

168536

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOELASTİSİTE VE SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMLERİ İLE TEK KESEN AĞIZLI
TAKIMLARDAKİ GERİLMELERİN ANALİZİ**

Makina Mühendisi Ömer Faruk GÜVEN

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erhan ALTAN
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mesut ÖZGÜRLER
Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ



İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. METALLERDE TALAŞ KALDIRMA.....	2
2.1 Talaş Kaldırmada Oluşan Kuvvetler	2
2.1.1 Kesici Kenar Üzerinde Oluşan Kuvvetler.....	2
2.1.2 Tornalama Esnasında Kuvvet Sistemi.....	3
3. TAKIM ÜZERİNDEKİ GERİLMELER.....	8
3.1 Talaş Yüzeyindeki Normal Gerilmeler	12
4.FOTOELASTİSİTE.....	15
4.1 Fotoelastisite Teorisi	16
4.2 Işığın Elektromanyetik Dalga Teorisi	16
4.3 Polarizasyon	18
4.4 Kırılma.....	19
4.5 Çift Kırılım	20
4.6 Gerilme ve Çift Kırılım	24
4.7 İzokromatik ve İzoklinik Saçaklar.....	26
4.8 İzoklinik Saçak Analizi	27
4.9 İzokromatik Saçak Analizi	30
5. FOTOELASTİK UYGULAMALARDA KULLANILAN TEKNİKLER.....	34
5.1 Fotoelastik Malzeme Kalibrasyonu.....	34
5.2 Kesirli Saçak Sıraları	35

5.2.1 Tardy Metodu.....	35
5.2.2 Babinet – Soleil Metodu.....	37
5.3 σ_1 ve σ_2 Asal Gerilmelerinin Ayrılması.....	39
5.3.1 Eğik Yönlendirme Metodu.....	40
5.3.2 Kayma Farkı Metodu.....	41
5.4 Yansıma Fotoelastisitesi.....	43
6. SONLU ELEMANLAR METODU.....	48
6.1 Sonlu Elemanlar Metodu İle İlgili Temel Kavramlar.....	49
6.2 Solu Elemanlar Yönteminde Eleman Tipleri	50
6.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Üstünlükleri	52
6.4 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları.....	52
6.5 Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları.....	53
6.6 Sonlu Elemanlar Yönteminde Temel Basamaklar	53
6.6.1 İşlem Öncesi Safha (Preprocessing).....	53
6.6.2 Çözüm Safhası (Solving).....	53
6.6.3 İşlem Sonrası Safha (Postprocessing).....	54
6.7 Sonlu Elemanlar İle Yapılabilecek Analizler	54
7. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	55
7.1 Fotoelastisite İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	55
7.2 Sonlu Elemanlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	91
8. DENEYSEL VE SONLU ELEMAN ÇALIŞMALARI.....	137
8.1. Deneysel Çalışma	137
8.2 Sonlu Elemanlar Çalışması.....	139
9. SONUÇLAR.....	144
KAYNAKLAR.....	146
EKLER.....	148
Ek 1 Fotoelastisite Düzeneginin Parça Resimleri	148
Ek 2 Fotoelastisite Düzeneginin Montaj Resmi.....	153
ÖZGEÇMİŞ.....	154

SİMGE LİSTESİ

f_{σ} Saçak sabiti

N Saçak numarası

F Modele uygulanan kuvvet

w Model genişliği

N_0 Model düz iken oluşan saçak sayısı

N_{θ} Model eğik iken oluşan saçak sayısı

σ_1, σ_2 Asal gerilmeler

σ Normal gerilme

τ Kayma gerilmesi

φ Asal gerilmeler ile x eksenini arasındaki açı

θ Modelin eğilme açısı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Talaş Kaldırma Esnasında Oluşan Kuvvet Sistemleri.....	2
Şekil 2.2 Tornalama İşleminde Kuvvet Sistemi	3
Şekil 2.3 Birinci Tür Ortogonal Sistemde Oluşan Kuvvetler.....	4
Şekil 2.4 İkinci Tür Ortogonal Sistemin Oluştığı Birinci Durum	4
Şekil 2.5 İkinci Tür Ortogonal Sistemin Oluştığı İkinci Durum	5
Şekil 2.6 Kesme Esnasında Talaşın Denge Durumu	5
Şekil 2.7 Merchant' ın Çember Tasarımı	6
Şekil 2.8 Birinci Tür Ortogonal Sistemde Kuvvetlerin Durumu.....	6
Şekil 2.9 Kayma Düzleminde Kuvvetlerin Durumu	7
Şekil 3.1 Gerilmenin iki boyutlu genel halinin gösterimi	8
Şekil 3.2 Mohr diyagramı.....	8
Şekil 3.3 İki boyutlu gerilme hali için maksimum kayma gerilmesi koşulları.....	9
Şekil 3.4 Uygun Gerilme Koşulları	10
Şekil 3.5 Normal ve kayma gerilmelerinin durumu	10
Şekil 3.6 Maksimum sürtünme koşulları altında sınır yüzeyi boyunca oluşan kayma doğrultuları	11
Şekil 3.7 Sürtünme değerlerine bağlı olarak ortaya çıkan kayma doğrultuları	11
Şekil 3.8 Takım ve talaşın ara temas yüzeyindeki normal gerilmenin hiperbolik dağılımı	12
Şekil 3.9 Takım ve talaşın ara temas yüzeyindeki sürtünme gerilmesinin dağılımı	13
Şekil 4.1 z ekseninde yayılan bir dalga	17
Şekil 4.2 Yayılan dalganın x ve y eksenlerindeki bileşenleri.....	18
Şekil 4.3 Polarizasyon filtresi ile ışığın tek eksenindeki bileşeninin iletimi	19
Şekil 4.4 Analizör filtresi ile polarizör filtresinin ekseninin	19
Şekil 4.5 Bir dalganın geçirgen bir katıdan iletilmesi	20
Şekil 4.6 Çift kırıcı plaka.....	21
Şekil 4.7 Plakaya giren ışık	22
Şekil 4.8 Işığın hızlı ve yavaş eksenlerdeki bileşenleri	22
Şekil 4.9 Dairesel polarize ışık.....	24
Şekil 4.10 Düzlem polariskobu	26
Şekil 4.11 İzoklinik saçaklar	28
Şekil 4.12 İzoklinik saçakların bağlı durumu.....	28
Şekil 4.13 Gerilme yörüngelerinin çizimi	29
Şekil 4.14 Asal gerilme yörüngeleri	30
Şekil 4.15 Dairesel polariskop.....	31
Şekil 4.16 Beyaz ışık ile dairesele polariskopta elde edilen izokromatikler	32
Şekil 4.17 Saçak sıraları	33
Şekil 5.1: Kalibrasyon için uygulanan çekme testi	35
Şekil 5.2 Karanlık bölgeler.....	36
Şekil 5.3 Işık bölgesi ve karanlık bölge.....	36
Şekil 5.4 t kalınlığının ayarlanması	37
Şekil 5.5 Optik etki.....	38
Şekil 5.6 Babinet Soleil kompensatörü	39
Şekil 5.7 Prizma kullanarak eğik yönlendirme.....	41
Şekil 5.8 Gerilme hesabı için ızgara çizimi.....	42
Şekil 5.9 Fotoelastik malzeme ile kaplanmış bölümler.....	43
Şekil 5.10 Yansıma fotoelastisitesi (a) ve yansıma polariskobu ile ölçüm (b)	44
Şekil 5.11 Düzeltme faktörleri	45
Şekil 5.12 Eğik yönlendirme adaptörü	46

Şekil 6.1 Tek boyutlu elemanlar.....	51
Şekil 6.2 İki boyutlu elemanlar	51
Şekil 6.3 Üç boyutlu elemanlar	51
Şekil 7.1 Fotoelastik kesme takımının görünüşü.....	55
Şekil 7.2 Deney düzeneği	56
Şekil 7.3 Dinamik (a) ve statik (b) saçaklar	57
Şekil 7.4 İzoklinik çizgiler	57
Şekil 7.5 İzokromatik ve izoklinik çizgiler	58
Şekil 7.6 Talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımı.....	59
Şekil 7.7 Talaş yüzeyindeki normal gerilmenin hesaplanma prosedürü	60
Şekil 7.8 Normal gerilmenin kesme noktasından uzaklığa göre dağılımı.....	61
Şekil 7.9 Kesici yüzeydeki sürtünme katsayısı	62
Şekil 7.10 Takım-talaş temas bölgesi.....	62
Şekil 7.11 Kuvvet vektörleri.....	63
Şekil 7.12 Talaş kaldırmanın genel özellikleri	65
Şekil 7.13 Uygulanan yükün saçak çapına oranı.....	66
Şekil 7.14 Deney düzeneği.....	67
Şekil 7.15 İzoklinik saçaklar	68
Şekil 7.16 İzokromatik saçaklar	68
Şekil 7.17 İzoklinik ve izokromatik saçaklar	69
Şekil 7.18 İzoklinik ve izokromatik çizgiler	71
Şekil 7.19 İzoklinik ve izokromatik çizgiler	71
Şekil 7.20 İzoklinik ve izokromatik çizgiler	72
Şekil 7.21 Gerilmelerin dağılımı	72
Şekil 7.22 Gerilmelerin değişimi.....	72
Şekil 7.23 Gerilmelerin dağılımı	73
Şekil 7.24 Kullanılan takım geometrisi (A)	75
Şekil 7.25 Kullanılan takım geometrisi (B).....	75
Şekil 7.26 Kullanılan takım geometrisi (C).....	75
Şekil 7.27 Tanaka düzeneği.....	76
Şekil 7.28 (a) İzokromatik saçaklar.....	76
Şekil 7.28 (b) Gerilme dağılımları.....	77
Şekil 7.29 Minimum sürtünme durumunda akış doğrusu	77
Şekil 7.30 Maksimum sürtünme durumunda akış doğrusu	79
Şekil 7.31 Takımın detayı.....	80
Şekil 7.32 Deney düzeneği.....	81
Şekil 7.33 0° Talaş açılı takımında oluşan izokromatikler	81
Şekil 7.34 +10° Talaş açılı takımında oluşan izokromatikler.....	81
Şekil 7.35 +20° Talaş açılı takımında oluşan izokromatikler	82
Şekil 7.36 -10° Talaş açılı takımında oluşan izokromatikler	82
Şekil 7.38 Talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımı.....	85
Şekil 7.39 İki boyutlu bası altında malzeme	86
Şekil 7.40 Talaş yüzeyinde normal gerilme dağılımı.....	86
Şekil 7.41 Talaş açısı - kritik basınç grafiği.....	89
Şekil 7.42 Normal gerilmenin yaklaşık dağılımı.....	90
Şekil 7.43 Kayma gerilmesinin yaklaşık dağılımı.....	91
Şekil 7.44 Loladze' nin kesici yüzeyde belirlediği normal gerilme dağılımı.....	92
Şekil 7.45 Sinterlenmiş karbürler için Kreimer tarafından belirlenen enine kopma mukavemeti	93
Şekil 7.46 Sonlu elemanlar hesaplamalarında kullanılan mesh yapısı.....	94
Şekil 7.47 Takım ucundaki yükün ve mesh yapısının detayı	94

Şekil 7.48 Klasik kiriş teorisi ile elde edilen sabit gerilme çizgileri	95
Şekil 7.49 Sabit maksimum asal gerilme çizgileri	96
Şekil 7.50 Minimum asal gerilme çizgileri	97
Şekil 7.51 Sabit maksimum kayma gerilmesi çizgileri	97
Şekil 7.52 Maksimum asal ve kayma gerilme doğrultuları	98
Şekil 7.53 Sürekli kesme işleminde talaş oluşumu ve takım kırılması	99
Şekil 7.54 Aralıklı kesme işleminde talaş oluşumu ve takım kırılması	99
Şekil 7.55 Sabit minimum asal gerilme çizgileri (ikinci metot).....	100
Şekil 7.56 Sabit maksimum kayma gerilmesi çizgileri (ikinci metot)	100
Şekil 7.57 Childs tarafından belirlenen kesici yüzey gerilme dağılımları.....	102
Şekil 7.58 Buryta tarafından belirlenen gerilme dağılımları	103
Şekil 7.59 Sonlu elemanlar modeli için deforme olmamış mesh yapısı.....	104
Şekil 7.60 Durağan kesme için deforme olmuş mesh yapısı.....	104
Şekil 7.61 Sonlu elemanlar için uzaklık kriteri	105
Şekil 7.62 Sonlu elemanlar ile elde edilen gerilme dağılımları.....	107
Şekil 7.63 Kullanılan numuneler ve takım geometrisi	111
Şekil 7.64 Kesme kuvveti dinamometresi	112
Şekil 7.65 Ani durdurma aparatı	112
Şekil 7.66 Aniden durdurma işleminin osilografı	113
Şekil 7.67 Kesici takıma etkiyen kuvvetler	113
Şekil 7.68 Kesme ve itme kuvvetleri.....	114
Şekil 7.69 Kesme kuvvetinin meyil açısına göre dağılımı	116
Şekil 7.70 Kesme kuvvetinin kesme hızına göre dağılımı	116
Şekil 7.71 Kesme hareketine dik ve paralel kesme kuvvetleri.....	117
Şekil 7.72 Ortalama gerilme, dalma bölgesi ve talaş kalınlığı dağılımı.....	118
Şekil 7.73 Geometrik benzer kesme işlemleri	119
Şekil 7.74 Kesici takım üzerindeki ortalama normal ve kayma gerilmeleri	119
Şekil 7.75 Talaş yüzeyinin mikrofotografı.....	120
Şekil 7.76 Temas alanının kayma ve sıvanma bölgeleri	121
Şekil 7.77 Temas alanının iki bölgesinde zahiri sürtünme katsayısı.....	122
Şekil 7.78 Takım yüzeyindeki gerilme dağılımı	123
Şekil 7.79 Takım yüzeyindeki gerilmelerin fotoelastik sonuçları.....	124
Şekil 7.80 Takım yüzeyindeki normal gerilmenin teorik dağılımı.....	125
Şekil 7.81 Değişik boşluk açılarında talaş yüzeyindeki ortalama gerilmeler.....	126
Şekil 7.82 Değişik kesme hızlarında takım yüzeyindeki ortalama gerilmeler	126
Şekil 7.83 Kesici takım hazırlama dizaynları.....	127
Şekil 7.84 Konti-cut ile elde edilen talaş oluşumu	129
Şekil 7.85 Uygulanan deplasman ve sınır şartları	130
Şekil 7.86 Yuvarlak uçlu ve pahlı takımlar	132
Şekil 7.87 Deney ve FEM simülasyon sonuçlarının karşılaştırması	132
Şekil 7.88 Kesici yüzey boyunca tahmini normal ve kayma gerilme dağılımları.....	133
Şekil 7.89 Değişik pah genişliklerinin kesme kuvvetine etkisi.....	134
Şekil 7.90 Azalan talaş yükünün işlenen yüzey üzerindeki parlatma etkisi.....	134
Şekil 8.1 Çekme Numunesinin Şematik Gösterimi	137
Şekil 8.2 Hazırlanan deney düzeneği	137
Şekil 8.3 (a) 20° izokliniği (b) 60° izokliniği ve (c) 80° izokliniği.....	138
Şekil 8.4 İzokromatik eğriler.....	138
Şekil 8.5 Model eğik iken oluşan izokromatik eğriler	138
Şekil 8.6 Noktaların oluşturulması	140
Şekil 8.7 Noktalardan çizgilerin oluşturulması	140
Şekil 8.8 Çizgilerden alanın oluşturulması.....	140

Şekil 8.9 Modelin ayrıklaştırılmış hali	141
Şekil 8.10 Mesnetlerin uygulanışı	141
Şekil 8.11 Kuvvetlerin uygulanışı	141
Şekil 8.12 Deforme olmuş model	142
Şekil 8.13 Normal gerilmelerin dağılımı	142
Şekil 8.14 Kayma gerilmelerinin dağılımı	143
Şekil 9.1 Fotoelastisite ile elde edilen gerilme grafiği	144
Şekil 9.2 Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen gerilme grafiği	144



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5.1 Çeşitli fotoelastik malzeme özellikleri	34
Çizelge 7.1 Talaş yüzeyindeki normal gerilme değerleri	61
Çizelge 7.2 -10° Talaş açılı takımındaki kayma gerilmeleri	83
Çizelge 7.3 0° Talaş açılı takımındaki kayma gerilmeleri	83
Çizelge 7.4 $+10^{\circ}$ Talaş açılı takımındaki kayma gerilmeleri	84
Çizelge 7.5 $+20^{\circ}$ Talaş açılı takımındaki kayma gerilmeleri	84
Çizelge 7.6 -10° Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler	87
Çizelge 7.7 0° Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler	87
Çizelge 7.8 $+10^{\circ}$ Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler	87
Çizelge 7.9 $+20^{\circ}$ Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler	88
Çizelge 7.10 Normal gerilme değerleri	88
Çizelge 7.11 Modellemede kullanılan parametreler	106
Çizelge 7.12 Takım üzerindeki kuvvetlerin deneysel ve modelleme sonuçları	106
Çizelge 7.13 Boşluk açısı, kesme hızı ve itme kuvveti değerleri	113
Çizelge 7.14 Takım ve iş parçasının mekanik ve ısıl özellikleri	130
Çizelge 7.15 Tahmin edilen kesme kuvvetleri ile deneysel sonuçların karşılaştırması	131
Çizelge 7.16 takımlar için kesme koşulları ve takım geometrisi	131
Çizelge 7.17 Takımlar için kesme koşulları ve takım geometrisi	131
Çizelge 7.18 Değişik uç radyüsleri için tahmini talaş kalınlığı ve kayma açısı değerleri	133
Çizelge 7.19 t_{min} ile kenar yarı çapı ve pah geometrisi arasındaki bağıntı	135
Çizelge 8.1 f_{σ} Değerleri	137
Çizelge 8.2 Normal ve Kayma Gerilme Değerleri	139

ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlamam süresince maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme, çalışmalarında yol gösteren ve yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr Erhan Altan Bey'e, Sonlu Elemanlar uygulamasında yardımcı olan hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Bora Yıldırım ve mühendis kuzenim Mehmet Emin Seyrek'e, deney düzeneğinin tasarımında yardımcı olan mühendis arkadaşım Aydın Kongel'e, deney düzeneğinin yapılmasında yardımcı olan Teknisyen Ahmet Arabacı ve Teknisyen Yardımcısı Haşım Yüksel beylere teşekkür ederim.



ÖZET

Günümüz imal usullerinde talaşlı imalat yöntemi büyük bir öneme sahiptir. Takım mukavemetini ve ömrünü etkileyen faktörler üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar öncelikle teorik olmuş, daha sonra deneysel yöntemler uygulanmış ve bilgisayar ortamına taşınmıştır. Bu çalışmalar sonucunda gerilmelerin takım ömrü ve mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olduğu saptanmıştır.

Bu tezde önce deneysel olarak Fotoelastisite Yöntemi ile, daha sonra bir Sonlu Elemanlar Analiz programı kullanılarak tek kesen ağızlı bir takımın talaş yüzeyi üzerindeki gerilme dağılımı incelenmiştir. Daha önceki araştırmacıların belirttiği gibi gerilmelerin takım ucunda maksimum değere ulaştığı ve talaş ayırımına doğru azalarak sıfır olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotoelastisite, sonlu elemanlar, tek kesen ağızlı takım, gerilme dağılımı



ABSTRACT

Today, metal cutting is very important in production process. Many researchers have been studied the factors that effect tool strenght and tool life. These studies were firstly theorotical, then experimental studies and computer analysis have been done. As a result, they investigated that tool life and tool strenght effected by the stresses.

In this thesis, tool rake face stress distribution in a single rake cutting tool investigated with Photoelasticity Method experimentally and Finite Element Analysis.

The stresses determined maximum at tool tip and then reduced to zero at chip seperation as determined other researchers.

Key Words: Photoelasticity, finite elements, single rake cutting tool, stress distribution



1. GİRİŞ

Talaş kaldırma esnasında takım üzerinde oluşan gerilme dağılımının belirlenmesi ve bu gerilmelerin talaş oluşumuna etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Kesici takımlarda oluşan gerilmelerle ilgili ilk çalışma A.L. Deleeuw tarafından yapılmıştır. Daha sonra Merchant, H. Takeyama ve Zorev çeşitli araştırmalar yapmıştır. Zorev normal gerilmenin takım ucunda maksimum değeri taşıdığı ve gerilme değerinin üstel olarak azalarak talaş ayrım noktasında sıfır olduğunu, kayma gerilmesinin ise takım-talaş temas yüzeyinin bir kısmında sabit olduğunu ve daha sonra azaldığını önermiştir. Usui ve Takeyama tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile bu önerme desteklenmiştir.

Teknolojinin gelişmesi ile gerilmelerin analizi bilgisayar ortamında da yapılmaya başlanmıştır. 1972 yılında C. S. Desai ve J. F. Abel Sonlu Elemanlar yöntemi ile gerilme analizi yapmış ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.



2. METALLERDE TALAŞ KALDIRMA

Talaşın oluşumu için üç temel gereksinim mevcuttur. Bunları şöyle özetleyebiliriz:

- Kesici olarak kullanılan bir takımın, iş parçasından daha sert ve aşınmaya karşı daha dirençli olması,
- Takımın talaş derinliği ve ilerlemeyle iş parçası ve takım arasında dalmayı sağlayan kesici uç geometrisine sahip olması,
- İş parçası malzemesinin direncinin yeterli kuvvetle yenilmesi için iş parçası ve takım arasında bir kesme hızı veya bağıl hareketin oluşmasıdır.

Bu şartlar varolduğu sürece işlenecek malzemeden takım talaş yüzeyi aracılığıyla talaş oluşturmak için malzemenin bir kısmı kaldıracaktır. (Şahin,2000)

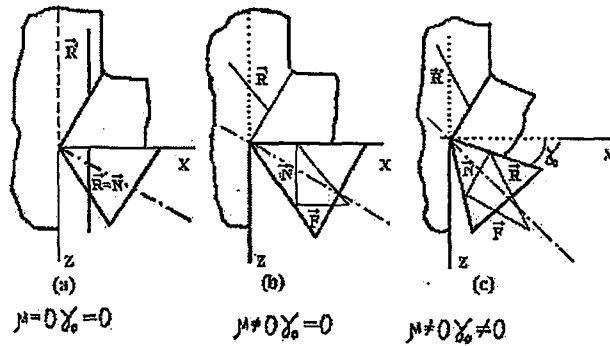
2.1 Talaş Kaldırmada Oluşan Kuvvetler

2.1.1 Kesici Kenar Üzerinde Oluşan Kuvvetler

Kesici takım üzerine etki eden kuvvetler, talaş kaldırmanın önemli bir safhasıdır. (Şahin,2000) Talaş kaldırma esnasında oluşacak kuvvetlerin bilinmesi şu sebeplerden dolayı istenir:

1. Herhangi bir talaş kaldırma işlemi için gerekli olan tezgah gücünün bulunması,
2. Takım tezgahının üzerine gelen etkileri belirleyebilmek, aynı zamanda takım tezgahını dizayn etmek,
3. Talaş kaldırma esnasında kullanılması gereken takım veya iş parçası bağlama aparatlarının dizayn edilmesi için,
4. Kesme kuvvetlerinin araştırılmaları, yeni iş parçası ve kesici takım malzemelerinin ve işlem parametrelerinin belirlenmesi için kuvvetler bilinmeli ve incelenmelidir.

Talaş kaldırma esnasında üç farklı kesme sistemi oluşabilir. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Talaş Kaldırma Esnasında Oluşan Kuvvet Sistemleri (Altan, 2002)

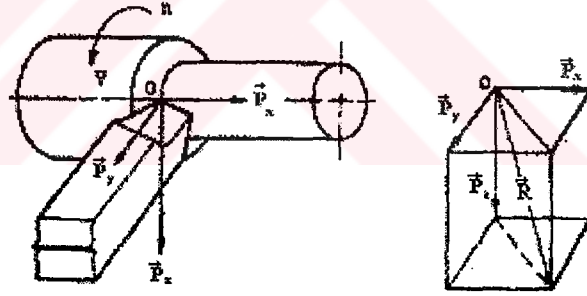
Sonuç olarak kama üzerinde ortaya çıkan \vec{R} kuvvetinin şiddet ve yönü bilinmemektedir. Bu şiddet ve yönün bilinebilmesi için uygun bir referans ve koordinat sistemi seçilmelidir. Bunun için üç değişik yol izlenir:

- \vec{R} ' nin iki boyutlu kuvvetler sisteminde bir ekseninde bulunması. Bu metod deneysel gerilme analizinde kullanılır.
- \vec{R} ' nin iki boyutlu kuvvet sisteminde seçilen iki referans koordinata bağlı olarak bulunması
- \vec{R} ' nin üç boyutlu kuvvet sistemi içinde üç referans eksenine bağlı olarak tanımlanması.

2.1.2 Tornalama Esnasında Kuvvet Sistemi

Tornalama işleminin genel hali için kuvvet sistemi Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Burada \vec{R} bileşke kuvvet, \vec{P}_x ilerleme doğrultusunda oluşan ilerleme kuvveti, \vec{P}_y radyal kuvvet ve \vec{P}_z kesme kuvveti olarak adlandırılır ve aralarında şu bağıntı vardır:

$$\vec{R} = \sqrt{\vec{P}_x^2 + \vec{P}_y^2 + \vec{P}_z^2} \quad (2.1)$$

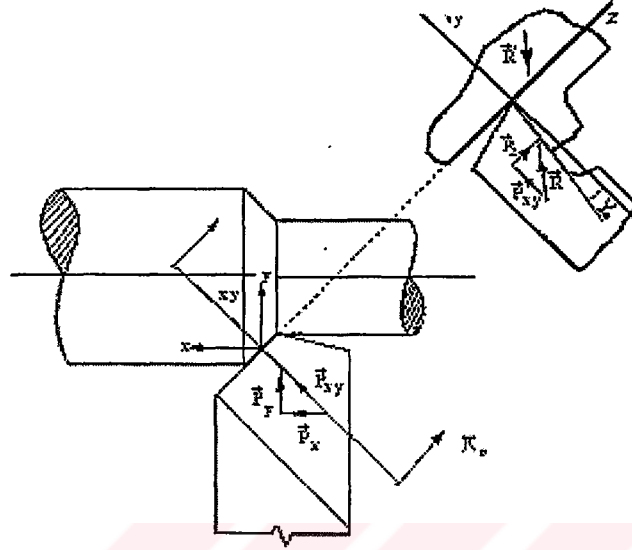


Şekil 2.2 Tornalama İşleminde Kuvvet Sistemi (Altan, 2002)

Bu üç boyutlu kuvvet sistemini iki boyutlu kuvvet sistemine indirmek için ortogonal düzlemden faydalanılır. Ortogonal düzlem ana ağza diktir ve üç eksen gösterimi iki boyutlu kuvvet sistemine indirmek için eğim açısının sıfır olması gerekir. Bu durumda \vec{P}_{xy} kuvveti ortogonal düzlem içinde bulunur. Bu birinci dereceden ortogonal düzlemi ifade eder ve şu şartları gerektirir:

1. $\lambda = 0^0$
2. $0^0 < \phi < 90^0$
3. Sürekli talaş oluşumu

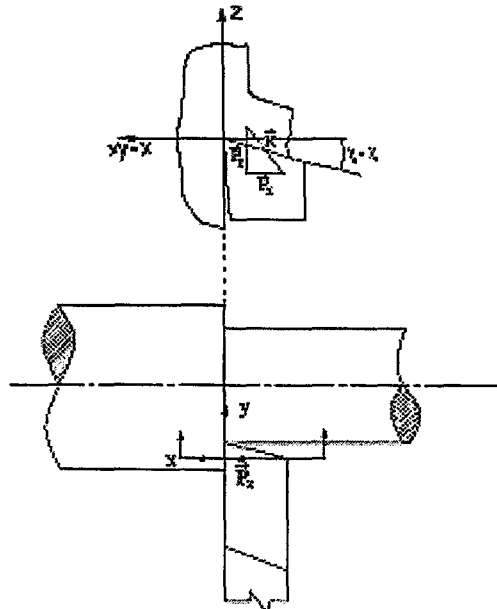
Şekil 2.3' te birinci tür ortogonal sistemdeki kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Birinci Tür Ortogonal Sistemde Oluşan Kuvvetler (Altan, 2002)

İkinci tür ortogonal sistem elde etmek için iki farklı durum vardır. Birinci durumda (Şekil 2.4) şu şartlar sağlanmalıdır:

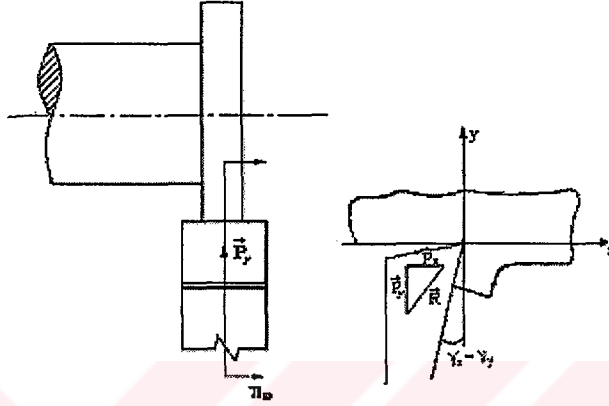
1. $\bar{P}_y = 0$
2. $\phi = 90^0$
3. $\lambda = 0^0$



Şekil 2.4 İkinci Tür Ortogonal Sistemin Oluştugu Birinci Durum (Altan, 2002)

İkinci durumda (Şekil 2.5) ise aşağıdaki şartların sağlanması gerekir:

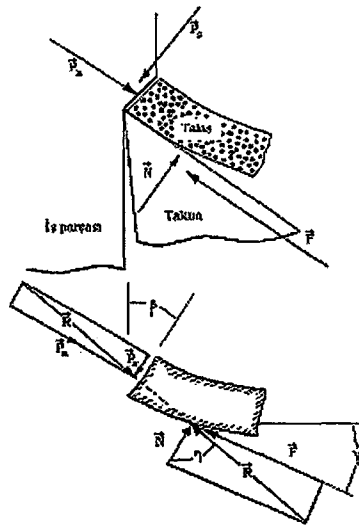
1. $\bar{P}_x = 0$ $P_y = P_{y \max}$
2. $\lambda = 0^0$
3. $\phi = 0^0$



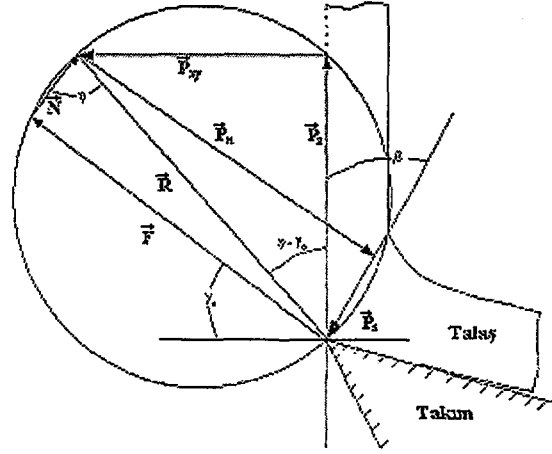
Şekil 2.5 İkinci Tür Ortogonal Sistemin Oluşturduğu İkinci Durum (Altan, 2002)

İnce cidarlı bir borunun boyu kesme derinliği ile karşılaştırıldığında çok büyük olan bir kesici ağız ile işlenmesi halinde, birinci veya ikinci türden bir ortogonal kesmenin olduğu söylenir. Tornalama için söylenen kuvvetler sistemi diğer talaş kaldırma işlemleri için benzerlikten faydalanılarak uygulanabilir.

Kuvvetler bir talaşın denge durumu göz önüne alındığında (Şekil 2.6), Merchant tarafından tasarlanan çember tasarımına (Şekil 2.7) temel oluşturur.



Şekil 2.6 Kesme Esnasında Talaşın Denge Durumu (Altan, 2002)



Şekil 2.7 Merchant' in Çember Tasarımı (Altan, 2002)

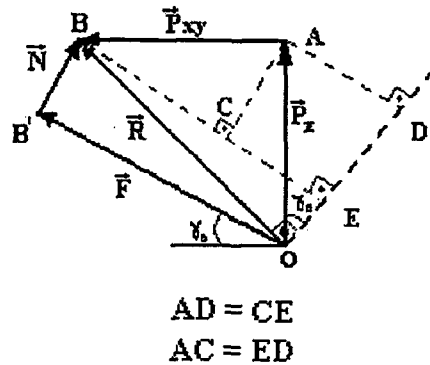
Bu çemberde talaş kaldırma esnasında oluşan kuvvetlerin uç noktaları ve tatbik noktası bir çember üzerinde bulunur. Bu çembere göre β kayma açısıdır. \vec{R} bileşke kuvvet, \vec{N} dik kuvvet, \vec{P}_x kayma düzlemindeki kesme kuvveti, η sürtünme açısı ve γ_0 talaş açısıdır.

Verilen bir takımın eğim açısı sıfır ise ve ortogonal talaş açısı ile yerleştirme açısı biliniyorsa \vec{P}_{xy} söz konusu açılara bağlı bulunabilir. β kayma açısı deneysel olarak bulunabilir. β , \vec{P}_x ve \vec{P}_{xy} den faydalanılarak diğer kuvvetler de bulunabilir. Birinci türden ortogonal kesme için şu bağıntılar kullanılabilir:

$$\vec{P}_x = \vec{P}_{xy} \sin \phi \quad (2.2)$$

$$\vec{P}_y = \vec{P}_{xy} \cos \phi \quad (2.3)$$

Birinci türden ortogonal sistem için takım-talaş ara yüzeyinde sürtünme sonucu meydana gelen kuvvetler sistemi Şekil 2.8' de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Birinci Tür Ortogonal Sistemde Kuvvetlerin Durumu (Altan, 2002)

Kuvvetler arasındaki bağıntıları şekle bağlı kalarak yazarsak şöyledir:

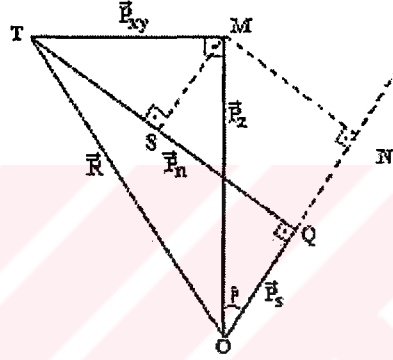
$$\begin{aligned}\vec{F} &= OB' = EB = BC + CE \\ \vec{F} &= \vec{P}_{xy} \cos \gamma_0 + \vec{P}_z \sin \gamma_0\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}N &= OD - DE = BB' \\ N &= \vec{P}_z \cos \gamma_0 - \vec{P}_{xy} \sin \gamma_0\end{aligned}\quad (2.5)$$

sürtünme katsayısı μ ise;

$$\mu = \frac{\vec{F}}{N} = \frac{\vec{P}_{xy} \cos \gamma_0 + \vec{P}_z \sin \gamma_0}{\vec{P}_z \cos \gamma_0 - \vec{P}_{xy} \sin \gamma_0}\quad (2.6)$$

Kayma düzlemindeki kuvvetler sistemi ise Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Kayma Düzleminde Kuvvetlerin Durumu (Altan, 2002)

Kuvvetler arasındaki bağıntı ise şöyledir:

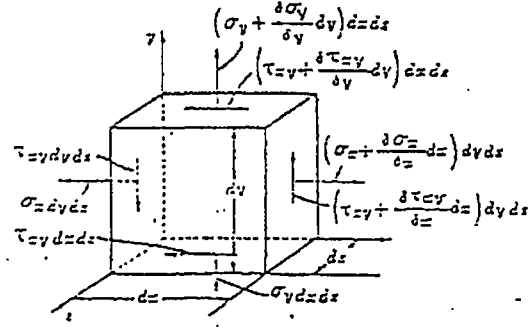
$$\begin{aligned}\vec{P}_s &= ON - QN = ON - MS \\ \vec{P}_s &= \vec{P}_z \cos \beta - \vec{P}_{xy} \sin \beta\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}\vec{P}_n &= QT = QS + ST = MN + ST \\ \vec{P}_n &= \vec{P}_z \sin \beta + \vec{P}_{xy} \cos \beta\end{aligned}\quad (2.8)$$

İkinci türden ortogonal kesme için:

$\lambda = 0^0$, $\phi = 90^0$ ve $\vec{P}_y = 0$ ise $\vec{P}_x = \vec{P}_{xy}$ olur. (Altan, 2002)

3. TAKIM ÜZERİNDEKİ GERİLMELER



Şekil 3.1 Gerilmenin iki boyutlu genel halinin gösterimi (Altan, 2002)

Birim elemanda iki boyutlu gerilme hali için (Şekil 3.1) denge durumunda;

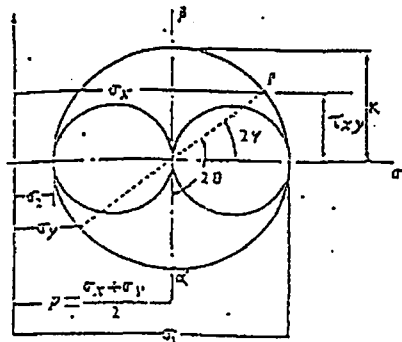
$$\sum P_x = -\sigma_x dydz + \left[\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right] dydz - \tau_{xy} dx dz + \left[\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right] dx dz = 0 \quad (3.1)$$

$$\sum P_y = -\sigma_y dx dz + \left[\sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy \right] dx dz - \tau_{xy} dx dz + \left[\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right] dy dz \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

Bu bağıntılar bir elastisite probleminde denge eşitlikleri olarak bilinir.



Şekil 3.2 Mohr diyagramı (Altan, 2002)

Akma ve kayma mekanizmalarında oluşan kayma veya akmanın maksimum kayma gerilmesiyle ilişkili olduğu kabul edilir. Şekil 3.2' deki Mohr diyagramından;

$$\sigma_x = -p - k \cdot \sin 2\phi \quad (3.5)$$

$$\sigma_y = -p + k \cdot \sin 2\phi \quad (3.6)$$

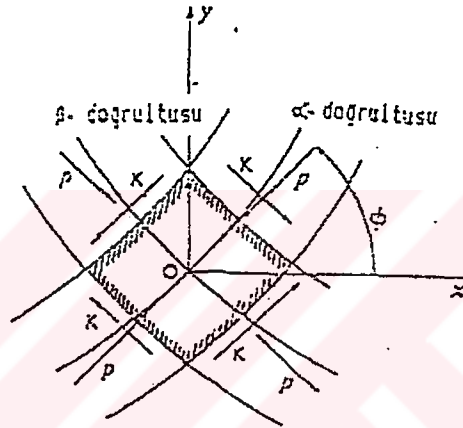
$$\tau_{xy} = k \cdot \cos 2\phi \quad (3.7)$$

Burada P ortalama normal gerilmedir. k kayma gerilmesidir. İki boyutlu gerilme hali için genel denge eşitlikleri maksimum kayma gerilmesi şartına göre şöyle yazılabilir:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} - 2k \cos 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} - 2k \sin 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + 2k \cos 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} - 2k \sin 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

Burada maksimum kayma gerilmesinin meydana geldiği düzlem ile x eksenini arasındaki açı ϕ ile gösterilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 İki boyutlu gerilme hali için maksimum kayma gerilmesi koşulları (Altan, 2002)

Eğer birim eleman maksimum kayma gerilmesi hatlarıyla sınırlı olduğu kabul edilirse ve $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ yerine p, k ve ϕ değişkenleri kullanılarak yeni eşitlikler bulunabilir. x ve y koordinatları küpün sınırlarına paralel olacak şekilde ($\phi = 0$) yeni koordinatlara dönüştürülecek olursa;

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + 2k \frac{\partial \phi}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial y} - 2k \frac{\partial \phi}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ elde edilir.}$$

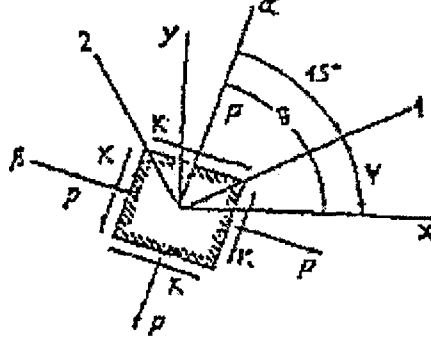
Bunlar integre edilirse;

$$p + 2k\phi = c_1 \rightarrow \alpha \text{ doğrultusu} \quad (3.10)$$

$$p - 2k\phi = c_2 \rightarrow \beta \text{ doğrultusu} \quad (3.11)$$

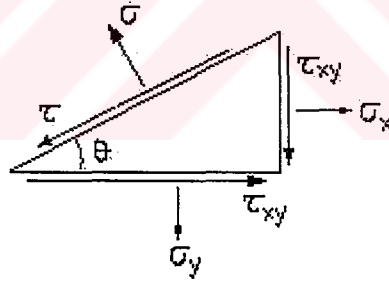
bağıntıları elde edilir. Bunlara Hencky eşitlikleri denir. Bu bağıntılara bağlı kalarak iki adet kayma doğrultusu oluşur. Bu doğrultulara α ve β doğrultuları adı verilir. Bunlar kayma

doğrultularıdır veya maksimum kayma gerilmesi doğrultusu anlamına gelen diğer bir adlandırma ile kayma akış doğrultuları da denir. Şekil 3.2' de görülen Mohr dairesinde α noktası asal gerilme düzlemi σ_1 ile saat yönüne zıt yönde 45° açı yapan bir düzlemdeki gerilmeleri gösterir.



Şekil 3.4 Uygun Gerilme Koşulları (Altan, 2002)

Şekil 3.4' de iki eksenli plastik deformasyonda birim hücredeki $\alpha - \beta$ doğrultuları gösterilmiştir. 1 asal gerilme doğrultusudur. $\alpha - \beta$ maksimum kayma düzleminin bulunduğu doğrultulardır.



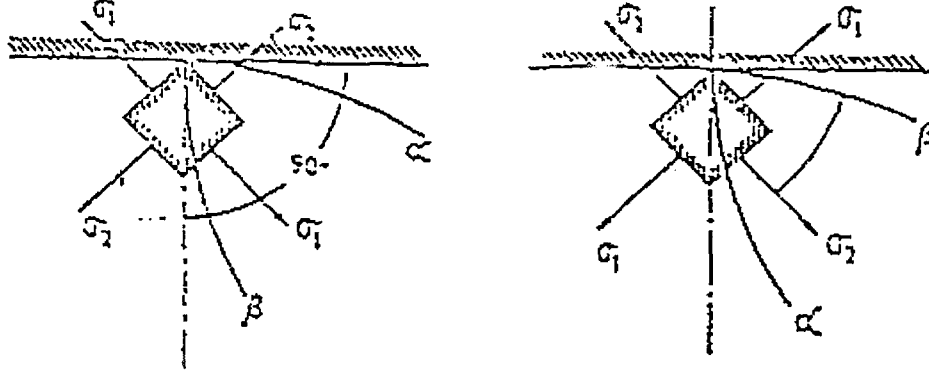
Şekil 3.5 Normal ve kayma gerilmelerinin durumu (Altan, 2002)

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3.12)$$

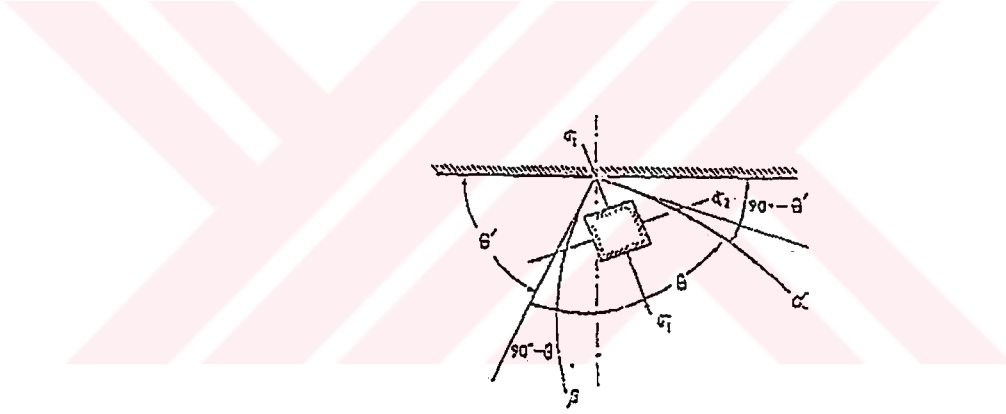
$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (3.13)$$

$$\sigma_{\max}^{\min} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.14)$$

$$\operatorname{tg} 2\theta_{\max, \text{kay gerilmesi}} = \frac{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)}{\tau_{xy}} \quad (3.15)$$



Şekil 3.6 Maksimum sürtünme koşulları altında sınır yüzeyi boyunca oluşan kayma doğrultuları (Altan, 2002)



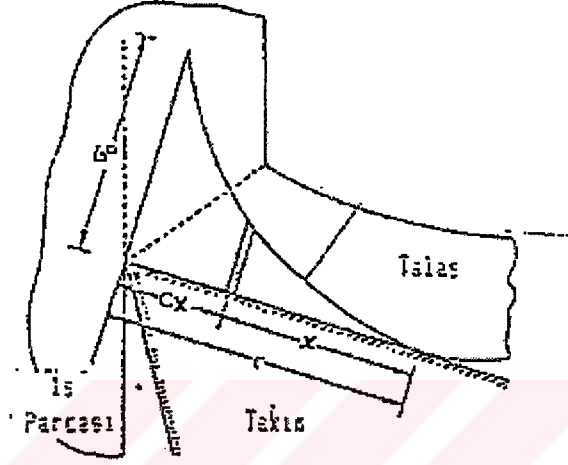
Şekil 3.7 Sürtünme değerlerine bağlı olarak ortaya çıkan kayma doğrultuları (Altan, 2002)

Kayma doğruları ile şu sonuçlar ortaya çıkmaktadır:

1. Kayma doğrultuları çiftler halindedir ve kayma yörüngelerini meydana getirirler.
2. Kayma doğrultuları birbirlerini 90° lik açıyla keserler.
3. Rijit sürtünmesiz malzemelerin sınırlarında veya serbest yüzeyinde kayma doğrultuları sınır düzlemiyle 45° lik bir açı altında bulunurlar.
4. Maksimum sürtünme veya kayma oluşumunu önleyici temas koşullarında kayma doğrultusu sınır yüzeyi boyunca uzanır.(Şekil 3.6)
5. Diğer sürtünme koşullarında ise kayma doğrultuları sürtünme koşullarına göre değişir. (Şekil3.7)

3.1 Talaş Yüzeyindeki Normal Gerilmeler

Maksimum normal gerilmenin talaş yüzeyi üzerindeki yerinin saptanması konusunda çeşitli çalışmalar yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Sonuç olarak maksimum normal gerilmenin kesici ağzın ucunda olduğu kabul edilmiştir (Şekil 3.8)



Şekil 3.8 Takım ve talaşın ara temas yüzeyindeki normal gerilmenin hiperbolik dağılımı (Altan, 2002)

Normal gerilme talaşın talaş yüzeyini terk ettiği noktada sıfırdır. Herhangi ara noktadaki gerilme ise hiperbolik özellik gösterir ve şu bağıntı ile bulunabilir:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \frac{c_x}{c} \right]^n \quad (3.16)$$

Burada,

σ_0 : tam uçtaki maksimum normal gerilme

c_x : herhangi bir noktanın uca olan uzaklığı

c : talaş yüzeyinde talaşın temas boyu

n : dağılım indeksi

$$x = c - c_x \quad (3.17)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{c^n} x^n \quad (3.18)$$

Normal kuvvet;

$$N = \int_0^c b \sigma dx = b \sigma_0 \frac{c}{n+1} = \frac{2bc \tau_s (1,285 - \gamma)}{n+1} \quad (3.19)$$

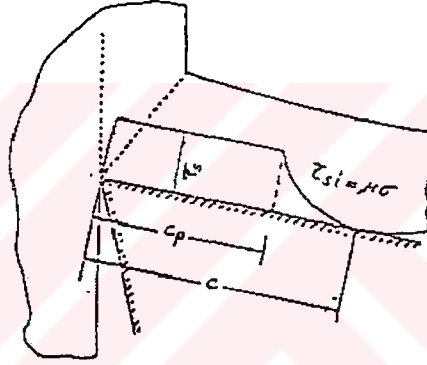
Ortalama gerilme;

$$\sigma_{ort} = \frac{N}{b.c} = \frac{2\tau_s (1,285 - \gamma)}{n+1} \quad (3.20)$$

τ_s değeri ise aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir:

$$\tau_s = 0,74 \cdot \sigma_u \cdot \Delta^{0,6\Delta} \quad (3.21)$$

Burada, τ_s kayma gerilmesi, σ_u malzemenin maksimum çekme gerilmesi, Δ ise yüzde uzama değeridir.



