma baskın şekilde $\{110\}$ düzlemlerinde olduğu gözlenirse de demirde kayma çizgilerinin $\{110\}$, $\{112\}$ ve $\{113\}$ düzlemlerinde olduğu bulunmuştur (8). Dislokasyon reaksiyonunun; dislokasyon ağlarında sıklıkla gözlenen $a\langle 100 \rangle$ dislokasyonlardan dolayı $\frac{1}{2}a(111) + \frac{1}{2}a(1\bar{1}1) = a(100)$ olduğu görülmüştür. Diğer bir reaksiyon ise belirtilen $\frac{1}{2}a(111) \rightarrow \frac{1}{3}a(111) + \frac{1}{6}a(111)$ dır (4).

Bununla birlikte Cottrell, HMK kafeste hareketsiz dislokasyonların oluşmasına sebep olan dislokasyon hareketlerini belirtmektedir (4). Bu hareket gevrek kırılma için çatlak oluşumunu üreten bir mekanizma olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda $a_0(001)$ dislokasyon ağını üreten bir mekanizmadır (7).

Silisyumlu demirde (% 3), kenar dislokasyon bileşenleri vida dislokasyonundan daha uzağa hareket etmektedir bu nedenle, vida dislokasyon bileşenleri uzun ve genellikle $\langle 111 \rangle$ doğrultuları boyunca dizilmişlerdir. Bununla birlikte, vida dislokasyon bileşenleri daha kolay çapraz kaymayı gerçekleştirdiğinden kayma bantları genişlemektedir (4). Bütün HMK metallerde düşük eşit sıcaklıklarda, vida dislokasyonu hareketliliği, kink çiftinin çekirdeklenme ve yayılması ile kontrol edilmekte ve dislokasyonlar arası etkileşim sonucu oluşan engeller üzerinde joglar kendiliğinden oluşmaktadır (23).

Niobyumda da benzer davranış göstermiştir. % 1-2'lik gerinimde hücre yapısı içerisinde dislokasyonlar çabukça bozulmuş ve % 1-2'lik gerinimden sonra görülen basit dislokasyon şekli hemen hücresel yapıya dönüşmektedir. α demirde % 60 gerinimde, $\frac{1}{2}a\langle 111 \rangle$ tip dislokasyon (% 60) belirlenmiştir. Bununla birlikte, % 20 gerinimde yüksek miktarlarda $a\langle 100 \rangle$ (% 20) ve $a\langle 110 \rangle$ tip dislokasyonların her ikisi de bulunmuştur (4).

2.3. Pekleşme

Metal kristallerinin başlangıçtaki plastik deformasyonu, dislokasyonların kayması ile gerçekleşmektedir. Daha sonra, dislokasyonların kristal içerisindeki hareketlerinin engellenmesi ile pekleşme artmakta ve deformasyonu devam ettirmek için yüksek gerilme gerekmektedir. Dislokasyon hareketleri için diğer dislokasyonlar, tane ve alt tane sınırları, çözünmüş atomlar, ikinci faz partikülleri ve yüzey filmleri gibi birçok engel oluşmaktadır.

HMK metallerde pekleşme, esas olarak dislokasyon düğümlerinin oluşması ile meydana gelmektedir. Yeni düğümlerin oluşması ile dislokasyon ortalama serbest yolunun azalması ve dislokasyon çoğalmasından dolayı, hareketli dislokasyon yoğunluğunun artması gibi karmaşık iki etki pekleşmeye katkıda bulunmaktadır (23). Saf metallerin tek kristalleri çok belirgin pekleşme göstermektedir ve diğer dislokasyonların en önemli engeller olduğu bilinmektedir. Gerilme alanları etrafındaki dislokasyonlar, çekici veya itici elastik etkileşim göstermekte ve iki dislokasyon birbirine yaklaştığında, etkileşim artmaktadır (4).

Taylor, pekleşmenin dislokasyonları içeren ilk genel teorisini ortaya atmış, alüminyum gibi metal kristallerinin çekme-uzama eğrileri parabolik olarak kabul edilmiştir (4). Taylor, pek çok dislokasyonun kristal yüzeyine ulaşmadığını ancak, diğer dislokasyonlarla elastik olarak etkileşim olduğunu ve kristalde sabitlenerek bir ağ oluşturduğunu düşünmüştür. Deformasyon ilerlediğinde, dislokasyon yoğunluğu giderek artmakta ve sonraki dislokasyonların geçilmesi için gerekli kuvvet yükselmektedir.

Taylor'un deformasyonun izole edilmiş dislokasyonların hareketi ile oluşmamasını düşünmesi mevcut teorilerle ters düşmektedir. Ancak, kayma bantları üzerindeki dislokasyonların sayısı, Frank-Read kaynağı ile artmakta ve dislokasyon çiftlerinin birbirlerini kilitlediğinde diğer dislokasyonlar tarafından harekete zorlanmaktadır.

Mott, Taylor'un teorisine karşın, bireysel dislokasyonlar yerine yığılmış dislokasyon gurupları arasındaki etkileşimleri incelemiştir. Bu gruplar, hareketsiz dislokasyonlar olarak engellere karşı yığılmış Frank-Read kaynağından çıkan bir kayma düzlemindeki dislokasyonlar olarak düşünülmüştür. Bu sebeple dislokasyon yığılması iç gerilmeyi artırmakta ve belirli ikinci sistemlerdeki kaynakları harekete geçirmektedir. Oluşan bu dislokasyonlar, dislokasyon yığınlarındaki birincil dislokasyonlarla etkileşmektedir (4). Deformasyon sonucu gerilimin artmasında dislokasyon yoğunluğu, dislokasyon şeklinden daha önemli rol oynamaktadır (24).

Kayma için kritik kaydırma gerilmesinin bağlı olduğu değişkenlerden birinin sıcaklık olduğu bilinmektedir. Seeger, başlangıç plastik deformasyon gerilmesinin sadece, seçilen kayma sisteminde üretilmiş ilk dislokasyonlar arasındaki etkileşimden değil, aynı zamanda bu dislokasyonların toplanmış durumda bulunan dislokasyonlarla etkileşimi ile de belirlenebileceğini vurgulamaktadır (4). Bu “grown-in” dislokasyonların rasgele dağıldıkları ve pek çoğunun birincil kayma düzlemlerini çapraz kestikleri kabul edilmekte, ve bunlar genellikle dislokasyon yığınları olarak “forest” ifade edilmektedir.

2.3.1. Plastik deformasyon gerilmesi ve pekleşme ilişkisi

Dislokasyon hareketleri için mevcut engeller, uygulanan gerilme veya ısı enerjisi ile yenilebilmektedir. Seeger, kaymanın (τ_G ve τ_S) gibi iki bileşenden meydana geldiğini ve τ_G 'nin, aynı Burgers vektörüne sahip birincil kayma düzlemindeki paralel dislokasyonların etkileşimlerinden kaynaklandığını ve bu bileşenin sıcaklıktan bağımsız olduğunu ortaya atmıştır (4).

Diğer bileşen τ_S , kayma düzlemini boydan boya kesen, dislokasyon yığınları ile kaymaya sebep olan dislokasyonların etkileşiminden ortaya çıktığını ve müteakip hareketi engelleyen “joglar” oluştuğunu belirtmiştir. Bu bileşen, sıcaklık ısı aktivasyonu jogların oluşumuna büyük ölçüde katkıda bulunacağı için oldukça sıcaklık hassasiyetlidir.

Yüksek sıcaklıklarda, τ_G değişmez olarak kalmakta ve τ_s bileşeni, ısı aktivasyonu birincil kayma dislokasyonlarının, dislokasyon ormanına doğru boydan boya hareketi için gerilme yardımına ihtiyacı olmaması ile ortadan kalkmaktadır.

Asensio ve arkadaşları, soğuk haddeleme sırasında düşük karbonlu çeliklerde, yüksek karbon ve ince tane yapısında artan pekleşme hızı ile birlikte şerit halindeki çeliklerin sertleştiğini gözlemlemişlerdir (25).

2.3.2. Pekleşme davranışı

Düşük karbonlu çeliklerde, çekme sırasında deformasyonun erken aşamalarında basma türü kalıntı gerilmeler yok olurken, dislokasyonların kesişmesi veya ara yüzeyin engellemesi sonucu dislokasyon hareketleri önlenir. Deformasyonun devamı için gerekli yeni dislokasyonların oluşumu ve dislokasyonların tırmanması için gerilmenin artırılması gereklidir ve artan gerilme ile şekil değişimi de artmaktadır (26).

Metallerin deformasyon davranışı Hollman eşitliği “Eş. 2.1” ile izah edilmektedir (19). Ancak, Hollman eşitliğinin sabit n , değerine ve karbonlu çeliklerin üç farklı deformasyon aşamasına sahip olmasından dolayı üç farklı “ n ” katsayısının bulunması ile Ludwick denkleminde geliştirilen “Eş. 2.2” Jaoul-Crussard analizi kullanılmaktadır.

$$\sigma = k \varepsilon_p^n \quad [2.1]$$

$$\log \sigma = \log k + n \log \varepsilon_p$$

Burada:

σ ; gerçek gerilme

ε_p ; gerçek plastik şekil değiştirme

k ;dayanım katsayısı

n ; pekleşme katsayısıdır.

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon_p^n \quad [2.2]$$

k, n =sabittir (log σ -log ε çiziminden elde edilir) veya

log ($d\sigma/\varepsilon$)=log $k+n+(n-1)$ log ε_p dır (6).

Jaoul-Crussard analizinde σ, k ve n değerleri log $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ /log ε_p çiziminden elde edilir.

Geliştirilmiş Swift denkleminde “Eş 2.3” uniform uzama basitçe anlatılmaktadır.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 + C_\sigma^m \quad [2.3]$$

Burada :

ε_p ; gerçek plastik şekil değiştirme

C, m, ε_0 ; malzeme sabitleri (log $d\sigma/\varepsilon$ 'nin log σ 'a göre çiziminden elde edilir)

σ ; gerçek gerilmedir (6).

Jaoul-Crussard analizi küçük şekil değiştirme miktarında, pekleşmedeki değişmelere karşı oldukça hassastır (26). Numunelerin pekleşme davranışlarını belirlemek için her bir numunenin çekme deney grafikleri üzerinde, düzenli aralıklara Mühendislik gerilim ve gerinim değerleri alınmıştır. Alınan bu değerler “Eş. 2.3” ve “Eş. 2.4” kullanılarak Jaoul-Crussard analizi ile numunelerin üç aşama pekleşme davranışları elde edilmiştir.

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad [2.4]$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1+e) \quad [2.5]$$

Burada :

ε ; gerçek gerinim

l ; herhangi bir gerilme anındaki numune boyu

l_0 ; numunenin ilk boyu

σ_t ; gerçek gerilme

σ_e ; mühendislik gerilme

e ; boyca uzama oranıdır (18).

2.4. Eş Yönlü Olmayan Çok Kristalli Metaller

Tek kristal çalışmaları kübik kristallerde dahi mekanik özelliklerinin belirgin olarak eş yönlü olmayan olduğunu açığa çıkarmış ve kübik olmayan yapılarda bu eş yönlü olmayannın daha fazla olabileceğini göstermiştir. Plastik özelliklerin eş yönlü olmayansı, kristaldeki dislokasyon davranışlarının kaçınılmaz bir sonucudur, yönsel özellikler öncelikle elastik özelliklerin eş yönlü olmamasından kaynaklanmaktadır.

Çekme deneylerinde kayma ile deformasyon üzerine uygulanan makroskopik sınırlamalar ve diğer karmaşık deformasyon işlemleri önemli bir rol oynamaktadır. Çok kristalli malzemelerde eş yönlü olmayan davranış etkileri eş eksenli bir tane yapısı ile kolaylıkla ortadan kaldırılamamaktadır. Bir ingotun ilk şekillendirilmesi ile tavlanmış çok kristalli toplulukların oluşumu ve deformasyonun değişik aşamalarındaki yeniden kristalleşmede her zaman, rasgele yönelmiş tane yapısı elde edilememektedir.

Deformasyon işlemlerinin çoğu kayma ve ikizleme ile deformasyonun kristalografik özelliği nedeni ile eş yönlü olmayan davranış oluşturma eğilimindedir ve bu yeniden kristalleşme üzerine daha da yoğunlaşmaktadır. Rasgele olmayan tane sıralanışı, tercihli yönelme veya yönelmeye atfedilmektedir. Deforme edilmiş ve tavlanmış durumlardaki çok kristalli topluluklarda tercihli yönelmeler oluşmaktadır. Pek çok

fiziksel özellikler örneğin, manyetik ve ısı özellikler, kristalin yönelme derecesi ile orantılı olarak değişmektedir (4).

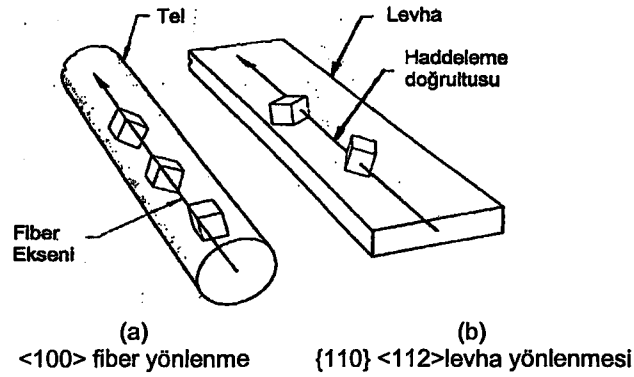
2.4.1. Tercihli yönelmenin gelişimi (tekstür)

Tel çekme ve haddeleme gibi şekil değiştirmeye uğrayan bir metalde taneler kristalografik düzlemler ve en büyük gerinim yönüne bağlı olarak belirli yön ve doğrultularda yönelme eğilimi gösterir. Tel çekmede, tek kristaldeki kayma düzlemlerinin esas gerinim yönü eksenine paralel dönme eğiliminde olduğu bilinmektedir. Aynı durum çok kristalli malzemelerde de gerçekleşmektedir ancak, çoklu kayma sistemlerinin birbiri arasındaki karmaşık hareketler, çok kristalli durumun analizini zorlaştırmaktadır. Çoklu kristallerin tamamında tanelerin bireysel olarak serbestçe dönmemesinden dolayı, kafes bükülmeleri ve kırılmaları olmaktadır (7).

Tercihli yönelme % 20-30'luk soğuk şekillendirme ile enine kesit daralmasından sonra bulunabilmektedir. Kesit daralmasının bu safhasında, ideal yönelmedeki kristallerin tek tek dağıldıkları fark edilebilir. Artan kesit daralmasıyla (% 80-90), tercihli yönelme, gerekli biçimi alarak tamamlanmaktadır. Tercihli yönelmenin tipi veya şekil değiştirme tercihli yönelmesi, başlangıçta kayma sistemleri tipi ve adedine veya gerinime bağlı olarak gerçekleşmektedir. Şekil değiştirme sıcaklığı ve önceki tercihli yönelme tipi gibi faktörler şekil değiştirme için önemli olabilmektedir (7).

En basit şekil değiştirme tercihli yönelmesi; çubuk veya telin çekilmesi ile oluşmaktadır. Bu, fiber yapılı malzemelerdeki yapıya benzer düzen sebebiyle, doğal olarak fiber tercihli yönelmeye atfedilir. Mekanik şekillendirme ana yönündeki ikinci faz sürekliliği, boşluklar ve inklüzyonların yönelmesi ile oluşan mekanik fiber yapı, şekil değiştirme sırasındaki tanelerin kristalografik yeniden yönelmesi ile farklılık arz etmektedir. Çubuk ve levha gibi plastik olarak şekillendirilmiş metallerin yönlü mekanik özelliklerinin üretilmesi, mekanik ve kristalografik yapıda önemli

faktörlerdir (7). Tel ve levha tercihli yönlenmesi (tekstür) Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Tel ve levha tercihli yönlenmesinin (tekstür) sistematik gösterilmesi: teldeki fiber yönlenme (a) ve levhadaki levha yönlenmesi (8)

Choi ve arkadaşları, düşük karbonlu çeliklerde levha ve çubuk haddelenmede mekanik özelliklerin haddelenme tipine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini gözlemlemişlerdir (27). Çubuk haddelenmiş numunelerde maksimum çekme gerilimi ve gerinim pekleşmesi, haddelenmiş levhalardan daha yüksek olmuştur. Bu durum, eş eksenli alt taneli haddelenmiş çubuk numunelerde, aktif kayma sisteminin yüksek miktardaki dislokasyon etkileşimi ile olmasına atfedilmektedir.

İdeal tel tercihli yönlenmesi kristalografik yönleri, kesin olarak tel eksenine paraleldir ve bu tercihli yönlenme tel çevresine veya fiber eksenine simetriktir. Hacim merkezli kübik metaller <110> yönünde tel eksenine paralel bir tercihli yönlenmeye sahiptir. Yüzey merkezli kübik metaller <111> ve <100> yönlerinde tel eksenine paralel çift fiber tercihli yönlenmeye sahiptir. Alüminyum gibi yüksek istif hatasına sahip metallerde ve kolay kaymanın olması sebebiyle ağırlıklı olarak <111> tercihli yönlenme, düşük istif hata enerjisine sahip gümüş ve princi ağırlıklı olarak <100> tercihli yönlenmesine sahiptir. SPH metallerde taban düzlemler magnezyumda olduğu gibi <10 $\bar{1}$ 0> yönünde tel eksenine aynı zamanda dönmektedir (7, 28).

Haddeleme ile üretilen bir levhanın şekil değiştirme tercihli yönlenmesi, haddeleme doğrultusuna paralel düzlemdeki kristalografik doğrultular ve levha yüzeyine paralel kristalografik düzlemler ile tanımlanmaktadır. YMK metaller ve alaşımlarında iki çeşit haddeleme yapısı hakimdir. İlk baştaki şekil değiştirme esnasında yoğun çapraz kayma olduğunda $\{110\}$ $\langle 112 \rangle$ tercihli yönlenme (α -prinç tip tercihli yönlenme) gelişmekte; ancak daha yoğun plastik şekil değiştirme ile $\{112\}$ $\langle 111 \rangle$ bakır tip tercihli yönlenme gelişmektedir. Çapraz kaymanın kolaylığı nedeniyle istif hata enerjisi ile tercihli yönlenme arasında iyi bir ilişki vardır. Yüksek istif hata enerjisi ve yüksek sıcaklık bakır tip yönlenmenin $\{112\}$ $\langle 111 \rangle$ oluşmasına neden olmaktadır (7).

2.4.2. Mekanik fiberleşme yönlenmesi (tekstür)

Mekanik fiber yönlenme ekstürüzyon, döverek kalıplama, haddeleme veya tel çekme gibi tek eksenli deformasyon sırasında tanelerin şekillendirme ekseni yönünde uzaması ile oluşmaktadır. Fiber yönlenme, eksene paralel düşük indislerin bir kristalografik yönü ile karakterize edilmektedir. Tel çekmeyle deforme edilen HMK metaller, tel eksenine paralel yönde $\langle 110 \rangle$ yönlü bir fiber yönlenmeye sahiptir (7, 29).

Yönlenmenin kusursuzluğu deformasyon miktarı ile artmakta ve yönlenme, telin yüzeyinden merkezine doğru önemli ölçüde değişebilmektedir. YMK metaller, tel eksenine paralel yönde $\langle 111 \rangle$ ve $\langle 100 \rangle$ doğrultulu çift fiber yönlenmesine sahip olabilirler. Yüksek istif hata enerjili metallerde $\langle 111 \rangle$ yönlenmesi, hakim olma eğilimindedir. Alüminyum tek bir $\langle 111 \rangle$ yönlenmesinin sahip olurken düşük istif hata enerjili, gümüş ve prinç çoğunlukla $\langle 100 \rangle$ ve bir miktar da $\langle 111 \rangle$ yönlenmelerine sahiptir. Magnezyum gibi SPH metallerde taban düzlemleri, taban düzlemindeki $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ yönüne uyma eğiliminde olan tel ekseni kapsayınca kadar dönerler (4). Genel olarak, yeniden kristalleşmenin olmadığı ekstürize edilmiş ve tek eksenle dövülerek uzatılmış metaller çekme ile oluşan yapıya benzer fiber yönlenmeye sahiptirler.

2.4.3. Haddeleme ve tane yönlenmesi

Haddeleme yönlenmesi, haddeleme doğrultusuna paralel bir özel kristalografik yöne ve aynı zamanda haddeleme düzleminde düşük indisli bir düzleme sahiptir. Fiber yönlenmeler gibi, deformasyon miktarının artması ile azalan bir ideal yönlenmeden sapmalar olmaktadır. Ayrıca, haddelenmiş metalde birden fazla belirgin ve de daha küçük miktarlarda az sayıda yönlenmiş kısımlar birlikte bulunabilmektedirler.

YMK metaller ve alaşımları oldukça basit hakim bir haddeleme yönlenmesine sahiptir, bunlar haddeleme düzlemindeki $\{110\}$ düzlemi ile, $\{110\}$, $\langle 112 \rangle$ ve haddeleme yönündeki $\langle 112 \rangle$ yönüdür. Bilinen çoğu YMK metaller, soğuk haddeleme üzerine bu yönlenmesi oluşturmaktadırlar. Bakırda bu yönlenme ile birlikte ikincil yönlenmenin miktarı ağır deformasyon $\{112\}$ $\langle 111 \rangle$ 'e yaklaşıncaya kadar irrasyoneldir ve çeşitli diğer küçük yönlenmiş kısımlar bulunmaktadır. Bunlar muhtemelen çeşitli yeniden kristalleşmiş yönlenmelerin tavlama üzerine büyümede etkili olabilmektedir (4).

HMK metallerde, hakim tercihlili yönlenme haddeleme düzleminde $\{001\}$ $\langle 110 \rangle$ kübiktir, ancak yine de diğer $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ ve $\{111\}$ $\langle 112 \rangle$ gibi yönlenme elemanları da bulunmaktadır. Haddeleme, dik açılarda iki yönde yapılırsa bu işlem çapraz haddeleme olarak adlandırılır. HMK metallerde, çapraz haddeleme düz haddelenmiş levhanın karakteristiği olan $\{001\}$ $\langle 110 \rangle$ yönlenmesi yoğunlaştırma veya belirginleştirme eğilimindedir. Bazı YMK metallerde çapraz haddeleme etkisi, düz haddelemede oluşan eş yönlü olmayan davranış düzeyini düşürmektedir (4).

2.4.3.1. Soğuk haddeleme yönlenmesi

HMK metallerde baskın haddeleme tercihlili yönlenmesi, levhanın düzlemine paralel yönlenmiş haddeleme doğrultusunda ve $\langle 110 \rangle$ yönlerinde $\{100\}$ düzlemlerinden oluşur (4), ancak $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ ve $\{111\}$, $\langle 112 \rangle$ gibi diğer tercihlili yönlenme öğeleri

de bulunabilir. SPH metallerinin taban düzlemleri haddeleme yönüne bağlı olarak haddeleme düzlemine paralel $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ eğilim göstermektedirler (7, 8).

Soğuk haddeleme sırasında, harcanan enerjinin yaklaşık % 10'u çok kristalli malzemede, kristal hatalarına bağlı olarak elastik enerjinin oluşması için depo edilmektedir. α fiber eksen boyunca, plastik gerinim düşerken, depolanmış enerji $\{001\}\langle 110 \rangle$ 'dan $\{111\}\langle 110 \rangle$ 'a artmaktadır (30).

Plastik şekil değiştirme sonucu tercihli yönlenme, şekil değiştirme için kuvvetli biçimde kayma ve ikizleme sistemine bağlıdır ancak, bu genel olarak kalıp köşesi, silindir çapı, silindir hızı ve her bir pasodaki kesit daralması gibi değişkenlerden etkilenmez. En önemli mekanik değişkenler akış geometrisi ve şekil değiştirme miktarıdır. Bu sebeple, aynı şekil değiştirme tercihli yönlenmesi bir çubukta hem haddeleme hem de çekme suretiyle yapılabilir (7). Çeşitli kristal yapıları göre tel ve levha tercihli yönlenme yapıları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Soğuk şekillendirme ile üretilen yaygın bazı yönlenmeler (4)

Kristal yapı	İşlenme şekli	Yönlenme
YMK	Tel çekme ve ekstürüzyon	$\langle 111 \rangle$ Tel eksenine paralel $\langle 100 \rangle$
HMK	Tel çekme ve ekstürüzyon	$\langle 110 \rangle$ Tel eksenine paralel
SPH	Tel çekme ve ekstürüzyon	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$ Tel eksenine paralel
YMK	Haddeleme	$\{110\}$ Haddeleme düzlemine paralel $\langle 112 \rangle$ Haddeleme doğrultusuna paralel
HMK	Haddeleme	$\{001\}$ Haddeleme düzlemine paralel $\langle 110 \rangle$ Haddeleme doğrultusuna paralel
SPH	Haddeleme	$\{0001\}$ Haddeleme düzlemine paralel $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ Haddeleme doğrultusuna paralel

2.4.3.2. Sıcak haddeleme yönlenmesi

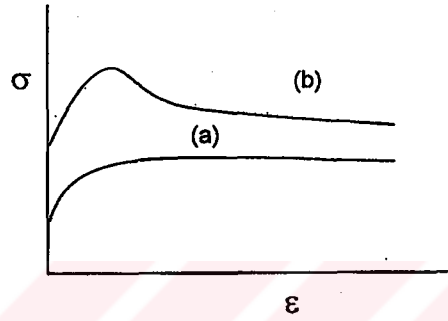
Sıcak şekillendirme, sıcaklık şartları altında ve deformasyon işlemleri sırasında önemli ölçüde toparlanma işlemlerinin olduğu gerinim hızına atfedilmektedir. Çünkü yüksek gerinimler, gerinim pekleşmesi olmaksızın elde edilebilmektedir. Sıcak şekillendirmede gerinim, çekme ve sürünme deneyleri ile karşılaştırıldığında ($\sigma \approx 2-4$ kat) daha büyüktür. Sıcak şekillendirme, çoğunlukla $0,6 T_M$ sıcaklığın üzerinde ve yüksek gerinim hızları $0,5-500s^{-1}$ aralığında yapılmaktadır (7).

Sıcak şekillendirilmiş metallerin özellikleri ve yapıları, soğuk şekillendirilmiş ve tavlanmış metallere daha uniform değildir. Deformasyon daima yüzey tabakalarında daha fazla olduğundan, metal bu bölgede yeniden kristalleşmiş ince tanelere sahip olmaktadır. Çünkü çalışma sıcaklığında iç kısımlar, dış yüzeyden daha geç soğumakta ve iç kısmın büyük bir bölümünde tane büyümesi olmaktadır. Bir metalin sıcak şekillendirme için düşük sıcaklık sınırı, metal sıcak olduğunda, yeniden kristalleşme hızının gerinim pekleşmesini ortadan kaldırmak için yeterince hızlı olduğu zamandaki en düşük sıcaklıktır (7).

Genellikle sıcak şekillendirme sıcaklıkları, düşük deformasyon gerilmesi için minimum çalışma sıcaklığının üzerinde bir sıcaklık seçilmektedir. Muhtemelen bu sıcaklıklarda yeniden kristalleşmeyi müteakiben tane büyümesi meydana gelmektedir. İnce tane yapısı arzu edildiğinden, son pasodaki seçilen çalışma sıcaklığı, tane büyümesi ihmal edilecek düzeyde olduğu noktadadır. Bitirme sıcaklığı çoğunlukla minimum yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindedir. İnce taneli bir yapı elde etmek için son pasodaki deformasyon miktarı nispeten büyük olmalıdır (7).

Silindirlerin basması sırasında kayma bantları meydana gelir. Bu tip deformasyon, basma sırasında plastik kararsızlığın oluşması ile ilgilidir. Sıcak deformasyonda genellikle basma numunesinde, deformasyon yumuşaması için alanın artması ile bazı mukavemetlendirme mekanizmaları kararsızlığının artmasına katkıda bulunmaktadır.

Sıcak şekillendirmede, metale bağlı olarak yumuşamaya sebep olan iki mekanizma bulunmaktadır. Alüminyum ve α demirde dinamik toparlanma yumuşama mekanizmasıdır. Bu, çapraz kayma ve tırmanma ile sürünme deformasyonunda olduğu gibi iyi bir alt tane yapısının oluşması ile meydana gelmektedir. Sıcak şekillendirme akış eğrileri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Metal için sıcak şekillendirme çekme-uzama eğrileri : (a) dinamik toparlanma (b) dinamik toparlanmadan sonra yeniden kristalleşme (7)

Sıcak şekillendirme mekanizmaları, deformasyon işlemleri sırasında olan dinamik işlemler ve deformasyondan sonra meydana gelen statik işlemlerdir. Sıcak şekillendirmedeki dinamik işlemler; dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmedir.

Dinamik toparlanma, gerinim esnasında dislokasyon çiftlerinin yok olmasına sebep olan basit bir mekanizmadır. Akış eğrisinde soğuk şekillendirmeden daha az öneme sahiptir [Şekil 2.2 (a)]. Düşük dislokasyon yoğunluğu bu sıcaklık bölgesinde çapraz kaymanın kolaylığı, tırmanma ve dislokasyon düğümlerinin çözülmesi ile ilgilidir. Bu deformasyon mekanizmaları mikroyapıda uzamış tanelerin oluşmasına, bunların içerisinde belirgin bir (1-10 μm) ince alt taneli yapıya sebep olmaktadır. Tanelerin uzaması ve ezilmesine rağmen, bunların içerisindeki alt tane sınırları deformasyon sırasında sürekli olarak bozulmakta ve düzenlenmektedir. Bu sebeple, taneler eş eksenli yapıyı sürdürürler. Dinamik toparlanma; α demir, yüksek istif hata enerjisine sahip alüminyum ve çoğu HMK gibi metallerde olmaktadır (7).

Dinamik yeniden kristalleşmede dislokasyonların yok olması, sadece dislokasyon yoğunluğu yüksek düzeye çıkması durumunda olmaktadır. Sonuç olarak, gerinim pekleşme hızı, yeniden kristalleşme oluncaya kadar yüksektir [Şekil 2.2 (b)].

Tavlama tercihli yönlenmesi, “yönlenmiş çekirdeklenme” ve diğeri “yönlenmiş büyüme” olmak üzere iki tip temel mekanizma ile açıklanmaktadır. Yeniden kristalleşmiş tanelerin yönlenmesi teorisine dayanan yönlenmiş çekirdeklenme, teorisi tamamen yeniden kristalleşme için çekirdeklerin yönlenmesi ile belirlenmektedir. Bununla birlikte, önceden tahmin edilen; diğere deneyler ve tecrübelerde açıkça olmayandan farklı olarak birçok çekirdeklerin yönlenmesi rol oynamaktadır (28). Bunun yanı sıra, soğuk şekillendirmenin neden olduğu mekanik ve fiziksel özelliklerdeki değişim tavlama ve yeniden kristalleşme sonucu, yaklaşık olarak soğuk şekillendirme öncesi özellikler seviyesine geri dönmektedir (17).

Sıcak haddeleme sırasında demir YMK yapıya sahiptir bu nedenle, deformasyon mekanizmaları YMK kristallerin üçüncü aşaması ile benzerlik göstermektedir. Üçüncü aşama ikinci aşamayı takip eden çekme-uzama eğrisinin, parabolik bölümüdür ve pekleşme hızı gitgide azalır. Bu aşamada sıcaklık hariç bir ve ikinci aşamadaki değişkenlerin etkisi daha azdır (4). Bu bölgede dinamik yeniden toparlanma nedeniyle pekleşme hızı düşmekte ve vida dislokasyonları da kenar dislokasyonları gibi kolayca hareket etmektedir.

Bu sebeple, üçüncü aşamadaki muhtemel mekanizma, ısı hareketi olarak görülmektedir. Üçüncü aşamada, periyodik olarak güçlü engeller tarafından bloke edilen bazı dislokasyonlar, çapraz kayma düzlemleri üzerinde bölgesel kayma ile engellerden kurtulmaktadır. Birincil kayma düzlemi üzerindeki bir kenar dislokasyonunun, alternatif bir oktahedral düzlemi üzerinde hareket etmesi, dislokasyon tırmanmasını gerektireceğinden oldukça zordur. Diğere taraftan bir vida dislokasyonu veya bir vida dislokasyon halkasının vida bileşeni, sağlanan alternatif düzlem bilinen kayma doğrultusuna sahip olduğundan kolay kaymaktadır ve aynı Burgers vektörüne sahip olabilmektedir (4).

YMK metaller aynı pekleşme aşamasında mukayese edilirse düzenli davranış şeklinde görülür. Her bir metal, aynı durumu sergilemekte ve sadece pekleşme davranışlarını kontrol eden dislokasyon reaksiyonları için gerekli sıcaklıklar ve/veya gerilmeler değişmektedir (31).

Deformasyonun başlangıç aşamalarında, dislokasyon hareketlerinin tane sınırları tarafından sınırlandırılması sonucunda, tek kristallilerde başlangıçtaki parabolik pekleşmenin yerini kolay kayma almaktadır. Çoğu tanelerde çapraz kaymaya neden olan karmaşıklık faktörü vardır. Bu, sınırlar boyunca sürekliliği sürdürürken şekil değişikliğine izin verme gerekliliğidir.

Karmaşıklık faktörünün ikinci bir durumu ise, bir tane içerisindeki gerilme sisteminin bile oldukça heterojen ve diğer bitişik tanelerdeki farklı davranışlara bağımlı olmasıdır. Genel olarak, bu etkiler ince taneli yapılarda daha etkili olurken, kaba taneli yapılar tek kristallilerin davranışlarına yaklaşmaktadır (4).

Çelik malzemelerde, sıcak haddeleme genellikle, A_3 sıcaklığının üzerinde yapılmaktadır. Bu nedenle oda sıcaklığındaki HMK demir YMK yapıya dönüşmektedir. Hindson, sıcak haddeleme sıcaklığının hemen hemen A_3 sıcaklığına eşit olduğunu ancak, bir miktar düşük sıcaklıkların kullanılmasında ferritin oluşmadığını gözlemlemiştir (32).

Düşük karbonlu çeliğin 910°C 'de % 85, haddelenmesinde çoğunlukla rasgele bir yönlenme oluşmasına rağmen, 780°C 'deki haddelemede hemen hemen soğuk haddelenmiş çelikle aynı yönlenmeye sahip olmaktadır (29). Whitely ve Wise, kaynar çeliklerin sıcak haddeleme yönlenmesi ve müteakip tavlama yönlenmesi üzerine sıcak haddelemenin, sıcaklık üzerine etkisini çalışmışlardır (33). 860°C yüksek bitirme sıcaklığında yönlenmenin hemen hemen rasgele olduğunu ve 771°C düşük bitirme sıcaklığında (110) yönlenmenin oluştuğunu ve rasgele yönlenmenin, tavlama yönlenmesinde kuvvetli bir (111) yönlenme bileşenini destekleyebileceğini bulmuşlardır.

Goodman ve Hu, düşük karbonlu çeliklerin plastik gerinim oranı üzerine sıcak haddeleme yönlenmesi etkisini araştırmışlardır (34). 850 °C bitirme sıcaklığında (110)'nin, sıcaklığın azalması ile birlikte azaldığını ve 900-925 °C sıcaklık aralığında (200) bileşenin minimuma indiğini ve haddeleme sıcaklığının 1000°C'den 900°C'ye düşmesi ile (112) ve (222) bileşeninin hızla arttığını gözlemişlerdir.

Sanz ve arkadaşları, ara yer atomları bulunmayan ekstra düşük karbonlu ve düşük karbonlu çeliklerde 1000°C'de haddelemede ve 650-675°C (α) bitirme sıcaklığındaki haddelemede her iki numunede de {100} yönlenme bileşeninin {111} bileşeninden daha kuvvetli olduğunu gözlemişlerdir (35).

Asensio ve arkadaşları, düşük karbonlu paket halindeki ince çelik levhaların bitirme pasosu yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki haddelenmesinde dönüşüm yönlenmelerinin şerit haddeleme düzlemine paralel uzanan belirgin {110} ve {100} olduğunu gözlemişlerdir (25).

2.5. Mekanik Özelliklerin Yön Bağımlılığı

Özelliklerin yöne bağımlılığı eş yönlü olmayan davranış olarak tanımlanmaktadır. Metalik malzemelerde kristalografik eş yönlü olmayan davranış ve mekanik fiberleşme olarak iki tip eş yönlü olmayan davranış oluşmaktadır (6).

Kristalografik eş yönlü olmayan davranış plastik deformasyon veya tavlama ile meydana gelmektedir. Tercihli yönlenme sonucu oluşan yapı, deformasyon yönlenmesi ve yeniden kristalleşme sonucu tanelerin kristalografik yönlenmesi tavlama veya yeniden kristalleşme yönlenmesi meydana getirmektedir. Çok kristalli malzemelerde plastik deformasyon veya tavlama ile oluşan kristalografik eş yönlü olmayan davranış tek kristallilerde olduğu gibi mekanik değerlerin yöne bağlı olarak değişmesine sebep olmaktadır (6). Bu sebeple eş yönlü olmayan davranış faydalı veya ciddi bir dezavantaj olabilir. Kapların derin çekilmesinde, kenarlar etrafında simetrik olarak sıklıkla kulakçık meydana gelmektedir, bu mekanik özelliklerin eş

yönlü olmayan davranışı sonucu olarak, malzeme kalınlığı değişmesine de bağlıdır. Diğer taraftan, uygun yönlümelere sahip bir levha, belirli yönlerde yönlüme gelişmemiş bir malzemeden daha önemli ölçüde yüksek dayanıma sahiptir (4).

Deformasyon yönlümesinin akma gerilmesine etkisi, çekme gerilmesine etkisinden daha fazla olmakta ve deformasyon yönüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kristalografik eş yönlü olmayan davranış karakteristiği yassı metalik malzemelerde eş yönlü olmayan davranış katsayısı; genişlikteki şekil değişiminin kalınlıktaki şekil değişimine oranı R ile belirlenmektedir. İzotrop malzemede levha düzlemine dik şekil değiştirme $R=1$ dir (7).

Zambrano ve arkadaşları, sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelik numunelerin çekme deneylerinde, haddeme doğrultusuna paralel çekme geriliminin en yüksek, haddeme doğrultusuna 45° 'de daha az ve 90° 'de en az olduğunu gözlemlemişlerdir (36).

Haddelenmiş ve haddelendikten sonra tavllanmış levhanın mekanik özelliklerinin yönlümesi, bakır ve bakır esaslı alaşımlar ve alüminyum vb. metallerde deformasyonunun bir sonucudur. Deformasyon, tavlama yönlümeleri ve tavlama öncesi kesit daralma miktarı, tavlama sıcaklığı vs. gibi değişkenlerin etkileri ile çekme sırasında eş yönlü olmayan davranış akışı ve kulakçık oluşumuna sebep olan durumu ortadan kaldırmak için, levha üretiminde en az yönlüme miktarına sahip levha üretimini zorunlu hale getirmektedir (6, 7).

Belirgin tavlama yönlümesinin gerçek bir faktör olduğu bilinmektedir. Son yüksek tavlama sıcaklığı, son ağır haddeme kesit daralması, daha belirgin kulakçık oluşumuna sebep olmaktadır. Bakırda 45° 'de kulakçık oluşumu gözlenmekte ve genellikle 4 kulakçığın ikisi haddeme doğrultusuna 90° ve ikisi de haddeme doğrultusuna paralel olarak elde edilmektedir (4).

Şerit α -princinin kulakçık oluşumu $\{111\}$ kayma düzlemleri haddelenme doğrultusuna paralel ve 45° doğrultuda kulakçık oluşumu belirgin olduğunda, haddelenme doğrultusuna 90° olma eğilimindedir. Bu son pozisyonlar, akış için optimum olabilir çünkü, bu yönlerdeki bir çekme gerilmesi, maksimum deformasyon gerilmesini muhafaza ettirmek için yönlendirilmiş (gerilme eksenine 45°) maksimum sayıdaki $\{111\}$ düzlemlerine rastlayabilir.

Bakırda haddelenme doğrultusu ve haddelenme doğrultusuna 90° 'de görülen kulakçık oluşumunun, derin çekme sırasında, dikey yöndeki çekme gerilmesinin büyüklüğü ile ilgili olduğu görülmüştür (4). Bununla birlikte, bu basit yaklaşımın geçerliliği şüphelidir, çünkü çekme işlemi, dikey çekme gerilmesinin hakim olduğu bir işlem gibi değerlendirilmez.

Levha düzlemine “dik” yönlenebilirlik, “düzlemsel” yönlenebilirlikten daha belirgin olabilmekte ve çekme operasyonları sırasında iyi bir performansa neden olabilmektedir. Bu tip eş yönlü olmamanın doğrudan ölçülmesi zor olmakla birlikte, levha düzleminde çekme numunelerinin davranışlarını dolaylı olarak yansıtmaktadır (37). Levha düzlemine dik ve paralel malzeme mukavemetinde farklılığın bir sonucudur (38). R'nin, gerinimden bağımsız bir sabit ve yönlenebilirliğin bir ölçüsü olmakla birlikte, haddelenme düzlemindeki çekme eksenini yönü ile değişmektedir ve yönlendirme yapıları malzemede R daima (1)'den büyüktür (4).

Dik eş yönlü olmamadan dolayı eğrinin eğimi (1)'den saptığında $R_0 \neq R_{45} \neq R_{90}$ düzlemsel eş yönlü olmamanın bir sonucudur. Derin çekme için çeliklerde bir çok çalışma, R yüksek olduğunda derin çekme performansının iyi olduğunu göstermiştir. Yüksek R'ye sahip yönlendirme yapıları malzeme, çekme sırasında duvar mukavemetini artırmaktadır ve bu sebeple geniş kalıp boşluğu, yarıma ile duvar hatası olmaksızın çekmenin gerçekleşebilmesi, izotropik malzemede daha yüksek bir ıstampa yükünü desteklemektedir. R, oranı ve yönlendirme arasındaki ilişki, soğuk haddelenmiş ve tavllanmış düşük karbonlu çeliklerde gelişen tercihli yönlendirmelerin detaylı x-ışınları incelenmesi ile doğrulanmıştır (4).

2.6. Düşük Karbonlu Çeliklerin Haddelenmesi

Malzemeleri, eksenleri etrafında dönen iki silindir (merdane) arasından geçirerek yapılan plastik şekil verme işlemine haddeleme denir. Haddeleme, üretim hızı ve sürekliliği ile işlemin ve ürünün kontrolünün kolay oluşu nedenleriyle en çok kullanılan plastik şekil verme yöntemidir. Plastik deformasyon uygulanan bütün malzemelerin % 95 kadarı haddeleme ile şekillendirilmektedir (6).

Malzemenin deformasyonu, merdanelerin malzemeyi sıkıştırmasıyla sağlanan radyal basma gerilmeleri ve malzeme ile merdaneler arasında sürtünmeyle oluşan yüzey kayma gerilmeleriyle sağlanır. Sürtünme kuvvetleri, aynı zamanda malzemenin merdaneler arasında ilerlemesini de sağlar. Bu işlemde haddelenen malzemenin kesiti küçülürken boyunda uzama, genişliğinde ise bir miktar artma meydana gelir ve buna yayılma adı verilir. Yayılmanın miktarı, haddelenen malzemenin boyutlarına uygulanan deformasyon oranına ve merdanelerin çapına bağlıdır (6). Yayılma miktarı eğik haddeleme ile artırılabilir (39).

Haddeleme, demir dışı metalik malzemelerde, genellikle yalnız yassı ürünlerin üretiminde kullanılır. Bütün metalik malzemelerde haddeleme işlemi genellikle ingottan veya sürekli döküm ile elde edilen slab, kütük veya takoz gibi yarı mamul malzemeler ile başlar. Haddeleme ile metal tozlarından doğrudan şerit şeklinde ürünler de elde edilebilir. Toz haddeledede merdaneler arasına akıtılan metal tozları merdaneler arasından geçerken preslenir, daha sonra sinterlenip sıcak haddeleme ile veya birbiri ardından yapılan soğuk haddeleme-tavlama işlemleri ile istenilen kalınlığa indirilir. Toz haddelemenin en önemli avantajı ara kademedeki haddeleme işlemleri kalktığından yatırım maliyetinin çok azalmasıdır. Diğer avantajları ise döküm hammaddeden elde edilen haddelenmiş ürünlere göre çok küçük taneli ve minimum eş yönlü olmayan özellikte sacların elde edilebilmesidir (6, 7).

Sıcak ve soğuk haddeledede esas amaç malzemenin kalınlığını azaltmaktır. Haddeleme, ile malzemenin kalınlığını hemen hemen değiştirmeksizin

şekillendirmek de mümkündür. Bu amaçla yapılan soğuk haddelenmede, çeşitli profillerdeki merdaneler kullanılarak saclara istenilen şekil verilmektedir (6).

2.6.1. Hadde tezgahları ve merdane türleri

Bir hadde tezgahında, merdanelerin düşey konumlarının ayarı ile merdaneler arası açıklık ve haddelenen malzemenin çıkış yüksekliği, yatay yöndeki ayarlama ile merdanelerin birbirine göre konumunu belirlenmektedir. Merdanelerin çapı 5-10 cm ile 150 cm arasındadır. Genel olarak gövde kısmının uzunluğunun (L)'nin çapa (D) oranı (L/D) 2,2 ile 2,7 arasında değişmektedir (6).

Merdanelerin gövde kısmı, haddelenecek ürünün cinsine göre düz yüzeyli veya çeşitli profillerde olabilmektedir. Yassı ürünlerin haddelenmesinde silindirik gövdeli “düz merdaneler”, profillerin haddelenmesinde de merdane gövdesinde istenilen profile göre çeşitli şekilde oyuklar bulunan “kalibreli merdaneler” kullanılmaktadır (6, 7, 19).

Merdaneler genel olarak “çelik merdaneler” ve “dökme demir merdaneler” olarak ikiye ayrılırlar. Merdanelerde, genelde aşınmanın önlenmesi için yüzey sertliğinin yüksek olması ve iç kısımlarının da eğme deformasyonu ile kırılmaması için kırılma tokluğunun yüksek olması gerekmektedir.

2.6.2. Merdane düzenleri

Yassı ürünlerin haddelenmesinde en basit merdane düzeni tek yönlü ikili düzendir. Bunun yanı sıra çift yönlü ikili ve tek yönlü üçlü düzenler bulunmaktadır. Küçük çaplı merdanelerle haddeleme için gerekli kuvvetin azalmasının yanı sıra mukavemeti ve rijidliği azaldığı için küçük çaplı iş merdanelerinin daha büyük çaptaki destek merdaneleri ile desteklenerek dörtlü, altılı düzenler geliştirilmiştir.

Dörtlü hadde tezgahında iki adet küçük çapta iş merdanesi ile bunları destekleyen iki adet daha büyük çaptaki destek merdaneleri bulunur. Bu tip hadde tezgahı levha ve sac haddelenmesinde çok sık kullanılır. Aynı amaçla, iş merdanelerinin çapının daha küçük olabilmesi için çok sayıda destek merdaneli planet hadde tezgahı ile bir defada % 90'a kadar deformasyon yapılabilmektedir.

Yassı metalik malzemelerin sıcak haddelenmesinde kullanılan diğer hadde tezgahları ile tek pasoda en fazla % 30-40 oranında deformasyon sağlanabilmektedir. Birkaç hadde tezgahı birbiri ardı sıra sıralandığında veya çok ayaklı düzen kullanıldığında, haddeleme işleminde üretimin sürekli ve hızlı olması sağlanmaktadır (6, 7).

2.6.3. Soğuk haddeleme

Soğuk haddeleme sac, folyo, ince çubuk ve tel gibi küçük kesitli ürünlerin elde edilmesinde kullanılmakta ve düzgün bir yüzey, hatasız boyutlar ve yüksek mukavemet sağlanmasının yanı sıra, kesit daralmasının sebep olduğu gerinim pekleşmesi malzeme mukavemetini arttırmaktadır (7). Bu durum, işlem için gerekli haddeleme kuvvetini ve gücünü arttırmaktadır (6). Çekme mukavemetine oranla akma sınırı çabuk yükselmekte ve soğuk şekillendirme miktarının artması ile akma ve çekme mukavemeti arasındaki fark azalmakta ve akma sınırı oranı (1)'e yaklaşmaktadır (39). Demir olmayan metallerin büyük bir bölümünün bitirme pasosu soğuk haddeleme ile yapılmaktadır (7).

Ardarda dizilmiş 3-5 ayaklı dörtlü düzen hadde tezgahı (tandem) çelik levha, alüminyum ve bakır alaşımlarının soğuk haddelenmesinde kullanılır. Bu tip merdaneler ön ve arkadan çekmeli olarak tasarlanmıştır ve işçilik maliyetini düşürmektedir (5, 19). Merdaneler arasındaki çap farkı malzemenin küçük çaplı merdaneye doğru kıvrılmasına sebep olacağından soğuk haddelemede karşılıklı merdanelerin eşit çapta olması gerekmektedir (6, 19).

Soğuk haddeleme ile elde edilen toplam kesit daralması % 50 ile % 90 arasında değişmektedir. Her bir paso veya ayakta kesit daralmasının belirlenmesi, kesit daralmasının olabildiğince düzgün olarak, her bir pasoya düşen maksimum kesit daralmasının altına düşmeksizin, şekillendirmenin bütün pasolarına yayılması arzu edilir. Genellikle en az kesit daralması kalınlık, çap ve yüzey kalitesini daha iyi kontrol etmek için son pasoda yapılmaktadır (7).

Tavlanmış metal levhalardan akma gerilmesinin yükseltilmesi, şekillendirme veya derin çekme sırasında homojen olmayan deformasyonun (gerdirme gerinimi) sebep olduğu bir akma noktası uzamasının mevcudiyeti, önemli bir uygulama problemidir. Genel uygulama, tavlanmış çeliğin bir nihai, küçük kesit daralması, temper haddelemesi veya düzeltme pasosu (skin pass) akma noktası uzamasını ortadan kaldırır. Temper haddelemesi yüzeyin iyileştirilmesi ve kalınlığın yakın toleranslara getirilmesi için de kullanılmaktadır (7).

2.6.4. Sıcak haddeleme

Haddeleme, işlem sıcaklığına göre sıcak ve soğuk haddeleme olarak sınıflandırılır. İngot ve kütük dökümlerin haddelenmesinde olduğu gibi büyük oranlarda kesit daralması için, haddeleme sıcak olarak yapılmaktadır. Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan sıcak haddeleme ile döküm yapısı bozulurken, daha küçük kesitli ürünler elde edilir (7).

Sıcak haddelemede genellikle, ileri geri hareket eden 0,6-1,4 m çapındaki merdaneler kullanılır ve haddeler boyutlarına göre sınıflandırılır (örneğin, 1 m slab mili). Başlangıç pasoları genellikle düşük kesit daralmalarını içerir. Başlangıçta haddeleme ile kenarları, uzatmak için, 90° döndürülerek ingotun yassı hale getirilmesinde kalınlık düşürülürken ağır ölçek kullanılmaz. İngotun haddelenmesinde, ingot genişliğinin yayılması önemlidir. Arzu edilen genişliği sürdürmek, kenarları muhafaza etmek için ara pasolarda ingot 90° döndürülür ve kenar yivli merdanelerden geçirilir (7).

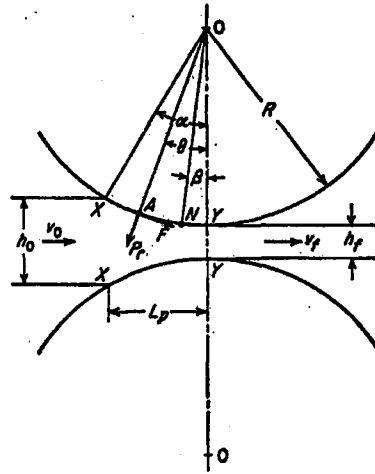
Yüksek üretim hızları için üniversal hadde düzenleri kullanılarak kenar pasolar ortadan kaldırılmaktadır. Sıcak haddeleme ile döküm ingotlardan slabların üretimi sürekli döküm kullanılarak ergimiş çelikten doğrudan slab üreterek ortadan kaldırılabilir. Üniversal hadde düzeninde, eğik haddeleme ile genişlik artırılırken dikey kenar merdaneleri ile kontrol edilmektedir. Yüksek basınçlı su fiskiyeleleri şerit üzerindeki oksitleri kaldırmak için kullanılır. Bitirme pasosundan sonra boy kesilir.

Sıcak haddelemede slablar, başlangıçta 1100-1300°C arasında yapılmaktadır. Son bitirme ayağında sıcaklık 700-900° C arasında değişmektedir. Ancak eş taneli uniform ferrit taneleri üretmek için, üretim kritik sıcaklığın (A_1) üzerinde olmalıdır. Daha düşük ingot boyutları ve daha düşük deformasyon gerilmesi gerektiren demir olmayan alaşımların haddelenmesinde küçük boyutlu hadde düzenleri kullanılmaktadır (7).

2.6.5. Haddelemede etkili kuvvetler ve geometrik ilişkiler

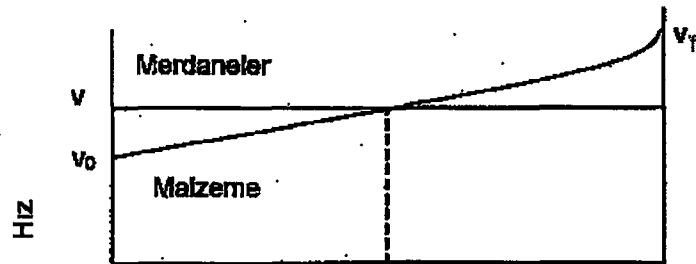
Şekil 2.3’de haddelemede etki eden kuvvetler ve haddeleme geometrisi görülmektedir. w_0 genişliğinde ve h_0 kalınlığındaki bir sac, v_0 hızı ile merdanelere girmekte ve haddelendikten sonra h_f kalınlığında ve v_f hızında merdanelerden çıkmaktadır.