Şekil 3.9 Takım ve talaşın ara temas yüzeyindeki sürtünme gerilmesinin dağılımı (Altan, 2002)

$0 < x < c_p$ bölgesinde ara yüzeydeki kayma gerilmesi sabit ve τ_s olarak gösterilir. Bu bölgenin ötesinde kayma gerilmesi talaşın talaş yüzeyini terk ettiği bölgede sıfır ve bu değere ulaşana kadar da gittikçe azalan bir karakter gösterir.

$$F_T = F_1 + F_2 \quad (3.22)$$

Burada, F_T toplam sürtünme kuvveti, F_1 c_p deki sürtünme kuvveti, F_2 diğer bölgedeki sürtünme kuvvetidir.

$$F_1 = b \cdot c_p \cdot \tau_s \quad (3.23)$$

$$F_2 = b \cdot \tau_s \left[\frac{c \cdot c_p}{n+1} \right] \quad (3.24)$$

Ortalama kayma gerilmesi ise aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\tau_{ort} = \frac{F_T \cdot \tau_s}{b \cdot c} \left[\frac{1 + n \left(\frac{c_p}{c} \right)}{n+1} \right] \quad (3.25)$$

Dağılım indeksi (n) kesme hızına bağlı olarak değişir. (Altan, 2002)



4.FOTOELASTİSİTE

Fotoelastisite, cisimlerin iç gerilme dağılımının deneysel olarak belirlenmesini sağlar. Bunun için izotrop cisimlerin gerilme halinde iken heterotrop olma özelliklerinden faydalanılır.(Cinemre, 1963) Fotoelastik yöntem:

- 1) Geçirgen fotoelastisite'nin kullanıldığı iki boyutlu modeller üzerinde,
- 2) Yansıma fotoelstisitesi yönteminin kullanıldığı fotoelastik kaplamalı gerçek parçalar üzerinde,
- 3) Gerilme dondurulması yönteminin kullanıldığı üç boyutlu modeller üzerinde

Uygulanmaktadır.(Budynas, 1999)

İncelenecek cismin saydam bir malzemeden modelini yapmış olduğumuzu farz edelim. Gerçek cisminkine eşdeğer bir yükleme haline maruz kalınca malzeme heterotroplaşır. Modelden polarize bir ışık geçirirsek, meydana gelecek çift kırılma olayını inceleyerek her noktada cismin heterotropik elemanlarını belirtebilir ve iç gerilmelerin değerini bulabiliriz.

İki boyutlu fotoelastisite hem Matematiksel Elastisite Teorisi' nin elde ettiği sonuçları sağlamakta hem de bilhassa karışıklıklardan dolayı bu teorinin çözemediği problemlerin çözümünü bulmakta çok büyük fayda sağlamaktadır.(Cinemre, 1963)

1816'ya doğru, yani Elastisite' nin matematik teorisinin henüz doğduğu devirde, fizikçi David Brewster bir gerilme halinde izotrop saydam cisimlerin çift kırıcı olduğunu, gerilme ortadan kalkınca bu özelliğin de kaybolduğunu keşfetti ve bu olay fotoelastisite biliminin başlangıcı oldu.(Frocht, 1969, Cinemre, 1963) Neumann 1841 yılında gerilme cinsinden gerilme-optik kanunlarını formüle etti, yaklaşık 1 yıl sonra Maxwell bu kanunların gerilme cinsinden bağıntısını kurdu. Fotoelastisite' nin mühendislik uygulamaları ise 1900 yılında Fransız mühendis Mesnager ve İngiliz bilim adamları Coker ve Filon' un çalışmaları sayesinde ortaya çıktı. 35 yıl boyunca fotoelastisite çalışmaları iki boyutlu problemlerle sınırlı kaldı. Daha sonra Oppel tarafından üç boyutlu bir problemin nicel olarak çözümü gerçekleştirildi.(Frocht, 1969) 1960' lı yıllardan itibaren fotoelastik bilgilerin toplanması ve analizi otomatik metotlarla yapılmaya başlandı. 1960' lı ve 1970' li yıllarda nokta nokta otomatik analiz sistemleri geliştirildi. Bu sistemler genel olarak dönen optik elemanlar ve bir noktadaki ışık yoğunluğunu ölçen fotometrik sensörlerle donatılmışlardı. 1970' lerin sonunda ve özellikle 1980' li yıllarda dijital görüntü elemanlarının maliyetlerinin azalması ile tek renkli ışık

kaynağı kullanan klasik polariskopların kullanıldığı metotlar geliştirilmekle birlikte yeni metotlarda geliştirildi. Bu metotların gelişimi şöyle olmuştur:

- Işığın kırılmasıyla oluşan çizgi (saçak) merkezlerinin çıkarılmasına dayanan metotlar (1979)
- Yarı saçak fotoelastisitesi (HFP) metotları (1983)
- Faz basamaklama metotları (1985)
- Fourier dönüşümlerine dayanan metotlar (1986)
- Spektral içerik analizi metotları(1985)
- Hetrodyn metodu (1987)
- RGB fotoelastisitesi (1991) (Ajovalist vd., 1998)

4.1 Fotoelastisite Teorisi

Fotoelastik analiz hem eğitim amaçlı hem de uygulamalarda çok etkili bir yöntemdir. Fotoelastisite yi anlamak için öncelikle Maxwell' in elektromanyetik dalga teorisini temel alarak ışığın özelliklerini, ışığın kırılmasını ve polarizasyonunu yeniden gözden geçirmek gerekir.

4.2 Işığın Elektromanyetik Dalga Teorisi

Tek renkli bir ışık kaynağı belirli bir λ dalga boyunda ve c ışık hızında yayılan ışınlar üretir. Genel durumu kabul edersek, ışınlar kaynaktan birçok yöne doğru yayılırlar. Her bir ışının bir dalgalar dizisinden oluştuğunu farz edelim, burada her bir dalga zaman ve yere göre sinüzoidal olarak değişen bir vektör olarak düşünülebilir. λ dalga boyunda, A_1 genliğinde ve c hızında z yönünde yayılan bir dalga (Şekil 4.1) şöyle tanımlanabilir:

$$a_1(t, z) = A_1 \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \quad (4.1)$$

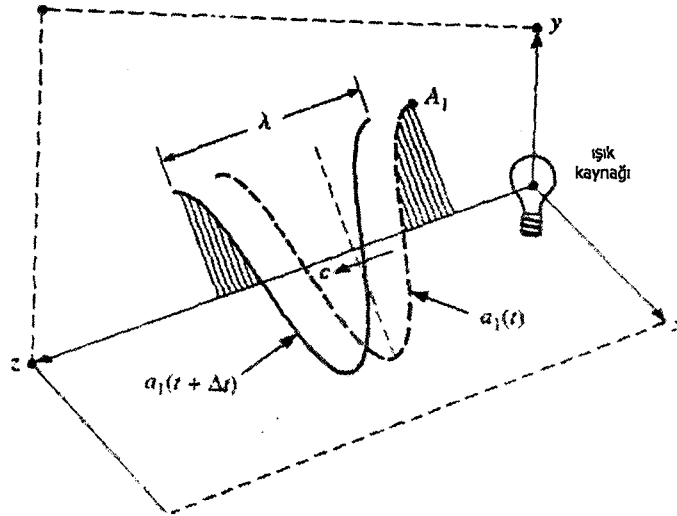
Eğer dalga z ekseninde yayılıyor ve bir noktada sabitlenirse, şöyle tanımlanır:

$$a_1(t) = A_1 \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct \quad (4.2)$$

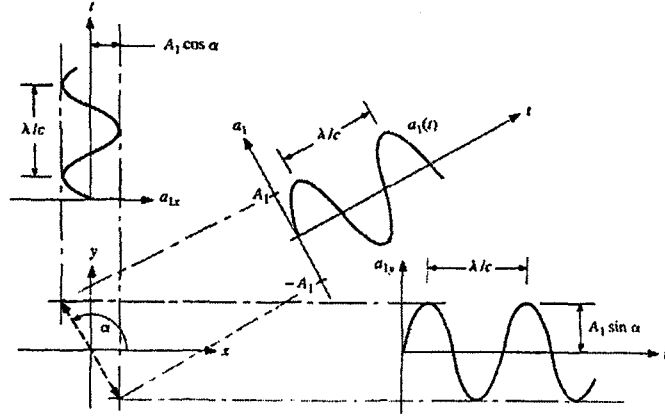
Böylece z ekseninde yayılan bir noktada ışığın genliği, büyüklüğü $\pm A_1$ değerleri arasında değişen bir vektör olarak düşünülebilir (Şekil 4.2). Bir tam devrin periyodu λ/c , dalga frekansı c/λ dir. a_1, a_2, \dots dalgaları bir vektör olarak düşünüldüğünde, her bir dalga birbirine dik iki parçaya ayrılabilir. Örneğin Şekil 4.2' deki a_1 dalgası x ve y doğrultularında bileşenlere sahiptir ve bunlar şöyle ifade edilir:

$$a_{1x}(t) = A_1 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct \quad (4.3a)$$

$$a_{1y}(t) = A_1 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct \quad (4.3b)$$



Şekil 4.1 z ekseninde yayılan bir dalga (Budynas,1999)



Şekil 4.2 Yayılan dalganın x ve y eksenlerindeki bileşenleri (Budynas,1999)

Böylece $a_1(t)$ dalgası z yönüne yayılan x ve y doğrultularındaki fazda salınım yapan iki dalganın toplamı olarak düşünülebilir.

4.3 Polarizasyon

Herhangi bir $a(t)$ dalgası göz önüne alalım. $a(t)$ nin x ve y doğrultularındaki bileşenleri şöyle yazılabilir:

$$a_x(t) = A_x \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct \quad (4.4a)$$

$$a_y(t) = A_y \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct \quad (4.4b)$$

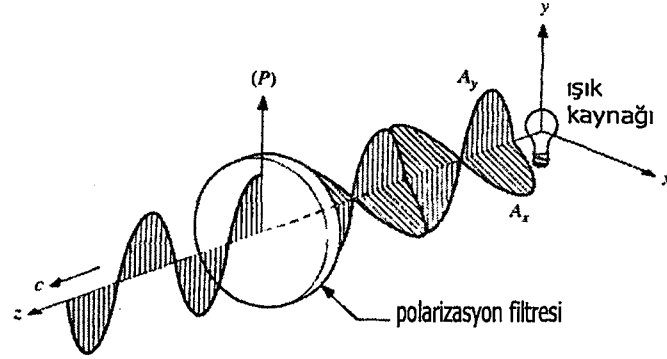
Burada A_x ve A_y dalganın x ve y doğrultularındaki bileşenlerinin genlikleridir.(Şekil4.3)

Şekil 4.3' deki bileşke dalgalardan biri ışık yolu üzerine bir polarizasyon filtresi konularak engellenebilir. Bir polarizasyon filtresi, filtrenin polarizasyon eksenine dik olan bir ışık dalgasının hemen hemen tamamını emebilir. Böylece eğer polarizasyon ekseni y ekseni seçilirse $A_x(t)$ nin çoğu emilir ve $A_y(t)$ nin çoğu geçer.

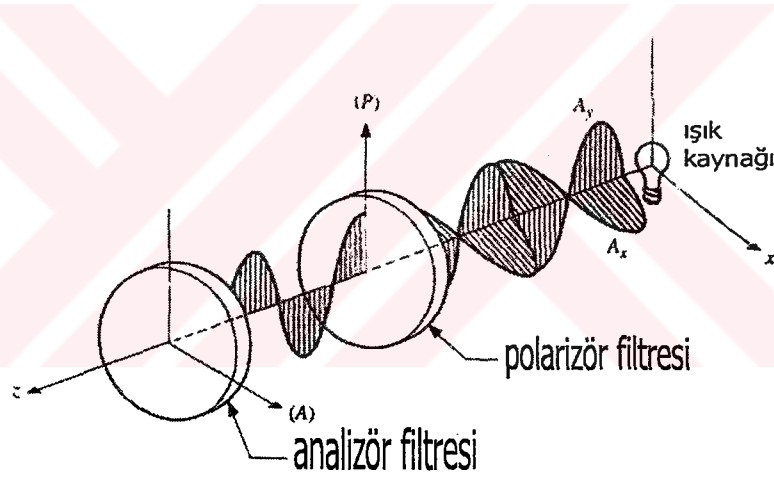
Işığı polarize eden filtre P polarizörü olarak adlandırılmıştır. Eğer ışık yolu üzerine ikinci bir polarizasyon filtresi konulursa, birinci filtre tarafından polarize edilen ışık eğer iki filtrenin polarizasyon ekseni birbirine dik ise tamamen emilir. (Şekil 4.4)

İkinci filtre A analizörü olarak adlandırılmıştır. Eğer analizör ekseninin polarizör eksenine göre açısı 90° den küçük ise biraz ışık iletilir. Bu ışık, analizör ekseni boyunca polarize

edilmiş ışığın bir bileşenidir. Eğer analizör ve polarizör eksenleri paralel ise analizörden polarize edilen ışığın çoğu iletilir.



Şekil 4.3 Polarizasyon filtresi ile ışığın tek eksenindeki bileşeninin iletimi (Budynas,1999)



Şekil 4.4 Analizör filtresi ile polarizör filtresi eksenlerinin birbirine dik olması durumu (Budynas,1999)

4.4 Kırılma

Işık bir ortamdan diğerine geçtiğinde, dalga yayılma hızı değişir. n_r bağıl kırılma indisi, maddenin ortama göre ışığı kırma indisi olarak tanımlanır ve ortamdaki c_o hızının maddedeki c_s hızına oranıdır.

$$n_r = \frac{c_o}{c_s} \quad (4.5)$$

Bir dalga havadan geçirgen bir katı ortamına geçtiğinde yavaşlar. Bununla birlikte katıdan

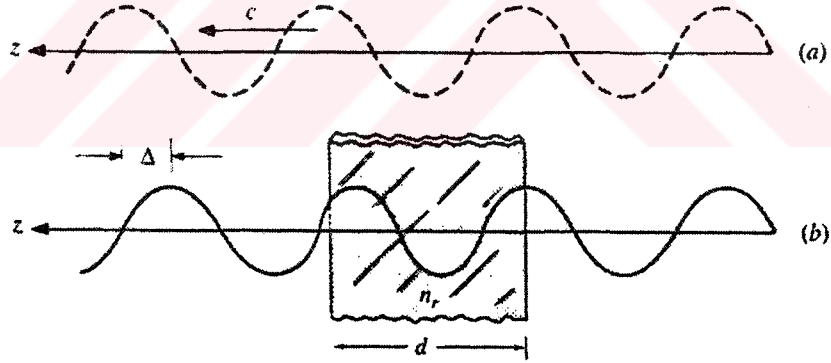
tekrar hava ortamına geçtiğinde tekrar orijinal hızını kazanır. Eğer geliş açısı sıfır ise, görülebilir bir değişiklik olmamasın rağmen dalga gene yavaşlar. Şekil 4.5(a)' da bir dalganın havadaki hareketi, Şekil 4.5(b)' de aynı dalganın geçirgen bir katıdan geçişi gösterilmiştir. Işığın katıdan geçişi esnasında dalganın yavaşlaması dalga boyunda da bir azalmaya sebep olmaktadır. Bu da fazda bir Δ değişikliğine sebep olur. Şekil 4.5(a)' da dalganın $d+\Delta$ uzaklığını kat etmesi süresince geçen t zamanı , Şekil 4.5(b)' de dalganın katının d kalınlığından geçerken geçen süreye eşittir. Böylece

$$t = \frac{d + \Delta}{c_a} = \frac{d}{c_s} \quad \text{veya} \quad \Delta = \left(\frac{c_a}{c_s} - 1 \right) d \quad \text{ve} \quad n_r = \frac{c_a}{c_s}$$

olduğundan

$$\Delta = (n_r - 1)d \quad \text{olur.} \quad (4.6)$$

Işık dalgasının dik açıyla katıdan geçmesi esnasında bir gecikme olsa da bu gözle görülmez.

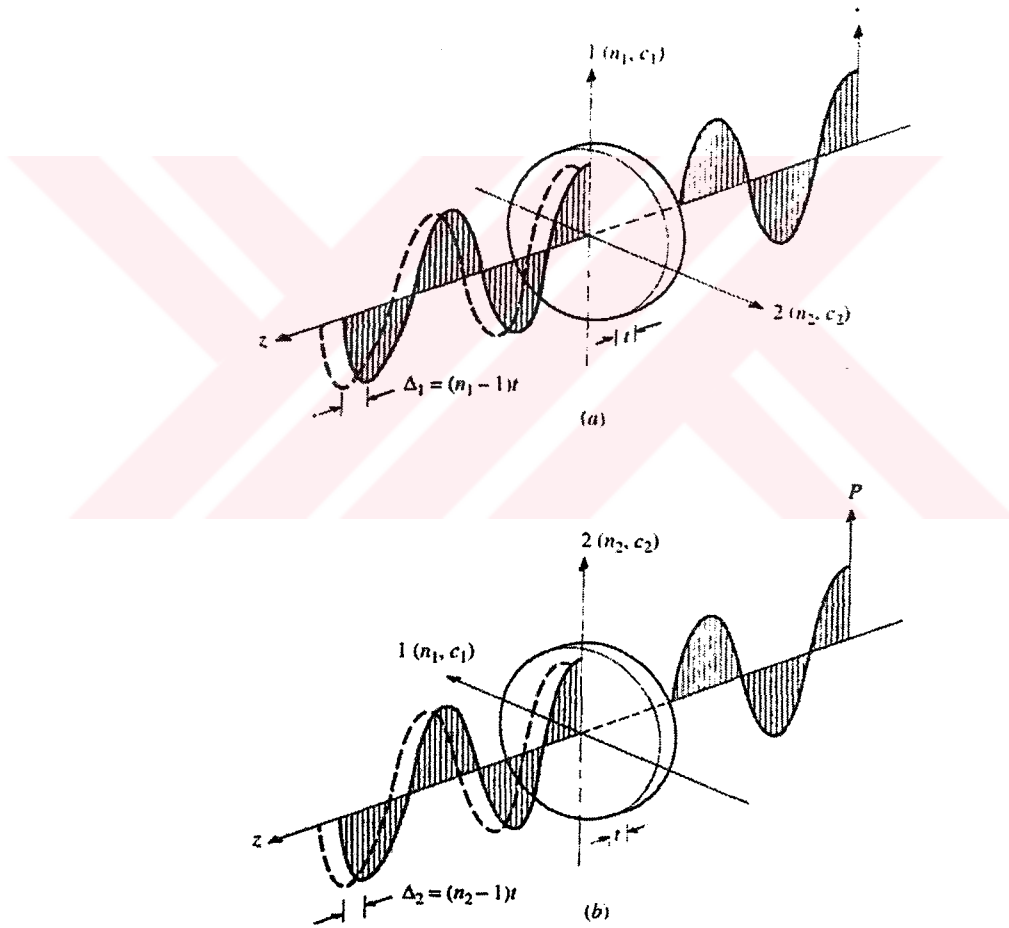


Şekil 4.5 Bir dalganın geçirgen bir katıdan iletilmesi (Budynas,1999)

4.5 Çift Kırılım

Bazı geçirgen malzemeler için, kırılma indisi malzemeden geçen polarize ışının açısına bağlı olarak değişmektedir. Minimum ve maksimum kırılma asal eksenleri birbirine diktir ve hızlı ve yavaş eksenler olarak adlandırılırlar. Böyle davranan malzemeler çift kırıcı olarak

adlandırılırlar. Şekil 4.6' da disk şeklinde çift kırıcı bir malzeme gösterilmiştir. Burada (n_1, c_1) ve (n_2, c_2) 1 ve 2 asal eksenleri boyunca (bağıl kırılma indisi, ışık geçiş hızı) dır. Eğer $n_2 > n_1$ ise $c_1 > c_2$ dir ve 1 eksenini hızlı eksen, 2 eksenini yavaş eksenidir. Eğer ışık, ışığın hızlı veya yavaş eksen doğrultusunda polarize olduğu, Şekil 4.6' da gösterildiği şekilde, çift kırıcı bir plakaya girerse plakadan polarize olarak girdiği gibi, fakat $\Delta_1 = (n_1 - 1)t$ veya $\Delta_2 = (n_2 - 1)t$ gecikmesiyle çıkar. Burada t zamanı değil plaka kalınlığını ifade etmektedir. Eğer $n_2 > n_1$ ise faz değişikliği $\Delta_2 > \Delta_1$ şeklinde olur. Giren ışığın polarizasyon eksenini 1, 2 eksenlerine açılı ise ışık bu eksenler boyunca bileşenlere sahiptir ve bileşenler $\Delta_2 - \Delta_1$ faz farkıyla çıktığı için çıkan ışık karmaşık olur.



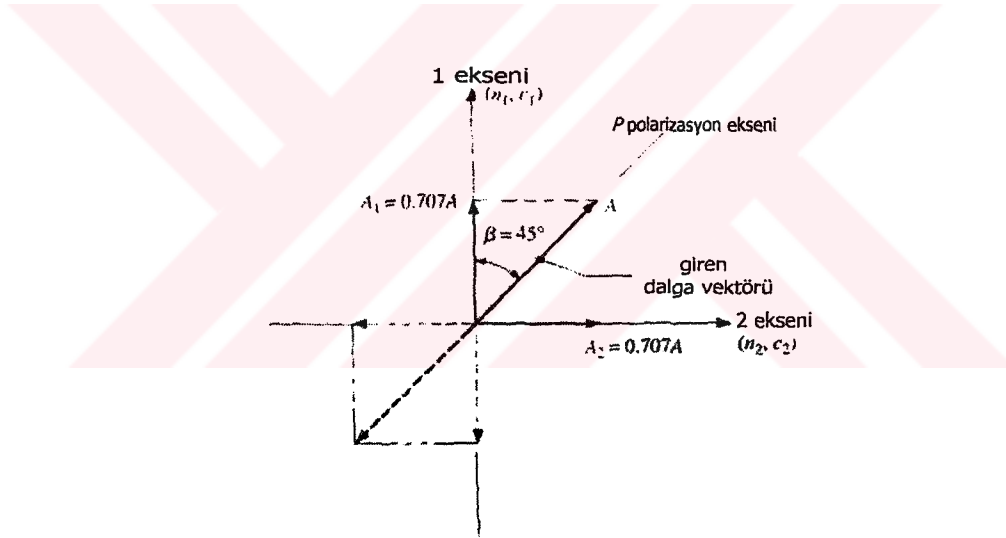
Şekil 4.6 Çift kırıcı plaka (Budynas,1999)

Özel bir durum olarak, çift kırıcı plakada $\Delta_2 - \Delta_1 = \lambda/4$ olduğunu kabul edelim. Bunun anlamı, hızlı ve yavaş eksenler arasındaki gecikmede çeyrek dalga boyu fark vardır ve plaka çeyrek dalga plakası olarak adlandırılır. Ayrıca dalganın hızlı ve yavaş eksenlere göre $\beta = 45^\circ$ açısı ile

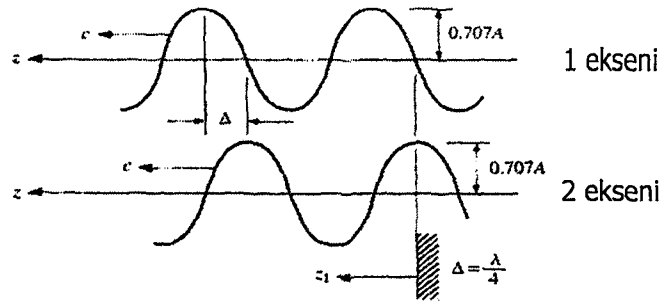
polarize olduğunu kabul edelim. Plakaya giren ışık Şekil 4.7' de gösterilmiştir.

Önceden olduğu gibi, A büyüklüğündeki dalga 1 ve 2 eksenleri boyunca A_1 ve A_2 bileşenlerine ayrılır. Bu bileşenlerin büyüklüğü $0,707A$ olur. Dalga plakaya girer girmez her ikisi de yavaşlar. Buna rağmen, 2 eksenini yavaş eksen olduğu için 2 eksenini üzerindeki dalga 1 eksenini üzerindeki dalgadan daha fazla yavaşlar. Her iki dalga plakadan çıktığında her ikisi de özdeş c hızına erişirler, fakat Şekil 4.8' de gösterildiği gibi 1 eksenini üzerindeki dalga $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \lambda/4$ kadar öndedir. Çıkan dalganın karakteristiğini tespit etmek için iki bileşeni vektör toplama yöntemiyle toplayalım. Şekil 4.8' de ışık yolu boyunca herhangi bir z_1 referans noktasında belirli bir zamanda ışık dalgaları tespit edilmektedir. Hızlı ve yavaş eksenler boyunca çıkan dalgalar şöyle ifade edilebilir:

$$a_1 = 0,707A \sin \frac{2\pi}{\lambda} z_1 \quad (4.7a)$$



Şekil 4.7 Plakaya giren ışık (Budynas,1999)



Şekil 4.8 Işığın hızlı ve yavaş eksenlerdeki bileşenleri (Budynas,1999)

$$a_2 = 0,707A \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(z_1 + \frac{\lambda}{4} \right) = 0,707A \cos \frac{2\pi}{\lambda} z_1 \quad (4.7b)$$

Nihai dalga 7 denklemlerindeki dalgaların vektörel toplamıdır. Çıkan dalganın genliği:

$$A_f = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} = \sqrt{\left(0,707A \sin \frac{2\pi}{\lambda} z_1 \right)^2 + \left(0,707A \cos \frac{2\pi}{\lambda} z_1 \right)^2} = 0,707A \quad (4.8)$$

sabit değeridir. Nihai dalga vektörünün 2 eksenine ile arasındaki açı $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)$ olsun.

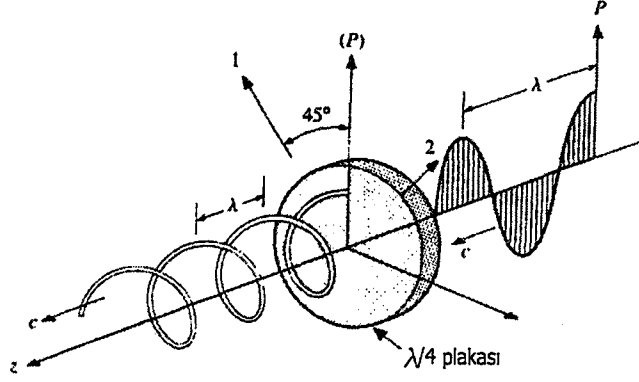
Böylece;

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{0,707A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} z_1 \right)}{0,707A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} z_1 \right)} \right] = \frac{2\pi}{\lambda} z_1 \quad (4.9)$$

Bunun anlamı çeyrek dalga plakasından çıkan dalga vektörü $0,707A$ sabit genliğine sahiptir ve dalga boyu başına tam bir devir (2π) dönmektedir. Çıkan dalga vektörü Şekil 4.9 da gösterilmiştir. Çeyrek dalga plakasından çıkan dalga dairesel polarize ışık olarak adlandırılır.

A analizör filtresi polarizasyon ekseninin P polarizörüne dik olduğu ışık yoluna yerleştirilirse, dairesel polarize ışığın bileşenleri iletilir ve analizör boyunca gözlemlenir. Işık yolu üzerinde çeyrek dalga plakası olmadığı ve analizör polarizöre dik olduğunda analizör boyunca hemen hemen hiç ışık gözlenmez. Böylece çift kırıcı malzemenin bu özel durumu ışığın çapraz polarizasyon filtrelerinden nasıl geçtiğini gösterir.

Eğer çift kırıcı bir plakanın bağıl dalga değişimi Δ , λ' nın bir integral çarpanı ise ($\Delta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$) plakayı terk eden bileşke dalgalar β değerlerinden bağımsızdır ve vektör bileşimleri çift kırıcı plakalara giren dalgaya özdeş bir dalga meydana getirir.



Şekil 4.9 Dairesel polarize ışık (Budynas,1999)

Böylece polarizasyon filtreleri çapraz konulduğunda, çift kırıcı plakalar ışık karakteristiklerini değiştirmedikçe hiçbir ışık gözlemlenemez. Eğer Δ , λ' nın buçuklu katlarından biri ise ($\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$) çıkan dalga polarizasyon eksenine dik olmadığı zaman giren dalga ile özdeşdir. Eğer analizör, polarizöre dik ise, bütün ışık dalgası analizörden geçer. (önemsiz geçiş kayıpları hariç)

Eğer, polarizör eksenini ile çeyrek dalga plakasının 1 eksenini arasındaki açı 45° den farklı ise, 1 ve 2 eksenleri boyunca dalgalar farklı A_1 ve A_2 genliklerine sahip olurlar. Çıkan dalga önceki gibi döner, fakat $A_1 \neq A_2$ olduğundan çıkan dalga dairesel değil eliptiktir ve 1 ekseninde A_1 , 2 ekseninde A_2 değerlerine sahiptir. Eğer polarizör ve 1 eksenini arasındaki açı 0° veya 90° ise, dalganın gecikme eksenlerinin birinde bileşeni yoktur ve Δ değerinden bağımsızdır. Bundan dolayı çıkan dalga girdiği doğrultuda ve polarize olarak çıkar, eğer analizör ve polarizör çapraz ise, ışık iletilmez. Böylece $\beta=0^\circ$ veya 90° olduğunda veya $\Delta=N\lambda$ ($N=0, 1, 2, 3, \dots$) ise analizörden ışık iletilmez. Bu iki durum fotoelastisite' yi anlamada en önemli kavramlardır.

4.6 Gerilme ve Çift Kırılım

Gerilme halinde, belirli geçirgen malzemeler çift kırıcı davranır ve n_1 ve n_2 kırılma indisleri doğrudan asal gerinimlere bağlıdır. Bununla birlikte asal gerinimler doğrudan asal gerilmelere bağlı olduğu için kırılma halini doğrudan gerilmelerle ilişkilendireceğiz. İki boyutlu fotoelastisite için, çift kırıcı malzemeyi t sabit kalınlığında ince bir plaka ve plaka içi asal gerilmelerin σ_1 ve σ_2 olduğunu ($\sigma_1 > \sigma_2$) ve plakaya dik olan σ_3 asal gerilmesinin sıfır olduğunu kabul edelim. n_1 ve n_2 kırılma indisleri farkı doğrudan asal gerilme farklarına

bağıdır. Şöyle ki,

$$n_1 - n_2 = k(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4.10)$$

Burada 1 ve 2 eksenleri asal gerilme eksenleridir ve k bağıl gerilme-optik sabiti olarak adlandırılır ve malzemeye bağlıdır. Eğer numunenin t kalınlığı böyle bir malzemedan yapılmışsa, 4.6 denkleminde

$$n_1 = \frac{\Delta_1}{t} + 1 \quad (4.11a)$$

$$n_2 = \frac{\Delta_2}{t} + 1 \quad (4.11b)$$

böylece

$$n_1 - n_2 = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{t} = \frac{\Delta}{t} \quad (4.12)$$

denklemi elde edilir. Burada Δ numuneden 1 ve 2 eksenleri boyunca çıkan dalgalar arasındaki bağıl faz değişimidir. (4.10) ve (4.12) denklemlerini birleştirirsek,

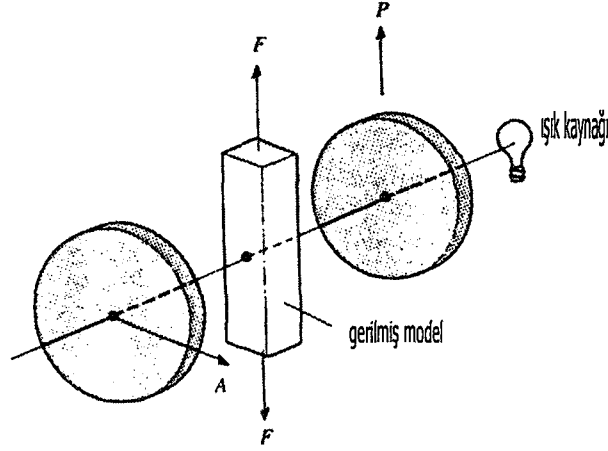
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\Delta}{kt} \quad (4.13)$$

eşitliğini elde ederiz. $\Delta = N\lambda$ olduğunda ($N=0,1,2,3,\dots$) teorik olarak net bir değişimle sonuçlanmayan tam dalga değişimi olur. Böylece, model iki çapraz polarizasyon filtresi arasında (düzlem polarizasyonu, Şekil 4.10) ve $\Delta = N\lambda$ olduğunda, N' nin tam değerleri için hiç ışık iletilmez. Bu yüzden ışığın sönümlenmesi için gerekli şart

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N\lambda}{kt} \quad N=0,1,2,3,\dots \quad (4.14)$$

(4.14) no' lu denklem ışığın iletilmediği noktalarda $\sigma_1 - \sigma_2$ gerilme farkını nicelenebilir kılabilen temel fotoelastisite denklemdir. Işığın sönümlenmesi $N=0$ olması dışında λ dalga boyunun da bir fonksiyonudur. Bu da ne zaman beyaz ışık fotoelastik bir modelden geçirilirse çeşitli renkteki şerit ve saçakların oluşmasına neden olur. Her bir renk belirli bir dalga boyunun sönümlenmesini gösterir. Bağıl gecikme etkisine bağlı olarak, λ' dan bağımsız olduğu için sadece $N=0$ saçığı siyah olur. (bütün dalga boyları $N=0$ da sönümlenir.) geriye kalan saçaklar gökkuşağı renginde olurlar. Bütün bu saçaklara ($N=0$ ' ı da içerir.) izokromatik

saçaklar adı verilir.



Şekil 4.10 Düzlem polariskobu (Budynas,1999)

Işığın sönmüldüğü ikinci bir durum daha vardır. Çeyrek dalga plakalarında işlediğimiz gibi, polarizör ve analizör çapraz yerleştirilip 1 ve 2 eksenine hizalandığında ışık iletilmez. Bu gerilmiş malzemeye de uygulanabilir. Böylece polarizör ve analizör çapraz yerleştirilip asal gerilmelerle hizalandığında ışık sönmülenir. Aynı zamanda ışığın sönmüldüğü yerlerde şerit veya saçaklar görünür. Bu şeritler beyaz ışık kaynağının kullanılıp kullanılmadığına bağlı olmaksızın her zaman siyahtır. Oluşan saçaklar izokromatik saçaklardan daha kalındır ve hassasiyeti daha azdır. Polarizör ve asal gerilmelerin hizalanmasıyla oluşan saçaklara izoklinik saçak adı verilir ve herhangi bir saçak üzerindeki bütün noktalar polarizör ile aynı doğrultuda asal gerilmelere sahiptir. Polarizör ve analizör gerilmiş modele göre beraberce döndürüldüklerinde ve çapraz konumlarını koruduklarında, sadece gerilmeleri polarizörle hizalanan noktalar ışığı sönmüler ve izoklinik saçaklar değişir. Bir noktadaki asal gerilmeleri belirlemek için, bir izoklinik saçak noktaya kadar polarizör / analizör filtresi kümesi döndürülür ve filtrenin açısal durumu kaydedilir.

4.7 İzokromatik ve İzoklinik Saçaklar

İzokromatik Saçaklar: İzokromatik saçaklar gerilme-optik etkilerine bağlıdır. Ne zaman bir dalga boyunun bir kısmının sıfır veya tam dalga katları değişimi meydana gelirse ışık sönmülenir. Bu davranış Denklem 4.14'e uygundur. Eğer modelden beyaz ışık geçirilirse, sadece sıfır saçığı ($N=0$) siyahtır, kalan izokromatik saçaklar renklidir. Çapraz konumlandırılmış filtre kümesinin açısal durumu bu etkiden bağımsızdır.

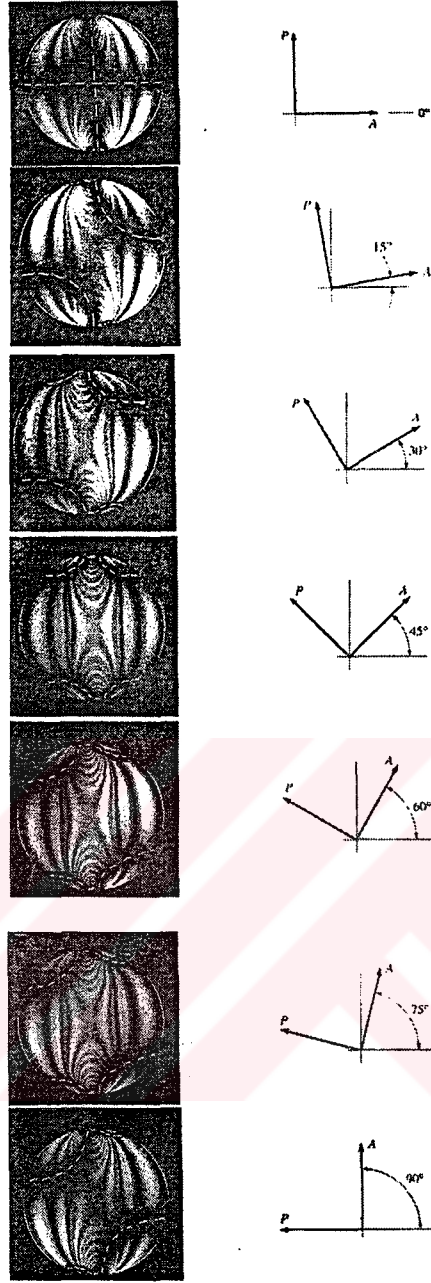
İzoklinik Saçaklar: Bu saçaklar çaprazlanmış filtre kümesinin açısal durumuna bağlıdır. Çapraz filtre kümesinin belirli bir açısal durumu için model üzerinde geniş bir saçak dizisi görülür. Saçakların içindeki her bir noktadaki asal gerilmeler aşağı yukarı polarizör ve analizördeki gibi aynı yöndedir. Normal olarak bir izoklinik saçığı kaydederken şerit merkezi kullanılır. Bu saçaklar ışık kaynağının dalga boyuna bağlı olmaksızın her zaman siyahtır. Filtre kümesi modele göre döndürüldükçe saçaklar hareket eder. Eğer bütün saçaklar filtrelerin açısal durumuna bağlı olmaksızın aynı noktaya doğru hareket ediyorsa, bu nokta numune düzlemindeki bir izotropik noktadır. Buradaki gerilmelerin Mohr dairesi bir noktadır ve numune düzlemindeki herhangi bir noktadaki gerilmelerin durumu aynıdır. Numune düzlemine dik herhangi dahili bir yüzeyde kesme gerilmesi yoktur.

İzoklinik saçaklar geniş ve siyah oldukları için izokromatik saçakları perdelerler ve analizlerini zorlaştırırlar. İki çeyrek dalga plakası kullanarak izoklinik saçakları yok eden bir metot vardır. Bu metodu açıklamadan önce izoklinik saçakların analizi incelenecektir.

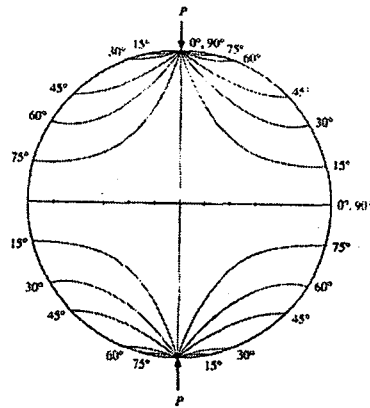
4.8 İzoklinik Saçak Analizi

Üstünden ve altından yoğunlaştırılmış kuvvetlerle sıkıştırılmış iki boyutlu bir disk düşünelim. Benzer saçak örnekleri Şekil 4.11' de gösterilmiştir. Zayıf saçaklar izokromatik saçaklardır ve daha sonra işlenecektir. Geniş, koyu saçaklar izoklinik saçaklardır. Fotoğraf üzerindeki beyaz noktalı çizgiler her bir izoklinik saçığın merkez çizgisinin yerini göstermek için elle çizilen çizgilerdir. Her bir fotoğraf filtre setinin modele göre değişik açısal durumlarını göstermektedir. Değişik açısal durumlara göre değişik izokliniklerin oluştuğu görülebilir. 0° ve 90° durumları aslında aynıdır.

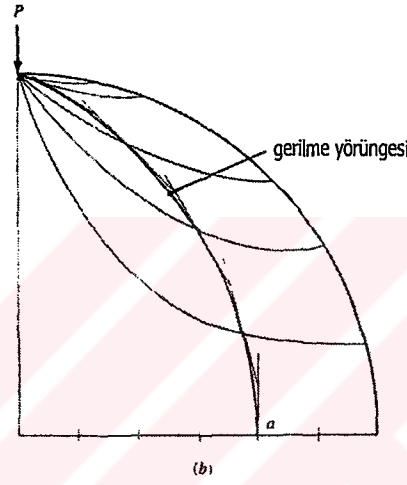
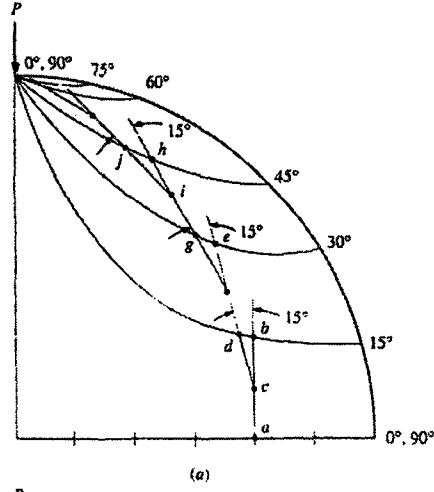
Şekil 4.12 ve Şekil 4.11' de bütün izokliniklerin bağıl pozisyonları gösterilmiştir. Asal eksenlerin yerlerinin bilinmesi izokromatik saçakların analizini kolaylaştıracaktır. İzoklinik bilgiden gerilme yörüngeleri grafik olarak çıkarılabileceği için tek başına oldukça yararlı olabilir. Gerilme yörüngeleri asal gerilmelerin "akış"ını tasvir eder ve dizaynda da yardımcı olabilir.



Şekil 4.11 İzoklinik saçaklar (Budynas,1999)



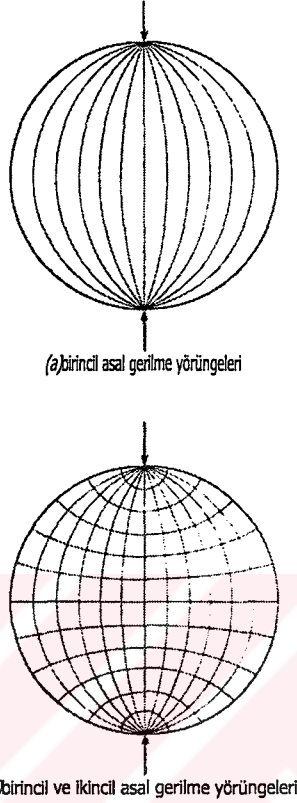
Şekil 4.12 İzoklinik saçakların bağıl durumu (Budynas,1999)



Şekil 4.13 Gerilme yörüngelerinin çizimi (Budynas,1999)

Gerilme yörüngelerinin çizilmesinin bir yolu Şekil 4.13(a)' da gösterilmiştir. Şekilde diskin çeyreğini düşünün. Yatay çap boyunca üniform bir ızgara işaretleyin. Izgaradaki her bir noktada (şekilde a noktası) en yakın izokliniğe ab dik çizgisini çizin. Yatay çizgi 0° , izoklinik 90° , a noktasındaki asal gerilmelerden biri dikey doğrultuda olsun. ab doğrusunu c noktasında ikiye bölün. c noktasında 15° izoklinik saçağı oluştuğunda filtre setinin döndürüldüğü doğrultuda bir 15° doğrusu çizin. 15° doğrusu 15° izokliniğiyle d noktasında, 30° izokliniğiyle e noktasında kesişir. Tekrar, de doğrusunu ortadan ikiye bölün (f noktası). f noktasından dikeye 30° açılı doğru çizin. İşleme 90° izokliniğine erişinceye kadar devam edin. Daha sonra eğri cetveli kullanarak Şekil 4.13' de gösterildiği gibi bu doğrulara teğet bir çizgi çizin. Bu yaklaşık bir gerilme yörüngesidir. İşlem her bir yatay ızgara noktası için devam eder. Bu problem simetrik olduğu için kalan üç çeyrek de çizilebilir. Böylece Şekil 4.14(a)' da gösterildiği gibi gerilme yörüngelerinin ilk kümesi çizilmiş olur. Benzer şekilde ikinci gerilme

yörüngeleri de çizilir, fakat bu sefer çizime Şekil 4.14(b)' de gösterildiği gibi dikey çap boyunca başlanır. Şekil 4.14(b)' de görüldüğü gibi birincil asal gerilmeler gerilme akışının disk boyunca nasıl iletildiğini belirtir.

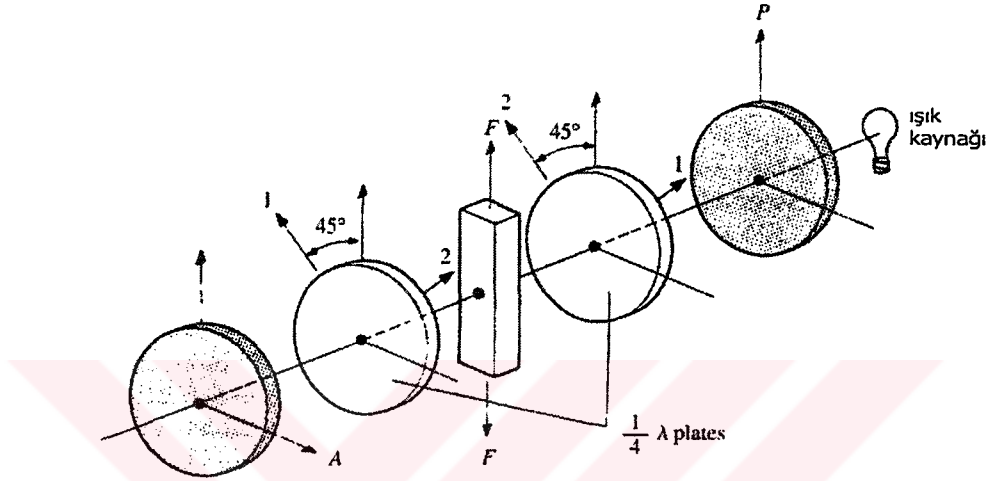


Şekil 4.14 Asal gerilme yörüngeleri (Budynas,1999)

4.9 İzokromatik Saçak Analizi

İzokromatik saçak analizi yapılırken izoklinik saçakları yok eden bir metot vardır. Bir çeyrek dalga plakası polarizörden sonra yerleştirildiğinde ve hızlı ve yavaş eksenleri polarizör eksenine göre 45° açılı olduğunda plakalardan çıkan ışık dairesel polarize olur. Eğer model bu dairesel polarize ışık yolu üzerine yerleştirilirse, bağıl kırılmalar olur, fakat ışık model boyunca helezon şeklinde ilerlediğinden ışık vektörü sadece sonsuz küçük uzaklıktaki asal gerilme eksenleri ile aynı hizaya gelir. Böylece izoklinik saçaklar oluşmaz. Işık modeli terk ettiğinde, çeyrek dalga plakası tarafından indüklenen helezon şeklindeki ilerleme etkisi durdurulmalıdır, aksi takdirde izokromatik saçaklar etkilenir. Bu da model ve analizör filtresi arasında ikinci bir çeyrek dalga plakası yerleştirilerek yapılabilir. İki plakanın hızlı ve yavaş eksenleri Şekil 4.15' de gösterildiği gibi kesişmelidir. Polarizasyon filtreleri ve çeyrek dalga plakalarının bu şekilde düzenlenmesi dairesel polariskoplar içindir.

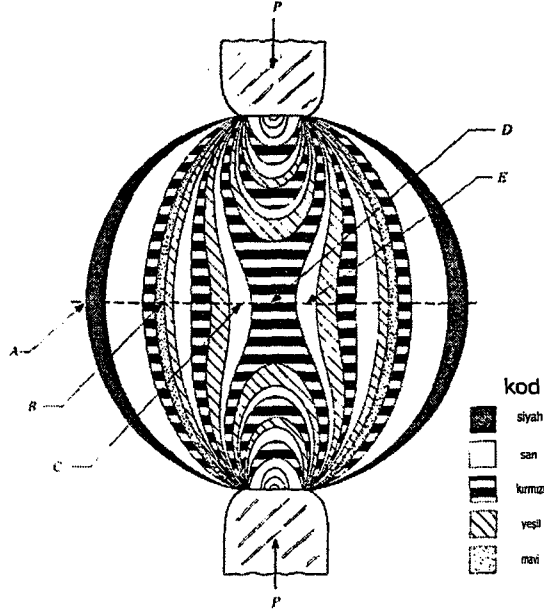
Eğer her iki çeyrek dalga plakasının hızlı veya yavaş eksenleri 45° döndürülürse eksenler polarizörle aynı hizaya gelir, dalga plakaları etkisiz kalır, polariskop düzlem polariskobuna dönüşür ve bundan dolayı izoklinik saçaklar tekrar görülür. Polariskoplar genellikle çeyrek dalga plakası döndürülerek düzlem veya dairesel polariskop oluşturacak şekilde tasarlanırlar.



Şekil 4.15 Dairesel polariskop (Budynas,1999)

Tekrar sıkıştırılmış bir disk düşünelim. Eğer disk bir dairesel polariskoba yerleştirilirse, sadece izokromatik saçaklar oluşur. Şekil 4.16' da saçaklar ve renk sıraları şematik olarak gösterilmiştir. Beyaz ışıkta, siyah olan izokromatik saçak sıfırcı saçaktır ($N=0$). Sıkıştırılmış diskte, yükün uygulandığı noktaların yanları hariç dış kenar boyunca her yerde sıfırcı saçak oluşur. Şekil 4.16' da yatay kesikli çizgi saçak sayma metodunu göstermek için çizilmiştir.

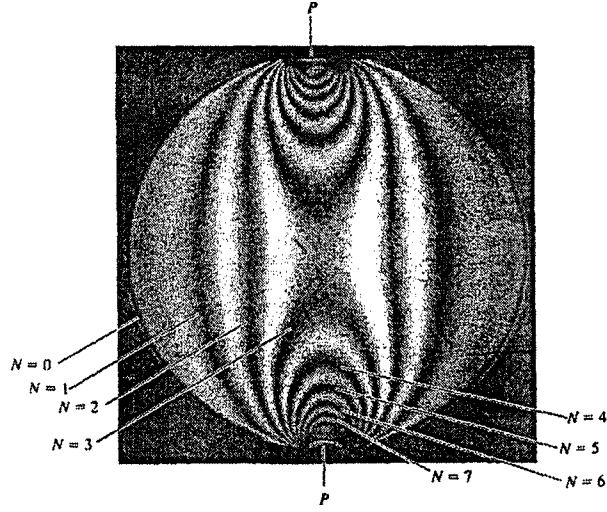
A noktasından başlarsak, saçak siyahtır, yani bu noktada $N=0$ dır. Şimdi, A noktasından kesikli çizgi boyunca birer birer sağa doğru gidersek, renk siyahtan sarıya, sarıdan turuncuya, turuncudan kırmızıya, kırmızıdan maviye, maviden yeşile ve son olarak yeşilden tekrar sarıya döner. Bu her bir ışık dalga boyunun farklı kırılmasına bağlıdır. Denklem 4.14'den, $\sigma_1 - \sigma_2 = N\lambda / kt$, düşük gerilme farklarının olduğu küçük dalga boylarının ilk önce sönümlendiği görülebilir.



Şekil 4.16 Beyaz ışık ile dairesel polariskopta elde edilen izokromatikler (Budynas,1999)

Görülebilir ışık tayfının en kısa dalga boyu mavi veya mor olduğu için ilk o sönümlenir ve sarımsı bir renge dönüşür. Daha yüksek dalga boylarının sönümlenmesiyle, ışığın geçişi sarıdan kırmızıya, kırmızıdan yeşile döner. Birinci saçak bölgesi sıfırıncı siyah saçaktan sarımsı olan ile başlar ve yeşilin sonuna kadar devam eder. Bu renk şeriti ilk saçağı meydana getirir. Kantitatif çalışma, Denklem 4.14 belirli bir dalga boyuna ait olmasına rağmen, tek renkli ışık kullanılarak yapılmalıdır. Ayrıca verilen dalga boyu için saçaklar dar ve farklı olur.

Saçak sırası arttıkça sarı, kırmızı, yeşil sırası devam eder. Renk düzeni saçak sırası azalınca değişir. Örneğin, Şekil 4.16' daki model üzerinde C noktasından E noktasına doğru renk sırasını gözlersek, sıranın D noktasında tersine döndüğünü görürüz. Burada yeşilden kırmızıya, kırmızıdan sarıya dönen renk sırası saçak sırasının azaldığını gösterir. Bu durum model üzerindeki yüklemenin simetrik olup olmadığı tartışılırken önemlidir. Başlangıçta beyaz ışık saçakları saymada kolaylık sağlar, daha sonra beyaz ışık ile artan ve azalan sıralar ayırt edilince tek renkli ışık kullanılır. Eğer disk şimdi tek renkli ışık kullanılarak gözlenirse, Şekil 4.17' de gösterildiği gibi sadece siyah saçaklar görülür. Bununla birlikte beyaz ışığın kullanımıyla sıralar daha kolay belirlenir.



Şekil 4.17 Saçak sıraları (Budynas,1999)

Saçak sırasının belirlenmesinde sadece beyaz ışık kullanılmaz. Eğer saçakların oluşumu gözlenirse, bir kişi saçakların, oluştukları gibi hesabını tutabilir. Bir diğer yöntem ise Babinet kompensatör kullanmaktır.

Beyaz ışıktaki izokromatik saçakların bir başka özelliği de kırmızı ve yeşil bölge arasında mavi bir bölge oluşmasıdır ve bu bölge ilk saçakta ($N=1$) çok baskındır ve daha sonraki saçaklarda çok incedir ve neredeyse fark edilemez. Bu renge karşılık gelen dalga boyu 5770 Angström birimindedir. Dar saçaklar elde etmek için bu dalga boyunda tek renkli filtre kullanılması tercih edilmektedir. Beyaz ışık kullanılan çalışmalarda kırmızıdan yeşile geçiş saçak sıralarını belirlemek için kullanılabilir.

Eğer siyah bir izokromatik saçak varsa ($N=0$), saçak sayma işlemi bu noktadan başlamalıdır. Eğer siyah bir saçak yoksa, kırmızı ve yeşil arasında açık mavi bir saçak oluşur, bu birinci saçaktır ($N=1$) ve saymaya bu noktadan başlamalıdır. Eğer sıfır veya bir numaralı saçaklar oluşmazsa, son yüklemeye kadar saçak oluşumu dikkatlice izlenmelidir veya Babinet kompensatör kullanılabilir.

5. FOTOELASTİK UYGULAMALARDA KULLANILAN TEKNİKLER

5.1 Fotoelastik Malzeme Kalibrasyonu

Fotoelastik bir modeli test etmeden önce Denklem 4.14' de kullanılan k' yı belirlemek için fotoelastik malzemeyi kalibre etmek gerekir. Fotoelastik malzemeyi kalibre etmek için kullanılan çeşitli standart numuneler vardır. Şekil 5.1' de gösterildiği gibi gerilme testi uygulayarak kalibre etmeyi açıklayacağız. Pratikte, verilen λ dalga boyundaki bir ışık için kalibrasyon testleri yapılır böylece λ/k sabittir ve gerilme testinden elde edilir. Eğer $\lambda/k = C$ kabul edersek, Denklem 4.14 şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{CN}{t} \quad (5.1)$$

Gerilme testi için $\sigma_1 = P/A$ ve $\sigma_2 = 0$ dır. Eğer numunenin kalınlığı t ve genişliğini w kabul edersek $A = wt$ olur. Böylece

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{P}{wt}$$

ve Denklem 5.1 den $CN/t = P/wt$ veya

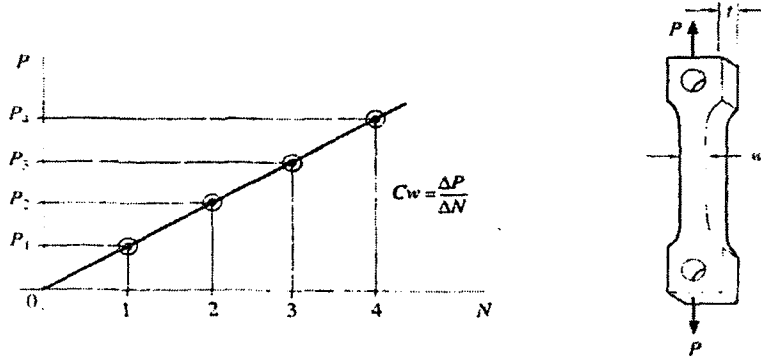
$$\frac{P}{N} = Cw \quad (5.2)$$

Numune P/A ' nın geçerli olduğu alanda $N=1$ olana kadar yüklenir ve P yükü kaydedilir. Bu işleme $N=2,3,.....$ için devam edilir, P' ye karşılık gelen N değerleri işaretlenir ve Şekil 4.1' de gösterildiği gibi eğri elde edilir. Denklem 5.2' den eğrinin eğimi Cw ' dir. Çizelge 5.1' de çeşitli fotoelastik malzemelerin mekanik özellikleri ve fotoelastik sabitler özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Çeşitli fotoelastik malzeme özellikleri (Budynas,1999)

Material	Tensile Strength, psi	E, psi	ν	C, lb/(in) (fringe) [†]
CR-39	3000	300.000	0.42	100
PSM-5 epoxy [†]	—	450.000	0.36	60
PSM-1 polycarbonate [†]	—	340.000	0.38	40
PSM-4 polyurethane [†]	—	1,000	0.50	3-5

† $\lambda = 5770$ Angstrom units.



Şekil 5.1: Kalibrasyon için uygulanan çekme testi (Budynas,1999)

5.2 Kesirli Saçak Sıraları

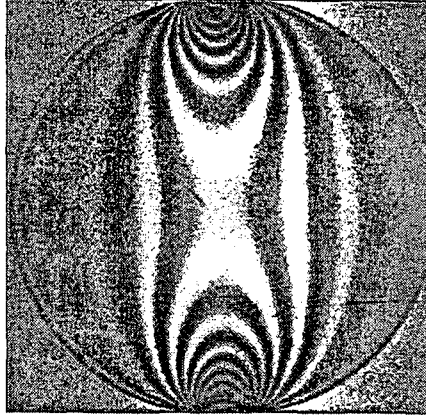
Önceki bölümde belirli bir dalga boyu için model üzerindeki ışığın sönmüldüğü (izokromatik saçaklar) noktalarda saçak sırasının nasıl belirlendiğini belirtmiştik. Bu noktalardaki saçak sıraları $N=0,1,2,3,\dots$ gibi tam sayı değerlerine sahipti. Saçak doğruları üzerinde olmayan noktalar N' nin kesirli değerlerine sahiptir. Bir noktadaki kesirli saçak sırasını belirlemek için iki temel metot vardır, bunlar Tardy Metodu ve Babinet-Soleil Metodu' dur. Tardy Metodu standart bir polariskop ile uygulanabilir, ama diğeri Babinet-Soleil kompensatörü adı verilen ilave bir ekipman gerektirir.

5.2.1 Tardy Metodu

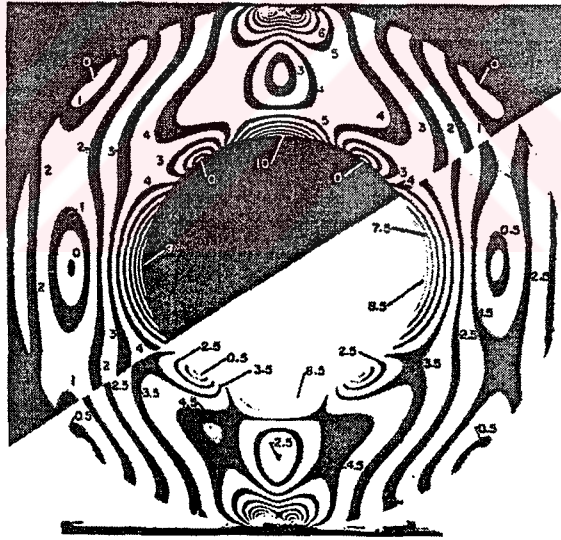
Model üzerinde N inci ve $(N+1)$ inci saçaklar arasında bir nokta düşünelim. Tardy metodu uygulanırken aşağıdaki basamaklar izlenir:

1. Düzlem polariskobu pozisyonunda çaprazlanmış polarizör ve analizör filtrelerini bir izoklinik saçak noktayla kesişene kadar döndürerek çeyrek dalga plakalarıyla asal gerilme doğrultuları aynı hizaya getirilir.
2. Sadece çeyrek dalga plakalarını hareket ettirerek, plakaları dairesel polariskop düzenine getirilir..
3. Nokta ile bir izokromatik saçak rastlayana kadar sadece analizör filtresini döndürün. Analizör filtresinin döndürüldüğü γ açısını belirlenir.
4. Eğer analizör filtresi γ açısı kadar çevrildiğinde $(N+1)$ inci saçak noktaya hareket ederse, N_Q noktasının saçak sırası:

$$N_Q = (N + 1) - \frac{\gamma}{180} \quad (5.3)$$



Şekil 5.2 Karanlık bölgeler (Budynas,1999)



Şekil 5.3 Işık bölgesi ve karanlık bölge (Durelli, 1970)

Eğer analizör γ açısı kadar döndürüldüğünde N inci saçak sıralı saçak noktaya hareket ederse, noktanın saçak sırası:

$$N_Q = N + \frac{\gamma}{180} \quad (5.4)$$

Analizör 90° döndürüldüğünde buçuklu saçaklar gözükür. Bu durumda, filtreler modele göre

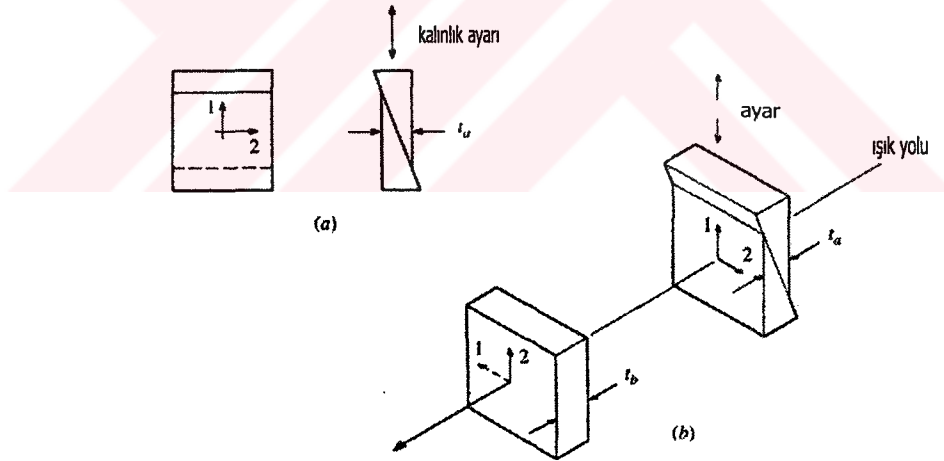
herhangi bir yönde döndürülebilir. Buna ek olarak model etrafındaki ışık bölgesi koyu değildir ve maksimum ışık iletilir. Bu, ışık bölgesi iletimi adlandırılır, karanlık bölge iletimine karşılık $\gamma=0$ derecedir. Işık bölgesi ve karanlık bölge için örnekler Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’ de gösterilmiştir.

5.2.2 Babinet – Soleil Metodu

Bu metot için ek olarak ayarlanabilir çift kırılım sağlayan optik bir aygıt gerekmektedir. Normal durumda çift kırılım sağlayan bir malzememiz olduğunu kabul edelim ve bu malzeme dalga plakalarında kullanılsın. 1 ve 2 eksenlerinin kırma indisleri n_1 ve n_2 olsun. Denklem 3.12 ile verilen faz değişim denklemi şöyle yazılabilir:

$$\Delta = (n_1 - n_2)t \quad (5.5)$$

Faz değişimi t kalınlığı değiştirilerek ayarlanabilir. Bu aynı malzemeden Şekil 5.4 (a)’da gösterildiği gibi iki adet kama yaparak ayarlanabilir.



Şekil 5.4 t kalınlığının ayarlanması (Budynas,1999)

Şekilde gösterildiği gibi kamalar hareket ettirilerek t_a kalınlığı değiştirilebilir. Kompensatörü hazırlarken üçüncü bir eleman daha kullanılır. t_b kalınlığında, kamalarla aynı malzemeden yapılmış bir plaka Şekil 5.4(b)’ de gösterildiği gibi eksenleri kesişecek şekilde optik yolu üzerine konur. $t_a = t_b$ olduğunda, üç elemanlı kompensatör boyunca faz değişimi oluşmaz. Kamalar $t_a > t_b$ olacak şekilde ayarlandığında faz değişimi şöyle olur:

$$\Delta = (n_1 - n_2)(t_a - t_b) \quad (5.6)$$

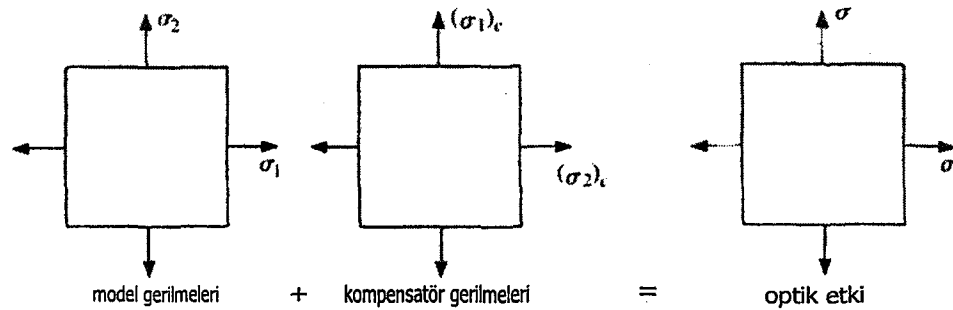
Eğer kompensatör polariskobun optik yolu üzerine modelden ışık iletdikten sonra kompensatör eksenleri asal eksenlerle aynı doğrultuda olacak şekilde yerleştirilirse, analizöre giren son dalga cephesinin değişimi kamalar düzenlenerek ayarlanabilir. Kamaların düzenlenmesi kompensatördeki tam dalga değişimlerinin yüzdesi cinsinden belirli bir dalga boyuna göre (genellikle 5770 Angström biriminde) kalibre edilebilir. Kompensatör kullanmanın optik etkisi model gerilme bölgesi üzerine ek bir gerilme bölgesi getirilmiş gibi olmasıdır. Kompensatörün gerilme etkisi farkı kalınlık değişimiyle orantılı olacaktır ve bundan dolayı:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_c = K(t_a - t_b) \quad (5.7)$$

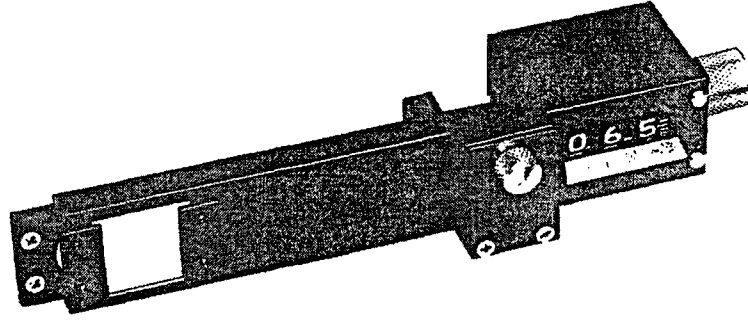
olur. Burada K malzemeye ve dalga boyuna bağlı bir sabittir. Kompensatörün kama kalınlığı model gerilmeleri ve kompensatör gerilmeleri toplamı 1 ve 2 eksenlerindeki gerilmelere eşit olacak şekilde artırılabilir (Şekil 5.5). $\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1)_c - (\sigma_2)_c$ olduğunda bileşke optik etkisi σ gerilmelere eşit olur.

$$\sigma = (\sigma_1)_c + \sigma_2 = (\sigma_2)_c + \sigma_1$$

Böylece bu noktada analizör boyunca sonuç olarak, beyaz ışık kullanıldığında siyah olan sıfır numaralı saçak görülür. Kompensatör saçak sıraları cinsinden kalibre edilir. Şekil 5.6' da görülen kompensatör saçak başına x birim olarak kalibre edilmiştir. Örneğin $x = 52$ ise ve 2 numaralı saçığı Q noktasıyla aynı hizaya getirmek için vida 42 birim hareket ettirilirse, noktanın saçak sırası $N_Q = 2 + 42 / 52 = 2.81$ dir. Eğer vida sıfır numaralı siyah saçak noktayla kesişecek kadar çevrilirse, göstergede $(2.81)(52) = 146$ birim okunur.



Şekil 5.5 Optik etki (Budynas,1999)



Şekil 5.6 Babinet Soleil kompensatörü (Budynas,1999)

Eğer pozitif kama ayarı $(\sigma_1)_c$ ' nin $(\sigma_2)_c$ ' ye göre daha da artmasına sebep olursa, kompensatör ile net bir sıfır sıralı saçak elde etmek için $(\sigma_1)_c$ modeldeki düşük asal gerilme σ_2 ile aynı doğrultuda hizaya gelecek şekilde ayarlanmalıdır.

Eğer analizör pozitif kama ayar doğrultusu bağıl kompensatör gerilmelerinin kama ayar doğrultusunda artmasına neden olacak şekilde tasarlanırsa, kompensatör modeldeki σ_1 doğrultusuyla aynı hizaya getirilmelidir. Bunu bilinen gerilme durumunda test etmek kolaydır.

5.3 σ_1 ve σ_2 Asal Gerilmelerinin Ayrılması

Düzlem gerilmesinin genel hali için, bilginin üç bağımsız parçası önemlidir. İzokromatik ve izoklinik saçaklar herhangi bir noktadaki bilginin sadece iki parçasını gösteren bilgiyi verirler. Üçüncü bilgi σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerindeki bağımsız bir başka denklemden elde edilir. Genel durumda Denklem 5.1 bu iki bilinmeyeni içerir. Buna rağmen, çoğu düzlem gerilme problemlerinde maksimum gerilme durumu sınırda oluşur, ki burada σ_1 veya σ_2 sıfırdır. Bu durumda bir bilinmeyenli asal gerilmenin belirlenmesinde izokromatik bilgi gereklidir. Modelin daha iç noktaları için, iki saçak kümesinden sadece gerilme farkları ve asal eksen doğrultuları belirlenir. σ_1 ve σ_2 arasında ek bir bağıntı bulmak için Denklem 5.1 den asal gerilmeler ayrılmalıdır. Bazı ortak metotlar:

1. İki eksenli gerilme etkisindeki ince bir model için, düzlem dışı ε_z geriniminin ölçülmesi

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \text{ veya } \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

2. Işığın yeni izokromatik bilgi oluşturacak şekilde modele eğik olarak yönlendirilmesiyle (eğik yönlendirme metodu olarak adlandırılır.)

3. Kayma farkı metodu adı verilen bir teknik kullanarak. Burada denge denklemlerine sonlu farklar metodu uygulanır.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \bar{F}_x = 0 \quad (5.8 a)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \bar{F}_y = 0 \quad (5.8 b)$$

Pratikte en çok eğik yönlendirme ve kayma farkı metodu kullanılmaktadır.

5.3.1 Eğik Yönlendirme Metodu

Bu metot soruda noktaya karşılık gelen σ_1 eksenine göre döndürülerek veya σ_1 eksenini boyunca prizmalar kümesi yerleştirilerek uygulanabilir.(Şekil 5.7) Burada σ_1 kağıt düzlemine diktir.

İzokromatik saçak sırası gözlemlendiğinde normal geliş açılı N_0 in genellikle eğik açılı N_θ dan farklılık gösterir. Denklem 5.1 den

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{CN_0}{t} \quad (5.9)$$

ve eğik ışın için

$$\sigma_1 - \sigma_2' = \frac{CN_\theta}{t/(\cos \theta)} \quad (5.10)$$

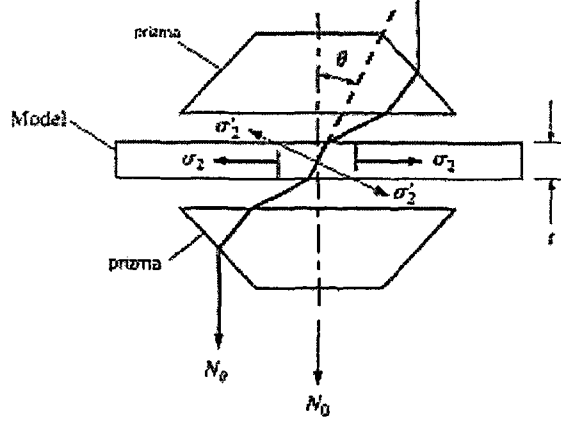
burada $t/\cos \theta$ eğik ışının model boyunca kat ettiği yoldur.

$$\sigma_2' = \sigma_2 \cos^2 \theta$$

Bu denklemi 5.9 ve 5.10 denklemleriyle birleştirerek σ_1 ve σ_2 için çözersek şu denklemi elde ederiz:

$$\sigma_1 = \frac{C \cos \theta}{t \sin^2 \theta} (N_\theta - N_0 \cos \theta) \quad (5.11a)$$

$$\sigma_2 = \frac{C}{t \sin^2 \theta} (N_\theta \cos \theta - N_0) \quad (5.11b)$$



Şekil 5.7 Prizma kullanarak eğik yönlendirme (Budynas,1999)

5.3.2 Kayma Farkı Metodu

Bu metod denge denklemlerine dayanır. Gövde kuvvetlerinin olmadığını kabul edersek, Denklem 5.8a' yı şu şekilde yazabiliriz:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\Delta y} = 0$$

Bu denklem sonlu farklar ile yaklaşık şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\Delta \sigma_x}{\Delta x} \Big|_{y=sbt} + \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Big|_{x=sbt} = 0$$

veya

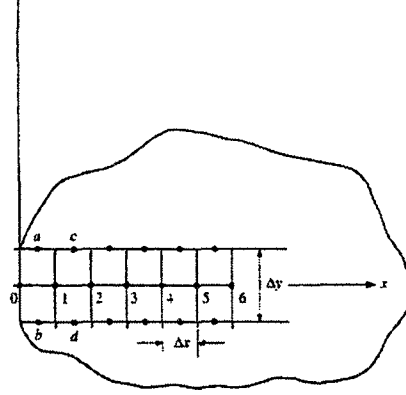
$$\Delta \sigma_x = - \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Big|_{x=sbt} \Delta x \Big|_{y=sbt} \quad (5.12)$$

Burada Δx ve Δy mümkün olduğunca küçük seçilir. Serbest bir yüzeyden (veya gerilme durumunun bilindiği bir yüzey) başlayarak Şekil 5.8' de gösterildiği gibi bir ızgara çizin. 0 noktasındaki σ_x gerilmesini $(\sigma_x)_0$ bildiğimizi farz edersek, Denklem 5.12 den σ_x in 0 noktasından 1 noktasına değişimi:

$$\Delta \sigma_x = (\sigma_x)_1 - (\sigma_x)_0 = - \frac{(\tau_{xy})_a - (\tau_{xy})_b}{\Delta y} \Delta x$$

Böylece σ_x in 1 noktasındaki değeri:

$$(\sigma_x)_1 = (\sigma_x)_0 - \frac{\Delta_x}{\Delta_y} [(\tau_{xy})_a - (\tau_{xy})_b] \quad (5.13)$$



Şekil 5.8 Gerilme hesabı için ızgara çizimi (Budynas,1999)

τ_{xy} kayma gerilmesi izoklinik ve izokromatik bilgilerden belirlenebilir.

$$\tau_{x'y'} = -\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

Asal gerilme durumundan başlayarak (sıfır kayma gerilmeli) τ_{xy} yi belirlemek için saat yönünde $(-\theta)$ dönüşümü yapılır.

$$\tau_{xy} = -\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) \sin[2(-\theta)] + (0) \cos[2(-\theta)]$$

veya

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad (5.14)$$

$\sigma_1 - \sigma_2$ farkı izokromatik saçak bilgisinden denklem 4.1 yardımıyla bulunur ve θ , x eksen ve σ_1 doğrultusu arasındaki açıdır ve bir a noktasındaki izoklinik saçak bilgisinden elde edilir. $(\tau_{xy})_a$ ve $(\tau_{xy})_b$ kesme gerilmeleri fotoelastik saçaklardan belirlenebilir. $(\sigma_x)_1$ Denklem 5.13' den hesaplandığında 1 noktasındaki asal gerilmeler bulunabilir. Asal gerilme durumunun (sıfır kesme gerilmeli) dönüştürülmesiyle

$$(\sigma_x)_i = (\sigma_1)_i \cos^2 \theta_i + (\sigma_2)_i \sin^2 \theta_i \quad (5.15)$$

Denklem 5.15 ve 5.1' i çözersek

$$(\sigma_1)_i = (\sigma_x)_i + \frac{CN}{t} \sin^2 \theta_i \quad (5.16a)$$

$$(\sigma_2)_i = (\sigma_x)_i - \frac{CN}{t} \cos^2 \theta_i \quad (5.16b)$$

Bu işlemler 2 noktası için de tekrarlanır. Yani

$$(\sigma_x)_2 = (\sigma_x)_1 - \frac{\Delta_x}{\Delta_y} \left[(\tau_{xy})_c - (\tau_{xy})_d \right]$$

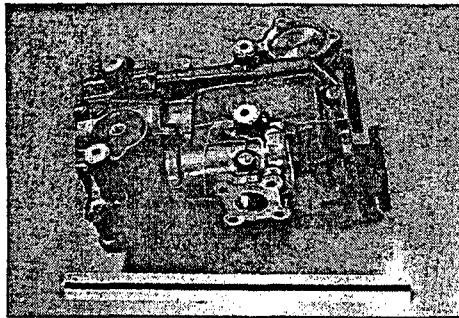
Bu teknik, model içindeki herhangi bir noktadaki gerilmeleri bulmak için kullanılır. Metot nümerik integrasyona dayandığı için, hatalar artarak çoğalır, dolayısıyla fotoelastik bilgiler dikkatli okunmalıdır.

5.4 Yansıma Fotoelastisitesi

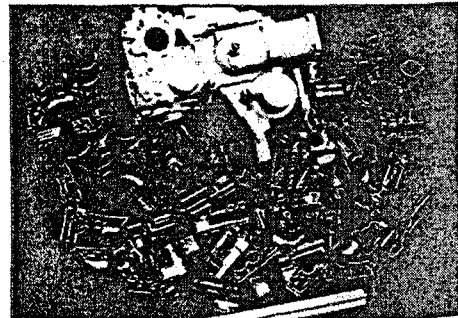
Yansıma tekniği herhangi bir malzemeden yapılan bir model için kullanılabilir. İncelenecek alanlar veya bütün parça fotoelastik kaplamalarla kaplanır (Şekil 5.9). Kural olarak, Şekil 5.10' dan da görülebileceği gibi, teknik geçirgen fotoelastisite ye benzer.

Işık kaplama boyunca iki kez iletildiği için

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{CN}{2t}$$

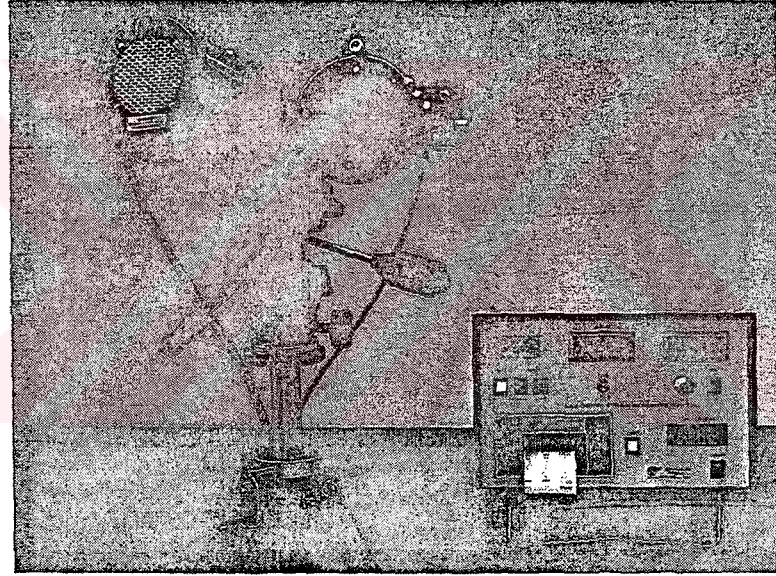
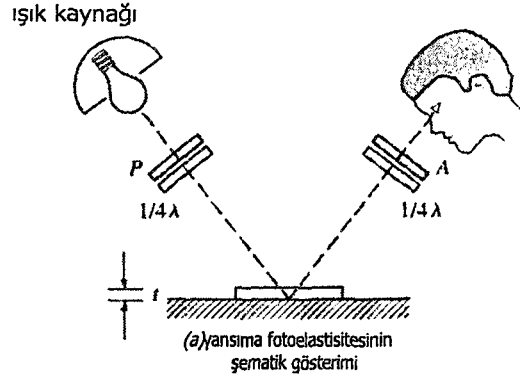


(a) tamamen kaplanmış bölüm



(b) kaplanmış bölümler

Şekil 5.9 Fotoelastik malzeme ile kaplanmış bölümler (Budynas,1999)



(b) Babinet-Soleil kompensatörlü bir yansıma polariskobu ile ölçüm

Şekil 5.10 Yansıma fotoelastisitesi (a) ve yansıma polariskobu ile ölçüm (b) (Budynas,1999)

Kaplama, başka bir malzemeden yapılmış bir model üzerinde kullanılmasına rağmen, gerinimleri de belirlemek gerekir. Hooke Kanunu'ndan

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E_c}{1 + \nu_c} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

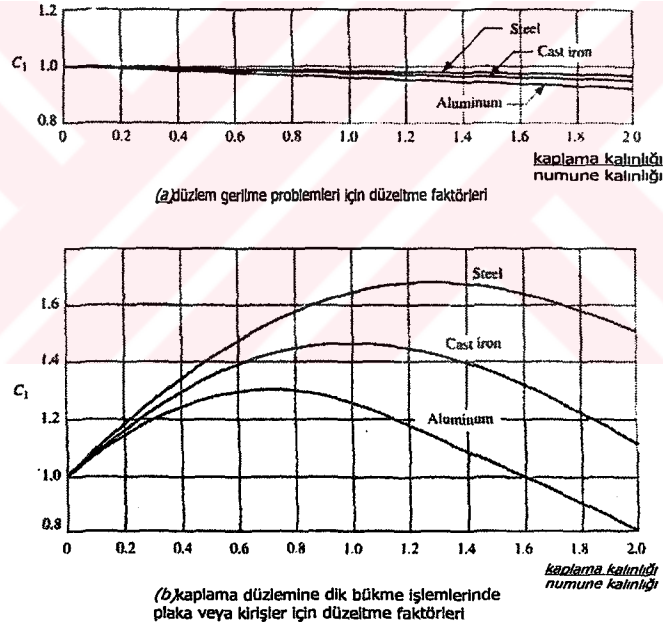
Burada E_c ve ν_c kaplama malzemesine aittir. Böylece,

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{(1 + \nu_c)CN}{2E_c t} \quad (5.17)$$

Kaplamanın kalibrasyonu genellikle test modeli üzerinde aynı kalınlıkta ve aynı kaplama malzemesinin kullanıldığı bir kiriş test numunesi ile yapılır. Böylece $(1 + \nu_c)C/(2E_c t) = f$, burada f kaplama malzemesinin belirli kalınlığı için bir sabittir. Denklem 5.17 şu şekilde yazılabilir:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = fN \quad (5.18)$$

f kalibrasyon sabitidir ve birimi saçak başına gerinmedir.



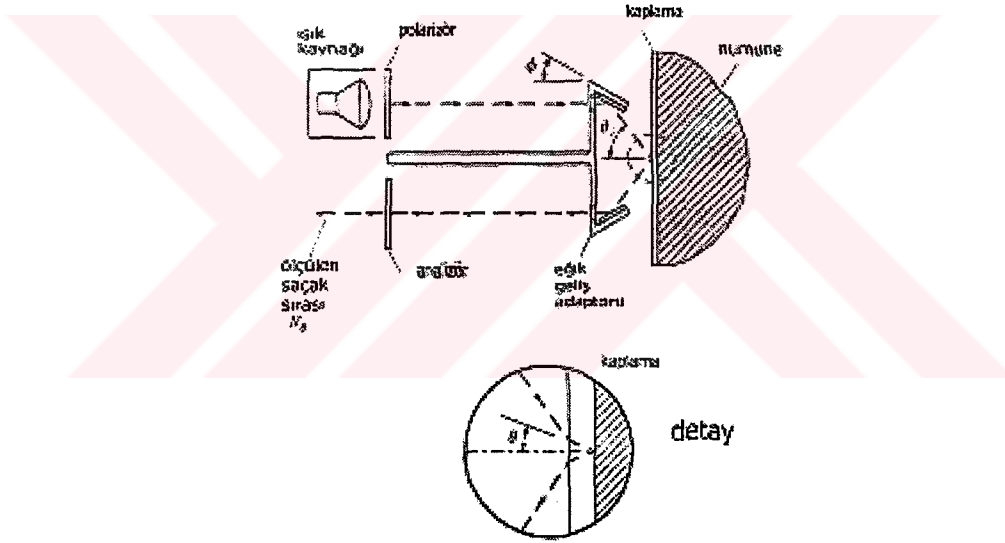
Şekil 5.11 Düzeltme faktörleri (Budynas,1999)

Eğer test numunesi ince ise, kaplama yüklemenin önemsenebilecek bir kısmını taşıyabilir ve bir düzeltme yapılması gerekir. Düzeltmiş denklem yaklaşık olarak:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{fN}{C_1} \quad (5.19)$$

Burada C_1 Şekil 5.11 (a) ve (b) de verilmiştir.

Asal gerilmeler eğik yönlendirme adaptörü veya fotoelastik uygulamalar için özel gerinme ayırıcı ölçerler kullanılarak ayrılabilir. Eğik yönlendirme adaptörü Şekil 5.12' de şematik olarak gösterilmiştir. polarizörden çıkan ışık adaptör içindeki gelen ışığı ayarlamak için genişletilip daraltılabilen bir deliğe yönlendirilir ve ışığı kaplamaya θ_1 geliş açısıyla yansıtan bir aynaya gönderilir. Şekil 4.12' deki test noktasındaki detay kaplamadan, kırılma dolayısıyla normalden θ açısıyla saparak iletilen ışığı göstermektedir. Işığın analizörden dönüş yolu temel olarak polarizörden kaplamaya gidiş yoluyla aynıdır.



Şekil 5.12 Eğik yönlendirme adaptörü (Budynas,1999)

Eğer yansıtma polariskobu ε_1 sayfa düzlemine dik olacak şekilde hizalanırsa, ε_2 sayfa düzleminde ve kaplamaya paralel, ε_3 sayfa düzleminde ve kaplamaya dik olur. Kesme gerinmesiz gerinme dönüştürme denklemlerini kullanırsak, eğik ışığa dik sayfa düzlemindeki gerinme:

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_2 \cos^2 \theta + \varepsilon_3 \sin^2 \theta \quad (5.20)$$

Eğik saçak sırası N_θ için gerinme-optik denklemi:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{(1 + \nu_c)CN_\theta}{2E_c t / \cos\theta} = fN_\theta \cos\theta \quad (5.21)$$

Burada eğik ışın $2t/\cos\theta$ kalınlığından geçmektedir. ε_2 ' ni Denklem 5.20' den 5.21' de yerine koyarsak ε_3 belirlenir. Fotoelastik kaplamanın ince ve düzlem gerilmesi durumunda olduğu kabul edilirse $\varepsilon_3 = -\nu_c(\sigma_1 + \sigma_2)/E_c$ ve;

$$\sigma_1 = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2}(\varepsilon_1 + \nu_c \varepsilon_2) \quad \sigma_2 = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2}(\varepsilon_2 + \nu_c \varepsilon_1)$$

olduğundan

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu_c}{1 - \nu_c}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (5.22)$$

Denklem 5.22' yi 5.20 numaralı denklemde yerine koyalım. Bunun sonucunu Denklem 5.21' de yerine koyarak basitleştirirsek

$$\left(1 + \frac{\nu_c}{1 - \nu_c} \sin^2 \theta\right) \varepsilon_1 - \left(\cos^2 \theta - \frac{\nu_c}{1 - \nu_c} \sin^2 \theta\right) \varepsilon_2 = fN_\theta \cos\theta \quad (5.23)$$

Bu sonuç Denklem 5.18 ile birlikte normal geliş $N = N_0$ ile ve ε_1 ve ε_2 bilinmeyenleri için iki denklem verir. Bu denklemleri çözersek:

$$\varepsilon_1 = \frac{f[(1 - \nu_c)\cos\theta N_\theta - (\cos^2 \theta - \nu_c)N_0]}{(1 + \nu_c)\sin^2 \theta} \quad (5.24a)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{f[(1 - \nu_c)\cos\theta N_\theta - (1 - \nu_c \cos^2 \theta)N_0]}{(1 + \nu_c)\sin^2 \theta} \quad (5.24b)$$

olur.

6. SONLU ELEMANLAR METODU

Üretim sürecinin temel bileşeni olan tasarım alanında ulaşılan seviye, mühendisliğin sınırlarını zorlamaktadır. Bilgisayar Destekli Tasarım ve Üretim (CAD/CAM) yöntemlerindeki gelişmelerin yanında Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) de artık vazgeçilemez bir araç haline gelmiştir. Kavramsal tasarımdan sanal prototip testine kadar her aşamada performans değerlendirmesi yapılabilmektedir. Bilgisayar Destekli Mühendislik sistemlerinin bir parçası olan Sonlu Elemanlar Analizi yöntemi ürün kalitesini arttırmanın yanı sıra hataları ve geri dönüşlerden kaynaklanan zaman kayıplarını da azaltmaktadır. [2]

Sonlu elemanlar yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan bir çok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir.

Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük alanının almış olduğu en büyük değer pratikte özel bir öneme sahiptir. Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar "düğüm noktası" yada "nod" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebirsel bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır. [1]

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam sonucun bulunduğu bir çözüm şeklidir. Bu metot bilgisayar çağının bir ürünüdür. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bilgi iletim hızlarının sürekli olarak artmasına bağlı olarak bu metotla çözüm yapan paket programların sayısı gittikçe artmaktadır. Günümüzde çeşitli analizler için bu paket programların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayie girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok makine elemanının (motor blokları, pistonlar vs.) kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmıştır. [3]

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için katılık matrisini oluşturmuşlardır. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. Metodun üç boyutlu problemlere uygulanması iki boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleştirilmiştir (Örneğin, Argyis (1964)). İlk gerçek kabuk elemanlar aksenal simetrik elemanlar olup (Grafton ve Strome (1963)), bunları silindirik ve diğer kabuk elemanları izlemiştir (Gallagher (1969)). Araştırmacılar 1960'lı yılların başlarında non-lineer problemlerle ilgilenmeye başlamışlardır. Turner ve diğerleri (1960) geometrik olarak non-lineer problemler için bir çözüm tekniği geliştirmiştir. Sonlu elemanlar metoduyla stabilite analizi ise ilk Martin (1965) tarafından tartışılmıştır. Statik problemlerin yanı sıra dinamik problemlerde sonlu elemanlar metoduyla incelenmeye başlanmıştır. (Zienkiewicz ve diğerleri (1966) ve Koenig ve Davids (1969)). 1943 yılında Courant bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir.

Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar metoduyla çözümü 1960 'lı yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve Cheung (1965) sonlu elemanlar metodu ile Poisson denklemini çözmüştür. Doctors (1970) ise metodu potansiyel akışa uygulamıştır. Sonlu elemanlar metodu geliştirilerek ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan ve diğer bir çok alana uygulanmaktadır.

Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yıllarının ortaları itibarıyla sonlu elemanlar metodu ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 makale ve kitap yayınlanmıştır.[1]

6.1 Sonlu Elemanlar Metodu İle İlgili Temel Kavramlar

Eleman: Sonlu elemanlar yönteminde analizi yapılacak model, belirli noktalarda birbirine bağlanmış birçok parçanın birleşiminden oluşmuş bir yapı olarak düşünülür. Her bir parçaya eleman adı verilir.

Düğüm Noktası (Nod): Elemanların birleşme noktalarına düğüm noktası adı verilir. Düğüm noktalarında elemanların başlangıç ve sınır şartları tanımlanarak her bir eleman için çözüm işlemine başlanır.

Ağ Yapısı (Mesh): Ağ yapısı düğüm noktalarının ve elemanların koordinatlarını oluşturur. Aynı zamanda kullanıcı tarafından girilen minimum bilgiye karşılık optimum sürede otomatik olarak düğüm noktalarını ve elemanları sıralar, numaralanmasını sağlar.

h ve p metodu: Klasik sonlu elemanlar analizinde sonuçların doğruluğu çoğunlukla eleman sayısına bağlıdır. Eleman sayısı arttıkça sonuçlar daha gerçeğe yakın çıkar. Gerilme değişimlerinin yüksek olduğu bölgelerde eleman sayısı artırılarak elde edilen sonucun hassasiyeti de artırılır. Bu çözüm yöntemi, h-adaptivity metodu olarak tanımlanabilir. İkinci bir yöntem ise bu elemanların sayısını arttırmak yerine elemanların polinom derecesini arttırmaktır. Polinom derecesi arttıkça elde edilen modelin doğruluğu da artar. Sonuçlar kullanıcı tarafından tayin edilen tolerans içine girene kadar polinom derecesi artar. Bu tür elemanlar p elemanı olarak tanımlanır.[analiz.infotron.com.tr]

İzoparametrik eleman:Eğrisel kenar veya yüzeye sahip elemanlardır. Elemanın kenar veya yüzeyi üzerinde de düğüm noktaları bulunmaktadır. Yer değiştirme fonksiyonunda kullanılan polinomun derecesinin artırılması ile sonuçların analitik çözüme yaklaşma oranı artar. Bu sebeple çok sayıda basit eleman yerine analizi yapılacak modelin şekline uygun daha az sayıda izoparametrik eleman kullanılması daha verimlidir.

Global katılık matrisi: Analiz edilecek sistemin her bir elemanı için elde edilen matrislerin toplamından oluşan matrisler topluluğudur.

Von Mises akma kriteri: Malzemenin akma gerilmesi ile maksimum kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi açıklayan Von Mises akma kriteri eşdeğer gerilmelerin hesaplanmasında kullanılır.

6.2 Sulu Elemanlar Yönteminde Eleman Tipleri

Elemanlar tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu ve değişik şekillerde olabilirler (Altan, 2002)

Tek Boyutlu Elemanlar: Geometriden veya problemin özelliğinden dolayı tek boyutlu analiz yapmayı gerektiren modellerde tek boyutlu elemanlar kullanılır. Geometriden dolayı tek boyutlu analiz yapmayı gerektiren duruma örnek olarak kafes sistemlerini, problemin özelliğinden dolayı tek boyutlu analiz yapmayı gerektiren duruma örnek olarak da tek boyutta ısı transferini gösterebiliriz. Geometrik olarak diğer iki boyutu, tek boyutuna göre ihmal edilebilecek büyüklükte olan geometrik yapıların analizinde de tek boyutlu elemanlar kullanılabilir.



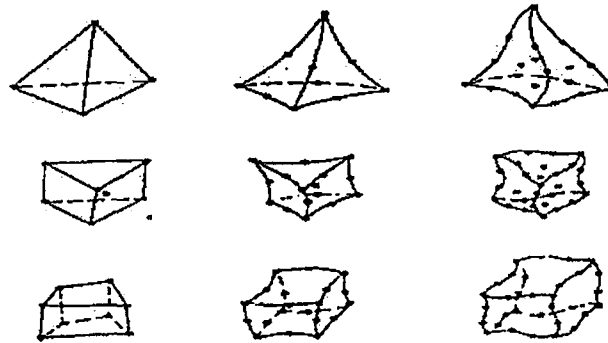
Şekil 6.1 Tek boyutlu elemanlar (Altan, 2002)

İki Boyutlu Elemanlar: Düzlemsel modellerde veya iki boyutlu analizin yeterli olduğu koşullarda kullanılırlar. Katı mekaniğinde birçok problemin yaklaşık çözümü, iki boyutlu sonlu elemanlarla yapılabilmektedir. En yaygın kullanılan iki boyutlu eleman tipi üçgen elemandır.



Şekil 6.2 İki boyutlu elemanlar (Altan, 2002)

Üç Boyutlu Elemanlar: Üç boyutlu analiz yapmayı gerektiren durumlarda üç boyutlu elemanlar kullanılır. En basit üç boyutlu eleman tipi dörtyüzlüdür. Altı yüzlü ve eksenel simetrik üç boyutlu elemanlarda mevcuttur. Eksenel simetrik cisimlerde kesiti üçgen veya dörtgen olabilen halka şeklinde sonlu elemanlar kullanılır.



Şekil 6.3 Üç boyutlu elemanlar (Altan, 2002)

6.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Üstünlükleri

Sonlu eleman metodunu diğer metotlara üstün kılan başlıca hususlar şunlardır:

1. Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cismi temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olabilir.
2. Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köseleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
3. Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme nonlineeriteleri olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.
4. Sebep-sonuç bağıntılarına ait problemler tümel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yer değiştirmeler" cinsinden formüle edilebilir. Sonlu eleman metodunun bu özelliği problemin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
5. Sınır şartları kolayca uygulanır.
6. Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir. Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.

6.4 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları

Sonlu elemanlar yönteminin günümüzdeki uygulamaları oldukça fazladır ve diferansiyel eşitliklerle düzenlenen fiziksel tüm problemleri kapsar. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları, genişçe kullanılmasına yardımcı olmaktadır . Bunların bazıları :

1. Bitişik elemanlardaki malzeme özellikleri aynı olmayabilir. Bu özellik bir kaç malzemenin birleştirildiği cisimlerde uygulanabilmesine imkan vermektedir.
2. Düzgün olmayan sınırlara sahip şekiller, eğri kenarlı elemanlar kullanılarak analiz edilebilirler.
3. Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı arttırılabilir.
4. Süreksiz yüzey yüklemeleri gibi sınır durumları yöntem için zorluk oluşturmaz.

Karışık sınır durumları kolaylıkla ele alınabilir.[1]

6.5 Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları

1. Eleman seçiminin ve giriş bilgilerinin doğru olarak belirlenmesi ve hatasız olarak programa girilmesi sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Ayrıca analiz sonuçlarının da doğru olarak yorumlanabilmesi gerekir. Bu nedenlerden dolayı Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz belirli bir deneyim ve bilgi birikimi gerektirir.