Haddelenmiş sacın w_1 genişliği, yayılma sebebiyle w_0 giriş genişliğinden biraz büyük olmakla birlikte genişliğin değişmediği kabul edilirse, haddeleme sırasında merdanelerin malzemeye uyguladığı radyal basma kuvvetleri ile malzemenin boyca uzaması sağlanmaktadır. Haddelenen malzemenin, merdaneler arasındaki herhangi bir düşey elementinin bozulmaması için çıkış hızı (v_f), giriş hızından (v_0) büyük olmalıdır. Haddelenen malzemenin hızı merdanelere girişten çıkışa doğru devamlı artarken merdanelerin yüzey hızı (v) sabittir ve v_0 ile v_f arasındadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.3. Haddelemeye etki eden kuvvetler (7)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi malzemenin merdaneler arasındaki geçiş hızı sadece bir noktada merdanelerin yüzey hızına eşittir. Bu noktaya nötr nokta (N) denir. Merdanelerle malzeme arasındaki temas boyunca (L) her noktada malzemeye etki eden radyal P_r basma kuvveti ve merdane ile malzeme arasındaki F sürtünme kuvvetidir. Merdanelere giriş düzlemi (xx) ile nötr nokta arasında malzemenin hızı, merdanenin yüzey hızından daha azdır. Bu durumda F sürtünme kuvvetinin yönü, çıkış yönünde olup sacın merdaneler arasında ilerlemesini sağlar. Buna karşılık nötr nokta ile çıkış düzlemi (YY) arasında malzemenin hızı merdanelerin yüzey hızından daha fazla olduğundan bu bölgede F sürtünme kuvvetinin yönü giriş yönündedir ve sacın merdanelerden çıkışını engelleyecek şekilde etki etmektedir (6).



Şekil 2.4. Haddeleme deformasyon bölgesindeki temas yüzeyi boyunca merdanelerin dönme hızına göre malzemenin geçiş hızının değişmesi (6)

Kavrama açısı ve temas açısı ise giriş düzlemi ile merdanelerin merkezlerini birleştiren düzlem arasındaki α açısıdır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi radyal P_r basma kuvvetinin yatay bileşkeni $P_r \sin \alpha$, sürtünme kuvvetinin yatay bileşkeni ise $F \cos \alpha$ ’dır. Eğer $F \cos \alpha > P_r \sin \alpha$ ise, sac merdaneler arasında çıkış yönünde ilerler. Sınır şartlarında;

$$F \cos \alpha > P_r \sin \alpha$$

$$F / P_r > \sin \alpha / \cos \alpha = \tan \alpha$$

Sürtünme katsayısı $\mu = F / P_r$ olduğundan

$$\mu > \tan \alpha$$

[2.6]

bulunur (6).

“Eş. 2.6” den anlaşılacağı gibi sürtünme katsayısı kavrama açısının tanjantından büyükse, malzeme merdaneler arasında çıkış yönünde ilerleyerek haddelenebilir. Kavrama açısının tanjantı, sürtünme katsayısından büyükse haddelenen malzeme merdaneler arasında ilerleyemez, geriye doğru itilir. Sürtünme katsayısı sıfır olması halinde haddeleme yapılamaz. Sürtünme katsayısının artması ile daha kalın malzemelerin kavranması ve haddelenmesi mümkün olur. Bu nedenle, sıcak haddelemede her pasoda büyük kesit daralmaları sağlamak için merdanelerin yüzeyine merdane boyunca yivler yapılarak sürtünme katsayısının değeri artırılır. Sürtünmenin aynı olması durumunda, büyük çaplı merdanelerle küçük çaplı merdanelere göre, daha kalın levhaların kavranması ve haddelenmesi mümkün olmaktadır. Bu durumda kavrama açısı büyük ve küçük çaplı merdanelere göre büyük merdanelerde temas boyu daha büyüktür.

Haddelemede en fazla kalınlık azaltma, veya kesit küçültme sürtünme katsayısı (μ) ve merdane yarıçapına (R) bağlıdır. Bu sebeple, μ ve R değerleri artıkça haddeleme deformasyon oranı artmaktadır. Sıcak haddelemede en kısa zamanda istenilen boyutları sağlanması istendiğinden R ve μ ’nün artırılması sıcak haddeleme için faydalıdır, çünkü her pasoda büyük kesit küçültmelerinin yapılması istenir. Buna

artmaktadır. Bu yeni durumda çıkış kalınlığının h_1 olması istenirse haddeleme kuvvetinin P_3 olması ve merdaneler arası mesafenin de azaltılması gerekmektedir.

2.6.6. Haddeleme kuvvetlerinin hesaplanması

Haddeleme sırasında deformasyon bölgesinde malzemeye etki eden kuvvetlerden radyal P_r kuvvetinin düşey bileşeni haddeleme kuvveti (P) olarak bilinir (Şekil 2.3). Haddeleme kuvveti, merdanelerin malzemeye radyal basınç yapması için kullanılan veya malzemenin merdaneleri birbirinden uzaklaştırmaya çalıştığı kuvvettir.

Hadde basıncı, haddeleme kuvvetinin (P), temas yüzeyine bölünmesiyle hesaplanır. Temas yüzeyinin alanı ise haddelenen sacın genişliği (w) ile temas boyunun (L) çarpımına eşittir. Buna göre;

$$\text{Hadde basıncı} = P/Lw \quad [2.7]$$

şeklinde hesaplanabilir (39).

Soğuk haddeleme sırasında haddelenen malzemenin mukavemeti, deformasyon sertleşmesi sebebiyle artmakta ve haddeleme kuvveti hesaplanırken malzemenin ortalama gerilmesi için, malzemenin merdanelere giriş ve çıkış mukavemetlerinin ortalaması alınmalıdır. Sıcak haddelemede ise ortalama gerilme,

$$\sigma = C \bar{\epsilon}^m \quad [2.8]$$

olarak hesaplanır.

Burada:

σ ; ortalama gerilme (N/mm^2)

C ; merdane malzemesi için hesaplanan bir sabit (N/mm^2)

$\bar{\epsilon}$; ortalama deformasyon hızı

m ; deformasyon duyarlılık üssü (sünek malzemeler için $\cong 0,3-0,4$)'dür.

Ortalama deformasyon hızı $\bar{\epsilon}$;

$$\bar{\epsilon} = \frac{v}{L} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad [2.9]$$

şeklinde hesaplanabilir (6).

Burada:

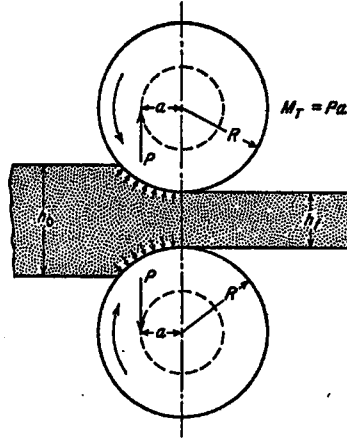
v ; merdanenin dönme hızı (rpm)

L ; merdanenin temas boyu (m) dir.

Küçük çaplı merdanelerde, temas alanının azalması ile birlikte haddeme kuvveti de azalmaktadır. Sürtünme katsayısının çok yüksek olması, haddelenen malzemede köşe çatlaklarına sebep olmaktadır. Buna karşılık, deformasyon oranı artmaktadır. Haddeme sırasında sürtünme katsayısının değeri, temas yayı boyunca her noktada farklıdır. Ancak, μ 'nun değerini her noktada belirlemenin zorluğu nedeni ile ortalama sabit bir sürtünme katsayısı kabul edilmektedir. Soğuk haddemede sürtünme katsayısı, $\mu = 0,05-0,01$ değerleri arasında, sıcak haddemede ise genellikle $\mu > 0,2$ değerinde kabul edilmektedir (6). Bir başka kaynakta ise yağlayıcıya bağlı olarak soğuk haddemede sürtünme katsayısı, $\mu = 0,02-0,3$ ve sıcak haddemede ise $\mu = 0,02-0,7$ olarak kabul edilmektedir (19).

2.6.7. Haddeme için gerekli gücün hesaplanması

Hadde tezgahına uygulanan güç, merdaneleri çevirmek için gerekli momenti sağlamaktadır. Toplam haddeme kuvveti, deformasyon bölgesindeki hadde basıncının dağılımına benzer şekilde temas yayı boyunca dağılmıştır. Bununla beraber, toplam haddeme kuvvetinin, Şekil 2.6'da görüleceği üzere merdanelerin merkez çizgisinden belirli bir (a) mesafesinde, temas yayı içindeki bir noktada toplandığı kabul edilebilir.



Şekil 2.6. Haddeme kuvvetinin toplandığı kabul edilen (a) mesafesi (7)

Haddeme momentinin hesaplanmasında haddeme kuvvetinin (P) temas yayının tam ortasını etkilediği kabul edilirse $a=L/2$ olarak alınır. İki merdane kullanıldığına göre toplam moment (MT);

$$MT=2Pa = 2 PL/2 = PL \quad [2.10]$$

şeklindedir (6).

Merdanelerin her dönüşünde toplam haddeme kuvveti (P) çevre uzunluğu $2\pi a$ olan bir daire boyunca hareket eder. İki merdane olduğundan yapılan iş;

$$\dot{İş} = 2(2\pi a) \quad P = 2\pi MT = 2\pi PL \quad [2.11]$$

şeklindedir (6).

Haddeme için gerekli güç, beygir gücü (BG) veya kilowatt (KW) cinsinden;

$$Güç(BG) = \frac{2\pi PLN}{4650} \quad [2.12]$$

$$Güç(KW) = \frac{2\pi PLN}{6000} \quad [2.13]$$

şeklindedir (6, 7).

Burada:

P ; toplam haddeleme kuvveti (Newton)

L ; temas boyu (m)

N ; merdanelerin dönme hızı (rpm)'dir.

“Eş. 2.12” veya “Eş. 2.13”den hesaplanan güç malzemenin plastik deformasyonu için gerekli olan güçtür. Toplam gücün hesaplanmasında, bu haddeleme gücüne sürtünme kuvvetlerini, gücü motordan tezgaha taşıyan sistemdeki ve motordaki enerji kayıplarını karşılamak için gerekli olan gücü de ilave etmek gerekir.

2.6.8. Kalıntı gerilmeler

Yassı ürünlerin haddelenmesinde homojen olmayan plastik şekil değişimi malzemede kalıntı gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Örneğin, küçük çaplı merdaneler veya düşük kalınlık azalması plastik şekil değiştirmenin dış yüzeyden fazla derine yayılmamasına yol açar (19, 39).

Bir şeridin yüzeyindeki kalıntı gerilmelerin düzeyi, merdane çapı, şerit kalınlığı, kalınlık azalmasına bağlı olmakla birlikte, kalınlığın temas yayı uzunluğuna oranı arttıkça kalıntı gerilmelerde büyür. Bu sebeple küçük çaplı merdane, yüksek malzeme kalınlığı ve düşük kalınlık azalması ile yüksek kalıntı gerilmeler oluşur. Bu durum aynı zamanda kalıntı gerilmelerin yüzeyde basma ve içte çekme yönünde olmasına, buna karşılık büyük çaplı merdaneler ve büyük kalınlık azalmaları kalıntı gerilmelerin yüzeyde çekme içte basma yönünde olmasına yol açmaktadır (19).

3. ÇELİKLERDE İŞLENEBİLİRLİK

3.1. İşlenebilirliğe Giriş

İşlenebilirlik, malzemelerde kolayca ölçülebilen ve açıklanabilen tek bir özellik değildir. İşlenebilirlik; iş parçası malzemesi, kesici takım malzemesi, yağlayıcı ve işleme şartları arasındaki dinamik etkileşim sonucu oluşan bir sistem özelliğidir (40). Diğer bir deyişle, iş parçasının kesici bir takımla şekillendirilmesinin ne kadar kolay veya zor olduğu işlenebilirlik olarak adlandırılmaktadır (1).

İşlenebilirlik üzerinde birçok etkili kriter vardır ve aynı malzeme, operasyon kriterlerinin değiştirilmesinden dolayı farklı işlenebilirlik özellikleri sergileyebilmektedir.

İşlenebilirliğin değerlendirilmesi;

- Takım ömrü,
- Talaş oluşumu,
- Yüzey kalitesi,
- Kesme kuvvetleri,
- Yığıntı talaş (Built-Up-Edge BUE) eğilimi

gibi kriterlerden bir veya birkaçını kapsamaktadır (1, 12, 40, 41).

Orta karbonlu çelik, ısıl dirençli yüksek bir alaşımla karşılaştırıldığında daha kolay işlenmektedir. Yine aynı şekilde gri dökme demir, beyaz dökme demirden daha kolay işlenmektedir. Bununla beraber, sıvanma eğilimi fazla olan düşük karbonlu bir çeliğin işlenmesi, bazı paslanmaz çeliklerden daha zor olabilir (1).

İş parçası malzemesinin mikroyapısı, ısıl işlem geçmişi, kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, kolay işleme katkıları, inklüzyonlar ve yüzeydeki tabakanın kalınlığı, gibi iş parçası özelliklerinin yanı sıra takım malzemesi, takım geometrisi, takım tezgahı, kesme sıvısı, kesme parametreleri, bağlama şartları, işleme biçimi, gibi faktörler

işlenebilirlik üzerinde etkili olmaktadır (1, 13). İşlenebilirliği iyileştirmek için bu faktörlerden bir veya birkaçını değiştirmek gerekebilir (1). Malzemenin sertliği ve dayanımının yanı sıra inklüzyonlar (kalıntılar), kolay işleme katkıları, mikroyapı, sert ve aşındırıcı bileşenler, yığıntı talaş oluşma eğilimi vb. faktörler de önemli olabilir (41, 42). Soğuk şekillendirme ve inklüzyonların kontrolü ile işlenebilirlik ve süneklik arasında uygun bir yapı elde edilir (43).

İşlenebilirliğin değerlendirilmesi için deney metotları Çizelge 3.1’de verilmiştir. İşleme deneyleri grubunda olan derecelendirme deneyleri sadece, verilen bir grup şartlara bağlı olarak ve mutlak deneylerden daha az zaman alan deneylerdir. Bunlar tipik kısa deneylerdir. Mutlak deneyler ise iki veya daha fazla kombinasyonun değerlerinin bağlantısını gösteren uzun deneylerdir ve işleme özelliklerinin daha genel bir biçimini vermektedir. İkinci gruptaki talaş kaldırmaksızın işleme deneyleri ise genellikle kısa deneylerdir.

Çizelge 3.1. İşlenebilirliğin değerlendirilmesi için deney metotları (44)

Derecelendirme deneyleri			Mutlak işlenebilirlik deneyleri			Talaş kaldırmaksızın derecelendirme deneyleri		
Deney	İşleme	Değişken	Deney	İşleme	Değişken	Deney	İşleme	Değişken
Hızlı alın tornalama	Tornalama	İş parçası Takım Kesme SIVISI	Konik tornalama	Tornalama	İş parçası Takım Kesme SIVISI	Kimyasal bileşim	Tornalama	İş parçası
Sabit basınçta işleme	Tornalama Delme Testere ile kesme	İş parçası Kesme SIVISI	Değişken hızda tornalama	Tornalama	İş parçası Takım Kesme SIVISI	Mikroyapı	Tornalama	İş parçası
Kademeli takım aşınmasını izleme	Tornalama	İş parçası	Kademeli tornalama	Tornalama	İş parçası Takım Kesme SIVISI	Fiziksel özellikler	Tornalama	İş parçası
Hızlı takım aşınmasını izleme	Tornalama	İş parçası	HSS takım aşınma hızını izleme	Tornalama	İş parçası			

3.2. Karbonlu ve Alaşımli Çeliklerde İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler

Karbonlu ve alaşımli çeliklerin işlenebilirliği; operasyon şartlarının yanı sıra, iş parçasının mikroyapısı, kimyasal bileşimi, ikinci faz partiküllerinin dağılımı,

mukavemet, süneklik ve sertlik gibi mekanik özellikler, termal iletkenlik gibi fiziksel özellikleri ile takım ömrü arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır (14, 15).

İş parçasının mekanik özellikleri, mikroyapı ve kimyasal bileşimleriyle kontrol edilmektedir (15, 45). Demire bakır, alüminyum ve krom gibi alaşım elementleri ilavesi saf demirle mukayese edildiğinde, kesme kuvvetlerini düşürmektedir. Metal malzemelerde talaş oluşumu için kesme sırasında, malzemenin kesilmesine göre; kayma düzlemindeki metali kaydırmak (kesmek) için gerekli kuvvet artmakta, talaş incelmekte, kayma düzlem açısı genişlemektedir (41).

3.2.1. İş parçası malzemesinin etkisi

Uygun işleme şartlarının belirlenebilmesi için çelik malzemelerde; öncelikle temel malzemenin mekanik, mikroyapı ve kimyasal özellikleri ve bunların işlenebilirliğe etkileri dikkate alınmalıdır.

Karbonlu ve alaşımlı çelik malzemelerde, karbon miktarının artmasıyla, temel malzeme mekanik özelliklerinden çekme dayanımı ve sertlik artmakta, darbe dayanımı ve süneklik düşmektedir. Bu durum kesme kuvvetlerini ve takım aşınmasını artırmaktadır.

Çelik içerisindeki karbürler gibi bileşenler aşındırıcı özelliğe sahiptir. Karbürlerin miktarı ve biçimi, karbon ve diğer alaşım elementlerinin miktarı, malzemenin işlenebilirlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir (1). Karbon oranı % 0,15'den az olan çeliklerin yumuşak ve aşırı sünek olmaları, kesici takıma sıvanmalara neden olduğu için işlenebilirlikleri kötüdür. Bu çeliklerin işlenebilirlikleri, pekleşme ile mukavemet seviyeleri yükseltilip süneklikleri düşürülerek iyi duruma getirilebilir (12).

Karbon oranı % 0,15 - % 0,30 arası olan çeliklerde perlit oranı artmaktadır ve bu çelikler çoğunlukla haddelenmiş, dövülmüş, tavlanmış veya normalize edilmiş şartlarda elverişli biçimde işlenebilmektedir. Karbon oranı % 0,55 olan orta karbonlu

eliklerde de tavlama ile lamelli ve küresel perlit karışımı bir yapı üretilirse kolaylıkla işlenir. Ancak, yapı kısmen küresel olmaması halinde optimum işlenebilirlik için yapı çok sert olur. Karbon oranı % 0,55'den fazla olan çeliklerde tamamen küresel yapı tercih edilmektedir (14).

Çelikte demir ve sementitin lamelli karışımından oluşan perlit, düşük süneklik ve yüksek mukavemete sahiptir. Perlit miktarının, ferrit miktarından fazla olması durumunda, kesme kuvvetleri artmakta ve yüzey kalitesi düşmektedir (46). Sementit, yüksek aşındırıcı özelliğinden dolayı takım ömrünü azaltmakta ve kesme kuvvetlerini artırmaktadır (1).

Çelikte artan karbon miktarı ile birlikte perlit miktarı artmakta ve kesme hızı düşmektedir (14). Ötektoid st çeliklerde perlit ve ferrit-perlit tane sınırlarında sementitin ağı şeklindeki yapısı nedeni ile işlenebilirlik kötüleşmektedir. Sementitin sertliğı ve kırılğanlığından dolayı kesici takım sementit plakalarını kesemez ve bu plakaları kırar. Bu durumda takımın sürekli darbeli yüklemelere maruz kalması ile, düzensiz bitirme yüzeyleri oluşmaktadır (47).

Ayrıca, sıcak haddeleme, soğuk haddeleme veya soğuk çekme, normalize (ıslah), tavlama, sertleştirme ve temperleme işlemleri de işlenebilirlik üzerinde etkilidir (1, 12). Normalizasyon işlemi, sıcak haddeleme şartlarından daha ince ve homojen bir yapı elde etmek için uygulanır. Daha homojen bir yapı, işlenebilirlik açısından iyileşme sağlamaktadır.

Küreselleştirme ısıl işlemi sertliğı önemli ölçüde düşürmekte, perlitteki sementit lamellerini küresel sementite dönüştürmektedir. Ferrit matris içinde düzgün dağılmış küresel sementitlerin oluşması ile işleme esnasında kesici takım, sementit aşındırıcı taneciklerle çok daha kısa mesafede temas etmekte ve işlenebilirlik iyileşmektedir (14).

elik malzemelerde, su verme sonrası uygulanan temperleme veya soğuk şekillendirme şartlarında oluşan gerilmelerin giderilmesi için yapılan “gerilim

giderme” tavlamaşı, talaş kaldırma sırasında iş parçasında olabilecek muhtemel çarpılmaları ortadan kaldırmaktadır (47).

Soğuk şekillendirme genellikle, yumuşak bir yapıya sahip olan % 0,2’den az karbon ihtiva eden çeliklere işlenebiliriliğı iyileştirmek amacı ile uygulanır. Alaşımlı çelikler ve yüksek karbonlu çeliklerin işlenebiliriliğı soğuk çekmeden daha az etkilenir. Soğuk çekmenin amacı sünekliğıin düşmesini sağılamaktır. Bunun sonucu talaşlar kıvrık ve kısa olur (14).

Yumuşak çelikler normalize edilmiş, tavlannış ve düzgün dağılmış bir lamelli perlit yapıya sahip olduğıunda iyi işlenebilirlik özellikleri sergiler. Çok düşük karbonlu çelikler, normalize edilmiş veya havada soğutulmuş şartlarda veya bunların soğuk çekilmiş ve gerilimi giderilmiş durumda iken işlenebilirlikleri en iyidir (16). Soğuk şekillendirme ile (haddeleme veya dövme ile) oluşacak eş yönlü olmayan yapı işleme sırasında da işleme yönüne bağılı olarak kesme şartlarını etkilemektedir.

Araki ve Yamamoto, 770-870 °C’de 2 saat tavlannış ve fırında soğutulmuş (~5°C/saat) AISI 4120 çeliğıi numunelerde, boyuna talaş kaldırmada enine kaldırmaya oranla, talaş kalınlaşmasından dolayı kesme direncinde azalma eğıilimini gözlemlemişlerdir (9). Woldman, işlemede karşılaşılacak zorluklarının işleme operasyonu tipine ve çubuk malzemenin boyuna veya enine kesmeye bağılı olduğıunu rapor etmektedir (16).

3.2.2. Sertlik ve dayanımın etkisi

Genellikle, düşük sertlik ve dayanım değıerleri işlenebilirlik ağıısından daha uygundur. Karbonlu, alaşımlı ve kolay işlenebilir çeliklerde artan kükürt miktarı ve sertlik sebebi ile birim güç tüketiminin arttığı gözlenmiştir (35). Soğuk çekme işlemleri ve benzer yollarla bir miktar artırılmış sertlik, pozitif bir etkiye sahiptir (1, 15).

Soğuk şekillendirme, şekil değiştirme miktarına bağlı olarak dayanımı artırır. İş parçasının sertliği, takım aşınmasının değerini etkiler. Yaklaşık 200 HB'ye sahip malzemelerin sementit karbür takımlarla işlenmesinde, sertlikteki artış orta düzeyde bir aşınma meydana getirir (1).

Yeniden fosfor ve azot katılmış düşük karbonlu çelikler, haddelenmiş şartlardaki standart çeliklerden daha az pekleşmeye sahip olmalarına karşın, bazı tornalama operasyonlarında, ferrit fazının sertleşmesinden dolayı, takım aşınması gözle görülür biçimde artmaktadır. Oksit inklüzyonları, sert ve şekil değiştirebilme zorluğundan dolayı, talaş kaldırma esnasında büyük miktarda takım aşınmasına sebep olmaktadır (15).

Bhattacharya, düşük alaşımlı ve orta karbonlu 1-3 inch çapında farklı oranlarda sıcak haddelenmiş çelik numuneler üzerinde işlenebilirlik deneyleri yapmıştır. Tornalamada artan sertliğe bağlı olarak kesme kuvvetlerinde artış, takım ömründe düşüş ayrıca, delme deneylerinde delme kuvveti ve delme torkunda artış gözlemiştir (2).

3.2.3. Süneklik etkisi

Düşük süneklik değeri genellikle olumludur ve bir talaş kaldırmada güç tüketimini düşürmektedir. Düşük süneklik, yüksek sertlikle oluşur. İyi işlenebilirlik, genellikle sertlik ve süneklik arasında bir noktadadır. Azalan sertlik ve artan süneklik yığıntı talaş oluşma eğilimini artırmaktadır (1, 16, 48).

Karbonlu çeliklerde, karbon içeriği mekanik özelliklerin yanı sıra, işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek sünekliğe sahip çelikler, % 0,15'den daha düşük karbon içeriğine sahiptir ve kesici takıma yapışma ve sıvanma davranışı sergiler. Bu durumdaki çelikler, soğuk çekme ile mukavemeti yükseltip ve sünekliği düşürülerek işlenebilirliği iyileştirilebilir (1, 14).

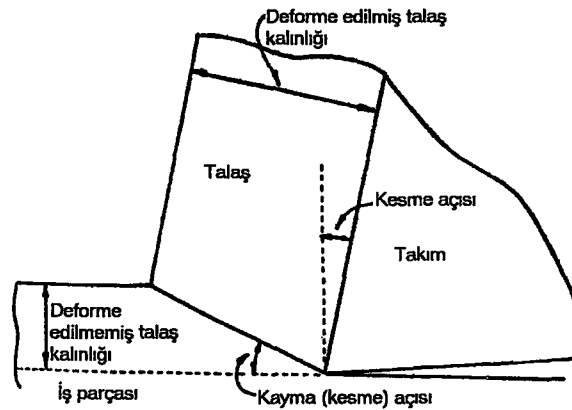
Karbon, süneklikte azalma sağlamakta ve takım talaş temas uzunluğunu azaltmaktadır. Bu sebeple takım aşınması, sıcaklık ve kesme kuvvetini düşürmektedir (41, 49). Artan akma dayanımı, sertliği artırmakta ve sünekliği düşürmektedir.

3.2.4. Isıl iletkenlik

Yüksek ısıl iletkenlik talaş kaldırma işleminde oluşan ısının, süratle kesme bölgesinden uzaklaştırılması demektir. Isının büyük bir bölümünün kesici takımda toplanması takım malzemesi seçimini önemli hale getirmektedir (13, 50). Yüksek hız çeliği (HSS) takımlarda kesme sırasında oluşan ısı deformasyona sebep olmaktadır (12). Bu sebeple, yüksek değerlerde ısıl iletkenlik genellikle arzu edilmektedir.

3.2.5. Talaş kaldırma sırasında oluşan pekleşme

Plastik şekil değiştirme sırasında, metallerin dayanımındaki artış, şekil değiştirme yüzdesine ve malzemenin pekleşme kabiliyetine bağlıdır. Çelik malzemenin işlenmesi sırasında, yüzeyden kaldırılan malzemedeki deformasyon hızı genellikle kesici kenara yakındır. Yüksek pekleşme hızı, kesme kuvvetini artırmakta ve işlenen yüzeydeki ince bir tabakada sertlikte büyük bir artış sağlamaktadır (1). Şekil 3.1’de kesme sırasındaki önemli parametreler görülmektedir.



Şekil 3.1. Dik kesme sırasında önemli parametreler (42)

İşleme sırasında, östenitik paslanmaz çelikler ve çeşitli yüksek sıcaklık alaşımları yüksek pekleşme hızına, karbonlu çelikler ise oldukça düşük pekleşme hızına sahiptirler. İşleme sırasındaki pekleşmeyle sertleşmiş tabakanın kalınlığı, ilerleme değeri ile aynı olması halinde, kesici kenarda şiddetli gerilmeler oluşmaktadır. Pекleşme ile oluşan tabakanın kalınlığı ve sertlik düzeyi, kesici kenardaki şekil değiştirme miktarı ile orantılıdır (1).

Büyük bir talaş açısına sahip keskin ve kesici bir kenar, şekil değiştirme miktarını azaltır. Bu sebeple, pozitif bir geometri, pekleşmiş tabaka kalınlığını ve kesici kenardaki gerilmeleri azaltacaktır. Ayrıca, pekleşme yığıntı talaş oluşumunu azaltıcı bir etkiye sahiptir (1, 12).

3.2.6. İnküzyonlar (kalıntılar)

Malzemenin yapısı içerisinde 150 µm'dan büyük makro inküzyonlar çok sert ve aşındırıcı oldukları için ani kırılmalara neden olabilirler. Çelik içinde genellikle değişik miktarlarda bulunan mikro inküzyon; alümina ve spineller (Al_2O_3 ve Ca) gibi inküzyonlar istenmeyen inküzyonlardır.

Demir ve mangan oksitlerin (FeO , MnO), şekil değiştirebilme kabiliyeti biraz daha iyidir ve talaş akışına katılabilirler (1). Yüksek kesme hızlarında, oluşan yüksek ısı ile yumuşayan silisyum, kesme bölgesinde takım aşınmasını engelleyici özelliğe sahiptir.

İnküzyonlar gerilimi artırarak kayma düzleminde çatlak oluşumunu başlatmakta ve talaş kırılmalarına yol açmakta, takım talaş ara yüzeyini azaltmakta, kesme bölgesinde metal akışına katılarak kaymayı kolaylaştırmaktadır. İnküzyonların kesilememesi nedeniyle yüzeyde hasara neden olmakta, takım talaş ara yüzeyinde artan sıcaklıklarda difüzyona karşı engel oluşturmaktadır. İnküzyonlar düzgün iş parçası yüzeyi vermekte ve takım yan yüzeyinde abrasiv aşınmalarda rol oynamaktadır (51). Ayrıca inküzyonlar talaş sürekliliği için gerekli olmaktadır (52).

Son yirmi yılda oksitleri, kalsiyum-mangan sülfürlü bir kabuğun içerisine alarak oksitlerin olumsuz etkileri ortadan kaldıran bir yöntem geliştirilmiştir. Çeliğe kalsiyum katkısı ile elde edilen bu tip bir heterojen çekirdeklenme MnS'lerin plastik deformasyon yeteneğini düşürür ve haddeleme doğrultusunda, uzamayı engelleyerek işlenebilirliği olumlu yönde etkiler (50). İnküzyonların ergime dereceleri, tipleri ve çeşitli mekanik etkilere maruz kalan metal üzerine etkileri önem taşımaktadır (53).

Sing ve arkadaşları, % 0,24 karbonlu çelikte, tornalama sureti ile yapılan işlenebilirlik deneylerinde, inklüzyonların alınmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını ancak, takım aşınmasının azaldığını gözlemişlerdir (54). Artan süneklik, talaş kaldırma sırasında deformasyon için yüksek güç tüketimi gerektirmekte ve takım talaş ara yüzeyinde önemli miktarda ısı oluşturmaktadır (41).

3.2.7. Alaşım elementleri etkisi

Alaşım elementleri, malzemelerin mekanik ve işlenebilirlik özellikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir (1, 15). Talaş oluşumu, genellikle sünekliği azaltan alaşım elementleri ile iyileştirilebilir. Kükürt, fosfor ve kurşun bunlara örnek olup kolay işlenebilir çeliklere ilave edilirler. Çizelge 3.2'de pozitif ve negatif etkiye sahip elementler gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Katkı elemanlarının işlenebilirlik üzerine etkileri (1)

Pozitif etkileyenler	Pb, S, P, C (% 0.3 - 0.6 arasında)
Negatif etkileyenler	Mn, Ni, Co, Cr, V, C< % 0.3, C> % 0.6, Mo, Nb, W

3.2.8. Kolay işleme katkıları (katıklar)

Çeliğin işlenebilirliğini geliştirmek için en yaygın metot, kükürt ilavesidir. Kolay işlenebilen çeliklerdeki kükürt miktarı, işlenebilirliği iyileştirilmiş çeliklerdekine yaklaşık on katıdır (1). Çelikte kükürt ve fosfor miktarının artması veya kurşun ilavesi ile işlenebilirliğin iyileştiği uzun zamandır bilinmektedir (53, 55). Kurşun da

mangan sülfata benzer davranış sergilemekte ve bazen kükürtle beraber ilavesi de yaygın şekilde kullanılmaktadır (1).

Talaşın iş parçasından ayrılması sırasında meydana gelen ısı, katkı elemanlarının ergime derecesini geçmektedir. Bu sebeple, kurşun ergiyerek talaşla, kesici takım arasında bir film tabakası oluşturmakta ve bir çeşit yağlama görevi yaparak talaş kaldırılabilirliği kolaylaştırmaktadır (42). Kurşun ilave edilmiş çelik ve yeniden kükürt katılmış çelikte, soğuk çekme bitirme yüzeyini iyileştirmekte ve kurşun ilavesi, kükürdün aksine düşük ilerleme hızında etkili olmaktadır (56).

Yeterli miktarda mangan ihtiva eden çeliklerde, kükürt ve mangan, MnS bileşiğini oluşturur. Talaş oluşumu sırasında bu sülfat inklüzyonları, düşük dayanımlı düzlemler oluşturacak şekilde plastik şekil değiştirmeye uğrar ve böylece çatlak oluşumu ve yayılması için gerekli enerji azalır (1, 50). Bu, birinci kayma (kesme) bölgesindeki şekil değiştirmeyi kolaylaştırmaktadır ve dolayısıyla kayma açısının ve talaş yarıçapının artmasına sebep olurken talaş kalınlığında, takım/talaş temas boyunda ve işleme sıcaklığında azalmaya sebep olmaktadır. İlaveten, sülfat takım/talaş ara yüzeyinde bir yağlayıcı gibi görev yapar. Aynı zamanda takım aşınmasını geciktirir. Bununla beraber, işlenebilirlik sülfatların boyutu, biçimi ve dağılımına bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir (1).

Mangan sülfür miktarının genel olarak takım ömrünü arttırdığı bilinmekle birlikte, karbür takımlarda, düşük kesme hızlarında takım ömrüne olumlu katkısı olurken, yüksek kesme hızlarında yığıntı talaş oluşumunu desteklemesi nedeniyle takım ömrüne katkıda bulunmamaktadır (56).

Oldukça yeni bir katkı elamanı olan “selenyum” da genellikle kükürtle beraber kullanılır. Sülfür ve selenyum katkılı kolay işlenebilir çelikler, karbonlu çelikler ve ferritik, martensitik ve östenitik paslanmaz çeliklerde yaygındır (1). İşlenebilirliği etkileyen malzeme mekanik özellikleri, ısı iletkenlik, pekleşme, inklüzyon ve kolay işleme katkıları ve bunların artan değerlerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Malzeme mekanik özellikleri, ısı iletkenlik, pekleşme, inklüzyon ve kolay işleme katkıları ve bunların artan değerlerinin genel işlenebilirlik üzerine etkileri (1)

Artan değerleri	Genel işlenebilirlik etkisi
Sertlik ve dayanım	-
Süneklik	-
Isıl iletkenlik	+
Pekleşme	-
İnklüzyonlar; Makro, Mikro	- -/+
Kolay işleme katkıları	++

3.3. Kesme Kuvveti ve Takım Ömrü

Kesme kuvveti ve takım ömrü akma dayanımı, mikroyapı, katkıları, sertlik, kesme hızı, talaş derinliği, ilerleme miktarı, soğutma sıvısı gibi parametrelerden etkilenmektedir (16, 41, 42, 55). Bazı malzemelerde takım ömrüne bağı olarak, İşlenebilirlik İndeksi Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bazı malzemelerde takım ömrüne bağı olarak, İşlenebilirlik İndeksi (57)

Malzemenin cinsi	İşlenebilirlik katsayısı
Kır dökme demir	110
Temper dökme demir	120
AISI B 1112 çeliğı	100
İngot demir	50
C 1010 sıcak hadde	40
C 1010 soğuk işlenmiş	50
C 1015 sıcak hadde	50
C 1015 soğuk işlenmiş	58
C 1018 sıcak hadde	52
C 1018 soğuk işlenmiş	65
C 1020 sıcak hadde	50
C 1020 soğuk işlenmiş	65
C 1025 sıcak hadde	50
C 1025 soğuk işlenmiş	65
C 1030 soğuk işlenmiş	67
C 1030 su verilmiş ve temperlenmiş	55
C 1035 soğuk işlenmiş	67
C 1035 su verilmiş ve temperlenmiş	55
C 1040 soğuk işlenmiş	65
C 1040 su verilmiş ve temperlenmiş	55

Pickett ve Naylor, kolay işlenebilir çeliklerde tornalamadaki kesme kuvvetlerinin, haddelenmiş, çekilmiş, çekilmiş ve düzeltme pasosu yapılmış, gerilim giderilmiş ve düzeltme pasosu yapılmış numunelerde, kesme hızına bağlı olarak düştüğünü, ancak haddelenmiş numunede takım ömrünün daha az etkilendiğini gözlemlemişlerdir (58).

Şahin, Ç1050 çeliği üzerinde 0,05 ve 0,075 m/dk kesme hızlarındaki tornalama deneyinde, artan kesme hızı ile birlikte takım ömrünün düştüğünü rapor etmiştir (12).

Işık ve Çakır, sıcak iş, soğuk iş ve kalıp çelikleri üzerindeki tornalama deneylerinde, artan kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği ile takım ömrünün düştüğünü gözlemlemişlerdir (59). Takım ömrü üzerinde en büyük etkiyi kesme hızı, sonra ilerleme ve en az etkiyi ihmal edilebilecek düzeydeki talaş derinliği yapmıştır.

Araki ve arkadaşları, JIS krom molibdenli çelikte, sert ferritik+martensitik yapının, yumuşak ferritik+perlitik yapılara göre talaş kaldırılabilirliğinin daha iyi olduğunu ve kesme kuvvetlerinin düştüğünü rapor etmiştir (60).

Strafford ve Audy, % 0,02 ve % 0,60 arasında karbon oranına sahip ve bir miktar krom içeren 4 ayrı numune üzerinde tornalama deneylerinde; kesme kuvvetlerinin, sertlikteki değişme ile tutarlı bir değişime uğramadığını ancak, bu kuvvetlerdeki değişimin, ferrit ve perlit oranının ve bunların tane boyutlarına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir (61).

3.4. Çeliklerde Soğuk Şekillendirmenin İşlenebilirlik Üzerine Etkisi

Saf demir, talaş oluşumu (düşük kesme açısı ve düşük kesme oranı) ile bağlantılı olarak, yüksek gerinimden ve nispeten takım yüzeyinde yüksek sürtünmeden dolayı iyi işlenebilirlik için çok yumuşaktır. Bunun, kristal boyutu 0,5 benzeş sıcaklığın °K cinsinden T/T_M , deformasyon sıcaklığı/metalin ergime sıcaklığı) altındaki sıcaklıkta (650°), soğuk şekillendirme plastik gerinim deformasyonu ile işlenebilirlik için uygun hale getirilebilir (56).

HMK yapıya sahip çeliklerde haddeleme sonucu, haddeleme doğrultusuna paralel bir özel kristalografik yönlenme meydana gelmekte ve deformasyon miktarını artması ile mekanik fiberleşmiş yönlenme oluşmaktadır. Haddeleme düzleminde $\{001\}$ $\langle 110 \rangle$ kübik hakim tercihli yönlenmenin yanı sıra $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ ve $\{111\}$ $\langle 112 \rangle$ gibi yönlenme elemanları da birlikte bulunabilmektedir (4). SPH metallerinin taban düzlemleri haddeleme yönüne bağlı olarak haddeleme düzlemine paralel $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ eğilim göstermektedirler (7, 8).

Haddeleme sırasında oluşan pekleşmiş gerilimli ve yönlenmiş tane yapısı, talaş kaldırma sırasında talaş oluşma mekanizmasını etkilemek suretiyle, işlenebilirlik şartlarını ve yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (15). Soğuk şekillendirme ile ferritin artan sertliği, tornalama ile talaş kaldırma esnasında pekleşmeyi azaltmaktadır (15, 45). Soğuk şekillendirilmiş veya çekilmiş düşük karbonlu çeliklerde yığıntı talaşın azalması, yüzey kalitesini genellikle iyileştirmekte ve talaş boyunu kısaltmakta (15), çapak oluşumunu azaltmakta ve kesme kuvvetlerini düşürme gibi avantajlar sağlamaktadır (1, 12).

Soğuk şekillendirme % 0,2'den az karbonlu çeliklerde işlenebilirliği iyileştirmekte, alaşımlı ve yüksek karbonlu çeliklerde daha az etkili olmaktadır (14). Boulger, sertlik, dayanım ve işlenebilirlik arasında sıkı bir ilişkinin olduğunu belirtmektedir (45).

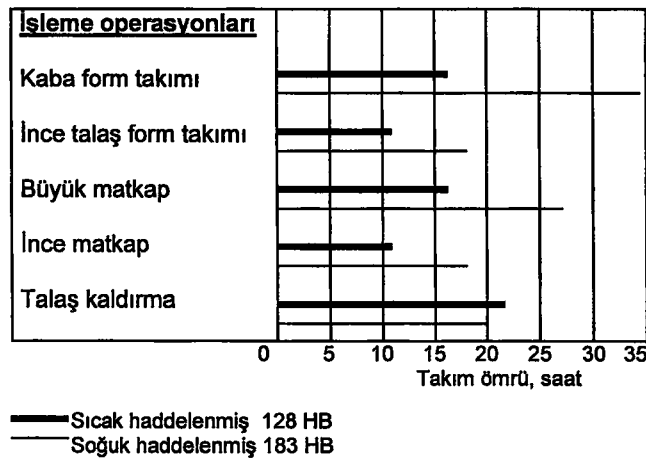
Bu güne kadar, kesme kuvvetlerindeki azalmayı açıklayan iki teori önerilmiştir. Her iki teori de soğuk şekillendirmeden kaynaklanan pekleşme hızı ile ilgilidir. İşlenebilirliğin kontrolü için en önemli faktör pekleşme hızı olarak bilinmektedir. İş parçası işlenme sırasında pekleşir. Sonuç olarak, takımın kesmesiyle şekillenen bölge ve kesme işlemi, pekleşme hızı tarafından kuvvetli şekilde etkilenmektedir (40). Birinci teori, kesme kuvvetinin azalması, takımın kesme açısının büyümesi (62, 63), ikinci teori ise azalan pekleşme hızıyla birlikte birinci kesme bölgesi boyutundaki azalma gözlemine dayanmaktadır (64, 65). Her bir durum da işleme işleminin, azalan

pekleşme hızıyla birlikte daha etkili olması şeklinde özetlenebilir. Hatta, her iki mekanizmanın da aynı anda benzer rol oynaması mümkündür (40).

Ayrıca, teorik ve pratik bazı gözlemlerin % 0,06-0,20 karbon içeriğine sahip çeliklerde işlenebilirlik açısından, en ekonomik optimum mikroyapının haddeleme olduğunu belirtmektedir. Soğuk şekillendirmenin, genel olarak çeşitli metal ve alaşımlarında, düşük karbonlu yeniden kükürt katılmış kolay işlenebilir çeliklerde, kesme kuvvetini düşürdüğü iyi bilinmektedir (56, 62, 64, 66).

Abeyama ve arkadaşları, soğuk dövülmüş düşük alaşımlı çelik numunelerde, soğuk dövme oranına bağlı olarak sertliğin arttığını ve numunelerin yüzeyindeki sertliğin, merkeze doğru inildikçe de bu artışın devam ettiğini gözlemlemişlerdir (10). Delme deneylerinde sertliğe bağlı olarak takım ömrünün düştüğünü ve çeliklerde delinebilirliğin sertlik, mikroyapı ve soğuk kesit daralmasına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Boulger, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi % 0,2’den az karbon ihtiva eden çeliklerde, soğuk çekmenin işlenebilirliği iyileştirdiğini rapor etmektedir (45).



Şekil 3.2. Soğuk çekmenin takım ömrüne etkisi. İş parçası 1" (25,4 mm) AISI 1016 çeliği. İşleme şartları: 0,73 m/s (1,44 m/s) kesme hızı ile çoklu işleme operasyonları (45)

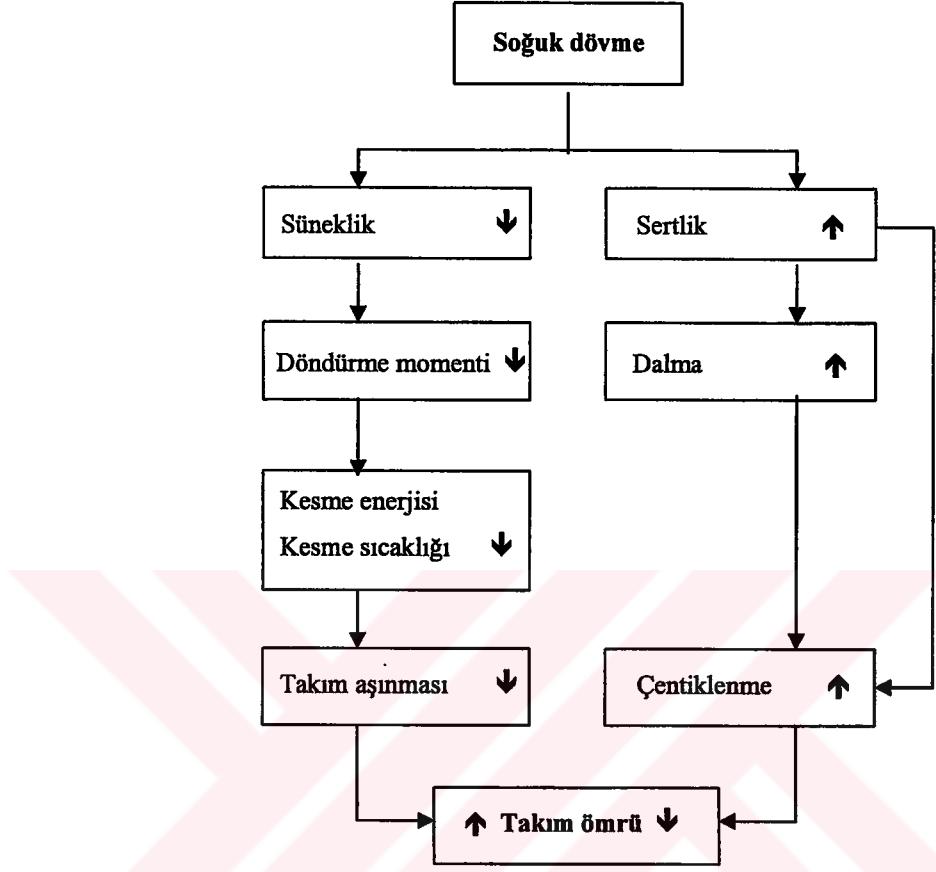
Bhattacharya, orta karbonlu, düşük alaşımlı çeliklerde azalan soğuk şekillendirme oranı ile takım ömrünün arttığını, kesme kuvvetinin, artan kesit daralması oranı ile arttığını ancak; kesme deneyinde, kesme kuvvetleri ile kesit daralması oranı arasında köklü bir ilişki bulunamadığını belirtmektedir (2). Aynı çalışmada, artan sertlikle birlikte, 20 dakikada takım ömründe düşme; yine artan sertliğe bağlı olarak, gerçek kesme kuvvetinin, delme kuvvetinden daha fazla etkilendiğini gözlemiştir.

Düşük karbonlu çeliklerde, belirgin bantlı yapı arzu edilmemekte ve hafif bantlı yapı işlenebilirliğe olumlu katkı sağlamaktadır (16). Bhattacharya ve arkadaşları, bantlı perlitik yapıya sahip düşük karbonlu yeniden kükürt katılmış çeliklerde, perlit bant aralığı ve sürekliliğin matkap ucu ömrüne etkisi olmadığını gözlemişlerdir (11).

Aynı çalışmada, haddelerme yönüne dik ve paralel delme deneylerinde, artan perlit bant sürekliliği ve artan perlit bant aralığı ile takım yan yüzeyindeki çentik aşınmasında iyileşme gözlenmiştir. Bu durum perlit bantları sıklığının, özellikle orta karbonlu çeliklerde işlenebilirliği kötüleştirdiği anlayışı ile uyuşmamaktadır (16). Ancak, bu numunelerin işlenebilirlik deneylerinde, seyrek perlit bant aralığına sahip numunelerde yığıntı talaşın daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Araki ve Yamamoto'da, düşük alaşımlı çeliklerde boyuna kesme yönünde, enine kesme yönüne nazaran yığıntı talaşın daha kararlı olduğunu gözlemişlerdir (9). Kuşak, kolay işlenebilir çeliklerde artan soğuk haddelerme miktarı ile kesme kuvvetinin azaldığını gözlemiştir (67). Bu çalışmada, artan kesme hızı ile birlikte takım ucundaki aşınma artmıştır.

Abeyama ve arkadaşları, SAE 5120 serisi çeliklerdeki delme deneylerinde, soğuk dövülmüş ve ısıtılmış numunelerde ferrit ve perlit yapıda ilaveten küresel sementitin bulunmasıyla, takım ömrünün önemli ölçüde ve soğuk dövme ile de bir miktar düştüğünü gözlemişlerdir (10). Soğuk dövmenin, delinebilirliğe etkisi Şekil 3.3'de verilmektedir.



Şekil 3.3. Soğuk dövmenin delik delmedeki takım ömrüne etkisi (10).

Soğuk dövmenin; sünekliği azaltırken, sertliği yükseltmekte ve delme işleminde döndürme momenti, kesme enerjisi ve kesme sıcaklığı, takım aşınmasını düşürdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra, dalma ve gevrekleşme özelliklerini arttırmaktadır. Takım ömrü ise soğuk dövme miktarına bağlı olarak artmakta veya azalmaktadır.

3.5. Sıcak Şekillendirmenin İşlenebilirlik Üzerine Etkisi

Sıcak haddelenmiş şartlardaki iş parçası genellikle homojen olmayan kaba bir yapıya sahiptir. Bunun sebebi, sıcak haddeleme sırasında malzeme uzun süre yüksek sıcaklıklara maruz kalması ve sonuç olarak nispeten kaba bir yapının oluşmasıdır. Homojen olmayan bu yapı, işlenebilirlik açısından olumsuz bir durum sergilemektedir (1).

Sıcak haddelenme sırasında gerinim hızına bağlı olarak toparlanma, önemli ölçüde gerinim pekleşmesi olmaksızın elde edilebilmektedir. Bu, α demirde, çapraz kayma ve tırmanma ile oluşan alt tane yapısı ile oluşan, dinamik toparlanmanın bir sonucudur (7).

Sıcak haddelenmiş metallere de soğuk haddelenmiş ve tavllanmış metallerdeki gibi uniform olmayan yapı elde edilmektedir. Yüzey tabakalarında deformasyonun ve haddelenme sırasındaki soğumanın daha fazla olması yüzeyde yeniden kristalleşmiş ince taneli yapıya sebep olmaktadır (6, 7).

İşleme için elverişli bütün metallerin ortalama tane boyutu 25-250 μm arasındadır. Malzemede, plastik şekillendirme ile tane boyutunun düşmesi sonucu oluşan yüksek miktardaki dislokasyonlar, 0,5 benzeş sıcaklığın ($^{\circ}\text{K}$ cinsinden T/T_M , deformasyon sıcaklığı/metalin ergime sıcaklığı) üzerindeki sıcaklıkta ortadan kalkmaktadır. Bu, malzemenin sıcak olarak haddelenmesi veya soğuk haddelenmeyi müteakiben, yeniden kristalleşme ısı işleminin uygulanması ile yapılabilmektedir (56).

Haddelenmiş ve tavllanmış düşük karbonlu çeliklerin tamamında işlenebilirliğinin, perlit içeriği ile ve ferrit miktarının ve ilk östenit tane boyutunun küçülmesi ile iyileştiği bilinmektedir (15).

Tavllanmış çeliklerde perlit miktarı, artan karbon miktarı ile artmakta ve bu sebeple akma dayanımı artmaktadır. Sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelik numunelerde, artan karbon miktarına bağlı olarak, kayma mukavemetinin ve hacim başına kesme kuvveti için harcanan spesifik gücün daha fazla olduğu gözlenmiştir (42).

Düşük karbonlu çeliklerde, sıcak haddelenmiş numunelerin, soğuk haddelenmiş numunelere göre kesme kuvvetinin daha düşük olduğu bilinmektedir (14). Özçatalbaş, SAE 8620 çeliği üzerinde yaptığı tornalama deneylerinde, kesme kuvvetlerinin sıcak haddelenmiş numunelere göre tam tavllanmış ve normalize edilmiş numunelerde daha düşük olduğunu gözlemiştir (48).

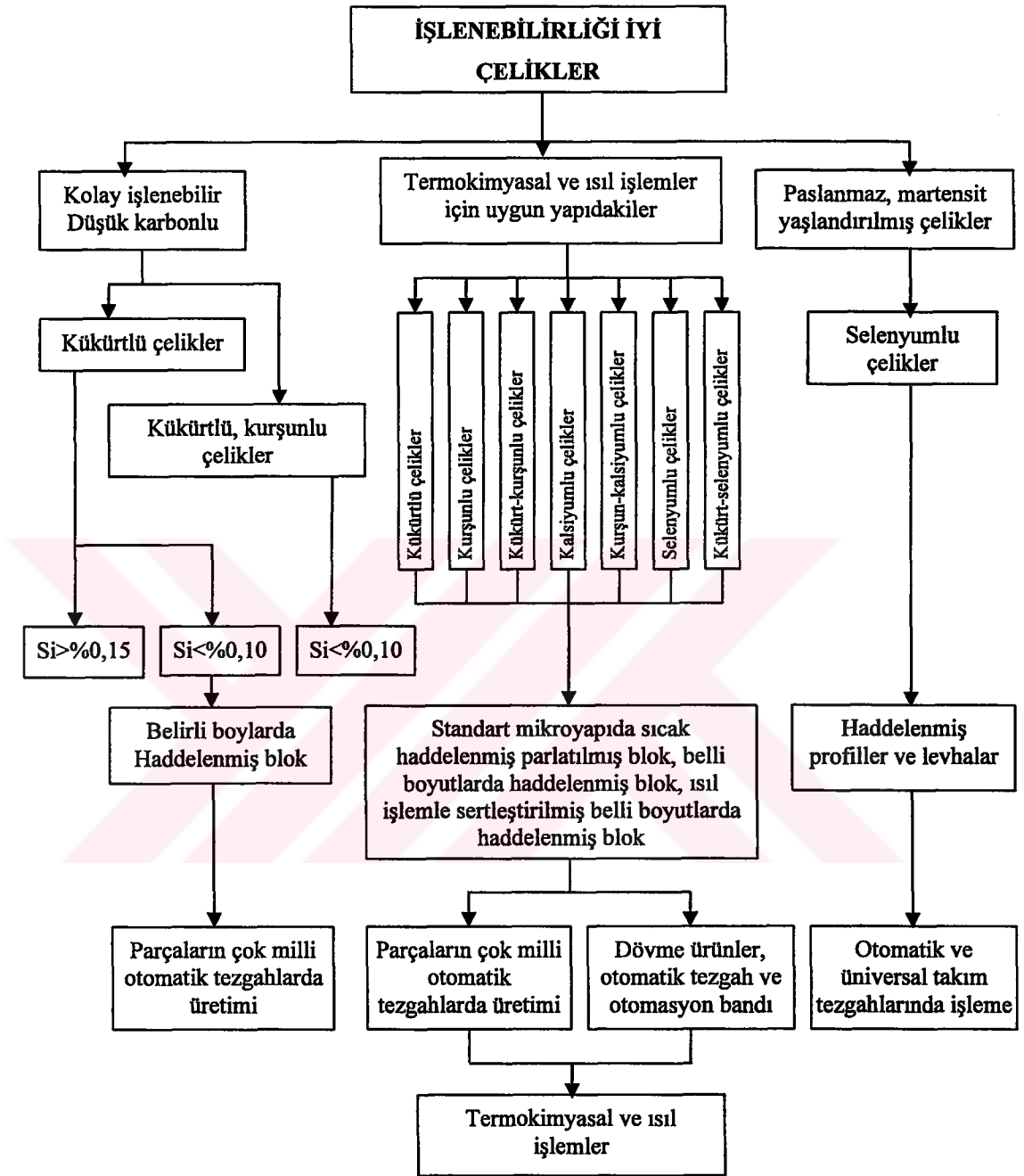
Araki ve Yamamoto, çeşitli mikroyapılardaki AISI 4120 numuneler üzerindeki tornalama deneylerinde, en sert R (beynitik+ferritik haddelenmiş) numunenin kesme kuvvetlerinin S (küreselleştirilmiş), A (tam tavlanmış ferritik-perlitik), N_H (normalize edilmiş), numunelere göre en düşük olduğunu gözlemişlerdir (9). N_H ve A karşılaştırıldığında, A numunesinde bantlı yapıdaki sertliğe karşın, kesme kuvvetlerinde büyük fark gözlenmemiştir.