2. Sonlu Elemanlar Metodunda hesaplamalar, çok küçük bir problem için dahi çok fazladır. Bu nedenle yöntem el ile çözüm için uygun değildir.

3. Büyük ve karmaşık sistemlerin analizi için genellikle büyük bilgisayar belleğine ve çözüm zamanına ihtiyaç vardır. Geçmişte bilgisayar kapasitelerinin düşük fiyatlarının ise yüksek olması gibi sorunlar Sonlu Elemanlar Yöntemi' nin kullanım alanını sınırlayan en büyük etkenlerken, günümüzde bu sorunlar hızla ortadan kalkmaktadır.

4. Analiz sonuçlarının yüzde yüz doğru olduğu zannedilmemelidir. En iyi şartlarda elde edilen sonuçlarda dahi belirli bir hata payının bulunduğu daima göz önünde tutulmalıdır.

6.6 Sonlu Elemanlar Yönteminde Temel Basamaklar

Herhangi bir sonlu elemanlar analizi aşağıdaki temel basamaklardan oluşur:

6.6.1 İşlem Öncesi Safha (Preprocessing):

- Çözüm bölgesini çizerek sonlu elemanlara ayırmak, yani problemi düğüm noktaları (nod) ve elemanlara ayırılır.
- Bir elemanın fiziksel davranışını belirten bir şekil fonksiyonu kabul edilir, yani uygun bir sürekli fonksiyonun bir elemanın çözümünü belirttiği kabul edilir.
- Bir eleman için denklemler geliştirilir.
- Elemanları problemin bütününe belirtecek şekilde birleştirmek ve global katılık matrisi tasarlanır.
- Başlangıç şartları, sınır şartları ve yükleri tanımlanır.

6.6.2 Çözüm Safhası (Solving):

- Sonuçları elde etmek için düğüm noktalarındaki değişik noktalardaki deplasman

değerleri veya bir ısı transferi problemindeki değişik düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri gibi bir dizi lineer veya lineer olmayan cebirsel denklemler çözülür.

6.6.3 İşlem Sonrası Safha (Postprocessing):

- Diğer önemli bilgilerin sonuçları alınır. Bu safhada ilgilenilen asal gerilmeler, ısı akışları vb. değerler elde edilir ve isteğe bağlı olarak grafikler çizdirilir.(Moaveni, 2003)

6.7 Sonlu Elemanlar İle Yapılabilecek Analizler

- Yapısal gerilme ve deformasyon analizleri
- Isı transferi analizleri
- Akışkan analizleri
- Elektro manyetik analizler
- Titreşim analizleri ve temas problemleri
- Akustik analizler

7. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

7.1 Fotoelastisite İle İlgili Yapılan Çalışmalar

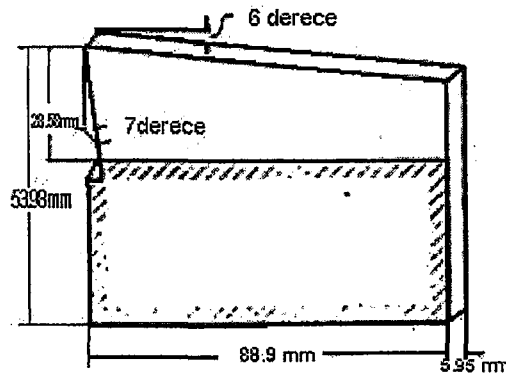
1960 yılında E.Usui ve H.Takeyama tarafından talaş yüzeyindeki normal ve sürtünme gerilmelerini belirlemek için yapılan deneyde, fotoelastik bir malzeme model olarak kullanılmıştır. Deney hakkındaki bilgileri şöyle verebiliriz:

Bugüne kadar ortogonal talaş kaldırma hakkında çeşitli teoriler ortaya atılmıştır. Bu teorilerin çoğunda talaş yüzeyindeki sürtünme katsayısı, takım dinamometresi kullanılarak ölçülen iki bileşeni kullanarak

$$\mu = \frac{F_H \sin \alpha + F_V \cos \alpha}{F_H \cos \alpha - F_V \sin \alpha}$$

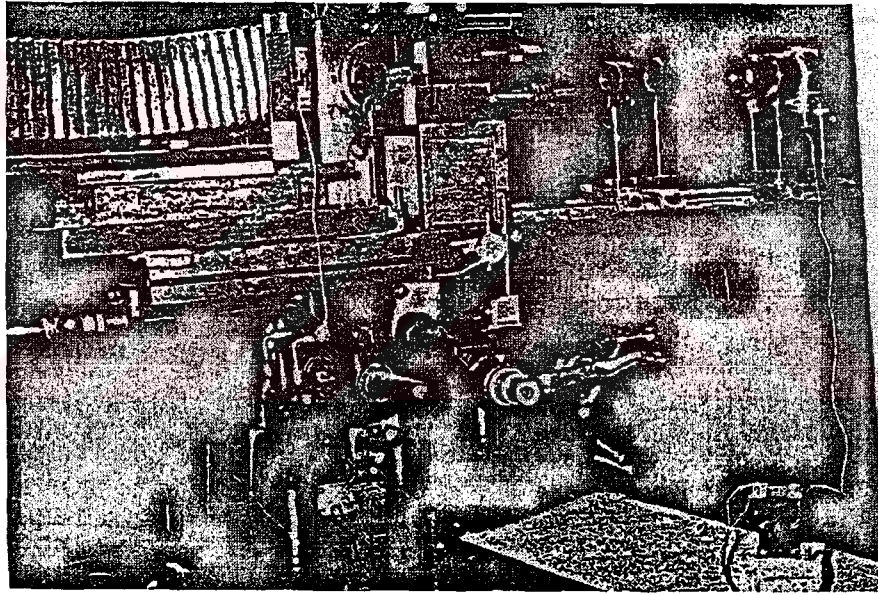
denklemini ile hesaplanmıştır. Bununla birlikte, bu denklemin üstü kapalı olarak iki önemli kabul içerdiğine dikkat etmeliyiz. Şöyle ki, Coulomb kanunu' na dayanarak takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünme gerilmesinin sabit ve gerilmelerin tamamen eşit olduğu kabul edilmektedir. Takım-talaş ara yüzeyinde talaş kaldırma gibi zorlu bir durumda Coulomb kanununun uygulanması oldukça şüpheli sonuçlar doğurur ve kesici kenarda yüksek bir değerin oluşu, ikinci kabulü de anlamsız hale getirir. Talaş kaldırma mekanizmasının güvenilir bir analizi için talaş yüzeyindeki gerilmeler hakkında kesin bir bilgi edinmek en önemli sorundur.

Kesme kuvvetlerine yeterli derecede dayanıklı olabilmesi ve sıkıştırma anında takımın sınır etkilerini engelleyebilecek şekilde (Şekil 7.1) gibi özel olarak tasarlanmış fotoelastik malzemedan (epoksi reçine) yapılan bir takımla kurşun bir plaka işlenmiştir.



Şekil 7.1 Fotoelastik kesme takımının görünüşü (Usui vd., 1960)

Kurşun seçilmesinin sebebi, epoksi reçineden yapılan takım için yeterli derecede yumuşak olmasıdır. Plakanın genişliği, kesme genişliğine eşit olan 5.08 mm dir. Kesme derinliği 0.87 mm ve kesme hızı 18.03 mm/dk dır. Takım (7,0,6,0,0,0,0) şeklini alacak biçimde tasarlanmıştır ve kesici yüzey pürüzlülüğü 0.0044 mm' dir. Ortogonal talaş kaldırma testi için konsollu tip freze tezgahı kullanılmıştır. Fotoelastik kesici takım frezenin iş miline ve işlenen malzeme tablaya mengene ile bağlanmıştır. Takım, rijit olarak bağlanmış malzemeye tezgahın ilerleme traversi kullanılarak bastırılmıştır. Kullanılan fotoelastisite aparatları saçak metodu için sıradan tip olmasıyla birlikte, bölge lensleri, kesici takımın gerilme bölgesi Şekil 7.2' de gösterilen iki adet kondenser lensten sağlanan ışıklar tarafından kaplanacak kadar küçük olduğu için kullanılmadı.

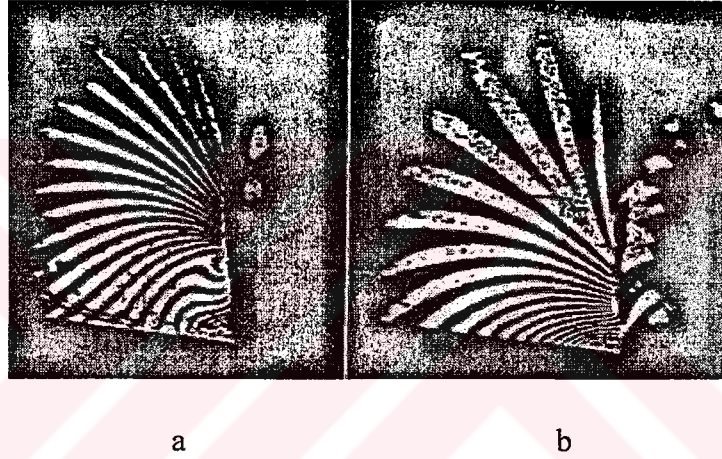


Şekil 7.2 Deney düzeneği (Usui vd., 1960)

Aparatlar freze tezgahının tablası üzerinde fotoelastik takım ile birlikte hareket edecek şekilde düzenlendi. Böylece kesme esnasında takım iç gerilmeleri net olarak gözlemlendi. Talaş kaldırma işlemi boyunca izoklinik ve izokromatik saçaklar umulmadık biçimde sabitti, dolayısıyla fotoğraf çekimi çok kolay oldu. Tezgahın sarsıntısı kesme hızı yavaş olduğu için fotoğrafları etkilemedi, takım ve fotoğraf makinesini içeren bütün optik sistem aynı tabla üzerine monte edildi.

Şekil 7.3'de iki saçak örneği gösterilmektedir. (a) da kesme esnasındaki izokromatik saçak, (b) de ise işlem durdurulup statik olarak hazır talaşa bastırılmasıyla elde edilen saçak gösterilmiştir. Görünüş olarak iki saçak örneği de birbirinden oldukça farklıdır. (b) deki

saçaklar arasındaki boşluk daha düzenlidir ve saçaklar kesme kenarında birbirine derece derece yaklaşırken, (a) daki örnek daha karmaşıktır, yani saçaklar hem kesici kenarda, hem de talaşın talaş yüzeyinden ayrıldığı noktanın yanında birbirine yakın olarak yoğunlaşmıştır. Fakat orta bölgede daha seyreklerdir. Her bir saçak iki asal gerilme farkı ($\sigma_1 - \sigma_2$) yi belirten çizgilerle uyuşur ve ikisi de aynı değere sahiptir. Bunun için saçak dağılımı $\sigma_1 - \sigma_2$ farkına eşittir. $\sigma_1 - \sigma_2$ farkı ayrıca her bir noktadaki kesme gerilmesiyle doğrudan bağıntılıdır. Dolayısıyla statik bir deneyle elde edilen talaş yüzeyindeki sürtünme gerilmeleriyle, talaş kaldırma esnasında oluşan gerilmeler birbiri ile aynı olmayacaktır. Buna rağmen bugüne kadar bazı kişiler statik deneyler yapmış ve fotoelastik malzeme özel olarak hazırlanan talaşa bastırılmıştır.



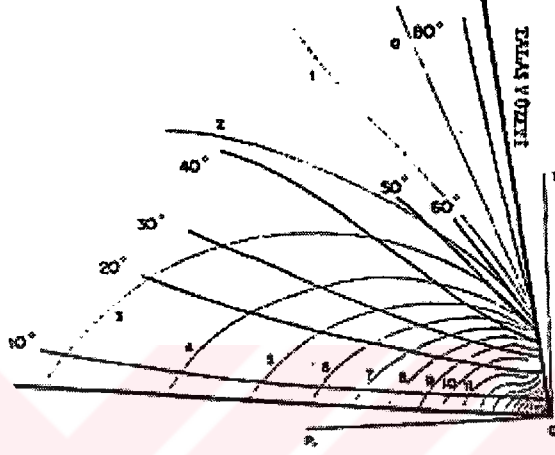
Şekil 7.3 Dinamik (a) ve statik (b) saçaklar (Usui vd., 1960)

Şekil 7.4'te kesme anında fotoğrafı çekilen izoklinik çizgiler gösterilmiştir. Deneyde saçak örneklerinin fotoğrafları çekildikten hemen sonra aynı takım kullanılarak çizgiler elde edilmiştir, çünkü bütün deneysel koşulların saçak numuneleri ve izoklinik çizgi testleri için korunması gerekir.



Şekil 7.4 İzoklinik çizgiler (Usui vd., 1960)

Şekil 7.5'te izokromatik ve izoklinik çizgiler beraber gösterilmiştir. İzokromatik saçaklar ince çizgilerle gösterilmiş ve bağlı saçak sıralarını göstermek için numaralar konulmuştur. Sıfır numaralı saçak, filtre çekildiğinde her bir saçığın gözlenerek renk düzenlemesi yapılmasıyla belirlenir. İzoklinik çizgiler kalın çizgiler ile belirtilmiştir. Gerilmeyi pozitif basıyı negatif olarak, her bir izoklinik çizgi için Şekil 7.5 te gösterildiği gibi OP_1 polarize ışığının bir eksenini ile cebirsel olarak büyük olan σ_1 gerilme doğrultusunun arasındaki açı bulunur.



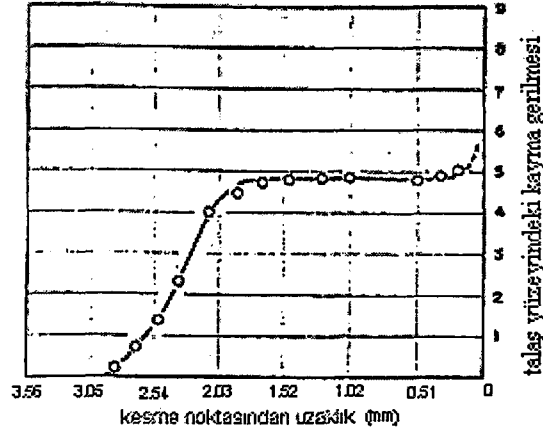
Şekil 7.5 İzokromatik ve izoklinik çizgiler (Usui vd., 1960)

Eğer iki asal gerilme farkı $\sigma_1 - \sigma_2$ ve büyük olan asal gerilme doğrultusu ile x eksenini arasındaki ϕ açısı verilmiş ise, kayma gerilmesi aşağıdaki denklem ile elde edilebilir:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\phi = 2\tau \quad (7.1)$$

burada σ_1 ve σ_2 asal gerilmeler, τ kayma gerilmesidir. $\sigma_1 - \sigma_2$ Şekil 7.5'te gösterilen saçak sırasıyla orantılıdır. Kesici yüzey doğrultusunu x eksenini olarak alırsak, ϕ açısı σ_1 ve OP_1 arasındaki bilinen açının σ_1 ve x eksenini arasındaki açıya dönüştürülmesiyle elde edilebilir

Şekil 7.6'da talaş yüzeyi üzerinde elde edilen sürtünme gerilmeleri dağılımı gösterilmiştir. Sürtünme gerilmesinin kesici kenardan takım-talaş uzunluğunun üç çeyreğinde hemen hemen eşit biçimde dağıldığı gözlenmiştir ve gerilme değeri işlenen malzemenin kayma mukavemetine eşit gibi görülmektedir. Sürtünme gerilmesi talaşın talaş yüzeyinden ayrıldığı noktanın yanında hızla azalmaktadır. Dağılım takım-talaş temas bölgesinde üniformdur.



Şekil 7.6 Talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımı (Usui vd., 1960)

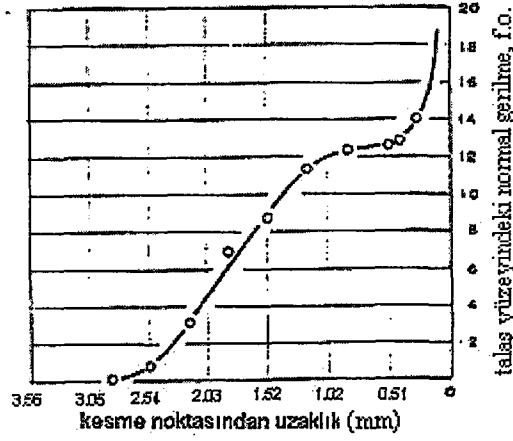
Gerçek bir talaş kaldırma süreci üniform gerilme bölgesi tarafından etkilenir ve talaş ayrılma noktası yanındaki sınır talaş kaldırmada çok az bir rol oynar. Şekil 7.6'da noktalı çizgi ile gösterilen kesici kenardaki sürtünme gerilmesi yüksek görünmektedir. Talaş yüzeyi üzerindeki herhangi bir noktadaki ϕ açısı tam bir değere sahip olmalıdır, çünkü serbest yüzey asal gerilmelerin aynı doğrultuda olduğu serbest sınırdır. Bunun için, teorik olarak kesici kenardaki açı da aynı değerde olacaktır. Bilakis, Şekil 7.5'te görüldüğü gibi kesici kenardaki saçak sırası hızla yükselmektedir. Bu da teorik olarak Denklem 1 e göre kesici kenardaki sürtünme gerilmesini hızla artırmaktadır. Kesici kenarda tekil kuvvetin bulunuşu deneysel olarak ispatlanmıştır. Sürtünme gerilmesinin en yüksek değeri, talaş yüzeyinin teğetsel doğrultusundaki tekil kuvvetin bileşeni olarak açıklanabilir. Buna rağmen, kesici kenar yanındaki serbest yüzey kuvvetin etki etmediği bir durumda olamaz, işlenmiş yüzeye temas ederek bastırılır. Bunun için, kesici kenardaki gerilme bölgesi daha karmaşıktır ve bu durumda olumlu bir açıklama yapılamaz.

Elastik yapıda denge hali için iki denklemden biri integral olarak şöyle yazılabilir:

$$\sigma_y = \sigma_{y_0} - \int_{y_0}^y \frac{\partial \tau}{\partial x} dy \quad (7.2)$$

Burada σ_y y - eksenine doğrultusundaki normal gerilme, σ_{y_0} y nin y_0 olduğu σ_y değeridir.

Talaş yüzeyindeki σ_y değerlerini hesaplamak için, takım Şekil 7.7 de gösterildiği gibi talaş yüzeyine dik olan doğrularla dörtgenlere ayrılır.



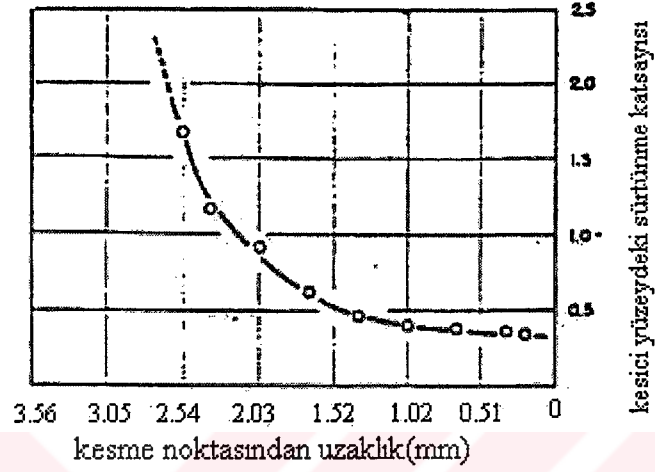
Şekil 7.8 Normal gerilmenin kesme noktasından uzaklığa göre dağılımı (Usui vd., 1960)

Çizelge 7.1 Talaş yüzeyindeki normal gerilme değerleri (Usui vd., 1960)

kesici kenardan uzaklık mm	σ_y f.o.	$\int_{y_0}^y \frac{\partial \tau}{\partial x} dy$ f.o.	σ_x f.o.
0.28	14.23	0.21	14.02
0.41	12.35	-0.48	12.83
0.51	12.35	-0.26	12.63
0.84	9.35	-3.03	12.38
1.19	7.40	-3.96	11.36
1.52	6.01	-2.71	8.72
1.85	5.12	-1.80	6.92
2.21	4.37	1.23	3.14
2.54	3.80	3.07	0.73
2.87	3.33	3.23	0.10

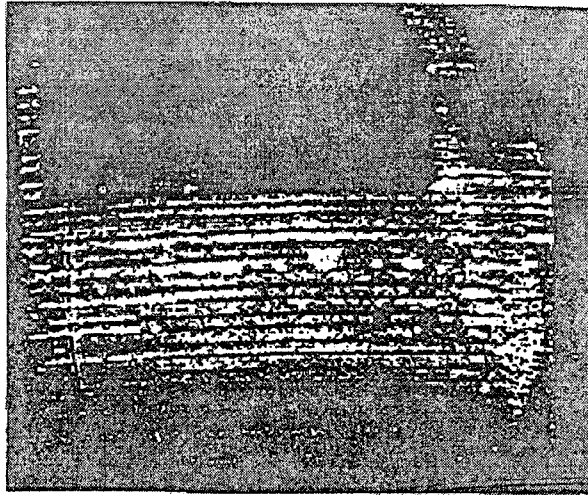
Kesici kenardaki normal gerilmenin aşırı yüksek ve kesici kenarda maksimum değerde olduğu dikkat çekicidir. Gerilme dağılımı açısından daha önce belirtilen bölge ikiye ayrılabilir. Özel bölge olarak adlandırılan bitişik bölgede normal gerilme dağılımı çoğunlukla sabitken, daha dış bölgede gerilme doğrusal olarak azalmakta ve talaş ayırım noktasında sıfır olmaktadır. Kesici yüzeydeki normal ve sürtünme gerilmelerini karşılaştırmak oldukça ilginçtir. Normal gerilmeler takım-talaş temas uzunluğunun büyük bir bölümünde üniform olarak dağılmışken, sürtünme gerilmesi normal gerilmeden bağımsız olarak değişmektedir. Bunun anlamı, sürtünme gerilmesi normal gerilme ile birlikte limit bir değere kadar artmaktadır, bu artışın talaş ayırımına kadar olduğu görülmüştür. Fakat normal gerilme artmasına rağmen bu limit yükselmez, bu limitin işlenen malzemenin kayma mukavemeti olduğu düşünülmektedir. Talaş kaldırma durumunda takım ve talaş arasındaki sürtünmenin Coulomb kanunu' nun içerdiği sıradan sürtünmeden farklı olması muhtemeldir. Talaş, talaş yüzeyine öyle şiddetli bastırılır ki, malzemenin talaş yüzeyi üzerinde takım-talaş temas bölgesindeki malzemenin

kaynaklanan kısımları dağılır. Bu da daha önce bahsedilen kesici yüzeydeki sürtünme gerilmesinin malzemenin kayma gerilmesine hemen hemen eşit olmasının sebebidir. Şekil 7.9' da talaş yüzeyindeki sürtünme katsayısı gösterilmiştir. Görünüş olarak yaygın olarak kabul edilen talaş yüzeyindeki sürtünme katsayısının sabit olduğu fikrine ters düşmektedir.



Şekil 7.9 Kesici yüzeydeki sürtünme katsayısı (Usui vd., 1960)

Şekil 7.10'da talaş yüzeyindeki takım-talaş temas bölgesinin mikrofotografı gösterilmiştir. Mikrofotoğraftan ölçülen takım-talaş temas uzunluğu, kesme kenarından Şekil 7.5 te gösterilen sıfır sıralı saçağın pozisyonuna tam olarak eşittir.



Şekil 7.10 Takım-talaş temas bölgesi (Usui vd., 1960)

Kesici kenar temas bölgesinin üçte biri diğer bölümden daha karanlıktır. Karanlık, talaşın

talaş yüzeyine kuvvetlice kaynadığı yerdir.. Bu parçanın genişliği Şekil 7.8'de sabit olan normal gerilme bölgesini belirleyicidir.

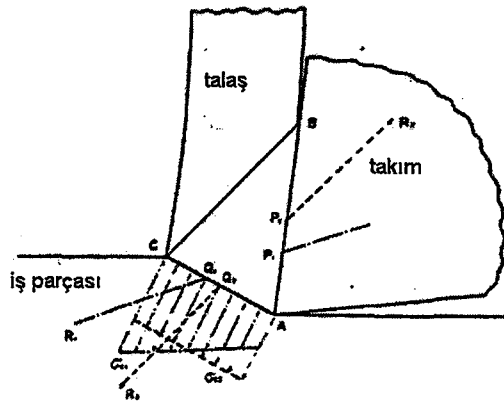
Hem doğrultu, hem de bileşke kesme kuvvetinin etkin noktası aşağıda belirtilen, talaş yüzeyindeki gerilme dağılımının hesaplandığı iki denklemle bulunabilir.

$$S = \frac{\int_A^B \sigma(x) x dx}{\int_A^B \sigma(x) dx} \quad (7.5)$$

$$\tan \theta = \frac{\int_A^B \tau(x) dx}{\int_A^B \sigma(x) dx} \quad (7.6)$$

Burada S kesici kenar ile bileşke kuvvetin etkin noktası arasındaki uzaklık, $\sigma(x)$ ve $\tau(x)$ kesici yüzeydeki normal ve sürtünme gerilmeleri, θ ise talaş yüzeyi ve bileşke kuvvet arasındaki açıdır. Her bir integralin hesaplanması, grafik olarak A kesici kenarından B talaş ayırım noktasına kadar yapılmıştır. Böylece hesaplanan θ açısı 64° ve S değeri 0.97 mm dir.

Şekil 7.11'de B talaş ayırım noktası, P_1 bileşke kuvvetin etkin noktası ve R_1 bileşke kuvvet vektörü gösterilmiştir. Kayma düzlemindeki bileşke kuvvetin etkin noktası Q_1 , bileşke kesme kuvveti R_1 üzerinde olmalıdır, çünkü her iki kuvvet de denge halinde bulunmalıdır. Talaş geometrisinde açı bağıntılarını kullanarak kolayca hesaplanabilecek Q_1 ile kesici kenar arasındaki uzaklık 1.22mm dir.



Şekil 7.11 Kuvvet vektörleri (Usui vd., 1960)

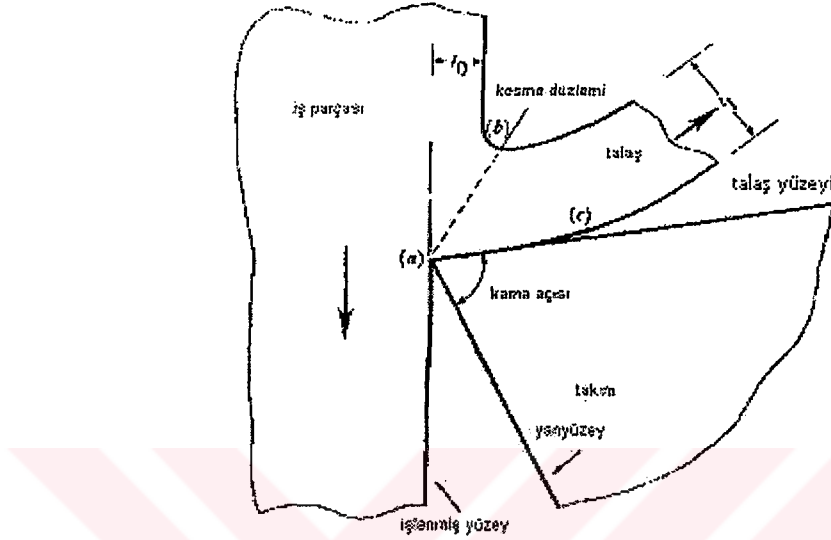
Eğer hem kayma düzlemindeki, hem de talaş yüzeyindeki gerilme dağılımları şimdiye kadar düşünüldüğü gibi üniform ise, R_2 bileşke kuvvetinin etken kuvvetleri Q_2 ve P_2 Şekil 7.11 de gösterildiği gibi temas boyunun merkezinde olmalıdır. Hesaplandığı gibi gerçekte durum böyle değildir, fakat kayma düzlemindeki Q_1 etken kuvveti kayma düzlemi merkezi Q_2 nin üst tarafındadır. Sonuç olarak kayma düzlemindeki normal gerilme dağılımı üniform değildir çalışma yüzeyine doğru artmaktadır, çünkü kayma düzlemindeki bileşke kuvvetin etkidiği noktanın pozisyonunun kayma düzlemindeki kayma kuvvetiyle hiçbir bağıntısı yoktur. Şekil 7.11 de kayma düzleminde, tahmin edilen normal gerilme dağılımı σ_{s_1} kesik çizgi ile, üniform model σ_{s_2} noktalı çizgi ile gösterilmiştir. Deneiden kısaca şu sonuçlar elde edilmiştir:

Kesici yüzeydeki gerilme dağılımları epoksi reçineden yapılmış takım kullanılarak fotoelastisite ile başarılı bir şekilde belirlenebilir. Talaş yüzeyindeki sürtünme gerilmesi takım-talaş temas bölgesinin büyük bir kısmında değişen normal gerilmelerden bağımsız olarak üniformdur, fakat talaş ayırım noktasında hızla azalmaktadır. Talaş yüzeyindeki normal gerilmeler ise, kesici kenarda bir uç değere sahip, takım-talaş temas boyunun orta kısmında çoğunlukla sabit, dış kısımda ise lineer olarak azalarak talaş ayırım noktasında yok olmaktadır. Fotoelastik deneyle kanıtlanan, kesici kenarda uç değerdeki normal gerilme kesici kenardaki tekil kuvvete işaret etmektedir. Kayma düzlemindeki normal gerilme dağılımı üniform değildir, çalışma yüzeyine doğru artmaktadır.

1986 yılında A.Bagcht ve P.K.Wright tarafından yapılan deneyler hakkında da şu bilgileri verebiliriz:

Safir takımlarda gerilmeden dolayı oluşan çift kırılma, talaş kaldırmadaki gerilme sınır şartlarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Çelik ve pirinç numuneler ortogonal talaş kaldırma yöntemi ile 0.381 mm/dk maksimum ilerleme hızı ve 75 m/dk hıza kadar işlenerek, hızın ve ilerleme hızının gerilme üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen izoklinik ve izokromatiklerden, normal ve kayma gerilmelerinin hesaplanmasında kayma farkı (shear difference) metodu kullanılmıştır. Normal gerilmelerin kesici kenarda uç bir değere ulaştığı ve temas boyu sonunda sifira kadar üstel olarak azaldığı görülmüştür. Kayma gerilmesi ise kenarda çok düşük veya sıfır, temas uzunluğu ortasında artmakta ve temasın sonuna doğru azalarak sıfır olmaktadır. Normal gerilmenin en yüksek değeri ortalama normal gerilmenin 1,5-2 katıdır.

Çalışmada, fotoelastisite çalışmalarında ilk olarak geçirgen tek kristalli safir (tek kristalli alüminyum oksit) kullanılmıştır. Uygulama, talaş kaldırma esnasında kesici kenar çevresindeki gerilme dağılımlarını belirlemek için yapılmıştır. Şekil 7.12'de talaş kaldırmanın genel özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 7.12 Talaş kaldırmanın genel özellikleri (Bagcht vd.,1986)

ab düzleminde kayma, ac düzleminde sürtünmesel iş yapılmaktadır. Sonuç olarak, takım kesici yüzeyine yüksek normal ve kayma gerilmeleri etki etmektedir.

Gerilme sınır şartlarının kantitatif olarak belirlenmesi geçtiğimiz yarım yüzyılın bilimsel çevrelerinin ilgi odağı olmuştur. Bu alandaki öncü çalışma Okoshi ve Fukui (1934) tarafından yapılmıştır.

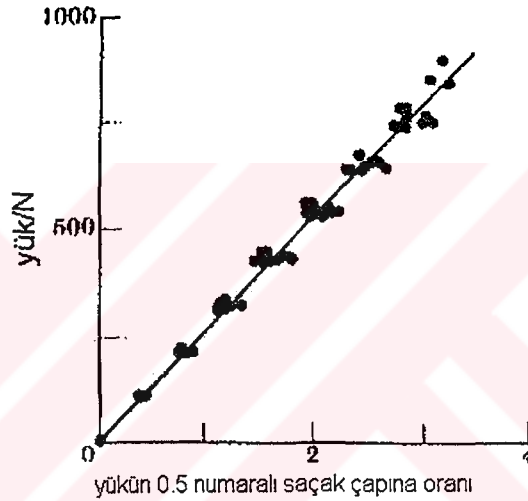
Deneysel çalışmaya safirin gerilme-saçak sabitinin bulunmasıyla başlanmıştır. Kullanılan safirlerin C eksenine paralel olan kristal yüzeyine çizgisel bası yükü uygulanarak safirler kalibre edildi. Böyle bir yük uygulaması, bir elastik yarı boşluk üzerine Flamant çizgisel yükü uygulamasına çok benzemiştir. (Timoshenko 1970). Yük, oluşan saçaklar numunenin serbest kenarına yaklaşmayacak şekilde kontrol edilerek uygulandı. Çünkü tek kristalli alüminyum oksit gerilme dolayısıyla zayıf bir çift kırılım gösterdi, bu şartı sağlamanın en kolay yolu buydu.

Elastik bir bölgeye Flamant çizgisel yükünün uygulanışı Maxwell bağıntılarını kullanarak şöyle gösterilebilir:

$$f_{\sigma} = 2P/\pi dN$$

Burada P uygulanan toplam yük, N saçak sayısı, d belirli bir sıranın dairesel izokromatiğinin çapı, f_{σ} malzemenin gerilme-saçak sabitidir.

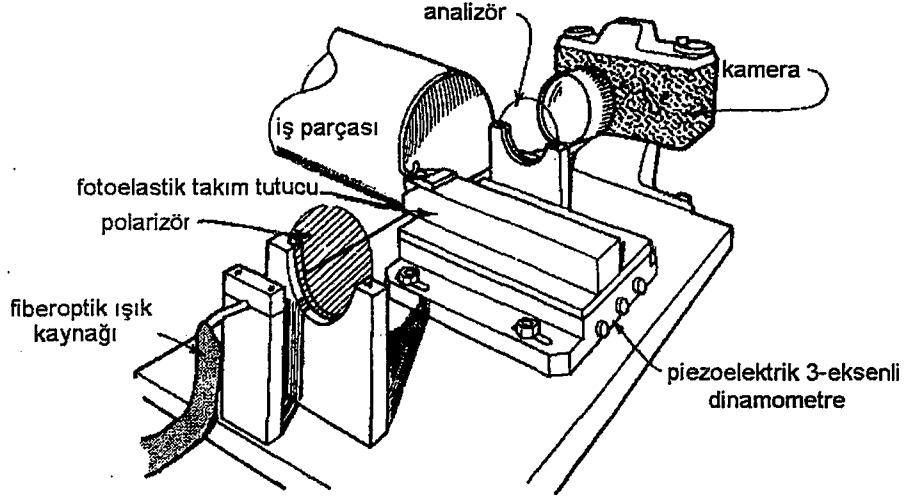
Safir kristalleri standart bir polariskopta, talaş kaldırma deneyinde olacağı gibi, safir kristal eksenine paralel yük uygulanarak gerildi. Çeşitli yükler için i sıralı saçakların çapları belirlenmiştir. Şekil 7.13'de $i = 0.5$ saçak çapı için uygulanan yükler gösterilmiştir. Deneysel koşullardaki P yükü ve d çapı arasındaki orantı, analitik modeli geliştirirken yapılan kabullerle iyi bir uyum sağlamaktadır.



Şekil 7.13 Uygulanan yükün saçak çapına oranı (Bagcht vd.,1986)

Şekil 7.13'de gösterilen yükün saçak çapına oranı P/d , doğrusal regresyonla elde edilmiştir. $N = 0.5$ ve P/d değeri için, tek kristalli safirin gerilme-saçak sabiti $330567 \text{Nm}^{-1}/\text{saçak}$ elde edilmiştir.

Deneysel prosedür ise şöyledir. $(7 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3)$ boyutlarında dikdörtgen boru şeklindeki safir takım, takım tutucuya -5° kesme ve 5° boşluk açısıyla Şekil 7.14'de gösterildiği gibi sadece arka ve alt yüzeyi ile monte edildi. Bu, kristalin kenarlarının, C yüzeylerinin, serbest olmasını ve analiz için düzlem gerilmelerine uygun hale gelmesini sağlamıştır. Takım tutucudaki pencere de talaş kaldırma süresince kayıt yapmaya ve gözlemeye olanak sağlamıştır.



Şekil 7.14 Deney düzeneği (Bagcht vd.,1986)

Bu deneylerde kullanılan safir takımların genişliği 7 mm idi. Talaş genişliğine eşit olan tüp çeper kalınlığı yaklaşık olarak 5 mm idi. İlk deneylerde talaş küçük parçalar halinde ayrılmış ve kesici yüzey ve kenar genişliğini tamamen kaplamıştır. Böylece küçük kenar etkisi ihmal edildi ve elde edilen izokromatik ve izoklinikler takım genişliği üzerindeki gerilmeleri temsil ettiği kabul edilmiştir.

Takım tutucu deney düzeneği üzerinde talaş kaldırma süresince takım üzerindeki kuvvetin X , Y ve Z bileşenlerini ölçen üç eksenli piezoelektrik bir dinamometre üzerine yerleştirilmiştir. Dinamometrenin X eksenini kesici kenara paralel, Y eksenini kesici kenara dik ve dikey bir düzlem kenarı içermekte ve Z , X ve Y eksenlerine ortogonaldır. Deney düzeneği, safir takım ve takım tutucu torna aynası üzerine monte edilmiştir.

Yuvarlak çubuklardan yapılmış boru tabakalar şeklindeki AISI 1020 ve 12L14 çelikleri ve 360 pirinci iş parçası olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin her biri benzer işleme karakteristikleri gösterdi ve uygulanan kesme şartlarında devamlı talaş oluşmuştur. Talaş kaldırma deneyleri Şekil 7.14'te gösterildiği gibi kesici kenar iş parçası eksenine dik olacak şekilde, takım tüp eksenine paralel ilerletilerek gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada yeterli stabilite ve takım çalışma rijitliği sağlanarak ortogonal talaş kaldırma koşulları sağlanmıştır. Numune cidar kalınlığına eşit olan kaldırılmamış talaş genişliği ve kalınlığı, ilerleme hızı ile belirlenmiştir.

Parlak renkli izokromatik ve koyu izoklinik elde etmek için beyaz ışık ile bir düzlem polariskop düzeneği kullanılarak izokromatik ve izoklinikler anında elde edilmiştir.

İzoklinikler 15° aralıklı polarizör-analizör kombinasyonu ile elde edilmiş ve başlangıçta her deney en az bir kere tekrar edilmiştir. Saçakları oluşturulabilirliği ve karşılaştırılabilirliği sağlanınca bir deney sadece gerekli ve önemliyse tekrar edilmiştir. Takım üzerindeki ve takım-talaş ara yüzeyindeki gerilmelerin hesaplanmasında altı adet polarizör oryantasyonu ile elde edilen izoklinikler ve özel bir deneyle belirli bir dalga boyu için elde edilen izokromatikler kullanılmıştır.

Talaş kaldırmadaki gerilme analizlerinin sonuçları ise şöyle yorumlanmıştır. İzokromatik saçakların (Şekil 7.15, 7.16 ve 7.17, 1 ve 2 plakaları) her bir deney süresi boyunca yerlerinin ve sıralarının değişme göstermemesi durağan şartların sağlandığını göstermektedir. Saçakta oluşabilecek küçük titreşimler, objektif kapağının hızı 1/500 s den büyük olarak saçakları film üzerinde donduracak şekilde kamera merceği çapı ve ışıklandırma ayarlanarak önlenmiştir.



Şekil 7.15 İzoklinik saçaklar (Bagcht vd.,1986)

İki iş parçası için elde edilen izokromatik ve izoklinikler Şekil 7.15 ve 7.17'de gösterilmiştir. Şekil 7.16'da fotoğraf, fazla poz verilerek elde edilmiştir. Bu fotoğrafta kesici kenar yakınlığında olağan dışı gerilme gözlenmeyen sonlu sayıda izokromatikler görülmektedir. Eğer gerilmeler kesici kenarda sonsuz geniş ise, ki bu tuhaflığın olduğunu gösterir, bu kenarda yumuşak veya gevrek bozulmalar oluşabilir.



Şekil 7.16 İzokromatik saçaklar (Bagcht vd.,1986)



Şekil 7.17 İzoklinik ve izokromatik saçaklar (Bagcht vd.,1986)

Kesici yüzeydeki gerilme dağılımlarının analizinde uygulanabilir çözüm tekniklerinden bahsetmek gerekirse fotoelastik gerilme analizinin deneysel sonuçlarından izokromatikler (σ_1 - σ_2) ve izoklinikler (θ) elde edilir. Gerilme bölgesindeki üç bilinmeyen σ_x, σ_y ve τ_{xy} dir. İki bağımsız parametre bilindiği için, bu parametrelerden üç bilinmeyen bulunamaz. Gerilmeleri ayırmak için üçüncü bir parametre veya bağıntı gereklidir. Deneysel gerilme analizlerinde bu problemi gidermek için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bunların en yaygınları:

- i) girişim ölçmeye dayalı metotlar
- ii) eğik yönlendirme metodu
- iii) elektriksel-analog metot
- iv) kayma farkı metodu

Bu analitik teknikler üzerinde yapılan detaylı çalışmalar ve önemli kabuller safir gibi tek kristalli, anizotropik, tek eksenli bir model için sadece kayma farkı metodunun kullanılabilceğini göstermiştir. Girişim ölçen metotlarda ($\sigma_1 + \sigma_2$) nin sabit olduğu eş kalınlıktaki doğruların elde edilmesi için deney düzeneği ile bağlantılı tabakalı ekstensometrelerin kullanılması gereklidir. Eğik yönlendirme metodunda yükleme düzlemi ve polariskop eksenini arasındaki değişik oryantasyonlarda malzemenin aynı derecede gerilme çift kırılması gösterebilecek kadar izotropik olmalıdır. Elektriksel analog metot numunedeki gerilme bölgelerini bilinen sınır şartlarında belirlemede faydalıdır. Fakat çalışmada sınır şartlarının bulunması amaçlandığı için bu metot kullanılamamıştır.

Deneyde elde edilen gerilme dağılımlarının analizinde kayma farkı metodu kullanılmıştır. Kayma farkı metodu herhangi bir genel sınır koşulları ve numune şekli için kullanılabilir. Sayısal bir uyum geliştirmek için bilinen uygun bir sınır koşulundan başlayarak denge denklemleri kullanılır.

Gövde kuvvetlerinin yokluğunda, bir düzlem gerilme problemi için denge denklemleri sonlu farklar formunda şöyle yazılabilir:

$$\sigma_{x(i+1,j)} = \sigma_{x(i,j)} - \left[\Delta x (\tau_{xy(i,j+1)} - \tau_{xy(i,j)}) \right] / \Delta y \quad (7.7)$$

$$\sigma_{y(i,j+1)} = \sigma_{y(i,j)} - \left[\Delta y (\tau_{xy(i+1,j)} - \tau_{xy(i,j)}) \right] / \Delta x \quad (7.8)$$

Bu denklemlerde, $\sigma_{x(i,j)}$ ve $\sigma_{y(i,j)}$ bilinen noktalardaki normal gerilme değerleri, $\tau_{xy(i,j)}$ bu sınırlardaki kayma gerilmesidir. Her bir noktadaki kayma gerilmesi ve x ve y boyunca türevleri deneysel izokromatik ($\sigma_1 - \sigma_2$) ve izoklinik (θ) lerden elde edilir.

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \quad (7.9)$$

Eğer herhangi bir noktada sadece σ_x biliniyorsa, σ_y şu bağıntıdan bulunabilir:

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (7.10)$$

Genellikle, hesaplama bilinen bir sınır çizgisindeki gerilmelerle (7.7) ve (7.8) kullanılarak yapılır. Bu işlem çeşitli çizgilerde tekrarlanıp diğer noktalardaki gerilmeler bulunarak bütün alan çevrelenir. Hesaplama yapılırken eş doğrultu kullanılır, tek yönde geliştirilir. Kesici takımın geometrisi göz önüne alındığında, hesaplamaların değişken yön metodu ile yapılmasının önemli olduğu bulunmuştur.

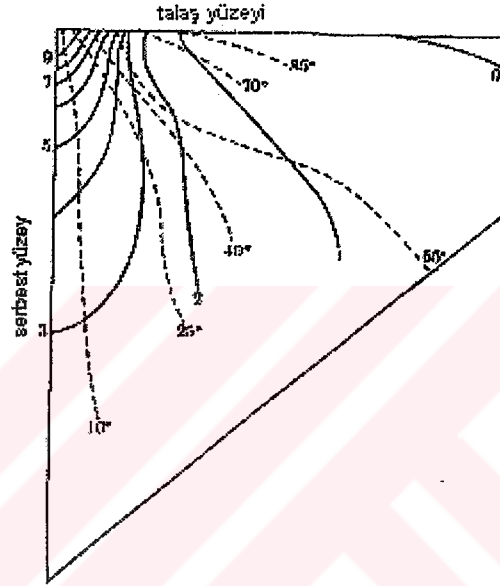
Kesici yüzey yakınlarındaki deformasyonlar ihmal edilerek takımın yan yüzeyinde gerilme olmadığı kabul edilir. Kartezyen koordinat sisteminin sağ tarafı seçilerek kesici yüzey x eksenini boyunca, yan yüzey y eksenini boyuncadır ve kesici kenar orijindedir (kama açısı 90° dir). Böylece yan yüzeyin sınır koşulları:

$$\sigma_x = \tau_{xy} = 0 \quad \text{ve} \quad \sigma_y = 0 \quad (7.11)$$

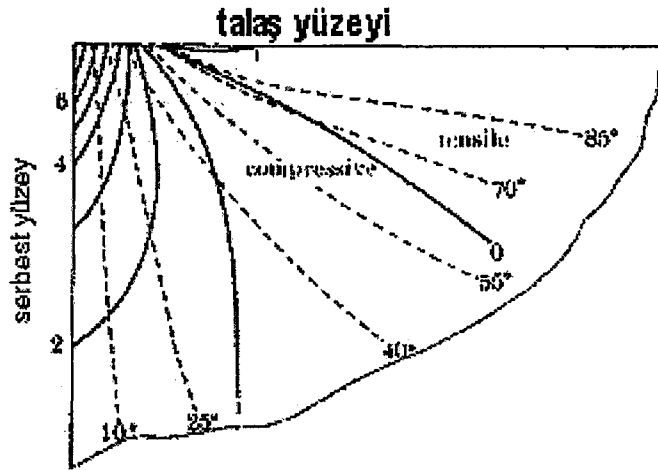
Kayma farkı ile hesaplama takım yüzeyinin yan yüzeyinden herhangi bir sıradan başlamıştır. (7.7) numaralı denklem σ_x i elde etmek için pozitif x eksenini boyunca Δ^2 hata payı ile ileri farklar uygulanarak başarı ile kullanılmıştır, burada Δ basamak genişliğidir. Denklem 7.11 ise

her bir noktada σ_y yi belirlemek için bilinen $(\sigma_1-\sigma_2)$, τ_{xy} ve σ_x değerleri ile kullanılmıştır. σ_y nin bu yeni hesaplanan değerleri ile her bir noktada σ_y yi hesaplamak için ileri ve merkezi farklar ile uygulanmıştır. Kesici yüzeye kadar nümerik hesaplamalar devam etmiş ve takım-talaş ara yüzey gerilmeleri böylece elde edilmiştir.

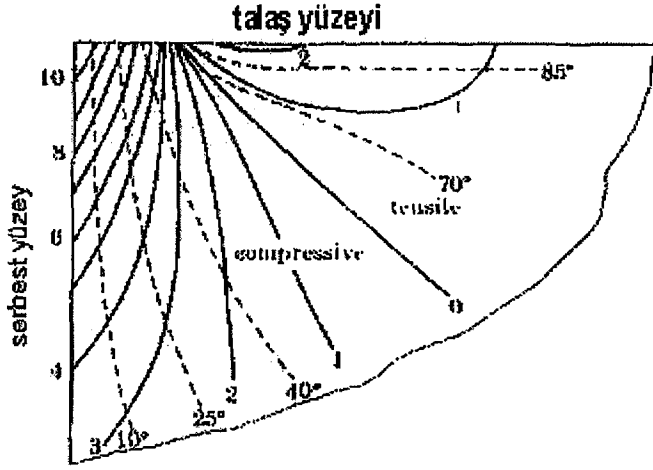
Sonuç olarak üç kesme koşulu için izokromatik ve izoklinik çizgiler beraberce Şekil 7.18, 7.19 ve 7.20'de gösterilmiştir. Bu şekillerdeki izokromatikler Şekil 7.15, 7.16 ve 7.17'de gösterilen yeşil (5461 A⁰) saçaklardan alınmıştır.



Şekil 7.18 İzoklinik ve izokromatik çizgiler (Bagcht vd.,1986)

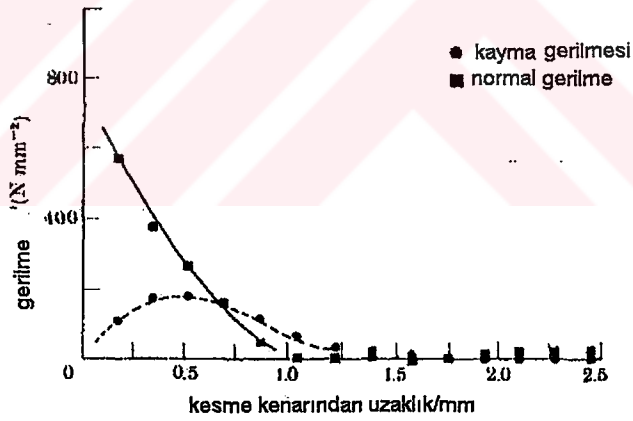


Şekil 7.19 İzoklinik ve izokromatik çizgiler (Bagcht vd.,1986)



Şekil 7.20 İzoklinik ve izokromatik çizgiler (Bagcht vd.,1986)

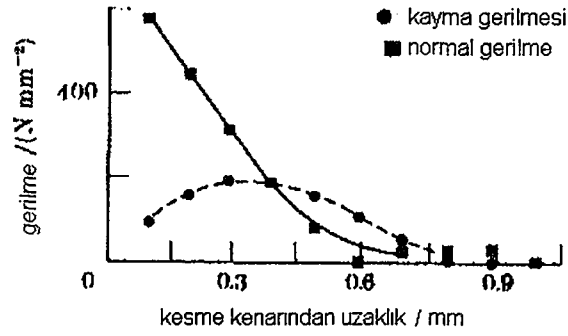
Bununla birlikte, her bir fotoelastisite deneyinde çaprazlanmış polarizör-analizör oryantasyonundan sadece tek bir izoklinik elde edilir. Bundan dolayı 6 adet izoklinik elde etmek için 6 değişik polarizör-analizör oryantasyonu uygulandı. Üç kesme koşulunda deneysel olarak izoklinik ve izokromatiklerden kayma farkı metodu ile kesici yüzey dağılımları Şekil 7.21, 7.22 ve 7.23'de gösterilmiştir.



Şekil 7.21 Gerilmelerin dağılımı (Bagcht vd.,1986)



Şekil 7.22 Gerilmelerin değişimi (Bagcht vd.,1986)



Şekil 7.23 Gerilmelerin dağılımı (Bagcht vd.,1986)

Şekil 7.21, 7.22 ve 7.23'de gösterilen kesici yüzeydeki normal ve kayma gerilmeleri dağılımı epoksi reçine ile kurşunu -10° talaş açısıyla işleyen Chandrasekaran ve Kapoor (1965) un sonuçlarına benzemektedir. Safir takımla yapılan deneylerde, umulduğu gibi gerilme dağılım sınırları hız ve ilerleme hızı ile değişmiştir, fakat ilerleme hızının değişmeye etkisi daha fazla olmuştur.

0.132 mm/dev ilerleme hızında hızdaki %650 artışa karşılık (10 m/dk dan 75 m/dk ya) kenardaki maksimum normal gerilme sadece %10 azalmaktadır. 0.381 mm/dev ilerleme hızında, kesme hızı %200 artarken (25 m/dk dan 75 m/dk ya) gerilmenin uç değerinde herhangi bir azalma görülmemiştir. Kesici kenar yakınlarında hesaplanan gerilme değerlerindeki değişimde de aynı eğilim görülmektedir. Kesici yüzeye dik olan toplam kuvvetin ölçülen ve hesaplanan değerleri arasındaki farkın %15 civarında olduğu düşünülürse, böyle küçük değişikliklerin gerilmenin hız ile değişiminde belirleyici olmadığı kabul edilir.

Normal gerilmelerin ilerleme hızıyla değişimi kolayca gözlenebilirdi. İlerleme hızı 0.132 den 0.381 e yaklaşık üç kat arttığında, talaş yüzeyi normal gerilmeleri yaklaşık 1,5 kat artıyordu. Yüzeyler arası gerilmeler, kesilmemiş talaş kalınlığı ile artıyordu. Bununla birlikte, gerilmeler ve ilerleme hızı ve/veya hız arasında fonksiyonel bir bağıntı kurmadan önce ilerleme hızı hakkında daha kapsamlı deneyler yapılmalıdır.

Belirli kesme koşullarında fotoelastik safir takımların, gerilmemiş talaş yüzeyi yakınlarında temas uzunluğunun ardında gerilme zorlanmalarına maruz kaldığı bulunmuştur. Takımdaki gerilme dağılımındaki bu sapmalar, daha önceki çalışmalarda takımlardaki gevrek malzeme kullanımını artırırken gerilme kuvvetinin engellenerek takım ömrünü uzatacaklarını umuluyordu.

AISI 12L14 çeliği, yüksek ilerleme hızı ve yüksek hızlarda işlenirken takımın gerilme ve basılma alanlarına ayrıldığı ve sıfır sıralı izokromatik ile bu bölgelerin ayrıldığı gözlemlendi.

Sıfır sıralı izokromatiğin talaş yüzeyi üzerindeki yeri aynı zamanda takım ve talaş temasının bittiğini göstermekteydi. Bunun için, eğer talaş yüzeyi ve sıfır sıralı izokromatik arasında herhangi bir izokromatik oluşursa bu saçak, bu alanda takımın gerilme bölgesinde olduğunu gösterir. Şekil 7.19 ve 7.20'de gösterildiği gibi, üç kesme koşulunda (25 m/dk ve 0.381 mm/dev, 75 m/dk ve 0.132 mm/dev, 75 m/dk ve 0.381 mm/dev) takımın gerilme bölgesinde böyle izokromatikler net olarak gözlemlendi. Bu gerilme bölgesinin maksimum değeri, kesici yüzey üzerinde kesici kenardan temas boyunun 1.75 katı olarak bulundu

Deneyden şu sonuçlar çıkarılmıştır. Gerilme sınır şartlarını belirlemek için safir takımların kullanıldığı talaş kaldırma deneylerinde ekonomik ilerleme hızı ve kesme hızlarında, negatif talaş açısıyla yapılmıştır. Gerilme dağılımları kayma farkı metodu ile ve yan yüzeyin gerilmelerden arınmış olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır. İzokromatik sayısının ilerleme hızına bağlı, fakat hızdan bağımsız olduğu bulunmuştur. Ayrıca temas uzunluğu ve kesme kuvvetleri ilerleme hızı ile artarken, kesme hızı ile azalmıştır. Talaş yüzeyi üzerindeki normal gerilmeler, kenarda uç değerde ve üstel olarak azalarak temas uzunluğu sonunda sıfır olmaktadır. Kayma gerilmeleri kenarda sıfır veya çok küçük, dalma bölgesinde maksimum değere çıkmakta ve temas sonunda sıfır olmaktadır. Takımdaki maksimum normal gerilme ve takım-talaş temasındaki ortalama gerilme ilişkilendirilebilir. Bu çalışma sonucu elde edilen gerilme analizleri sonuçlarına göre, uç gerilme değeri takım dinamometresi kullanılarak ölçülen ortalama gerilmenin 1,5-2 katıdır.

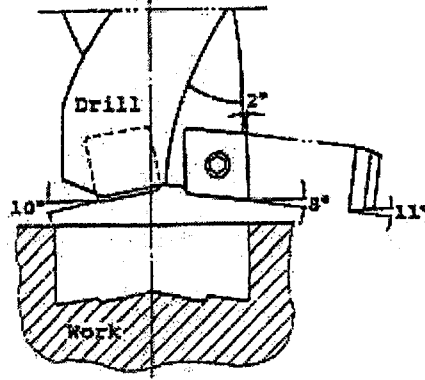
1970 yılında K.Okushima, Y.Kakino, S.Hagihara ve H.Hashimoto tarafından yapılan deneylerde ise şu sonuçlar elde edilmiştir:

Talaş yüzeyindeki sürtünme gerilme dağılımı hemen hemen üniformdur ve talaş temas boyunun 2/3 ünde maksimum kayma gerilmesine eşittir, normal gerilmeler ise ilk olarak artmakta ve talaş temasının sonuna doğru üstel olarak azalmaktadır. Talaş ve takım yüzeyi arasındaki yüksek sürtünme, plastik deformasyon bölgesini genişletmekte ve alttaki elasto-plastik sınırı aşağı doğru dışbükey yapmaktadır. Uç yuvarlaklığı ve kesici yüzey kaplaması işlenen yüzey üzerinde daha geniş etki etmekte, talaş oluşumu üzerinde ise daha az etkili olmaktadır.

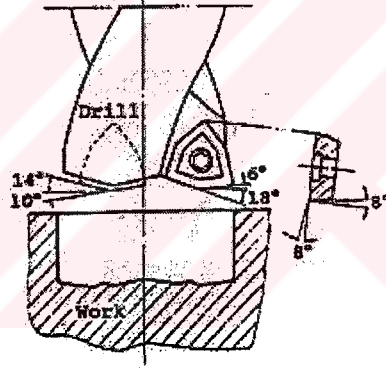
1992 yılında Venkatesh vd. Tarafından yapılan çalışmada matkap uçları incelenmiştir.

Deneyde üç tip matkap ucu kullanılmış (Şekil 7.24, 7.25 ve 7.2), 10118 çeliği bakır ve

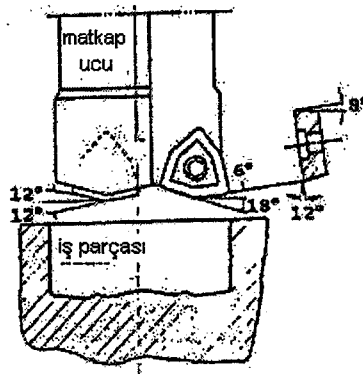
alüminyum alaşımları işlenerek σ_1 ve σ_2 elde etmek için Şekil 7.27'de gösterilen Tanaka düzeneği kurulmuştur.



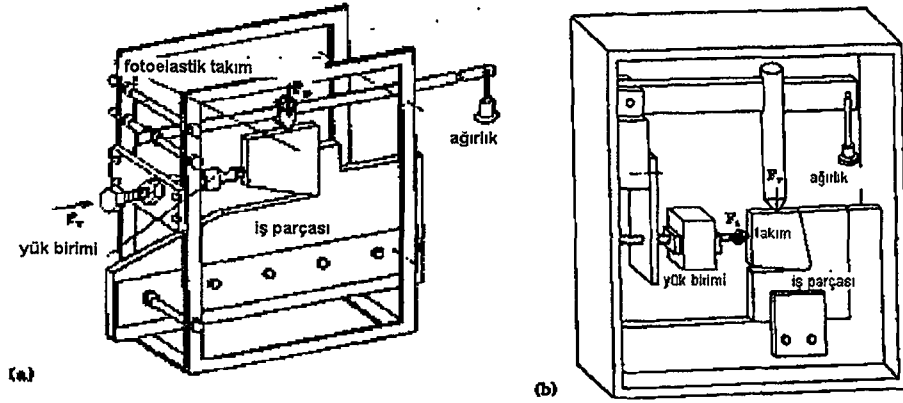
Şekil 7.24 Kullanılan takım geometrisi (A) (Venkatesh vd.,1992)



Şekil 7.25 Kullanılan takım geometrisi (B) (Venkatesh vd.,1992)

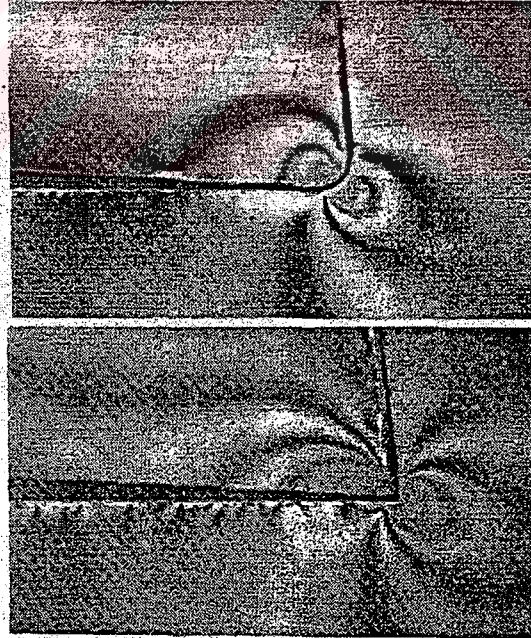


Şekil 7.26 Kullanılan takım geometrisi (C) (Venkatesh vd.,1992)

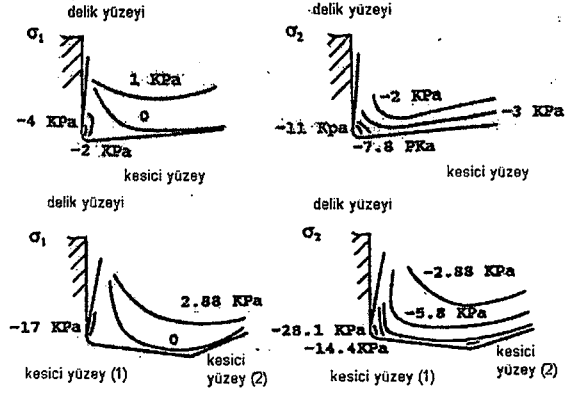


Şekil 7.27 Tanaka düzeneği (Venkatesh vd.,1992)

Tanaka düzeneği talaş açısı, boşluk açısının etkilerini belirlemek için faydalıdır. Deney sonucu elde edilen izokromatik saçaklar ve gerilme dağılımları Şekil 7.28 (a) ve (b) de gösterilmiştir.



Şekil 7.28 (a) İzokromatik saçaklar (Venkatesh vd.,1992)



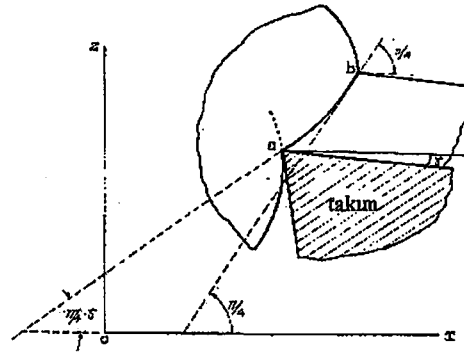
Şekil 7.28 (b) Gerilme dağılımları (Venkatesh vd.,1992)

B ve C (katkı malzemeleri $4\mu\text{m}$ TiN ve $10\mu\text{m}$ TiN/ Al_2O_3 /TiCN) matkap uçları aralıklı kesme esnasında tutukluk yapmış ve matkap delikleri zarar görmüştür. B ucu yüksek ilerleme hızı ile keserken, C ucu ise normal kullanımda zarar görmüştür. Tutukluk yapmasının sebebi büyük olasılıkla katkı malzemelerinin kenarlarındaki mikro talaş oluşumudur. A ucundaki katkı maddesi ($8\mu\text{m}$ TiC) mikro yapıya yüksek kenar direnci sağlayan kobaltla zenginleştirilmiş substrattır.

Takım-talaş arayüzündeki gerilmeler 1965 yılında H.Chandrasekaran ve D. V. Kapoor tarafından incelenmiştir. Deneyle ilgili bilgiler şöyledir:

Pratikteki sonuçların doğrulanması için belirli denklemler Plastisite Teorisinden türetilmiştir. Loladze' nin kullandığı bu metot da takım ucu civarındaki akış doğrultu alanlarındaki özellikler kullanılarak buradaki olası maksimum ve minimum normal gerilmeler belirlenmiştir. İki durum göz önüne alınmıştır:

1. Minimum sürtünme ile talaş kaldırma
2. Maksimum sürtünme ile talaş kaldırma



Şekil 7.29 Minimum sürtünme durumunda akış doğrusu (Chandrasekaran vd, 1965)

Minimum sürtünme ile talaş kaldırma göz önüne alındığında, a ve b noktalarından geçen akış doğrusunun (Şekil 7.29) Hencky eşitliği şöyle yazılabilir:

$$\sigma_a - \sigma_b = \pm 2k\psi_{ab} \quad (7.12)$$

Burada σ_a ve σ_b a ve b noktalarındaki ortalama normal gerilmeler, k iş parçası malzemesinin akma gerilme değeri, ψ_{ab} akış doğrusu seviyesindeki değişimdir.

Akış doğrularının özelliklerine göre, sürtünme yoksa serbest sınırlı akış doğrusunun eğim açısı 45° dir ve b noktasının durumu böyledir.

$$\therefore \psi_{ab} = \psi_a - \psi_b = \left(\frac{\pi}{4} - \gamma \right) - \frac{\pi}{4} = -\gamma$$

a ve b noktaları bası gerilmeleri etkisinde olduğu için 7.12 numaralı denklemde negatif işaret kullanılarak

$$\begin{aligned} \sigma_a - \sigma_b &= -2k(-\gamma) \\ \sigma_a &= \sigma_b - 2k(-\gamma) \end{aligned} \quad (7.13)$$

ve

$$k = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (7.14)$$

Burada σ_1 ve σ_2 asal normal gerilmelerdir ve a ve b noktaları için Mohr dairesi çizilirse b noktasındaki kayma gerilmesi değeri k ' dir. Serbest sınırdaki bir nokta, b noktası, için bir normal gerilme değeri, ki bu ayrıca asal gerilmedir, sıfırdır. Dolayısıyla b noktasında;

$$\sigma_1 = 0$$

böylece 7.14 numaralı denklemden

$$\sigma_2 = -2k$$

b ' deki ortalama normal gerilme;

$$\sigma_b = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{-2k}{2} = -k \quad (7.15)$$

Denklem 7.15' i 7.13 numaralı denklemde yerine koyarsak:

$$\sigma_a = -k - 2k(-\gamma) = 2k\gamma - k$$

a noktasındaki σ_a ortalama gerilmesini bilindiğine göre asal gerilmeyi belirlemek mümkündür.

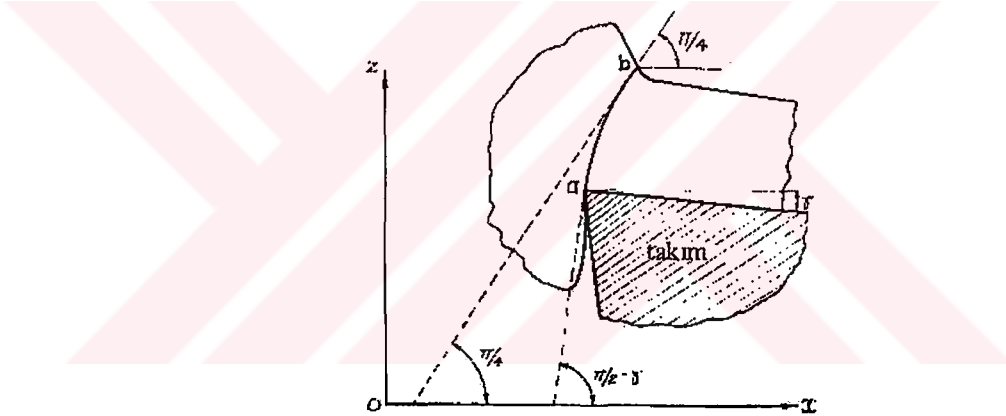
$$\sigma_1 = \sigma_a + k = 2k\gamma - k + k = 2k\gamma$$

ve

$$\sigma_2 = \sigma_a - k = -2k(1 - \gamma)$$

Kesici uçtaki σ_n normal gerilmesi asal gerilmelerden bir tanesi, yani σ_2 ' dir.

$$\therefore \sigma_n = -2k(1 - \gamma) \quad (7.16)$$



Şekil 7.30 Maksimum sürtünme durumunda akış doğrusu (Chandrasekaran vd, 1965)

Maksimum sürtünme koşullarında talaş kaldırma için benzer şekilde düşünülürse, akış doğrusu özelliklerine göre, akış doğrusu a noktasından talaş yüzeyi ile 90° lik açı yapacak şekilde ayrılır ve b noktasına 45° lik açı ile ulaşır (Şekil 7.30).

$$\psi_{ab} = \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) - \frac{\pi}{4} = \left(\frac{\pi}{4} - \gamma \right)$$

Bu açıdan, talaş yüzeyindeki normal gerilme ortalama normal gerilmeye eşittir:

$$\sigma_n = \sigma_a \quad \text{ve} \quad -k = \sigma_b$$

Böylece Hencky eşitliğinden;

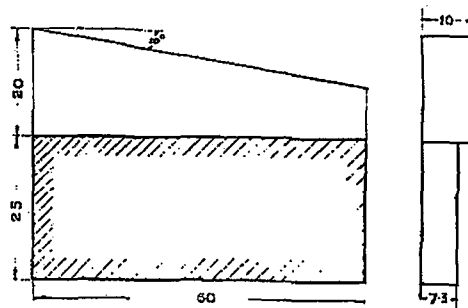
$$\sigma_a - \sigma_b = \sigma_n + k = -2k \left(\frac{\pi}{4} - \gamma \right)$$

Dolayısıyla,

$$\sigma_n = -2k \left(\frac{\pi}{4} - \gamma \right) - k = -2k \left(\frac{\pi}{4} + 0.5 - \gamma \right) = -2k(1.285 - \gamma) \quad (7.17)$$

Her iki sürtünme durumunda takım ucundaki minimum ve maksimum normal gerilmeyi hesaplamak için 7.16 ve 7.17 numaralı denklemler kullanılabilir.

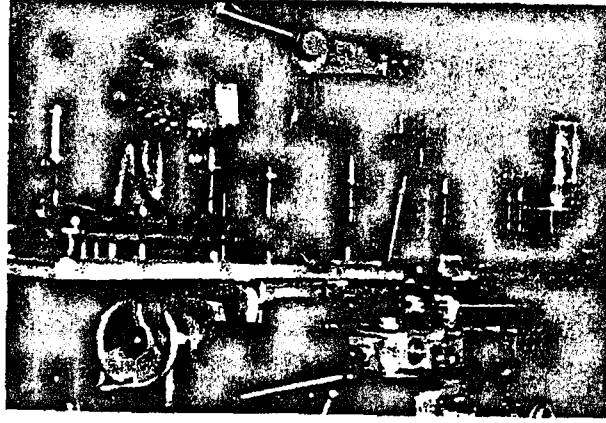
Deneylerde kurşun fotoelastik bir takımla işlenmiştir. Kurşunun iş parçası olarak kullanılmasındaki temel avantaj istenilen sertlikte olmasının yanı sıra, oda sıcaklığındaki plastik durumunun Plastisite denklemlerinin kullanılmasına uygun olmasıydı. Takım malzemesinin seçimi iş parçasının sertliği göz önüne alınarak yapılmıştır. Loladze' nin de belirttiği gibi takım malzemesinin sertliği iş parçası malzemesinin sertliğinin en az 2.7 katı olmalı idi. Böylece, sertliği 20-24 Bhn olan VP_1527 fotoelastik malzeme kullanılmıştır, kurşunun sertliği ise yaklaşık 6 Bhn dir. Kullanılan takımın detayları Şekil 7.31' de gösterilmiştir. Problemin başlangıç kalitatif analizi yavaş, el ile idare edilen kesme hareketi ile yapıldı ve takım ucu, işleme gerilmelerinden dolayı bükülerek saçaklara engel olmuştur. Bu durum yeterli genişlikte takım dizaynı ile giderilmiştir.



Şekil 7.31 Takımın detayı (Chandrasekaran vd, 1965)

Kurşun plakanın genişliği takım kalınlığı ile aynı tutuldu (10 mm). Çalışma boyunca kesme derinliği 0.76 mm idi. -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$ lik talaş açılı takımlar kullanılmıştır. Fotoğraf düzeneğinden dolayı daha yüksek talaş açıları kullanılmamıştır. Bütün takımların boşluk açısı 10° idi. 25.4 mm/dk'lık kesme hızı en güzel sonucu vermiştir. Deneylerde yatay freze tezgahı kullanılmıştır. Takım, tezgahın tablasına özel teçhizatlarla bağlanmış ve kurşun plaka iş

miline rijit olarak bağlanmıştır (Şekil 7.32).



Şekil 7.32 Deney düzeneği (Chandrasekaran vd, 1965)

Oluşan saçaklar ile takımın hazır talaşa bastırılmasıyla elde edilen saçaklardan biraz farklı olmuştur. Saçaklar talaş ayırım noktası civarında yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte değişik talaş açılara sahip takımlarda farklılıklar olmuştur. İzokromatik ve izoklinik saçaklar elde edildiğinde talaş yüzeyindeki gerilmelerin analizi yapılabilmektedir. Çeşitli izokromatik ve izoklinik saçaklar Şekil 7.33, 7.34, 7.35, 7.36 ve 7.37' de gösterilmiştir.



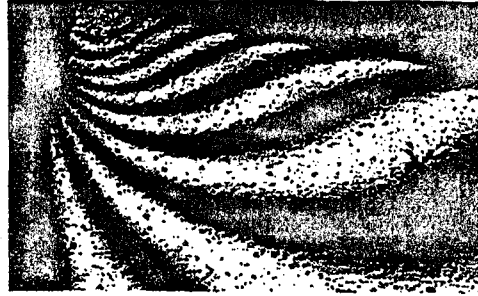
Şekil 7.33 0° Talaş açılı takımında oluşan izokromatikler (Chandrasekaran vd, 1965)



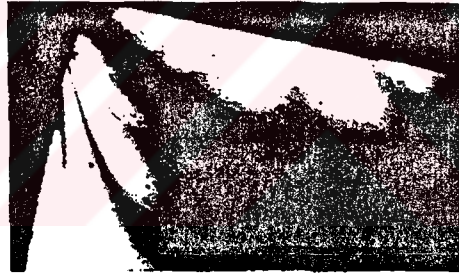
Şekil 7.34 +10° Talaş açılı takımında oluşan izokromatikler (Chandrasekaran vd, 1965)



Şekil 7.35 +20° Talaş açılı takımda oluşan izokromatikler (Chandrasekaran vd, 1965)



Şekil 7.36 -10° Talaş açılı takımda oluşan izokromatikler (Chandrasekaran vd, 1965)



Şekil 7.37 -10° Talaş açılı takımda 40° izokliniği (Chandrasekaran vd, 1965)

Talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımının belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \sin 2\phi \quad (7.18)$$

Burada, τ talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi, σ_1 ve σ_2 asal gerilmeler, ϕ büyük değerdeki asal gerilme ile kullanılan koordinat sistemindeki x eksenini arasındaki açıdır. Talaş yüzeyi doğrultusunu x eksenini kabul ederek talaş yüzeyindeki çeşitli noktadaki izoklinik parametreleri ile talaş açısı etkisini göz önüne alarak ϕ değeri elde edilmiştir. $\sigma_1 - \sigma_2$ farkı saçak sırasıyla doğrudan orantılı olduğu için ϕ 'nin belirlendiği noktalardaki izokromatiklerden σ_1 , σ_2 ve τ değerleri belirlenmiştir.

Böylece -10° , 0° , $+10^\circ$ ve $+20^\circ$ talaş açılı takımlar için talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımı saptanmıştır. Sonuçlar 7.2, 7.3, 7.4 ve 7.5 numaralı çizelgelerde verilmiştir. Dağılım eğrileri Şekil 7.38' de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 -10° Talaş açılı takımdaki kayma gerilmeleri (Chandrasekaran vd, 1965)

No	Kesici Kenardan Uzaklık mm	$(\sigma_1 - \sigma_2)$ f.o.	ϕ Derece	$\sin 2\phi$	Kayma Gerilmesi kg/mm^2
1	0.31	10.9	82	0.267	0.322
2	0.49	10.8	80	0.342	0.413
3	0.85	10.6	76.5	0.455	0.548
4	0.81	9.6	73	0.55	0.59
5	0.93	8.5	68	0.626	0.66
6	1.15	8.25	63	0.81	0.74
7	1.31	7.75	58.5	0.89	0.78
8	1.47	7.5	54	0.95	0.90
9	1.64	7.25	52	0.97	0.79
10	1.80	7.0	50	0.985	0.77
11	1.96	6.5	48	0.994	0.72
12	2.12	6.2	46	0.99	0.69
13	2.29	6.1	43	0.994	0.67
14	2.45	6.0	41.5	0.991	0.61
15	2.62	5.0	40	0.985	0.55
16	2.78	4.3	39.5	0.976	0.47
17	2.95	3.0	37.5	0.965	0.32
18	3.10	2.15	36	0.95	0.22
19	3.27	2.0	33.5	0.92	0.10
20	3.40	1.5	31.5	0.89	0.08

Çizelge 7.3 0° Talaş açılı takımdaki kayma gerilmeleri (Chandrasekaran vd, 1965)

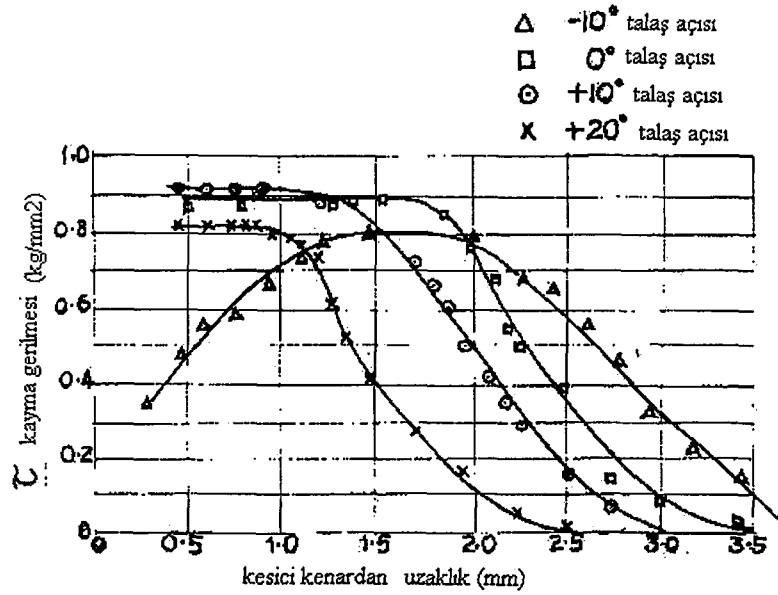
No.	Kesici Kenardan Uzaklık mm	$(\sigma_1 - \sigma_2)$ f.o.	ϕ Derece	$\sin 2\phi$	Kayma Gerilmesi kg/mm^2
1	0.46	11.7	70	0.639	0.84
2	0.61	11.4	68.5	0.685	0.89
3	0.75	11.2	67.5	0.705	0.85
4	0.85	11.1	67	0.723	0.90
5	1.09	10.9	66	0.748	0.87
6	1.20	10.0	64.5	0.766	0.88
7	1.35	9.5	62	0.820	0.88
8	1.50	9.1	60	0.850	0.81
9	1.58	8.6	54.5	0.940	0.90
10	1.69	8.0	46	0.997	0.85
11	1.85	7.5	42.5	0.995	0.85
12	1.99	6.8	41	0.986	0.76
13	2.10	6.0	40	0.985	0.66
14	2.18	5.0	39.5	0.973	0.65
15	2.25	4.6	38	0.970	0.49
16	2.50	3.5	35	0.940	0.38
17	2.70	1.8	32	0.900	0.18
18	3.00	1.2	25	0.763	0.11
19	3.30	0.5	17.5	0.574	0.03

Çizelge 7.4 +10° Talaş açılı takımındaki kayma gerilmeleri (Chandrasekaran vd, 1965)

No.	Kesici Kenardan Uzaklık mm	$(\sigma_1 - \sigma_2)$	ϕ Derece	$\sin 2\phi$	Kayma Gerilmesi kg/mm^2
1	0.45	11.0	62	0.826	0.91
2	0.52	10.5	58	0.898	0.90
3	0.61	10.0	55	0.940	0.90
4	0.76	9.5	52	0.970	0.91
5	0.90	8.3	48	0.983	0.90
6	1.08	8.0	46	0.993	0.89
7	1.20	7.8	44	0.996	0.86
8	1.36	7.6	42	0.983	0.84
9	1.50	7.3	40	0.985	0.80
10	1.60	6.9	38.5	0.983	0.76
11	1.68	6.4	37.5	0.975	0.74
12	1.80	6.0	37	0.960	0.66
13	1.88	5.5	36.5	0.960	0.60
14	1.98	4.8	34	0.925	0.49
15	2.10	4.0	33.5	0.920	0.41
16	2.18	3.5	32	0.900	0.33
17	2.26	3.0	28.5	0.838	0.28
18	2.52	2.0	23	0.720	0.16
19	2.74	1.0	20	0.643	0.07

Çizelge 7.5 +20° Talaş açılı takımındaki kayma gerilmeleri (Chandrasekaran vd, 1965)

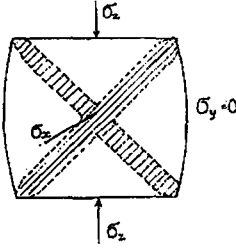
No.	Kesici Kenardan Uzaklık mm	$(\sigma_1 - \sigma_2)$	ϕ Derece	$\sin 2\phi$	Kayma Gerilmesi kg/mm^2
1	0.31	11.1	65.6	0.638	0.92
2	0.44	9.3	64.	0.788	0.81
3	0.62	8.8	62	0.828	0.81
4	0.70	7.9	58	0.900	0.80
5	0.79	7.7	54.5	0.945	0.81
6	0.84	7.5	53	0.960	0.80
7	0.94	7.2	51	0.978	0.78
8	0.98	7.0	50	0.985	0.76
9	1.06	6.8	44.5	0.999	0.72
10	1.15	6.6	39	0.980	0.73
11	1.25	6.0	33	0.913	0.62
12	1.33	5.4	30	0.866	0.52
13	1.47	4.9	28.5	0.755	0.41
14	1.68	4.0	18	0.643	0.29
15	1.88	3.0	13	0.530	0.18
16	1.88	2.5	9.5	0.438	0.12
17	2.39	2.0	5	0.326	0.07



Şekil 7.38 Talaş yüzeyindeki kayma gerilmesi dağılımı (Chandrasekaran vd, 1965)

Kayma gerilmesi eğrileri bazı ilginç özellikler göstermektedir. Sıfır ve pozitif açılı takımlar için elde edilen eğriler Takeyama'nın elde ettiği eğrilere benzemektedir, yani kayma gerilmesi belirli bir bölgede sabittir, gerilmenin büyüklüğü yaklaşık olarak malzemenin kayma gerilmesine eşittir. Kullanılan kurşunun kayma gerilmesi 0.92 kg/mm^2 'dir. Daha sonra gerilme hemen hemen doğrusal olarak azalmakta ve talaş ayrımında sıfır olmaktadır.

Negatif talaş açılı takımında (-10°) ise farklı bir durum oluşmuştur (Şekil 7.38). bu durumda, kesici kenar civarındaki kayma gerilmesi düşüktür, daha sonra yavaşça artarak temas uzunluğunun bir bölümünde diğer takımlarda olduğu gibi sabit olmakta, daha sonra azalarak talaş ayrımında sıfır olmaktadır. Bu durum, negatif talaş açılı bir takımında takım ucu civarındaki iş malzemesinin hidrostatik basınç etkisinde olduğu şeklinde açıklanabilir. Yetersiz yağlamanın olduğu iki boyutlu hidrostatik basınç altında çapraz kayma oluşur (Şekil 7.39), böylece uç yakınında kayma azalır. Araştırmadaki durum uç civarında biraz kayma gerilmesi olduğunu göstermektedir, bu kayma dağılım eğrisinin ekstrapolasyonu ile elde edilebilir, ve talaş kaldırmanın tam hidrostatik bir durum olmadığını gösterir. Eğrinin ulaştığı maksimum kayma gerilmesi işlenen malzemenin kayma gerilmesine hemen hemen eşittir.



Şekil 7.39 İki boyutlu bası altında malzeme (Chandrasekaran vd, 1965)

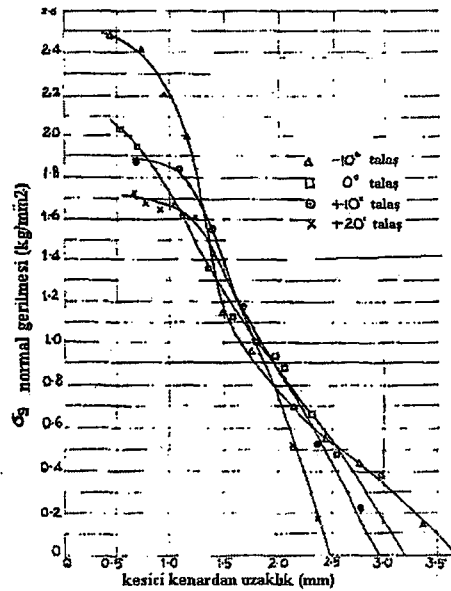
Talaş yüzeyindeki normal gerilme dağılımını belirlemek için, bazı yaklaşımlar kabul edilerek kayma farkı metodu kullanılmıştır. Bu metotta kartezyen denge denklemleri integral formunda kullanılmaktadır. Yani;

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = 0 \text{ integral formunda şöyle yazılabilir:}$$

$$\int_{y_0}^{y_1} \sigma_y = - \int_{y_0}^{y_1} \frac{\partial \tau}{\partial x} dy$$

$$\sigma_{y_1} = \sigma_{y_0} - \int_{y_0}^{y_1} \frac{\partial \tau}{\partial x} dy \quad (7.19)$$

Burada σ_{y_1} y eksenini doğrultusunda normal gerilme ve σ_{y_0} $y_1=y_0$ iken σ_{y_1} değeridir. Denklem 7 ve Denklem 8' i kullanarak talaş yüzeyindeki bütün kayma gerilmesi dağılımı elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 7.40' ta ve 5, 6, 7 ve 8 numaralı çizelgelerde gösterilmiştir.



Şekil 7.40 Talaş yüzeyinde normal gerilme dağılımı (Chandrasekaran vd, 1965)

Çizelge 7.6 -10° Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler (Chandrasekaran vd, 1965)

No.	x	D.I.	σ_x
1	0.40	11.75	2.62
2	0.73	11.20	2.53
3	0.89	10.30	2.30
4	1.14	9.40	2.10
5	1.47	5.35	1.19
6	1.80	4.36	0.97
7	2.125	3.52	0.75
8	2.46	2.72	0.58
9	2.78	2.25	0.48
10	3.02	1.88	0.40
11	3.43	0.67	0.16

Çizelge 7.7 0° Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler (Chandrasekaran vd, 1965)

No.	x	σ_{y0}	D.I.	σ_{y1}	σ_x
1	0.53	8.50	- 1.215	9.715	2.16
2	0.68	7.65	- 1.62	9.27	2.07
3	1.12	6.42	- 1.06	7.486	1.875
4	1.35	4.80	- 1.60	6.40	1.43
5	1.60	4.30	- 0.35	3.25	1.17
6	1.83	4.00	- 0.83	4.83	1.08
7	2.06	3.50	- 0.70	4.20	0.94
8	2.34	3.06	- 0.10	3.15	0.70
9	2.60	2.80	+ 0.55	2.25	0.50
10	2.85	2.60	+ 1.30	1.30	0.39
11	3.15	2.25	+ 1.20	0.45	0.09

Çizelge 7.8 +10° Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler (Chandrasekaran vd, 1965)

No.	x	σ_{y0}	D.I.	σ_{y1}	σ_x
1	0.68	11.60	3.72	8.88	1.97
2	0.83	10.50	1.61	8.89	1.98
3	1.05	9.70	0.85	8.85	1.96
4	1.35	8.50	0.90	7.40	1.64
5	1.65	7.70	2.07	6.60	1.25
6	1.95	7.00	2.46	4.54	1.01
7	2.38	6.10	2.60	2.60	0.56
8	2.63	5.75	3.77	1.98	0.46
9	2.94	5.05	3.93	1.12	0.25

Çizelge 7.9 +20° Talaş açılı takımındaki normal gerilmeler (Chandrasekaran vd, 1965)

No.	x	σ_{y_0}	D.I.	σ_{y_1}	σ_g
1	0.66	12.60	4.45	8.08	1.80
2	0.76	12.40	6.50	7.90	1.78
3	0.88	12.20	4.52	7.78	1.74
4	1.06	11.80	3.78	7.82	1.76
5	1.23	11.30	3.90	7.50	1.70
6	1.40	10.80	4.40	6.20	1.42
7	1.82	9.80	5.00	4.80	1.07
8	2.09	8.70	4.67	4.03	0.90
9	2.125	7.08	4.72	2.33	0.32
10	2.40	7.50	6.65	0.85	0.19

Eğrilerden de görülebileceği gibi -10° talaş açılı takımında değişiklik vardır. Grafiklerin tümünden de görülebileceği gibi temas uzunluğu boyunca normal gerilme dağılımı lineer değildir. Pozitiften negatife değişen talaş açılı takımların eğrilerinde de belirli bir değişiklik vardır. $+20^\circ$ talaş açılı takımın eğrisi daha dışbükeyken -10° talaş açılı takımın eğrisi daha içbükeydir. Normal gerilme grafiğinin gösterdiği diğer önemli bir nokta ise maksimum normal gerilme bölgesinin, kesilmemiş kalınlığın talaş yüzeyi üzerindeki izdüşümü kadar, yani $t/\cos\gamma'$ kadar genişlemesidir (çalışmada 0.76 mm). Burada t kesilmemiş talaş kalınlığı ve γ' takım talaş açısıdır. Gerçek değeri pratikte ölçmek ise çok zordur.

Maksimum normal gerilme teorik olarak 7.14 ve 7.15 numaralı denklemlerle elde edilmiştir, sonuçlar Şekil 7.40' daki grafik ile Çizelge 7.10' da karşılaştırılmıştır.

Deneysel olarak elde edilen maksimum normal gerilme değerleri kesme sıvısının kullanılmadığı talaş kaldırmada maksimum ve minimum sürtünme durumları arasında değişir.

Çizelge 7.10 Normal gerilme değerleri (Chandrasekaran vd, 1965)

Talaş açısı γ' , derece	σ_{min} kg/mm ²	σ_{max} kg/mm ²	σ_g kg/mm ²
-10	2.14	2.66	2.6
0	1.82	2.34	2.1
+10	1.5	2.08	1.9
+20	1.2	1.72	1.7

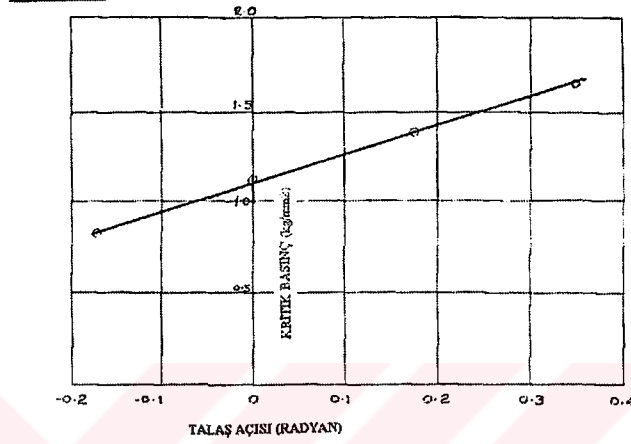
σ_{min} = minimum sürtünme kabulünde normal gerilme değeri

σ_{max} = maksimum sürtünme kabulünde normal gerilme değeri

σ_g = grafiklerden elde edilen gerçek durumdaki değer

Herhangi bir takım için, normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılım eğrilerinden görüldüğü gibi "plastik temas" olarak bilinen durumu, veya kayma gerilmesinin malzemenin kayma

gerilmesine ulaştığı bölgeyi oluşturmak için, normal basıncın tam değerini içerir. Deneyde kullanılan değişik talaş açılı takımlar için kritik basınç değerinin sabit olmadığı görülmüştür. Kritik basınç normal gerilme dağılım eğrisinde, kayma eğrisinin sabit gerilme bölgesinin bittiği yerden hesaplanabilir. Eğer ilk yaklaşımda olduğu gibi talaş açısı ve kayma eğrisi arasında lineer bağıntı bulunursa, elde edilen grafiğin durumu Şekil 7.41' deki gibi olur.



Şekil 7.41 Talaş açısı - kritik basınç grafiği (Chandrasekaran vd, 1965)

Bu grafiğin denklemi herhangi bir talaş açısı için kritik basınç değerini verir.

$$\sigma_k = k(1.65\gamma + 1.2) \quad (7.20)$$

Burada σ_k kg/mm^2 cinsinden kritik basınç, k malzemenin kayma gerilmesi (kg/mm^2) ve γ radyan cinsinden talaş açısıdır.

Belirtilen durumlar göz önüne alınarak normal gerilme dağılımının üç bölgeye ayrılması yaklaşımında bulunulmuştur:

- $t/\cos\gamma'$ uzunluğuna kadar sabit normal gerilme olan bölge,
- bu yüksek değerden kritik basınç değerine kadar olan lineer bölge,
- kritik basınçtan talaş ayırımındaki sıfır gerilmeli bölgeye kadar olan bölge.

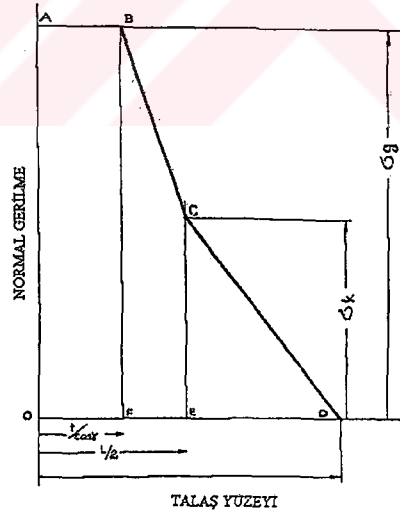
Bu üç bölge de Şekil 7.42' te gösterilmiştir. ABCD altındaki alan takımın birim genişliği başına normal kuvveti verir. Böylece ABCDEFO alanı üç alanın toplamını içerir.

$$\begin{aligned}
 Alan_{ABFO} &= \sigma_g \left(\frac{t}{\cos \gamma'} \right) \\
 Alan_{BCFE} &= \left(\frac{\sigma_g + \sigma_k}{2} \right) \left(\frac{L}{2} - \frac{t}{\cos \gamma'} \right) \\
 Alan_{CDE} &= \left(\frac{\sigma_k}{2} \right) \left(\frac{L}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Buradan N normal gerilme;

$$\begin{aligned}
 N &= \left(\frac{t}{2} \right) 2k(1.285 - \gamma) + \left(\frac{L}{2} - \frac{t}{\cos \gamma'} \right) \frac{1}{2} [2k(1.285 - \gamma) + k(1.65\gamma + 1.2)] \\
 &+ \frac{k(1.65\gamma + 1.2) L}{2} \frac{L}{2}
 \end{aligned} \quad (7.21)$$

Burada L mm cinsinden toplam temas, γ radyan cinsinden talaş açısıdır.

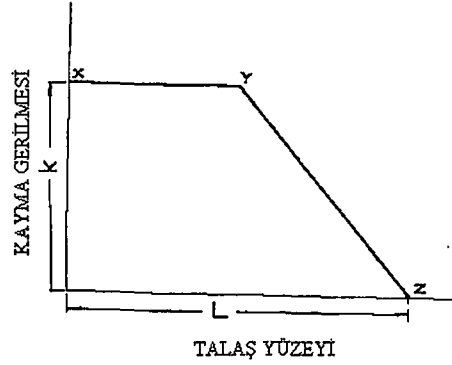


Şekil 7.42 Normal gerilmenin yaklaşık dağılımı (Chandrasekaran vd, 1965)

Birim sürtünme kuvveti değeri kayma gerilmesi dağılım eğrisinden belirlenebilir. Sabit kayma gerilme bölgesini toplam temas uzunluğunun yarısı olarak alırsak (bu sonuç Zorev' in değişik koşullar altındaki değerlerine dayanmaktadır), birim sürtünme kuvveti F :

$$F = 0.75L.k \quad (7.22)$$

Şekil 7.43' te YZ bölgesinde lineer dağılım kabul edilmiştir. Böylece 7.21 ve 7.22 numaralı denklemleri kullanarak sürtünme katsayısı μ , F/N den elde edilir.



Şekil 7. 43 Kayma gerilmesinin yaklaşık dağılımı (Chandrasekaran vd, 1965)

Deneyler sonunda takım ucundaki gerilme durumu takım talaş açısındaki değişiklikler için fotoelastik takımlar kullanılarak fotoelastisite metodu ile başarılı olarak belirlenebileceği, temas uzunluğundaki kayma gerilmesi uzunluğun yarısı kadar sabit olup daha sonra talaş ayırım noktasına doğru azalarak sıfır olduğu ve yaklaşık olarak lineer olduğu, incelenen talaş açıları için maksimum kayma gerilmesi değerinin işlenen malzemenin kayma gerilmesine ulaştığı, temas uzunluğundaki normal gerilme değişiminin tam anlamıyla lineer olmadığı, maksimum normal gerilmenin takım talaş açısı ile ters orantılı nonlineer olarak değiştiği sonuçlarına varılmıştır.

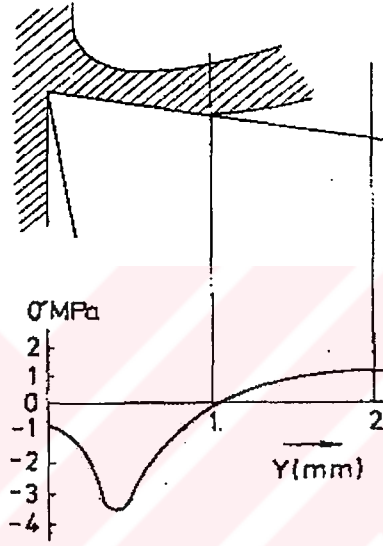
7.2 Sonlu Elemanlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Kesici takımlar üzerindeki gerilmelerin belirlenmesi amacıyla J. Tlustý ve Z. Masood tarafından 1978 yılında yapılan çalışmalarda elde edilen bilgiler şöyledir:

Karbür takımların kamalarında talaş oluşumu ve kırılması çok az anlaşılmıştır. Kamalar tahmin edilemeyen takım kaplaması özellikleri gösterir ve bunun için otomatik makinelerde operatör tarafından devamlı kontrolü olmadan yapılan talaş kaldırma işlemi istenmeyen ve tehlikeli bir durumdur.