Aynı çalışmada, yığıntı talaşın R numunelerinde, S numunelerinden daha az ve enine kesmede daha düşük değer göstermiş, A numunesinde, yığıntı talaş asılı kararsız çıkıntılar göstermiştir. Boyuna kesmede, enine kesmeye nazaran daha kararlı yığıntı talaş oluşumu gözlenmiştir. Yumuşak numunelerin iyi işlenebilirlik sergilemediği ve ısıtıl işlem görmemiş, perlitik ve beynitik yapıların iyi işlenebilirlik özelliklerine dikkat çekilmektedir.

Araki ve Yamamoto, ısıtıl işlem görmüş JIS-SCM3; AISI 4135 düşük alaşımlı çelik üzerindeki tornalama deneylerinde; ısıtıl işlem görmüş yapılarda artan mukavemet düzeyi ile malzeme kırılganlığının arttığını, kayma (kesme) açısının büyüdüğünü, takım-talaş ara yüzeyinin genişlediğini, yığıntı talaş oluşma ihtimalinin azaldığını ve takım aşınmasının daha fazla olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir (9).

Özçatalbaş'ın, sıcak haddelenmiş, tavlanmış ve normalize edilmiş durumda 90 mm çapında SAE 1050 çeliği üzerindeki tornalama deneylerinde; çekme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özellikler ile işlenebilirlik arasında önemli bir ilişki gözlenmemiştir. Ferrit+perlit bantlaşması gibi faz dağılımı mikroskobik heterojenliğinin, takım ömrü üzerinde belirgin etkileri görülmemiştir (68).

Zaslavasskii, Rusya'da üretilen işlenebilirliği iyi çeliklerin sınıflandırılmasını Şekil 3.4'deki gibi yapmıştır (69).



Şekil 3.4. Rusya'da üretilen işlenebilirliği iyi çeliklerin sınıflandırılması (69)

3.6. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, kullanılan imalat metotları ve başka etkilerle de ortaya çıkan küçük aralıklı yüzey düzensizlikleridir. Bitirme yüzeyi, bir yüzeyin genel kalitesi için

kullanılan bir terimdir. Yüzeyin karakteristik özelliği, yapıya veya spesifik pürüzlülük değerine bağlı olmamakla birlikte iyi bitirme yüzeyi düşük pürüzlülük değerini göstermektedir (12).

Yüzey pürüzlülüğü sayısal değerlerinin alınmasında, ortalama çizgi (M) veya zarf sistemi (E, yarıçapı R olan bir dairenin yüzey üzerinde yuvarlanarak meydana getirilen çizgi) kullanılmasında; Ra (ortalama pürüzlülük değeri) Rmax (en büyük pürüzlülük derinliği), Rt (dipten tepeye yükseklik), Rz (on nokta yükseklikler ortalaması), Rp (profil maksimum tepe yüksekliği), Rm (profil maksimum çukur derinliği), L (örnekleme uzunluğu) kullanılmaktadır (70).

Aynı yüzey için sayısal olarak, Ra ve Rq değerleri birbirine yakın olup, Rt Ra'ya oranla 4-8 kat daha büyüktür.

3.6.1. İdeal yüzey pürüzlülüğü

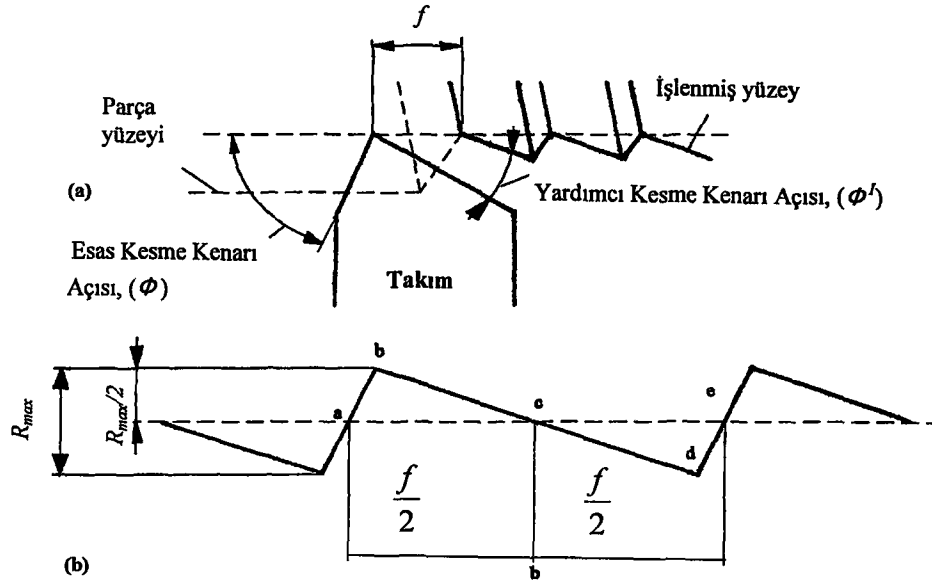
En uygun biçimde verilmiş takım şekli, geometrisi ve kesme hızı ile sağlanabilen en iyi yüzey pürüzlülüğü “ideal” yüzey pürüzlülüğünü vermektedir (71). Kesici takımında yığıntı talaş, titreşim ve takımın bağlanma hataları vb. etkenlerin azaltılması ile ideal yüzey pürüzlülüğü sağlanabilir. Tornalama işlemlerinde, en ideal şartlar altında sağlanan ideal yüzey pürüzlülüğü Şekil 3.5’de gösterilmiştir

Şekil 3.5.b’de Yüzey pürüzlülük değeri Ra, yüzey düzlemine paralel eksenin üst ve alt tarafındaki alanların, örnek uzunluğa bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$R_a = \frac{('abc' \text{ alanı}) + ('cde' \text{ alanı})}{f} \quad [3.1]$$

Burada :

f ; birim ilerlemedir.



Şekil 3.5. M sistemine göre yüzey pürüzlülüğü profili, (a) yüzeyin oluşması, (b) işlenmiş yüzeyden kesit f, ilerleme (72)

“abc” alanı ile “cde” alanları birbirine eşit olduğundan;

$$R_a = \frac{2(\text{'abc' alanı})}{f} = \frac{R_{\max}}{4} \quad [3.2]$$

elde edilir. Burada;

$R_{\max}/2$: ‘abc’ üçgeninin yüksekliğidir.

Bu aşamada düzgün köşeli düzensizliğe sahip yüzey için yüzey pürüzlülüğünün aritmetik olarak gerçek değeri pürüzlülüğün maksimum yüksekliğinin ¼’üne eşittir (71). Şekil 3.5’e göre;

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot \phi + \cot \phi'} \quad [3.3]$$

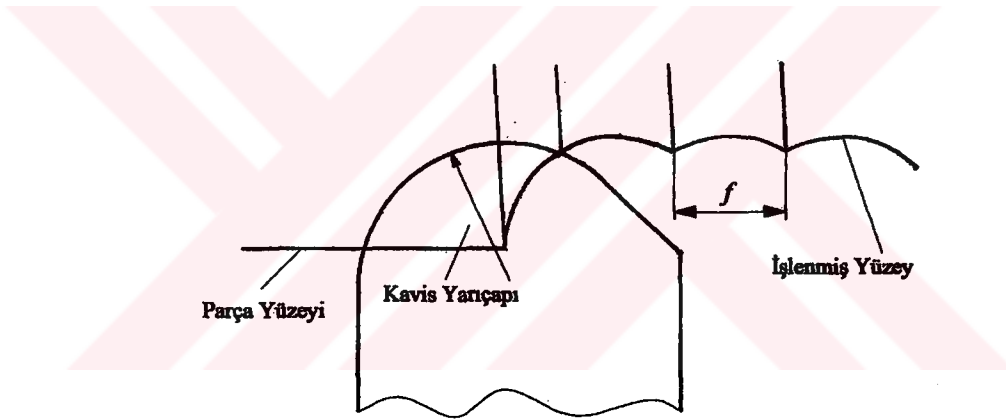
Burada;

ϕ ve ϕ' sırasıyla en yüksek ve en düşük kesme açısıdır ve “Eş. 3.3”, “Eş. 3.4”de yerine konursa;

$$R_a = \frac{f}{4(\cot\phi + \cot\phi')} \quad [3.4]$$

elde edilmektedir (71).

“Eş. 3.4” keskin köşeli takımlarla yapılan işlemenin ilerleme hızına bağlı olduğunu göstermektedir. Talaşlı imalatı, genelde yuvarlak köşeli kesici takımlar kullanılmaktadır. Şekil 3.6’da ideal şartlar altında, yuvarlak uca sahip bir takım ile işlenmiş yüzey pürüzlülüğünün geometrisi gösterilmiştir. Bu şekilde bir yüzey pürüzlülüğü için geometrik olarak R_a , değerinin hesaplanması keskin kenarlı kesici takıma göre daha zor olmaktadır.



Şekil 3.6. Yuvarlak köşeli kesici uç ile işlemede ideal yüzey pürüzlülüğü (72).

R_a değerinin hesaplanması için ilerleme ve kesici ucun yarı çapı hesaplamaya katılarak aşağıdaki deneysel çalışmalarda elde edilen “Eş. 3.5” kullanılmaktadır (71).

$$R_a = \frac{0,0321 \cdot f^2}{r_e} \quad [3.5]$$

Burada :

r_e ; kesici takım uç yarı çapı,

f ; ilerlemedir.

3.6.2. Doğal yüzey pürüzlülüğü

Talaşlı imalat uygulamalarının yukarıda belirtilen ideal şartlara uyması genellikle mümkün olmamaktadır. Doğal işleme şartları altında elde edilen yüzey pürüzlülüğü, gerçek yüzey pürüzlülüğüdür. Doğal yüzey pürüzlülüğüne neden olan temel etkenlerden biri de yığıntı talaş oluşumudur. Bazı durumlarda, yığıntı talaş devamlı olarak oluşmakta ve kopabilmektedir. Bu durumda, sıvanma ile talaş yüzeyinin altında ve talaş kaldırılmış malzeme yüzeyinde, uzaklaştırılan parçalardan dolayı daha pürüzlü bir yüzey meydana gelmektedir (73). İşleme kalitesine, takım tezgahı kinematik mekanizmaları, takım tezgahının fiziki koşulları, kesici takım ve sıcaklık gibi ortam özellikleri etkilemektedir (12).

3.6.3. Mikroyapının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Işık ve Çakır, soğuk iş, sıcak iş ve kalıp çelikleri üzerinde yaptıkları tornalama deneylerinde, her üç numunede de artan kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemişlerdir (74). Sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiyi, ilerleme, sonra talaş derinliği ve en az etkiyi kesme hızı yapmıştır.

Kopač ve arkadaşları ise, soğuk çekilmiş C1 E4 düşük karbonlu çelikler üzerinde yaptıkları tornalama deneylerinde, yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesinde en önemli faktörün kesme hızı, daha sonra takım ve üçüncü olarak talaş derinliğinin etkili olduğunu rapor etmişlerdir (75).

Kesme sırasında, kesme hızının artmasıyla birlikte takım talaş ara yüzeyinde oluşan ısı nedeniyle oluşan yığıntı talaş ve yığıntı talaşın aşağı doğru büyümesi ve sertleşen yığıntı talaşın kesici takım gibi davranması kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü de arttırmaktadır (12).

Bhattacharya ve arkadaşları, düşük karbonlu yeniden kükürt katılmış kolay işlenebilir çelikler üzerinde tornalama deneyleri yapmışlardır (11). Sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü perlit bantlarının sürekliliği ile iyileşmekte ve kesici takım yan yüzeyindeki çentik aşınması da kısalmaktadır. Ayrıca, çentik aşınması ve yüzey pürüzlülüğü perlit bantları arasındaki mesafenin artışıyla iyileşmiştir.

Kuşak ve arkadaşları, üç ayrı otomat çeliği üzerinde ve dört ayrı kesme hızında yaptığı tornalama deneylerinde, en iyi yüzey pürüzlülüğünü içerisinde daha çok sayıda küçük, küresel ve MnS inklüzyonları bulunan numunede elde etmiş ve bunu, MnS'nin, yığıntı talaş oluşumunu engellemesine atfetmişlerdir (76).

Katayama ve Imai, düşük karbonlu yeniden kükürt katılmış kolay işlenebilir çeliklerdeki işlenebilirlik deneylerinde, ZrO_2 kesici takımda daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir (77). Bu durum MnS'ün takım talaş ara yüzeyinde yağlayıcı rol oynamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, ferrit fazı takım yüzeyine yapışma eğilimi göstermemiştir.

Yoguchi ve Onodera, AISI 12L14 kurşun ilave edilmiş ve yeniden kükürt katılmış düşük karbonlu kolay işlenebilir çelikler üzerinde, (ASTM E-618'de genel hatları verilen) deneyi yapmışlardır (3). Sonuçlara göre, kaba ve ince talaşın her ikisinin de yüzey kalitesi, soğuk şekillendirmenin % 29'a kadar arttırılması ile iyileşmiştir.

Ayrıca, optimum soğuk şekillendirme % 20 civarında bulunmuştur. Aynı deneyde, 25 mm çubuklar için % 11'lik normal soğuk şekillendirmeden daha yüksek soğuk şekillendirmede, işlenebilirliği ve özellikle de yüzey kalitesini iyileştirmek mümkün olmuştur.

Aynı deneylerde, çentik aşınması oluşumundan dolayı yüzey kalitesini doğrudan veya dolaylı olarak bozduğuna inanılan yığıntı talaşın ayrılma veya kırılma sıklığı ve boyutunun, talaş oluşturma işlemi kararlılığının arttırılması ile azaldığı görülmüştür.

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Malzeme

Deneylerde kullanılan St 44 çelik malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. St 44 çeliğin kimyasal bileşimi (Ağırlık %)

C	Si	Mn	P	S	Al	N
0,07	0,18	1,01	0,016	0,007	0,032	0,005

4.2. Haddeleme

Haddelemede kullanılacak numuneler, 6000×1500×35 mm boyutlarındaki levhadan, 90 mm genişliğinde şeritler halinde oksit-gazla kesilerek elde edilmiştir. Soğuk ve sıcak haddelemenin işlenebilirlik üzerindeki farklı etkilerini mukayese etmek amacıyla, haddeleme işlemi soğuk ve sıcak olarak yapılmıştır.

4.2.1. Soğuk haddeleme

Haddelemeden önce, yüzeylerdeki oksit tabakasının ve oksit-gazla kesme işleminden etkilenen yan yüzeylerin ortadan kaldırılması amacıyla üst ve alt yüzeylerden ≈1 mm ve yan yüzeylerden 3’er mm, freze ile talaş kaldırılarak numune boyutları 33x84x500 mm’ye getirilmiştir. Haddeleme işlemi sırasında oluşan eğilmeler dikkate alınarak parça boyu kısa tutulmuştur.

Hazırlanan bu numunelerin % 11, 15, 19, 23 ve 27 oranlarında haddeleme işlemleri, silindir çapları 400 mm olan merdaneler arasından geçirilerek 0,4 mm ve 0,5 mm pasolar halinde yapılmıştır. % 10’luk haddelemeden sonra haddelenen malzemelerde eğilmeler meydana geldiğinden, her pasodan sonra malzeme çevrilerek eğilmeler engellenmeye çalışılmıştır. Ancak, bu iki taraflı eğilmeler sonucu, % 20’lik

haddelenmeden sonra, yüzeyde çatlaklar görülmüştür. Çekme ve işlenebilirlik deneylerinde, muhtemel çatlakları ortadan kaldırmak için yüzeyden 2 mm talaş kaldırılmıştır. Her haddeleme oranı için 3 adet numune kullanılmıştır.

4.2.2. Sıcak haddeleme

Sıcak haddeleme işlemi için 35x90x1200 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Deney numuneleri, fırında 1100 °C'ye kadar tavllanmış ve % 11, 13, 17, 23, 26 ve 34 oranlarındaki haddeleme işlemleri tek pasoda gerçekleştirilmiştir. Her haddeleme oranı için 2'şer adet numune kullanılmıştır.

4.3. Metalografi

Metalografi çalışmaları için sıcak ve soğuk haddelenmiş numunelerden, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi 5 ayrı yüzeyden parça alınmıştır. (y), yüzeye 2 mm mesafe; (a), ara yüzeyle merkez arasındaki bölge ve (m), merkezden 2 mm içerdeki bölgeyi göstermektedir.

Numuneler, zımparalama+parlatma yöntemi ile dağlamaya hazırlanmıştır. Soğuk haddelenmiş numunelerin (c) yüzeyinde, haddeleme sırasında meydana gelen çatlakları yüzeyden uzaklaştırmak için, 0,5 mm derinliğe kadar zımparalama işlemi uygulanmıştır. Dağlama ayırıcı olarak % 3'lük nital (% 3 nitrik asit + % 97 metanol) kullanılmıştır. Her numunede, 3 ayrı noktadan görüntü alınmıştır.

4.3.1. Faz oranı ölçümü

Perlit koloni oranı; başlangıç numunesi ile soğuk ve sıcak haddelenmiş numunelerin farklı yüzeylerinden, 10 ayrı bölgeden alınan mikroyapı fotoğrafı üzerinden, nokta sayım metodu uygulanarak (her bir numune için 25'er sayım) ve "Eş. 4.1" kullanılarak belirlenmiştir (78).

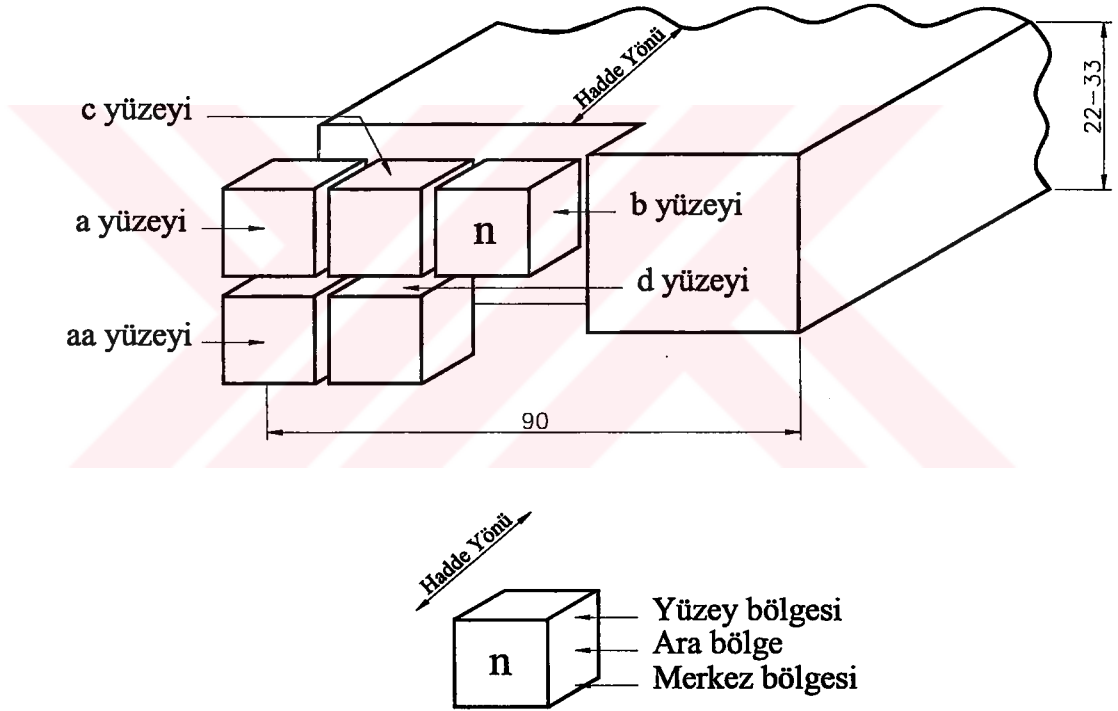
$$Pf = \frac{P_\alpha}{P} \quad [4.1]$$

Burada :

Pf ; faz oranı

P_α ; α fazı içerisine düşen faz nokta sayısı

P ; toplam nokta sayısıdır.



Şekil 4.1. Mikroyapı fotoğrafları için numunelerin hazırlanması

4.3.2. Tane boyunun enine oranın belirlenmesi

Ferit tane ve perlit koloni boyunun enine oranı (aspect ratio), Şekil 4.1’de tanımlanan (b) yüzeyinde, her bir numune için en az beş farklı bölgeden ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Ölçüm sonuçları Ek 1’de çizelge halinde verilmiştir.

4.3.3. Ferrit tane ve perlit koloni boyutlarının ölçümü

Ortalama ferrit tane ve perlit koloni boyutları, mikroyapı fotoğrafları üzerinden çizgisel kesişme metodu kullanılarak belirlenmiştir. Toplam uzunluğu 500 mm olan ızgara mikroyapı üzerine yerleştirilmiştir (Resim 5.1). Izgara çizgileri ile ferrit taneleri ve perlit kolonilerinin kesişme sayıları belirlenmiştir. Bir faz veya perlit kolonilerindeki çizgisel kesişme “Eş. 4.2” ve “Eş. 4.3”e göre hesaplanmıştır.

$$\bar{d}_p = \frac{L_T}{N_p} \times \frac{V_{Faz}}{M} \quad [4.2]$$

$$D = 1,776 \bar{d}_p \quad [4.3]$$

Bu eşitlikte:

V_{Faz} ; faz hacim oranı,

L_{Faz} ; fazı kesen toplam çizgi uzunluğu (mm),

L_T ; toplam çizgi uzunluğu (500 mm),

$\bar{d}_p$; çizgisel kesişme uzunluğu (μm),

D ; fazın ortalama tane boyutu (μm),

N_p ; çizgilerin fazı kesen noktalarının sayısı,

M ; büyütme oranıdır.

Her bir faz veya perlit kolonilerinde yaklaşık 140 kesişme elde etmek için uygun bir büyütme kullanılmıştır. Kabul edilebilir doğruluğu sağlamak için en az beş farklı bölge ölçülmüştür (78). Ortalama tane veya koloni boyutu “Eş. 4.3”e göre hesaplanmıştır (79).

4.3.4. Perlit bantları arası mesafenin belirlenmesi

Haddeleme oranına bağlı olarak, perlit bantları arası mesafesindeki değişim (b)

yüzeyinden farklı bölgelerden alınan mikroyapı fotoğrafı üzerinde, çizgisel kesişme metodu uygulanarak belirlenmiştir (78). Görüntü üzerinde, haddeme eksenine dik, 50 mm boyunda bir çizgi yerleştirilmiş ve çizgiyi kesen sürekli perlit bantları sayılmıştır. Ölçümler; 30 µm aralıklarla, y-a-m (yüzey, ara ve merkez) noktalarında ayrı ayrı, her numune için 25'er sayım yapılarak ve “Eş. 4.4” kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Perlit bantları arası mesafe ölçüm sonuçları Ek 2’de verilmiştir.

$$a = \frac{L_T / M}{N} \quad [4.4]$$

Burada :

a ; perlit bantları arası mesafe (µm)

L_T ; kesişen çizgi uzunluğu (50 mm) x 1000 = µm

N ; çizgiyi kesen perlit bant sayısı

M ; büyütme oranıdır.

4.3.5. Perlit bantları kalınlığının ölçülmesi

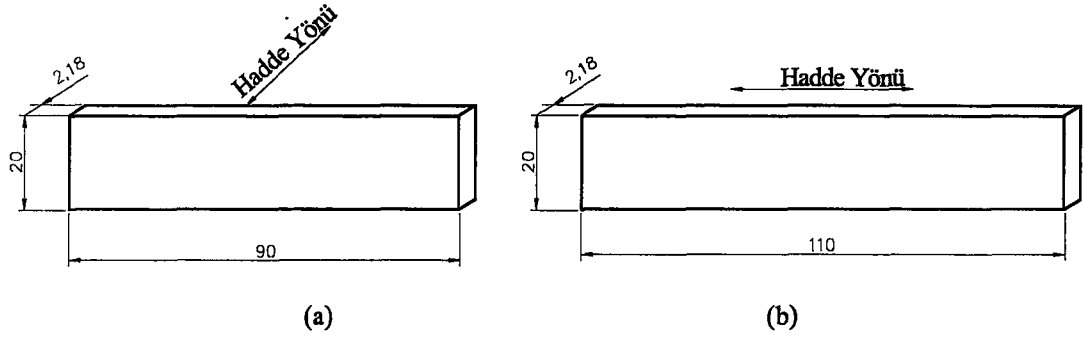
Perlit bant kalınlığı, numunelerin talaş kaldırılan (y), yüzey bölgelerinde; başlangıç numunesi ile soğuk haddelenmiş numunelerin x100 ve sıcak haddelenmiş numunelerin x400 ölçekli mikroyapı fotoğrafları üzerinden her bir numune için üç ayrı mikroyapı fotoğrafı üzerinde 25'er ayrı ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir.

4.4. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

4.4.1. Çekme deneyleri

Farklı oranlarda soğuk ve sıcak haddelenmiş parçalardan haddeme yönüne paralel ve dik olarak alınan çekme deney numuneleri, TS 138 EN10002-1'e (80) göre hazırlanmıştır (Şekil 4.2 (a) ve (b)). Her bir haddeme oranı ve yönü için 5'er adet numune hazırlanmış ve çekme deneyi için DARTEC marka çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyleri 100 mm/min hızda gerçekleştirilmiştir. Gerilme ve

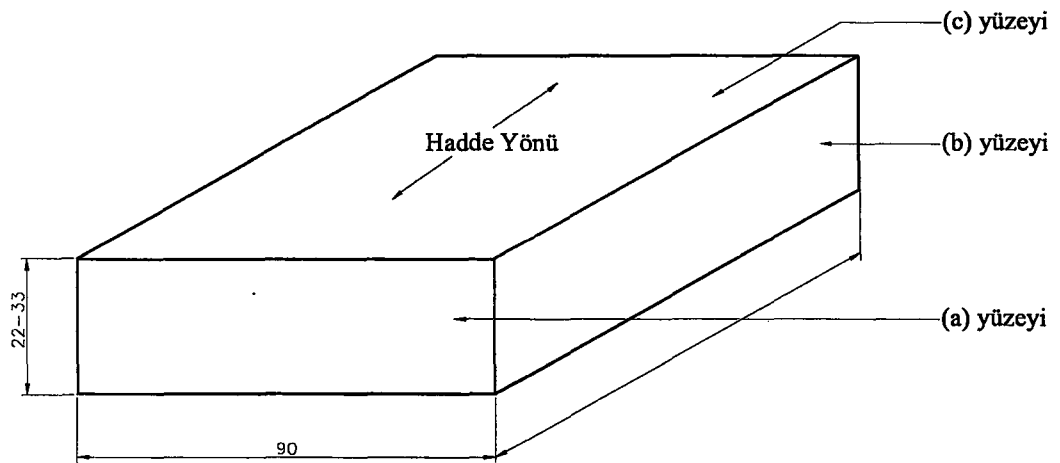
yüzde uzama değerleri otomatik olarak kayıt yapabilen kayıt cihazından grafik olarak alınmıştır. Çekme deney sonuçları Ek 3’de verilmiştir.



Şekil 4.2. TS 138 EN10002-1’e göre hazırlanan çekme numuneleri

4.4.3. Sertlik ölçümü

Malzemelerin sertlik ölçümü için Vickers metodu kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri henüz dilimlenmemiş (Şekil 4.3) ve dilimlenmiş numunelerin, (Şekil 4.1) beş ayrı yüzeyinden TS 207’ye göre yapılmıştır (81). Sertlik ölçüm sonuçları Ek 4’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Sertlik ölçümü için dilimlenmemiş bloğun boyutları

4.5. İşlenebilirlik Deneyleri

Soğuk ve sıcak haddelenmiş numunelerin işlenebilirlik deneyleri için doğrusal hareketle talaş kaldıran takım tezgâhlarından “vargel tezgâhı” kullanılmıştır. Oluşan kesme kuvvetlerinin bilgisayar yardımıyla ölçülebilmesi ve yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçümü için doğrusal olarak talaş kaldırma sırasında oluşan asıl kesme kuvveti (F_c) ile ilerleme kuvvetini (F_a) ölçmek amacıyla, Kurt tarafından tasarlanmış ve imalatı yapılmış, yük hücresi (load-cell) esaslı dinamometre kullanılmıştır (82, 83).

Bu deney düzeneğinin temel çalışma prensibi, talaş kaldırma sırasında meydana gelen kesme kuvvetlerinden etkilenen kesici takımdaki yer değiştirmelerin yük hücreleri yardımıyla ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Donanım, kuvvet etkisiyle kesicide oluşan yer değiştirmelerin, elektriksel gerilim (Volt) cinsinden bilgisayar yardımıyla ölçülmesini ve toplanmasını sağlamaktadır.

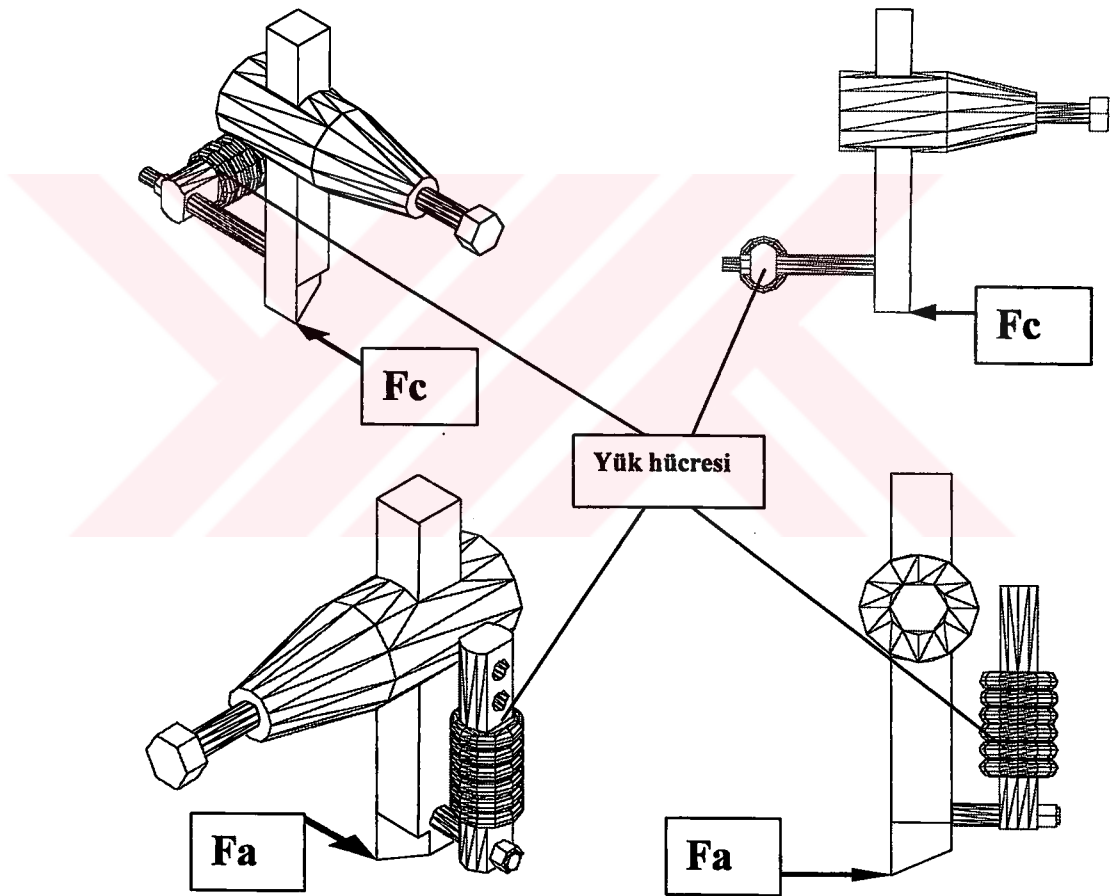
4.5.1. Sistem donanımı

Ölçme sisteminin temelini oluşturan; asıl kesme ve ilerleme kuvvetlerinin ayrı ayrı ölçülebilmesi için TEDEA firmasına ait 2 adet kiriş tipi BB 200 kg yük hücresi kullanılmıştır. Sistemde yük hücresinden alınan sinyallerin bilgisayar ortamında okunması için ADVANTECH ürünü, çoklu fonksiyon özelliği olan analog ve dijital I/O kartı kullanılmıştır.

PCL-812PG ve yük hücrelerinden gelecek verileri gerinim olarak okuyarak kesme kuvvetlerini ölçme işlemini yapmak amacıyla kurulan deney düzeneğinde, yine bir ADVANTECH ürünü olan “GENIE Data Acquisition and Software Version 2.0” isimli ticari bir paket program kullanılmıştır.

4.5.2. Yük hücrelerinin deney düzeneğine yerleştirilmesi

Doğrusal talaş kaldırma için kullanılan vargel tezgâhı üzerinde, değerlendirmede kullanılan (F_c) Asıl kesme kuvveti ve (F_a) İlerleme kuvvetlerinin uygulama yönlerine göre kullanılan yük hücrelerinin kesici takıma temas noktaları şekil 4.4'de gösterilmiştir.



şekil 4.4. Yük hücrelerinin konumları (82)

4.5.3. Tezgâh, kesici takım ve deney numuneleri

Deney düzeneğinin yerleştirildiği tezgâh, mekanik tertibatlı CINCINNATI vargel tezgâhıdır. Deneylerde kullanılan kesici takım: STELLRAM firmasına ait SCMT 12 M5 08E formunda olup, aynı firmanın NL 25 kalite grubu seçilmiştir. Bu kalite

grubu ISO P15/M15'e karşılık gelmekte olup, vargel tezgâhında talaş kaldırma sırasında oluşan darbeleri absorbe edecek tok bir kalite olması sebebiyle tercih edilmiştir. Aynı kesici ucu bağlamak için ISO 1832'ye (84) uygun ve STELLRAM firmasına ait SSSCL 2525-12 takım tutucu kullanılmıştır.

Ölçme işleminde kesici takım ile yük hücresi arasındaki temasın sağlanması için tasarlanan dinamometre gövdesi, titreşimi absorbe etmek ve rijitliği sağlamak amacıyla yekpare döküm bloktan imal edilmiştir.

İşlenebilirlik deneyleri için; başlangıç numunesi, soğuk ve sıcak haddelenmiş numuneler 90x90 mm ebadında kesilmiştir. Başlangıç numunesi ve sıcak haddelenmiş numunelerin yüzeylerindeki tufal, oksit ve soğuk haddelenmiş numunelerde haddeleme sonucu oluşabilecek muhtemel çatlakların ortadan kaldırılması için numune yüzeylerinden freze ile 2'şer mm talaş kaldırılmıştır.

4.6. Sistemin Kalibrasyonu

İşleme deneylerine geçmeden önce, dinamometrenin kalibrasyonu yapılmıştır. Deney düzeneğinin kalibrasyonu için bilinen ağırlıklar metodu kullanılmıştır. Kalibrasyonlarda kullanılacak ağırlıklar, 0-20 kg kapasiteli hassas bir elektronik terazide tartılarak tespit edilmiştir. Ağırlıkların kesici uca etkisini tam olarak tespit edebilmek için, kesici uç formunda hazırlanmış ve tam kesme noktasında ağırlıkların asılacağı bir çelik telin bağlanması için bir delik açılarak hazırlanan, bir çelik plaket takım tutucuya ve takım tutucu da dinamometreye bağlanmıştır.

Ağırlığı ihmal edilebilir çelik tel vasıtasıyla, kuvvetlerin oluşacağı yön ve doğrultuda (F_c, F_a) sırasıyla artan ağırlıklar asılmıştır. Her bir ağırlık uygulaması sonucunda kesici takımda meydana gelen yer değiştirmeler, yük hücreleri yardımıyla, gerilim (volt) cinsinden ölçülmüştür.

Kalibrasyonlarda kullanılan (δ_0) gerilim büyüklüğü değeri, herhangi bir ağırlık uygulaması olmaksızın sistemin çevresel etkiler sonucu sezmiş olduğu gerilimdir. Kalibrasyonlarda kullanılan her bir ağırlık uygulaması öncesinde, 3 dakikalık beklemeler yapılarak, dinamometrenin yüksüz konumundaki (δ_0) değerine geri dönmesi sağlanmıştır. Bu bekleme süreleri sonrasında, ağırlıklar Çizelge 4.2’de gösterilen sıra ile, dinamometreye uygulanmış ve 1 dakika süresince ağırlığın oluşturduğu yer değiştirmeler-gerilimler kaydedilmiştir.

Kaydedilen bu verilerin analizinde; her bir ağırlığın oluşturduğu en kararlı 1000-7000 gerilim verisi (maksimum gerilme değeriyle minimum gerilme değeri arasındaki farkın en az olduğu ardışık okunan veriler) değeri seçilerek bunların ortalamaları alınmıştır.

Çizelge 4.2’de gösterilen $\Delta\delta$ değerleri ise her bir ağırlık uygulaması sonucu bulunan gerilim değerleri ile her hangi bir ağırlık uygulaması olmaksızın dinamometrenin yalnızca çevresel etkiler sonucu sezmiş olduğu gerilim büyüklüğü arasındaki farkları ifade etmektedir. Diğer bir deyişle her bir ağırlığın dinamometrede meydana getirdiği net gerilim büyüklükleri $\Delta\delta$ ile gösterilmektedir. Bu veriler ışığında, asıl kesme kuvveti için oluşturulan kalibrasyon eğrisi ve kalibrasyon denklemi Şekil 4.5’de gösterilmiştir. “Eş 4.5” de yerine konarak Newton cinsinden yer değiştirme bulunmuştur. Fc için doğruluk (eğim) $R^2 = 0,999$ değeri elde edilmiştir.

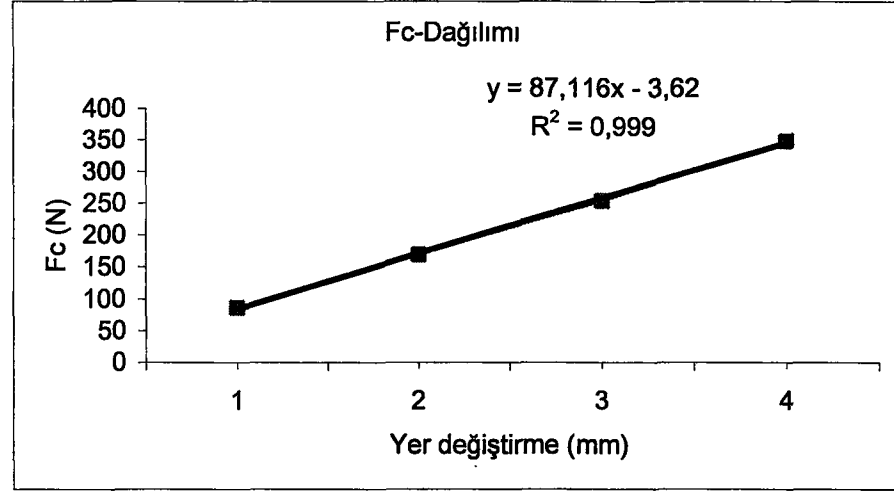
Çizelge 4.2. Yük hücresinin kalibrasyon verileri

Fc kalibrasyonu		
δ (volt)	$\Delta\delta=\delta-\delta_0$ (volt)	Ağırlık (N)
13,294	2,192	86,02
9,864	5,622	168,94
9,743	5,743	253,50
9,311	6,175	348,22

$$F_c (N) = 87,116 \times \Delta\delta \text{ (volt)} - 3,62$$

[4.5]

bulunmuştur.



Şekil 4.5. Asıl kesme kuvvetine (Fc) ait kalibrasyon eğrisi ve denklemi

4.7. Deneylerin Yapılışı

Deneylerde kullanılacak kesme değişkenlerinin seçiminde, yük hücrelerinin çalışma aralığı esas alınmıştır. Akkurt'un (85), "Eş. 4.6" kullanılarak kesme kuvveti denklemine göre, Mikrosoft Office Excel 2000 kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar sonucunda, elde edilen kesme kuvveti değerlerine bağlı olarak talaş derinliği (a), ilerleme (f) ve kesme hızı (V_M) değişkenleri; yük hücrelerinin çalışma aralığını aşmayacak şekilde seçilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme değişkenleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

CINCINNATI marka vargel tezgâhı üzerindeki ilerleme birimlerinin "inç/1000" ve devir sayısı birimlerinin de "çiftkurs/dak" olması nedeniyle, Akkurt'un (85), "Eş. 4.7" ve "Eş. 4.8" ilerleme ve kesme hızı denklemleri kullanılarak gerekli birim çevirme işlemleri yapılmıştır.

$$F_c = 1,1 \times a \times f \times k_\gamma \times k_{l1} \times h^{-m} \quad [4.6]$$

Bu eşitlikte:

F_c ; asıl kesme kuvveti

a ; talaş derinliği (mm)

f ; ilerleme (mm/çift kurs)

k_y ; talaş açısı faktörü

k_{11} ; özgül kesme kuvveti

h^{-m} ; talaş genişliği ve kalınlığı arasındaki bağlantı

1,1 ; doğrusal kesme sabitidir.

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan değişkenler

Talaş derinliği (a) (mm)	İlerleme (f) (mm/çift kurs)	İlerleme hızı (u) (mm/min)	Gidiş geliş sayısı (n_L) (çift kurs/min)	Hız (V_M) (m/min)
1,5	0,0110	0,254	23	9
1,5	0,0082	0,254	31	12
1,5	0,0054	0,254	47	19

$$f = u / n_L \quad [4.7]$$

Burada :

f ; ilerleme (mm/çift kurs)

u ; ilerleme hızı (mm/min)

n_L ; gidiş/geliş sayısı (çift kurs/min)'dir.

Tezgâh üzerindeki 10 ve 20 inç/1000 değerine karşılık gelen ilerleme değerleri için “Eş. 4.7” kullanılarak gerekli dönüşüm yapılmıştır. 1 inç, 2,54 mm ise 10 inç/1000 0,254 mm/min ve 20 inç/1000 değeri 0,508 mm/min karşılık gelmektedir. Dönüşümü yapılmış bu ilerleme değerlerine göre, “Eş. 4.8” kullanılarak, her bir n_L değeri ($n_L = 23, 31, 47$) için V_M değerleri bulunmuş ve Çizelge 4.3’deki ilerleme değerleri tespit edilmiştir.

$$V_M = \frac{2Ln_L}{1000} \quad (\text{m/min}) \quad [4.8]$$

Burada :

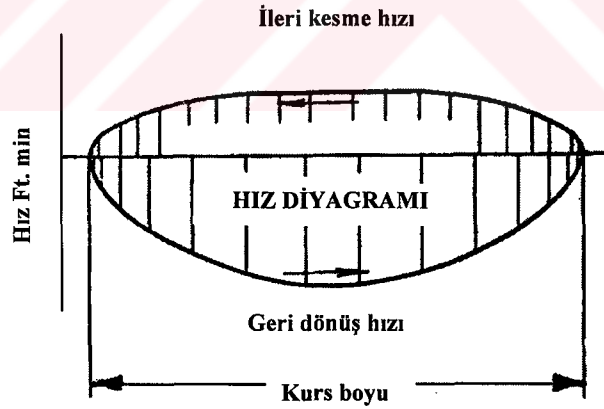
V_M ; kesme hızı

L ; kurs boyu

n_L ; gidiş/geliş sayısı (çift kurs/min)'dir.

(a), (f) ve (V_M) kesme değişkenlerine göre deneylerin yapılmasına geçilmiştir. Yapılan deneylerde, (a) sabit tutulmuş, (n_L) için üç farklı kesme hızı ve (f) için iki farklı ilerleme kullanılmıştır. Ancak, (f)'in 0,508 mm/min olduğu ilerlemede çok sık yaşanan takım kırılması, (darbeli çalışma ile oluşan) verilerin bütün deney parçalarında kararlı bir seyir takip etmemesinden dolayı değerlendirmede (f)'in 0,254 mm/min ilerleme için elde edilen veriler dikkate alınmıştır.

Vargel tezgahında kurs boyunca sabit bir hız olmadığı için Şekil 4.6'da gösterildiği gibi kesme, sabit hızın en yüksek olduğu orta kısımda yapılmış ve kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde en kararlı ve en yüksek bölgedeki veriler alınmıştır (86).

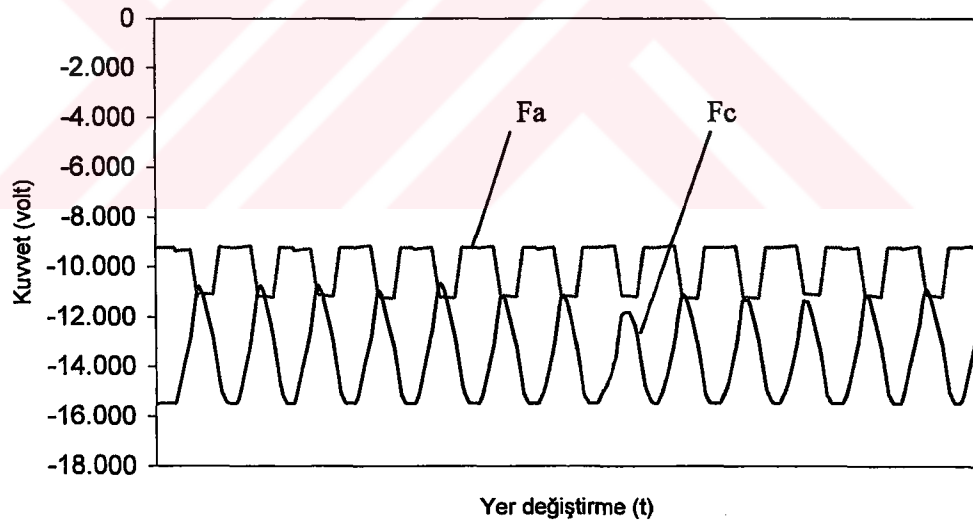


Şekil 4.6. Vargel için Pillar Tip hızlı geri dönüş mekanizması diyagramı (86)

Tezgâhın mikrometrik bileziğinden verilen talaş derinliği, talaş kaldırılmadan önceki numune kalınlık değeri ile kesme deneylerinden sonra elde edilen kalınlık değerinin, bir sürmeli kumpasla ölçülmesi ile doğrulanmıştır.

Deneylerde, numunelerin yalnızca bir yüzeyi kullanılmış olup 90x90 mm boyutundaki her bir numune üzerinde, eşit işleme genişliğine (15 mm) sahip, 3 farklı (f) değeri sıra ile değiştirilerek, her bir numune için 15 ve toplam 180 değişik kesme deneyi yapılmıştır.

Deneyler, normal atölye şartlarında ve ortam sıcaklığında yapılmıştır. Deneylerin tümünde aynı şartları oluşturmak için, hiç kullanılmamış, yeni kesici takım ucu kullanılmıştır. Her bir deney sonrası tezgâh durdurularak (f) değeri ve kesici uç değiştirilmiştir. Haddelme yönüne çapraz işlemede parçalar, kesme açısına 45° eğik bağlanmış ve sadece 0,254 mm/min “f” değeri için talaş kaldırılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçümünde elde edilen asıl kesme kuvveti ve ilerleme kuvvetine ait bir veri örneği Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. % 11 oranında soğuk haddelenmiş numunede 9 m/min hız ve 0,254 mm/min ilerlemede haddelme doğrultusuna dik kesme kuvvetleri

Talaş kesiti “Eş 4.9” kullanılarak her üç kesme hızı için de ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$S = ax(fx \sin 45)$$

[4.9]

Burada:

a ; talaş kesiti

f ; ilerleme (mm/çift kurs)

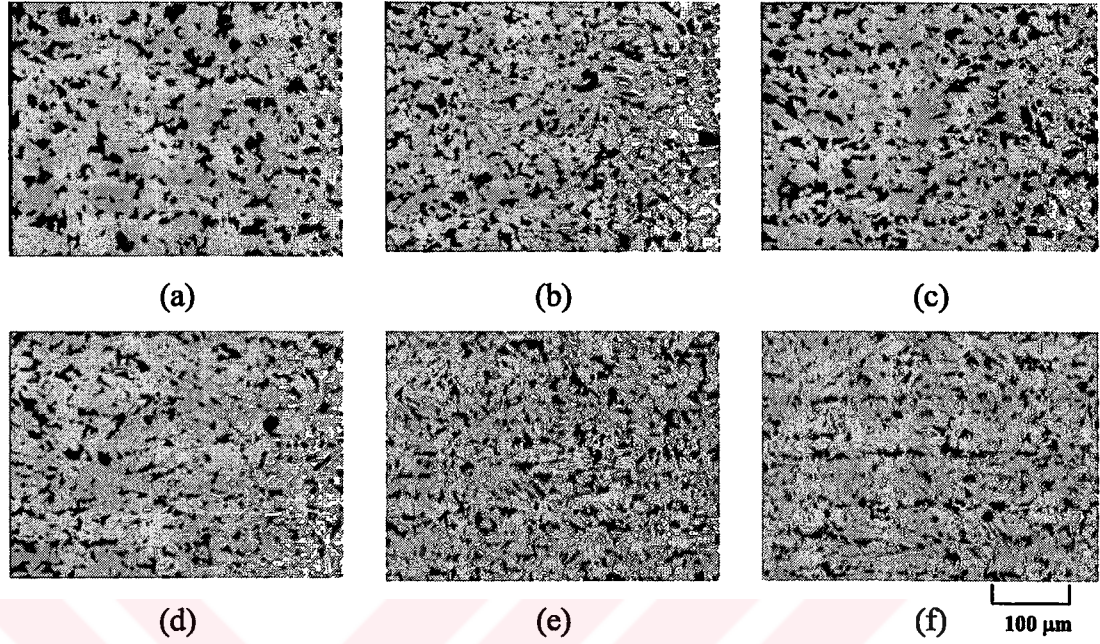
$\sin 45$; takım açısıdır.