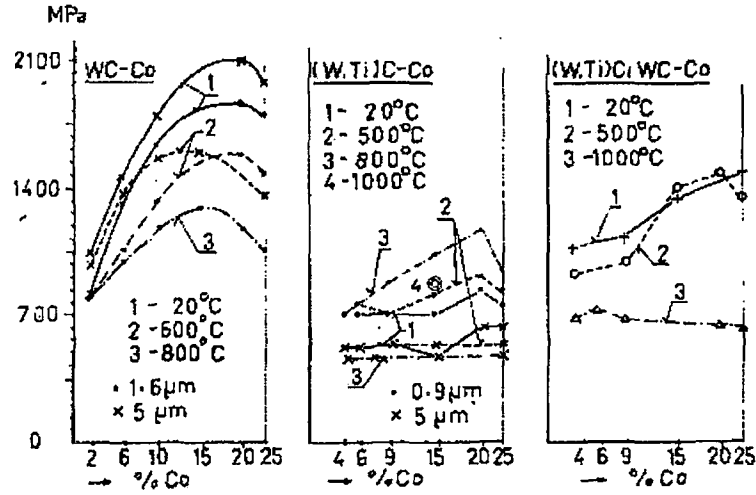
Genellikle bu hatalar karbür takımların gevrek doğaları gereği birleşirler ve gevrek çatlaklar oluşur. Bunun aksine bazıları bunun aralıklı talaş kaldırmadaki yorulmanın sonucu malzemenin sünek doğasından dolayı olduğunu belirtmektedir. Primus tarafından yapılan fotoelastik analizlerde cam takımlarla alüminyum ve elmas takımlarla çeşitli çelikler işlenerek takım üzerindeki kesme yükleri incelenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar hesaplamalı gerilme analizlerindeki yükleri belirlemede kullanılmaktadır. Loladze kurşunu işlemek için

plastik takımlar kullanmış ve kamadaki gerilme dağılımını belirlemek için fotoelastisite yöntemini uygulamıştır. Takım kesici yüzeyindeki normal gerilme dağılımını elde ettiği sonuçlardan bir örnek Şekil 7.44'te gösterilmiştir. Kesme kenarından, talaş-takım temas uzunluğunun yaklaşık iki katı uzaklıktaki mesafelerde çekme gerilmeleri bulmuş ve kırılma hakkındaki düşüncelerini bununla ilişkilendirmiştir. Isıl gerilmeler üzerine klasik bir çalışma Hoshi ve Okushima tarafından yapılmıştır. Freze takımındaki sıcaklık devinimini ölçmüşler, talaş oluşumu ve kırılmayı beş çeşide ayırmışlardır. H.J.J. Kals tarafından karbürler test edilerek toklukları ölçülmüştür.



Şekil 7.44 Loladze' nin kesici yüzeyde belirlediği normal gerilme dağılımı (Tlusty vd, 1978)

Ayrıca karbürlerin enine kopma gerilmeleri çeşitli sıcaklıklarda belirlenerek G.S. Kreimer tarafından bir kitap haline getirilmiştir. Şekil 7.45'te Kreimer tarafından elde edilen bilgilerden derlenerek oluşturulmuş bir grafik gösterilmektedir. Düzlük derecelerinden belirlenen gerilme değerlerinde yaklaşık %16 Co' lı karbürlerde maksimum enine kopma gerilme değerleri elde edilmektedir. Bu değerler sıcaklıkla artmaktadır ve 800⁰C de %50' ye yükselmektedir.

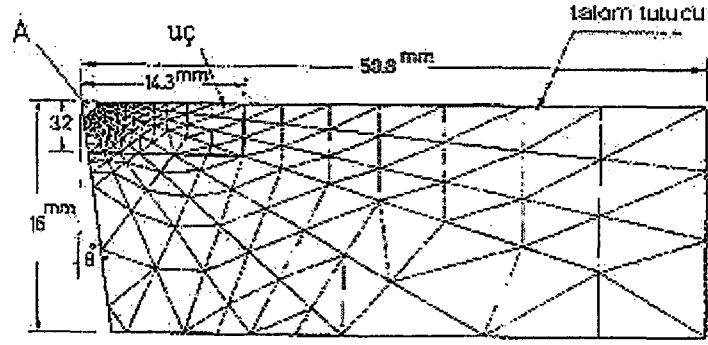


Şekil 7.45 Sinterlenmiş karbürler için Kreimer tarafından belirlenen enine kopma mukavemeti (Tlustý vd, 1978)

Yapılan çalışmada gerilme analizlerini basitleştirmek için düzlem gerilim durumu kabul edilerek sonlu elemanlar ile yapılmıştır. Testlerde kullanılan takım ucundan uzaktaki kesici kenarda talaş genişliğinin talaş kalınlığına oranının yaklaşık 5 olduğu göz önüne alınarak bu basitleştirme yapılmıştır. Takım ucundaki durum 3 boyutlu gerilme durumudur ve uğraşmak daha zordur. Yapılan diğer bir basitleştirme ise katkı maddesindeki malzemenin de homojen ve izotropik olduğu kabulüdür. Bu kabullerin uygulanabilirliği gerçekten uzak bir ihtimaldir. Buna rağmen hesaplama kolaylığı için pratikte bu kabuller yapılmıştır.

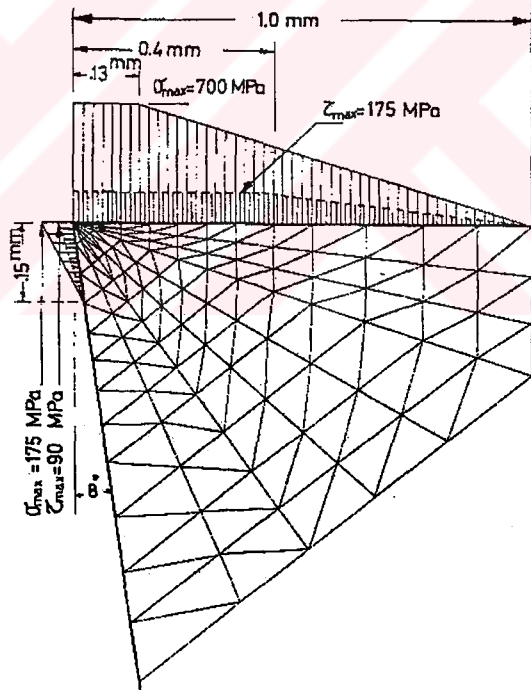
Sonlu elemanlar tekniği açısından yaygın olarak kullanılan klasik bir uygulama yapıldı. Takım tutucudan katkı maddesine doğru değişen büyüklüklerde kesici kenarda daha sık bir ağ yapısı oluşturuldu. Bütün sistem için geniş bir katılık matrisi oluşturuldu ve geniş, tek basamakta sonuç elde edildi.

Ağ yapısının sıklaştırılması mesh iyileştirmesi ile yapıldı. Genel olarak kullanılan, yeni alanın sınırındaki deplasmanların önceki basamağın sonucu olduğunun kabul edildiği metot kullanılmadı çünkü bu yöntemde bütün basamaklardaki yük değişimi tekrar tekrar hesaplanması gerekir. Önceki basamakların sadece bir kere hesaplandığı çeşitli yüklerin hesaplanmasının, en iyi son alanda hesaplandığı yeni bir metot uygulandı. Tek geniş basamak metodu ile basamak basamak mesh iyileştirme metodundan elde edilen sonuçlar özdeştir. İkinci metotta daha az belleğe ihtiyaç vardır. Kesici kenara yakın olan bölgede daha iyi mesh kullanılır ve her basamakta düzenli mesh kullanıldığı için işlemi oldukça basitleştiren otomatik mesh oluşturma kullanımına izin verir.



Şekil 7.46 Sonlu elemanlar hesaplamalarında kullanılan mesh yapısı (Tlusty vd, 1978)

Şekil 7.46'de tek basamak metodunda oluşturulan mesh takım tutucu ve uç boyutları ile birlikte gösterilmiştir. Şekil 7.47'de kesici kenara yakın olan A bölgesi büyütülerek gösterilmiş, ayrıca uygulanan yük belirtilmiştir.

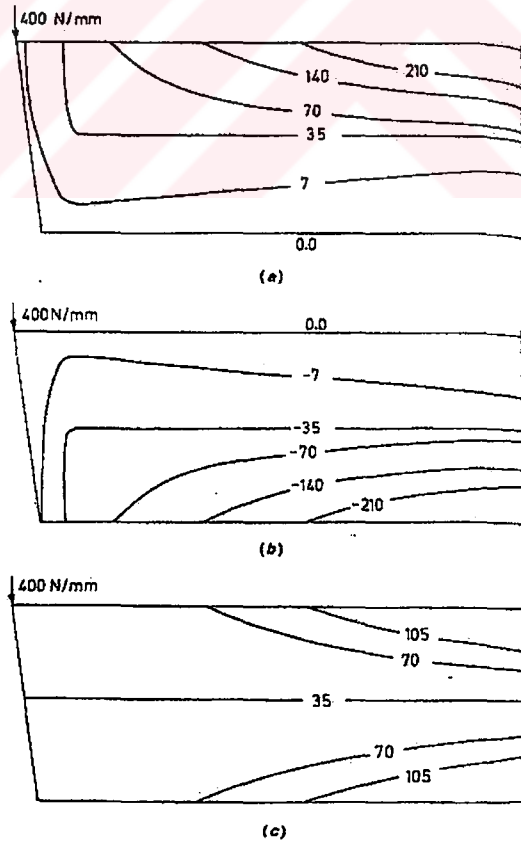


Şekil 7.47 Takım ucundaki yükün ve mesh yapısının detayı (Tlusty vd, 1978)

Deforme olmamış talaş kalınlığı 0.25 mm ve talaş temas boyu 1 mm kabul edilmiştir. Kesici yüzey üzerindeki kesme kenarının birim uzunluğundaki normal gerilmenin maksimum değeri 700 MPa olarak kabul edilmiştir. Bu maksimum değer deforme olmamış talaş kalınlığının yarısı boyunca uzanır ve daha sonra talaş temasının sonuna kadar lineer olarak azalır. Teğetsel gerilmenin kesici kenardan 0-4 mm uzaklığa kadar sabit ve 175 MPa olduğu kabul edilir. Daha

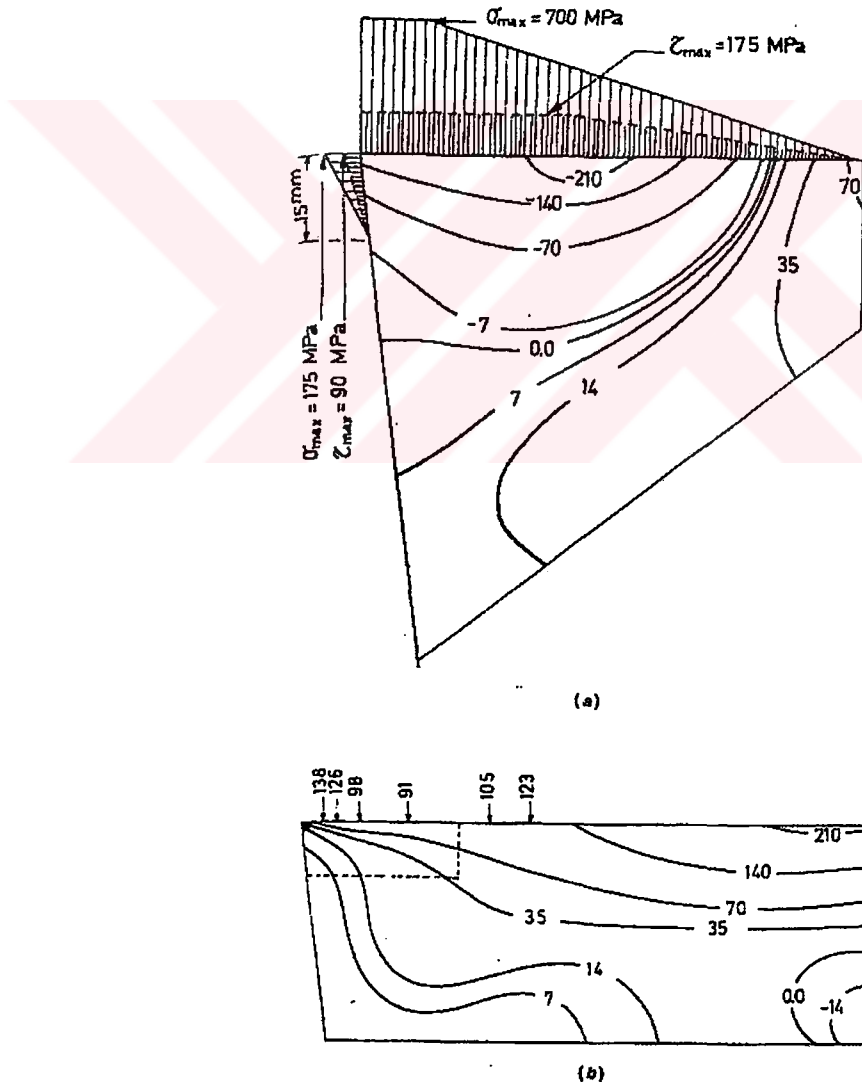
sonra talaş temasının sonuna kadar lineer olarak azalmaktadır. Yan yüzeydeki yükler kaplamanın kalınlığına bağlıdır. Burada $a=0.15$ mm kabul edilmiştir. Kesici kenardaki normal gerilme maksimum 175 MPa' dır ve kaplama genişliği üzerinde lineer olarak azalmaktadır. Teğetsel gerilme değeri normal gerilmenin yarısıdır. Çözümde elde edilen gerilmelerin grafiğini okumayı kolaylaştırmak için, kesici kenar üzerinde, bir ucuna 1 mm kenar uzunluğu başına 400N toplam normal yüke eşit olan konsantre yük uygulanan, homojen çelik bir kiriş kabulü ile elde edilmiştir ve bunlar gerçeklikten uzaktır. Bununla birlikte yükten uzak alanlarda gerilmeler gerçeğe oldukça yakındır. Lokal gerilmelerin oluştuğu sabitlenmiş uçta bükülme olmaktadır.

Basitleştirilmiş klasik bir çözüm Şekil 7.48'de gösterilmiştir. Burada (a)' da eşit maksimum normal gerilme çizgileri, (b)' de minimum normal gerilme çizgileri ((a)' dakilerin simetrik olarak tersi), (c)' de maksimum kayma gerilmesi çizgileri gösterilmiştir. Temel özellikleri özetleyecek olursak: kiriş ucunda gerilme yoktur, çeki gerilmeleri maksimumdur, uçtan uzaklaştıkça artmakta ve alt yüzeyde bası gerilmeleri aynı etkiyi göstermektedir. Kayma gerilmeleri her iki yüzeyde de yükten uzaklaştıkça artmaktadır.



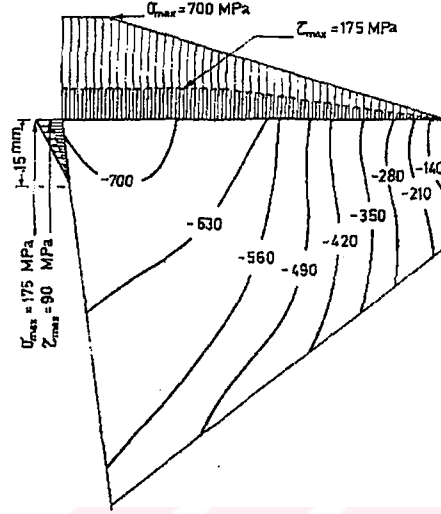
Şekil 7.48 Klasik kiriş teorisi ile elde edilen sabit gerilme çizgileri (Tlusty vd, 1978)

Şekil 7.49'de boşluk açısı sıfır olan bir takım sonlu elemanlar ile analizin sonuçları gösterilmektedir. (a)' da kesici kenar yakınındaki bölgede maksimum asal gerilmeler gösterilmiştir. Kenar boyunca çeki gerilmesi yoktur ve minör eksenlerdeki bası gerilmeleri düşüktür. Bütün bu bölge, çeki gerilmelerinin maksimum değeri 70 MPa, bası gerilmelerinin maksimum değeri 210 MPa' dır. (b)' de bütün bir takım için maksimum asal gerilmeler gösterilmiştir. Karbür katkı maddeli kesici kenardan talaş temas boyunun yaklaşık 3 katı uzaklıkta maksimum lokal değer 138 MPa civarındadır. Bu sonuçlar Şekil 7.44'te gösterilen Loladze' nin deneysel sonuçları ile uyuşmaktadır. Burada da, uçtan uzakta, katkı maddesinde çeki gerilmesi yeniden azalmaktadır. Takım sapında artmaktadır. Tespit edilmiş uca doğru artmakta ve 210 MPa olmaktadır.



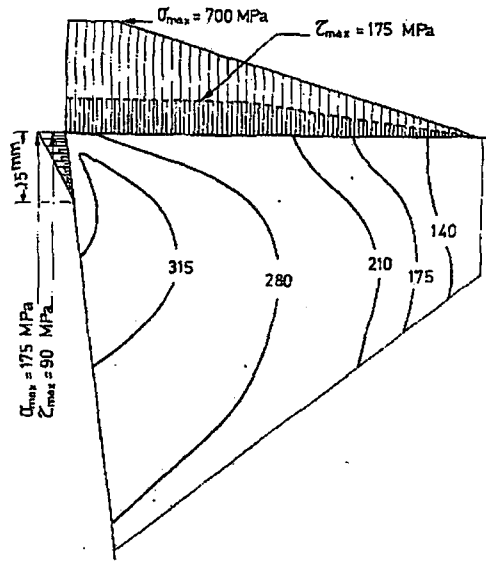
Şekil 7.49 Sabit maksimum asal gerilme çizgileri (Tlustý vd, 1978)

Kesici kenardan uzaktaki bölgelerde, sapın üst yarısındaki eşit maksimum gerilme çizgileri Şekil 7.48(a)'daki ile uyuşmaktadır. Alt yarıda genel olarak benzerdir. Bununla birlikte bu ikinci değerler çok küçüktür ve sapmalar fazla değildir.



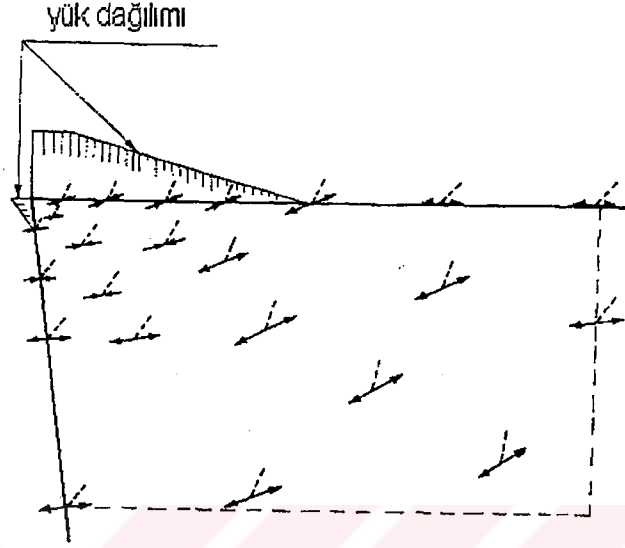
Şekil 7.50 Minimum asal gerilme çizgileri (Tlusty vd, 1978)

Şekil 7.50'de, kesici kenar yakınındaki eş minimum asal gerilmeler gösterilmektedir. Majör eksenlerdeki bası gerilmelerinin kesici kenara doğru arttığı ve 700 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Minör eksenlerdeki asal gerilmeler ile majör eksenlerdeki asal gerilmeler arasındaki büyük fark Şekil 7.51'de gösterilen maksimum kayma gerilme çizgilerindeki büyük kayma gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Kesici kenara yaklaştıkça artmakta ve 315 MPa değerini almaktadır.



Şekil 7.51 Sabit maksimum kayma gerilmesi çizgileri (Tlusty vd, 1978)


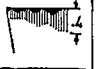

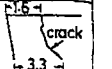
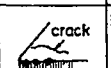
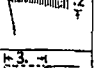

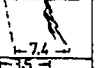
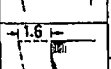

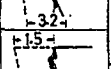

Şekil 7.52’de karbür katkı maddesinin ucundaki gerilme doğrultuları gösterilmiştir. Oklar maksimum asal gerilme doğrultularını belirtmekte ve kesikli çizgiler maksimum kayma gerilme doğrultularını belirtmektedir.





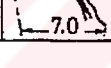


Şekil 7.52 Maksimum asal ve kayma gerilme doğrultuları (Tlusty vd, 1978)

Özetleyecek olursak, öncelikle bilinmesi gereken bütün bu gerilmeler 0.25 mm deforme olmamış talaş kalınlığı içindir. Ayrıca, bütün bunlar ana kesici kenar boyunca kenardan belirli uzaklıktaki değerleri göstermektedir ve takım ucunda daha büyüktür.

Diğer önemli bir özellikte katkı maddesinin kesici yüzeyindeki çeki gerilmesinin lokal maksimum değeridir. Deneysel olarak kırılma oluşan besleme değeri için yeniden hesaplanarak, örneğin 1mm\dev için maksimum çeki gerilmesi kesici kenardan 2mm ila 3mm uzaklıkta oluşmakta ve 500 MPa civarında bir değer ulaşmaktadır ve takımın uç bölgesinde bekli 1000 MPa değerinde olduğu fikrini vermektedir. Bu da karbürlerin özellikle kesici yüzeyde yüksek sıcaklıklarda ulaşılan TRS değerleri ile (Şekil 7.45) karşılaştırılabilir. Böylece, bu sonuç kesici yüzey üzerindeki bu noktada gevrek kırılma şeklinde meydana gelen kırılmanın deneysel gözleminin sonuçları ile büyük uyum sağlamaktadır.(Şekil 7.53 ve7.54)

t	v	f		t	v	f	
min	m	mm		min	m	mm	
min	min	rev		min	min	rev	
4340 BHN 217, (A)				4340 BHN 217, (A)			
1	3.5	85	.25	4	4.5	80	0.9
							
	16	50	0.6		5.5	80	1.1
							
	18	50	0.6	5	4340 BHN 380, K45		
					2	60	0.7
2	13	50	0.7				
					5	60	0.9
	18	50	0.7				
				6	0.5	60	.84
3	0.5	80	0.7				
							

Şekil 7.53 Sürekli kesme işleminde talaş oluşumu ve takım kırılması (Tlusty vd, 1978)

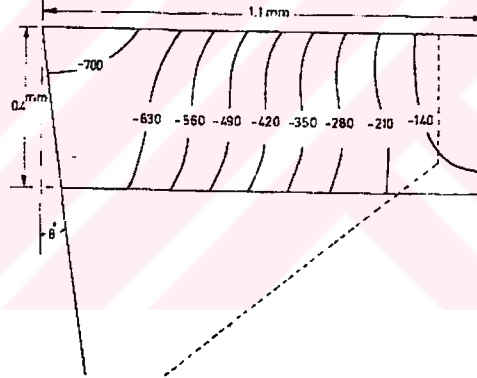
t	v	f		t	v	f	
min	m	mm		min	m	mm	
min	min	rev		min	min	rev	
4340 BHN 380, (C)				4340 BHN 380, (C)			
1	0.1	90	0.5	2	2	90	0.4
							
				5	5	90	0.4
							

Şekil 7.54 Aralıklı kesme işleminde talaş oluşumu ve takım kırılması (Tlusty vd, 1978)

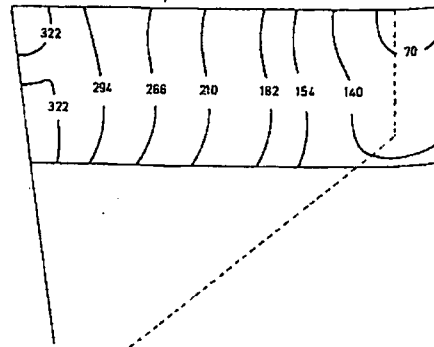
Bahsedilen özelliklerden biride kesici kenardaki yüksek kayma gerilmesidir. 0,4-1mm ilerleme değerleri için hesaplanan bu gerilmeler 600 MPa 1300 MPa arasındadır ve özellikle artan sıcaklık değerleri hesaba katıldığında sinter karbür malzemelerin kayma akış bölgelerindedir. Bu da talaş oluşumunun sünek hata olduğunu iyi bir şekilde açıklamaktadır.

Anlatılan gerilme analiz sonuçları geneldir. Uygulanan diğer durumlar; pozitif ve negatif 5 derece boşluk açılı, yan yüzeyde sıfır gerilmeli, gerilme alanı (yan yüzey hesaplamasında) 0.3 mm' dir. Bütün bu durumlardan aynı sonuçlar elde edilir, kesici yüzey üzerinde lokal maksimumda çeki gerilme değerleri ve kesici kenar yakınındaki maksimum kayma gerilmesi 0.156 mm kaplamalı ve sıfır eğim açılı durum için daha önce belirtilen değerlerin %5' idir. Bu sınırdaki; lokal çeki gerilmesinin maksimum değeri artan boşluk açısı ve artan kaplama genişliği ile artarken yan yüzeydeki yükün artışıyla maksimum kayma gerilmesi azalır.

Şekil 7.47, 7.49 ve 7.52’de gösterilen durumla aynı şekilde elde edilen normal mesh kullanılırken ağ yapısının daraltılarak iyileştirildiği metodun kullanıldığı durumda elde edilen gerilme dağılımlarının iki adet grafiğini göstermekte yara vardır. Bu metot sonradan yapılan bütün çalışmalara uygulanmıştır. Bütün bu yorumlar teknik tabiatta olmasına ve gerilme dağılımlarına bir etkide bulunmamasına rağmen analitik çalışma uygulanmıştır. Bu yöntem gerilme hesaplamasından farklı olarak el gerilme çizgileri bilgisayar tarafından çizilmiştir. Şekil 7.55’te ikinci yöntemle elde edilen minimum gerilme çizgileri kesici kenar yakınındaki bir alanda gösterilmiştir. Şekilde kesikli çizgilerle gösterilen bu alan şekil 7.49(a), 7.50 ve 7.52’de gösterilen alanla tam olarak özdeş değildir. Fakat ana parçaları uyuşmaktadır. Şekil 7.55’te gösterilen alanın analizinde kullanılan ağ yapısı genel olarak kullanılan 0.1 mm aralıklı düğüm noktalı ve 88 üçgen elemanlarla kaplanmıştır. Şekil 7.50 ve Şekil 7.55’i karşılaştırırsak, hesaplanan gerilme dağılımlarında büyük bir benzerlik görülmektedir. Yeni metodun uyguladığı Şekil 7.56 ile Şekil 7.51 karşılaştırılırsa denk oldukları görülmektedir.



Şekil 7.55 Sabit minimum asal gerilme çizgileri (ikinci metot) (Tlusty vd, 1978)



Şekil 7.56 Sabit maksimum kayma gerilmesi çizgileri (ikinci metot) (Tlusty vd, 1978)

Gerilme analizlerini iki boyutlu düzlem gerinim problemine indirgeyerek bu sonuçlar elde edildi. Kesici yüzey üzerinde kesici kenardan 2 mm ila 4 mm uzaklıkta gözlenen gevrek kırılmanın merkezi ile kesişen lokal maksimum çeki gerilmesi belirlendi. Gerilmenin derecesi sinterlenmiş karbürün TRS değeri ile kabaca aynıdır. Kesici kenar yakınında bulunan maksimum kayma gerilmesi değeri sinterlenmiş karbürün kayma akış mukavemeti ile denktir. Yukarıda bahsedilen üç şekilde belirlenen sonuçlarda da (deneysel, fractographic, gerilme analizi) kırılma- gevreklik, talaş oluşumu-süneklik ile açıklanmıştır. Lakin bu sonuçların kesin olduğunu kabul etmede ihtiyatlı davranılmalıdır. Çünkü ısıl olarak indüklenen gerilmeler, sinterlenmiş karbürlerin anizotropisi ve homojen olmaması ve gerilmelerin üç boyutlu doğası gibi bir çok önemli durum ihmal edilmiştir. Mikroskobik inceleme sonucu çeki gerilmeleri kesici kenar üzerinde bulunabilirdi. Adhezyon kuvvetleri çeki gerilmelerini kesici kenar üzerinde oluşturabilirdi. Bununla birlikte burada belirtilen sonuç büyük ölçüde geçerlidir. Metot açısından sonlu elemanlar analizinin uygulanmasında gövde üzerinde küçük bir alanda yoğunlaşmış çeşitli yüklerin etkidiği etkili bir yöntem kullanılmıştır.

Konuyla ilgili bir başka çalışma Ben McClain vd. tarafından 2002 yılında yapılmıştır. Konuyla ilgili bilgiler şöyledir:

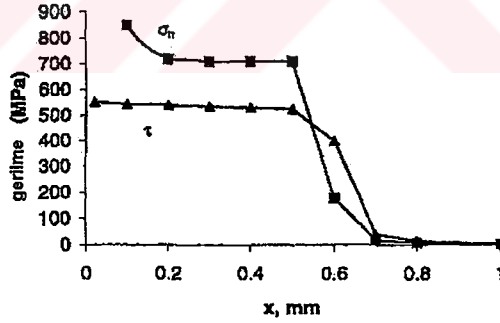
Talaş kaldırma mekaniğini anlamının en önemli noktalarından biri takım kesici yüzeyi üzerinde oluşan normal ve kayma gerilmelerinin modelini geliştirmektir. Bu konudaki ilk çalışmalar deneysel olarak itme ve kesme kuvvetlerinin ölçülmesi, vektörel olarak toplanması ve dairesel kuvvet diyagramı kullanarak onları takım üzerindeki ortalama teğetsel ve normal kuvvetlere ayırarak incelenmesi idi. Takım yüzeyi üzerinde sabit bir sürtünme katsayısı olduğunu kabul edersek teğetsel ve normal kuvvetler sabit, ve ortalama gerilme ile takım-talaş temas alanının çarpımına eşit olacaktır. Bununla birlikte, sabit bir sürtünme katsayısı olduğu kabul edilemez, çünkü gerilmelerin takım yüzeyi üzerinde değiştiği ve teğetsel ve normal gerilme oranının eğim açısı ile büyük ölçüde değiştiği görülmüştür. Zorev takım kesici yüzeyindeki normal gerilmeleri karmaşık güç dağılımı kanunu ile modellemiş, takım ucunda maksimum gerilme olduğunu ve takım-talaş temas boyunun sonuna doğru azalarak sıfır olduğunu bulmuştur (Denklem 7.23).

$$\sigma_c = qx^y \quad (7.23)$$

Burada, x talaşın takımla temasının bittiği nokta, q ve y sabitlerdir. Kayma gerilmelerinin düşük σ_n değerleri için normal gerilmelerle orantılı olduğu, fakat bir kere maksimum değere ulaştığı düşünülmüştür.

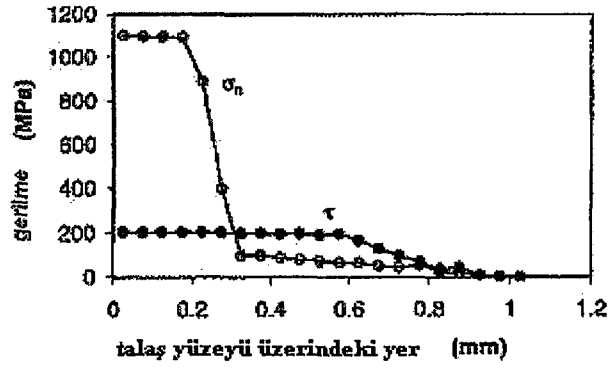
Daha sonra, araştırmacılar gerilme dağılımını belirlemek için kapsamlı deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde ölçüler parçalı takım dinamometreleri ile alınmıştır; takım/talaş ara yüzeyindekiler gerçek gerilme değerinin iç yüzünü kavramada merak uyandırmıştır. Bu çalışmaların sonuçları “plato modeli” ne çok benzeyen kayma gerilme dağılımı sonuçları göstermiştir, fakat normal gerilmeler için çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bir çok çalışmada takım ucu yakınlarında kayma gerilmesi yüksek bulunmuş ve takım ucundan uzak bir noktada bu değerlerin hızla düştüğü görülmüştür. Bu yüksek kayma gerilmesinin takım ucu yakınlarında bulunan, saplanan bölgede olduğu düşünülmektedir. Bu gerilmeyi elde etmek için ilk defa Kato tarafından parçalı takım çalışması yapılmış ve diğerlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Kato normal gerilme dağılımının takım ucunun yakınlarında arttıktan sonra sabit kaldığını ve eğrinin şeklinin ilerleme hızının değişmesinden etkilenmediğini bulmuştur. Daha sonraki çalışmalarda ilerleme hızının normal gerilme dağılımının şekliyle büyük ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Childs ve Mahdi tarafından yapılan ölçümlerde σ_n değerinin takım ucu yakınlarında yüksek bir değerde olduğu, besleme mesafesi boyunca hızla düştüğü görülmüştür. Takım ucu yakınlarında ölçülen kayma gerilmesi biraz artmış ve takım ucundan biraz uzakta hızla düşmüştür. Takım-talaş temas bölgesinin sonlarında kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler aynı seviyeye yaklaşmışlardır. Childs ve Mahdi tarafından yumuşak çelik için ölçülen değerler Şekil 7.57’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.57 Childs tarafından belirlenen kesici yüzey gerilme dağılımları (McClain vd, 2002)

Bu gerilme dağılımı Li tarafından gerçekleştirilen tahmini modele çok benzemektedir. Bir başka parçalı takım deneyleri Buryta tarafından yapılmıştır. Takım ucundaki σ_n yüksek değerinin hızla kayma gerilmesi seviyesine veya daha aşağısına düştüğü doğrulanmıştır. Buryta tarafından C1045 orta karbonlu çelik için ölçülen gerilme dağılımları Şekil 7.58’ de gösterilmiştir.

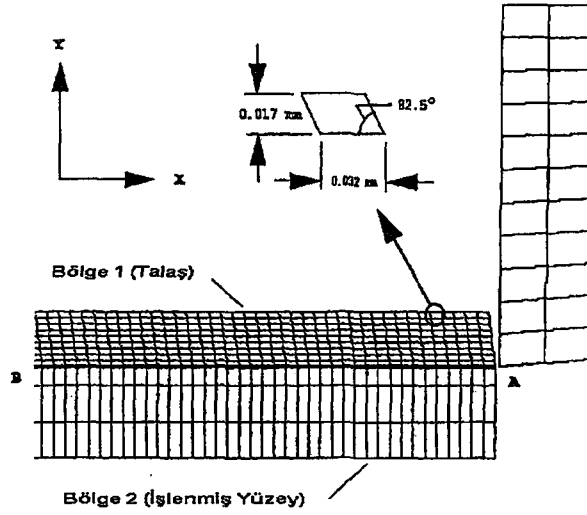


Şekil 7.58 Buryta tarafından belirlenen gerilme dağılımları (McClain vd, 2002)

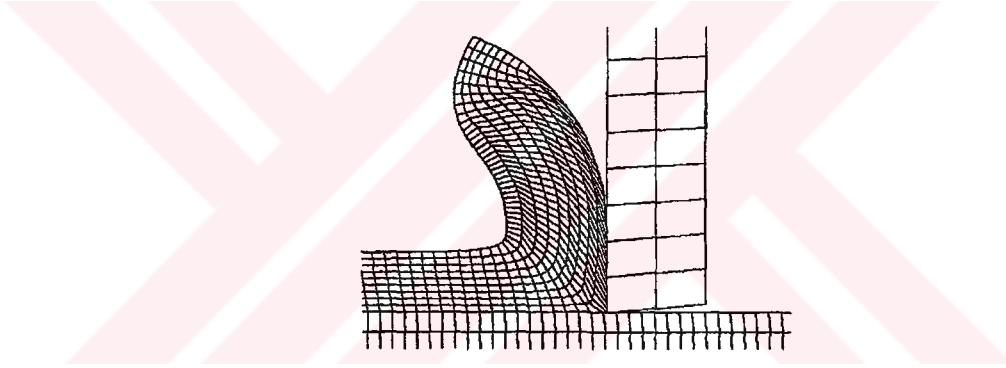
Parçalı takım dinamometresi ile ölçüm zor ve zaman harcıyıcı olduğu için gerilme dağılımını nümerik metotla hesaplamak daha cazip olacaktır. Sonlu elemanlar metodu talaş-takım ara yüzeyindeki malzemenin davranışını anlamamızı sağlayabilecek güçlü bir nümerik yöntemdir ve malzemenin deneyde gösterdiği davranışı yansıtır. Seçilen malzeme modeli yüksek sıcaklıkların, gerinim ve gerinim hızlarının talaş kaldırma süresince oluşan etkilerini belirtmelidir. Ayrıca talaşın iş parçasından ayrılışını simgeleyen elemanların gerçekçi kriterlerini geliştirmek çok önemlidir. Talaş ve takım arasındaki sürtünmenin etkisi de oldukça büyüktür. Bu çalışmada ortogonal kesmede parçalı takım ölçümleri ile belirlenen gerilme dağılımlarının sonlu elemanlar metodu ile analizi anlatılmıştır.

Çalışmadaki ortogonal kesme simülasyonları DYNA 3D programı ile yapılmıştır. DYNA 3D üç boyutlu yapıların karmaşık malzeme davranışlarını modellemek için geliştirilmiş Lagrange formülasyonlarını kullanan kesin, doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar programıdır. Alternatif Euler formülasyonları nesnenin son şekli için çeşitli kabuller gerektirirken, Lagrange formülasyonu bir nesnenin deforme olmuş son şeklini tahmin etmekte kullanılır. Lagrange formülasyonunun en iyi avantajı başlangıçtan denge haline kadar talaş oluşumunu simüle edebilme kabiliyetidir.

Takım ve iş parçasının her ikisi de 8 nodlu elemanlarla modellenmiş, takımın keskin ve rijit olması için kaba mesh kullanılmıştır. Kesme işlemini simüle etmek için iş parçasının altı x ve y doğrultusunda sabitlenmiş ve takım negatif x doğrultusunda sabit bir hıza sahip olarak tanımlanmıştır. Ortogonal kesme koşullarında eleman deformasyonlarını iki boyutta sınırlamak için simetri düzlemleri kullanılmıştır. Şekil 7.59' da da deforme olmamış mesh yapısı gösterilmiştir. Şekil 7.60' ta durağan halde kesme ile deforme olan mesh yapısı gösterilmiştir.



Şekil 7.59 Sonlu elemanlar modeli için deforme olmamış mesh yapısı (McClain vd, 2002)



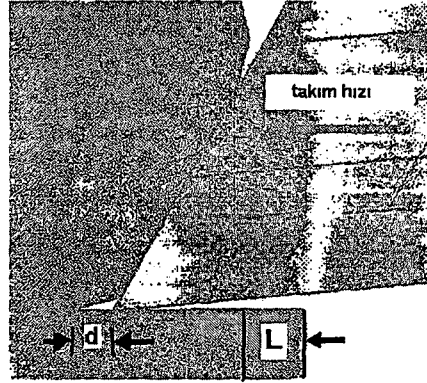
Şekil 7.60 Durağan kesme için deforme olmuş mesh yapısı (McClain vd, 2002)

Şekil 7.59'da, talaşın iş parçasından A-B çizgisi boyunca ayrıldığı kabul edilmiştir. AB çizgisi üzerindeki elemanlar aşağıdaki hata kriterlerine kadar bağlı olarak kalmıştır. DYNA 3D'deki standart hata kriteri,

$$\left(\frac{F_n}{F_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{F_s}{F_{ns}}\right)^2 \geq 1 \quad (7.24)$$

Burada F_n ve F_s tabakaya etki eden toplam normal kuvvet ve toplam kayma kuvvetidir. Normal kuvvet ve kayma kuvveti simülasyon süresince hesaplanmış, normal ve kayma hata gerilmeleri ise kullanıcı tarafından önceden belirlenmiştir. Bu fiziksel kriterlere ilaveten, kullanılan programa Thean ve çalışma arkadaşları tarafından ayrılma kriteri eklenmiştir. 1 ve 2 bölgelerini birleştiren nodlar denklem 7.24'ün sağlanması durumunda veya takım ucu ile birleştiren nodlar arasındaki mesafe belirlenen uzaklık kriterinden kısa ise ayrılacaktır. Uzaklık kriteri nümerik kararsızlığa sebep olmayacak şekilde takım ve talaş arasındaki çatlak

azaltmak için iş parçası elemanlarının %10 una eşit olarak düzenlenmiştir. Şekil 7.61’de çatlak oluşumu ve takım ucundaki eleman ayrılması gösterilmiştir.



Şekil 7.61 Sonlu elemanlar için uzaklık kriteri (McClain vd, 2002)

Çalışmada kullanılan modelde takım ucu önündeki küçük çatlak gelişiminin önlenmesi imkansız olmakla birlikte, bu gerçek hayattaki kesme koşullarını tam olarak ifade etmez. İlk talaş kaldırma modelleri takım ucunda küçük bir çatlak oluştuğunu kabul etse de “ani durdurmalı” kesme deneyleri bu teorinin yanlış olduğunu göstermiştir. Ortogonal talaş kaldırmanın sonlu elemanlarla modellenmesinde talaş ayrılma kriteri için yapılan bu çalışmada Zhang ve Bagchi en iyi sonuçlar uzaklık kriteri eleman uzunluğunun %10 ila %30 u arasındayken elde etmişlerdir. Çalışmada çatlak uzunluğunu azaltmak ve çatlağın simülasyon sonuçları üzerindeki etkilerini minimuma indirmek için %10 kullanılmıştır. Elemanlar bir kere ayrıldığında, iki yüzey arasındaki sürtünme Coulomb’ a benzer olarak sabit sürtünme katsayılı ($\mu=0,1$) modellenir. Yüksek değerler programda nümerik kararsızlıklara sebep olduğu için simülasyonlarda 0,1 değeri seçilmiştir. 0,1 deneylerde ölçülen değerlerden küçük olmakla birlikte bu çalışmanın amaçları için uygun olduğu düşünülmektedir. Artan sürtünme sabiti ölçülen gerilme değerini etkilerken eğri şekillerinin etkilenmeyeceği düşünülmektedir.

Talaş kaldırma simülasyonunun gerçekleştirilmesinde en önemli noktalardan biri, talaş kaldırma süreci boyunca karşılaşılan ekstrem koşullarda malzeme davranışını uygun bir şekilde ifade eden bir model oluşturmaktır. Talaş kaldırmada yüksek sıcaklıklar, gerinimler ve gerinim hızlarının malzeme davranışına çok büyük etkisi vardır. Bu etkilerin sebeplerini açıklamak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Marusich ve Ortiz ısı ve mekanik denklemler için ayrı meshler kullanan basamaklı bir prosedür uygulamışlardır. Bir sonuca ulaşılan kadar ısı oluşumu ve ısı yumuşama bilgileri iki mesh arasında transfer edilmiştir. Diğer

araştırmacılar çoklu meshe ihtiyaç olmadan ısı ve gerinim hızı etkilerinin sebebini açıklamak için oluşumsal denklemleri birleştirmişlerdir.

Çalışmada, iş parçasının mekanik davranışı O1 takım çeliğinin özelliklerini kullanan Johnson-Cook oluşumsal modeli ile modellenmiştir. Bu model çeliğin işlenmesinde çok büyük etkisi olan gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık etkilerini açıklamaktadır. Johnson-Cook modelinde gerilme-gerinim eğrisi aşağıdaki denklemle verilmektedir:

$$\sigma = \left[A + B(\varepsilon^{-p})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{-p}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (7.25)$$

Burada ε^p etkin plastik gerinim, $\dot{\varepsilon}_0$ referans gerinim hızı, T malzeme sıcaklığı, T_m malzemenin erime sıcaklığı, T_r oda sıcaklığı ve A, B, C, n ve m malzemeye bağlı sabitlerdir. Elemanlarda oluşan ısı pratik işin sonucudur. Johnson-Cook oluşumsal modelinde O1 çeliği için yoğunluk, özgül ısı, kayma modülü ve Batzer tarafından deneysel olarak belirlenen sabitler ve malzeme özellikleri Çizelge 7.11' de verilmiştir.

O1 takım çeliğinin 0.0152 cm ilerleme ve 4.06 m/s kesme hızı ile işlenmesinin modellenmesi için Sonlu Elemanlar Metodu kullanılmıştır. Modelin geçerliliğini sağlamak için kesme ve itme kuvvetleri ölçümleri Batzer tarafından yapılan 4.01 mm kesme genişliğindeki deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modellenen kuvveti ile ölçülen değerle arasında %2.5 sapma olduğu, itme kuvvetindeki hatanın ise daha fazla olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma Çizelge 7.12' de özetlenmiştir.

Çizelge 7.11 Modellemede kullanılan parametreler (McClain vd, 2002)

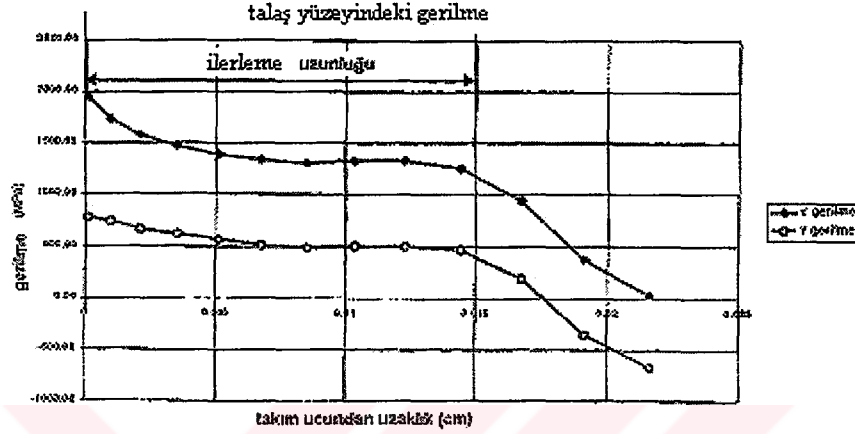
modellemede kullanılan Johnson-Cook parametreleri

P (kg/m ³)	7801
c_p (J/kg K)	477
G (MPa)	83
T_m (K)	1728
A (MPa)	391.3
B (MPa)	723.9
$\dot{\varepsilon}_0$ (s ⁻¹)	65.3
n (-)	0.3067
C (-)	0.1144
m (-)	0.9276

Çizelge 7.12 Takım üzerindeki kuvvetlerin deneysel ve modelleme sonuçları (McClain vd, 2002)

	deneysel	modellenen	% hata
F_C (N)	1326	1293	2.5
F_L (N)	504.8	129	74.4

Sonlu Elemanlar Analizi ile modellenen kesici yüzeyde durağan haldeki kesme Şekil 7.62’de gösterilmiştir. Modelleme sonucu benzer şekillerde kayma gerilmesi ve normal gerilme elde edilmiştir, normal gerilme bütün takım-talaş temas uzunluğunca daha yüksektir. Her iki eğri de takım ucunda artan diğer bölgelerde neredeyse sabit olan gerilme değerleri gösterilmiştir. Her iki eğri de ilerleme uzunluğunun sonunda aniden azalma göstermiştir.



Şekil 7.62 Sonlu elemanlar ile elde edilen gerilme dağılımları (McClain vd, 2002)

Sonlu Elemanlar Metodu ile modellenen gerilme dağılımının şekilleri ve bağıl değerleri parçalı takım dinamometreleri ile deneysel olarak ölçülen değerlerle benzerdir. Şekil 7.57 ile 7.62’ nin karşılaştırması dikkat çeken benzerlikleri açıklamaktadır. Her iki şekildeki σ_n eğrileri takım ucunda artan gerilmeleri, düz bölgeyi ve ilerleme uzunluğu sonunda azalmayı göstermektedir. Kayma gerilmesi eğrileri de benzer şekildedir. Mahdi’ nin ölçümlerinde takım ucunda gerilme artışı yoktur. Normal gerilmeler ve kayma gerilmelerinin bağıl değerleri şekilce benzerdir, fakat modellemede normal gerilme kayma gerilmesinin altına düşmemektedir.

Modellenen dağılımlar Şekil 7.58 incelendiğinde Buryta’ nın çalışması ile de benzerdir. Buryta’ nın modelinde takım ucunda artan gerilmeler yoktur fakat ilerleme uzunluğundaki değerler deneysel olarak belirtilmemiştir. Ayrıca Buryta’ nın ölçümlerinde ilerleme uzunluğunun sonunda normal gerilme, kayma gerilmesi, nin altına düşmektedir, modellemede böyle bir şey söz konusu değildir.