4.5. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

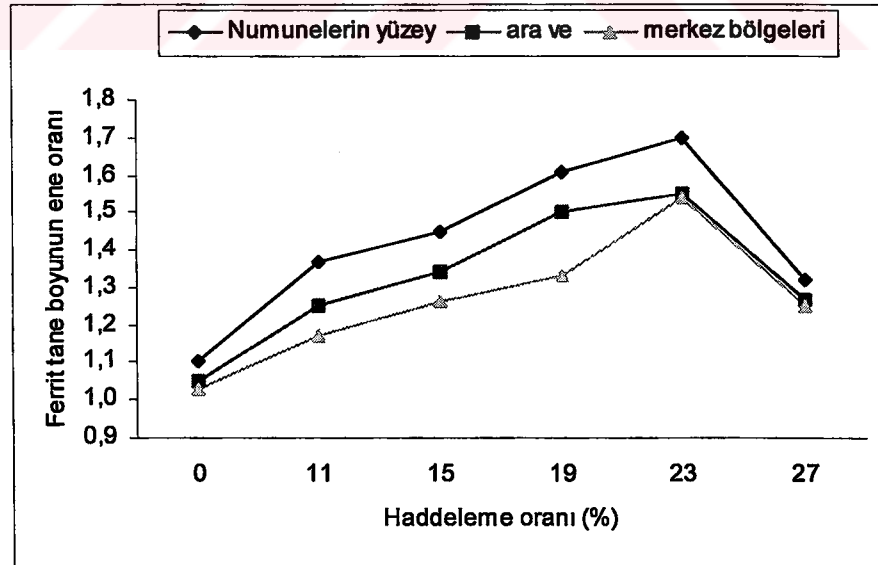
Vargel ile farklı kesme hızlarında talaş kaldırılan numunelerde, yüzey pürüzlülüğü ölçümü, özellikleri Çizelge 4.4’de verilen, Mitutoyo Surf-test-211 tipi yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ortam sıcaklığında yapılmıştır. Her numunede beş farklı bölgede yüzey pürüzlülük değeri ölçülerek bu değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Teorik yüzey pürüzlülüğünün değerleri için “Eş. 3.5” kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri

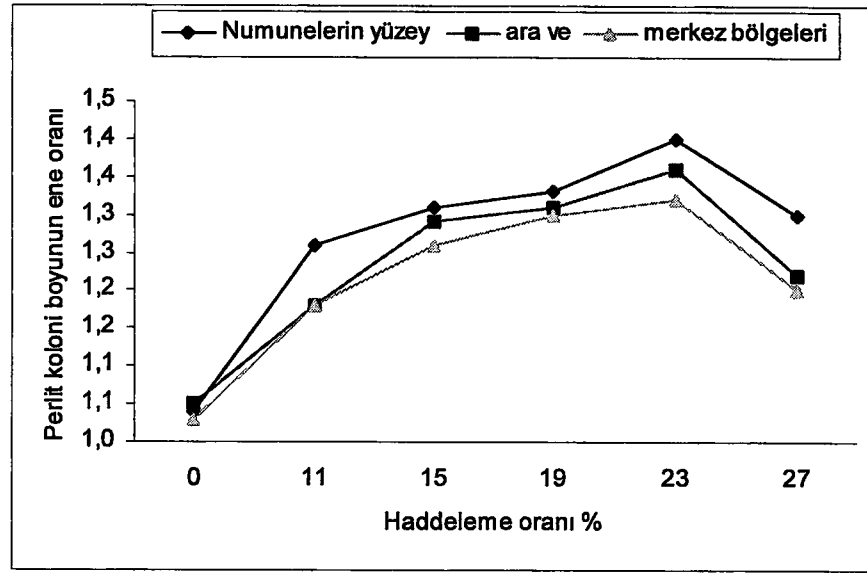
Numune ölçme uzunluğu	0,8 mm
Değerlendirme uzunluğu	4 mm
İzleyici uç yarıçapı	5 μ m
Ölçme kuvveti	4 μ N (0,4 g kuvvet)
İzleyici ucun ilerleme hızı	0,5 mm/s
Ra (ortalama) yüzey pürüzlülüğü	$\frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} f(x) dx$



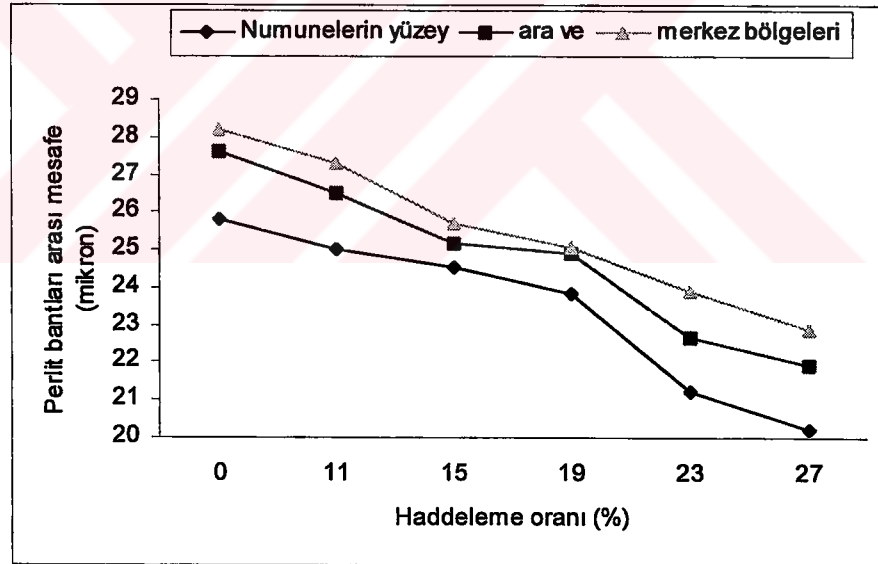
Resim 5.2. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 15 (c), % 19 (d), % 23 (e) ve % 27 (f) oranında soğuk olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik mikroyapıları, Dağlama : % 3 Nital, Büyütme : x100



Şekil 5.1. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak ferrit tanelerinde boyun ene oranındaki değişim



Şekil 5.2. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak perlit kolonilerinde boyun ene oranındaki değişim



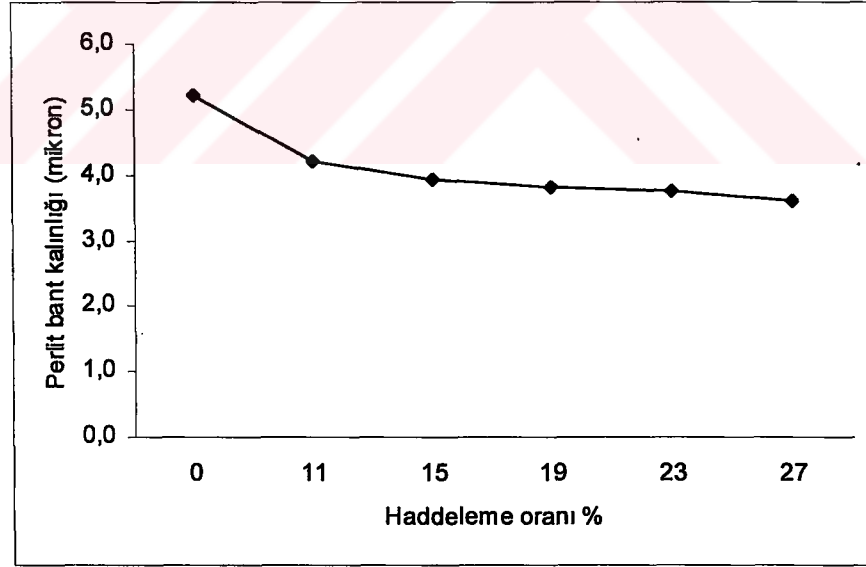
Şekil 5.3. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak perlit bantları arası mesafedeki değişim

Resim 5.1 ve Resim 5.2’de verilen mikroyapı fotoğraflarından ve Şekil 5.3’de verilen perlit bantları arasındaki mesafenin, haddeleme oranına göre değişiminden de görüleceği üzere haddeleme oranı arttıkça, perlit bantları arasındaki mesafe daralmış, ferrit taneleri ve perlit kolonileri haddeleme doğrultusunda uzamışlardır. Bir başka

deyişle, ferrit tane ve perlit kolonilerindeki boyun ene oranı (aspect ratio) haddeleme oranı arttıkça artış göstermiş ancak, bu artış ferrit tanelerinde daha fazla olmuştur (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2).

Bu sonuçlar, haddeleme (deformasyon) oranının mikroyapı üzerinde oluşturduğu tipik değışiklikleri yansıtmaktadır. Daha önce bu konuda yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (11). Ferrit tanelerindeki boyun ene oranının, perlit kolonilerine göre daha fazla olmasının nedeni ferritin, perlite göre daha yumuşak olması ve deforme edilebilirliğinin daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır (9). Bu nedenle haddeleme oranı arttıkça, perlit bantları arasındaki mesafe de daralmaktadır (Şekil 5.3).

Şekil 5.4'den görüleceği üzere soğuk haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak, talaş kaldırılan yüzey (y) bölgesinde perlit bant kalınlığı düşmüştür. Bu durum, perlitin de deforme edildiğini göstermektedir.



Şekil 5.4. Soğuk haddeleme oranına bağlı olarak yüzey (y) bölgesinde perlit bant kalınlıklarındaki değışim

Deformasyon miktarına bağlı olarak ferrit taneleri ve perlit kolonilerinde boyun ene oranındaki değışim ve perlit bantları arasındaki daralma, yüzey bölgesinden merkez bölgesine doğru inildikçe farklılık göstermektedir (Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3).

Bu sonuç, yüzeyden merkeze doğru deformasyon etkisinin değiştiğinin bir göstergesidir. Daha önce çelik üzerinde yapılan bir çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir (3). Bu sonuç, perlit bantları arasındaki mesafe ve ferrit taneleri ile perlit kolonilerindeki boyun ene oranına da yansımaktadır.

Haddeleme oranı % 23'ü geçtiğinde, perlit kolonilerinde boyun ene oranındaki farkın azaldığı görülmüştür. Bu azalma soğuk deformasyon sonucu, aşırı deformasyonla birbirlerine çok yakın perlit kolonilerinin birleşmesi ve perlit kolonilerinde muhtemel kırılmalardan kaynaklanabilir. Battacharya'da yaptığı deneylerde benzer sonuçları bulmuştur (11).

Şekil 5.4'de haddeleme oranına bağlı olarak perlit bant kalınlığındaki azalma, ferrit fazının pekleşmesi sonucu mukavemetinin, perlitin mukavemetine yaklaşması ile perlitin de deforme edilmiş olduğunu göstermekte ve bu sonuçları doğrulamaktadır.

Yukarıda yapılan açıklamalardan ve Resim 5.1'deki mikroyapı fotoğraflarından da görüleceği üzere haddeleme oranı arttıkça mekanik fiberleşmiş yapı oluşmaya başlamış ve bu çalışmadaki en yoğun haddeleme oranında (% 27) en belirgin halini [Resim 5.1 (f)] almıştır. Bu sonuç, mevcut literatürle paralellik arz etmektedir (4, 7).

5.2. Soğuk Haddelenmiş Numunelerde Mekanik Özellikler

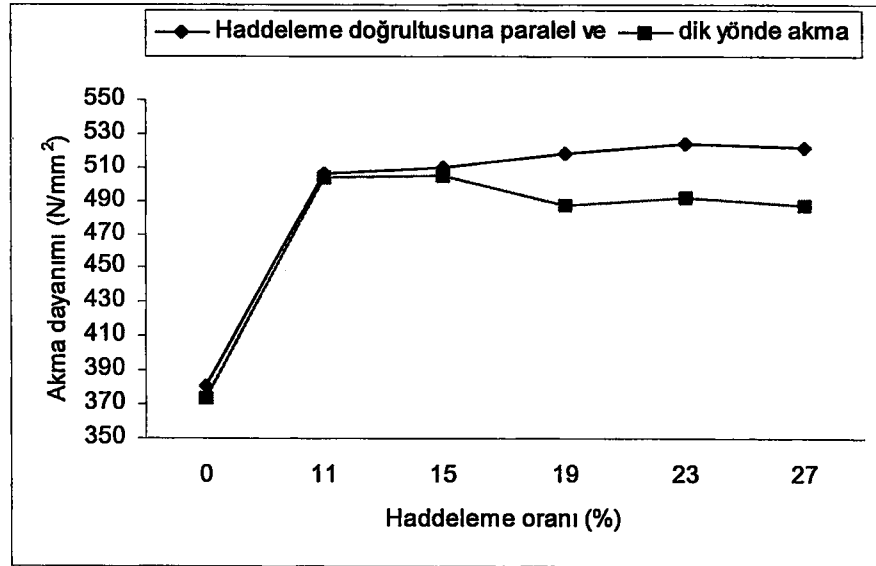
5.2.1. Çekme özellikleri

Başlangıç numunesi ile % 11, 15, 19, 23 ve 27 oranında soğuk olarak haddelenmiş numunelerin çekme özellikleri ve metalografik ölçüm sonuçları Çizelge 5.1'de ve haddeleme oranına bağlı olarak, akma dayanımındaki değişim Şekil 5.5'de, çekme dayanımındaki değişim Şekil 5.6'da, % uzama oranlarındaki değişim Şekil 5.7'de ve pekleşme davranışları Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Çizelge 5.2, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerin çekme özellikleri ve metalografik ölçüm sonuçları

Soğuk haddelenme oranı (%)	Akma dayanımı (N/mm ²)		Çekme dayanımı (N/mm ²)		Uzama (%)		Sertlik (HV) ortalama	Perlit bantları arası ortalama aralık (μm)	Ferrit tane boyunun ene oranı, ortalama	Perlit koloni boyunun ene oranı, ortalama	Perlit bant kalınlığı ortalama, yüzey (y) bölgesi (μm)
	Haddelenme doğrultusuna paralel	dik	Haddelenme doğrultusuna paralel	dik	Haddelenme doğrultusuna paralel	dik					
Başlangıç numunesi	380,2	373,6	491,4	472,4	44,3	45,5	140,7	27,21	1,06	1,04	5,20
11	506,6	504,4	568	560,0	22,3	21,8	177,1	26,26	1,26	1,21	4,20
15	509,4	505,2	569,6	562,0	20,6	20,0	183,2	25,13	1,35	1,29	3,92
19	518,2	487,8	582,4	575,0	20,0	17,5	184,2	24,59	1,48	1,31	3,80
23	524,4	492,2	587,0	579,2	19,9	16,1	191,6	22,60	1,60	1,36	3,76
27	521,6	487,4	603,8	587,0	16,0	11,6	191,5	21,67	1,28	1,24	3,60

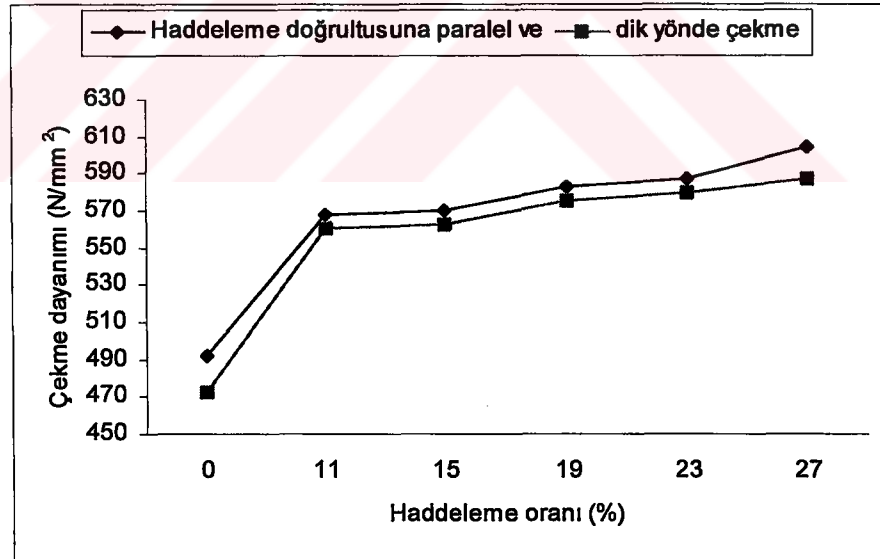
Şekil 5.5'den de görüleceği gibi haddelenme oranı arttıkça, akma dayanımı da yükselmiştir. Haddelenme oranı % 11 olan numunede akma dayanımı, başlangıç numunesine göre ani bir artışla birlikte, daha sonraki haddelenme oranlarında numunelerdeki artış daha az olmuştur. Bu değişim, soğuk şekil değiştirme ile malzemede meydana gelen pekleşmeden kaynaklanmaktadır (7). Ayrıca, metalik malzemelerde deformasyonun sonucu kayma ve ikizleme sisteminin bir sonucu olarak eş eksenli olmayan davranış oluştuğu bilinmektedir (4, 6).



Şekil 5.5. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak akma dayanımındaki değişim

Çekme yönüne bağlı olarak akma dayanımındaki değişime çelik levhalarda haddeleme sonucu, haddeleme düzleminde kristallerin dönmesi ve uzaması ile kristolografik tercihli yönlenme ve ikinci faz sürekliliği, inklüzyonlar ve boşluklarla oluşan mekanik fiberleşmiş yapı (7) etkili olabilir. Resim 5.1'den de görüleceği üzere artan haddeleme miktarına bağlı olarak, eş eksenli olmayan özelliğe sahip mekanik fiber yapı daha belirgindir. Bu sebeple, haddeleme doğrultusuna paralel akma dayanımı, haddeleme doğrultusuna dik akma dayanımından daha yüksektir. Bu sonuç literatürle paralellik arz etmektedir (6, 7).

Şekil 5.6'da görüleceği gibi akma dayanımındaki benzer şekilde, % 11'lik haddeleme oranında, başlangıç numunesine göre çekme dayanımında ani bir artış elde edilmiş ve daha sonraki haddeleme oranlarında daha az olmakla birlikte nispi bir artış gözlenmiştir.

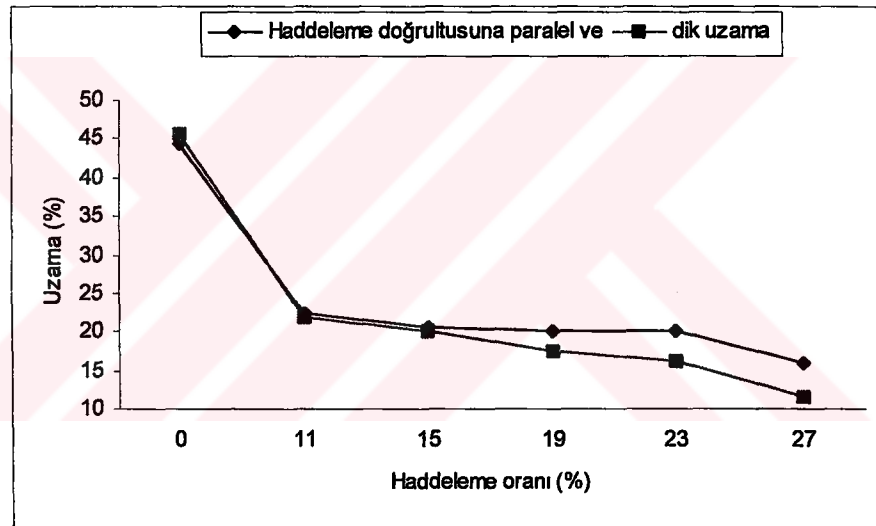


Şekil 5.6. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişim

Pickett ve Naylor, kolay işlenebilir 230M07Pb serisi çeliklerde, soğuk çekmede benzer sonuçları elde etmişlerdir (58). Soğuk haddelenmiş numunelerde, akma ve çekme dayanımları arasındaki fark karşılaştırıldığında, aradaki farkın başlangıç numunesine göre daha az olduğu görülecektir. Ancak, literatürde belirtilenin aksine

(58), deformasyon oranı arttıkça akma ve çekme dayanımları arasındaki fark hemen hemen değişmemiştir.

Haddeleme oranına bağlı olarak, akma ve çekme dayanımındaki artışa paralel olarak süneklikte düşüş olmuştur. Haddeleme doğrultusuna paralel yöndeki % uzama, haddeleme doğrultusuna dik numunelere göre farklılık göstermiş ve bu fark % 19'luk deformasyondan sonra daha fazla olmuştur (Şekil 5.7). Bu sonuç, literatürde belirtilen haddeleme doğrultusundaki sünekliğin, dik doğrultudan daha yüksek olması sonucu ile uyushmaktadır (6, 87).



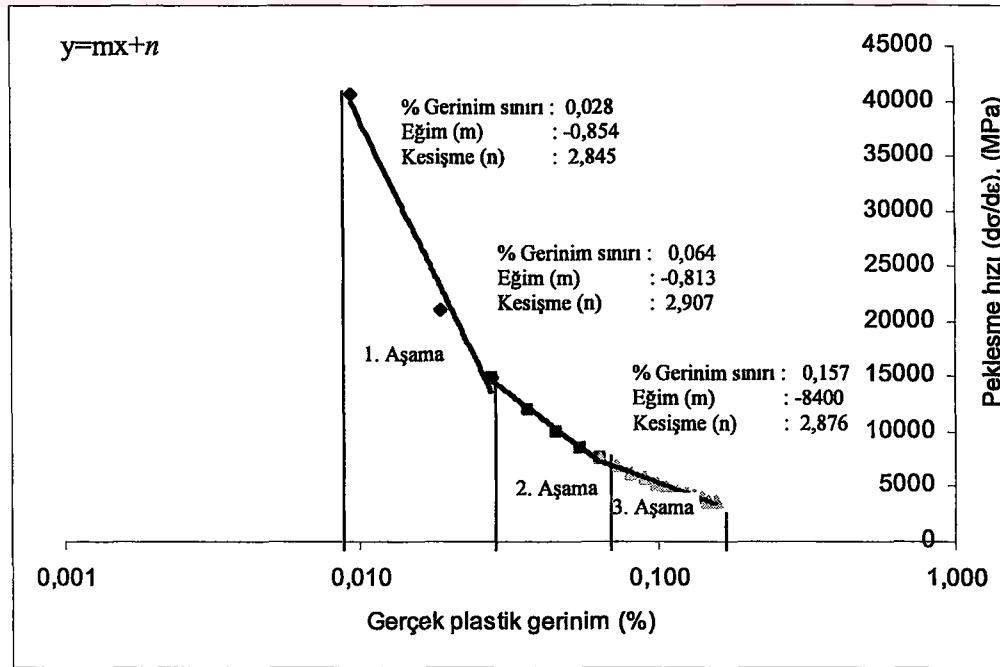
Şekil 5.7. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak % uzamadaki değişim

5.2.2. Pekleşme davranışı

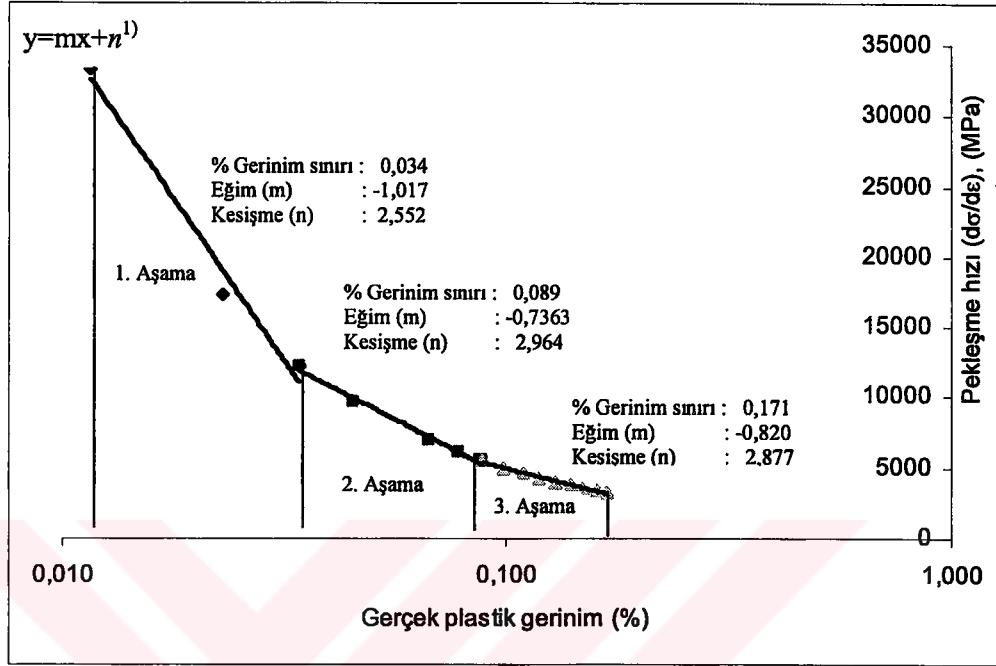
Çekme eğrileri, Jaoul-Crussard (J.C) analizi kullanılarak soğuk haddelenmiş numunelerde, haddeleme oranı ile pekleşme davranışı arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Çift fazlı çeliklerin ~0,05-0,4, 0,4-5 ve 3,5-15 olmak üzere, üç farklı % gerçek gerinim sınırı (ϵ limitler) pekleşme aşaması gösterdiği bilinmekte (88) ve düşük karbonlu çeliklerin pekleşme davranışları çift fazlı çeliklerle benzerlik göstermektedir.

Çizelge 5.2'deki analiz sonuçlarından görüleceği üzere, haddeleme doğrultusuna paralel ve dik yönde ve haddeleme oranına bağlı olarak, eğim, m (pekleşme üssü) değişmektedir. Soğuk haddelenmiş numunelerin tamamında, üç aşama pekleşme davranışı gözlenmiştir. Başlangıç numunesinde, haddeleme doğrultusuna paralel ve dik eğim, soğuk haddelenmiş numunelere göre daha yüksek ve her üç aşamadaki geçiş daha belirgindir (Şekil 5.8 ve Şekil 5.9). Haddeleme oranına bağlı olarak eğim düşüş göstermekte ve aşamalar arasındaki geçiş birbirine yaklaşımaktadır. Soğuk haddelenmiş numunelerde 1. ve 2. aşamalar birbirine çok yaklaşımakta ve 3. aşama eğim daha yüksek çıkmaktadır.

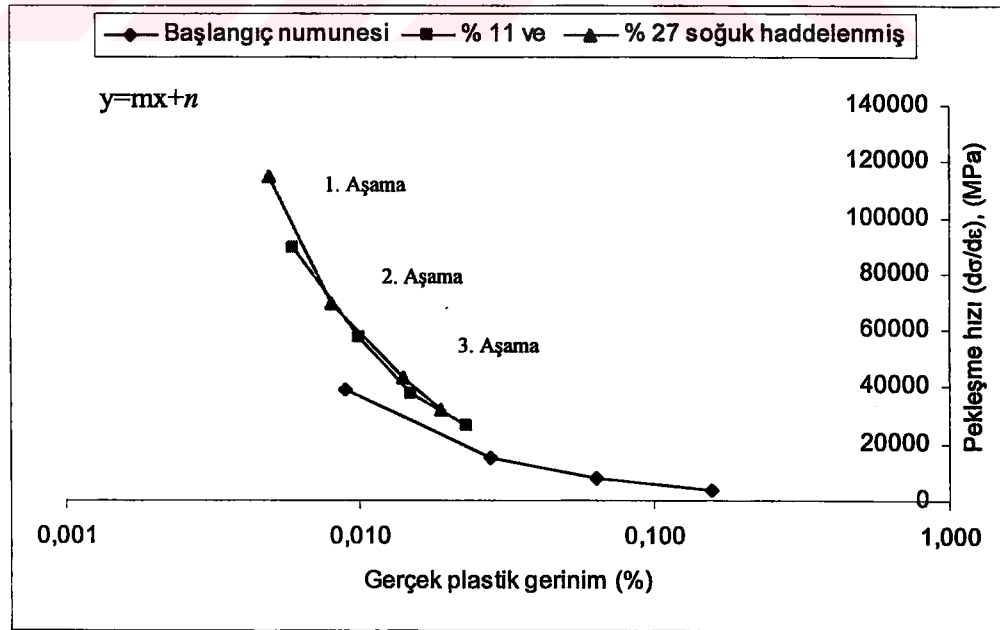
Gerinim sınırı, haddeleme oranına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel ve dik yönde düşüş göstermiştir. Bunun nedeni, haddeleme ile deforme edilmiş gerilimli tane yapısının, çekme ile ikinci bir deformasyona uğraması ile açıklanabilir. Haddeleme doğrultusuna paralel ve dik yöndeki eğim karşılaştırıldığında, farklılık çok yüksek olmamıştır (Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12). Soğuk haddelenmiş numunelerin Jaoul-Crussard analiz sonuçları Ek 5'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Başlangıç numunesinin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



Şekil 5.9. Başlangıç numunesinin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



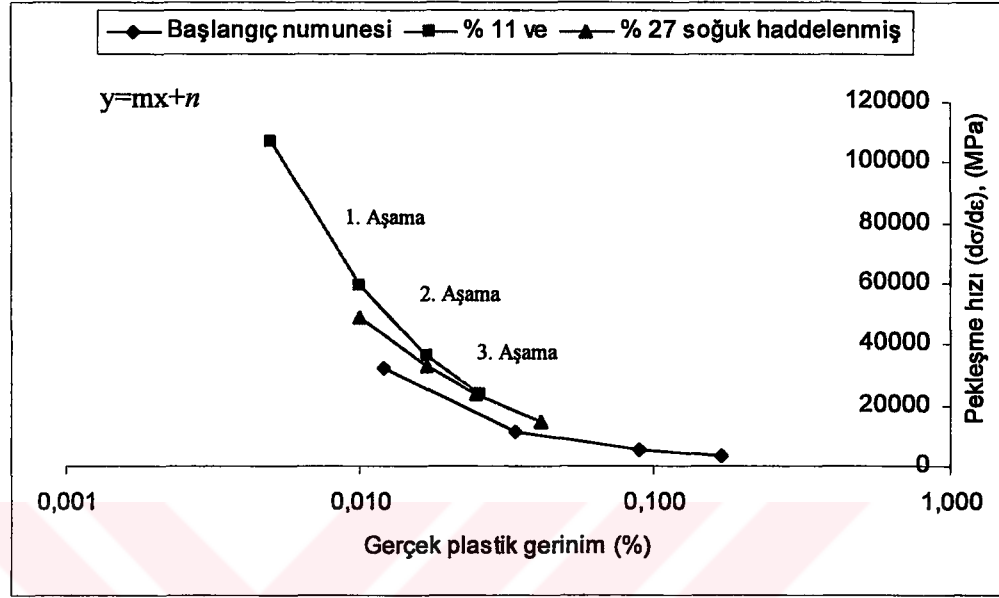
Şekil 5.10. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizleri

¹⁾ (m) eğim, (pekleşme üssü) ve (n) pekleşme üssü olmayıp $\log(d\sigma/d\varepsilon)/\log \varepsilon_p$ çiziminden elde edilen kesişme değeridir.

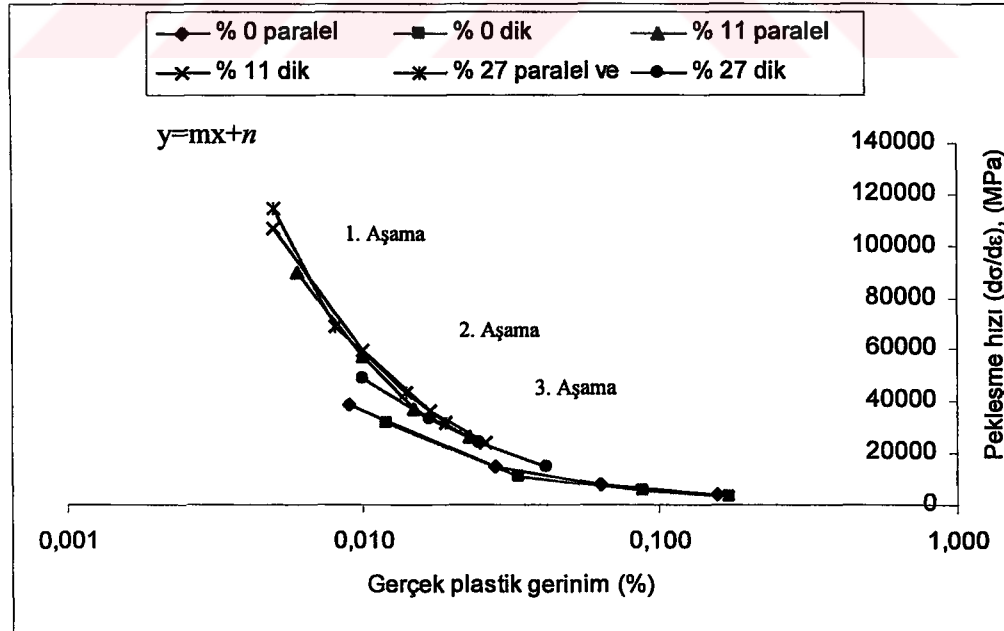
Çizelge 5.2. Soğuk haddelenmiş numunelerde haddelenme doğrultusuna paralel ve dik deformasyon aşamalarına göre eğim, kesişme ve gerçek gerinim değerleri

Doğru denklemi $y=mx+n$														
Numune	Haddelenme yönü	Ferrit tane boyutu (μm)	Perlit koloni boyutu (μm)	Ferrit Perlit (%)	1. Aşama			2. Aşama			3. Aşama			
					Eğim (m)	Kesişme (n)	ϵ limit (%)	Eğim (m)	Kesişme (n)	ϵ limit (%)	Eğim (m)	Kesişme (n)	ϵ limit (%)	
0	paralel	2,137	1,344	77	23	-0,854	2,845	0,028	-0,813	2,907	0,064	-0,840	2,876	0,157
	dik					-1,017	2,552	0,034	-0,736	2,964	0,089	-0,820	2,877	0,171
11	paralel	2,137	1,344	77	23	-0,878	3,000	0,012	-1,050	2,657	0,019	-0,850	3,021	0,038
	dik					-0,847	3,079	0,014	-0,918	2,937	0,036	-1,012	2,771	0,058
15	paralel	2,137	1,344	77	23	-0,613	3,510	0,009	-0,853	3,019	0,015	-0,997	2,755	0,022
	dik					-0,946	2,822	0,014	-0,942	2,829	0,021	-0,825	3,025	0,029
19	paralel	2,137	1,344	77	23	-0,730	3,311	0,009	-1,102	2,550	0,012	-0,817	3,096	0,018
	dik					-0,986	2,738	0,009	-0,792	3,136	0,017	-0,986	2,792	0,026
23	paralel	2,137	1,344	77	23	-0,792	3,214	0,008	-1,097	2,574	0,011	-0,888	2,983	0,015
	dik					-1,042	2,591	0,009	-0,808	3,071	0,013	-0,857	2,978	0,019
27	paralel	2,137	1,344	77	23	-1,081	2,572	0,007	-0,837	3,084	0,015	-1,021	2,743	0,028
	dik					-0,730	3,229	0,009	-0,876	2,972	0,015	-0,942	2,866	0,033

Soğuk haddelenme (%)



Şekil 5.11. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizleri



Şekil 5.12. Başlangıç numunesi (% 0), % 11 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel ve dik Jaoul-Crussard analizleri

Soğuk haddelenmiş numunelerde, % gerçek gerinim sınırı başlangıç numunesine göre daha düşüktür. % gerçek gerinim sınırı; 1. aşamada 0,007-0,034, 2. aşamada 0,011-0,089 ve 3. aşamada 0,015-0,171 arasındadır.

Deformasyona bağlı olarak eğimin ve % gerçek gerinim sınırının düşmesi, haddeleme sonucu meydana gelen pekleşme ile açıklanabilir. Haddeleme oranına bağlı olarak; akma, çekme dayanımı ve sertlikte meydana gelen artış ve süneklikteki düşüş bu durumu doğrulamaktadır (Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.13 ve Şekil 5.7).

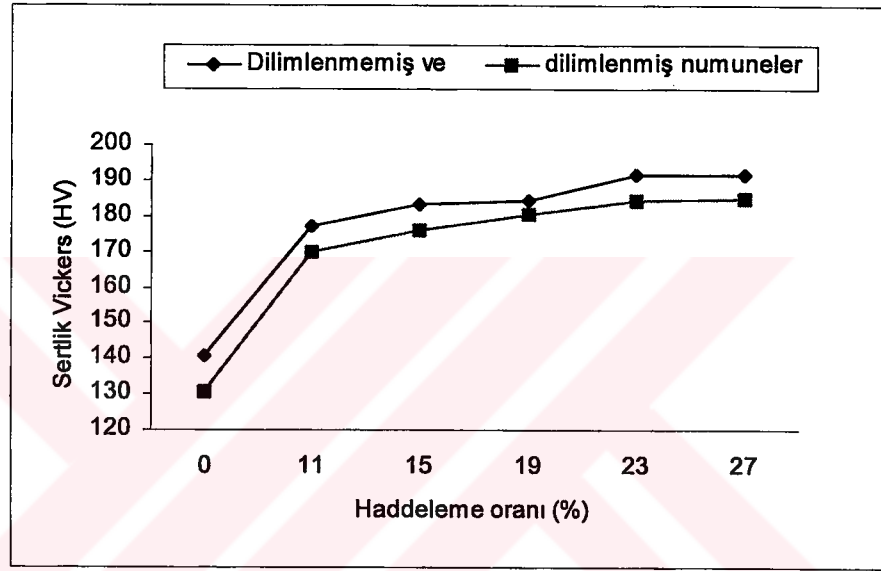
Sonuç olarak, soğuk haddelenme sonucu deforme edilmiş yapılarda pekleşme hızı daha yüksek ve % gerçek gerinim sınırı daha düşük çıkmaktadır. Pekleşme hızı yönlenmiş yapıda yöne bağlı olarak değişmektedir (Şekil 5.12).

5.2.3. Sertlik özellikleri

Bölüm 4 ve Şekil 4.1 ve Şekil 4.3’de görüleceği gibi dilimlenmemiş ve dilimlenmiş numuneler üzerinden, iki ayrı sertlik değeri alınmıştır. Şekil 5.13’de görüldüğü gibi, haddeleme oranına bağlı olarak, sertlikte doğrusal bir artış kaydedilmiştir. % 11’lik soğuk haddelenmiş numunedeki sertlik değeri, başlangıç numunesinin sertlik değerinin hemen hemen iki katına çıkmıştır. Sertlik, akma ve çekme dayanımındaki artışa paralel bir artış göstermiştir (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6). Artan deformasyon miktarı ile tekstür kusursuzluğunun arttığı ancak, malzeme yüzeyinden merkeze inildikçe farklılık gösterdiği bilinmektedir (4).

Sertlikteki artışın bir sonucu olarak, süneklikte düşüş (Şekil 5.7) ve yüzeyden merkeze doğru inildikçe sertlikte dilimlenmiş soğuk haddelenmiş numunelerde bir artış görülmüştür (Ek 4). Abeyama ve arkadaşları, soğuk dövme yapılmış yuvarlak numunelerde benzer sonuçlar elde etmişlerdir (10). Ancak, dilimlenmiş sıcak ve dilimlenmemiş numunelerde genellikle yüzeyden merkeze inildikçe sertlikte artış olmuştur.

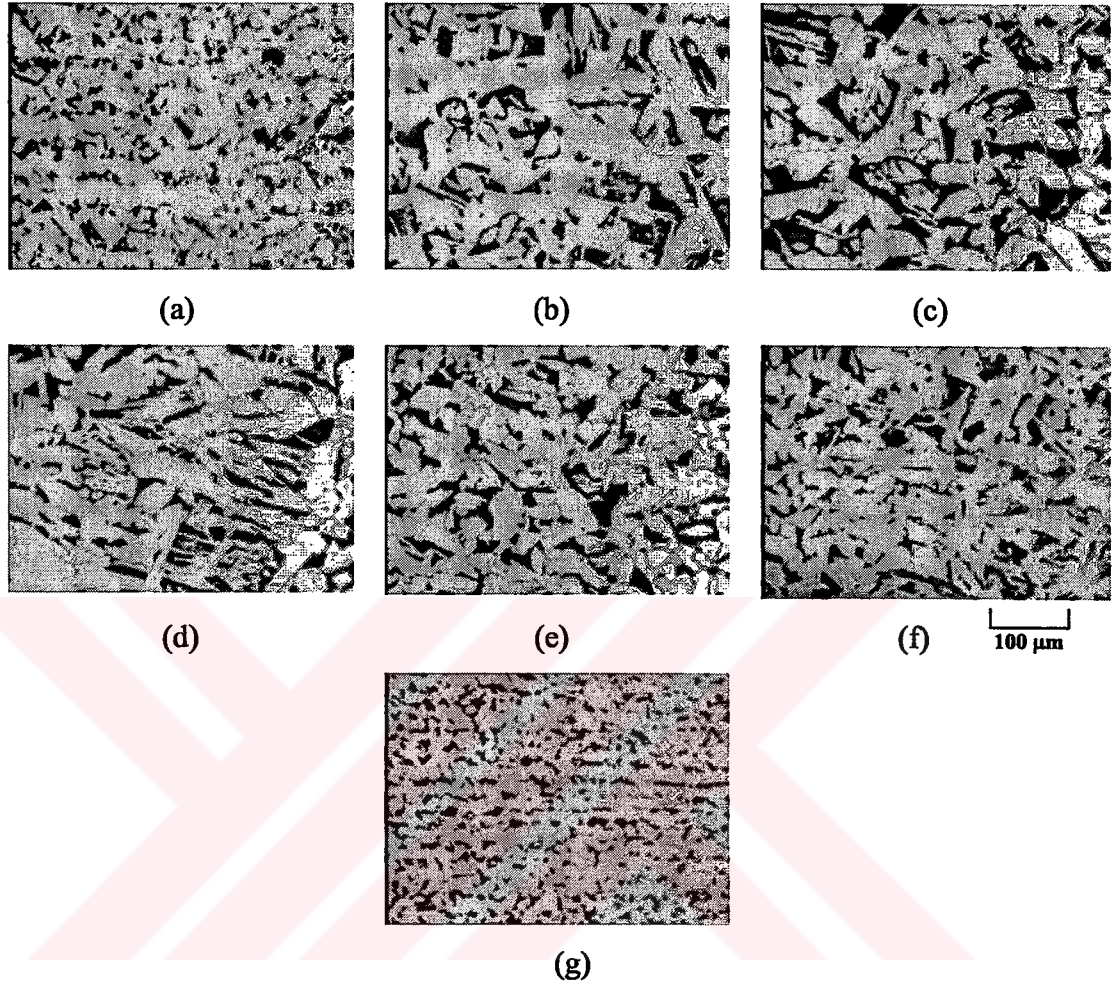
Araki ve Yamamoto, aynı eğilimi tam tavllanmış ferritik+perlitik yapıya sahip AISI 4120 çelik deney numunelerinde gözlemişlerdir (9). Ancak, Yaguchi ve Onedra, soğuk çekilmiş çubuklarda, soğuk şekillendirme miktarının düşük olması durumunda, deformasyonun parça yüzeyinde yoğunlaştığını ve sertliğin ilk % 30'luk bölümde en yüksek olduğunu gözlemişlerdir (3).



Şekil 5.13. Soğuk olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak sertlikteki değişim

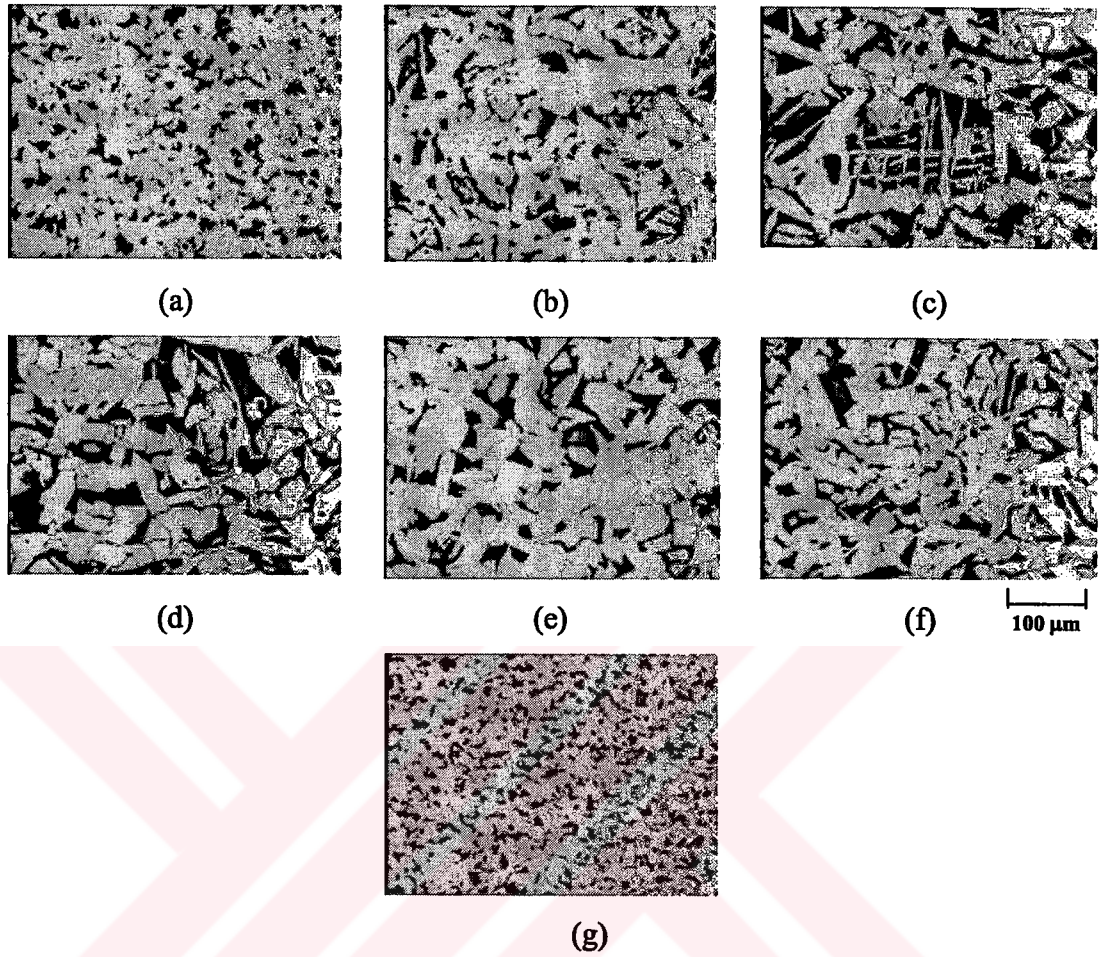
5.3. Sıcak Haddelenmiş Numunelerde Mikroyapılar

Başlangıç numunesi ile % 11, % 13, % 17, % 23, % 26, % 34 oranında 1100 °C'de sıcak haddelenmiş numunelerin haddeme doğrultusuna paralel ve dik mikroyapı örnekleri Resim 5.3 ve Resim 5.4'de ve yine bu numunelerin Şekil 4.1'de belirtildiği gibi yüzey (y), ara (a) ve merkez (m) bölgelerinde haddeme oranına bağlı olarak ferrit tanelerindeki boyun ene oranı Şekil 5.14'de, perlit kolonilerindeki boyun ene oranı Şekil 5.15'de, perlit bantları arası mesafedeki değişim Şekil 5.16'da ve perlit bant kalınlıklarındaki değişim Şekil 5.17'de verilmiştir.



Resim 5.3. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 13 (c), % 17 (d), % 23 (e) % 26 (f) ve % 34 (g) oranında sıcak olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel mikroyapıları, Dağlama: % 3 Nital, Büyütme : x100

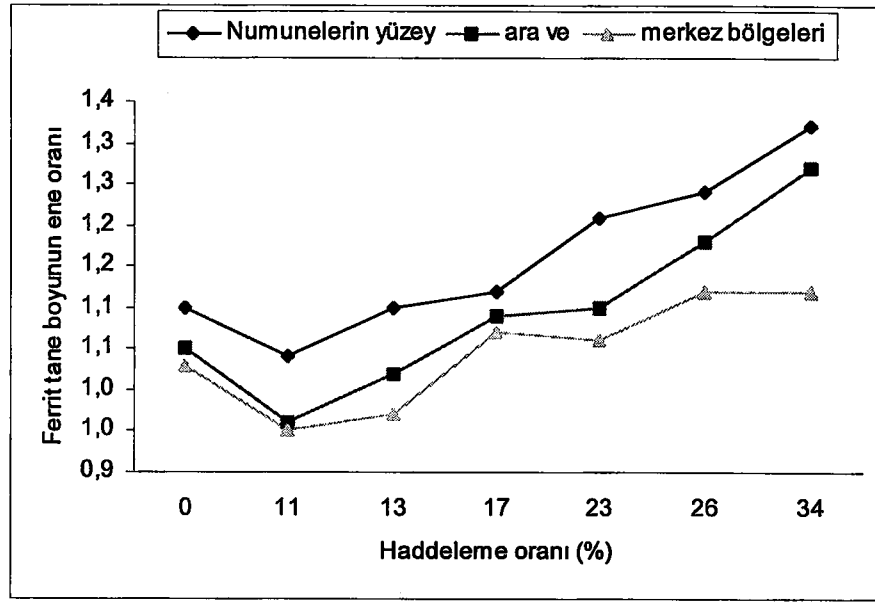
Şekil 5.14'den ferrit tanelerindeki boyun ene oranı incelendiğinde, tavlama ile meydana gelen yeniden kristalleşme sonucu (7), başlangıç numunesindeki orijinal bantlı yapının bozulduğu (4) ve yeni eş eksenli yapının oluşması ile düşüş gösterdiği görülmektedir. Ancak, % 17'lik haddeleme oranında başlangıç numunesi değerlerine ulaşılmıştır. Deformasyon miktarına bağlı olarak, ferrit tane boyunun ene oranında artış gözlenmiştir. Bu oran, yüzeyden merkeze inildikçe azalmaktadır. Perlit kolonilerinde boyun ene oranı, ferrit tanelerinde olduğu gibi % 17'lik haddeleme oranından sonra başlangıç numunesi düzeyine gelmiştir (Şekil 5.15). Perlit koloni boyunun ene oranında, yüzeyden merkeze inildikçe bir azalma göstermiştir.



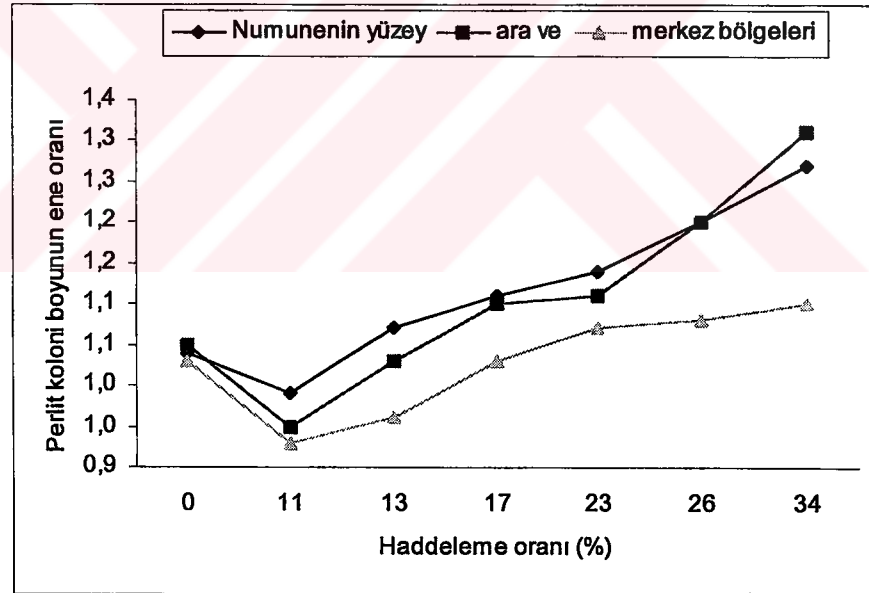
Resim 5.4. Başlangıç numunesi (a), % 11 (b), % 13 (c), % 17 (d), % 23 (e) % 26 (f) ve % 34 (g) oranında sıcak olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik mikroyapıları, Dağlama : % 3 Nital, Büyütme : x100

Perlit koloni boyunun ene oranında, yüzey bölgesi ile merkez arasındaki fark, başlangıç numunesine göre daha fazla olmuştur (Şekil 5.15). Bu farklılık, sıcak haddeleme sırasında merdane ile temas eden yüzeyde ısı transferinin daha fazla olması ile yüzeyin, merkeze göre daha düşük sıcaklığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır (6, 7, 39). Soğuma hızı arttıkça, çekirdeklenme hızı artmakta, buna karşın tane büyüme hızı azalmaktadır (17, 18).

Sıcak haddelenmiş numunelerde, haddeleme oranı arttıkça perlit bantları arasındaki mesafe daralmış, ferrit taneleri ve perlit kolonileri haddeleme doğrultusunda uzamışlardır. Bir başka deyişle, ferrit taneleri ve perlit kolonilerindeki boyun ene oranı, haddeleme oranı arttıkça bir artış göstermiştir (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15).



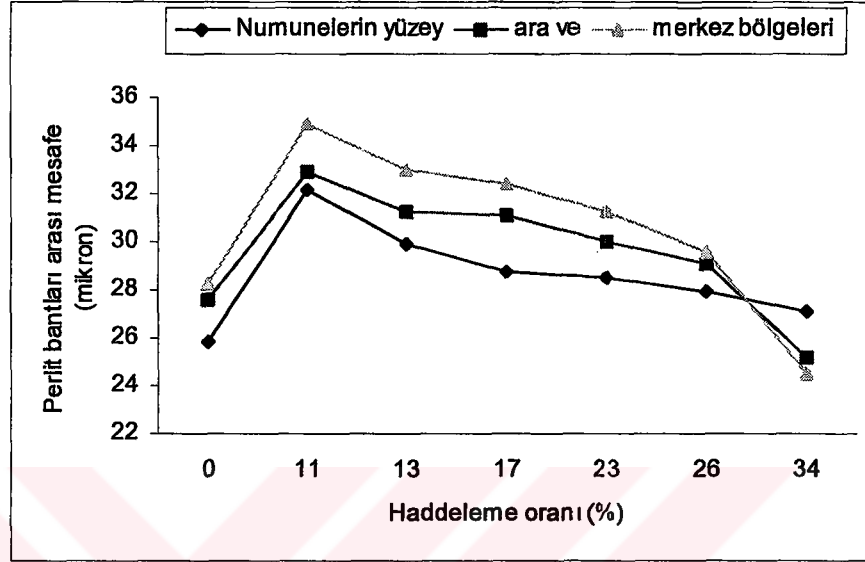
Şekil 5.14. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak ferrit tanelerinde boyun ene oranındaki değişim



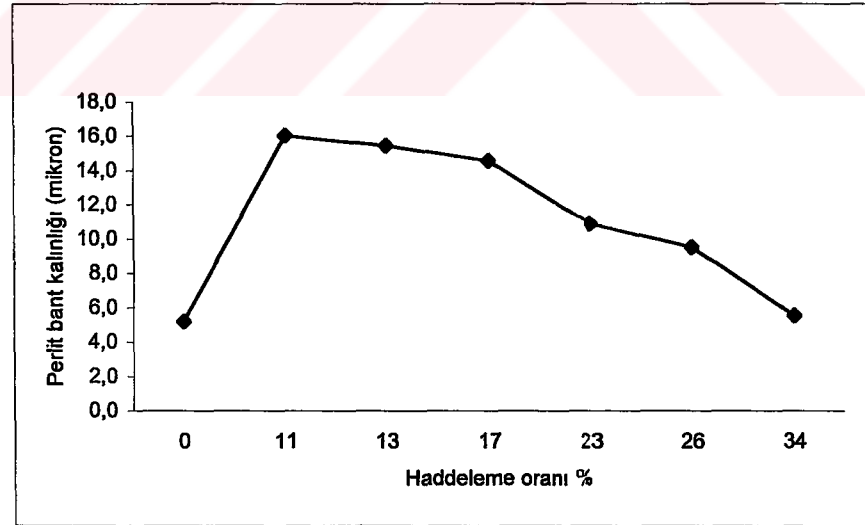
Şekil 5.15. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak perlit kolonilerinde boyun ene oranındaki değişim

Bu nedenle, haddeleme oranı arttıkça perlit bantları arasındaki mesafe daralmaktadır (Şekil 5.16). Yalnız bu daralma, yüzeyden merkeze inildikçe farklılık göstermektedir. Bu sonuç da, yüzeyden merkeze doğru inildikçe, perlit bantları arasında kalan yumuşak faz ferritin, deformasyon miktarına bağlı olarak daha fazla

deforme edildiğinin ve bu nedenle de perlit bantları arasındaki mesafenin daha daraldığının bir göstergesidir (7).