Deneysel sonuçlar ile modelleme sonuçları temel olarak benzerdir, sadece kayma gerilmesi değerinde farklılık göstermektedir. Bu farkın sebebi simülasyonda kullanılan sürtünme modelidir. $\mu = 0.1$ sabit sürtünme katsayısı kullanılmıştır, ki bu değer çoğu talaş kaldırma koşullarındaki değerden düşüktür. Birçok araştırma takım ucu yanında yüksek sürtünmeli

takım ucu dalma bölgesi ve bunu takip eden daha düşük sürtünmeli kayma bölgesi olduğunu göstermiştir. Bu iki bölge arasında dinamik bir bölge vardır. Bu bölgelerin hepsinde de sürtünme katsayısı muhtemelen 0.1' den büyüktür. Bu da modelleme sonucu kesme kuvvetlerinin deneysel sonuçları tam olarak yansıtırken, itme kuvvetlerinin daha düşük çıkmasının sebebini açıklamaktadır. 0^0 boşluk açısı seçildiğinde düşük sürtünme katsayısının kullanılmasının itme kuvveti değerinde büyük etkisi olacaktır, kesme kuvveti ise büyük ölçüde etkilenmeyecektir. Gerilme değeri etkilense de, sonlu elemanlar modelinin gerilme dağılımını tam olarak tahmin edeceği düşünülmektedir.

Önceden tanımlanan ayrılma çizgisi ve keyfi ayrılma kriterinin kullanılması ayrı bir konudur. Eğer deformasyon sürecinde önceden tanımlanmış ayrılma çizgisi kullanılmazsa talaşın iş parçasında ayrılması daha doğru ifade edilecektir. Bu takım ucu civarındaki iş parçası elemanlarının uyarlamalı olarak yeniden mesh edilmesini gerektirebilir ve burada takım ucu çok sivri olmamalıdır. Sonuç olarak, güncel programların kullanılması nümerik tutarsızlıkların ve sınırlı sürtünme modellemesinin önüne geçebilir. Bu da gerilme değerinin daha doğru saptanmasını sağlayabilir.

Çalışmada talaş kaldırma sürecinin Sonlu Elemanlar Modellemesi ile incelenmesinin önemi belirtilmiştir. Doğru bir modelleme talaş yüzeyindeki durumun daha detaylı incelenmesine yardımcı olmaktadır. Küçük boyutlu talaş oluşumunun ve yüksek hız gerektiren proseslerin deneysel olarak gözlenmesi çok zordur. Bu çalışma ile talaş yüzeyi üzerindeki gerilme dağılımlarının Sonlu Elemanlar Analizi ile tam olarak saptanabileceği hakkında cesaret verici sonuçlar elde edilmiştir. Modellenen talaş yüzeyi gerilme dağılımları parçalı takım dinamometresi ile ölçülen sonuçlara benzemektedir. Sonuçlar Buryta, Childs ve Mahdi tarafından elde edilen sonuçlarla uyuşmaktadır.

Zaman problemi ayrılma kriteri kullanılmadan metal deformasyon prosesi şeklinde uygulanmalıdır. Keyfi ayrılma kriterinin kullanılmaması kesme işlemini daha iyi yansıtacaktır. Ayrıca takım ucu çok sivri modellenmemelidir. Bazı geliştirmeler gerekse de, bu modelden değerli sonuçlar elde edilmiş ve gelecekteki araştırmalar için verimli bilgiler sunulmuştur.

Kesici takım üzerindeki normal ve kayma gerilmelerini belirlemek için bir başka çalışma ise 1966 yılında T.C.Hsu tarafından yapılmıştır. Konuyla ilgili bilgiler şöyledir:

Bir metal işlenirken uygulanan kesme kuvvetleri temel olarak takımın talaş ile temasta bulunan yüzeyinin ufak bir alanına etki ederler.

Talaş kaldırma mekaniği için Merchant' ın formüllerinde takım-talaş arasında sürtünme katsayısının sabit olduğu bir kayma teması vardır . Genelde kayan yüzeylerdeki

sürtünme katsayısı, geniş bağıl hız, temas alanı ve normal yük değer aralıkları için sabittir. Buna rağmen, talaş kaldırmada sürtünme sabiti normal yük, temas alanı ve bağıl hız değerlerine göre değişmektedir. Bu değişim açıklamak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Chao ve Trigger' a göre sürtünme katsayısının değişmesinin nedeni temas yüzeyindeki sıcaklık değerinin konvansiyonel sürtünme çalışmalarının dışında tutulmasıydı. Bowden ve Taber tarafından bağıl hız örneğin 3-609.6 mm/dk (0.01-2 ft/dk) alınmıştır ve böyle bir durum izotermal kabul edilebilir, yani düşük sıcaklık ve eşit olarak dağılan ısı olması tartışılmıştır. Bununla birlikte, talaş kaldırmada talaş-takım arasındaki bağıl hız daha yüksektir, böylece izotermal olmayan bir durum, yani yüksek lokal sıcaklık ve geniş sıcaklık gradyanları vardır.

Sürtünme katsayısı değişiminin bir açıklama önermesi ise Finnie ve Shaw tarafından yapılmış, görülen temasın gerçek temas kadar büyük olduğu, çok küçük gerçek temas alanında oluşan, daha yumuşak olan malzemenin bası gerilmesine tekabül eden ve geniş normal yükleri kapsayan bir sürtünme teorisi ileri sürülmüştür. Talaş kaldırmadaki talaş-takım ara yüzeyindeki durumun sürtünme için konvansiyonel testlerde olduğu gibi yüklerin hafif ve gerçek temas alanının çok küçük olduğu iki ekstrem durum arasında olduğu düşünülmüştür.

Takeyama ve Usui değişik temas uzunluklarına sahip takımlar üzerindeki kesme kuvvetlerini ölçmüşler ve sonuç olarak takım kesici yüzeyindeki kayma gerilmesi ve normal gerilmenin takım yüzeyi boyunca sabit olduğunu ve kayma gerilmesinin iş malzemesinin kayma mukavemetine eşit olduğunu bulmuşlardır. Değişik kesme koşullarındaki normal gerilme değişimleri zahiri sürtünme sabitindeki değişmeler için hesaplanmıştır.

Talaş kaldırmada sürtünme katsayısı öyle değişkendir ki, Hahn bunu herhangi bir yararlı amacı olduğu hakkında tereddüt etmiş ve Kronenberg bunun sirkülasyonda tutulmasının zararlı olduğu için tamamen ortadan kaldırılması düşüncesindeydi. Yüzeysel olarak talaş, takım üzerinde kayar gibi gözükür, fakat mikroskobik incelemelerde takım-talaş ara yüzeyindeki durumun sürtünmeli olarak adlandırılmasının zor olduğu belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı "zahiri sürtünme sabiti" ifadesi kullanılacaktır.

Araştırmanın amacı çeşitli pratik kesme koşulları altında takım-talaş ara yüzeyinin tabiatının bulunması ve kantitatif sonuçlarla ifade edilmesidir.

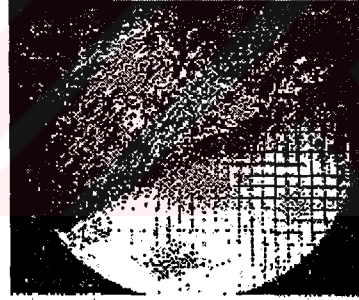
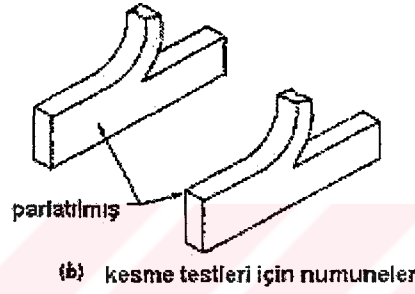
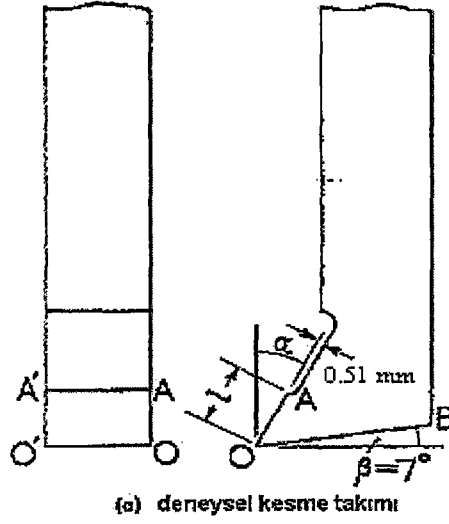
Talaş kaldırma testleri 457.2 mm (18") stroklu, yüksek verimli şekillendirme makinesi ile yapılmıştır. Strok boyunca takım tutucunun değişen hızları makinada çizilen hız diyagramlarından elde edilmiştir. Deneylede 101.6 mm (4") mesafede maksimum hızın sabit ve en kötü ihtimalle %3,5 sapma olduğu görülmüştür. Kesme kuvvetleri takım stroğun bu bölümünde iken ölçülmüştür. Kesme testleri boyunca hızın tam değeri takım tutucu kenarında bulunan ve sinyalleri osiloskopa ileterek ekran üzerinde deplasmanları işaretleyen, birbirinde 38.1 mm (1 1/2") uzaklıktaki reseptörler tarafından ölçülmüştür. Deneylede en ağır kesme koşullarında bile kesme işleminin takım tutucunun hızı üzerinde ölçülebilir etkileri gözlenmemiştir.

İş malzemesi HE-10-WP alüminyum alaşımıydı ve şu bileşenlerden oluşuyordu:

Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Al
%0.1	%0.4-1.5	%0.6	%0.6-1.3	%0.6	%0.1	dengeleyecek kadar

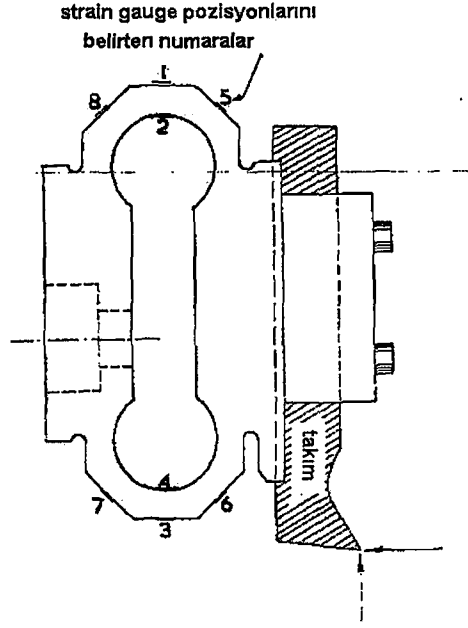
İş parçasından kaldırılan talaşlar 0.35 mm (1/4") genişlikteydi, malzeme masa üzerinde sabitlenmiş ve ortogonal koşullar uygulanmıştır.

Takım olarak, Şekil 7.63 (a)' da gösterildiği gibi taşlanmış yüksek hız çeliği kullanılmıştır . OAA'O' yüzeyi önce 7⁰ toleransla taşlanmış daha sonra 0.51 mm(0.020") oyulmuştur. OB yüzeyi 7⁰ toleransla taşlanmıştır. Kesici kenar yarıçapı OO', numune üzerine baskı uygulanarak ölçülmüştür. Yüzeyleri parlatılmış iki numune preslenmiş (Şekil 7.63 (b)) ve kesme işlemini aniden durduran aparata tutturulmuştur. Numunelerden birinin üzerine birbirinden 0.076 mm (0.003") uzaklıkta mikroskobik çizgiler oyulmuştur. Kesme işlemi durdurulduğunda talaş kökünde takım kenarının şeklinin kopyası çıkmaktadır. Sol alt köşede (Şekil 7.63 (c)) kesici kenar yarıçapı 0.025 mm (0.001") dir. Üzerinde mikroskobik çizgiler olan numune kesme süresince plastik deformasyon incelenmesi içinde kullanılmıştır.



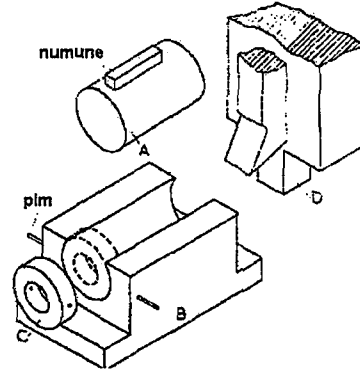
Şekil 7.63 Kullanılan numuneler ve takım geometrisi (Hsu, 1966)

Kesme kuvvet dinamometresi iki rijit plaka ucunda yarım halkalardan oluşmaktadır, çelikten yapılmıştır ve strain gaugeler halkalar üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 7.64). Kullanılan dinamometrede birim yük başına yatay ve dikey sapma 6.23×10^{-7} ve 5.99×10^{-7} idi. En düşük doğal frekans 1500 cps civarında ve tam frekans değeri kullanılan takıma bağımlı idi. Kesme kuvvelerinin yatay ve dikey bileşenleri için strain gaugeler iki ayrı Wheatstone köprüsüne bağlanmıştır.

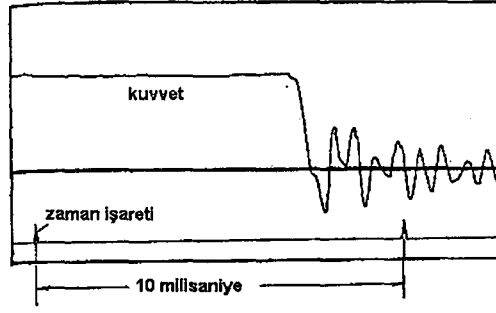


Şekil 7.64 Kesme kuvveti dinamometresi (Hsu, 1966)

Kullanılan bir başka gereç ise kesme işlemini aniden durdurma mekanizmasıdır (Şekil 7.65). Kesme numunesi A' ya tutturulmuş ve A, B içinde kaymaktadır. Kesme işlemi süresince A'nın B içinde kayması pimlerle tutturulan C ile önlenmektedir. C' yi tutan pimlerin kırılma mukavemeti A' yı kesme kuvvetine karşı tutacak kadar seçilmiştir. Takım numuneyi 1" kestikten sonra D dili A' nın ucuna vurur ve pimler kırılır. D ve A arasındaki tepki kuvveti çok küçüktür ve A' nın kütlesi takım tutucuya nazaran küçük seçilmiştir ve kesme işlemi aniden durur. Şekil 7.66' da kesme işlemi durdurulduğu andaki kuvvet azalması osilografda gösterilmiştir. Yavaşlamanın olduğu zaman aralığı yatay çizginin sonundaki kıvrım ile belirtilmiştir. Çizginin sonundaki hat ise dinamometrenin titreşimini belirtmektedir. Şekil 7.66' da gösterilen kesme işlemi 0.5×10^{-4} sn den kısa bir sürede durdurulmuştur.



Şekil 7.65 Ani durdurma aparatı (Hsu, 1966)



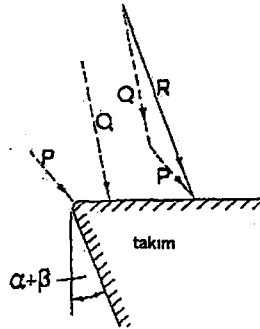
Şekil 7.66 Aniden durdurma işleminin osilografı (Hsu, 1966)

Testteki boşluk açıları ve kesme hızları Çizelge 1' de verilmiştir. Her bir talaş açısı ve kesme hızı kombinasyonu için t_1 kesme derinliği 0.17 mm (0.0067") ile 0.52 mm (0.0204") arasında değişmektedir ve her bir kesme derinliği için temas boyu l (Şekil 7.63' te OA) ölçülmüş ve t_1 ' in 0.75 ile 4 katı arasında değiştiği gözlenmiştir. Takım yüzeyindeki ortalama gerilme hesaplamalarında talaş genişliği numunedeki talaş genişliği ile aynı alınmıştır. Daha sonra genişlikleri mikrometre ile ölçülmüş ve maksimum talaş genişliğinin kabul edilen genişlikten en fazla %3' ü kadar fazla olduğu görülmüştür ve bu sapma ihmal edilmiştir.

Çizelge 7.13 Boşluk açısı, kesme hızı ve itme kuvveti değerleri (Hsu, 1966)

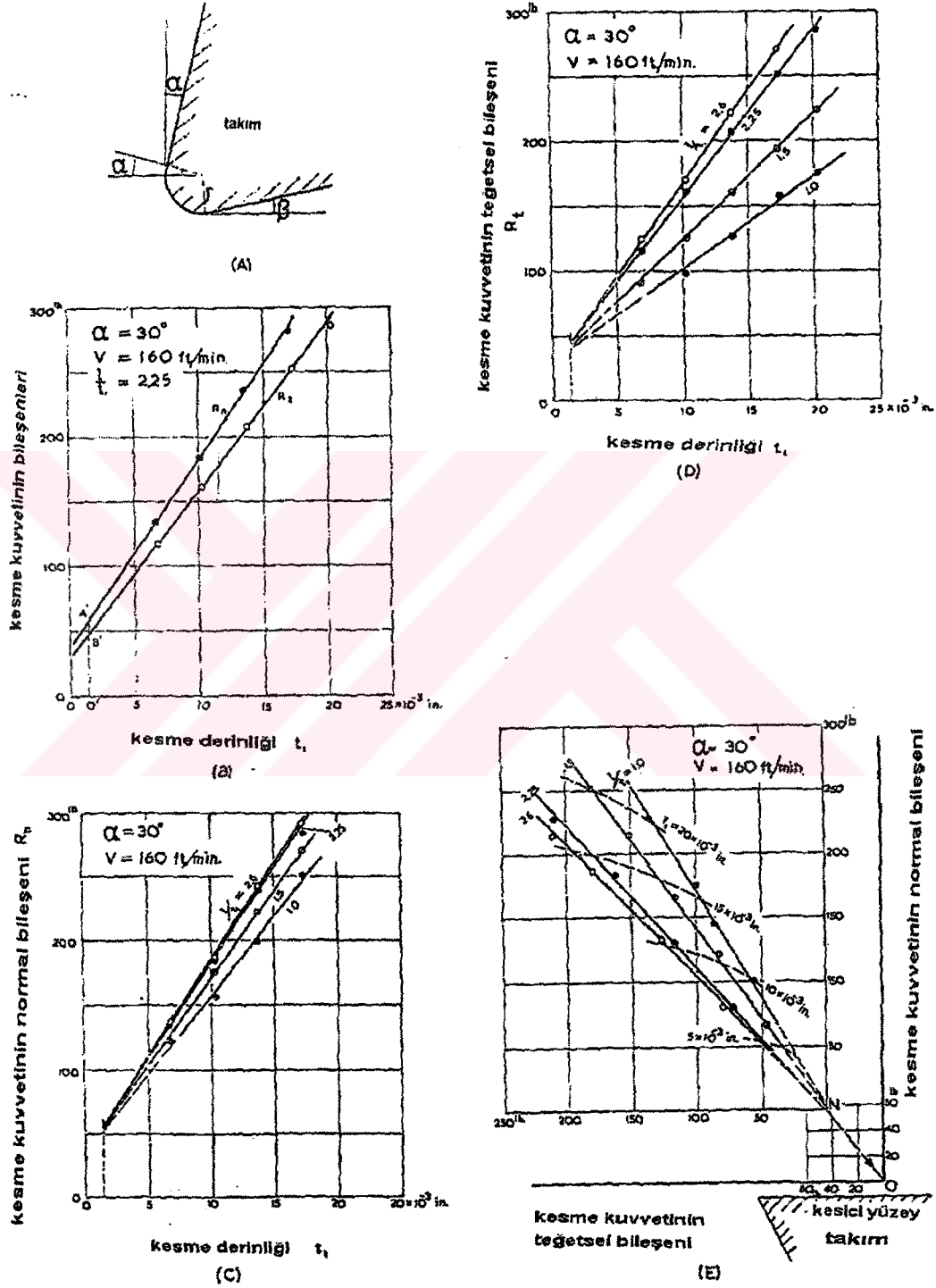
boşluk açısı, α	kesme hızı, v ft/dk	kuvvet	
		P_n , lb	P_t , lb
20 deg	180	25	20
30 deg	105	54	38
30 deg	160	56	43
30 deg	210	44	50

Kesme kuvvetlerinin ölçümü kuvvetler durağan olduktan sonra ve dört veya beş adet ölçüm yapılmıştır. Ölçülen R kesme kuvveti iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlar takımın yuvarlatılmış ucuna etkiyen P kuvveti ve takımın düz yüzeyine etkiyen Q kuvvetidir. R kesme kuvveti kesici yüzeye dik olan R_n ve teğet olan R_t kuvveti olarak da ikiye ayrılabilir (Şekil 7.67).



Şekil 7.67 Kesici takıma etkiyen kuvvetler (Hsu, 1966)

Bir zamanlar takım kenarına etkiyen bir kuvvet olmadığı düşünölmüştü. Eğer bir takım sivri ise sivri yüzeye etkiyen bir kuvvet olmadığı kabul edilebilir. Bununla birlikte kesici takımların kesme işlemi ile uçları yuvarlaklaşır.



Şekil 7.68 Kesme ve itme kuvvetleri (Hsu, 1966)

Şekil 7.68 (B)' de kesme kuvveti ve kesme derinliği arasındaki bağıntı gösterilmiştir. R_n eğrisi birim kesme derinliğine karşılık kesme kuvvetinin normal bileşenindeki artışı, diğer

eğri de teğetsel kuvvetteki artışı göstermektedir. Şekil 7.68 (A)' da yuvarlak kenar tarafından işlenen iş parçasındaki derinliğin $r(1+\sin\alpha)$ olduğu görülmektedir. Burada r kenar yarıçapı ve α boşluk açısıdır. Şekil 7.68 (B)' de O'A' ordinatı R ekseninden $r(1+\sin\alpha)$ kadar uzaklaşmış ve kesme kuvvetini belirten çizgiler O'A' nü, A' ve B' nde kesmek için uzatılmıştır. İşleme kuvvetinin t_1 boyunca sabit kaldığı kabul edilirse, A' B' nü işleme kuvvetinin normal bileşen ve O' B' nü teğet bileşeni olarak kabul edebiliriz. Bu araştırmadaki test koşulları altında bulunan işleme kuvvetleri Tablo 1' de gösterilmiştir, P_n normal kuvvet ve P_t teğetsel kuvvettir. 48.77 m/dk (160 ft/dk) kesme hızı için işleme kuvvetlerinin kullanılan iki boşluk açısında da farklı olduğu görülür. Değişik boşluk açıları için plastik bölgedeki veya kayma bölgesindeki şartlar tamamen farklıdır. Takım kenarı plastik bölge sınırını şekillendirir, böylece yuvarlak uçtaki gerilmeler farklıdır.

Metal kesme araştırmalarındaki zorluklardan biri de kesme koşullarından sadece birinin değiştirilememesidir. Örneğin sıcaklık, boşluk açısı gibi. Sadece değiştirilebilir kesme koşulları vardır. Bunlar boşluk açısı α , t_1 kesme derinliği ve v kesme hızıdır. Boşluk açısının değiştirilmesi talaş kaldırmanın mekaniğini anlamaya yetmez, çünkü sürecin bütün şekli değişmektedir. Aynı şekilde, kesme hızı değiştiğinde gerinim hızı, sıcaklıklar ve bütün kesme koşulları değişmektedir. Bu yüzden başka kesme koşulları da değiştirilmek istenebilir. Temas boyunun değiştirilmesinin de bazı avantajları vardır.

Kesme kuvvetinin iki bileşeni de kesme derinliği ile orantılı olarak artmaktadır.(Şekil 7.68 (B)). Şekil 7.68 (C) ve 7.68 (D)' de gösterildiği gibi temas kuvvetinin kesme derinliğine oranı l/t_1 ile kesme kuvveti arasında lineer bir bağıntı vardır. Ayrıca kesme ne kadar derin ve temas boyu ne kadar uzun olursa olsun talaşlı işleme kuvvetinin sabit kaldığı görülmektedir.

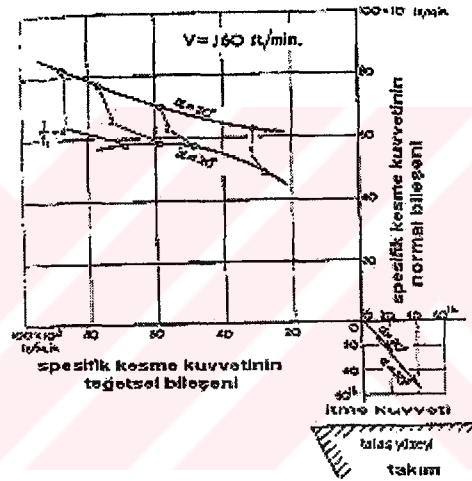
Şekil 7.53 (E)' de temas boyu oranı l/t_1 ' in dört değeri için kesme kuvvetinin normal bileşenine karşı teğetsel bileşeni çizilmiştir. Bu diyagramda, herhangi bir noktadan O orijin noktasına birleştirilen vektör kesme kuvvetini belirtmektedir ve takımın bağlı pozisyonu gösterilmiştir. Eğer her bir eğri $t_1=r(1+\sin\alpha)$ kadar uzatılırsa, burada 0.015" tir, bütün eğriler N noktasında birleşir. NO doğrusu burada işleme kuvvetini göstermektedir. Eksenler O noktasından N noktasına taşındığında yeni eksenlerdeki koordinatlar kesici yüzeydeki kuvvetin bileşenlerini göstermektedir. Herhangi bir noktadan N' ye çizilen bir çizgi talaş yüzeyindeki kuvveti belirtir ve eğimi zahiri sürtünme katsayısının tersidir. Zahiri sürtünme katsayısının kesme derinliği ile sabit, fakat temas uzunluğu ile değiştiği görülmektedir. Eğer talaş ve takım arasında Coulomb sürtünmesi olsaydı bütün çizgiler N doğrultusunda tek bir çizgi olur ve sürtünme katsayısı sabit olurdu. Bundan dolayı talaş-takım ara yüzeyinde oluşan

şeye tam olarak sürtünme diyemeyiz.

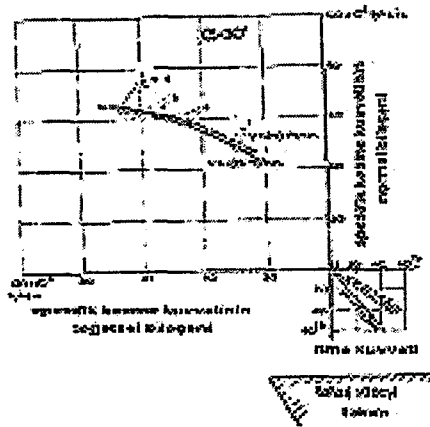
Şekil 7.68 (E)' ye göre kesme kuvveti için vektörel denklemi şöyle yazabiliriz:

$$\vec{R} = \vec{P} + (bt_1)\vec{q} \quad (7.26)$$

Burada (bt_1) kesilen malzemenin kesit alanı (skaler bir büyüklük), \vec{q} spesifik kesme kuvveti (lb/in^2) dir ve vektördür. Denklem 7.26, Şekil 7.69' daki gibi çizilebilir. $\alpha=20^\circ$ ve $\alpha=30^\circ$ eğrileri l/t_1 ile değişen spesifik kesme kuvvetlerini belirten vektörlerin konumlarıdır ve bunlara karşılık gelen işleme kuvvetleri diyagramının sağ alt köşesinde gösterilmiştir. Örneğin $\alpha=20^\circ$ ve $l/t_1=2$ alırsak spesifik kesme kuvvetinin normal bileşeni $70.0 \times 10^3 \text{ lb/in}^2$, teğetsel bileşeni $58.3 \times 10^3 \text{ lb/in}^2$ olur. Şekil 7.69' da spesifik kesme kuvvetinin boşluk açısıyla, Şekil 7.70' de ise kesme hızıyla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 7.69 Kesme kuvvetinin boşluk açısına göre dağılımı (Hsu, 1966)

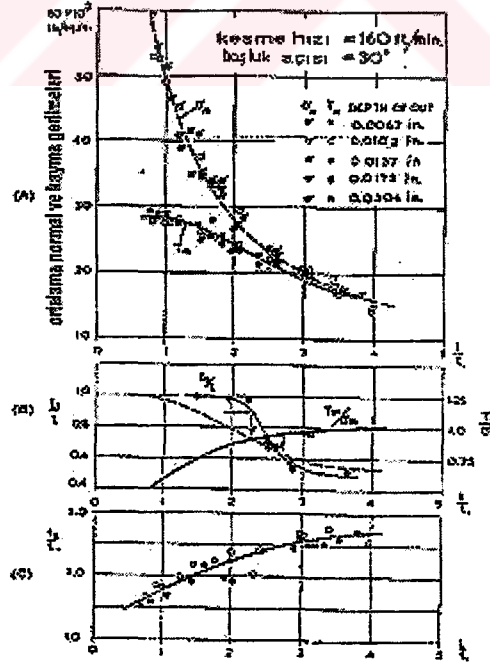


Şekil 7.70 Kesme kuvvetinin kesme hızına göre dağılımı (Hsu, 1966)

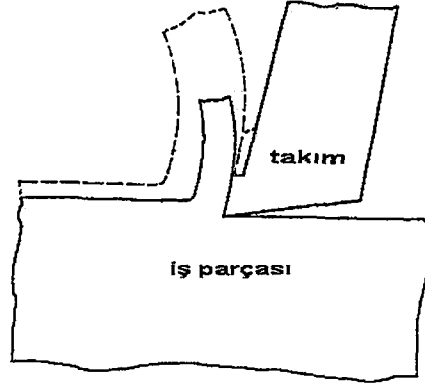
edilmiştir ve bu ortalama gerilmelerinin kesme derinliğinden bağımsız, fakat l/t_1 oranının bir fonksiyonu oldukları netleşmiştir. l/t_1 oranı boyutsuz temas uzunluğu olarak adlandırılabilir. t_2 yi talaş kalınlığı olarak alırsak ve aynı testlerdeki t_2/t_1 oranını boyutsuz temas uzunluğuna karşı işaretlenirse (Şekil 7.72 (C)) bütün noktalar tek bir doğru üzerine düşmektedir. t_2/t_1 oranı boyutsuz talaş kalınlığı olarak adlandırılabilir. Şekil 7.72 (C)' de bütün noktaların aynı eğri üzerinde olmasının nedeni aynı l/t_1 değerindeki kesme süreçleri geometrik olarak benzerdir. Şekil 7.73' te iki adet benzer kesme süreçleri, biri kesikli çizgi ile diğeri düz çizgi ile gösterilmiştir ve l/t_1 oranı 3 tür. Şekil 7.72 (A)' ya değinirsek, geometrik olarak benzer kesme süreçlerinde ortalama normal gerilmeler kayma gerilmeleri gibi aynıdır.

τ_m/σ_m zahiri sürtünme katsayıları değişimi Şekil 7.72 (B)' de gösterilmiştir. Ortalama normal gerilmenin 1 den 4 e kadar değişen değerlerinde zahiri sürtünme katsayısı 0.56 ile 1.03 arasında değişmektedir.

Ortalama kayma gerilmesine karşılık ortalama normal gerilmeler işaretlenirse (Şekil 7.74) kesme testlerini belirten noktaların hepsi bir tek eğri üzerine düşmektedir. Eğrinin herhangi bir noktasından orijine çizilen çizginin eğimi zahiri sürtünme katsayısına eşittir. Şekilde orijine çizilen kesikli çizgi sürtünme katsayısının 1.2 olduğunu belirtmek için çizilmiştir ve bu değer saf alüminyum içindir. Testlerde zahiri sürtünme katsayısının bu değere ulaşmadığı görülmektedir.

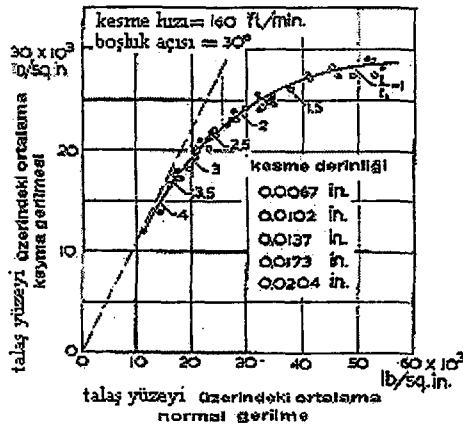


Şekil 7.72 Ortalama gerilme, dalma bölgesi ve talaş kalınlığı dağılımı (Hsu, 1966)

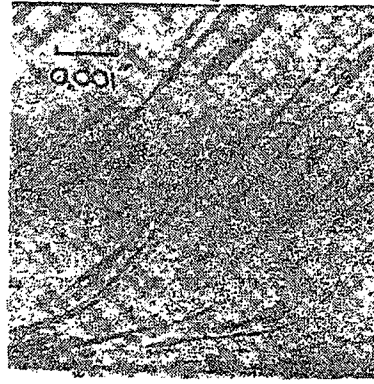


Şekil 7.73 Geometrik benzer kesme işlemleri (Hsu, 1966)

Şekil 7.72 ve 7.74' te gösterilen zahiri sürtünme katsayıları talaşın bütün temas alanı boyunca takım üzerinde kaymadığını göstermektedir. Talaş ya erimiş ince metal bir film tabakası üzerinde hareket etmektedir, ya da takım kesici yüzeyine soğuk kaynama yapmıştır. Yüksek hızlı kesmede talaş ve takımı ayıran ince metal bir film tabakası olduğuna inanmak için bazı sebepler vardır. Yapılan testlerde talaş, temas alanı bölgesinde takıma sıvanmaktadır ve takım üzerinde hareket ettiğinde talaş-takım ara yüzeyi civarındaki talaş kesilmektedir. Başka bir deyişle, talaş ve takım arasındaki bağ, talaş malzemesini kesmek için gerekli kuvvetten büyüktür. Takım yanındaki talaş malzemesindeki plastik deformasyon talaş kesiti mikrofotografında gösterilmiştir. Talaş, akış doğrultusunda ve takım yüzeyine diktir (Şekil 7.60). Malzeme %0.16 karbon çeliğidir ve ortogonal kesme koşullarında 10° boşluk açılı karbür takım ile 245 ft/dk hızda kuru olarak kesilmiştir. 0.002" derinlikteki bölgelere kadar bazı kayma deformasyonları olmaktadır.



Şekil 7.74 Kesici takım üzerindeki ortalama normal ve kayma gerilmeleri (Hsu, 1966)

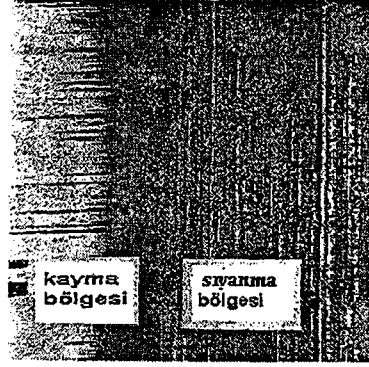


Şekil 7.75 Talaş yüzeyinin mikrofotografı (Hsu, 1966)

Ara yüzeyde oluşan fiziksel şartlar ile talaş takım üzerine saplanır gibi olmaktadır. Takım kenarındaki ortalama normal gerilme, normal gerilmelerinin sabit ve kayma gerilmesinin küçük olduğu kabul edilerek tahmin edilebilir. Bu durumda işleme kuvvetinin normal bileşeni 50 lb. ve izdüşüm alanı $br(1+\sin\alpha)$ dır. b numune genişliğidir ve değeri 3.75×10^{-4} in² dir. Kesme kenarındaki ortalama normal gerilme 150×10^3 lb/in² kesici kenar yanındaki talaş yüzeyinde de normal gerilme aynıdır. Bu basınç altında takım ile temas eden talaşın yüzeyi kesme işlemi ile yeni oluşturulmuştur ve oksidasyondan arınmıştır. Kesme işleminin başlangıcında, talaş yüzeyi talaşın takım üzerine sıvanmasını önleyecek oksit veya diğer filmlerle kirlenmiş olabilir, fakat yaklaşık 100 000 lb/in² basınç altındaki birkaç silme işleminden sonra takım yüzeyi çok temiz olmaktadır.

Talaşın takım üzerine gerçekten sıvandığını göstermek için önceden tarif edilen ani durdurma aparatı (Şekil 7.75) kullanılmıştır. Takım numunenin yaklaşık yarısını işlemişken kesme işlemi durur ve daha sonra talaş temizlenerek takım kenarındaki yüzey incelenir. Şekil 7.76' da böyle bir yüzeyin mikrofotografı gösterilmiştir. Fotoğrafın sağ tarafında kesme kenarı görülebilir ve bu kenarın yanında takım üzerindeki çizgi işaretlerinin talaş yüzeyine izi çıkmıştır. Fotoğrafın sol tarafında ise tanıdık bir parlak yüzey görünümü vardır. Takım yüzeyindeki normal gerilmenin kesici kenara doğru arttığına inanmak için çeşitli nedenler vardır ve bunun yüksek normal basınçlar için daha geniş zahiri temas alanı olduğu, talaş ve takım yüzeylerinin birbirine tamamen değdiği düşünülmektedir. Gerçek temas alanındaki böyle bir artma talaş yüzeyindeki kayma ve sıvanma bölgelerinde kesin bir sınır çizgisi olmadığı izlenimini uyandırmaktadır. Aslında Şekil 7.76' da gösterildiği gibi iki bölge de herhangi bir noktada iyi tanımlanmış bir sınıra sahiptir. Kullanılan iş malzemesi düşük kesme hızlarında yığılma ağız oluşturmayacak şekilde ve talaşta ihmal edilebilir kenar akışı olmasına göre seçilmektedir. Bütün bu testlerde talaş yüzeyi ve işlenmiş yüzey incelenmiş ve yığılma ağız kalıntısına rastlanmamıştır. Sıvanma bölgesi sabit yığılma ağızın alt yüzeyi değildir.

Sıvanma bölgesindeki takım yüzeyi incelenmiş ve üzerine küçük alüminyum parçalarının yapıştığı görülmüştür.

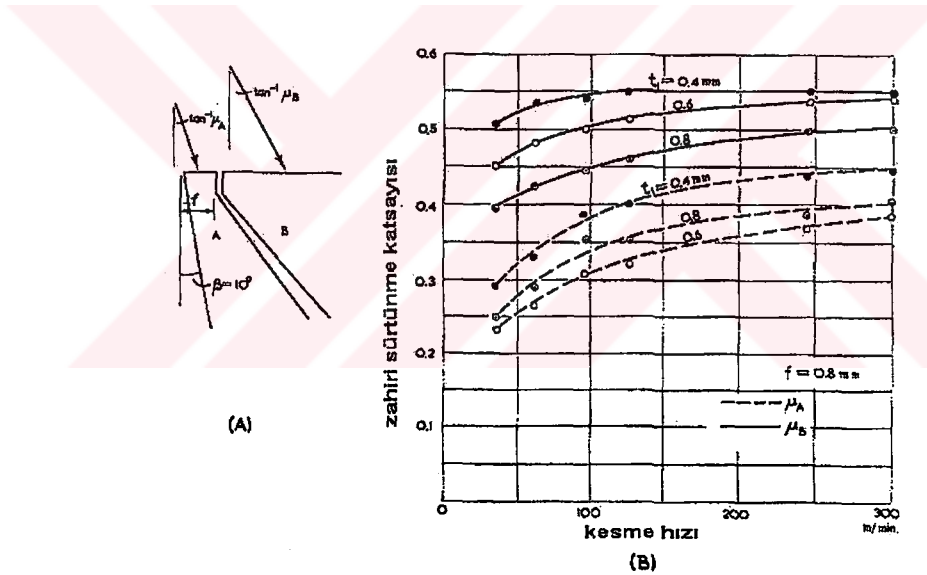


Şekil 7.76 Temas alanının kayma ve sıvanma bölgeleri (Hsu, 1966)

Sıvanma bölgesinin uzunluğu talaş yüzeyi üzerinden, toplam temas alanı takım üzerinden bir mikroskopla ölçülebilir. Sıvanma bölgesinin uzunluğunun (l_s), toplam temas yüzeyi uzunluğuna (l) oranı boyutsuz temas uzunluğuyla değişmektedir. (Şekil 7.72 (B)) l/l_s ' in belirli bir değeri için, burada 1.9, talaş takıma tamamen sıvanır, l/l_s ' in belirli bir değerinin üstünde, burada 3.3, sıvanma bölgesi temas alanının sabit bir minimum değerini kaplar, bu değerler arasında sıvanma bölgesinin büyüklüğü değişir. Şekil 7.72 (B)' deki iki düz çizginin karşılaştırılması ile zahiri sürtünme katsayısının, neden kayma sürtünmesi olan 1.2 değerine asla ulaşmadığı görülebilir. Bunun nedeni talaşın bir kısmının her zaman takıma sıvanmasıdır. Temas uzunluğu bağıl olarak küçük olduğunda, talaş bütün temas alanı boyunca sıvanır. Böyle bir adhezyon koşulu altında ortalama kayma gerilmesi değişir (Şekil 7.72 (A)). Adhezyonun kayma gerilmesini sabit ve iş malzemesinin kayma mukavemetine eşit tuttuğu izlenimi elde edilmiştir. 1958 yılında talaş malzemesinin kayma mukavemetinin plastisite kanunlarına göre normal yük ile değiştiği gösterilmişti. Bundan dolayı tam bir adhezyon koşulu altında ortalama kayma gerilmesi de sabit kalmaktadır. Aslında, sıvanma bölgesindeki koşullar sıcaklık, gerinim hızı ve takım yüzeyindeki normal ve teğetsel bası gerilmeleri, kayma mukavemetini etkilemektedir.

Diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlara göre zahiri sürtünme katsayısının değişmesinin nedeni talaşın takıma sıvanmasıdır. Örneğin Loladze kesici kenara yapışan talaşların fotoğrafını çekmiş ve düşük kesme hızında (0.5m/dk) talaşın takıma sadece küçük alanlarda temas ettiğini, talaş-takım ara yüzeyinin temel olarak mikroskobik boşluklardan oluştuğunu, fakat yüksek kesme hızlarında (166m/dk ve üstü) boşlukların kaybolduğunu ve iş parçasının (%0.4 karbonlu çelik) takım (tungsten karbür) üzerine elektrolitik olarak kaplanmış gibi tamamen kaynadığını göstermiştir. Loladze, Trent' in 1952 de bulduğu gibi tungsten karbürün

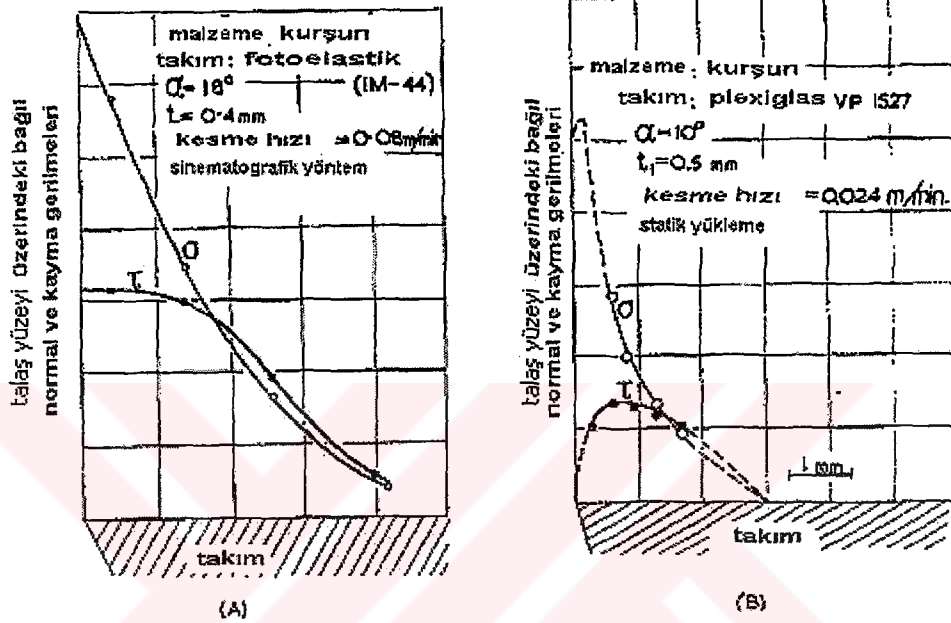
tamamen birleşerek çelik içinde difüze olduğunu göstermiştir. Komskov ise temas alanının iki değişik bölgesindeki zahiri sürtünme katsayısını ölçmek için Şekil 7.77 (A)' da şematik olarak gösterilen bir kompozit takım kullanılmıştır. A parçasının kesici yüzeyi en küçük 0.4mm (0.016") idi ve takımın iki parçasındaki kuvvet birbirinden bağımsız olarak iki ayrı ölçme düzeneğinde ölçülüyordu. Grafiklerde (Şekil 7.77 (B)) yüksek kesme hızları ve düşük kesme derinliklerinde A bölümünde (0.8mm genişlikte) zahiri sürtünme katsayısı her zaman değişmektedir, B parçasında ise sabit kalmaktadır. A parçasının talaş yüzeyi çoğunlukla sıvanma bölgesidir ve kayma gerilmesinin normal gerilmeyle ilgisi yoktur. Diğer taraftan B parçasının kesici yüzeyi çoğunlukla kayma bölgesidir ve küçük kesme hızlarında tümüyle kayma bölgesi olmaktadır, böylece sürtünme katsayısı sabit kalmaktadır. 100m/dk nın altındaki hızlarda talaş daha kalın hale gelmekte, saplanma bölgesi uzamakta, böylece B parçasında da A parçasındaki kadar sıvanma olmakta ve zahiri sürtünme katsayısı μ_s azalmaktadır.



Şekil 7.77 Temas alanının iki bölgesinde zahiri sürtünme katsayısı (Hsu, 1966)

Daha önce de belirtildiği gibi, temas alanının sıvanma ve kayma bölgesi olarak ikiye ayrıldığı, böylece ortalama normal ve kayma gerilmelerinin sadece boyutsuz temas uzunluğuna bağlı olduğu gözlenmiştir. Temas alanında normal ve kayma gerilmelerinin nasıl değiştiğine dair doğrudan bir bilgi yoktur. Bu değişimin deneysel olarak gözlenmesi zordur, bu nedenle, verilen bilgilerin bu değişimi tamamen tanımlanması için yeterli olmadığı görülmektedir. Şimdiye kadar bilinmeyen dağılım, talaş kaldırma işleminin mekaniği, sıcaklık dağılımı ve takım kaplaması ile ilişkilendirilmiştir. Bunun için direkt deneysel bilgi elde edilmeden önce

uzunluğunun temas uzunluğuna oranı l/t Şekil 7.78' de gösterildiği gibi σ_1 ve σ_2 için farklı olmalıdır. Şekil 7.72 (B)' de bu oranın bütün geometrik benzer prosesler için sabit olduğu gösterildiği gibi, 2 prosesi için gerilme dağılımı σ_2 olamaz, σ_1 olur. Sonuç olarak geometrik benzer proseslerde normal gerilmeler aynıdır.



Şekil 7.79 Talaş yüzeyindeki gerilmelerin fotoelastik sonuçları (Hsu, 1966)

Gerilme dağılımının gerçek şekli için Andreev ve Kattwinkel tarafından yapılan fotoelastik çalışmalar sonucu elde edilen eğrilere bakılabilir (Şekil 7.79). Henricksen' in teorik gerilme analizlerinde ve Usui ve Takeyama' nın fotoelastik çalışmalarında da aynı genel dağılım gösterilmektedir. Andreev' in normal gerilme eğrisi, yaklaşık olarak şöyle bir güç fonksiyonu ile ifade edilebilir:

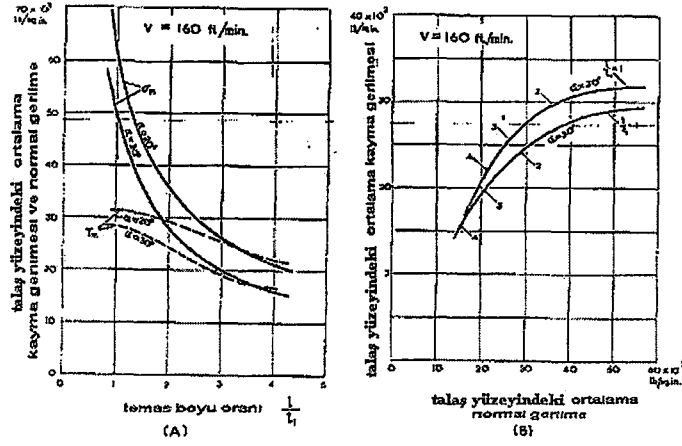
$$\sigma = \sigma_G x^m \quad (7.28)$$

Çalışmada σ_m sabit ve m , l/t ' nin bir fonksiyonudur.