Şekil 5.16. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak perlit bantları arası mesafedeki değişim



Şekil 5.17. Sıcak haddeleme oranına bağlı olarak yüzey (y) bölgesinde perlit bant kalınlıklarındaki değişim

Şekil 5.17'de görüleceği üzere, sıcak haddelenmiş numunelerde yüzey (y) bölgesinde perlit bant kalınlıkları ölçülmüştür. Başlangıç numunesine göre, sıcak haddeleme sırasında meydana gelen tane büyümesi ile % 11 oranında haddelenmiş numunede

(4, 7), mikroyapı fotoğraflarından da görüleceği gibi, perlit bant kalınlığında ani bir artış olmuştur (Resim 5.3 ve Resim 5.4). Ancak, haddeme oranındaki artışa bağlı olarak daha sonra sıcak haddeme sırasında yüksek deformasyon miktarı ile yüzeyde sıcaklığın düşmesinden dolayı bant kalınlığında düşme eğilimi görülmüştür.

5.4. Sıcak Haddelenmiş Numunelerde Mekanik Özellikler

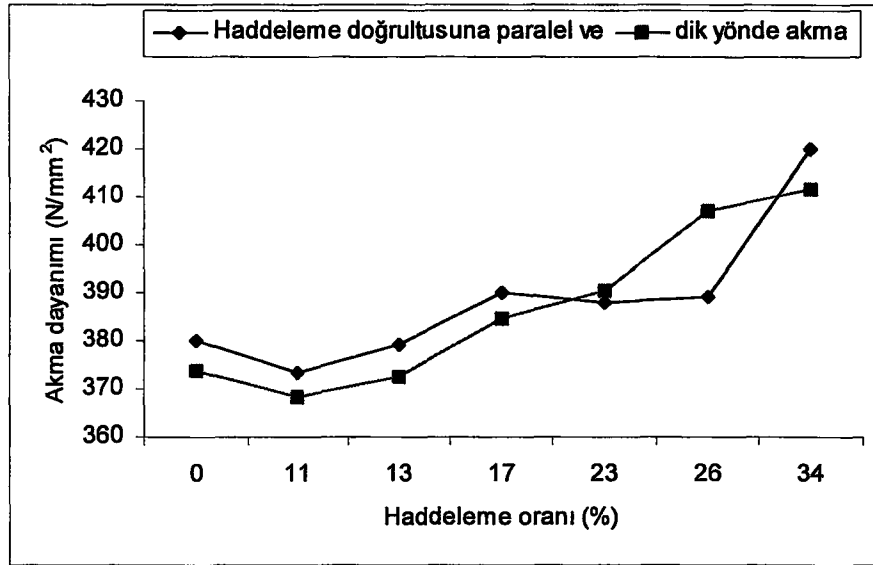
5.4.1. Çekme özellikleri

Başlangıç numunesi ile % 11, 13, 17, 23, 26 ve 34 oranında sıcak olarak haddelenmiş numunelerin çekme özellikleri ve metalografik ölçüm sonuçları Çizelge 5.3’de ve haddeme oranına bağlı olarak akma dayanımındaki değişim Şekil 5.18’de, çekme dayanımındaki değişim Şekil 5.19’da, % uzama oranlarındaki değişim Şekil 5.20’de, pekleşme davranışları Çizelge 5.4, Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de verilmiştir.

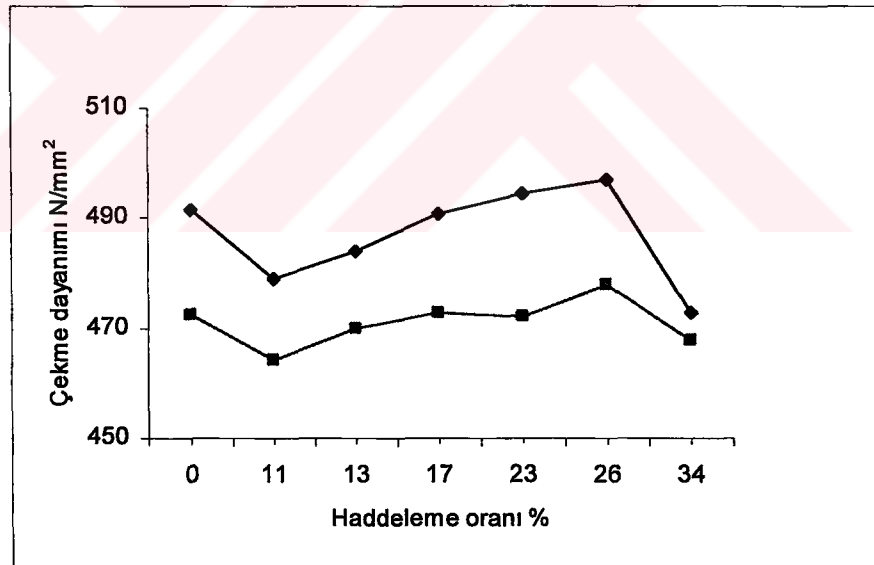
Şekil 5.18’de görüleceği üzere akma dayanımı, deformasyon miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. Haddeme doğrultusuna paralel yöndeki akma dayanımı, soğuk haddelenmiş numunelerde olduğu gibi haddeme doğrultusuna dik numunelere göre daha yüksektir. Zambrano ve arkadaşları, sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelik numunelerde aynı durumu gözlemişlerdir (36).

Çizelge 5.3. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerin çekme özellikleri ve metalografik ölçüm sonuçları

Sıcak haddeme oranı (%)	Akma dayanımı (N/mm ²)		Çekme dayanımı (N/mm ²)		Uzama (%)		Sertlik (HV) ortalama	Perlit bantları arası ortalama aralık (μm)	Ferrit tane boyunun ene oranı, ortalama	Perlit koloni boyunun ene oranı, ortalama	Perlit bant kalınlığı ortalama, yüzey (y) bölgesi (μm)
	Haddeme doğrultusuna paralel	Haddeme doğrultusuna dik	Haddeme doğrultusuna paralel	Haddeme doğrultusuna dik	Haddeme doğrultusuna paralel	Haddeme doğrultusuna dik					
Başlangıç numunesi	380,2	373,6	491,4	472,4	44,3	45,5	140,71	27,21	1,06	1,04	5,20
11	373,2	368,4	478,8	464,0	45,7	43,9	137,25	33,31	0,98	0,96	16,00
13	379,0	372,4	484,0	469,8	45,3	42,9	136,68	31,38	1,03	1,02	15,44
17	389,8	384,6	496,8	472,8	45,5	43,2	136,96	30,74	1,09	1,08	14,56
23	387,8	390,6	494,0	472,0	45,2	42,8	137,31	29,92	1,12	1,11	10,88
26	389,0	407,0	497,0	477,8	45,4	42,1	138,57	28,86	1,18	1,16	9,52
34	420,0	411,6	472,8	467,8	44,8	41,7	139,13	25,57	1,24	1,23	5,52



Şekil 5.18. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak akma dayanımındaki değişim

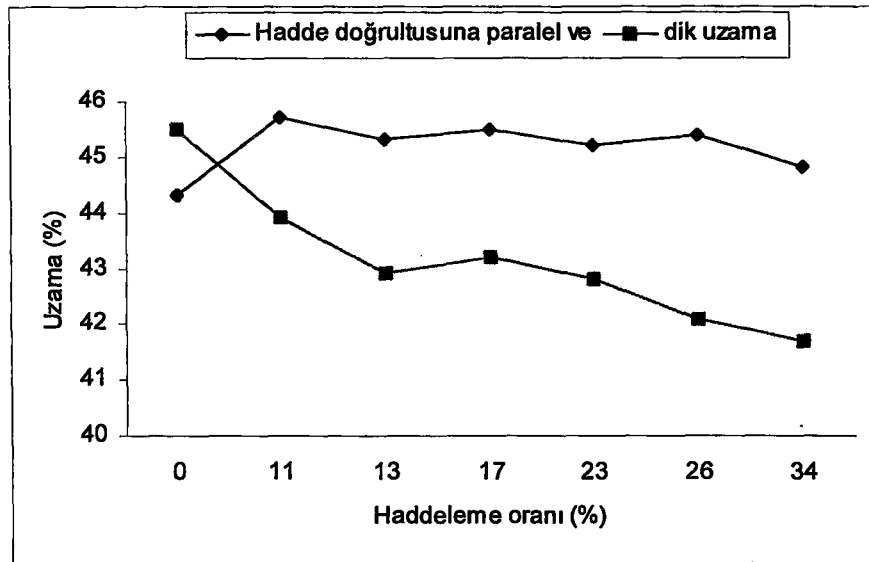


Şekil 5.19. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişim

Sıcak haddelenmiş numunelerin akma ve çekme dayanımları mukayese edildiğinde (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19), deformasyon yönlenmesinin akma dayanımına katkısının, çekme dayanımından daha fazla olduğu görülmektedir (7). Ancak, % 34'lük numunede çekme dayanımının ile aynı zamanda sünekliğin düşmesi, gerilimli tane yapısı ve muhtemel mikro çatlakların oluşması ile açıklanabilir.

Haddeleme oranı % 34 olan numunenin akma dayanımındaki ani artışın sebebi haddeleme sıcaklığındaki düşüştür. Bu sıcaklıkta yeniden kristalleşme ile kaba taneli yapı, ince taneli yapıya dönüşmektedir. Nasibov ve arkadaşları, Sp3st düşük karbonlu çelik üzerinde yaptıkları deneylerde, haddeleme bitirme sıcaklığının 900°C'den 700°C'ye düşmesi ile akma dayanımının 40 N/mm² ve maksimum çekme dayanımının da 20 N/mm² yükseldiği, tokluk ve süneklik değerlerinde değişme olmadığını gözlemişlerdir (89).

Numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımında olduğu gibi deformasyon miktarına bağlı olarak artış göstermiştir (Şekil 5.19). Tavlama sonucu, gerilimli yapı yerine eş eksenli bir tane yapısının oluşması ile % 11 oranında haddelenmiş numunede çekme dayanımında bir miktar düşüş ancak, % 26'lık haddeleme oranına kadar doğrusal bir artış görülmüştür. Bununla birlikte % 34'lük haddeleme oranında eğilimin değişmesi, haddeleme bitirme pasosunun A₁ sıcaklığının altına düşmesi ile Şekil 5.20'de görüleceği gibi sünekliğin düşmesi ile açıklanabilir. Düşük karbonlu çeliklerde, 780 °C sıcaklık ve % 85 deformasyonda, soğuk haddelenmiş çeliklerle hemen hemen aynı yönlenmeye sahip olduğu rapor edilmektedir (29).



Şekil 5.20. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak % uzamadaki değişim

Başlangıç numunesinin aksine, bütün sıcak haddeleme oranlarında, haddeleme doğrultusuna paralel yönde % uzama, haddeleme doğrultusuna dik yönden daha yüksektir. Bu sonuç, sünekliğin haddeleme doğrultusunda daha iyi olduğunu göstermektedir. Kayalı, aynı durumu rapor etmektedir (6). Bu durum levha düzlemine dik ve paralel malzeme mukavemetindeki farklılığın bir sonucudur (38).

5.4.2. Pekleşme davranışı

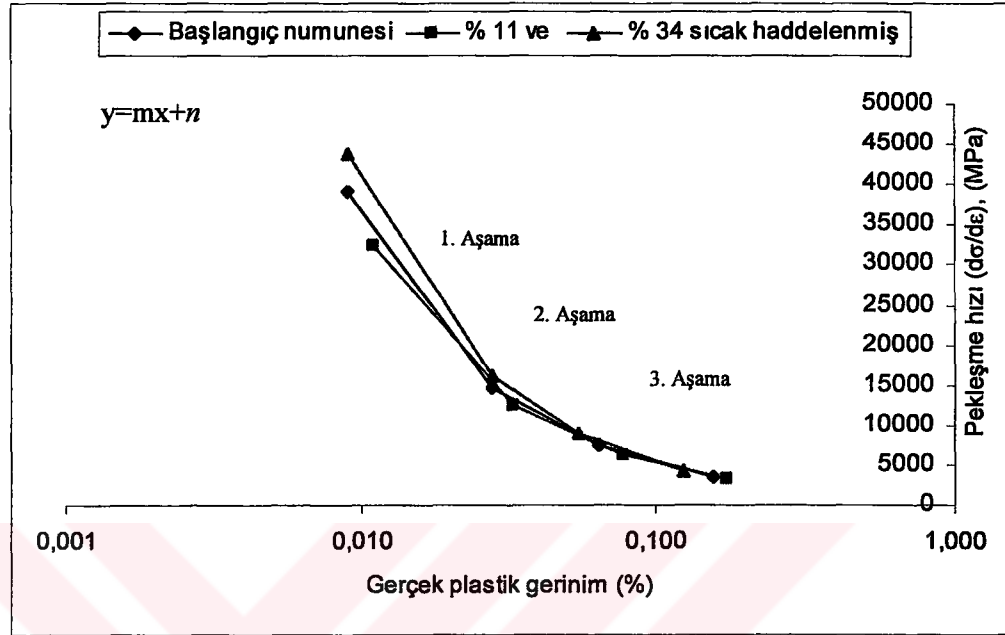
Çizelge 5.4'deki analiz sonuçlarından görüleceği üzere, sıcak haddelenmiş numunelerde haddeleme doğrultusuna paralel ve dik yönde ve haddeleme oranına bağlı olarak, eğim (m) değişmektedir. Sıcak haddelenmiş numunelerde, eğim ve % gerçek gerinim sınırı, soğuk haddelenmiş numunelere göre daha yüksektir. Pekleşme hızının ince tane yapısı ile değiştiği bilinmektedir (25). Numunelerin tane boyutu, başlangıç numunesi ve soğuk haddelenmiş numunelerden daha büyüktür (Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.4).

Numunelerin tamamında, üç aşama pekleşme gözlenmiştir ve aşamalar arasındaki geçiş, soğuk haddelenmiş numunelere göre daha belirgindir (Şekil 5.21 ve Şekil 5.22). Haddeleme oranı % 34 olan numunenin, haddeleme bitirme sıcaklığının A_1 sıcaklığının altına düşmesi ile ferrit tane ve perlit koloni boyutlarının diğer numunelere nazaran daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple, bu numunede % gerçek gerinim sınırı diğer numunelerden daha düşüktür (Şekil 5.23). Sıcak haddelenmiş numunelerin J.C analiz sonuçları Ek 6'da verilmiştir.

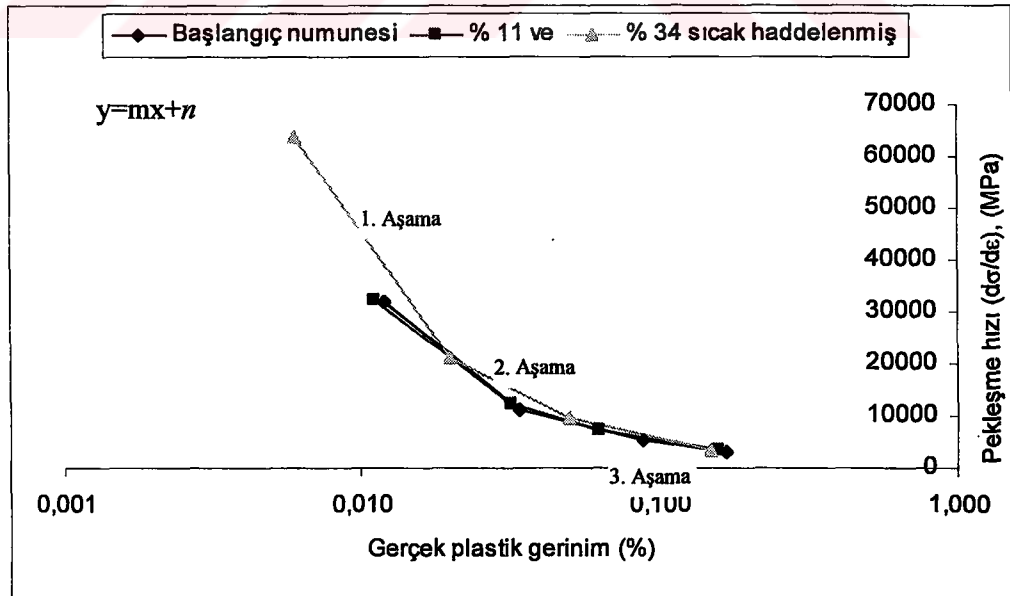
Sıcak haddelenmiş numunelerde, 3. aşamada haddeleme doğrultusuna paralel eğim, dik doğrultudakinden daha düşüktür. Ancak, % 34 oranında haddelenmiş numunede, tersine bir durum söz konusudur. Gerçek gerinim sınırı (%), % 11 oranında haddelenmiş numunede başlangıç numunesine oranla yüksek diğer numunelerden daha düşüktür.

Çizelge 5.4. Sıcak haddelenmiş numunelerde haddelenme doğrultusuna paralel ve dik deformasyon aşamalarına göre eğim, kesişme ve gerçek gerinim değerleri

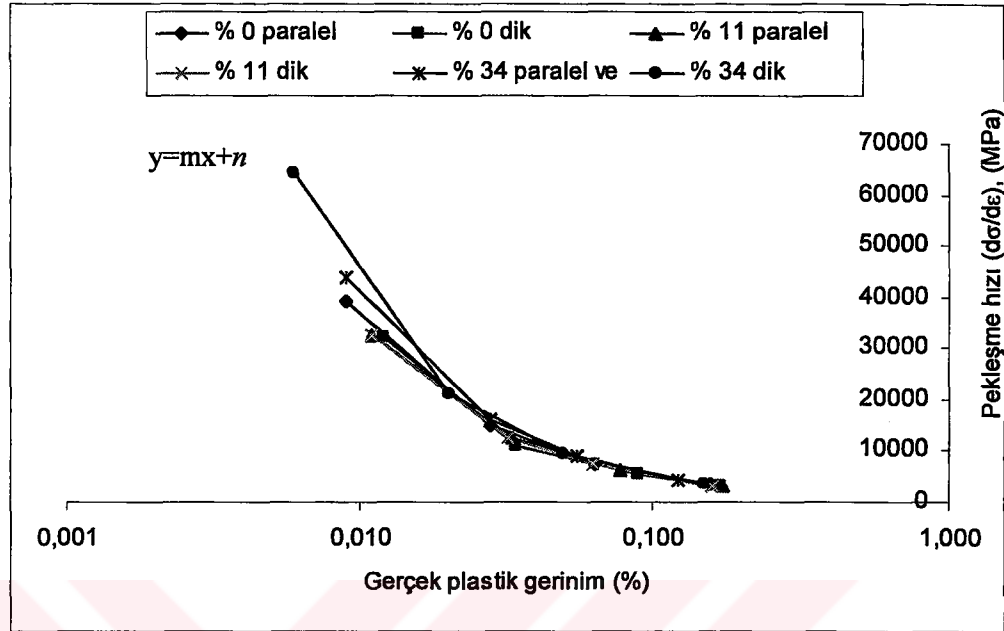
Doğru denklemi $y=mx+n$													
Numune	Haddelenme yönü	Ferrit tane boyutu (μm)	Ferrit koloni boyutu (μm)	Ferrit Perlit (%)	1. Aşama			2. Aşama			3. Aşama		
					Eğim (m)	Kesişme (n)	ε limit (%)	Eğim (m)	Kesişme (n)	ε limit (%)	Eğim (m)	Kesişme (n)	ε limit (%)
0	paralel	3,503	2,042	77	-0,854	2,845	0,028	-0,813	2,907	0,064	-0,840	2,876	0,157
	dik				-1,017	2,552	0,034	-0,736	2,964	0,089	-0,820	2,877	0,171
11	paralel	3,503	2,042	77	-0,867	2,813	0,033	-0,797	2,912	0,078	-0,846	2,862	0,173
	dik				-0,895	2,759	0,032	-0,793	2,912	0,063	-0,860	2,832	0,160
13	paralel	3,503	2,042	77	-0,961	2,669	0,019	-0,755	3,023	0,037	-0,819	2,931	0,147
	dik				-0,925	2,710	0,022	-0,802	2,914	0,053	-0,858	2,842	0,165
17	paralel	3,503	2,042	77	-0,982	2,637	0,022	-0,846	2,863	0,051	-0,847	2,861	0,121
	dik				-0,879	2,820	0,027	-0,867	2,839	0,053	-0,866	2,840	0,142
23	paralel	3,503	2,042	77	-0,958	2,689	0,022	-0,673	2,845	0,044	-0,848	2,867	0,114
	dik				-0,865	2,840	0,025	-0,848	2,867	0,058	-0,860	2,852	0,128
26	paralel	3,503	2,042	77	-0,864	2,852	0,022	-0,822	2,921	0,044	-0,788	2,966	0,147
	dik				-0,854	2,869	0,025	-0,869	2,846	0,050	-0,876	2,837	0,135
34	paralel	2,011	0,982	77	-0,882	2,838	0,028	-0,866	2,863	0,055	-0,909	2,808	0,123
	dik				-0,914	2,776	0,020	-0,883	2,828	0,050	-0,890	2,818	0,151



Şekil 5.21. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizleri



Şekil 5.22. Başlangıç numunesi % 11 ve % 27 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizleri



Şekil 5.23. Başlangıç numunesi (% 0), % 11 ve % 27 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel ve dik Jaoul-Crussard analizleri

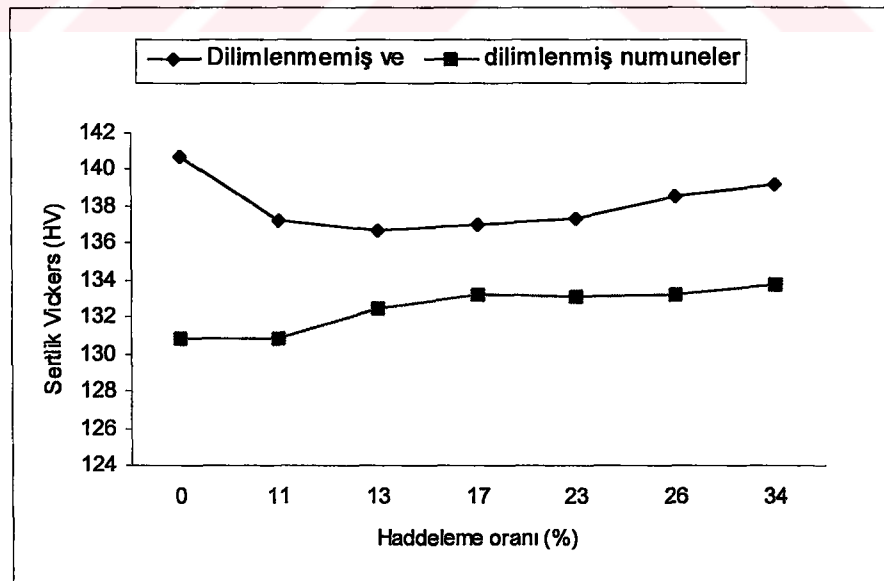
Deformasyon oranı arttıkça % gerçek gerinim sınırı, tanelerin haddeleme doğrultusunda deforme olmasıyla, % 26 oranında haddelenmiş numune hariç düşüş göstermiştir. Haddeleme oranı % 34 olan numunenin 2. ve 3. aşamalarında eğim daha yüksek olmuştur. Haddeleme sonucu akma dayanımı ve sertlikte meydana gelen artış, çekme dayanımı ve süneklikteki düşüş bu durumu doğrulamaktadır (Şekil 5.18, Şekil 5.24, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20). % gerçek gerinim sınırı; 1. aşamada 0,020-0,033 2. aşamada 0,037-0,044 ve 3. aşamada 0,0114-0,173 arasında olmuştur. Sonuç olarak, büyüyen tane boyutu ile pekleşme hızı düşmekte ve % gerçek gerinim sınırı artmaktadır.

5.4.3. Sertlik özellikleri

Sıcak haddelenmiş numuneler için, Bölüm 5.2’de belirtildiği gibi dilimlenmiş ve dilimlenmemiş numunelerin (b) yüzeylerinden iki ayrı ölçüm yapılarak elde edilen sertlik değerleri Şekil 5.24’de verilmiştir.

Sıcak haddelenmiş numunelerde, haddeleme oranına bağlı olarak dinamik yeniden toparlanma (7), sebebi ile deformasyon oranına bağlı olarak, numunelerin sertliklerinde çok fazla artış görülmemiştir. Malzemenin küçük parçalar halinde dilimlenmesi ile gerilimin azalması sonucu dilimlenmemiş numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Aynı durum, soğuk haddelenmiş numunelerde de gözlenmiştir (Şekil 5.13).

Başlangıç numunesinin sertliği, dilimlenmemiş numunelerden yüksek ve dilimlenmiş numunelerden düşüktür. Bu durum, başlangıç numunesinin haddeleme bitirme pasosunun A_1 sıcaklığın altında olması ile daha fazla gerilimli yapıya sahip olması ve muhtemel mikroçatlakların oluşumundan kaynaklanmaktadır. Resim 5.3'deki mikroyapı fotoğraflarından görüleceği gibi, başlangıç numunesi sıcak haddelenmiş numunelere göre daha çok yönlenmiş tanelere sahiptir. Ancak, % 34 haddeleme oranında, yönlenmiş tanelerin tekrar ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun haddeleme sırasında malzeme sıcaklığının A_1 sıcaklığının altına düşmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.24. Sıcak olarak haddelenmiş numunelerde deformasyon oranına bağlı olarak sertlikteki değişim

6. İŞLENEBİLİRLİK SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Soğuk Haddelenmiş Numunelerin İşlenebilirliği

İşlenebilirlik deneyleri sonrası; başlangıç numunesi ile % 11, % 15, % 19, % 23 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin 9 m/min, 12 m/min ve 19 m/min kesme hızı ve 0,254 mm/min ilerlemede; haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz doğrultuda elde edilen asıl kesme kuvveti F_c için Genie programından elde edilen F_c -genie değerleri ve bu değerlerin kalibrasyon denkleminde Eş. 4.5’de yerine konulması ile elde edilen Newton cinsinden karşılıkları [F_c (N)] Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelgedeki Boş- F_c değeri, tezgahın boşta çalışması sırasında her bir ilerleme ve kesme hızında volt cinsinden elde edilen değerdir. F_c , talaş kaldırma sırasında F_c doğrultusunda “volt” olarak ve F_c -genie ise, Boş- F_c değerinden F_c ’nin çıkarılması ile “volt” olarak elde edilen değerdir. Boş- F_c ’nin, sayısal olarak F_c ’den büyük olmasının sebebi, yük hücresinin eksi yönde bağlanmasından kaynaklanmaktadır.

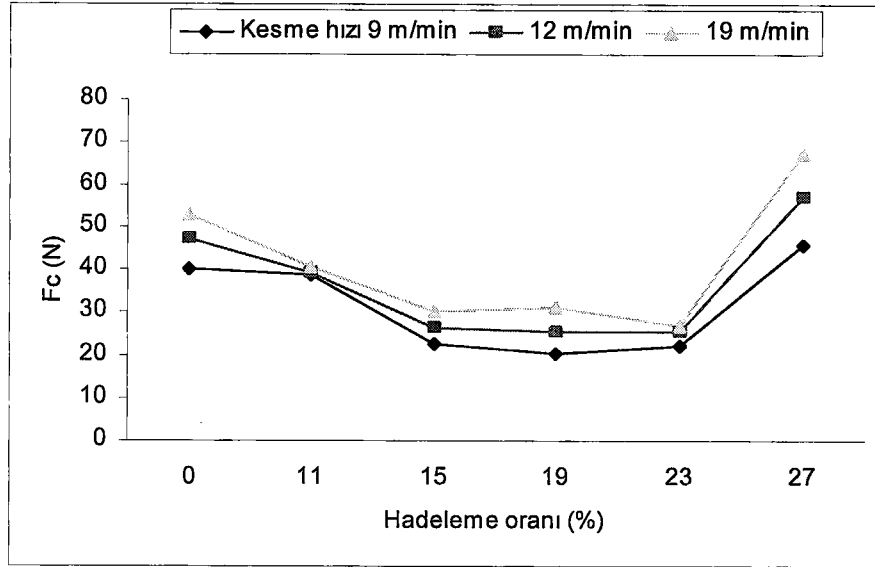
Soğuk haddelenmiş numunelerin kesme deneylerinde, dik kesme modeli kullanılarak elde edilen haddeleme doğrultusuna paralel asıl kesme kuvvetleri Şekil 6.1’de, işleme yönüne göre perlit bantlarının kesilmesi Şekil 6.2’de, dik doğrultudaki asıl kesme kuvvetleri Şekil 6.3’de, çapraz doğrultudaki asıl kesme kuvvetleri Şekil 6.4’de ve talaş şekilleri Şekil 6.5’de verilmektedir.

6.1.1. Haddeleme doğrultusuna paralel kesme kuvvetleri

Haddeleme doğrultusuna paralel işlemede kesme kuvvetleri, 9 m/min, 12 m/min ve 19 m/min’lik her üç kesme hızında da birbirine yakın olmakla birlikte, haddeleme oranına bağlı olarak genel bir düşüş görülmektedir (Şekil 6.1). Ancak, % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunedeki kesme kuvvetlerinde, her üç kesme hızında da ani bir artış olmuştur.

Çizelge 6.1. Soğuk haddelenmiş numunelerde haddelendirme doğrultusuna bağlı olarak Asıl kesme kuvveti (Fc) değerlerindeki değişim

Haddelendirme Oranı (%)	Kesme hızı (m/min)	İlerleme (mm/min)	Talaş derinliği (mm)	Haddelendirme doğrultusuna paralel			Haddelendirme doğrultusuna dik			Haddelendirme doğrultusuna çapraz			Teorik kesme kuvveti (N)
				Bos Fc (V)	Fc (V)	Fc-geçirile (V)	Fc (N)	Fc (V)	Fc-geçirile (V)	Fc (N)	Fc (V)	Fc-geçirile (V)	
Başlangıç numunesi	9	0,254	1,5	14,146	13,646	0,500	39,938	13,681	0,465	36,889	13,760	0,386	30,007
	12	0,254	1,5	14,264	13,681	0,583	47,169	13,784	0,480	38,196	13,843	0,421	33,056
	19	0,254	1,5	14,322	13,677	0,645	52,570	13,798	0,524	42,029	13,809	0,513	41,071
11	9	0,254	1,5	14,146	13,660	0,486	38,718	13,680	0,466	36,976	13,801	0,345	26,435
	12	0,254	1,5	14,264	13,772	0,492	39,241	13,782	0,482	38,370	13,899	0,365	28,177
	19	0,254	1,5	14,322	13,818	0,504	40,286	13,824	0,498	39,764	13,906	0,416	32,620
15	9	0,254	1,5	14,146	13,845	0,301	22,602	13,812	0,334	25,477	13,857	0,289	21,557
	12	0,254	1,5	14,264	13,918	0,346	26,522	13,857	0,407	31,836	13,937	0,327	24,867
	19	0,254	1,5	14,322	13,934	0,388	30,181	13,840	0,482	38,370	13,902	0,420	32,969
19	9	0,254	1,5	14,146	13,870	0,276	20,424	13,765	0,381	29,571	13,850	0,296	22,166
	12	0,254	1,5	14,264	13,933	0,331	25,215	13,867	0,397	30,965	13,939	0,325	24,693
	19	0,254	1,5	14,322	13,924	0,398	31,052	13,895	0,427	33,579	13,953	0,369	28,526
23	9	0,254	1,5	14,146	13,853	0,293	21,905	13,780	0,366	28,264	13,891	0,255	18,595
	12	0,254	1,5	14,264	13,933	0,331	25,215	13,876	0,388	30,181	13,975	0,289	21,557
	19	0,254	1,5	14,322	13,970	0,352	27,045	13,904	0,418	32,794	14,003	0,319	24,170
27	9	0,254	1,5	14,146	13,579	0,567	45,775	13,533	0,613	49,782	13,780	0,366	28,264
	12	0,254	1,5	14,264	13,571	0,693	56,751	13,517	0,747	61,456	13,813	0,451	35,669
	19	0,254	1,5	14,322	13,509	0,813	67,205	13,429	0,893	74,175	13,642	0,680	55,619

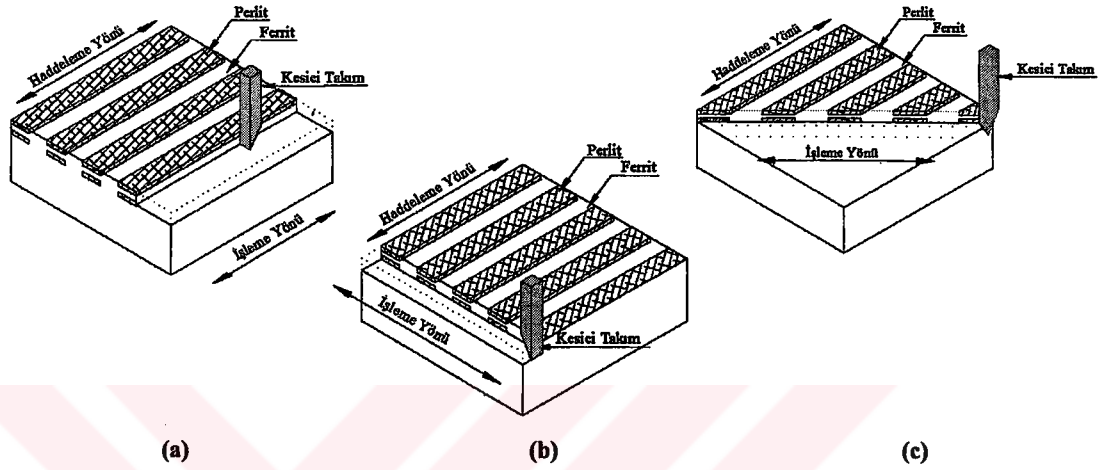


Şekil 6.1. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (F_c) değişim

Soğuk haddelenmiş numunelerde haddeleme doğrultusuna paralel işlemede, kesme kuvvetleri kesme hızı arttıkça artmıştır. Bu, düşük karbonlu ve düşük karbonlu yeniden kükürt katılmış kolay işlenebilir çeliklerde, kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinin düştüğü görüşüne uymamaktadır (3, 40, 42, 58, 62, 67). Çizelge 6.1’den de görüleceği üzere “Eş. 4.6” kullanılarak takım yanaşma açısı faktörü ihmal edilerek yapılan teorik hesaplamada kesme kuvveti, kesme hızı arttıkça düşmektedir (47). Literatürde, St 44 için (k_{11} ve $-m$) değerleri bulunamadığından Ç 1020’nin k_{11} , 1450 ve St 42’nin $-m$, 0,17 değerleri alınmıştır (13, 82). Ayrıca, kesme kuvvetleri başlangıç numunesi ve % 11, % 15 ve % 27 oranında haddelenmiş numunelerde, kesme kuvvetleri teorik kesme kuvvetinin üzerine çıkmıştır.

Haddeleme doğrultusuna paralel işlemede kesme kuvvetlerinin, dik doğrultudaki işlemeye nazaran yüksek olması, kesici ucun temas ettiği yapının aynı olmasına atfedilebilir. Daha önce Bölüm 5.1’de belirtildiği gibi, haddeleme oranı arttıkça, ferritin daha kolay deforme edilebilirliğinden dolayı perlit bantları arasındaki mesafe daralmakta (Şekil 5.3) ve mekanik fiberleşmiş yapı baskın yapı haline gelmektedir (Resim 5.1). Böyle bir yapıda kesici ucun, tüm talaş kaldırılan işleme boyu süresince, bantlı yapı ile temas ihtimali ve süresinin artması kaçınılmaz görünmektedir. Bu tür

bir yapıda kesme kuvveti, kesici takım ferrit fazı ile temas ettiğinde düşmekte, bantlı yapı ile (perlit gibi), temas ettiğinde ise yükselmektedir (42, 47). Şekil 6.2’de İşleme yönüne göre kesici takımın şematik mikroyapı ile temas ilişkisinin temsili verilmiştir.



Şekil 6.2. İşleme yönüne göre kesici takımın şematik mikroyapı ile temas ilişkisinin temsili: haddelenme doğrultusuna paralel (a), dik (b) ve çapraz (c)

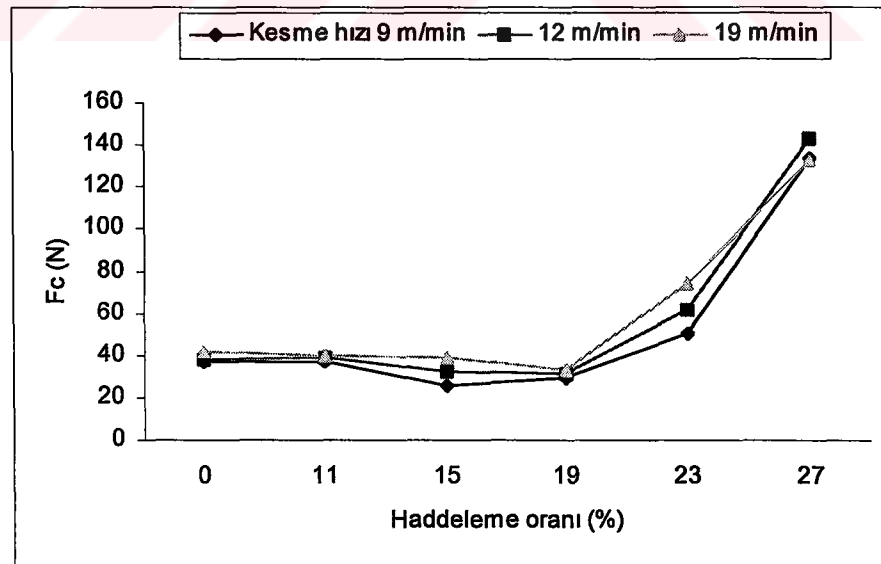
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da başlangıç numunesine ait J.C analiz sonuçlarından da görüleceği üzere, çekme deneylerinde 1. aşamada pekleşme hızı yüksek, 2. ve 3. aşamalarda pekleşme hızı nispeten düşük olmuştur. % 11 haddelenme oranından sonra haddelenme sonucu oluşan gerilimli yapı neticesinde J.C analiz sonuçlarına göre pekleşme hızı çok yüksek ve % gerçek gerinim sınırı (ϵ limit) başlangıç numunesine göre düşüktür. Bu durum haddelenme sonucu pekleşmiş numunelerde, talaş kaldırma sırasında pekleşmenin daha düşük olduğunu göstermekte ve bu sebeple, kesme kuvvetleri düşmektedir.

6.1.2. Haddelenme doğrultusuna dik kesme kuvvetleri

Haddelenme doğrultusuna dik işlemede, % 19 haddelenme oranına kadar kesme kuvvetleri daha kararlı kalırken, % 23 haddelenme oranından sonra artma eğilimi göstermiş ve daha sonra, haddelenme doğrultusuna paralel işlemede olduğu gibi, % 27 haddelenme oranında ise ani bir yükselme görülmüştür (Şekil 6.3).

Haddeleme yönüne dik işlenen numunelerde, kesme hızındaki artışla birlikte, kesme kuvvetlerinde de düzenli artış görülmektedir. Burada, kesici ucun farklı fazlara temas etmesi sonucu, kesme kuvvetlerini düzenli olarak arttırdığı düşünülmektedir. Bu da talaş kaldırma sırasında kesmenin uzun süre, birbirine göre farklı sertlikte ve farklı özellikteki yapılarla temasına atfedilebilir (Şekil 6.2). Dik yönde, kesici ucun farklı yapılarla teması sürekli aynı kalmakta ve dolayısıyla kesme kuvvetlerindeki değişim de daha az olmaktadır.

Haddeleme doğrultusuna dik J.C analizleri (Şekil 5.11) incelendiğinde, haddeleme doğrultusuna paralel işleme ile hemen hemen aynı eğilimi göstermiş olmakla birlikte, Paralel doğrultuda, % gerçek gerinim sınırının genel olarak, bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, haddeleme doğrultusuna paralel yönde tanelerin daha çok deforme olduğunu (uzadığını) ve yönlendirilmiş yapı nedeniyle haddeleme doğrultusuna bağlı olarak farklılık göstermesi ile açıklanabilir. Bu nedenle, haddeleme doğrultusuna paralel akma ve çekme dayanımı daha yüksektir (Şekil 5.8 ve Şekil 5.9).

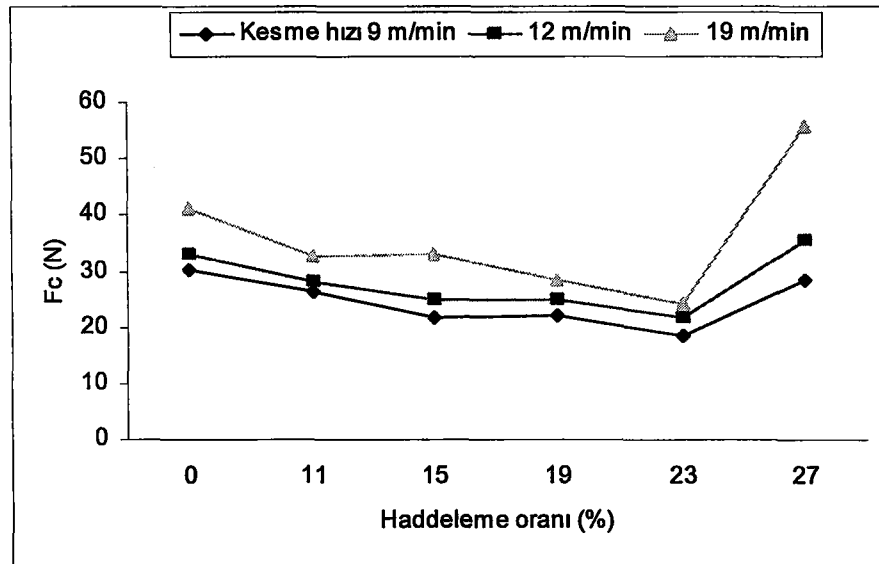


Şekil 6.3. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna dik işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (F_c) değişim

Haddeleme oranı % 27 olan numunenin J.C analiz sonucundan görüleceği üzere diğer numunelere göre 3. aşamada eğim (m) ve % gerçek gerinim sınırı daha yüksek olması, haddeleme sırasında mikroyapıda muhtemel çatlaklar oluşabileceğini bu nedenle de gerilimin bir miktar düşmüş olabileceğini göstermektedir. Talaş kaldırma sırasında pekleşmenin daha yüksek olması kesme kuvvetlerini artırmaktadır. Dik doğrultudaki işlemede kesme kuvvetleri genellikle teorik kesme kuvvetinden düşük çıkmakla birlikte % 27 oranında haddelenmiş numunede kesme kuvvetleri teorik kuvvetlerden daha yüksektir (Çizelge 6.1).

6.1.3. Haddeleme doğrultusuna çapraz kesme kuvvetleri

Haddeleme doğrultusuna çapraz işlemedeki kesme kuvvetleri, paralel doğrultuda işlemeye benzer eğilim göstermekle birlikte, % 27 oranındaki soğuk haddelenmiş numunede, kesme kuvvetlerindeki artış, haddeleme doğrultusuna paralel ve dik işlemedekine göre daha az olmuştur (Şekil 6.4). Haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede her üç kesme hızı için, diğer işleme yönlerindekiyle farklı olarak, kesme hızındaki artışla birlikte, kesme kuvvetlerindeki artış daha çok olmuştur.



Şekil 6.4. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (F_c) değişim

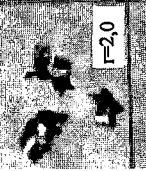
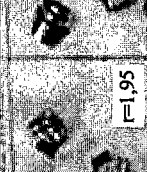
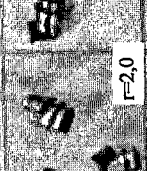
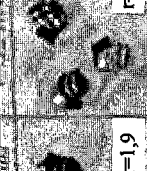
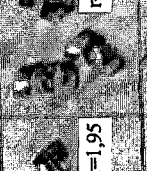
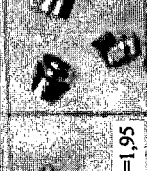
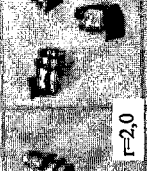
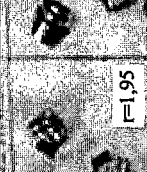
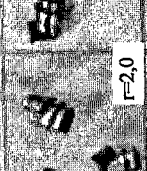
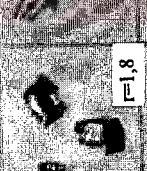
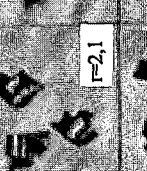
Çapraz doğrultuda beklenen özellik, nispeten haddeleme doğrultusuna dik işlemedekine benzer olmalıdır. Çünkü; takım hareketi sırasında kesici uç, hiçbir zaman tek bir tür yapı boyunca temasta olmayacaktır. Ancak, dik doğrultudaki işleme ile kıyaslandığında, aynı yapı ile temas, dik doğrultudaki işlemeye göre daha uzun (hipotenüs boyunca) olacak (Şekil 6.2) ve kuvvetlerdeki değişim de dik işlemekten daha yüksek olacaktır. Bu eğilim beklenen tarzıdır. Düşük kesme hızında (9 m/min), çok düşük bir kesme kuvveti elde edilirken, 19 m/min'lik kesme hızında, diğerlerine göre kesme kuvvetleri ve kesme kuvvetindeki değişim çok daha yüksek olmaktadır.

Haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede, kesme kuvvetlerinin paralel ve dik işlemeye nazaran düşük olması, talaş yüzeylerinin, daha pürüzsüz olması ile yığıntı talaşın kararlı oluşundan kaynaklanabilir (Şekil 6.5). Ancak, % 27 oranında haddelenmiş numunede 19 m/min kesme hızında kesme kuvvetleri, teorik kesme kuvvetinden yüksektir.

6.1.4. Talaş şekilleri

Şekil 6.5'den görüleceği üzere talaş şekilleri kıvrık ve kısadır. Bu durum, soğuk haddeleme sonucu yönlendirilmiş tane ve pekleşmiş yapı ile sünekliğin düşmesi sonucudur (1). Talaş kıvrım yarıçapı (r) için bozulmuş talaş üzerinde 5 ayrı ölçümün ortalaması alınmıştır. Soğuk ve sıcak haddelenmiş numunelerde 9 m/min kesme hızında talaş kesiti $0,1167 \text{ mm}^2$, 12 m/min'de $0,0087 \text{ mm}^2$ ve 19 m/min'de $0,0057 \text{ mm}^2$ dir. Talaş kıvrım yarıçapı genellikle kesme hızına bağlı olarak artmıştır. Talaş kıvrım yarıçapı haddeleme doğrultusuna paralel yönde en az, dik yönde biraz daha büyük ve çapraz yöndeki en büyüktür.

Azalan süneklik, kesme sırasında yüksek güç tüketimi gerektirmektedir (41). Artan kesme hızı ile birlikte, bütün işleme doğrultularında talaş kıvrım yarıçapı artmıştır. Gözle yapılan muayene sonucu, özellikle 19 m/min kesme hızında talaş yüzeylerin daha düzgün ve daha az pürüzlü olduğu görülmüştür. Bu durum, kesme hızının artması ile yığıntı talaş oluşma eğiliminin azaldığını göstermektedir.

Başlangıç numunesi	Haddeleme doğrultusuna paralel			Haddeleme doğrultusuna dik			Haddeleme doğrultusuna çapraz		
	V=9 m/min	V=12 m/min	V=19 m/min	V=9 m/min	V=12 m/min	V=19 m/min	V=9 m/min	V=12 m/min	V=19 m/min
% 11	 r=1,9	 r=1,95	 r=2,0	 r=1,8	 r=1,85	 r=2,0	 r=2,05	 r=2,1	 r=2,55
% 15	 r=1,95	 r=2,2	 r=2,45	 r=2,15	 r=2,2	 r=2,45	 r=2,1	 r=2,2	 r=2,55
% 19	 r=2,0	 r=2,25	 r=2,5	 r=2,15	 r=2,3	 r=2,55	 r=2,15	 r=2,3	 r=2,6
% 23	 r=2,2	 r=2,3	 r=2,6	 r=2,15	 r=2,35	 r=2,6	 r=2,2	 r=2,35	 r=2,65
% 27	 r=2,25	 r=2,35	 r=2,65	 r=2,2	 r=2,4	 r=2,65	 r=2,25	 r=2,45	 r=2,75
	 r=2,3	 r=2,6	 r=2,7	 r=2,25	 r=2,65	 r=2,75	 r=2,35	 r=2,7	 r=2,8

Şekil 6.5. Başlangıç numunesi, % 11, % 15, % 19, % 23 ve % 27 oranında soğuk olarak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz yönde ve üç ayrı kesme hızında talaş şekilleri ve talaş kıvrım yarıçapları, r (mm)

Talaş yüzeylerindeki pürüzlülüğün azalması özellikle, haddeme doğrultusuna çapraz işlemede daha belirgindir. Talaş yüzeylerinin pürüzsüz olması, yığıntı talaş oluşmaması anlamına gelmektedir. Araki ve Yamomota'da, düşük alaşımlı çelik çubuk numunelerde yığıntı talaşın boyuna kesmede, enine kesmeye nazaran daha kararlı olduğunu gözlemişlerdir (9).

6.1.5. Tartışma

Sonuç olarak, ferrit tane boyu ve perlit koloni boyunun ene oranı diğer bir deyişle, uzamış tane yapısı (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) ve perlit bantları arası mesafenin azalması (Şekil 5.3), üç yöndeki işlemede de % 27 ve dik doğrultudaki % 23 oranındaki haddelenmiş numune dışında genel olarak, kesme kuvvetlerini düşürmüştür. Benzer bir çalışmada, tornalama deneylerinde kesme kuvvetlerinin ferrit tane ve perlit koloni boyutlarına bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir (61).

Soğuk şekillendirme sırasında ferritin deforme edilmiş olması, talaş kaldırma sırasında kesme bölgesinde, pekleşmeyi azaltması nedeni ve yığıntı talaş oluşma eğilimini düşürmesi, kesme kuvvetlerinin azalmasına katkıda bulunabilir (15, 45). Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Ek 5'de verilen J.C analiz sonuçları da bu yorumu doğrulamaktadır. Bu durum kesme kuvvetlerini açıklayan en genel iki teoriye dayalı olarak (64, 65), kesme bölgesindeki pekleşme hızının azalması şeklinde açıklanabilir (40).

Soğuk haddelenmiş % 27 oranındaki numune dışında, kesme bölgesindeki perlit bant kalınlığının azalması ile diğer bir deyişle, kesme sırasında kesici ucun daha fazla perlit bantları ile teması neticesinde, perlit bant sıklığının özellikle orta karbonlu çeliklerde işlenebilirliği kötüleştirdiği sonucunun (16) aksine, kesme kuvvetlerinde artış görülmemiştir. Bhattacharya'da benzer sonuçları elde etmiştir (11).

Soğuk haddelenmiş % 27 oranındaki numunenin, her üç doğrultudaki kesme hızlarındaki ani artışın sebebi, Bölüm 5'de belirtildiği ve Resim 5.1 ve Resim 5.2'den de görüleceği üzere, mekanik fiberleşmiş yapının çok belirgin hale

gelmesidir. Deformasyonun artması, fiber yönlenmenin (mekanik fiberleşmiş yapı) oluşması ideal yönlenmelerden sapmalara sebep olmaktadır (4). Ayrıca, numune sertliği iyi işlenebilirlik için optimum noktayı geçmiş olabilir (1, 16, 48).

Akma ve çekme dayanımına bağlı olarak, soğuk şekillendirme ile elde edilen sertlikteki artışın (Şekil 5.13), kesme kuvvetlerindeki düşüşe etkisi literatürle uyushmaktadır (1, 15). Ancak, Strafford ve Audy, % 0,2-0,06 karbon ve bir miktar krom içeren çelik numunelerin tornalanmasında sertlik ve kesme kuvveti arasında tutarlı bir ilişki kuramamışlardır (61).

Artan akma dik doğrultularda (% 15 haddeleme oranından sonra bir miktar düşüş gözlenmiştir) ve çekme dayanımı ve azalan süneklikle birlikte (Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7), paralel ve çapraz doğrultuda % 23 ve dik doğrultuda % 19 haddeleme oranına kadar, kesme kuvvetlerinde genel olarak düşüş görölmüştür. Diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (9, 10, 67).

Sonuç olarak, soğuk şekillendirmenin kesme kuvvetlerini genel olarak düşürdüğü gözlenmiştir. Bu durum, literatürde belirtilen % 0,2'den az karbon ihtiva eden çeliklerde, soğuk şekillendirmenin işlenebilirliği iyileştirdiği görüşü ile uyushmaktadır (12, 14). Haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede kesme kuvvetleri, paralel ve dik doğrultudaki işlemeye göre % 11-27 soğuk haddeleme oranlarında en düşüktür. Bunun nedeni, kesme doğrultusuna bağlı olarak, kesici takımın perlit bantları ile daha seyrek temasının (Şekil 6.2) kesme kuvvetlerini düşürmesi olarak yorumlanmıştır (42).

Ayrıca, levha düzlemine paralel yönlenmiş yönlenmiş yapısı (4), yöne bağlı özellikleri etkilemektedir. Soğuk haddeleme ile kesme kuvvetlerinin düşmesi, haddeleme sırasında harcanan enerjinin yaklaşık % 10'unun çok kristalli malzemelerde kristal hatalarına bağlı olarak, elastik enerjinin oluşması için depo edilmesi (30), yeniden kristalleşme sıcaklığına kadar pekleşme hızının yüksek olması (Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Ek 5) (7), kesme sırasında talaş kaldırmayı

kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, kesme kuvvetlerindeki düşüş, kesme sırasında düşük pekleşme hızı nedeni ile takım/talaş temas yüzeyini düşürmektedir.

6.2. Soğuk Haddelenmiş Numunelerde Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

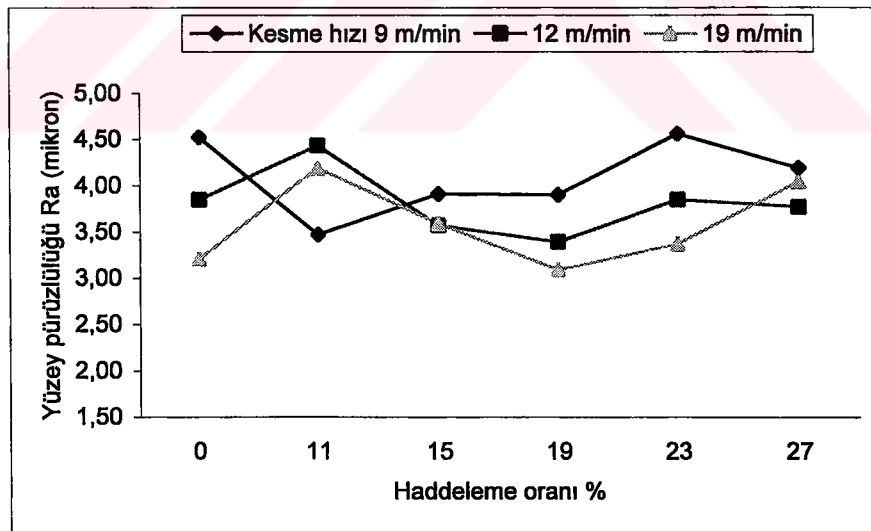
İşlenebilirlik deneyleri sonrasında, başlangıç numunesi ile % 11, % 15, % 19, % 23 ve % 27 oranında soğuk haddelenmiş numunelerin 9 m/min, 12 m/min ve 19 m/min kesme hızı ve 0,254 mm/min ilerlemede; haddeme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz doğrultuda elde edilen yüzey pürüzlük değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Bu numunelerin haddeme doğrultusuna bağlı olarak, haddeme doğrultusuna paralel işlemedeki yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.6’da, dik doğrultudaki Şekil 6.7’de ve çapraz doğrultudaki yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Soğuk haddelenmiş numunelerde haddeme doğrultusuna bağlı olarak teorik ve ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Ra (μm)

Haddeleme oranı (%)	Kesme hızı (m/min)	İlerleme mm/min	Talaş derinliği (mm)	Yüzey pürüzlülük değeri Ra (μm)			Teorik yüzey pürüzlülük değeri (ortalama) Ra (μm)
				Haddeleme doğrultusuna			
				paralel işleme	dik işleme	çapraz işleme	
Başlangıç numunesi	9	0,254	1,5	4,52	4,40	3,17	0,048
	12	0,254	1,5	3,85	3,70	3,30	0,026
	19	0,254	1,5	3,21	3,99	3,63	0,012
11	9	0,254	1,5	3,47	3,51	3,36	0,048
	12	0,254	1,5	4,43	4,66	3,36	0,026
	19	0,254	1,5	4,19	3,50	2,77	0,012
15	9	0,254	1,5	3,61	4,05	3,32	0,048
	12	0,254	1,5	3,57	4,14	2,86	0,026
	19	0,254	1,5	3,59	3,47	3,25	0,012
19	9	0,254	1,5	3,73	3,95	3,24	0,048
	12	0,254	1,5	3,39	3,85	2,76	0,026
	19	0,254	1,5	3,09	3,40	3,21	0,012
23	9	0,254	1,5	4,56	4,40	3,61	0,048
	12	0,254	1,5	3,85	4,21	3,15	0,026
	19	0,254	1,5	3,37	4,05	3,16	0,012
27	9	0,254	1,5	4,19	4,37	3,51	0,048
	12	0,254	1,5	3,77	3,75	2,95	0,026
	19	0,254	1,5	4,04	4,16	3,44	0,012

Soğuk haddelenmiş numunelerde, 9 m/min kesme hızında paralel ve dik doğrultuda işlemede, başlangıç numunesine göre yüzey pürüzlülük değeri daha düşük olmakla birlikte, haddeleme oranına bağlı olarak artmıştır. Kesme hızı 12 m/min'de ise her iki doğrultudaki işlemede, % 11 oranında soğuk haddelenmiş numunede, başlangıç numunesine göre artış göstermekle birlikte, diğer numunelerde haddeleme oranına bağlı olarak düşüş görülmüştür. Kesme hızı 19 m/min'de ise haddeleme doğrultusuna paralel % 19 ve % 23 oranında haddelenmiş numunelerde ve haddeleme doğrultusuna dik % 15 ve % 19 oranında haddelenmiş numunelerde en düşük pürüzlülük değeri elde edilmiştir (Şekil 6.6 ve Şekil 6.7).

Çapraz doğrultudaki işlemede her üç kesme hızında da yüzey pürüzlülük değerleri birbirine oldukça yakındır. Yüzey pürüzlülük değerlerinde, başlangıç numunesi ile soğuk haddelenmiş numuneler arasında farklılık görülmemekle birlikte en iyi yüzey pürüzlülük değerleri çapraz doğrultudaki işlemede elde edilmiştir (Şekil 6.8).

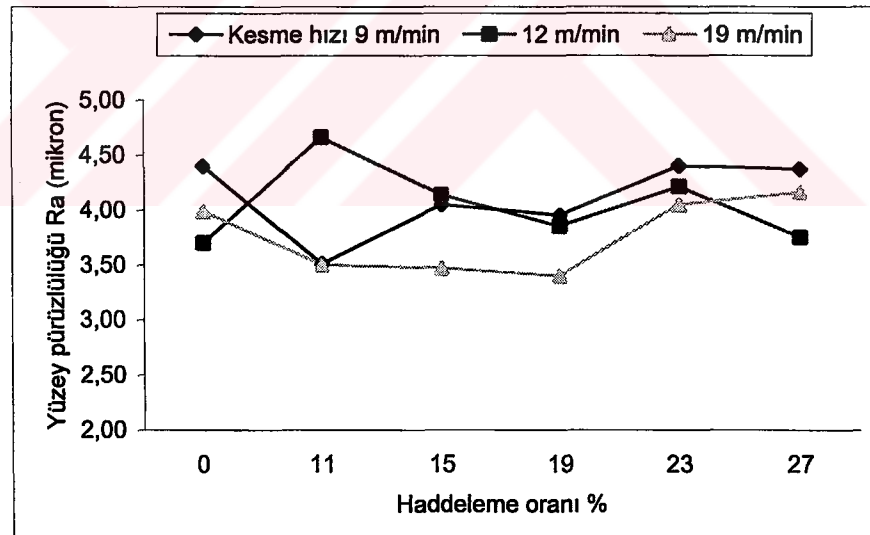


Şekil 6.6. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemedeki yüzey pürüzlülükleri

Çapraz doğrultudaki işlemede 19 m/min kesme hızında % 11 oranında haddelenmiş numune ve 12 m/min kesme hızında % 15 ve % 19 oranında haddelenmiş numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri en düşüktür. Bu durum, kesici ucun, birden

fazla farklı yapı ile, dik doğrultudaki işlemeye göre daha uzun süre, paralel doğrultudaki işlemeye göre daha kısa süre temasına atfedilebilir.

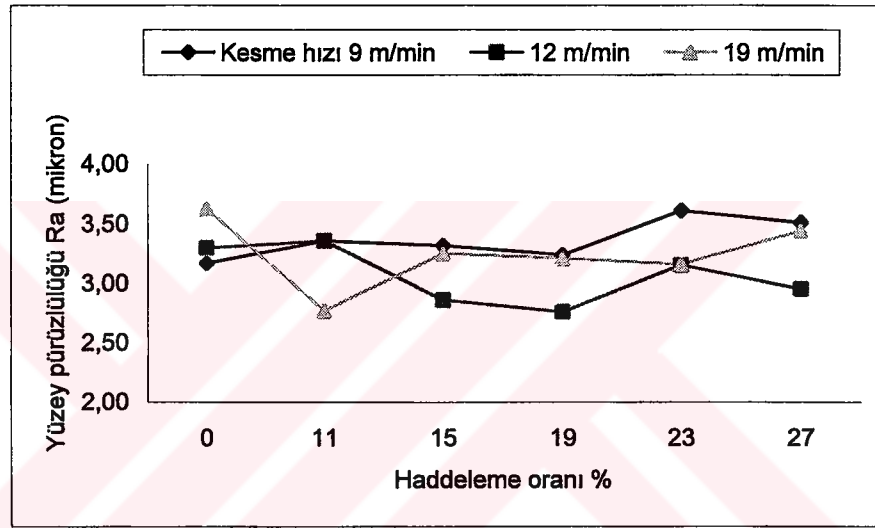
Düşük karbonlu çeliklerde yüzey pürüzlülüğünün genel olarak; kesme ve ilerleme hızı artışı, talaş derinliği, (74, 75), hafif bantlı yapı (16), ve yönlenme etkisi, perlit bant aralığı ve sürekliliği (11), yönlenmiş tane yapısı (15), işleme yönü (9), inklüzyonların dağılım ve boyutu (1, 76, 77, 90), soğuk şekillendirme miktarı (3), ile değişmekte ve bu parametrelere bağlı olarak optimum bir yüzey pürüzlülük değeri elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, alaşım elementleri (1, 15), kolay işleme katkıları (1, 50, 53, 55, 56), takım tezgahı (12), takım malzemesi ve geometrisi (1, 94) ve işleme şartları da (1, 12, 40, 41, 74, 76), yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkin rol oynamaktadır.



Şekil 6.7. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddelenme doğrultusuna dik işlemedeki yüzey pürüzlülükleri

Sonuç olarak, soğuk haddelenmiş numunelerde haddelenme doğrultusuna çapraz işlemedeki yüzey pürüzlülük değerleri, paralel ve dik işlemedekine nazaran daha iyi olmuştur. Haddelenme doğrultusuna paralel ve dik işlemedeki optimum işleme hızı, 19 m/min ve haddelenme oranı % 19 iken, çapraz doğrultudaki işlemede 19 m/min'de % 11 ve 12 m/min'de % 15 ve % 19'dur. Soğuk haddelenmiş numunelerin

işlenebilirlik deneylerinde; takım malzemesi, kesme açısı, talaş derinliği ve ilerleme hızı sabit tutulmuştur. Ancak, üç ayrı kesme hızında; kesme hızları ve soğuk haddeme oranları arasında yüzey pürüzlülüğü açısından köklü bir ilişki kurulamamıştır. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre kesme hızının düşük olması nedeni ile teorik değerlerin çok üzerinde çıkmıştır (Çizelge 6.2).



Şekil 6.8. Soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeme doğrultusuna çapraz işlemedeki yüzey pürüzlülükleri

6.3. Sıcak Haddelenmiş Numunelerin İşlenebilirliği

İşlenebilirlik deneyleri sonrasında, başlangıç numunesi ile % 11, % 13, % 17, % 23, % 26 ve % 34 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin 9 m/min, 12 m/min ve 19 m/min kesme hızı ve 0,254 mm/min ilerlemede; haddeme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz doğrultuda elde edilen asıl kesme kuvveti F_c için Genie programından elde edilen F_c -genie değerleri ve bu değerlerin kalibrasyon denkleminde “Eş. 4.5” de yerine konulması ile elde edilen Newton cinsinden karşılıkları [F_c (N)] Çizelge 6.3’de verilmiştir.

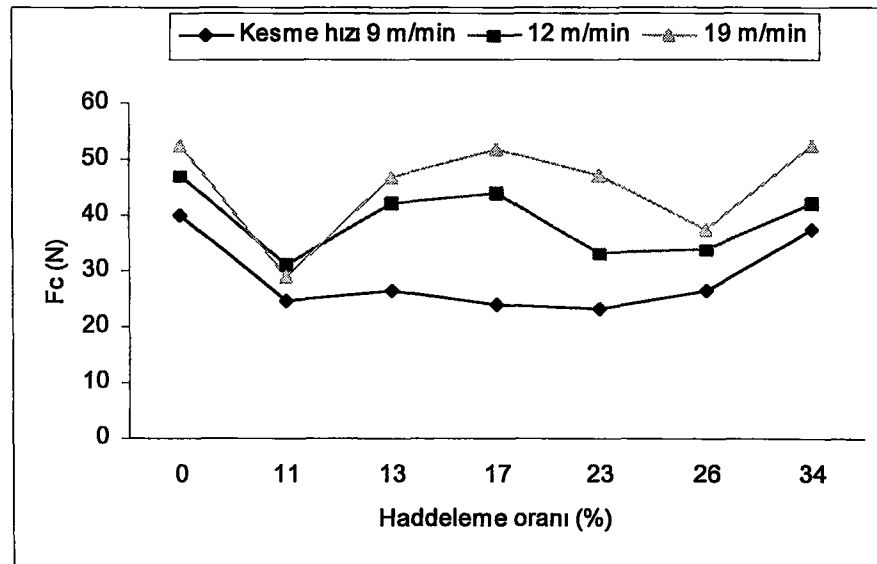
Çizelge 6.3. Sıcak haddelenmiş numunelerde haddelme doğrultusuna bağlı olarak Asıl kesme kuvveti (Fc) değerlerindeki değişim

Haddelme Oranı (%)	Kesme hızı (m/mln)	İlerleme (mm/min)	Talaş derinliği (mm)	Haddelme doğrultusuna paralel			Haddelme doğrultusuna dik			Haddelme doğrultusuna çapraz			Teorik kesme kuvveti (N)	
				Boş Fc (V)	Fc (V)	Fc-genie (V)	Fc (N)	Fc (V)	Fc-genie (V)	Fc (N)	Fc (V)	Fc-genie (V)		Fc (N)
Başlangıç numunesi	9	0,254	1,5	14,146	13,646	0,500	36,889	13,681	0,465	36,889	13,760	0,386	30,007	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,681	0,583	38,196	13,784	0,480	38,196	13,843	0,421	33,056	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,677	0,645	42,029	13,798	0,524	42,029	13,809	0,513	41,071	33,179
11	9	0,254	1,5	14,146	13,821	0,325	24,693	13,780	0,366	28,264	13,810	0,336	25,651	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,867	0,397	30,965	13,866	0,398	31,052	13,792	0,472	37,499	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,947	0,375	29,049	13,898	0,424	33,317	13,819	0,503	40,199	33,179
13	9	0,254	1,5	14,146	13,801	0,345	26,435	13,791	0,355	27,306	13,840	0,306	23,037	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,737	0,527	42,290	13,720	0,544	43,771	13,795	0,469	37,237	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,742	0,580	46,907	13,729	0,593	48,040	13,775	0,547	44,032	33,179
17	9	0,254	1,5	14,146	13,828	0,318	24,083	13,783	0,363	28,003	13,837	0,309	23,299	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,720	0,544	43,771	13,703	0,561	45,252	13,782	0,482	38,370	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,687	0,635	51,699	13,664	0,658	53,702	13,767	0,555	44,729	33,179
23	9	0,254	1,5	14,146	13,840	0,306	23,037	13,787	0,359	27,655	13,842	0,304	22,863	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,843	0,421	33,056	13,748	0,516	41,332	13,904	0,360	27,742	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,740	0,582	47,082	13,723	0,599	48,562	13,840	0,482	38,370	33,179
26	9	0,254	1,5	14,146	13,801	0,345	26,435	13,745	0,401	31,314	13,847	0,299	22,428	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,833	0,431	33,927	13,838	0,426	33,491	13,931	0,333	25,390	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,849	0,473	37,586	13,819	0,503	40,199	13,863	0,459	36,366	33,179
34	9	0,254	1,5	14,146	13,673	0,473	37,586	13,644	0,502	40,112	13,745	0,401	31,314	59,981
	12	0,254	1,5	14,264	13,738	0,526	42,203	13,723	0,541	43,510	13,809	0,455	36,018	47,064
	19	0,254	1,5	14,322	13,676	0,646	52,657	13,636	0,686	56,142	13,684	0,638	51,960	33,179

Sıcak haddelenmiş numunelerin kesme deneylerinde, dik kesme modeli kullanılarak, elde edilen haddeleme doğrultusuna paralel asıl kesme kuvvetleri Şekil 6.9'da, dik doğrultudaki Şekil 6.10'da, çapraz doğrultudaki asıl kesme kuvvetleri Şekil 6.11'de ve talaş şekilleri Şekil 6.12'de verilmiştir.

6.3.1. Haddeleme doğrultusuna paralel kesme kuvvetleri

Sıcak haddelenmiş numunelerde, haddeleme doğrultusuna paralel işlemedeki bütün kesme hızlarındaki kesme kuvvetleri, başlangıç numunesine göre düşüş göstermiştir (Şekil 6.9). Haddeleme oranı % 11 olan numunede kesme kuvvetlerindeki ani düşüş; ferrit tane ve perlit koloni boyunun ene oranındaki düşüş, perlit bantları arasındaki mesafe ve perlit bant kalınlığındaki artışla birlikte, kesme sırasında kesici ucun daha az sert yapıyla temasına (Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17) ve akma ve çekme dayanımı, sertlikteki düşüğe (Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.24) atfedilebilir. J.C analiz sonuçlarına bakıldığında, başlangıç numunesine göre, % gerçek gerinim sınırı ve eğimin yüksek olması pekleşme hızının etkili olmadığını göstermektedir (Şekil 5.8, Çizelge 5.4 ve Ek 6).

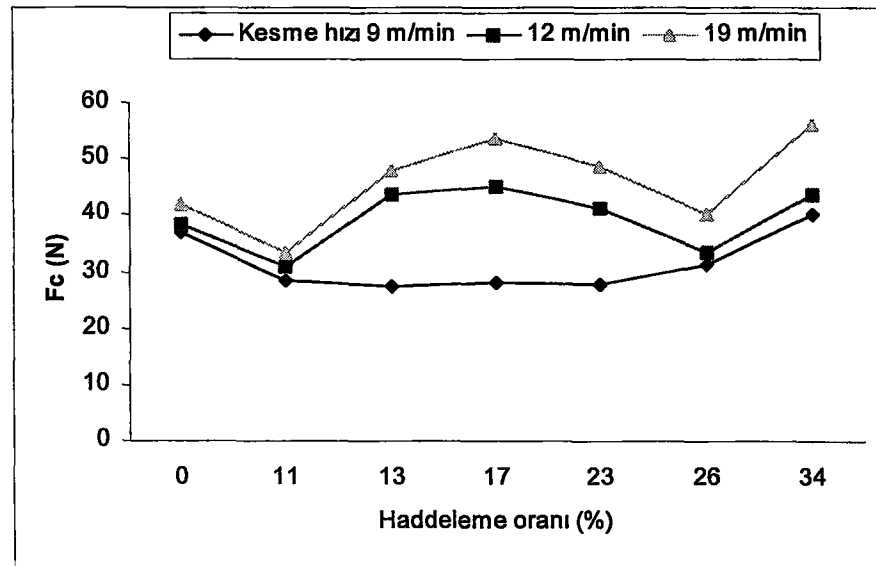


Şekil 6.9. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim

Haddeleme oranının % 11'den sonra, artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde artış gözlenmiştir. Her üç kesme hızında da, haddeleme oranına bağlı olarak kesme kuvvetleri artmış ve % 23 ve % 26 oranında haddelenmiş numunelerde düşme eğilimi sergilerken, % 34 oranındaki haddelenmiş numunede ani bir artış göstermiştir. Haddeleme oranı % 23 ve % 26 olan numunelerde kesme kuvvetlerindeki düşme eğilimi, artan deformasyonla birlikte akma ve çekme dayanımındaki yükselmeye karşın, yönlenmiş tane yapısına atfedilebilir (Resim 5.3 ve Resim 5.4).

6.3.2. Haddeleme doğrultusuna dik kesme kuvvetleri

Haddeleme doğrultusuna dik işlemede, her üç kesme hızında da haddeleme oranına bağlı olarak kesme kuvvetleri artmış ve % 17 oranında haddelenmiş numuneden sonra düşme eğilimi gözlenmiştir (Şekil 6.10). Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 mukayese edildiğinde, kesme kuvvetlerinin haddeleme doğrultusuna dik işlemede, paralel doğrultudaki işlemeye göre bir miktar yüksek ancak, kesme kuvvetlerindeki genel eğilimin her iki doğrultuda da birbirine paralel olduğu görülecektir. Bu durumun



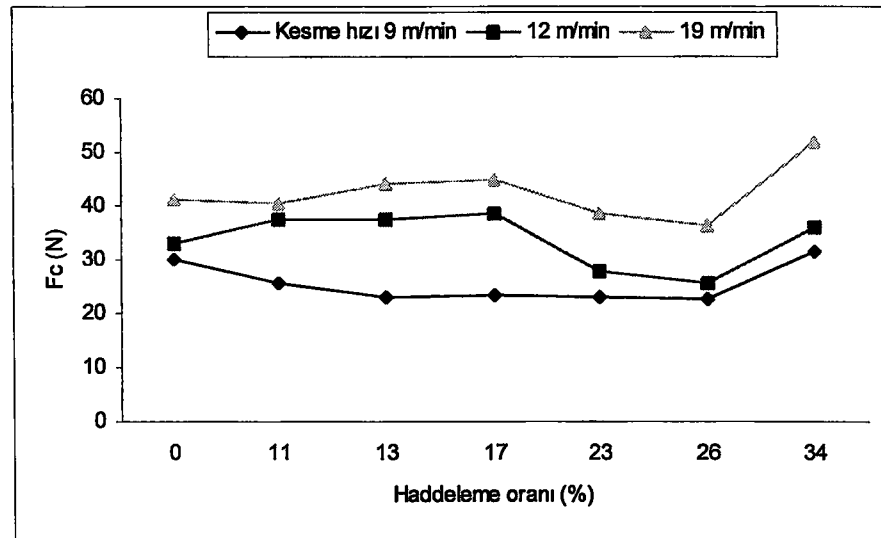
Şekil 6.10. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna dik işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (Fc) değişim

açıklaması, haddeleme doğrultusunda, soğuk haddelenmiş numunelerde olduğu gibi tercihli yönlenmenin belirgin olmadığıdır. Dik doğrultudaki işlemede de pekleşme hızı etkili olmamıştır (Çizelge 5.4).

6.3.3. Haddeleme doğrultusuna çapraz kesme kuvvetleri

Haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede ise kesme kuvvetleri, kesme hızına bağlı olarak farklı eğilim sergilemişlerdir. Şekil 6.11'den de görüleceği üzere, kesme kuvvetlerinde başlangıç numunesi ile önemli farklılık bulunmamakta ve haddeleme oranına bağlı olarak artış göstermemektedir. Ancak % 27 oranında haddelenmiş numunedeki kesme kuvvetlerindeki artış, haddeleme doğrultusuna paralel ve dik doğrultudaki işlemeye benzerdir.

Haddeleme oranı % 11 olan numunede, paralel ve dik doğrultudaki işlemeye benzer kesme kuvvetlerinde düşme eğilimin olmaması kesici takımın yumuşak faz ferritle daha uzun süre temasına atfedilebilir (Şekil 6.2). Çapraz doğrultudaki 19 m/min kesme hızındaki işlemede kesme kuvvetleri teorik kuvvetlerinin üzerinde çıkmıştır.



Şekil 6.11. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede asıl kesme kuvvetlerindeki (F_c) değişim

	Haddeleme doğrultusuna paralel				Haddeleme doğrultusuna dik				Haddeleme doğrultusuna çapraz			
	V=9 m/min	V=12 m/min	V=19 m/min	V=9 m/min	V=12 m/min	V=19 m/min	V=9 m/min	V=12 m/min	V=9 m/min	V=12 m/min	V=19 m/min	V=9 m/min
Başlangıç numunesi												
% 11												
% 13												
% 17												
% 23												
% 26												
% 34												

Şekil 6.12. Başlangıç numunesi, % 11, % 13, % 17, % 23, % 26 ve % 34 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz yönde ve üç ayrı kesme hızında talaş şekilleri ve talaş kıvrım yarıçapları, r (mm)

6.3.4. Talaş şekilleri

Her üç yöndeki işleme doğrultusunda da talaş şekilleri kıvrık ve kısadır. Artan kesme hızıyla bütün işleme doğrultularında, talaş kıvrım yarıçapı ve talaş boyu artmıştır (Şekil 6.12). Gözle yapılan muayene sonucu, talaş yüzeylerinde pürüzlülük açısından önemli fark gözlenmemiştir. Soğuk haddelenmiş numunelerde olduğu gibi talaş kıvrım yarıçapı genellikle kesme hızına bağlı olarak artmış ve talaş kıvrım yarıçapı haddeleme doğrultusuna paralel yönde en az, dik yönde biraz daha büyük ve çapraz yönde en büyüktür. Talaş kıvrım yarıçapı, genel olarak soğuk haddelenmiş numunelerden daha küçüktür.

6.3.5. Tartışma

Sonuç olarak, sıcak haddelenmiş numunelerde, başlangıç numunesine göre metalografik ölçüm sonuçları mukayese edildiğinde; ferrit tane ve perlit koloni boyunun ene oranı (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15), perlit bantları arası mesafe (Şekil 5.16) ve perlit bant kalınlığı (Şekil 5.17), düşüş göstermiştir. Ancak, bu değerler haddeleme miktarına bağlı olarak artış göstermiştir.

Sıcak haddeleme sırasında tanelerin ezilerek uzaması, alt tane sınırlarının bozulması ve yeniden düzenlenmesi sonucu eş eksenli yapının sürdürmesine rağmen (7), haddeleme öncesi yönlenmeye ve deformasyon oranına bağlı olarak yönlenmiş yapıyı sürdürmektedirler (4). Bu sonuç, kesme kuvvetlerinde artışa neden olmuştur. Haddelme oranı % 34 olan numunede hemen hemen soğuk haddelemeye yakın bir yapının elde edilmesi, haddeleme sıcaklığının A_1 sıcaklığının altına düşmesinin yanı sıra, son pasodaki nispeten büyük deformasyon oranının ince taneli bir yapıya (Çizelge 5.4) sebep olmasından kaynaklanmaktadır (7). Düşük karbonlu çeliğin 780 °C'de % 85 haddelenmesinde, hemen hemen soğuk deformasyon yönlenmesi elde edilmiştir (29). Kaynar çeliklerin 860°C'de sıcak haddelenmesinde, yönlenmenin hemen hemen rasgele ve 771°C'de (110) yönlenmesinin olduğu gözlemlenmiştir (33).

Akma ve çekme dayanımları (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19), deformasyon oranına bağlı olarak artmış ancak, çekme dayanımı % 26 oranında haddelenmiş numuneden sonra düşüş göstermiştir. Süneklik, başlangıç numunesinin aksine haddeleme doğrultusuna paralel yönde yüksek ve dik yönde düşük ve aynı yönde deformasyon oranına bağlı olarak sürekli düşüş göstermiştir. Bu durum, tercihli yönlenme sonucu oluşan deformasyon yönlenmesi ve tavlama ile meydana gelen tavlama yönlenmesi etkisi olarak düşünülebilir (4).

Sıcak haddelenmiş numunelerin haddeleme doğrultusuna dik ve paralel işlemede, bütün kesme hızlarında % 11 oranında haddelenmiş numunenin kesme kuvvetlerinde tavlama ile östenit bölgede tane yapısının bozunarak yeni eş eksenli tane yapısının oluşması ve tane büyümesi sebebi ile kesici ucun ferrit fazı ile daha fazla temas sonucu ani düşüş gözlenmiştir. Sıcak haddelenmiş numunelerin kesme kuvvetleri ile J.C analiz sonuçları karşılaştırıldığında, her üç kesme hızında da pekleşme hızı ile doğrusal ilişki kurulamamıştır.

Soğuk ve sıcak haddelenmiş numunelerin kesme kuvvetleri mukayese edildiğinde, soğuk ve sıcak numunelerde haddeleme doğrultusuna paralel ve dik ve çapraz doğrultuda kesme kuvvetleri, sıcak haddelemiş numunelere oranla (paralel ve dik doğrultuda % 11 oranında haddelenmiş numune hariç) düşüktür. Bu durum, soğuk haddeleme sonucu tercihli yönlenme oluşan yönlenmiş yapının, artan mukavemet ve azalan sünekliğe karşın kesme kuvvetlerini düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, sıcak haddelenmiş numunelerde iri tane boyutu ve kesme sırasındaki yüksek pekleşme ile, takım/talaş temas yüzeyinin artması sonucu kesme kuvvetleri de artmaktadır. Bu sonuç, düşük karbonlu çeliklerde sıcak haddelenmiş numunelerin, soğuk haddelenmiş numunelere göre kesme kuvvetinin daha düşük olduğu sonucu ile uyuşmamaktadır (14).

Araki ve Yamamoto'da AISI 4120 tam tavllanmış ferritik-perlitik ve normalize edilmiş çelik numuneler arasında, yapıdaki sertliğe karşın kesme kuvvetlerinde büyük farklılık olmadığını gözlemiştir (9).

6.4. Sıcak Haddelenmiş Numunelerde Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

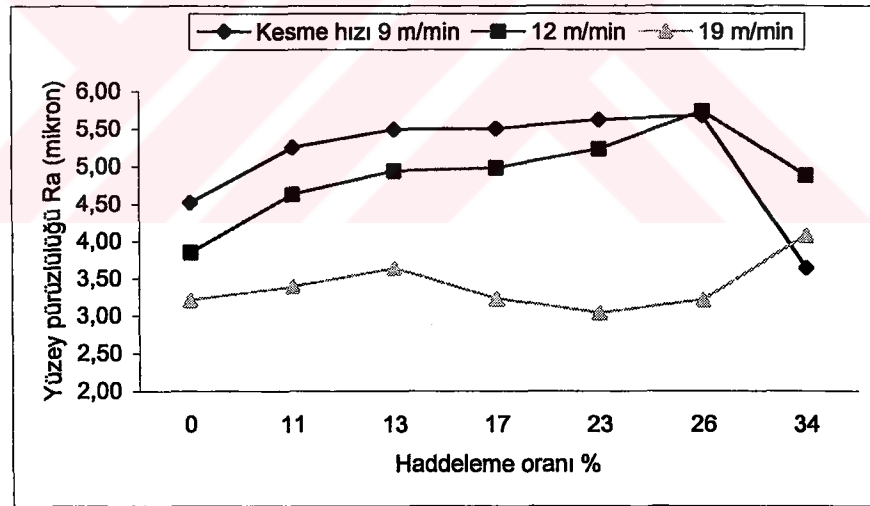
İşlenebilirlik deneylerinde, başlangıç numunesi ile % 11, % 13, % 17, % 23, % 26 ve % 34 oranında sıcak haddelenmiş numunelerin; 9 m/min, 12 m/min ve 19 m/min kesme hızı ve 0,254 mm/min ilerlemede; haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz doğrultuda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6.4’de verilmiştir. Bu numunelerin haddeleme doğrultusuna bağlı olarak, haddeleme doğrultusuna paralel işlemedeki yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.13’de, dik doğrultudaki Şekil 6.14’de ve çapraz doğrultudaki yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.15’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Sıcak haddelenmiş numunelerde haddeleme doğrultusuna bağlı olarak teorik ve ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Ra (μm).

Haddeleme oranı (%)	Kesme hızı (m/min)	İlerleme mm/min	Talaş derinliği (mm)	Yüzey pürüzlülük değeri Ra (μm)			Teorik yüzey pürüzlülük değeri (ortalama) Ra (μm)
				Haddeleme doğrultusuna			
				paralel işleme	dik işleme	çapraz işleme	
Başlangıç numunesi	9	0,254	1,5	4,52	4,40	3,17	0,048
	12	0,254	1,5	3,85	3,70	3,30	0,026
	19	0,254	1,5	3,21	3,99	3,63	0,012
11	9	0,254	1,5	5,25	4,57	4,14	0,048
	12	0,254	1,5	4,63	5,42	4,70	0,026
	19	0,254	1,5	3,39	3,85	4,05	0,012
13	9	0,254	1,5	5,49	4,97	4,34	0,048
	12	0,254	1,5	4,94	5,53	4,18	0,026
	19	0,254	1,5	3,64	4,11	3,29	0,012
17	9	0,254	1,5	5,50	5,18	4,71	0,048
	12	0,254	1,5	4,98	5,92	4,69	0,026
	19	0,254	1,5	3,23	4,36	3,55	0,012
23	9	0,254	1,5	5,62	5,55	4,66	0,048
	12	0,254	1,5	5,23	5,41	4,13	0,026
	19	0,254	1,5	3,04	3,82	3,10	0,012
26	9	0,254	1,5	5,67	5,76	5,38	0,048
	12	0,254	1,5	5,73	5,30	4,60	0,026
	19	0,254	1,5	3,21	3,63	3,12	0,012
34	9	0,254	1,5	3,64	5,20	5,72	0,048
	12	0,254	1,5	4,88	5,60	4,28	0,026
	19	0,254	1,5	4,08	4,05	4,12	0,012

Sıcak haddelenmiş numunelerde, her üç kesme hızında da haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz doğrultuda işlemede, artan kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinde iyileşme gözlenmiştir. Bu durum, literatürle paralellik arz etmektedir. Genel anlamda, kesme hızındaki bir artışın yüzey pürüzlülüğünde iyileşmeye sebep olduğu bilinmektedir (1, 40, 75).

Haddeleme doğrultusuna paralel işlemede; sıcak haddeleme oranına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri kötüleşmiş, % 34 oranında haddelenmiş numunede, ise 9 m/min ve 12 m/min'lik kesme hızlarındaki işlemede yüzey pürüzlülük değerinde ani bir düşüş göstermiştir (Şekil 6.13). Bu durum, % 34 oranında haddelenmiş numunede yönlenmiş tane yapısının belirgin ve pekleşme hızının yüksek olması ve ince tane yapısı ile açıklanabilir (Resim 5.3, Şekil 5.21 ve Çizelge 5.4)



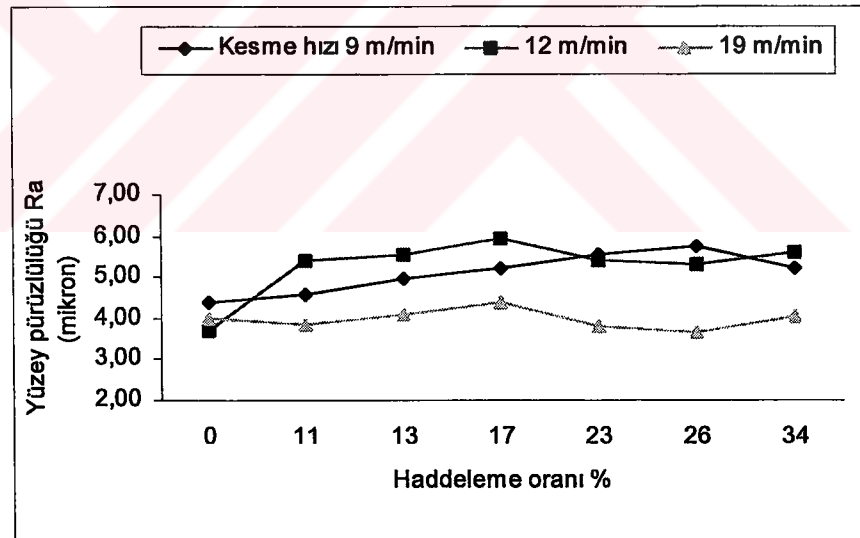
Şekil 6.13. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna paralel işlemedeki yüzey pürüzlülükleri

Haddeleme doğrultusuna dik işlemede; haddeleme oranına bağlı olarak, her üç kesme hızında da yüzey pürüzlülük değerleri artarken, 9 m/min'lik kesme hızında % 34 oranında haddelenmiş numunede ve 12 m/min ve 19 m/min'lik kesme hızlarında, hadde oranı % 17'yi geçtikten sonra düşme eğilimi gözlenmiştir. En yüksek kesme

hızında, başlangıç numunesine göre, haddeme oranına bağlı olarak, yüzey pürüzlülük değerinde hemen hemen değişme olmamıştır (Şekil 6.14).

Haddeme doğrultusuna çapraz işlemede en iyi pürüzlülük değerleri, haddeme doğrultusuna paralel ve dik işlemedeki gibi, en yüksek kesme hızında elde edilmiştir. Kesme kuvvetleri arttıkça yüzey pürüzlülük değerleri iyileşmiş, 19 m/min'lik kesme hızında haddeme oranına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerinde birbirine yakın değerler elde edilirken, % 34 oranında haddelenmiş numunenin yüzey pürüzlülük değerlerinde ani artış gözlenmiştir (Şekil 6.15).

Sonuç olarak; sıcak haddelenmiş numunelerde çapraz doğrultuda 19 m/min'lik kesme hızında elde edilen en yüksek kesme kuvveti değerlerine karşın, en iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

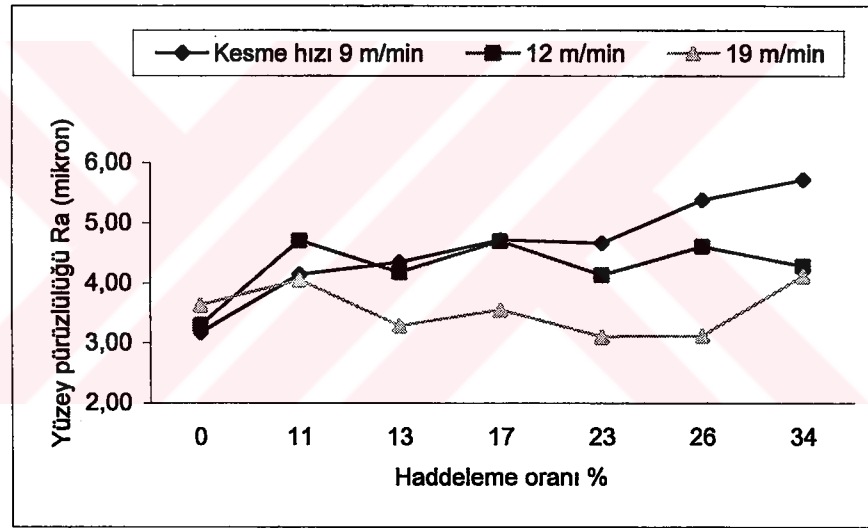


Şekil 6.14. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeme doğrultusuna dik işlemedeki yüzey pürüzlülükleri

Soğuk haddelenmiş numunelerde olduğu gibi takım malzemesi, kesme açısı, talaş derinliği ve ilerleme hızı sabit tutulmuştur. Haddeme doğrultusuna paralel, dik ve çapraz yönlerdeki işlemede, yüzey pürüzlülüğü açısından optimum haddeme oranı % 23 ve % 26 olmasına rağmen sıcak haddeme, genel olarak yüzey pürüzlülüğünü

iyileştirmemiştir. Ayrıca, haddeleme doğrultusu ile yüzey pürüzlülüğü açısından köklü bir ilişki kurulamamıştır. Bu durum, tavlama ile yönlendirilmiş yapının kısmen bozulması (3), ve kaba ve eş eksenli tane yapısının (Resim 5.3 ve Resim 5.4), yığıntı talaş oluşturma eğiliminden kaynaklanabilir.

Soğuk haddelenmiş numunelerde olduğu gibi sıcak haddelenmiş numunelerde de elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, diğer işleme metodlarına göre vargel tezgahında kesme hızının çok düşük olması nedeni ile teorik değerlerin çok üzerinde çıkmıştır (Çizelge 6.4).



Şekil 6.15. Sıcak haddelenmiş numuneler üzerinde 0,254 mm/min ilerlemede kesme hızlarına bağlı olarak haddeleme doğrultusuna çapraz işlemedeki yüzey pürüzlülükleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Soğuk haddeleme ile artan deformasyon oranına bağlı olarak, ferrit tane ve perlit koloni boyunun ene oranı, akma ve çekme dayanımı ile sertlik artmakta, perlit bant aralığı ve perlit bant kalınlığı düşmektedir.
2. Soğuk deformasyon sonucu oluşan yönlenme ve mekanik fiberleşmiş yapı ile meydana gelen mekanik özelliklerin anizotropisi, kesme yönüne (haddeleme doğrultusuna 0, 90 ve 45 derece) bağlı olarak kesme kuvvetlerinde değişime neden olmaktadır. Bu durum haddeleme doğrultusuna çapraz işlemede daha düşüktür.
3. Soğuk şekil değiştirme ile oluşan yönlenme yapı, kesme hızı düştükçe kesme kuvvetlerini düşürmekte, kesme hızındaki artış kesme kuvvetlerini yükseltmektedir.
4. Perlitik bantlı yapı ve perlit bantlarının artan sıklığı ve perlit bant kalınlığındaki azalma kesme kuvvetini düşürmektedir.
5. İnce tane yapısı kesme kuvvetlerini düşürmektedir.
6. Soğuk haddeleme sonucu oluşan pekleşmiş yapı, talaş kaldırma sırasında pekleşme hızını artırmak suretiyle kesme kuvvetlerini düşürmekte ve yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli ve düzenli bir değişiklik oluşturmamaktadır.
7. Sıcak haddeleme, kesme hızındaki artışa paralel olarak, kesme kuvvetlerinde büyük ölçüde artışa sebep olmaktadır.
8. Sıcak haddeleme sonucu oluşan iri ve homojen olmayan tane yapısı genel olarak kesme kuvvetlerinde ve yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olmaktadır.

9. Soğuk haddeleme sonucu, haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve özellikle çapraz doğrultuda işlemede kesme kuvvetinin düşmesi, soğuk haddelemenin kesme sırasında enerji tasarrufu sağlandığını ortaya koymaktadır.

Daha sonraki araştırmalarda aşağıdaki çalışmalar önerilebilir :

1. Benzer bir çalışmada, haddeleme doğrultusuna 45 derecede mekanik özellikler incelenebilir.
2. Yönlenme yapının incelenmesi için x-ray analizi yapılabilir.
3. Kesme işleminde kesici takım olarak, sert karbür takım yerine HSS kesici takım kullanılabilir.
4. Takım ömrü ölçülebilir.

KAYNAKLAR

1. Çakır, M. C., Çeviri, “Modern Talaşlı İmalatın Esasları”, *Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayını*, Bursa, 205-218 (1999)
2. Bhattacharya, D., “Effect of Reduction Ratio on the Machinability of a Medium Carbon Microalloyed Steel”, *Journal of Materials Engineering and Performans*, 3: 484-489 (1994)
3. Yeşil, H., Erdoğan, M., Çeviri, (Hiroshi Yaguchi-Norio Onodera), “Soğuk Şekillendirmenin AISI 12L14 Çeliklerinin İşlenebilirliği Üzerine Etkisi”, *Kara Harp Okulu Bilim Dergisi*, 9 (1): 120-142 Ankara, (1999)
4. Honeycombe, R.W.K., “The Plastic Deformation of Metals 2nd ed.”, *Edward Arnold*, London, 80-110, 128-132, 228-244, 322-341 (1984)
5. Liao, K. C., Friedman, P. A., Pan, J. And Tang, S. C., “Texture Development and Plastic Anisotropy of B.C.C. Strain Hardening Sheet Metals”, *Int. J. Solid Structures*, 35 (36): 5205-5236 (1998).
6. Kayalı, E. S., ve Ensari, C., “Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, *İstanbul Teknik Üniversitesi yayını*, İstanbul, 131-165, 260-293 (1991)
7. Dieter, G. E., “Mechanical Metallurgy”, *MC Graw-Hill*, London, 160, 237-240, 526-529, 534-536, 538, 586-614 (1988)
8. Chin, G. Y., “Metallographic Principles”, Textured Structures, *Metal Handbook*, 8: 229-232 (1973)
9. Yeşil, H. ve Erdoğan, M., Çeviri, (Araki, T., Yamamoto, S., 1979), “Isıl İşlem Görmüş veya Görmemiş Düşük Alaşımlı Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi” *Makine&Metal Teknolojisi Dergisi*, İstanbul, (81): 157-181 (1998)
10. Abeyama, S., Kimura, A., Nakamura S., “The Infuluence of Heat Treatment and Cold Forging on Machinability of Low Alloyed Steels”, *American Society for Metals*, Metals Park, Ohio, 13-28 (1983)
11. Bhattacharya, D., Yanase, M., Katayama, S., et al., “Effect of Pearlite Banded Structure on the Machinability of Low Carbon Resulphurized Free-Machining Steels, Strategies for Automation of Machining” *Proceeding of International Conference*, Orlando, Florida, USA, (5-7): 7-14 (1987)
12. Şahin, Y., “Talaş Kaldırma Prensipleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 2: 96, 114, 115, 188, 201, 202, (2000)

13. Şahin, Y., “Talaş Kaldırma İşlemine Etkileyen Faktörler”, Talaş Kaldırma Prensipleri, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 1: 238, 300-306 (2000)
14. Boulger, F.W., “Machining Characteristics of Steels”, *Metal Handbook*, 9th ed., Properties and Selection Irons and Steels, 1: 565-585 (1987)
15. Finn, M.E., “Machining of Carbon and Alloy Steels”, *Metals Handbook*, ASM, 16: 666–680 (1989)
16. Wolman, N. E., “Good and Bad Structures in Machining Steels”, *Materials and Methods*, 25: 80 (1947)
17. Erdoğan, M., Çeviri, (Smith, W. F.) “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 1: 1, 58 (2000)
18. Erdoğan, M., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 106, 182,183,186,187 (1998).
19. Çapan, L., “Metallere Plastik Şekil Verme”, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 106-115, 207-222 (1999)
20. Sarıtaş S., “Deformation of Metals” Engineering Metallurgy and Materials, *G.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Yayını*, Ankara, 244 (1995)
21. Heckler, A. J., and Granzow, W. G., “Crystallite Orientation Distribution of the Cold Rolled and Recrystallization Textures in Low-Carbon Steels”, *Metallurgical Transactions*, 1: 2089-2094 (1970)
22. Lineau, C., Rey, C., and Viaris de Lesegno, P., “Experimental Analysis of Plastic Deformation of Steel Grains Comparison with Polycrystal Models Prediction”, *Materials Science & Engineering A*, 853-856 (1997)
23. Louchet, F. and Saka, H., “Comments on the Paper : Observation of Dislocation Dynamics in the Electron Microscope by B.W. et al.”, *Materials Science & Engineering A*, 1-5 (2003)
24. Rauch, E. F., “The Stresses and Work Hardening Rates of Mild Steel with Different Dislocation Patterns”, *Materials Science & Engineering A*, 653-656 (1997)
25. Asensio, J., Romano G., et al., “Ferritic Steels Optimization of Hot-Rolled Textures Trough Cold Rolling and Annealing”, *Materials Characterization*, 47: 119-127 (2001)
26. Speich, G. R. and Miller, R. L., “Mechanical Properties of Ferrit-Martensite Steels” Structure and Prop. of Dual-Phase Steels, Ed. By R. A. Kott anda J.W. Morris, *AIME*, 91-117 (1979)

27. Choi, S., Lee, Y. and Hodgson, P. D., "A Comparative Study of Microstructures and Mechanical Properties Obtained by bar and Plate Rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, 124: 329-336 (2002)
28. Smallman, R. E., "Modern Physical Metallurgy 6th ed.", *Butterworth-Heinemann*, London, 204-208 (1998)
29. Barret, C. and Massalki, T.B., "Structure of Metals 3rd rev. ed.", *Pergamon Press*, New York, 35: 566, 580-582, (1993)
30. Diligent, S., Gautier, E., Lemonie, X. and Berveiller, M., "Lattice Orientation Dependence of the Stored Energy During Cold-Rolling of Polycrystalline Steels", *Acta Materialia*, 6: 4079-4088 (2001)
31. Fisher, J. C., Johnston, W.G., Thomson, R. and Vrethend, T. E., "Dislocations and Mechanical Properties of Crystals" Lake, *Placid Conference*, John Wiley, New York and London, 76 (1957)
32. Hindson, R.D., *Proc. International Symposium* on the Annealing of Low Carbon Steel, Lee Wilson Eng. Co., Cleveland, Ohio, 9-17 (1958)
33. Whiteley, R. L., and Wise, D. E., "Flat Rolled Products" *Interscience N. Y.*, III: 43-63 (1962)
34. Goodman, S., R. and Hu, H., "Effect of Hot-Rolling Textured on the Plastic Strain Ratio of Low-Carbon Steels", *Metallurgical Transactions*, 1: 1629-1640 (1970)
35. Sanz, P. J. et al., "Annealing Textures for Drawability: Influence of the Degree of Cold Rolling Reduction for Low-Carbon and Extra Low-Carbon Ferritic Steels", *Science Inc.*, 43: 303-309 (1999)
36. Zambrano, P. C., Guerrero, M. P., Coáls, R. and Leduc, L. A., "Microstructural Analysis of Hot-Rolled, Low-Carbon Steel Strips", *Materials Characterization*, 47: 275-282 (2001).
37. Backofe, W. A., et al. "Fundamentals of Deformation" Processing Sagamore Army Materials Conference, Eds., *Syracuse University Press*, New York, 1: (1964)
38. Hill, R., "Mathematical Theory of Plasticity", *Oxford University Press*, London, 315 (1950)
39. İnceayan, T., "Metal Malzemelerde Dayanıklılaşıma ve Şekil Değiştirme", Haddemele Tekniğinin Esasları, *Türkiye Demir Çelik İşletmeleri Yayını*, Ankara, 1: 12-13 (1989)

40. Bhattacharya, D., "Machinability of Steel", *Journal of Metals*, 487 (1987)
41. "Trent, E. M., Metal Cutting, 2nd ed.", *Butterworths and Company*, London, 183-196, 205 (1984)
42. Mills, B. and Redford, A.H., "Machinability of Engineering Materials", *Applied Science Publishers*, London, 10, 11, 97 (1983)
43. Robat, D., and Bellot, J., "Steels with Improved Machinability Under Varried Conditions", *High Production Machinability*, 195-203 (1985)
44. Smith, Graham T., "Advanced Machining: The Handbook of Cutting Technology", *IFS Publications*, UK, 169 (1989)
45. Boulger, F. W., "Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys 10th ed.", *ASTM International*, 1: 591-602 (1993)
46. "Machinability of Metals", *Physics of Metal Cutting*, Metal Handbook, 149 (1989)
47. Şeker, U., "Takım Tasarımı, Ders Notları", *Gazi Üniversitesi*, Ankara, (1997)
48. Özçatalbaş, Y., "Düşük Alaşımli Çelikte Yığıntı Talaş Oluşumunun İşleme Özelliklerine Etkisi", *8. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi ODTÜ*, Ankara, 25-33 (1999)
49. Sadık, M.I. and Lindström B., "The Role of Tool-Chip Contact Length in Metal Cutting", *Jurnal of Materials Processing Technology*, 37: 613, 627 (1993)
50. Asil Çelik, "İşlenebilirlik ve Kalsiyum Uygulaması", *Teknik Yayın*, Bursa, (12): 29-31 (1994)
51. Joseph, R. A. and Tipnis, V. A., "The Infuluence of Non-Metalik Inclusions on the Machinability of Free-Machining Steels", *Proceedings of Int. Infuluence of Mettallurgy on Machinability of Metals*, *ASM*, Chicago, 55-67, (1975)
52. Apple, C. A., "The Reletionship Between Inclusion and the Machinability of Steel", *Mechanical Working and Steel Processing Proceedings*, 415-429 (1989)
53. Bellot, J., "Steels with İmproved Machinability", *Metallov*, 794-799 (1980)
54. Singh, S. B., Chakrabarti, A. K., and Chattapadhyay, A., B., "A Study of the Effect of Inclusion Content of the Machinability and Wear Characteristics of 0.24 % Carbon steels", *Journals of Materials Processing Technology*, (66): 90-96 (1996)

55. Williams, J. E., Smart, E. F., and Milner, D. R., "The Metallurgy of Machining", Part 2: The Cutting of Single-Phase, Two-Phase and Some Free Machining Alloys, *Metallurgia*, 3: 51-66 (1970)
56. Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles", *Clarendon Press*, Oxford, USA. 369, 395, 499, 500 (1984)
57. Keskin, İ., "Malzeme El Kitabı", *Onursan A.Ş. Yayınları* Ankara, 46-55 (1991)
58. Pickett M. L. and Naylor, D. J., "Effect of Bright Drawing on Machinability of Free Cutting Steel", *Ironmaking and Steelmaking*, 17 (3): 203-213 (1990)
59. Işık. Y., Çakır, M. C., "Tornalama İşlemlerinde Taylor Takım Ömrü Denklemi Deneyisel Olarak İncelenmesi Yüzey Pürüzlüğüne Etkilerinin Deneyisel Olarak İncelenmesi", *Teknoloji*, 4: 47-56 (2001)
60. Araki, T., Osawa, M: and Yamamoto, S., "Review on the Studies for Improving Machinability of Steel in Japan", *Proceedings of Int. Conference, The Machinability of Engineering Materials ASM, Metal Parks*, Ohio, 3-13 (1982)
61. Strafford, K. N. and Audy, J., "Indirect Monitoring of Machinability in Carbon Steels by Measurement of Cutting Forces", *Journals of Materials Processing Technology*, (67): 150-156 (1997)
62. Itoh, T., Abeyama, S., Kimura, A. and Nakamura, S., "Infulence of Cold Working on Machinability", *Proch. Int. Symp. Influence Metall.*, Mach. Steel, Tokyo, 313 (1977)
63. Yamomoto, T., and Kumagai, K., "Effects of Heat Treated Structures and Cold Working on the Machinability of Case and Through-Hardening Steels Based on the Chip-Breaking Characteristics", *Proc. Int. Symp Influence Metall. Mach. Steel*, Tokyo, 471 (1977)
64. Yaguchi, H., "Effects of Cold Working on the Machinability of Low-Carbon Leaded Free-Machining Steel", *NAMRC-XIII*, Berkeley, SME, 245 (1985)
65. Turley, D. M., "Deformed Layers Produced by Machining 70/30 Brass", *J. Inst. Metals*, 96: 82 (1968)
66. Milović, R., and Wallbank, J., "The Machining of Low-Carbon Free Cutting Steels with High Speed Steel Tools", *J. Applied Metalworking*, 2: 249 (1983)
67. Kuşak, E., "Machinability of Free-Cutting Steels", MSc Thesis, *Boğaziçi University*, İstanbul, (1990)

68. Özçatalbaş Y. and Ercan, F., “The Effects of Heat Treatment on the Machinability of Mild Steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 227-238 (2003)
69. Zaslavsskii, A. Ya., Savings of Rolled Stock With the Use of Steels With Good Machinability, *Metallovenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, (12): 20-23 (1987)
70. TS 6956, “Yüzey Pürüzlülüğü-Terimler-Yüzey ve Yüzey Parametreleri İçin”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, Nisan (1989)
71. Boothroyd, G., “Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools”, **McGraw Hill Book Co.**, London, (1987)
72. Kocaböcek, M. A., “Frezelemede Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesi ve Mikro Yapıya Etkilerinin Araştırılması”, Y. Lisans Tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2001)
73. Güral, A., “Çift Fazlı Çeliklerde Martenzit Hacim Oranı ve Morfolojisinin İşlenebilirlik Özellikleri Üzerine Etkileri”, Y. Lisans Tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 65-70 (1999)
74. Işık, Y., Çakır, M. C., “Hız Çeliği Takımlar İçin Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, *Teknoloji*, (1-2): 111-118 (2001)
75. Kopač, J., Bahar, M. and Soković, M., “Optimal Machining Parameters, for Achieving the Desired Surface Roughness in Fine Turning of Cold Pre-Formed Steel Workpieces”, *Journals of Materials Processing Technology*, (42): 707-716 (2002)
76. Kuşak, E., Savaş, M. A. ve Altıntaş S., “Otomat Çeliklerinde İşlenebilirlik”, **Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi ODTÜ**, Ankara, 349-356 (1990)
77. Katayama, S. and Imai, Tatsuya, “Effect of Tool Materials on Surface Machined Roughness and Cutting Force Low-Carbon Resulfurized Free-Machining Steels”, *ISIJ International*, 30 (4): 331-337 (1990)
78. Vol Vander, G. F., “Metallography Principle and Practice”, **Mc Graw-Hill**, New York, 3-10 (1984)
79. Gifkins, R.C., “Optical Microscopy of Metals”, **Pitman**, London, 127-137 (1990)
80. TS 138 EN10002-1, “Metalik Malzemeler-Çekme Deneyi-Bölüm 1”: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1996)

81. TS 207, “Vickers Sertlik Deneyi-Metalik Malzemeler”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (1994)
82. Kurt, A., “Doğrusal Hareketle Talaş Kaldıran Vargel Tezgahında Kesme Kuvvetlerinin Ölçülebilmesi İçin Bir Dinamometre Tasarımı ve İmalatı”, Y. Lisans Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 91 (2001)
83. Şeker, U., Kurt, A., and Çiftçi, İ., “Design and Construction of a Dynamometer for Measurement of Cutting Forces During Machining with Linear Motion”, *Scienc, Materials and Design*, (23): 355-360 (2002)
84. ISO 1832, Indexable Inserts for Cutting Tools Designation, (1991)
85. Akkurt, M., “Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 44-49 (1996)
86. Begeman, Myron L., “Manufacturing Prosses” 2nd ed.”, *John Wiley & Sons, Ins.*, New York, 405 (1947)
87. Özçatalbaş, Y., “Sıcak Hadde Mamulü SAE 8620 Çelik Çubuğun Mekanik Özelliklerindeki Anizotropik Durumun İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, G.Ü. TEF, Ankara, 4: 35-39 (2002)
88. Cribb W.R. and Rigsbee J.M., “Work Hardening Behavior and Its Relationship to the Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Steels” Structure and Properties of Dual-Phase Steels, *Ed. By.R.A. Kott and J.W. Morris, AIME*, 91-117 (1979)
89. Nasibov, A. G., Popova, L: V., Chistyakov, Y. I. And Pavlov, V. V., “Increasing the Strength Characteristics of Low-Carbon Steel St3sp”, *Metallurgy*, (9): 24-25 (1987)
90. Katayama, S. and Hashimura, M., “Effect of Carbon, Phosphorus and Nitrogen Contents in Steel on Machining Surface and Cutting Force”, *ISIJ International*, 30 (6): 457-463 (1990)



EK-1 FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENİNE ORANI

FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENİ ORANI

Numuneler		Taneler (boyut: x 0,4 mikron)																									Ortalama	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Başlangıç numunesi	Ferrit yüzey	en	3	3	5	6	7	12	5	4	4	7	8	9	6	6	7	10	4	4	8	5	4	6	9	6	6	6,16
		boy	3	7	4	3	7	15	9	7	3	10	7	5	5	9	7	14	3	3	6	6	4	8	12	7	6	6,80
	Ferrit oran	1,00	2,33	0,80	0,50	1,00	1,25	1,80	1,75	0,75	1,43	0,88	0,56	0,83	1,50	1,00	1,40	0,75	0,75	0,75	1,20	1,00	1,33	1,33	1,17	1,00	1,10	1,10
		en	4	8	3	5	3	4	5	6	5	4	4	4	8	10	9	8	4	6	7	10	6	3	4	4	3	2
	Ferrit boy	4	14	3	6	5	7	7	6	3	2	5	10	12	5	6	3	4	9	7	5	6	5	3	2	2	2	5,64
		oran	1,00	1,75	1,00	1,20	1,67	1,75	1,40	1,00	0,60	0,50	1,25	1,25	1,20	0,56	0,75	0,75	0,67	1,29	0,70	0,83	2,00	1,25	0,75	0,67	1,00	1,04
	Ferrit ara	en	10	8	8	3	5	8	7	12	8	7	9	11	10	12	4	9	10	11	7	11	7	7	10	7	6	8,28
		boy	8	8	5	5	7	7	5	15	6	7	14	12	13	11	9	12	8	10	6	10	8	9	8	8	6	8,68
	Ferrit oran	0,80	1,00	0,63	1,67	1,40	0,88	0,71	1,25	0,75	1,00	1,56	1,09	1,30	0,92	2,25	1,33	0,80	0,91	0,86	0,91	1,14	1,29	0,80	1,14	1,00	1,05	1,05
		en	4	14	8	14	9	3	6	5	7	13	11	6	7	4	5	5	10	6	5	4	3	5	9	6	10	7,16
	Ferrit ara	boy	5	16	8	17	11	8	7	2	5	12	12	6	7	3	7	11	10	5	6	7	4	2	3	4	10	7,52
		oran	1,25	1,14	1,00	1,21	1,22	2,67	1,17	0,40	0,71	0,92	1,09	1,00	1,00	0,75	1,40	2,20	1,00	0,83	1,20	1,75	1,33	0,40	0,33	0,67	1,00	1,05
	Ferrit merkez	en	12	16	16	11	11	9	19	10	5	8	4	7	8	6	9	3	6	7	10	4	5	5	4	29	10	9,36
		boy	24	13	12	11	6	20	13	10	6	9	10	13	12	5	7	2	7	12	12	4	4	7	4	14	3	9,60
	Ferrit oran	2,00	0,81	0,75	1,00	0,55	2,22	0,68	1,00	1,20	1,13	2,50	1,86	1,50	0,83	0,78	0,67	1,17	1,71	1,20	1,00	0,80	1,40	1,00	0,48	0,30	1,03	1,03
en		7	6	3	1	3	2	3	4	12	11	6	5	8	8	5	7	5	6	11	2	4	3	3	5	4	5,36	
Ferrit merkez	boy	16	4	3	3	5	2	1	4	6	6	3	4	6	6	8	9	5	5	10	4	6	6	2	8	6	5,52	
	oran	2,29	0,67	1,00	3,00	1,67	1,00	0,33	1,00	0,50	0,55	0,50	0,80	0,75	0,75	1,60	1,29	1,00	0,83	0,91	2,00	1,50	2,00	0,67	1,60	1,50	1,03	
% II soğuk haddelenmiş	Ferrit yüzey	en	8	5	4	9	3	8	6	5	7	5	6	3	8	16	4	11	7	4	6	6	11	7	3	10	7	6,76
		boy	10	9	8	10	6	9	8	7	7	7	10	5	6	17	7	12	7	10	9	10	11	15	6	16	10	9,28
	Ferrit oran	1,25	1,80	2,00	1,11	2,00	1,13	1,33	1,40	1,00	1,40	1,67	1,67	0,75	1,06	1,75	1,09	1,00	2,50	1,50	1,67	1,00	2,14	2,00	1,60	1,43	1,37	1,37
		en	7	10	4	3	5	3	6	4	2	5	10	2	3	4	4	11	8	9	5	6	4	5	4	4	3	5,24
	Ferrit boy	10	13	2	4	3	3	6	9	3	7	10	2	3	6	9	12	12	13	4	7	7	7	7	2	4	4	6,60
		oran	1,43	1,30	0,50	1,33	0,60	1,00	1,00	2,25	1,50	1,40	1,00	1,00	1,00	1,50	2,25	1,09	1,50	1,44	0,80	1,17	1,75	1,40	1,75	0,50	1,33	1,26
	Ferrit ara	en	13	9	3	7	6	8	6	6	4	9	7	8	7	5	6	6	6	8	6	6	4	3	7	12	10	6,88
		boy	14	9	7	10	9	10	8	8	5	9	11	12	9	5	9	9	6	11	8	7	4	5	8	10	12	8,60
	Ferrit oran	1,08	1,00	2,33	1,43	1,50	1,25	1,33	1,33	1,25	1,00	1,57	1,50	1,29	1,00	1,50	1,50	1,00	1,38	1,33	1,17	1,00	1,67	1,14	0,83	1,20	1,25	1,25
		en	1	8	7	5	8	5	9	10	9	4	4	3	4	3	8	6	3	11	6	4	2	3	9	8	11	6,04
	Ferrit ara	boy	3	6	5	3	4	5	8	15	12	6	8	6	6	6	6	3	6	19	9	6	3	6	14	6	7	7,12
		oran	3,00	0,75	0,71	0,60	0,50	1,00	0,89	1,50	1,33	1,50	2,00	2,00	1,50	2,00	0,75	0,50	2,00	1,73	1,50	1,50	1,50	2,00	1,56	0,75	0,64	1,18
	Ferrit merkez	en	11	10	4	7	7	8	6	11	5	4	2	4	5	6	8	7	6	7	8	6	5	9	2	5	7	6,40
		boy	8	12	9	10	5	5	5	15	6	7	5	5	5	9	4	8	9	7	7	6	9	10	4	8	9	7,48
	Ferrit oran	0,73	1,20	2,25	1,43	0,71	0,63	0,83	1,36	1,20	1,75	2,50	1,25	1,00	1,50	0,50	1,14	1,50	1,00	0,88	1,00	1,80	1,11	2,00	1,60	1,29	1,17	1,17
en		3	3	5	13	3	5	6	7	4	3	14	11	3	6	8	10	5	6	4	7	6	5	3	3	2	5,80	
Ferrit merkez	boy	4	5	3	7	6	11	13	13	5	4	17	11	7	7	5	10	4	7	5	5	10	5	5	1	1	6,84	
	oran	1,33	1,67	0,60	0,54	2,00	2,20	2,17	1,86	1,25	1,33	1,21	1,00	2,33	1,17	0,63	1,00	0,80	1,17	1,25	0,71	1,67	1,00	1,67	0,33	0,50	1,18	

FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENE ORANI

Numuneler		Taneler (boyut: x 0,4 mikron)																									Ortalama		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
% 15 soğuk haddelenmiş	Yüzey	Ferrit	en	8	4	8	11	4	7	14	9	9	4	7	9	8	6	9	9	11	3	3	9	6	4	2	6	7,12	
		boy	11	6	7	12	18	8	12	18	13	13	8	8	13	14	10	13	15	14	7	4	11	8	4	5	6	10,32	
		oran	1,38	1,50	0,88	1,50	1,64	2,00	1,71	1,29	1,44	2,00	1,14	1,44	1,75	1,67	1,44	1,67	1,27	2,33	1,33	1,22	1,33	1,00	2,50	1,00	1,45		
	Yüzey	Ferrit	en	4	3	3	5	2	2	3	3	9	8	2	10	7	12	9	9	8	2	5	3	2	4	1	3	4,88	
		boy	3	4	4	5	6	4	3	3	3	11	11	5	18	5	10	12	19	6	3	10	4	3	3	1	4	6,40	
		oran	0,75	1,33	1,33	1,67	1,20	2,00	1,50	1,00	1,00	1,22	1,38	2,50	1,80	0,71	0,83	1,33	2,11	0,75	1,50	2,00	1,33	1,50	0,75	1,00	1,33	1,31	
	Yüzey	Ferrit	en	5	7	6	3	5	3	6	9	8	7	5	4	10	11	4	4	4	5	10	4	4	7	7	5	6	5,96
		boy	9	9	10	3	8	3	9	11	9	7	4	6	13	9	6	7	7	6	8	7	8	10	11	11	8	7,96	
		oran	1,80	1,29	1,67	1,00	1,60	1,00	1,50	1,22	1,13	1,00	0,80	1,50	1,30	0,82	1,50	1,75	1,75	1,20	0,80	1,75	2,00	1,43	1,57	2,20	1,33	1,34	
		ara	Perlit	en	6	3	2	4	11	6	4	4	10	3	3	9	2	4	5	4	8	10	7	11	3	4	3	2	5,28
		boy	14	3	4	7	19	4	3	2	15	4	3	13	2	6	8	2	7	15	9	10	4	3	8	3	2	6,80	
% 15 soğuk haddelenmiş	ara	Perlit	oran	2,33	1,00	2,00	1,75	1,73	0,67	0,75	0,50	1,50	1,33	1,00	1,44	1,00	1,50	0,50	0,88	1,50	1,29	0,91	1,33	0,75	2,00	1,00	1,00	1,29	
		en	4	6	10	6	11	6	6	6	4	5	8	11	8	8	10	5	6	15	4	10	8	10	5	8	7,52		
		boy	5	8	13	7	12	8	8	9	5	8	12	9	11	7	8	6	10	20	7	13	10	11	14	6	10	9,48	
	merkez	Ferrit	oran	1,25	1,33	1,30	1,17	1,09	1,33	1,33	1,50	1,25	1,60	1,50	0,82	1,38	0,88	0,80	1,20	1,67	1,33	1,75	1,30	1,25	1,38	1,40	1,20	1,25	1,26
		en	8	3	4	3	5	9	9	6	10	4	8	12	7	5	5	4	7	3	11	6	6	3	3	8	4	6,12	
		boy	9	10	5	3	3	8	11	7	13	6	5	15	10	4	5	3	12	17	17	8	5	4	2	5	6	7,72	
	merkez	Perlit	oran	1,13	3,33	1,25	1,00	0,60	0,89	1,22	1,17	1,30	1,50	0,63	1,25	1,43	0,80	1,00	0,75	1,71	5,67	1,55	1,33	0,83	1,33	0,67	0,63	1,50	1,26
		en	7	6	8	7	4	5	4	5	7	4	9	9	5	4	9	7	10	8	4	3	6	7	5	3	7	6,12	
		boy	20	16	16	9	10	5	6	6	9	8	16	15	9	5	2	15	15	12	6	7	6	8	10	10	6	9,88	
		oran	2,86	2,67	2,00	1,29	2,50	1,00	1,50	1,20	1,29	2,00	1,78	1,67	1,80	1,25	0,22	2,14	1,50	1,50	2,33	1,00	1,14	2,00	3,33	0,86	1,61		
% 19 soğuk haddelenmiş	Yüzey	Ferrit	en	5	3	10	3	3	3	3	3	4	4	6	8	3	4	5	4	5	4	11	5	5	2	1	5	4,48	
		boy	5	3	6	6	4	5	4	7	5	4	8	5	8	6	7	7	6	4	5	14	3	13	3	6	5	5,96	
		oran	1,00	1,00	0,60	2,00	1,33	1,67	1,33	2,33	1,67	1,00	2,00	0,83	1,00	2,00	1,75	1,40	1,50	0,80	1,25	1,27	0,60	2,60	1,50	6,00	1,00	1,33	
	ara	Ferrit	en	6	9	8	6	4	6	5	4	4	3	4	4	7	17	17	12	4	7	6	3	8	6	4	3	5	6,48
		boy	6	9	11	11	9	11	9	12	8	4	4	5	6	21	22	25	6	7	6	6	6	18	8	5	3	11	9,72
		oran	1,00	1,00	1,38	1,83	2,25	1,83	1,80	3,00	2,00	1,33	1,00	1,25	0,86	1,24	1,29	2,08	1,50	1,00	1,00	2,00	2,25	1,33	1,25	1,00	2,20	1,50	
	ara	Ferrit	en	3	7	5	5	8	5	8	7	5	4	7	7	2	4	9	4	5	7	5	6	5	10	2	5	5	5,60
		boy	3	13	11	8	12	8	10	11	6	3	10	9	3	4	11	5	5	6	8	7	7	3	12	3	4	7	7,36
		oran	1,00	1,86	2,20	1,60	1,50	1,60	1,25	1,57	1,20	0,75	1,43	1,29	1,50	1,00	1,22	1,25	1,20	1,14	1,40	1,17	0,60	1,20	1,50	0,80	1,40	1,31	
		merkez	Ferrit	en	5	4	4	8	8	6	8	9	6	6	7	6	5	5	8	6	11	5	9	4	8	7	6	5	6,60
		boy	6	6	6	10	8	6	6	10	8	3	10	7	10	8	11	12	11	7	13	14	7	9	10	10	12	8,80	
% 19 soğuk haddelenmiş	merkez	Ferrit	oran	1,20	1,50	1,50	1,25	1,00	0,75	1,11	1,33	0,50	1,43	1,17	2,00	1,60	1,38	2,00	1,00	1,40	1,44	1,56	1,75	1,13	1,43	1,67	2,40	1,33	
		en	3	3	5	5	7	7	5	4	6	6	5	9	5	4	4	10	6	3	3	5	4	6	3	9	3	5,20	
		boy	6	4	7	9	9	10	3	6	11	10	8	13	3	4	7	10	5	6	3	6	3	5	5	12	4	6,76	
		oran	2,00	1,33	1,40	1,80	1,29	1,43	0,60	1,50	1,83	1,67	1,60	1,44	0,60	1,00	1,75	1,00	0,83	2,00	1,00	1,20	0,75	0,83	1,67	1,33	1,33	1,30	

FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENE ORANI

Numuneler		Taneler (boyut:x 0,4 mikron)																									Ortalama	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
% 23 soğuk haddelenmiş	Yüzey	en	4	6	7	10	7	6	4	5	5	7	8	5	8	9	2	7	3	4	6	2	3	7	4	6	5	
		boy	15	12	8	15	11	12	8	7	8	8	13	9	13	11	10	12	8	9	7	5	4	8	7	9	9	
	Yüzey	oran	3,75	2,00	1,14	1,50	1,57	2,00	2,00	1,40	1,60	1,14	1,63	1,80	1,63	1,22	5,00	1,71	2,67	2,25	1,17	2,50	1,33	1,14	1,75	1,50	1,80	
		en	4	6	4	4	3	2	7	3	6	3	5	4	3	5	7	6	7	6	4	4	3	2	4	4	2	
	ara	boy	10	11	9	8	7	2	7	7	7	4	7	3	4	7	8	5	6	7	7	7	4	2	5	3	4	
		oran	2,50	1,83	2,25	2,00	2,33	1,00	1,00	2,33	1,17	1,33	1,40	0,75	1,33	1,40	1,14	0,83	0,86	1,17	1,75	1,75	1,33	1,00	1,25	0,75	2,00	
	ara	en	7	4	9	4	8	7	8	4	10	3	3	4	6	2	7	4	4	5	6	2	4	5	7	7	3	
		boy	8	6	16	4	6	6	12	7	8	6	5	8	7	10	12	12	7	10	11	6	11	8	8	6	6	
	ara	oran	1,14	1,50	1,78	1,00	0,75	0,86	1,50	1,75	0,80	2,00	1,67	2,00	1,17	5,00	1,71	3,00	1,75	2,00	1,83	3,00	2,75	1,60	1,14	0,86	2,00	
		en	3	4	5	4	9	2	7	5	4	4	4	6	3	3	4	4	4	8	4	5	8	5	3	5	7	
% 27 soğuk haddelenmiş	Yüzey	boy	7	4	5	10	10	3	4	7	11	7	8	10	5	5	5	9	10	6	6	10	5	3	4	6	4	
		oran	2,33	1,00	1,00	2,50	1,11	1,50	0,57	1,40	2,75	1,75	2,00	1,67	1,67	1,67	1,25	2,25	1,25	1,50	1,20	1,25	1,00	0,80	1,20	0,57		
	merkez	en	6	6	3	4	8	10	5	6	8	9	8	4	7	7	6	5	4	5	6	8	6	3	10	6	8	
		boy	10	11	4	7	10	12	9	15	15	14	4	5	18	7	8	6	6	9	10	8	12	5	21	9	9	
	merkez	oran	1,67	1,83	1,33	1,75	1,25	1,20	1,80	2,50	1,88	1,56	0,50	1,25	2,57	1,00	1,33	1,20	1,50	1,80	1,67	1,00	2,00	1,67	2,10	1,50	1,13	
		en	6	8	4	6	8	4	4	3	5	7	3	4	4	8	3	9	7	6	6	4	2	3	3	2	4,88	
	merkez	boy	7	6	7	9	10	8	3	8	6	9	4	6	5	10	6	11	7	9	7	5	3	4	4	4	3	
		oran	1,17	0,75	1,75	1,50	1,25	2,00	0,75	2,67	1,20	1,29	1,33	1,50	1,25	1,25	2,00	1,22	1,00	1,50	1,17	1,25	1,50	1,33	1,33	1,33	1,50	
	% 27 soğuk haddelenmiş	Yüzey	en	9	10	9	7	5	3	6	4	5	10	9	5	9	12	8	9	11	13	9	8	5	7	9	8	7,92
			boy	13	10	10	11	9	7	8	6	10	12	14	7	14	13	11	13	17	8	12	13	8	11	11	7	10,48
Yüzey		oran	1,44	1,00	1,11	1,57	1,80	2,33	1,33	1,50	2,00	1,56	1,40	1,56	1,08	1,38	1,44	1,55	0,62	1,33	1,63	1,60	1,57	1,22	0,88	0,88		
		en	4	6	4	4	7	3	3	7	4	2	6	3	5	4	5	8	15	9	6	6	2	4	5	6	5	
ara		boy	4	9	5	4	12	1	3	18	4	6	5	3	18	7	13	2	6	6	8	9	5	3	2	14	6	
		oran	1,00	1,50	1,25	1,00	1,71	0,33	1,00	2,57	1,00	3,00	0,83	1,00	3,60	1,75	2,60	0,25	0,40	0,67	1,33	1,50	2,50	0,75	0,40	2,33	1,20	
ara		en	4	20	15	7	9	11	12	11	8	12	8	15	11	6	14	11	14	9	14	12	12	11	15	5	5	
		boy	12	23	9	10	12	16	16	16	9	15	7	22	15	8	14	15	14	9	13	19	13	19	22	12	5	
ara		oran	3,00	1,15	0,60	1,43	1,33	1,45	1,33	1,45	1,13	1,25	0,88	1,47	1,36	1,33	1,00	1,36	1,00	1,00	0,93	1,58	1,08	1,73	1,47	2,40	1,00	
		en	7	7	3	14	7	5	3	3	3	4	3	7	3	13	4	10	7	8	7	1	6	2	3	5	9	
ara	boy	8	10	9	12	5	9	3	7	10	7	5	2	12	4	5	5	6	1	1	11	13	5	2	3	20	7	
	oran	1,14	1,43	3,00	0,86	0,71	1,80	1,00	2,33	2,50	2,33	0,71	0,67	0,92	1,00	0,50	0,71	0,75	0,14	1,00	1,83	6,50	1,67	0,67	0,60	2,22		
merkez	en	6	7	8	4	6	7	4	3	6	4	5	4	6	8	7	7	3	7	3	7	4	5	2	3	3	5,04	
	boy	9	4	8	3	9	9	6	5	8	5	6	5	8	7	8	8	3	9	8	8	7	3	3	4	5	6,32	
merkez	oran	1,50	0,57	1,00	0,75	1,50	1,29	1,50	1,67	1,33	1,25	1,20	1,25	1,33	0,88	1,14	1,14	1,00	1,29	2,00	1,60	1,40	1,50	1,50	1,33	1,67	1,25	
	en	3	3	4	1	7	3	8	4	2	5	4	3	5	4	1	4	2	5	4	6	3	7	5	5	3	4,04	
merkez	boy	2	4	6	1	8	4	6	6	3	8	3	4	6	5	1	4	2	6	5	7	7	8	5	8	2	4,84	
	oran	0,67	1,33	1,50	1,00	1,14	1,33	0,75	1,50	1,50	1,60	0,75	1,33	1,20	1,25	1,00	1,00	1,00	1,20	1,25	1,17	2,33	1,14	1,00	1,60	0,67	1,20	

FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENE ORANI

Numuneler			Taneler (boyut:x 0,4 mikron)																									Ortalama		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
% 11 sıcak haddelenmiş	Yüzey	Ferrit	en	7	5	11	9	9	8	10	9	9	9	11	7	7	6	8	15	7	9	10	8	6	12	11	6	7	8,64	
		boy	4	5	15	6	9	9	9	16	9	8	8	12	6	10	7	8	18	5	8	12	7	5	13	11	7	7	9,00	
	Yüzey	Perlit	oran	0,57	1,00	1,36	0,67	1,00	1,13	1,60	1,00	0,89	0,89	1,09	0,86	1,43	1,17	1,00	1,20	0,71	0,89	1,20	0,88	0,83	1,08	1,00	1,17	1,00	1,04	
		en	6	7	7	7	1	7	9	10	4	4	2	7	13	4	5	5	2	11	4	14	9	8	5	8	1	6,40		
	Yüzey	Perlit	boy	4	5	2	3	1	9	9	4	6	6	2	13	19	5	3	7	3	14	3	13	2	8	9	7	1	6,32	
		oran	0,67	0,71	0,29	0,43	1,00	1,29	1,00	0,40	1,50	1,50	1,00	1,86	1,46	1,25	0,60	1,40	1,50	1,27	0,75	0,93	0,22	1,00	1,80	0,88	1,00	0,99		
	ara	Ferrit	en	17	13	4	5	16	13	8	11	10	25	12	9	16	30	14	13	9	8	6	7	9	12	7	12	11,76		
		boy	17	3	7	21	14	12	4	11	9	13	10	9	9	17	18	11	5	5	9	15	23	13	12	4	12	11,32		
	ara	Ferrit	oran	1,00	0,23	1,75	4,20	0,88	0,92	0,50	1,00	0,90	0,52	0,83	1,00	0,56	0,57	1,29	0,85	0,56	0,63	1,13	2,50	3,29	1,44	1,00	0,57	1,00	0,96	
		en	11	10	7	3	9	5	4	28	15	7	32	21	8	4	9	8	9	9	10	4	4	3	3	3	11	9,48		
% 13 sıcak haddelenmiş	Yüzey	Perlit	boy	14	8	15	4	8	7	2	22	7	6	34	14	5	4	15	8	8	12	8	3	3	3	2	4	9	9,00	
		oran	1,27	0,80	2,14	1,33	0,89	1,40	0,50	0,79	0,47	0,86	1,06	0,67	0,63	1,00	1,67	1,00	0,89	1,33	0,80	0,75	0,75	1,00	0,67	1,33	0,82	0,95		
	merkez	Ferrit	en	20	10	19	12	8	11	10	11	9	30	19	16	7	7	5	8	9	9	5	10	6	4	7	6	6	10,56	
		boy	20	11	14	14	5	21	15	9	10	22	10	7	6	4	5	10	11	12	5	11	4	2	10	5	7	10,00		
	merkez	Ferrit	oran	1,00	1,10	0,74	1,17	0,63	1,91	1,50	0,82	1,11	0,73	0,53	0,44	0,86	0,57	1,00	1,25	1,22	1,33	1,00	1,10	0,67	0,50	1,43	0,83	1,17	0,95	
		en	4	4	5	7	5	6	18	15	10	12	12	10	20	5	12	10	15	4	5	6	11	8	11	12	5	9,28		
	merkez	Perlit	boy	2	4	5	5	4	7	17	14	13	12	10	13	9	4	10	8	13	4	4	5	17	8	6	18	4	8,64	
		oran	0,50	1,00	1,00	0,71	0,80	1,17	0,94	0,93	1,30	1,00	0,83	1,30	0,45	0,80	0,83	0,80	0,87	1,00	0,80	0,83	1,55	1,00	0,55	1,50	0,80	0,93		
	% 13 sıcak haddelenmiş	Yüzey	Ferrit	en	3	10	5	10	22	10	3	13	9	15	5	7	5	6	4	8	7	5	4	8	19	16	6	5	11	8,64
			boy	4	9	6	5	28	15	3	18	5	20	4	6	4	6	3	8	6	9	6	6	6	27	27	4	5	3	9,48
Yüzey		Perlit	oran	1,33	0,90	1,20	0,50	1,27	1,50	1,00	1,38	0,56	1,33	0,80	0,86	0,80	1,00	0,75	1,00	0,86	1,80	1,50	0,75	1,01	1,69	0,67	1,00	0,27	1,10	
		en	10	4	10	11	16	14	23	16	18	9	14	15	9	12	10	6	7	15	14	18	11	10	15	16	14	12,68		
ara		Perlit	boy	9	4	18	11	17	14	24	21	21	5	3	2	6	15	10	6	8	24	30	21	9	10	18	19	15	13,60	
		oran	0,90	1,00	1,80	1,00	1,06	1,00	1,04	1,31	1,17	0,56	0,21	0,13	0,67	1,25	1,00	1,00	1,14	1,60	2,14	1,17	0,82	1,00	1,20	1,19	1,07	1,07		
ara		Ferrit	en	10	12	8	8	3	11	14	13	10	10	10	20	7	6	12	5	12	12	7	11	5	5	5	10	7	9,32	
		boy	9	11	9	8	4	11	12	13	10	11	6	21	8	6	11	11	11	12	12	8	13	4	6	4	10	7	9,48	
ara		Ferrit	oran	0,90	0,92	1,13	1,00	1,33	1,00	0,86	1,00	1,00	1,10	0,60	1,05	1,14	1,00	0,92	2,20	1,00	1,00	1,14	1,18	0,80	1,20	0,80	1,00	1,00	1,02	
		en	12	13	18	5	10	4	6	22	6	18	19	10	8	8	9	10	8	6	10	15	10	5	9	4	11	7	10,20	
merkez		Perlit	boy	19	15	21	3	9	2	5	24	5	17	22	8	6	9	10	6	5	15	15	13	3	9	4	12	6	10,52	
		oran	1,58	1,15	1,17	0,60	0,90	0,50	0,83	1,09	0,83	0,94	1,16	0,80	0,75	1,00	1,00	0,75	0,83	1,50	1,00	1,30	0,60	1,00	1,00	1,09	0,86	1,03		
merkez	Ferrit	en	20	10	8	9	7	8	4	30	6	10	4	21	12	18	13	11	11	8	3	15	15	12	4	11	18	11,52		
	boy	10	12	20	16	13	6	6	18	14	11	5	17	9	10	15	15	3	5	6	10	14	6	13	13	11	11,12			
	merkez	oran	0,50	1,20	2,50	1,78	1,86	0,75	1,50	0,60	2,33	1,10	1,25	0,81	0,75	0,56	1,15	1,36	0,27	0,63	2,00	0,67	0,93	0,50	3,25	1,18	0,61	0,97		
merkez	Perlit	en	12	12	9	19	14	7	3	6	15	17	7	4	20	4	2	4	4	8	5	5	5	5	7	19	9	8,88		
	boy	7	31	12	10	6	3	5	8	17	17	4	6	12	8	5	6	6	6	3	3	8	4	11	3	9	10	8,56		
Ortalama			oran	0,58	2,58	1,33	0,53	0,43	0,43	1,67	1,33	1,13	1,00	0,57	1,50	0,60	2,00	2,50	1,50	0,38	0,60	1,60	0,80	2,20	0,43	0,47	1,11	0,96		

FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENE ORANI

Numuneler		Taneler (boyut: x 0,4 mikron)																									Ortalama
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
% 17 sıcak haddelemiş	Ferrit yüzey	21	20	12	21	9	6	10	16	16	6	20	16	16	16	8	11	15	8	12	16	14	12	11	16	20	13,92
	Ferrit boy	15	19	14	20	10	11	10	18	25	8	32	14	10	16	8	10	14	8	11	24	14	20	16	20	22	15,56
	Ferrit oran	0,71	0,95	1,17	0,95	1,11	1,83	1,00	1,13	1,56	1,33	1,60	0,88	0,63	1,00	1,00	0,91	0,93	1,00	0,92	1,50	1,00	1,67	1,45	1,25	1,10	1,12
	Ferrit en	11	7	3	7	6	4	11	15	5	9	16	14	11	10	7	7	6	5	10	7	10	6	9	5	7	8,32
	Ferrit boy	13	9	10	12	6	6	10	20	3	10	10	11	18	10	11	5	6	3	8	8	10	8	11	3	9	9,20
	Ferrit oran	1,18	1,29	3,33	1,71	1,00	1,50	0,91	1,33	0,60	1,11	0,63	0,79	1,64	1,00	1,57	0,71	1,00	0,60	0,80	1,14	1,00	1,33	1,22	0,60	1,29	1,11
	Ferrit en	14	6	12	10	13	10	7	6	8	9	5	11	8	9	5	6	11	10	6	10	11	6	8	17	5	8,92
	Ferrit boy	20	9	23	11	14	11	8	5	8	8	4	12	7	9	6	7	7	8	9	11	11	4	6	15	9	9,68
	Ferrit oran	1,43	1,50	1,92	1,10	1,08	1,10	1,14	0,83	1,00	0,89	0,80	1,09	0,88	1,00	1,20	1,17	0,64	0,80	1,50	1,10	1,00	0,67	0,75	0,88	1,80	1,09
	Ferrit en	7	7	12	2	6	14	7	15	21	6	7	13	8	6	4	12	5	9	19	28	18	6	5	29	5	10,84
	Ferrit boy	13	6	20	2	9	21	8	22	20	7	7	13	11	8	5	12	5	8	20	12	15	7	14	23	11	11,96
% 23 sıcak haddelemiş	Ferrit oran	1,86	0,86	1,67	1,00	1,50	1,50	1,14	1,47	0,95	1,17	1,00	1,00	1,38	1,33	1,25	1,00	1,00	0,89	1,05	0,43	0,83	1,17	2,80	0,79	2,20	1,10
	Ferrit en	35	13	8	8	6	6	20	19	16	7	10	20	5	5	17	16	13	9	17	7	12	8	8	10	7	12,08
	Ferrit boy	26	11	4	12	9	24	24	16	10	10	5	10	5	7	10	36	19	11	23	9	10	10	5	10	6	12,88
	Ferrit oran	0,74	0,85	0,50	1,50	1,50	4,00	1,20	0,84	0,63	1,43	0,50	0,50	1,00	1,40	0,59	2,25	1,46	1,22	1,35	1,29	0,83	1,25	0,63	1,00	0,86	1,07
	Ferrit en	8	22	2	6	16	7	15	7	12	12	15	18	5	9	9	2	1	5	7	6	4	3	5	4	3	8,12
	Ferrit boy	11	18	9	9	10	3	17	3	15	19	20	24	8	3	11	2	2	4	6	3	4	4	2	1	2	8,40
	Ferrit oran	1,38	0,82	4,50	1,50	0,63	0,43	1,13	0,43	1,25	1,58	1,33	1,33	1,60	0,33	1,22	1,00	2,00	0,80	0,86	0,50	1,00	1,33	0,40	0,25	0,67	1,03
	Ferrit en	11	12	7	10	10	13	6	20	16	12	6	12	18	7	11	3	7	5	12	18	11	5	8	10	3	10,12
	Ferrit boy	9	21	6	12	12	19	5	20	22	10	6	15	21	7	18	5	9	7	18	7	23	4	9	13	8	12,24
	Ferrit oran	0,82	1,75	0,86	1,20	1,20	1,46	0,83	1,00	1,38	0,83	1,00	1,25	1,17	1,00	1,64	1,67	1,29	1,40	1,50	0,39	2,09	0,80	1,13	1,30	2,67	1,21
	Ferrit en	5	2	12	2	5	3	1	4	8	9	4	17	3	12	14	15	6	5	2	3	7	3	5	3	1	6,04
% 23 sıcak haddelemiş	Ferrit boy	4	6	15	3	5	4	3	4	9	8	6	18	5	12	10	19	7	6	3	4	8	4	3	3	3	6,88
	Ferrit oran	0,80	3,00	1,25	1,50	1,00	1,33	3,00	1,00	1,13	0,89	1,50	1,06	1,67	1,00	0,71	1,27	1,17	1,20	1,50	1,33	1,14	1,33	0,60	1,00	3,00	1,14
	Ferrit en	3	16	13	11	6	7	6	14	12	10	17	18	12	10	6	9	8	8	20	6	9	10	10	13	7	10,44
	Ferrit boy	4	22	13	12	7	8	6	20	11	9	13	18	11	11	4	11	6	10	22	4	8	11	14	20	12	11,48
	Ferrit oran	1,33	1,38	1,00	1,09	1,17	1,14	1,00	1,43	0,92	0,90	0,76	1,00	0,92	1,10	0,67	1,22	0,75	1,25	1,10	0,67	0,89	1,10	1,40	1,54	1,71	1,10
	Ferrit en	3	5	4	2	4	17	4	4	6	7	6	12	15	6	3	2	15	8	10	22	10	9	3	3	3	7,32
	Ferrit boy	2	6	4	4	9	10	3	6	8	9	4	17	15	9	4	7	17	9	22	14	12	3	4	2	3	8,12
	Ferrit oran	0,67	1,20	1,00	2,00	2,25	0,59	0,75	1,50	1,33	1,29	0,67	1,42	1,00	1,50	1,33	3,50	1,13	1,13	2,20	0,64	1,20	0,33	1,33	0,67	1,00	1,11
	Ferrit en	18	24	16	11	10	6	9	17	12	5	2	18	12	20	12	13	29	7	6	5	6	5	8	1	7	11,12
	Ferrit boy	12	15	16	8	6	9	15	13	19	8	10	34	12	23	12	12	27	8	5	4	6	6	3	3	10	11,84
	Ferrit oran	0,67	0,63	1,00	0,73	0,60	1,50	1,88	0,76	1,58	1,60	5,00	1,89	1,00	1,15	1,00	0,92	0,93	1,14	0,83	0,80	1,00	1,20	0,38	3,00	1,43	1,06
% 23 sıcak haddelemiş	Ferrit en	3	10	6	14	1	2	9	7	3	8	18	7	2	7	2	14	6	3	11	8	4	2	2	6	2	6,28
	Ferrit boy	2	15	3	13	3	2	21	6	3	12	8	5	7	5	6	12	8	3	8	9	2	4	3	4	4	6,72
	Ferrit oran	0,67	1,50	0,50	0,93	3,00	1,00	2,33	0,86	1,00	1,50	0,44	0,71	3,50	0,71	3,00	0,86	1,33	1,00	0,73	1,13	0,50	2,00	1,50	0,67	2,00	1,07

FERRİT TANE VE PERLİT KOLONİ BOYUNUN ENE ORANI

Numuneler		Taneler (boyut:x 0,4 mikron)																									Ortalama
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
% 26 sicaak haddelenmiş	en	16	17	12	5	5	3	12	19	10	7	2	5	10	5	8	11	7	17	9	10	5	7	5	4	5	8,64
	boy	12	16	18	10	10	13	13	10	11	10	4	7	9	7	20	12	15	13	9	14	6	10	7	6	5	10,68
	oran	0,75	0,94	1,50	2,00	2,00	4,33	1,08	0,53	1,10	1,43	2,00	1,40	0,90	1,40	2,50	1,09	2,14	0,76	1,00	1,40	1,20	1,43	1,40	1,50	1,00	1,24
	en	7	6	7	15	20	5	28	20	19	20	12	6	16	18	18	12	10	15	2	9	12	2	6	1	4	11,60
	boy	11	10	6	39	46	10	26	15	10	15	24	22	13	17	14	8	10	12	8	11	8	2	3	3	4	13,88
	oran	1,57	1,67	0,86	2,60	2,30	2,00	0,93	0,75	0,53	0,75	2,00	3,67	0,81	0,94	0,78	0,67	1,00	0,80	4,00	1,22	0,67	1,00	0,50	3,00	1,00	1,20
	en	21	14	6	13	10	13	9	10	10	7	7	5	5	7	7	5	6	5	5	8	5	5	9	10	12	8,56
	boy	12	19	11	21	12	16	9	20	8	11	7	7	2	8	9	11	13	4	6	12	6	4	7	7	11	10,12
	oran	0,57	1,36	1,83	1,62	1,20	1,23	1,00	2,00	0,80	1,57	1,00	1,40	0,40	1,14	1,29	2,20	2,17	0,80	1,20	1,50	1,20	0,80	0,78	0,70	0,92	1,18
	en	4	16	2	15	14	8	3	4	10	8	20	8	5	11	13	4	3	11	8	4	9	10	3	4	4	4
boy	8	13	3	21	18	8	5	6	13	9	31	9	6	10	14	6	4	15	6	5	5	14	3	4	5	5	9,64
oran	2,00	0,81	1,50	1,40	1,29	1,00	1,67	1,50	1,30	1,13	1,55	1,13	1,20	0,91	1,08	1,50	1,33	1,36	0,75	1,25	0,56	1,40	1,00	1,00	1,25	1,20	
% 34 sicaak haddelenmiş	en	7	13	14	6	12	7	8	7	11	14	9	4	5	4	5	7	21	18	9	4	8	4	17	5	6	9,00
	boy	12	11	15	11	11	9	7	9	18	12	9	3	7	6	9	7	20	24	5	6	8	5	19	6	3	10,08
	oran	1,71	0,85	1,07	1,83	0,92	1,29	0,88	1,29	1,64	0,86	1,00	0,75	1,40	1,50	1,80	1,00	0,95	1,33	0,56	1,50	1,00	1,25	1,12	1,20	0,50	1,12
	en	4	11	4	5	13	15	18	3	4	14	5	6	11	5	9	10	8	5	3	4	8	4	4	4	4	7,24
	boy	3	15	3	4	9	22	20	2	4	20	6	5	18	4	7	11	7	3	3	3	11	2	6	5	3	7,84
	oran	0,75	1,36	0,75	0,80	0,69	1,47	1,11	0,67	1,00	1,43	1,20	0,83	1,64	0,80	0,78	1,10	0,88	0,60	1,00	0,75	1,38	0,50	1,50	1,25	0,75	1,08
	en	7	9	7	7	4	4	5	10	5	10	14	6	12	9	13	11	11	8	9	9	6	7	7	4	3	7,88
	boy	9	10	9	9	6	11	10	13	6	12	15	9	17	9	18	13	10	9	11	13	9	9	8	9	6	10,40
	oran	1,29	1,11	1,29	1,29	1,50	2,75	2,00	1,30	1,20	1,20	1,07	1,50	1,42	1,00	1,38	1,18	0,91	1,13	1,22	1,44	1,50	1,29	1,14	2,25	2,00	1,32
	en	3	5	6	7	7	5	6	7	5	6	3	3	4	7	3	3	9	5	5	4	6	5	6	3	3	5,04
boy	4	5	8	8	9	7	7	4	6	6	4	4	5	8	4	5	11	10	6	9	8	6	6	5	5	6,40	
oran	1,33	1,00	1,33	1,14	1,29	1,40	1,17	0,57	1,20	1,00	1,33	1,33	1,25	1,14	1,33	1,67	1,22	2,00	1,20	2,25	1,33	1,20	1,00	1,67	1,67	1,27	
en	7	6	5	13	4	5	8	4	4	9	6	7	4	7	8	7	6	2	9	6	3	6	7	5	8	6,24	
boy	9	12	7	14	5	8	8	6	7	12	7	9	6	6	7	7	7	9	3	9	7	5	9	9	6	11	7,92
oran	1,29	2,00	1,40	1,08	1,25	1,60	1,00	1,50	1,75	1,33	1,17	1,29	1,50	0,86	0,88	1,00	1,50	1,50	1,00	1,17	1,67	1,50	1,29	1,20	1,38	1,27	
en	3	3	3	4	3	10	4	3	5	10	4	7	3	5	9	9	5	2	2	4	6	8	3	4	4	4	4,92
boy	4	5	5	3	4	11	3	3	3	4	11	8	5	4	5	11	12	14	6	7	7	6	7	5	6	5	6,44
oran	1,33	1,67	1,67	0,75	1,33	1,10	0,75	1,00	0,80	1,10	2,00	0,71	1,33	1,00	1,22	1,33	2,80	3,00	3,50	1,75	1,00	0,88	1,67	1,50	1,25	1,31	
en	12	13	4	8	4	4	2	4	3	3	3	3	9	7	7	6	7	7	8	7	4	4	8	7	4	4	6,12
boy	12	10	5	6	5	10	6	6	6	6	4	3	4	12	9	7	10	7	7	6	2	3	9	11	8	4	6,88
oran	1,00	0,77	1,25	0,75	1,25	2,50	3,00	1,50	2,00	1,33	1,00	0,44	1,71	1,29	1,17	1,43	1,00	0,88	0,86	0,50	0,75	1,13	1,38	1,14	1,00	1,12	
en	10	13	5	5	5	3	5	5	5	4	4	3	7	10	4	3	7	5	6	5	5	4	4	4	4	4	5,36
boy	3	12	4	5	5	4	7	7	7	5	4	2	7	11	7	5	9	5	8	6	6	4	6	5	4	4	5,88
oran	0,30	0,92	0,80	1,00	1,00	1,33	1,40	1,40	1,40	1,25	1,00	0,67	1,00	1,10	1,75	1,67	1,29	1,00	1,33	1,20	1,20	1,00	1,50	1,50	1,25	1,00	1,10



EK-2 PERLİT BANTLARI ARASI MESAFEDEKİ DEĞİŞİM

PERLİT BANTLARI ARASI MESAFEDEKİ DEĞİŞİM

Numuneler		Sayım adedi																									Ortalama	Mikron
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
0	yüzey	20	21	19	20	21	20	18	20	20	18	17	20	19	21	20	19	21	20	17	19	19	20	19	17	19	19,36	25,83
	ara	21	20	17	18	17	19	19	18	18	18	19	17	17	17	22	18	18	18	17	19	18	15	18	17	18	18,12	27,59
	merkez	22	18	17	17	18	16	15	21	18	20	16	19	18	19	18	14	20	18	19	14	17	17	15	18	19	17,72	28,22
11	yüzey	18	20	17	14	17	18	18	22	20	20	24	21	22	21	24	18	20	22	20	18	20	22	22	23	20,00	25,00	
	ara	19	18	18	19	17	21	18	18	19	19	18	20	18	19	21	18	20	20	19	19	19	18	19	20	18,88	26,48	
	merkez	14	19	18	18	18	20	19	19	20	19	19	17	19	17	19	19	20	19	19	18	15	18	18	18	18	18,32	27,29
15	yüzey	19	26	22	20	19	19	18	21	20	21	23	17	21	21	22	23	21	18	20	19	20	21	20	18	21	20,40	24,51
	ara	24	22	19	21	21	21	21	22	21	19	19	21	19	21	18	19	19	18	19	18	18	19	19	19	19,88	25,15	
	merkez	19	22	21	23	22	19	20	19	19	19	19	18	20	18	22	20	20	19	18	18	19	18	19	19	19	19,44	25,72
19	yüzey	21	23	22	22	20	22	21	20	22	20	20	20	20	20	20	21	22	21	22	21	21	21	20	21	20	21,00	23,81
	ara	21	21	22	23	21	21	19	21	19	19	19	20	19	18	21	20	21	19	19	19	20	20	19	20	21	20,08	24,90
	merkez	21	22	20	21	22	24	22	18	20	21	19	19	18	20	19	18	19	18	19	21	18	19	20	18	21	19,96	25,05
23	yüzey	21	24	25	23	27	23	25	22	25	21	22	20	23	22	23	21	23	25	24	24	26	25	23	27	25	23,56	21,22
	ara	22	21	20	23	22	23	22	22	24	20	21	23	22	21	24	20	24	20	21	24	22	24	23	21	22	22,04	22,69
	merkez	21	23	25	24	21	23	21	19	21	21	18	23	22	19	22	19	22	19	21	19	21	22	21	18	19	20,92	23,90
27	yüzey	20	25	25	27	25	27	24	23	24	23	25	22	25	27	26	23	27	23	25	24	25	26	27	23	27	24,72	20,23
	ara	23	25	21	24	21	23	19	22	22	22	24	21	25	24	25	23	23	21	22	23	22	24	25	23	23	22,80	21,93
	merkez	20	21	22	21	20	21	20	24	22	21	22	22	22	23	24	22	21	24	21	22	21	23	22	24	22	21,88	22,85
11	yüzey	16	16	13	16	15	14	19	14	14	15	16	15	15	16	15	14	15	16	20	19	18	15	14	14	15	15,56	32,13
	ara	15	18	16	16	12	20	17	14	13	20	18	14	16	14	13	14	19	18	13	19	13	13	14	13	14	15,20	32,89
	merkez	13	13	15	15	15	14	15	13	12	13	13	14	16	16	16	15	14	15	13	16	14	14	16	13	15	14,32	34,92
13	yüzey	21	21	15	21	18	15	19	15	16	17	14	14	17	16	16	17	14	17	16	21	16	14	17	17	14	16,72	29,90
	ara	18	16	15	19	14	17	17	17	16	17	17	17	15	16	16	17	16	15	16	15	15	14	14	15	16	16,00	31,25
	merkez	18	18	15	14	15	15	15	16	12	14	15	15	15	15	14	15	14	14	14	15	13	19	17	15	17	15,16	32,98
17	yüzey	15	15	19	20	18	21	19	17	21	16	18	17	20	20	16	17	16	18	16	16	20	16	15	15	14	17,40	28,74
	ara	17	17	21	17	18	27	13	16	15	16	15	14	13	16	15	17	16	14	13	15	14	15	16	16	16	16,08	31,09
	merkez	20	21	18	14	14	14	15	14	12	18	14	16	15	17	17	15	14	13	15	14	15	15	15	16	16	15,44	32,38
23	yüzey	17	18	17	17	18	15	19	18	18	18	17	16	18	19	19	17	17	16	17	17	19	16	18	18	19	17,52	28,54
	ara	18	17	14	19	19	16	19	17	16	17	15	15	18	16	15	16	15	18	14	17	16	18	17	18	16,68	29,98	
	merkez	18	16	17	19	14	16	14	14	14	13	12	13	17	20	15	14	15	16	17	19	18	17	18	17	18	16,00	31,25
26	yüzey	15	15	16	16	18	20	17	18	19	17	19	19	17	19	17	19	17	19	18	20	19	18	19	17	17	17,92	27,90
	ara	14	16	16	16	16	17	19	18	17	17	18	18	19	18	17	18	18	16	17	17	18	18	17	18	17,20	29,07	
	merkez	17	16	15	16	17	15	18	16	18	17	18	15	14	18	16	16	16	19	19	19	19	20	16	17	15	16,88	29,62
34	yüzey	20	19	17	20	17	18	18	18	19	18	18	20	17	18	20	18	17	18	20	17	18	19	19	19	20	18,48	27,06
	ara	24	21	24	21	21	19	20	20	19	19	17	21	20	17	20	20	23	20	20	21	17	20	19	16	18	19,88	25,15
	merkez	22	21	21	20	21	19	20	21	20	21	22	20	19	21	22	20	19	20	21	22	20	21	19	18	20	20,40	24,51

Soğuk haddelenmiş (%)

Sıcak haddelenmiş (%)



EK-3 ÇEKME DENEY SONUÇLARI

ÇEKME DENEY SONUÇLARI

Numuneler	Haddeleme yönü	Akma dayanımı (N/mm ²)						Çekme dayanımı (N/mm ²)						ORT.						% Uzama						ORT.
		389	374	378	383	377	380,2	545	465	487	480	480	491,4	47	45,5	41	42,0	46,0	44,3							
0	paralel																									
	dik																									
11	paralel	502	516	508	502	505	506,6	550	573	580	563	575	568,2	23,0	19,5	24,5	23,5	21,0	22,3							
	dik	511	501	504	502	504	504,4	605	548	565	540	542	560,0	24,5	21,5	22,0	21,0	20,0	21,8							
15	paralel	454	499	552	517	525	509,4	546	542	590	590	580	569,6	19,0	20,5	19,5	22,0	22,0	20,6							
	dik	456	519	521	515	515	505,2	600	544	541	565	560	562,0	23,5	20,0	20,0	18,5	18,0	20,0							
19	paralel	515	520	520	517	519	518,2	574	582	573	595	588	582,4	20,0	21,0	22,5	19,0	17,5	20,0							
	dik	481	497	485	486	490	487,8	571	604	572	558	570	575,0	18,0	16,0	18,0	17,5	18,0	17,5							
23	paralel	527	516	538	520	521	524,4	591	584	588	587	585	587,0	20,5	20,0	19,2	20,0	20,0	19,9							
	dik	510	453	508	500	490	492,2	604	524	590	584	594	579,2	9,5	23,0	14,5	16,0	17,5	16,1							
27	paralel	533	527	510	520	518	521,6	604	599	609	603	604	603,8	17,0	16,0	15,0	16,0	16,0	16,0							
	dik	486	488	482	490	491	487,4	588	580	592	585	590	587,0	12,5	13,0	9,5	11,0	12,0	11,6							
11	paralel	372	378	369	372	375	373,2	479	477	479	480	479	478,8	46,5	45,0	45,5	45,5	46,0	45,7							
	dik	365	372	370	370	365	368,4	458	463	469	464	466	464,0	40,0	45,5	45,5	43,5	45,0	43,9							
13	paralel	376	388	370	380	381	379,0	482	490	486	480	482	484,0	44,5	44,0	45,5	46,5	46,0	45,3							
	dik	372	367	376	375	372	372,4	468	472	467	470	472	469,8	40,5	45,0	40,0	44,0	45,0	42,9							
17	paralel	388	380	400	391	390	389,8	471	483	495	504	501	490,8	44,0	44,5	47,0	46,0	46,0	45,5							
	dik	389	383	376	390	385	384,6	477	471	470	474	472	472,8	46,5	44,0	45,5	40,0	40,0	43,2							
23	paralel	387	391	383	388	390	387,8	491	489	496	499	495	494,0	45,0	45,5	45,5	45,0	45,0	45,2							
	dik	395	390	386	392	390	390,6	475	470	469	472	474	472,0	42,5	45,5	40,0	43,0	43,0	42,8							
26	paralel	390	392	386	392	385	389,0	498	495	499	497	496	497,0	45,0	46,0	45,0	45,0	46,0	45,4							
	dik	418	405	395	410	407	407,0	533	476	460	460	460	477,8	44,5	45,0	41,0	40,0	40,0	42,1							
34	paralel	423	421	386	450	420	420,0	473	476	455	490	470	472,8	46,0	47,0	43,5	44,0	43,5	44,8							
	dik	419	414	405	406	414	411,6	465	470	468	470	466	467,8	39,0	46,5	40,5	40,5	42,0	41,7							
Soğuk haddeme (%)																										
Sıcak haddeme (%)																										



EK-4 MALZEMELERİN SERTLİK ÖLÇÜM DEĞERLERİ

DİLİMLENMİŞ NUMUNELERİN SERTLİK DEĞERLERİ HV (Vickers)

Numuneler		Yüzey	Merkezden uzaklık (mm)					Merkez	Ortalama
			10	8	6	4	2		
Soğuk haddelenmiş (%)	0	a	144	137	134	134	134	138	136,83
		aa	138	142	142	142	142	142	141,33
		b	135	130	130	130	130	130	130,83
		c*	133	133	137	137	151	139	138,33
		d*	124	127	131	133	133	133	130,17
	11	a	171	166	166	168	169	178	169,67
		aa	164	166	166	168	169	178	168,50
		b	168	165	168	174	169	174	169,67
		c	169	169	169	169	169	174	169,83
		d	176	168	168	168	168	168	169,33
	15	a	167	176	175	175	175	175	173,83
		aa	170	172	175	175	176	176	174,00
		b	176	176	176	176	176	176	176,00
		c	185	178	175	170	170	170	174,67
		d	164	164	171	179	175	175	171,33
	19	a	171	174	174	181	179	183	177,00
		aa	178	177	180	182	182	183	180,33
		b	175	180	179	182	182	184	180,33
		c	188	188	187	193	193	177	187,67
		d	188	191	192	187	190	200	191,33
	23	a	174	174	178	183	187	187	180,50
		aa	174	180	188	185	179	192	183,00
		b	183	186	186	182	184	185	184,33
		c	186	185	186	186	184	187	185,67
		d	178	186	186	181	190	197	186,33
	27	a	171	177	182	189	183	187	181,50
		aa	189	192	197	195	199	200	195,33
		b	178	183	183	184	185	195	184,67
		c	186	196	187	183	183	183	186,33
		d	194	192	190	186	186	186	189,00
Sıcak haddelenmiş (%)	11	a	128	128	128	128	128	127	127,83
		aa	134	134	126	126	133	133	131,00
		b	131	135	132	130	130	127	130,83
		c	125	125	129	121	126	126	125,33
		d	140	130	130	148	148	148	140,67
	13	a	132	135	130	130	130	132	131,50
		aa	132	132	125	130	130	133	130,33
		b	133	133	133	134	129	133	132,50
		c	130	131	129	127	154	167	139,67
		d	135	135	135	135	135	135	135,00
	17	a	133	133	127	127	127	127	129,00
		aa	145	145	130	130	130	130	135,00
		b	163	131	131	131	125	130	135,17
		c	126	126	126	126	126	126	126,00
		d	126	126	126	126	126	127	126,17
	23	a	135	128	128	128	125	127	128,50
		aa	125	127	129	129	133	132	129,17
		b	157	157	142	128	130	135	141,50
		c	118	124	135	142	136	143	133,00
		d	143	143	127	143	148	143	141,17
	26	a	141	136	133	133	140	134	136,17
		aa	136	138	130	130	130	130	132,33
		b	130	130	130	130	130	134	130,67
		c	134	134	134	134	125	126	131,17
		d	137	137	142	142	138	136	138,67
	34	a	123	123	126	128	130	127	126,17
		aa	126	126	126	130	127	127	127,00
		b	127	127	133	133	137	137	132,33
		c	127	127	127	125	125	127	126,33
		d	120	124	126	126	126	126	124,67

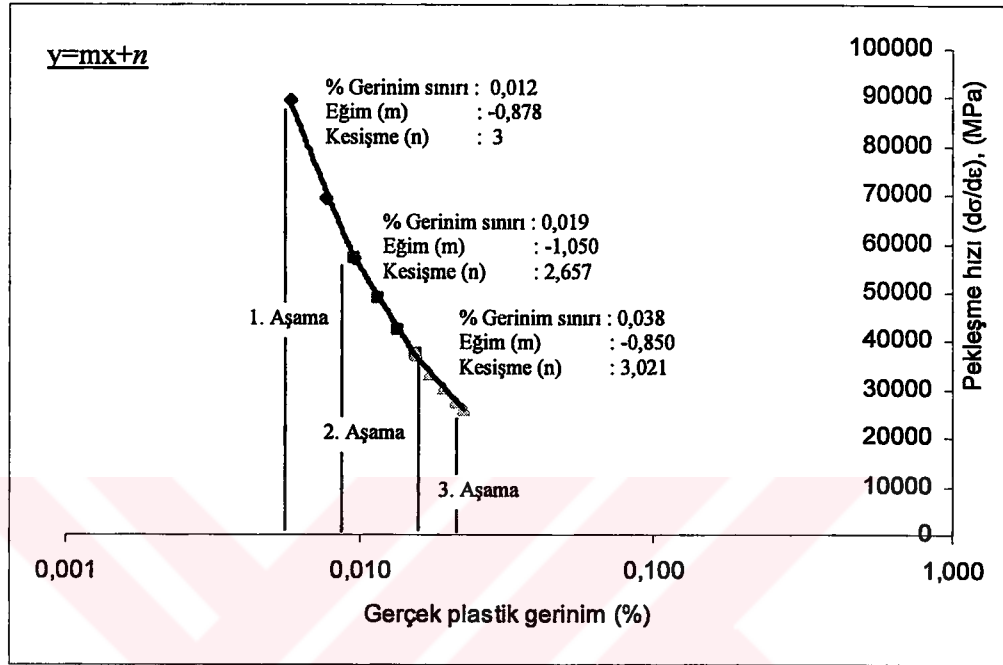
DİLİMLENMEMİŞ NUMUNELERİN SERTLİK DEĞERLERİ HV (Vickers)

Numuneler		Yüzey	Merkezden uzaklık (mm)						Merkez	Ortalama
			12	10	8	6	4	2		
Soğuk haddelenmiş (%)	0	a	132	127	133	125	130	132	137	130,86
		b	156	148	140	138	137	135	131	140,71
		c*	132	127	131	131	131	132	131	130,71
	11	a	162	165	164	172	176	178	179	170,86
		b	176	174	175	176	177	178	183	177,00
		c	166	165	171	168	166	168	169	167,57
	15	a	165	164	166	167	168	167	171	166,86
		b	181	183	185	185	183	183	183	183,29
		c	165	160	164	159	163	163	165	162,71
	19	a	180	183	181	182	188	178	193	183,57
		b	177	175	175	177	178	187	195	180,57
		c	164	166	165	170	174	172	171	168,86
	23	a	182	181	180	183	186	191	192	185,00
		b	186	177	171	185	201	209	212	191,57
		c	167	170	174	170	170	172	170	170,43
	27	a	178	179	178	183	191	197	206	187,43
		b	177	191	191	191	196	194	194	190,57
		c	173	176	170	175	176	177	180	175,29
Sıcak haddelenmiş (%)	11	a	140	140	141	137	141	140	149	141,14
		b	142	140	136	133	142	144	147	140,57
		c	162	158	154	160	158	162	157	158,71
	13	a	141	139	138	136	145	141	139	139,86
		b	131	132	132	136	134	137	131	133,29
		c	145	142	140	137	136	138	136	139,14
	17	a	146	146	151	146	150	154	153	149,43
		b	128	132	137	136	150	147	141	138,71
		c	140	138	132	144	137	137	138	138,00
	23	a	142	142	141	130	135	142	142	139,14
		b	147	148	143	151	143	150	149	147,29
		c	138	137	136	133	138	135	138	136,43
	26	a	143	143	130	141	141	148	144	141,43
		b	134	135	133	136	144	146	142	138,57
		c	139	144	140	146	140	145	142	142,29
	34	a	130	132	135	129	134	128	136	132,00
		b	132	141	135	133	134	135	135	135,00
		c	148	153	153	143	146	142	144	147,00

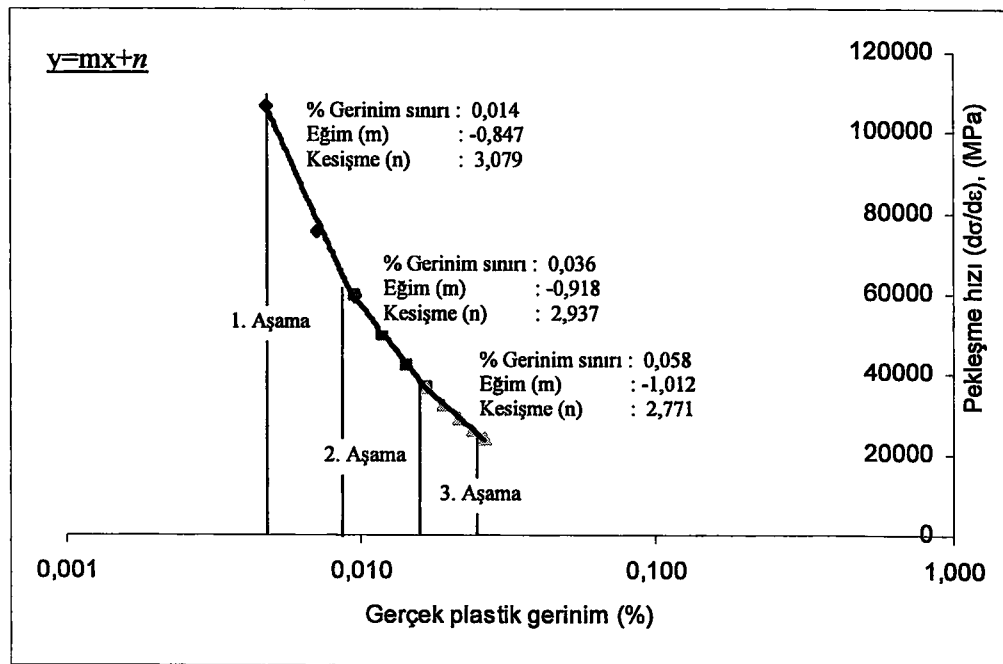
*Yüzeyden merkeze olan mesafe bu yüzeyler için geçerli değildir. "c" ve "d" yüzeyleri malzeme merkezine paralel yüzeylerdir (Şekil 4.1).

EK-5 SOĞUK HADDELENMİŞ NUMUNELERİN PEKLEŞME DAVRANIŞI

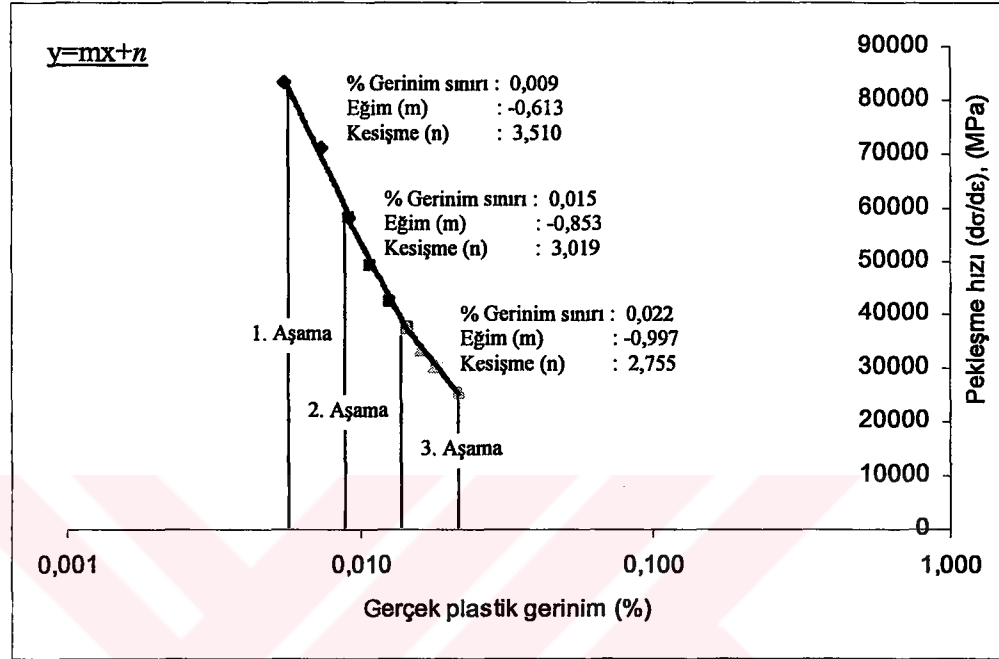
% 11 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



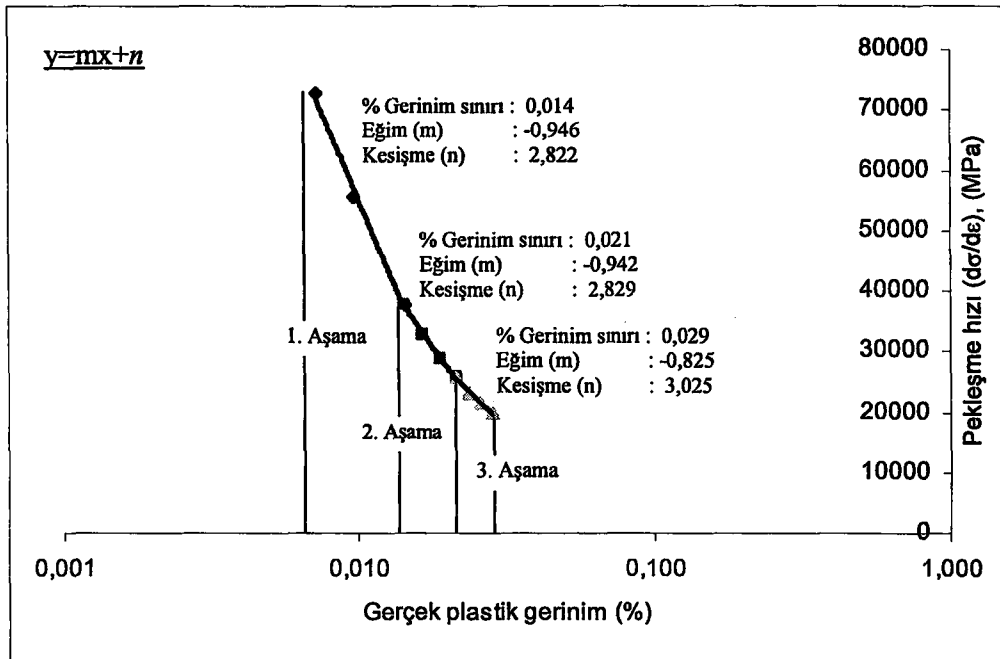
% 11 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



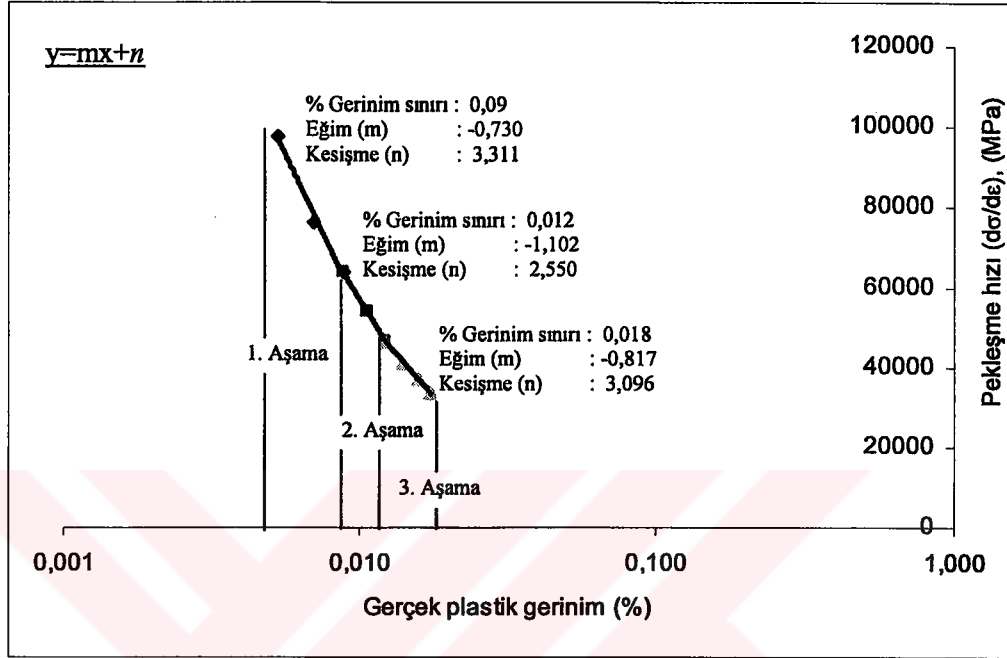
% 15 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



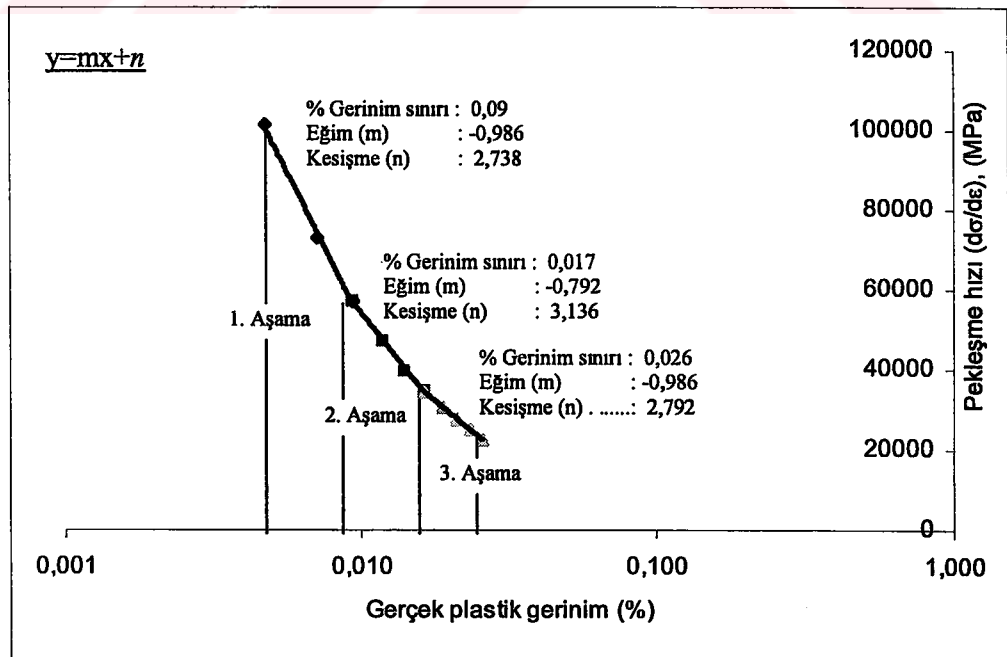
% 15 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



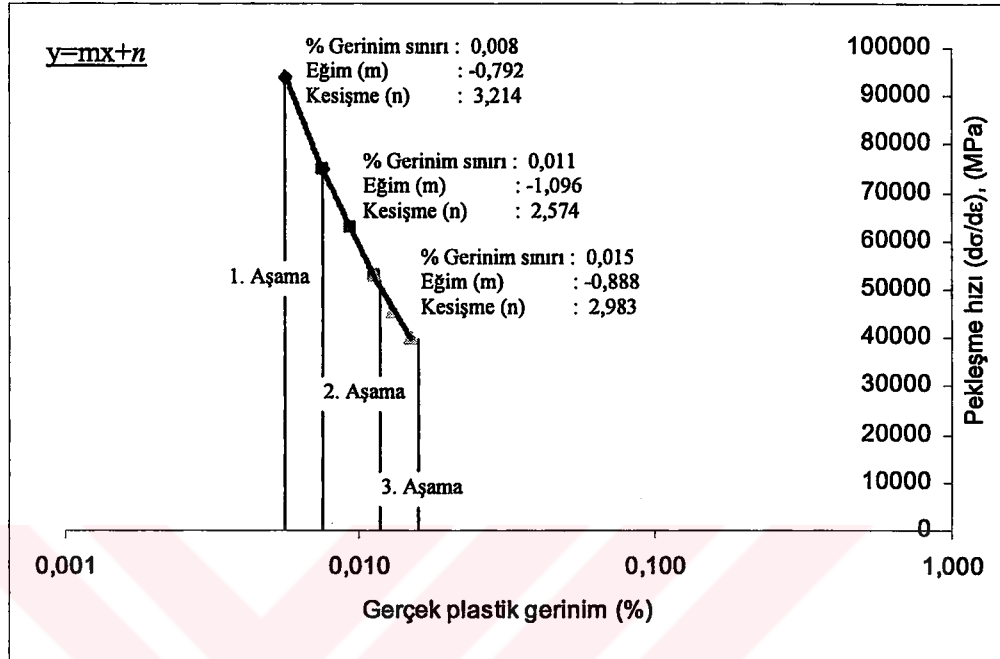
% 19 soğuk haddelenmiş numunenin haddelenme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



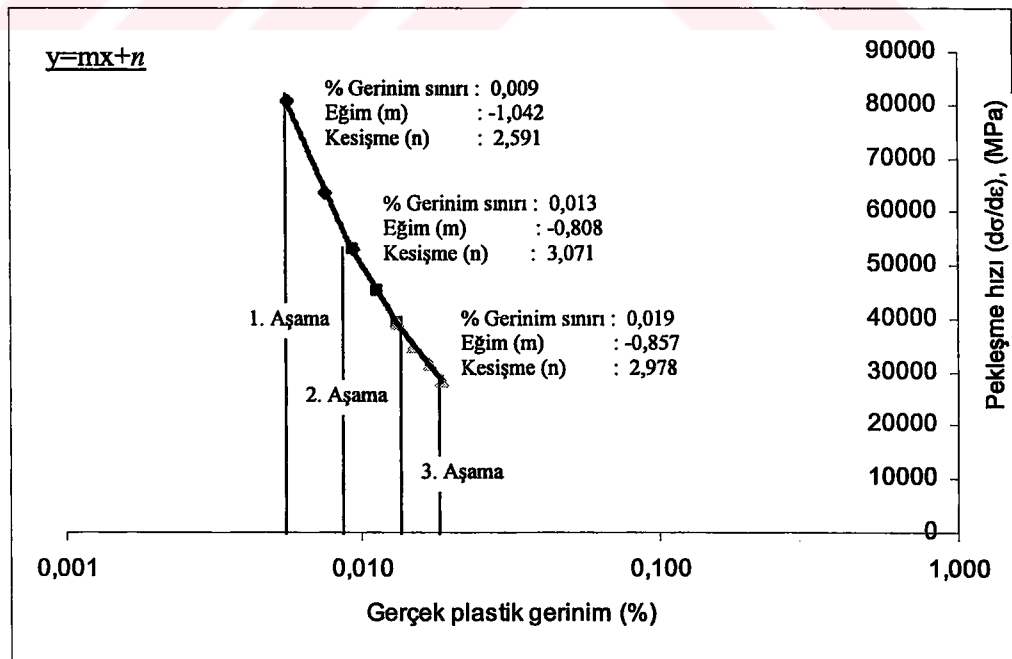
% 19 soğuk haddelenmiş numunenin haddelenme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



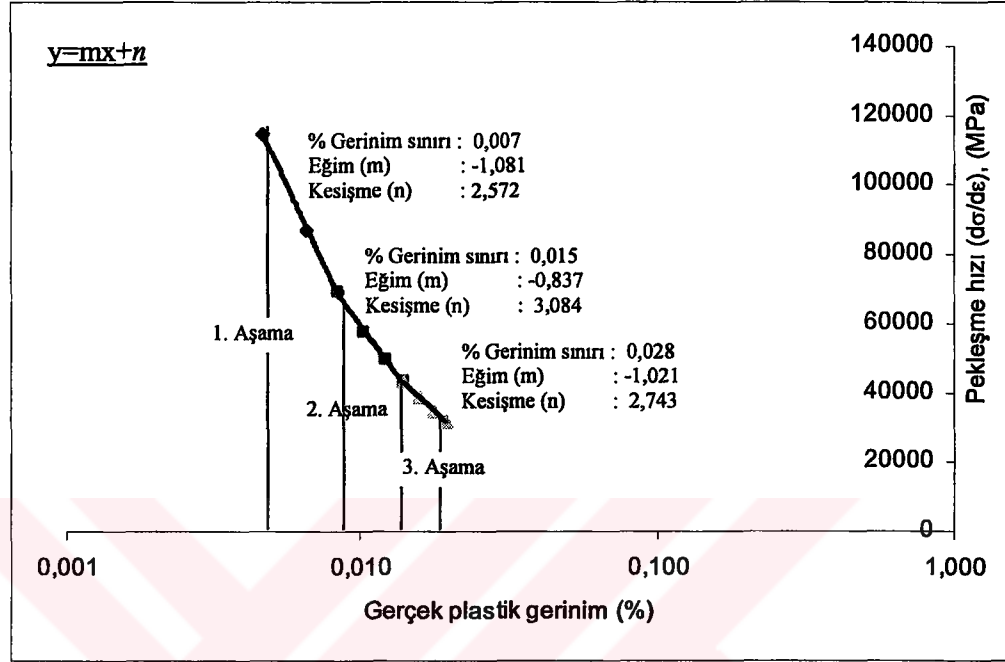
% 23 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



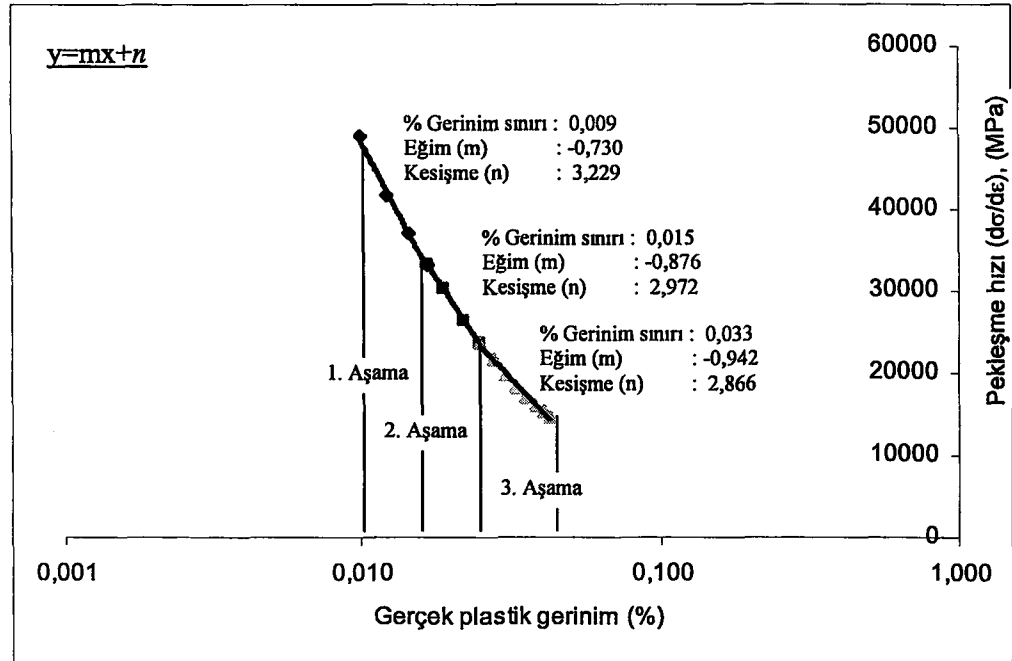
% 23 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi

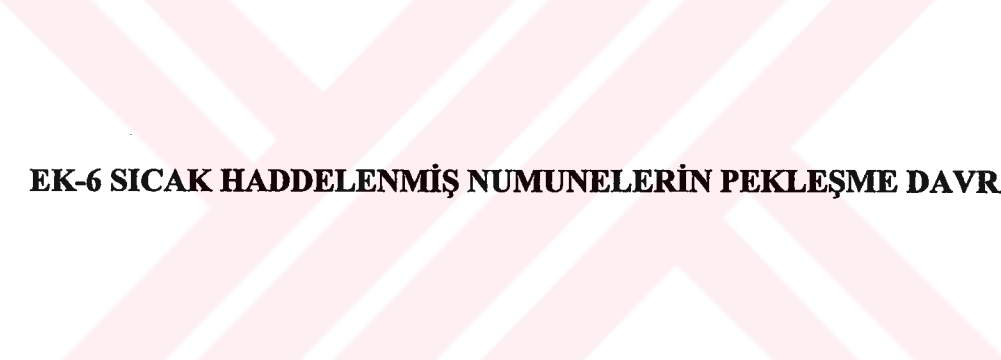


% 27 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



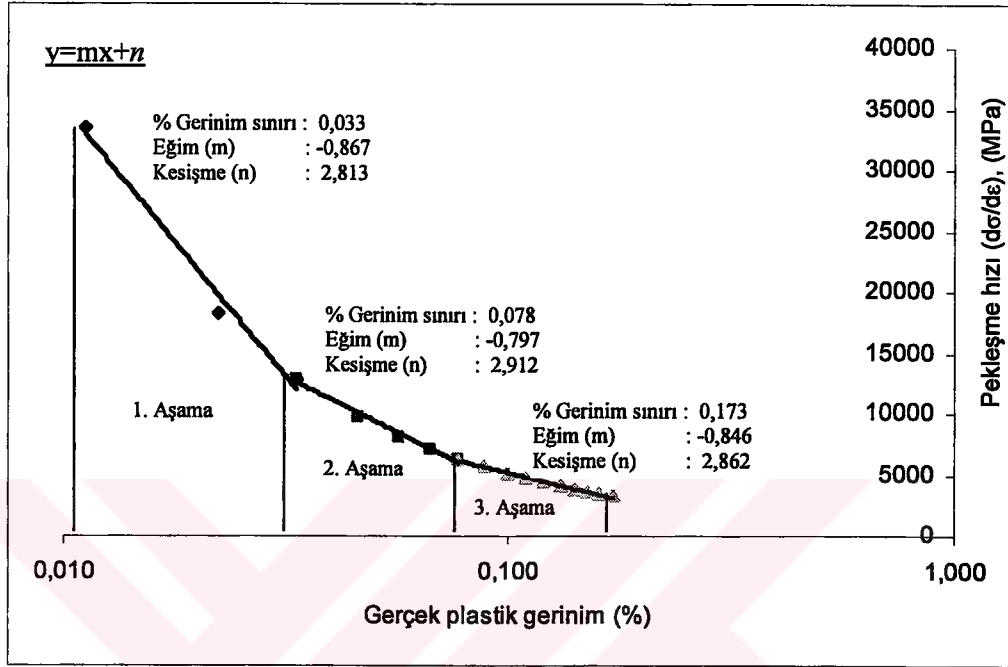
% 27 soğuk haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



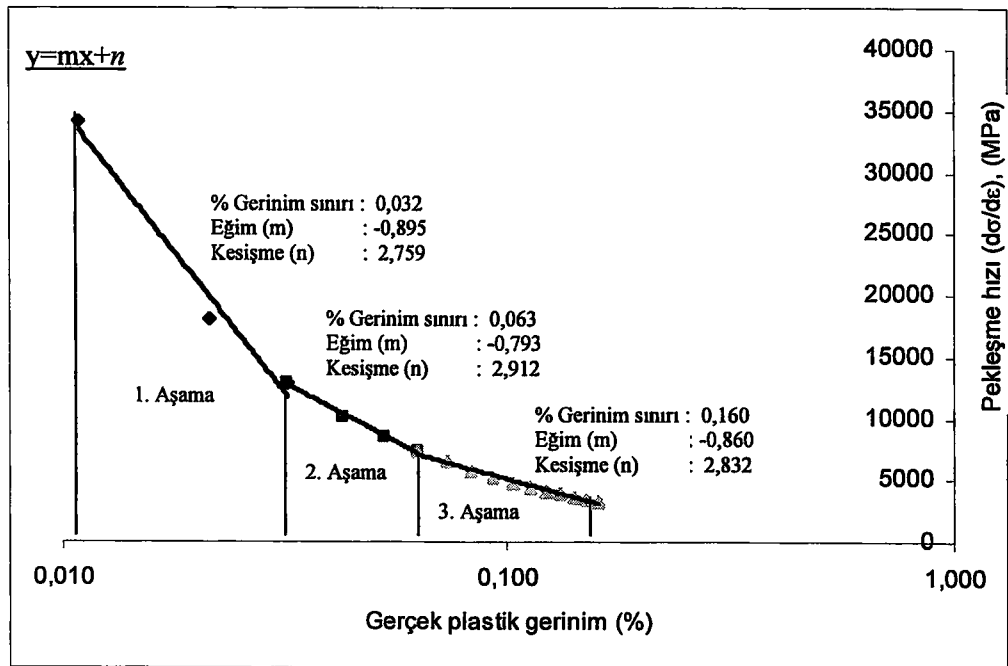


EK-6 SICAK HADDELENMİŞ NUMUNELERİN PEKLEŞME DAVRANIŞI

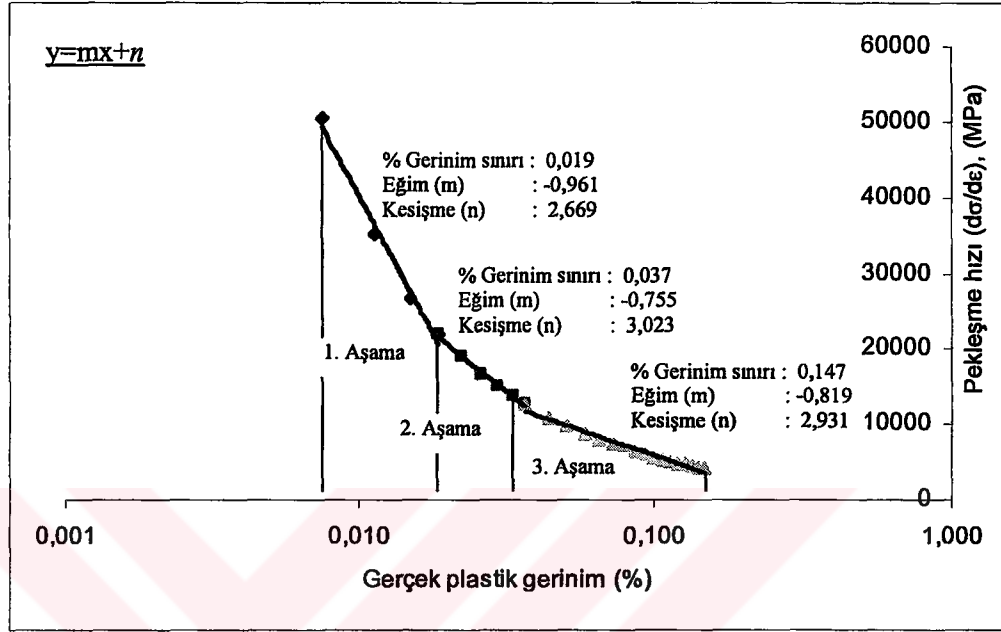
% 11 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



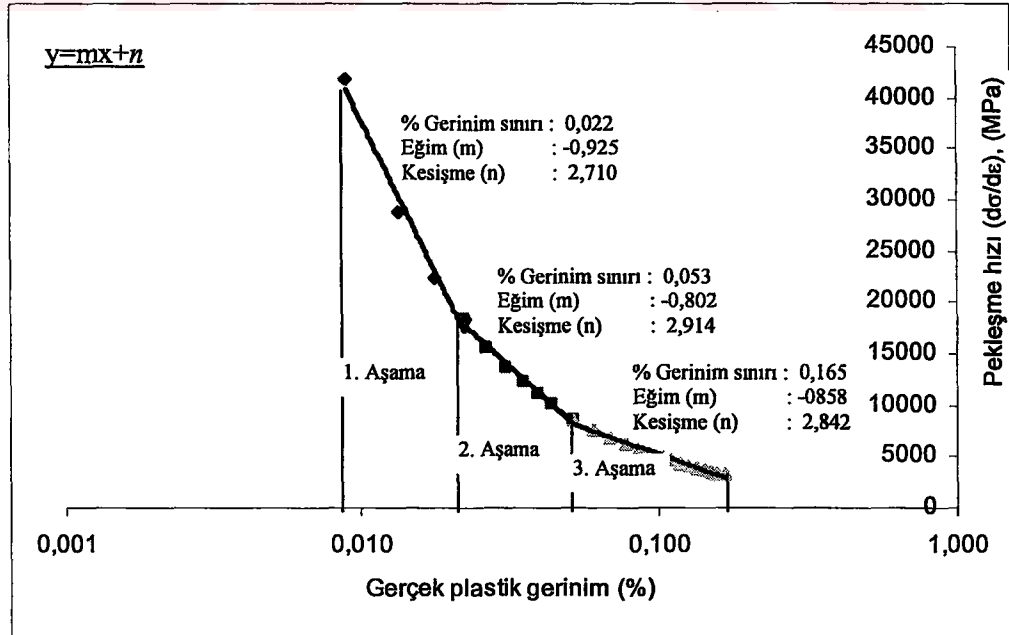
% 11 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



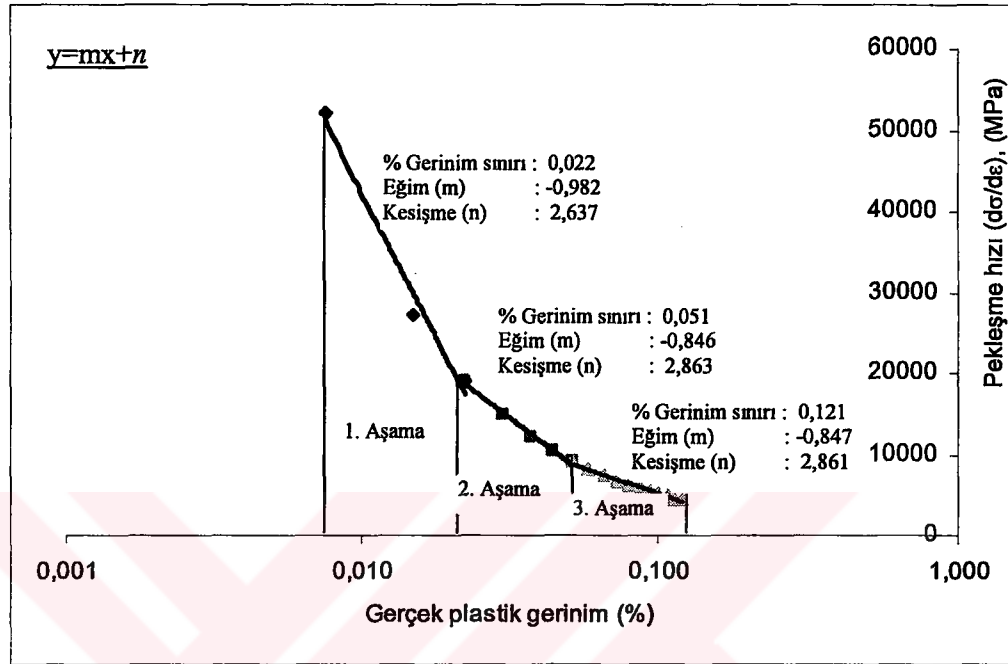
% 13 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



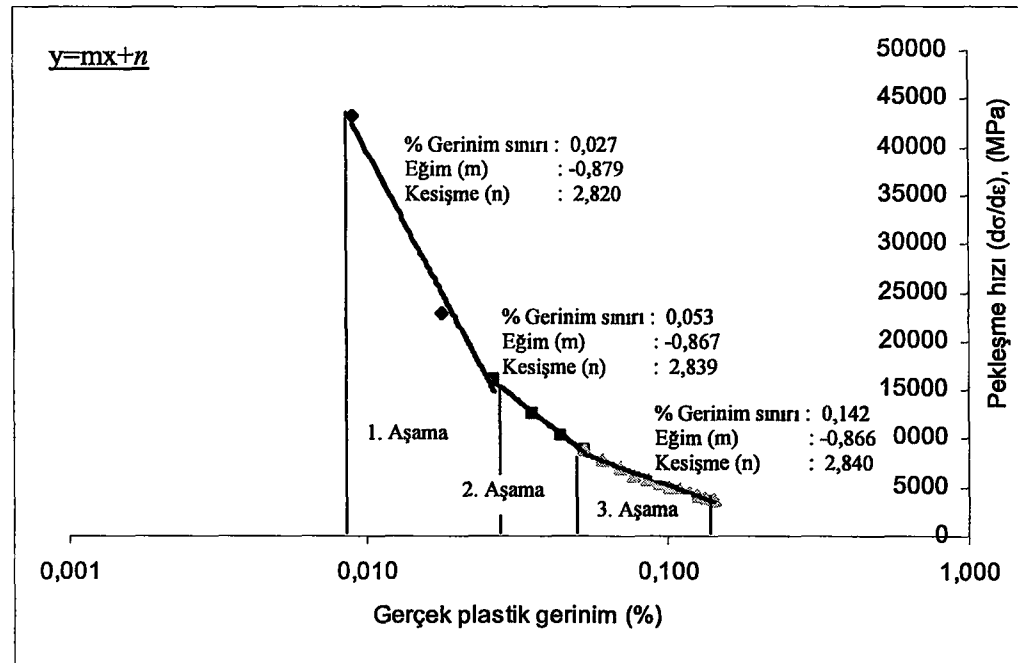
% 13 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



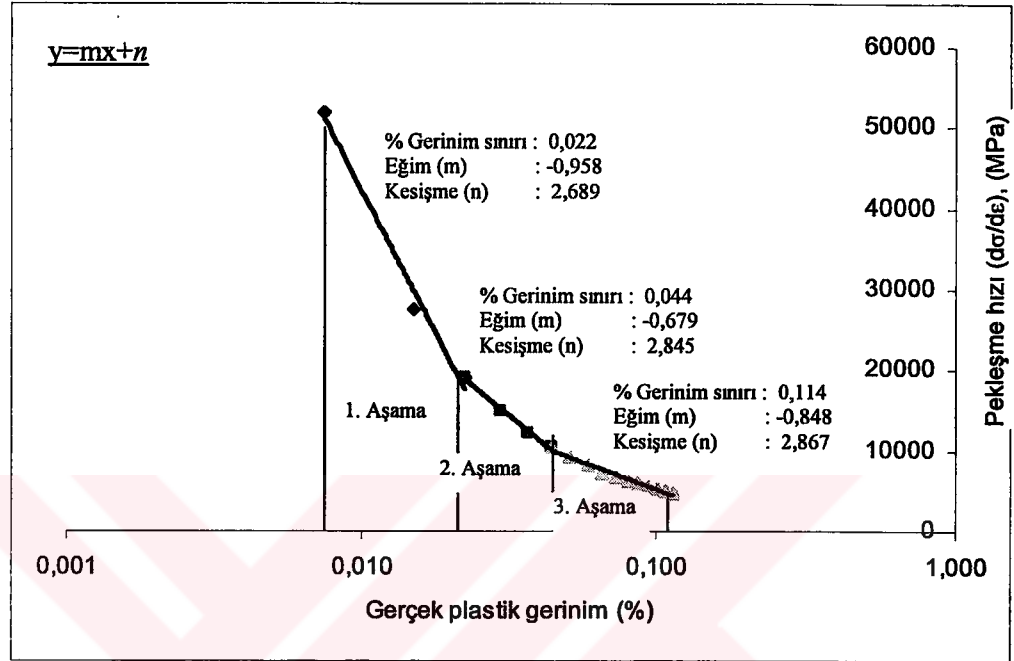
% 17 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



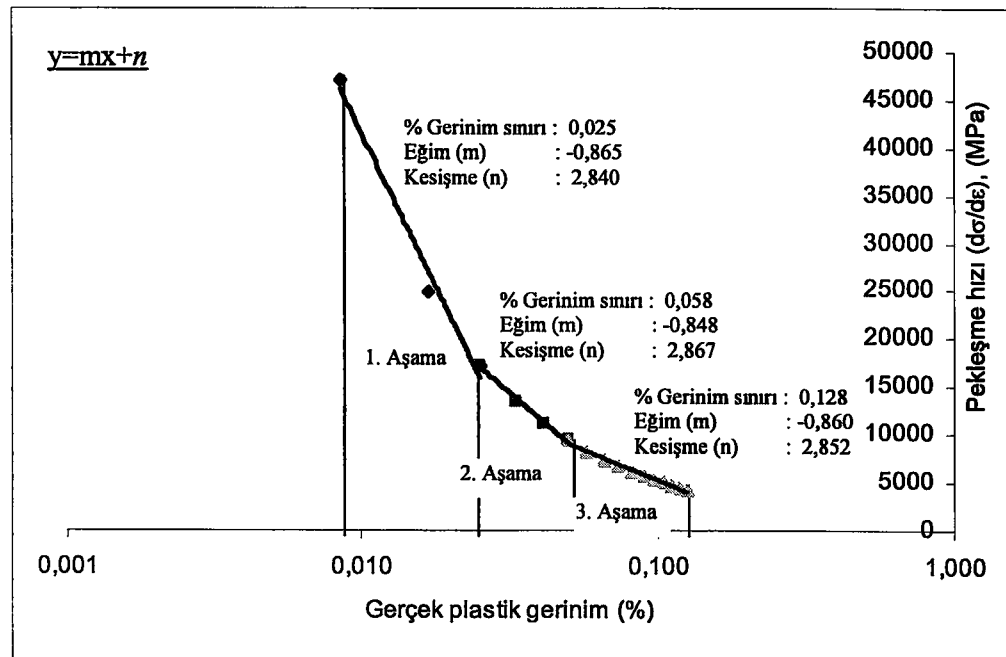
% 17 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



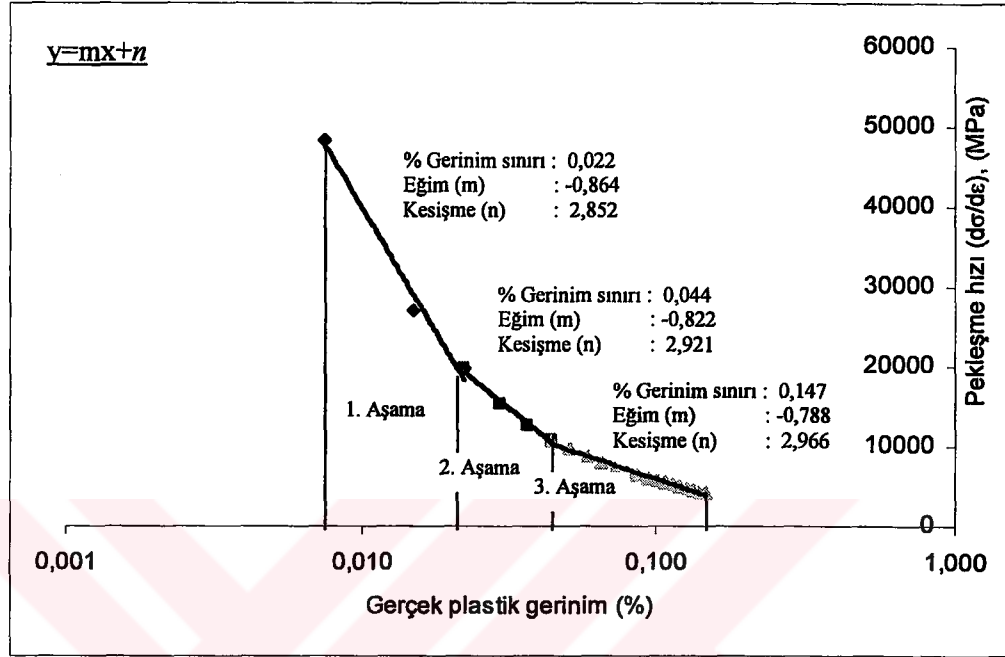
% 23 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



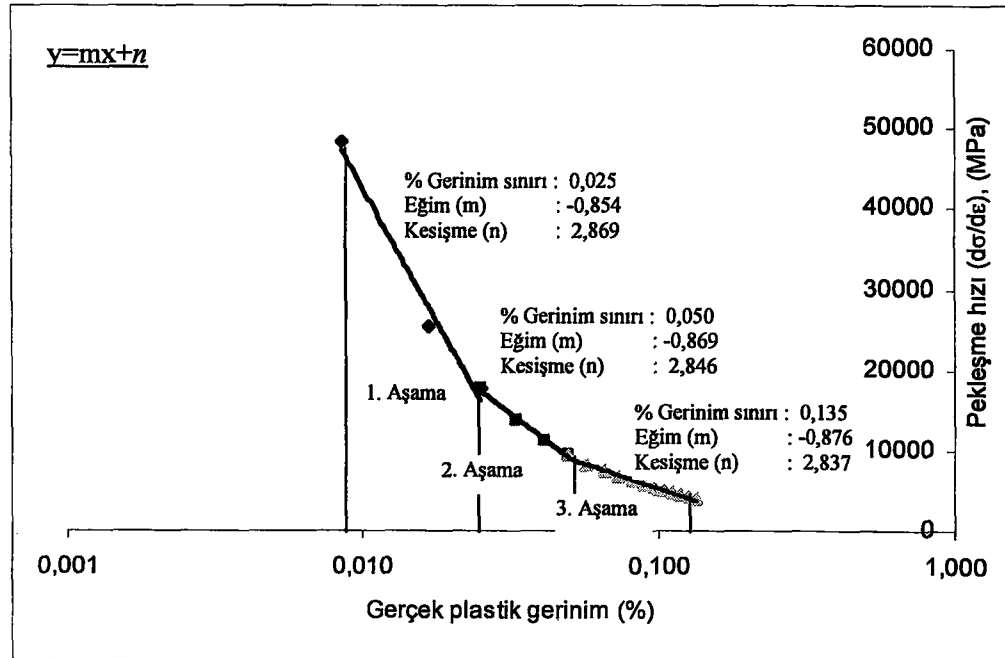
% 23 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



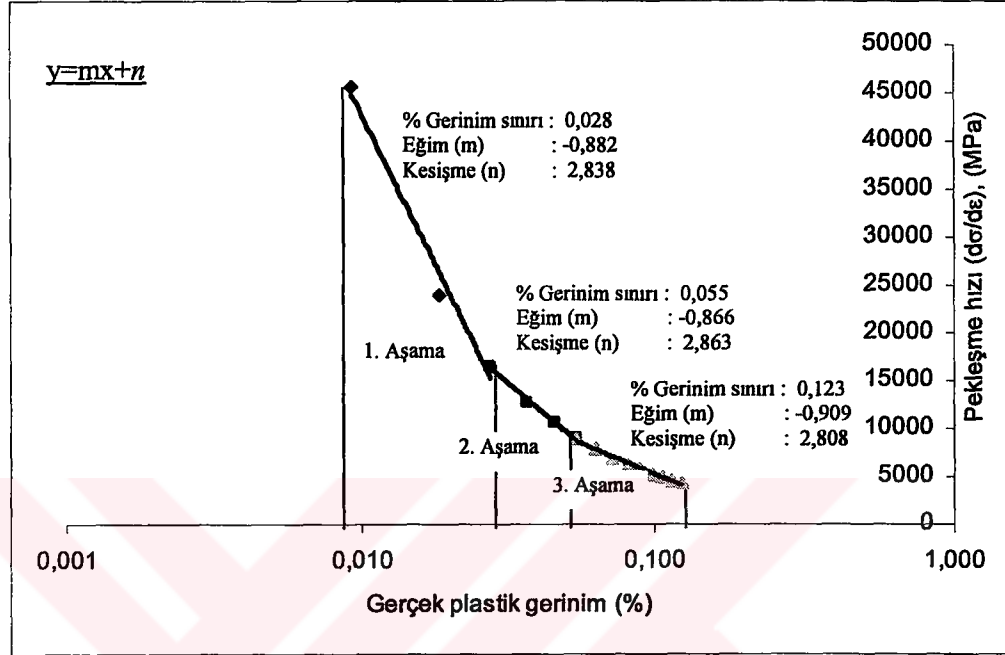
% 26 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



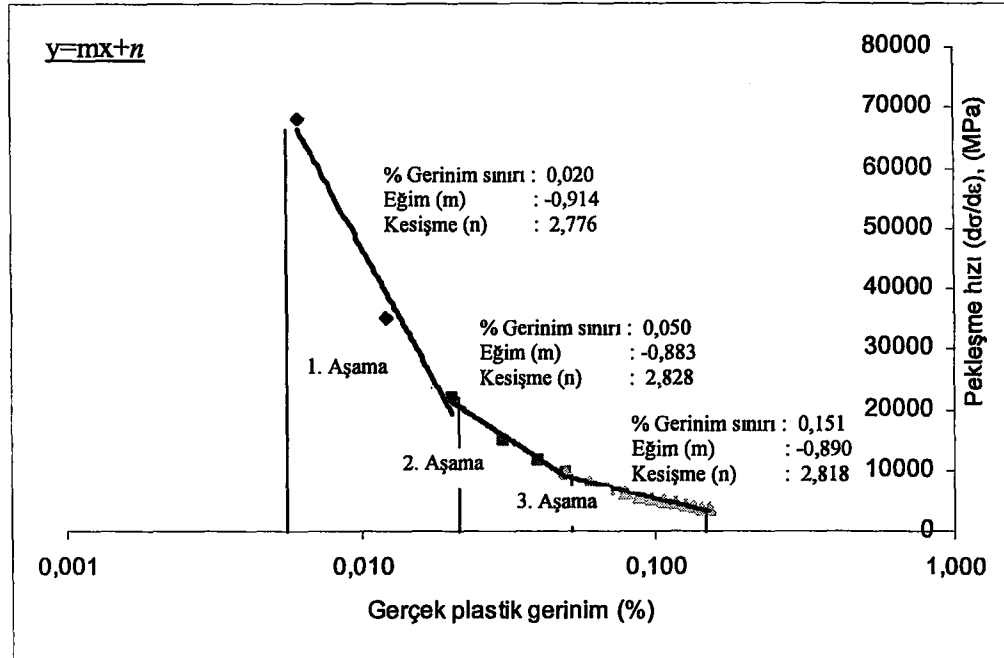
% 26 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



% 34 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna paralel Jaoul-Crussard analizi



% 34 sıcak haddelenmiş numunenin haddeleme doğrultusuna dik Jaoul-Crussard analizi



ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Ankara Yüksek Teknik Öğretmen Okulu, Metalişleri Bölümü'nden mezun olduktan sonra, 1981-1982 Artvin Endüstri Meslek Lisesi, 1983-1993 yılları arasında Ankara Atatürk Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi ve 1993-1999 MEB, Yaygın Eğitim Enstitüsü'nde görev yaptı. 1989 yılında G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Bölümü'nde Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 1990 Yılında 6 ay süre ile yurtdışında beceri testi ve sertifikalandırma konusunda eğitim aldı. 1999 yılından bu yana çalışmakta olduğu MEB, Projeler Koordinasyon Merkezi Başkanlığı'nda, AB desteği ile yürütülmekte olan Türkiye'de Mesleki ve Teknik Eğitimin Modernizasyonu Projesinde Eş Yönetici olarak görevini sürdürmektedir.