Ortalama normal gerilme dağılımını Şekil 7.72 (A)' daki gibi yeniden düzenlemek mümkündür. Ortalama normal gerilme eğrisi şöyle ifade edilebilir:

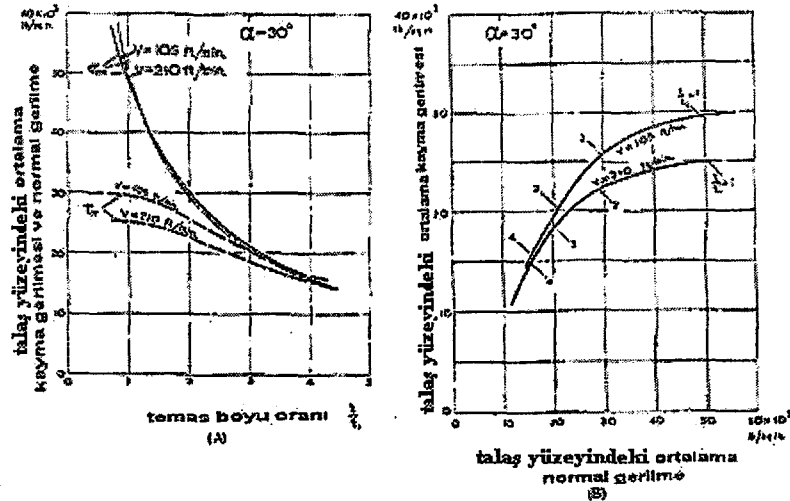
$$\sigma_m = \frac{49.2 \times 10^3}{\left(\frac{l}{t_1}\right)^{0.818}} \quad (7.29)$$

ft/dk) kesme hızında kesici yüzeydeki normal ve kayma gerilmeleri verilmiştir. Beklendiği gibi küçük talaş açılarında ortalama gerilmeler daha yüksektir. Bununla birlikte, ortalama normal ve kayma gerilmeleri arasındaki ilişki iki durumda da benzerdir (Şekil 7.81 B).



Şekil 7.81 Değişik boşluk açılarında talaş yüzeyindeki ortalama gerilmeler (Hsu, 1966)

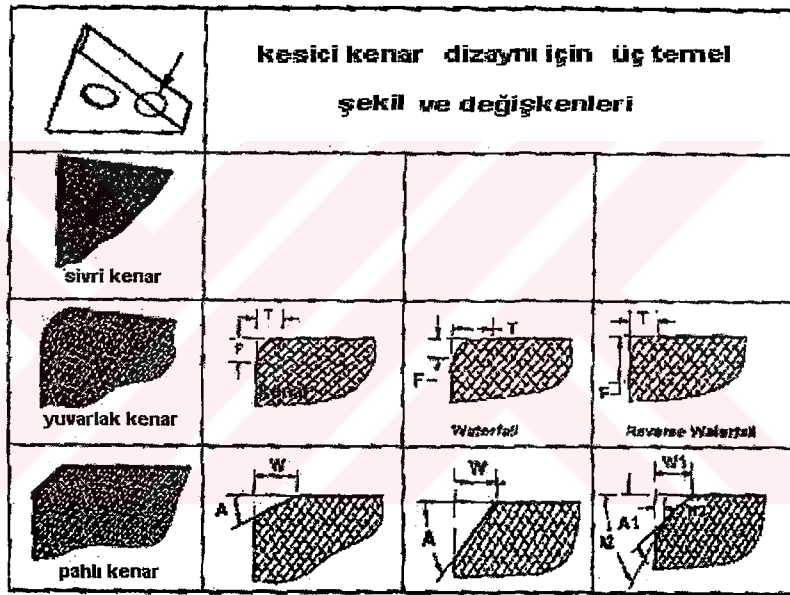
Şekil 7.82' de gösterilen kesme hızı değerinde plastik bölgedeki gerinim hızları ve sıcaklıkların, buradaki gerilme koşullarına etkisini yeterli olacak miktarda değişmediği için kesme hızının ortalama normal gerilme üzerindeki etkisi küçüktür (Şekil 7.82 (A)). Bundan dolayı talaş orada dirsek gibidir ve sonunda sınır vardır. Ara yüzeydeki yüksek sıcaklık kaymaya karşı direnci azalttığı için ortalama kayma gerilmesi yüksek kesme hızlarında düşüktür. Değişik hızlarda ortalama normal ve kayma gerilmeleri arasındaki bağıntı Şekil 7.82 (B)' de gösterilmiştir.



Şekil 7.82 Değişik kesme hızlarında talaş yüzeyindeki ortalama gerilmeler (Hsu, 1966)

Ortogonal talaş kaldırma işlemi sonlu elemanlar yöntemi ile Yung-Chang Yen vd. tarafından 2004 yılında incelenmiş ve değişik kesici kenarların etkisi belirlenmiştir. Bu araştırmada elde edilen bilgiler ise şöyledir:

Talaş kaldırma işleminde takım kesici kenar geometrisinin değiştirilmesi kenar hazırlanması olarak anılmaktadır. Şekil 7.83' te kenar hazırlamada kullanılan üç temel dizayn şekli gösterilmiştir. Bunlar keskin dik kenar, yuvarlatılmış kenar ve pahlı kenardır. Yuvarlatılmış pahlı bir yüzey de kullanılabilir. Kenar hazırlamanın amacı kesici kenarın mukavemetini arttırmak ve kaplamanın çökmesi için bir yüzey hazırlamaktır. Ayrıca yuvarlatılmış uçlar kaplamada çentik başlangıcını azaltabilir ve genellikle finiş işlemlerinde kullanılırlar. Pahlı kenarlar ise kaba ve aralıklı işlemede kullanılmaktadır.



Şekil 7.83 Kesici takım hazırlama dizaynları (Yen vd, 2004)

Takım kenar geometrisinin dizaynı deformasyon bölgesinin şekli, takım yüzeyindeki gerilme ve sıcaklık dağılımları ve kesme kuvvetleri gibi süreç parametrelerini etkilemektedir. Bu etkiler de sonuç olarak talaş akışını, işlenen yüzeyin düzgünlüğünü, takım kaplamasının direncini ve takım ömrünü etkilemektedir. Bu çalışmada kesme süreci takım kenar hazırlanması göz önüne alınarak sonlu elemanlar simülasyonu kullanılarak incelenmiştir ve takım kenar dizaynının optimizasyonu için önemli olan süreç değişkenleri ve mekaniğinin temel olarak anlaşılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın genel olarak amacı sonlu elemanlar simülasyonu kullanarak takım kenar geometrisinin kesme sürecinin fiziğine etkilerini; talaş oluşumu, kesme kuvvetleri ve süreç değişkenleri (sıcaklık, gerilme ve gerinim) cinsinden belirlemektir. Özel amaçlar ise:

i) Yuvarlak uçlu takımlarda uç yarıçapının talaş şekli, kesme kuvvetleri ve sıcaklığı üzerine etkilerini belirlemek ve deneysel verilerle karşılaştırmaktır.

ii) Pahlı takımlarda pah açısı ve pah genişliğinin talaş şekli, kesme kuvvetleri, sıcaklık ve temas yüzeyindeki gerilmelere etkisini analiz etmektir.

Bu çalışmada geniş plastik deformasyon analizi için, geliştirilmiş Lagrange formülasyonu kullanan DEFORM-2D paket programı kullanılmıştır. Talaş akışı plastik akma olarak simüle edilmiş ve talaşın iş parçasından ayrılması devamlı yeniden meşleme ile sağlanmıştır. Deneysel sonuçlarda en azından makroskopik boyutta takım ucunda çatlak oluşmadığı görülmüştür. Her yeniden meşleme aşamasında iş parçasının süreç durum değişkenleri için çözümlerde eski meş ile yeni deforme olmamış meş arasında interpolasyon yapılmıştır.

Durağan halde talaş akış geometrisi elde etmek için, Aachen Üniversitesindeki WZL tarafından geliştirilen ve “Konti-Cut” adı verilen modül, izotropik gerilme sertleştirilmesi ile bir çift termo viskoplastik kesme simülasyonu kullanılmıştır. Bu simülasyon modülü tipik Lagrange kesme simülasyonlarında görüldüğü gibi birkaç milisaniyeden ziyade yeterince uzun kesme süresi için kesme simülasyonunun çalışmasını sağlamaktadır. Konti-Cut prensibi kısaca şöyledir: her zaman yeniden meşleme basamağı başlar. “konti-cut” prosedürü fazla talaş malzemesini kesme bölgesinden ve kesme kenarının arkasındaki işlenmiş iş parçası malzemesini kullanıcı tarafından belirlenen sabit kontrol bölgesinden uzaklaştırır. Bununla birlikte, iş parçasının işlenmemiş tarafından yeni malzeme tedarik edilir. Bu prosedür tekrarlanarak kesme simülasyonu devamlı ve kesme süresi sınırlaması olmadan virtüel olarak devam eder.

Konti-cut simülasyonu aşağıdaki avantajları sağlar:

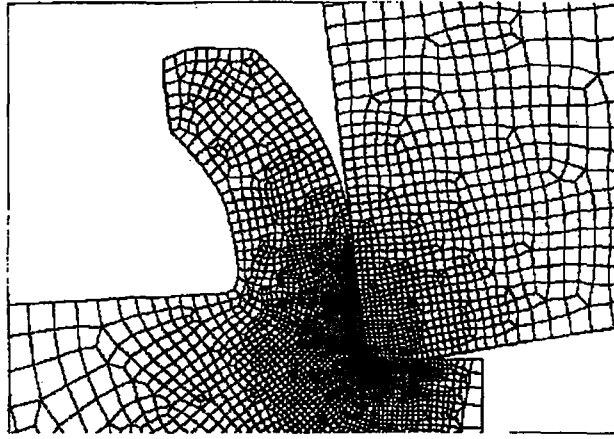
i) Uzun talaşın kıvrılarak işlenmemiş yüzeye dokunmasını ve olası yaklaşma ve temas problemlerini önler.

ii) Talaş akışı ve durum değişkenlerinin (iş parçası sıcaklığı ve takım-talaş ara yüzey sıcaklığı) yaklaşık durağan hal çözümleri elde edilebilir.

iii) İyileştirilmiş meş kalitesinin daha iyi kontrolü sağlanır ve daha az eleman gereklidir.

Şekil 7.84’ te konti-cut ile elde edilen tipik bir talaş oluşum sonucu gösterilmektedir. Talaş akış şekli 1 ms sonra fark edilir derecede değişmemiştir, yani talaş kalınlığı, kayma açısı ve talaş kıvrım yarı çapı sabit kalmıştır. Şekil 7.84’ te görüldüğü gibi, kesici kenarın arkasındaki

iş parçası malzemesi ve talaşın ucundaki talaş malzemesi kontrol bölgesini terk ettikten sonra uzaklaştırılmıştır.



Şekil 7.84 Konti-cut ile elde edilen talaş oluşumu (Yen vd, 2004)

“Konti-cut” simülasyonu süresince takım yüzeyindeki nodlardaki talaş-takım ara yüzey sıcaklık değerleri değişiklik göstermeyecek hale gelinceye kadar işlendi. Daha sonra takım sıcaklık alanının durağan hal çözümü takımın ısı transfer analizi ile birleştirilerek yaklaşımda bulunulmuş ve konti-cut ile elde edilen sabit sıcaklık değerleri ile takım temas yüzeyi üzerinde tanımlandı.

Takım ve iş parçası malzemelerinin mekanik ve ısıl özellikleri Çizelge 7.14’ te de gösterilmiştir. Takım malzemesi kaplanmış sinterlenmiş karbür, iş parçası malzemesi ise %0.2 alaşımsız karbonlu çeliktir. %0.18 karbonlu çelik için akma gerilmesi, gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Usui tarafından yüksek hızlı basma testleri ile elde edilmiştir. Bu çalışmada bu bilgilerden yararlanılmıştır. Bu bilgi belirli bir gerinme, gerinim hızı ve sıcaklık limitlerinde, aşağıda gösterildiği gibi elde edilmiştir:

$$\bar{\sigma} = A_0(T, \dot{\varepsilon}) \left(\frac{1}{1000} \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} \right)^{0.0195} \bar{\varepsilon}^{0.21} \quad (7.32)$$

Burada,

$$A_0(T, \dot{\varepsilon}) = 1394 \exp(-0.00118T) + 339 \exp[-0.0000184 * \left[T - (943 + 23.5 \ln \frac{1}{1000} \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon}) \right]^2]$$

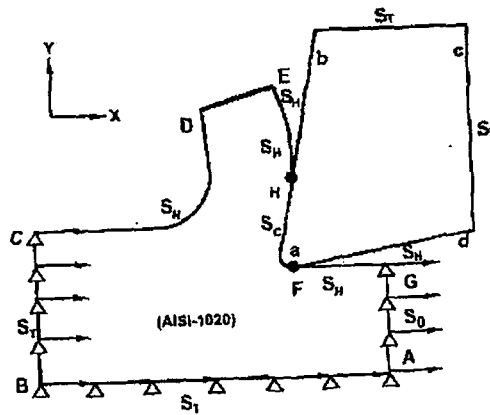
Çizelge 7.14 Takım ve iş parçasının mekanik ve ısıl özellikleri (Yen vd, 2004)

	Workpiece	Tool
Material	AISI 1020	Uncoated cemented carbide
Object type	Rigid plastic	Rigid
Young's modulus (GPa)	200	534
Poisson's ratio	0.3	0.22
Density (kg/m ³)	7850	11900
Thermal conductivity (W/m °C)	54.17 - 0.02987T	35.95 + 0.0427T
Specific heat (J/kg °C)	420 + 0.5047T	334.01 + 0.127T

Burada $\bar{\sigma}$ MPa cinsinden akma gerilmesi, T sıcaklık(293-970K), $\bar{\epsilon}$ etkin gerinim hızı (10^{-3} - 10^4 s⁻¹) ve $\bar{\epsilon}$ etkin gerinim (0.05-2) dir.

Denklem 7.32' de darbeli sıkıştırma testlerinden elde edilen gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın uygulanabilir değerlerini göz önüne almak önemlidir. Bu değerler pratikteki kesme süreçlerinde elde edilen değerlerin düşük kısımlarıdır. Bundan dolayı, akma değeri bilgisi başlangıçta tahmini kuvvetlerin deneysel değerlerle uyuşmasını sağlamak için yüksek değerlerle ekstrapolasyon yapılmıştır. Böylece, bası testlerinden elde edilen akma gerilmesi değeri değişmeden kalır, fakat akma gerilmesi bilgisinin ekstrapolasyon yapılmış kısmı değişir.

Şekil 7.85' te iş parçası ve takıma uygulanan deplasman ve ısıl sınır şartları gösterilmiştir. Takım sabitlenmiş ve iş parçasının C-B-A-G sınırına 130 m/dk kesme hızı uygulanmıştır. C-D-E-F-G yüzeyi serbest bir yüzeydir ve simülasyon boyunca serbestçe hareket etmesine olanak tanınmıştır.



Şekil 7.85 Uygulanan deplasman ve sınır şartları (Yen vd, 2004)

Bu çalışmada taşınan bütün simülasyonlarda, aşağıdaki basitleştirilmiş sürtünme modeli kullanılmıştır:

$$\tau = m.K_{\text{talaş}} \quad (7.33)$$

Burada m sabit kayma faktörü ve $K_{talaş}$ talaş-takım ara yüzeyi yakınındaki talaş malzemesinin kayma mukavemetidir. ($= \bar{\sigma}_{talaş} / \sqrt{3}$)

Yuvarlatılmış uçlu takım simülasyonunda uygun bir m değerinin seçilmesi için m ' nin 0.6 ile 0.8 arasında değiştiği hassasiyet analizi yapılmıştır. Tahmin edilen kesme kuvvetleri sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır (Çizelge 7.15). Her iki kuvvet bileşeninin de m ' nin artmasıyla arttığı, itme kuvvetinin deneysel değerden oldukça küçük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara dayanarak, kayma sürtünme faktörü m 0.7 alınmıştır.

Çizelge 7.15 Tahmin edilen kesme kuvvetleri ile deneysel sonuçların karşılaştırması (Yen vd, 2004)

parametreler	deney[16]	hassasiyet analizi		
		$m = 0.6$	$m = 0.7$	$m = 0.8$
kesme kuvveti, F_c (N)	1350	1380	1450	1610
itme kuvveti, F_t (N)	800	550	690	760

Negatif talaş açılı pahlı takımların simülasyonu için, deneysel sonuç olmadığı için, daha yüksek değerlere göre daha gerçekçi talaş şekli oluşturduğu için $m=0.3$ olarak kullanılmıştır. Daha yüksek m değerlerinde (örneğin $m=0.7$ için) talaş arkasında işlenmemiş parça yüzeyinde malzeme yığılması olmuştur. Tahminen bunun sebebi takım-talaş ara yüzeyindeki yüksek sürtünmedir.

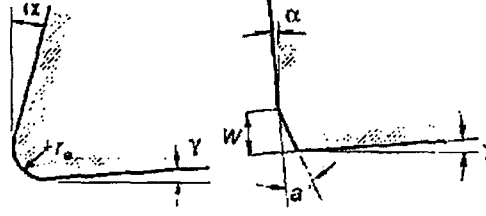
Çizelge 7.16 takımlar için kesme koşulları ve takım geometrisi (Yen vd, 2004)

kesme hızı V_c (m/min)	130
besleme oranı f (mm/rev)	0.2
α (°)	12
γ (°)	5
kenar yarıçapı r_e (mm)	0.01, 0.05, 0.1

Çizelge 7.17 Takımlar için kesme koşulları ve takım geometrisi (Yen vd, 2004)

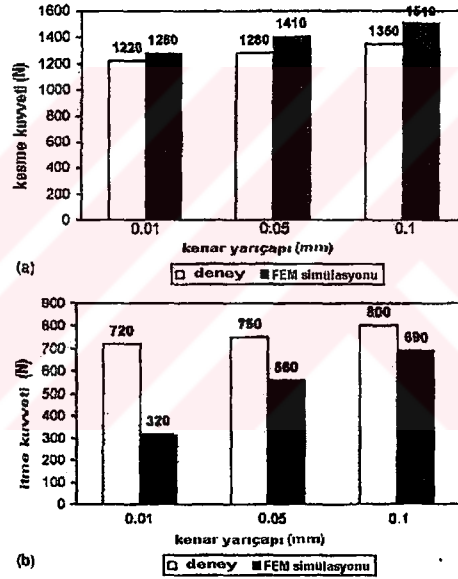
kesme hızı V_c (m/min)	130
besleme oranı f (mm/rev)	0.2
α (°)	-7
γ (°)	7
pah açısı α (°)	15, 25
pah genişliği w (mm)	0.1, 0.2

Çizelge 7.16 ve Çizelge 7.17' de yuvarlak uçlu ve pahlı takımlar için kesme koşulları ve takım geometrisi verilmiştir. Yuvarlak uçlu ve pahlı takımlar şematik olarak Şekil 7.86' da gösterilmiştir.



Şekil 7.86 Yuvarlak uçlu ve pahlı takım (Yen vd, 2004)

Yuvarlak uçlu bir takım için simülasyon koşulları verilmiştir (Çizelge 7.16). Şekil 7.87 (a) ve (b)' de tahmini kesme kuvvetleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması gösterilmiştir. Kesme kuvvetleri arasındaki fark %5-12 arasında değişmekle birlikte tahmini itme kuvveti deneysel kuvvetlerden %13-25 daha düşüktür. Tek istisna, sivri uçlu takımında ($r_e=0.01\text{mm}$) gözlenmiştir. Burada itme kuvvetinin değeri düşüktür. Şekil 7.87 (b)' de görüldüğü gibi, itme kuvvetindeki fark artan uç yarıçapı ile hızla azalmıştır.



Şekil 7.87 Deney ve FEM simülasyon sonuçlarının karşılaştırması (Yen vd, 2004)

Kenar yarıçapının artmasıyla her iki kuvvet bileşeni de artmıştır (Şekil 87 (a) ve (b)). Görünüşte bunun sebebi malzemenin kesilmesi için büyük kuvvetler gerektiren kesme kuvvetinin azalmasıdır. Bununla beraber, azalan kayma açısı ve artan talaş kalınlığı deformasyon bölgesinde daha geniş kayma düzlemi oluşmasına yol açar ve bu da kesme kuvvetlerini artırır. Takım ucunda geniş kenar yarıçapına bağlı olarak artan temas alanı ve işleme kuvveti özgül kesme enerjisinin kesme kuvveti gibi artması ile sonuçlanır. Kenar yarıçapının 10 kat artması (0.01-0.1mm) kesme ve itme kuvvetinin %10-15 artmasına neden olur (Şekil 7.87).

Deneysel ve tahmini itme kuvvetleri arasındaki fark (Şekil 7.87), aşağıdaki sebeplere bağlı olabilir:

i) Kenar yarıçapı çok küçük olduğunda, iş parçası elemanlarının bağıl olarak geniş boyutlu olması, böylece kenar yarıçapındaki kuvvetlerin hesaplama hatalarının yeni meshleme ile çok fazla artması,

ii) Yüksek gerinim hızları ve sıcaklıklarda malzeme akma gerilmesinin ekstrapolasyon hataları,

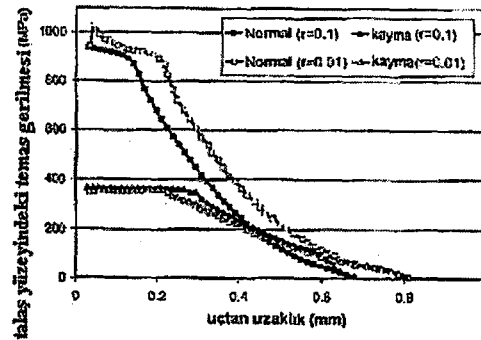
iii) Takım-talaş ara yüzeyinde basitleştirilmiş sürtünme modelinin kullanılması.

Çizelge 7.18' de değişik uç yarıçapları için tahmini talaş kalınlığı ve kayma açısı değerleri verilmiştir. Kenar yarıçapının artmasıyla kayma açısı azalırken talaş kalınlığının biraz arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.18 Değişik uç radyüsleri için tahmini talaş kalınlığı ve kayma açısı değerleri (Yen vd, 2004)

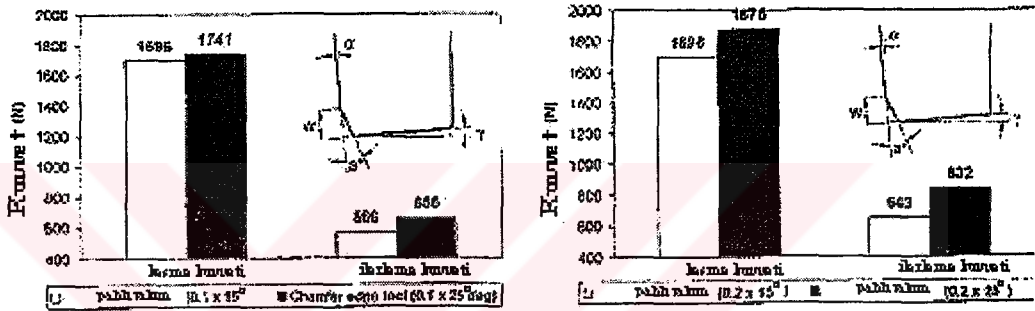
kenar yarıçapı r_e (mm)	talaş kalınlığı t_c (mm)	kayma açısı ϕ (°)
0.01	0.6	25.2
0.05	0.67	21.0
0.1	0.7	19.8

Şekil 7.88'te değişik kenar yarıçaplı (0.01 ve 0.1mm) yuvarlak uçlu takımın talaş yüzeyi boyunca tahmini normal ve kayma gerilme dağılımları gösterilmektedir. Takım gerilme değerleri deneysel sonuçlarla kalitatif uyuma göstermektedir. Hem normal gerilme hem de kayma gerilmesi takım ucu civarında (saplanma sürtünmesi bölgesi) sabit yüksek bir değere sahiptir ve azalarak kesici yüzey üzerindeki talaş ayırım noktasında (kayma sürtünmesi bölgesi) sıfır olmaktadır. Ayrıca kenar yarıçapının her iki gerilme bileşeninin değeri üzerinde çok büyük bir etkisinin olmadığı, saplanma ve kayma bölgesi uzunluklarının her iki takımda çok az farklı olduğu gözlenmiştir.



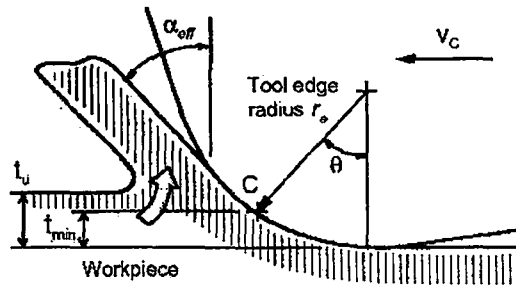
Şekil 7.88 Kesici yüzey boyunca tahmini normal ve kayma gerilme dağılımları (Yen vd, 2004)

Kayma sürtünme kanunu temas kayma gerilmesini (τ) talaş malzemesinin yerel akma gerilmesinin ($\bar{\sigma}_{talaş}$) bir fonksiyonu olarak belirlemektedir. Böylece, sonlu elemanlar hesaplamasında Şekil 7.88' den hesaplanan $\bar{\sigma}_{talaş}$ değerinin malzeme akma gerilmesi modelinden hesaplanan (Denklem 7.32) değeriyle karşılaştırmak gerekir. Şekil 7.88' de görülen sabit yüksek kayma gerilmesi değeri (~ 375 MPa) ve kullanılan sürtünme kanunu ile $\bar{\sigma}_{talaş}$ değeri yaklaşık 930 MPa bulunmuştur. Diğer yandan, talaştaki ikincil kayma bölgesi için hesaplanan ortalama sıcaklık, gerinim ve gerinim hızı değerleri ve Denklem 7.32' ye dayanarak $\bar{\sigma}_{talaş}$ değerinin 1010 MPa civarında olduğu tahmin edilmiştir. $\bar{\sigma}_{talaş}$ girdi ve çıktı değerleri %8'lik bir sapma ile iyi bir uyum göstermiştir.



Şekil 7.89 Değişik pah genişliklerinin kesme kuvvetine etkisi (Yen vd, 2004)

Şekil 7.89' da pah açısının değişik pah genişlikleri için (0.1 ve 0.2 mm) kesme kuvvetleri üzerine simülasyon ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Artan pah açısının büyük pah genişliği kullanıldığında kesme kuvvetleri üzerine daha çok etkidiği görülmüştür. Diğer taraftan, değişen pah açılarının itme kuvveti üzerine etkisinin kesme kuvvetinden daha çok olduğu görülmüştür. Pah açısının 15° den 25° ' ye çıkarıldığında itme kuvvetinde %16-30 artış olurken, kesme kuvvetindeki artış %10'dan az olmuştur. Pah açısının itme kuvveti üzerindeki etkisinin sebebi pah bölgesi civarındaki takım ve iş parçası arasındaki etkin temas alanının artan pah açısı ile artmasıdır (itme kuvveti yönündeki artan izdüşüm uzunluğu).



Şekil 7.90 Azalan talaş yükünün işlenen yüzey üzerindeki parlatma etkisi (Yen vd, 2004)

Finiş tornalama süreçlerinde kesici takımlar geniş uç yarıçaplı, geniş kama açılı, negatif talaş açılı özelliktedirler ve küçük ilerleme hızları ve düşük kesme derinliklerinde çalışırlar. Böylece uç yarıçapı civarında ve arka kenarda azalan talaş yükünün işlenen yüzey üzerindeki işleme veya parlatma etkisi geniş yuvarlak uçlu veya pahlı takımlarda önem kazanmaktadır (Şekil 7.90). Kesilmemiş minimum talaş kalınlığı (t_{min}) ile yuvarlak uçlu takım için kenar yarıçapı değerinin (r_e) ve pahlı takım için pah geometrisi ile arasındaki bağıntı Çizelge 6'da verilmiştir. Gerçekte, kesilmemiş minimum talaş kalınlığı malzeme akışının ayrıldığı üst parçanın talaşın içini oluşturduğu ve alt parçanın takımın altına doğru akarak işlenmiş yüzeyin bir parçası olduğu h_c yığılma noktasının yüksekliğine eşittir.

Çizelge 7.19 t_{min} ile kenar yarı çapı ve pah geometrisi arasındaki bağıntı (Yen vd, 2004)

kenar yarıçapı r_c (mm)	F_c/F_t	θ (°)	t_{min} or h_c (mm)
yuvarlak uçlu takım			
0.05	2.36	57	0.025
0.1	2.14	65	0.055
pah şekli	w (mm) \times a (°)	F_c/F_t	t_{min} or h_c (mm)
pahlı takım			
0.1 \times 15		3.00	0.020
0.1 \times 25		2.65	0.028
0.2 \times 15		2.64	0.031
0.2 \times 25		2.25	0.043

Yuvarlak uçlu takımlar için, yığılma açısı θ 'nın Çizelge 6'dan 57-65° arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca, h_c yığılma noktası yüksekliği kenar yarıçapının artmasıyla artmıştır. Benzer bilgi $r_e=0.01$ mm yarıçaplı takım için takım ucunda bağıl olarak kaba mesh olduğu için tam olarak elde edilemez. Pahlı takımlarda geometrik körlük etkisinden dolayı artan pah genişliği ve pah açısı ile h_c artar.

Değişik ilerleme hızları ile işleme için, kenar geometrisinin ve işleme koşullarının bir fonksiyonu olarak, talaş kaldırma oranı (t_{min}/t_u) kesme kenarının altına akan iş parçası malzemesinin miktarını belirlemede kullanılabilir ve artan işleme oranı ile azalan tahmini kesme kuvveti oranı (F_c/F_t) ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, (t_{min}/t_u) değerleri işlenmiş yüzeyin plastik deformasyon derecesi ve dolayısıyla mekanik etkiye bağlı olarak oluşan artık gerilmeler ile ilişkilendirilebilir. Bunu doğrulamak için elasto-plastik iş parçası ile simülasyonlar yapılmalı ve kesme hızının talaş kaldırma oranı üzerine etkisi incelenmelidir.

Sonlu elemanlar kesme simülasyonu ile ölçülemeyen veya deney ile belirlenmesi çok güç olan takım talaş yüzeyi ve yan yüzeydeki temas gerilmeleri, talaş-takım ve iş parçası ara yüzeylerindeki kesme sıcaklıkları, talaş sıcaklık alanı ve talaş-takım arasındaki kayma hızları gibi süreç değişken değerleri belirlenebilir. bu proses değişkenleri hakkındaki bilgi talaş

kaldırma fiziğinin daha iyi anlaşılmasını ve sistematik proses optimizasyonunun tamamlanmasını sağlayabilir.

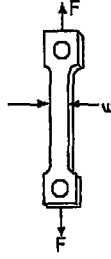
Çalışmada sonlu elemanlar kesme simülasyonu kullanılarak değişik takım geometrilerinin (yuvarlak ve pahlı kenar) proses değişkenleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kesme simülasyon modelinden elde edilen sonuçlara dayanarak incelenen takım geometrileri için takım kaplaması doğrudan kesme sıcaklığı, takım gerilmeleri ve talaş kayma hızıyla ilişkili olduğu için takım kaplamasının mühendislik analizi yapılabilir. Ayrıca verilen kesme koşulları, takım ve iş parçası malzemeleri için minimum takım kaplaması cinsinden takım kenar geometrisi elde edilebilir.



8. DENEYSEL VE SONLU ELEMAN ÇALIŞMALARI

8.1. Deneysel Çalışma

Fotoelastisite deneyinde model hazırlamak için 3mm. kalınlığında polikarbonat plaka kullanılmıştır. Öncelikle gerekli hesaplamaları yapabilmek için malzemenin saçak sabiti f_{σ} 'nin belirlenmesi gerekiyordu. Bunun için malzemeden bir çekme numunesi (Şekil 8.1) hazırlanarak numuneye tek eksenli gerilme uygulandı ve f_{σ} değeri hesaplandı. Çekme deneyinde elde edilen değerler Çizelge 8.1' de verilmiştir.

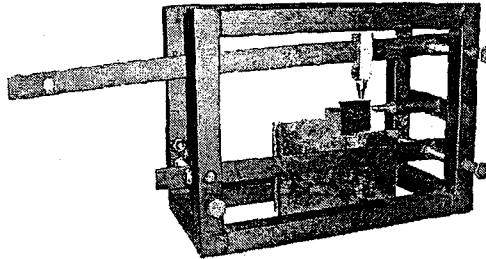


Şekil 8.1 Çekme Numunesinin Şematik Gösterimi

Çizelge 8.1 f_{σ} Değerleri

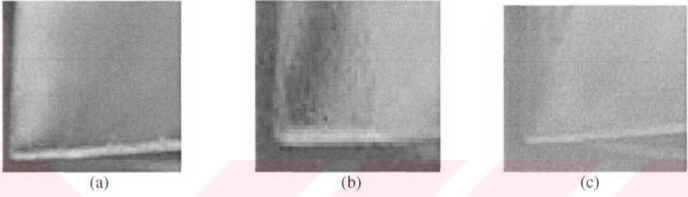
Deney Numarası	Uygulanan Kuvvet(F)	Saçak Numarası (N)	Model Genişliği (w)	Saçak Sabiti f_{σ}	Ortalama Saçak Sabiti
1	16.68 N	1	2.5 mm	6.67	6.82 N/mm
2	34.34N	2	2.5 mm	6.87	
3	51.99	3	2.5 mm	6.93	

Model belirlenen ölçülerde (Ek 1) kesildikten sonra zımparalandı ve polariskopta artık gerilmelerin giderilip giderilmediği kontrol edilerek deneye başlandı. Deneyde model iki eksenli gerilme haline tabi tutuldu ve kuvvetlerin uygulanması için Şekil 8.2'de gösterilen deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneği' nin parçaları ve montaj resmi Ek 1 ve Ek 2' de verilmiştir.

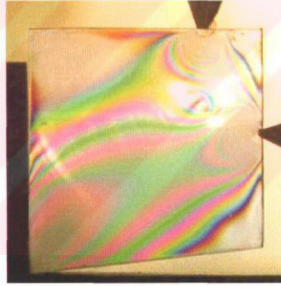


Şekil 8.2 Hazırlanan deney düzeneği

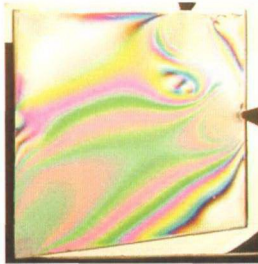
Deney sırasında σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerinin doğrultularını belirlemek amacıyla doğrusal polariskop düzeneği kullanıldı ve oluşan izoklinik eğrilerin fotoğrafı çekildi (Şekil 8.3). Daha sonra dairesel polariskop düzeneği kullanılarak izokromatik eğriler görüntüledi (Şekil 8.4). σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerinin ayrı ayrı hesaplanabilmesi için eğik yönlendirme metodu kullanıldı ve bunun için model $\theta = 10^\circ$ olacak şekilde eğilerek oluşan izokromatik eğriler görüntüledi (Şekil 8.5).



Şekil 8.3 (a) 20° izokliniği (b) 60° izokliniği ve (c) 80° izokliniği



Şekil 8.4 İzokromatik eğriler



Şekil 8.5 Model eğik iken oluşan izokromatik eğriler

Elde edilen görüntülerden saçak sıraları belirlendi ve Denklem 5.11a ve 5.11b kullanılarak asal gerilme değerleri hesaplandı. Daha sonra Denklem 8.1 ve Denklem 8.2 kullanılarak normal gerilme değeri σ ve kayma gerilmesi değeri τ hesaplandı. Bu değerler hesaplanırken izoklinik eğriler yardımıyla belirlenen asal gerilme doğrultularından faydalanarak φ değeri belirlenmiştir. Hesaplanan bu değerler Çizelge 8.2' de verilmiştir.

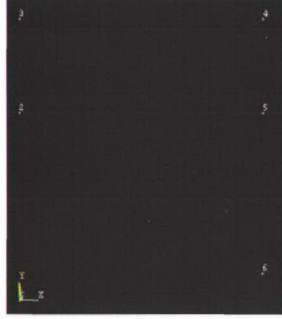
$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi \quad (8.1)$$

Çizelge 8.2 Normal ve Kayma Gerilme Değerleri

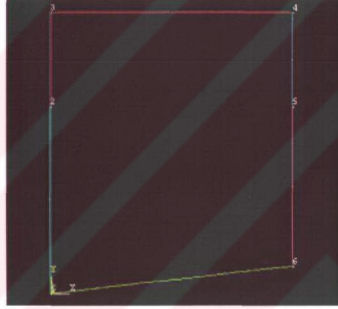
Kesici Uçtan Uzaklık	N_θ	σ_1, σ_2	θ	N_θ	σ_1	σ_2	σ	τ	φ
30.16 mm	1	2.27	10	1.08	7.06	4.79	4.86	0.39	80
18.56 mm	2	4.55	10	2.11	10.42	5.87	6.01	0.78	80
12.76 mm	3	6.82	10	6.23	22.69	15.87	16.07	2.95	60
3.48 mm	4	9.09	10	4.56	46.09	37	38.06	3.94	30
1.16 mm	5	11.37	10	5.75	61.32	49.95	54.65	3.65	20

8.2 Sonlu Elemanlar Çalışması

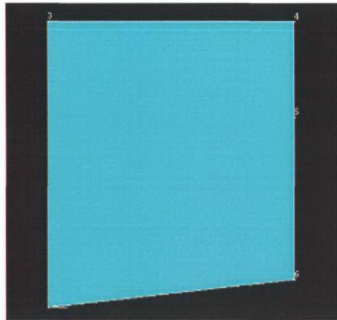
Sonlu elemanlar analizinde Ansys 8.0 programı kullanılarak HSS yekpare takım üzerindeki gerilmeler saptandı. İki boyutlu sabit hal (steady state) ve düzlem gerinimi (plane strain) kabul edildi. Öncelikle seçeneklerden yapısal (structural) analiz seçilerek malzemenin Elastisite Modülü (210000 N/mm^2) ve Poisson Oranı (0.28) girildi. Daha sonra eleman tipi seçilerek modelin oluşturulması bölümüne geçildi. Noktalar tanımlanarak bu noktalardan çizgiler, çizgilerden alan oluşturuldu (Şekil 8.7, 8.8 ve 8.9). Daha sonra ayırıklaştırma işlemi (mesh) yapılarak (Şekil 8.10) sınır şartları tanımlandı ve y ekseninde 200 N ve x ekseninde 100 N' lık kuvvetler uygulandı. Daha sonra çözüm safhasına geçildi ve çözüm yapıldı (Şekil 8.11 ve 8.12). Çözüm sonrası safhada deforme olmuş model (Şekil 8.13), normal gerilmelerin dağılımı (Şekil 8.14) ve kayma gerilmelerinin dağılımı (Şekil 8.15) görüntülendi.



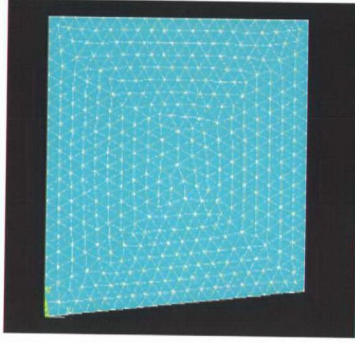
Şekil 8.6 Noktaların oluşturulması



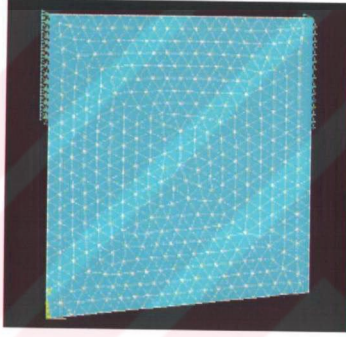
Şekil 8.7 Noktalardan çizgilerin oluşturulması



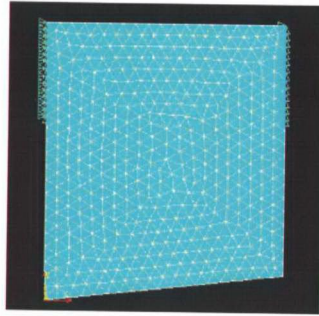
Şekil 8.8 Çizgilerden alanın oluşturulması



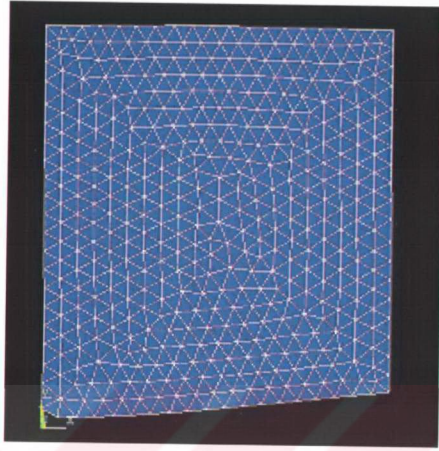
Şekil 8.9 Modelin ayrılaştırılmış hali



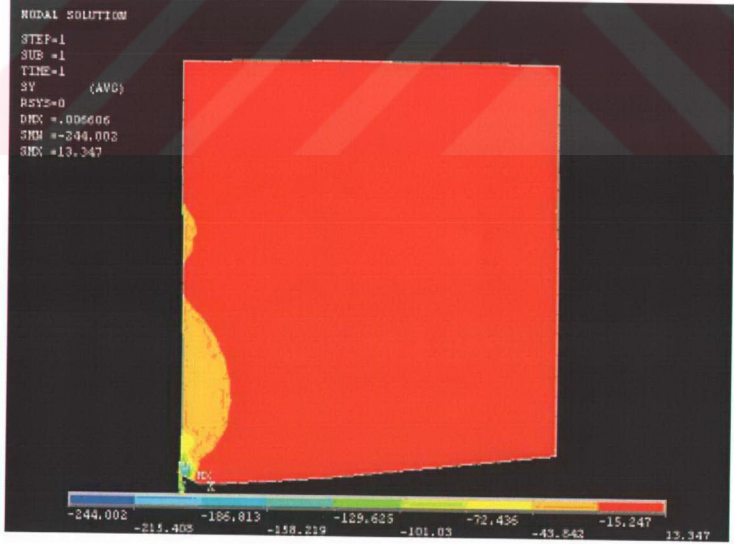
Şekil 8.10 Mesnetlerin uygulanışı



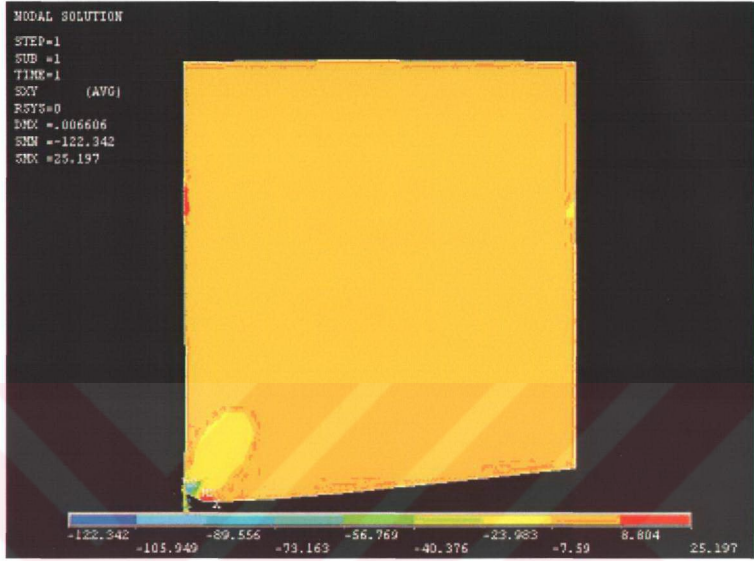
Şekil 8.11 Kuvvetlerin uygulanışı



Şekil 8.12 Deforme olmuş model



Şekil 8.13 Normal gerilmelerin dağılımı

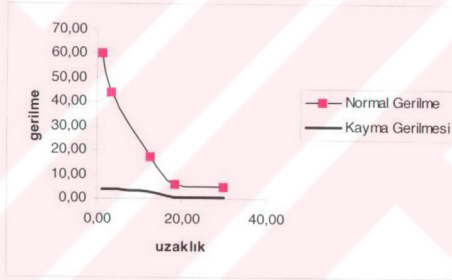


Şekil 8.14 Kayma gerilmelerinin dağılımı

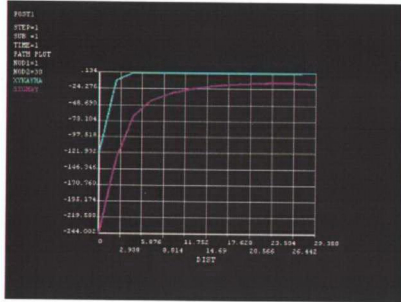
9. SONUÇLAR

Tek kesen ağızlı bir takımında talaş yüzeyindeki normal ve kayma gerilme dağılımları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda Fotoelastisite Yöntemi, teorik çalışmalarda ise Sonlu Elemanlar Yöntemi en sık kullanılan metotlardır.

Bu çalışmada tek kesen ağızlı bir takımın talaş yüzeyindeki gerilme dağılımları hem Fotoelastisite hem de Sonlu Elemanlar yöntemleri ile incelenmiştir. Fotoelastisite çalışmasında polikarbonat malzeme kullanılmış ve normal gerilmenin maksimum değerden üstel olarak azaldığı, kayma gerilmesinin önce sabit kaldığı, sonra azalarak sıfır olduğu saptanmıştır. Gerilme grafiği Şekil 9.1' de gösterilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapılan analizde ise, tek kesen ağızlı HSS bir takım modellenerek gerilme grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 9.2). Normal ve kayma gerilmelerinin her ikisinin de üstel olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 9.1 Fotoelastisite ile elde edilen gerilme grafiği



Şekil 9.2 Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen gerilme grafiği

Bu çalışmanın sonunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. Tek kesen ağızlı bir takım talaş kaldırma esnasında talaş yüzeyindeki normal ve kayma gerilmeleri takım ucunda maksimum olmaktadır.

2. Gerilmeler takım ucundan uzaklaştıkça azalmakta ve talaş ayrımında sıfır olmaktadır.

3. Zorev gibi araştırmacılar normal gerilmenin maksimum değerden üstel olarak azaldığını, kayma gerilmesinin ise temas uzunluğunun yaklaşık olarak yarısı kadar sabit kalarak daha sonra doğrusal bir şekilde azalarak sıfır olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ahmad, Derricot ve Draper isimli araştırmacılar ise kayma gerilmesinin de üstel olarak azaldığını ileri sürmüşlerdir. Bu farklılıkların kullanılan yöntemlerden kaynaklandığı düşünülmüştür (Childs ve Mahdi). Bu dağılımın ne şekilde olduğu henüz kesin olarak bilinmemektedir.

4. Fotoelastisite çalışmasında normal gerilmenin maksimum değerden üstel olarak azaldığı, kayma gerilmesinin önce sabit kaldığı sonra azalarak sıfır olduğu saptanmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar literatür çalışmaları ile (Bacht ve Wright, Chandrasekaran ve Kapoor, Usui ve Takeyama) uyumludur. Sonlu Elemanlar yöntemi ile normal ve kayma gerilmelerinin her ikisinin de üstel olarak azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar Hsu, Ahmad gibi araştırmacıların elde ettiği sonuçlarla uyumaktadır.

5. İki yöntemde elde edilen sonuçlar arasındaki görülen farkın değişik uygulama şartlarından (malzeme özellikleri, sınır şartları, vs.) kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Ajovalist, A. , Barone, S. ve Petrucci, G. , (1998), "A Review of Automated Methods for the Collection and Analysis of Photoelastic Data", Journ. Of Strain Analysis Vol 33, No:2; 75-91

Altan, E. , (2002), Dizayn ve İmalatta Bilgisayar Destekli Teknikler Ders Notları, İstanbul

Altan, E. , (2002), Talaş Kaldırma Mekaniği Ders Notları, İstanbul

Baght, A.ve Wright, P.K., (1986), "Stress Analysis in Machining with the Use of Sapphire Tools", Proc. R. Soc. London, 409: 99-113

Baker, A. J., Pepper D.W., (1991), Finite Elements, McGraw-Hill

Budynas, R. G., (1999), Advanced Strenght and Applied Stress Analysis, WCB/McGraw-Hill, Boston-Toronto

Chandrasekaran, H., Kapoor, D.V., (1965), "Photoelastic Analysis of Tool-Chip Interface Stresses", Jornal of Engineering for Industry, November 1965:495-502

Cinemre, V., (1963), İki Boyutlu Elastisite Teorisi, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul

Durelli, A. J., (1970), Applied Stress Analysis, Prentice-Hall of India Private Ltd., New Delhi

Fagan, M.J., (1992), Finite Element Analysis Theory and Practice, Prentice-Hall

Hsu, T.C., (1966), "A Study of the Normal and Shear Stresses on a Cutting Tool", Journ. of Engineering for Industry, February 1966: 51-64

Leven M.M., (1969), Selected Papers of M.M. Frocht on Photoelasticity, Pergamon Press, Oxford- New York

Mc Clain, B., Batzer, S.A. ve Maldonado, G.I., (2002), "A New Numeric Investigation of the Rake Face Stress Distribution in Orthogonal Machining", Journ. of Materials Processing Technology, Vol 123: 114-119

Moaveni, S., (2003), Finite Element Analysis Theory and Application with Ansys, Pearson Education

Şahin, Yusuf, (2000),Talaş Kaldırma Prensipleri 1, Ankara, Nobel Yayın Dağıtım

Tlusty, J. ve Masood, Z., (1978), "Chipping and Breakage of Carbide Tools", Journ. of Engineering for Industry, November 1978 Vol 100: 403-412

Usui, E., Takeyama, H., (1960), "A Photoelastic Analysis of Machining Stresses", Journ. of Engineering for Industry, Vol 82, No.4: 303-308

Venkatesh, V.C., Xue, W. Ve Quinto, D.T., (1992), "Surface Studies During Indexable Drilling with Coated Carbides of Different Geometry", Annals of the CIRP, V 41: 613-616

Yen, Y.C., Jain, A., Altan, T., (2004), "A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries", Journ. of Materials Processig Technology, V 146:72-81

İnternet Kaynakları

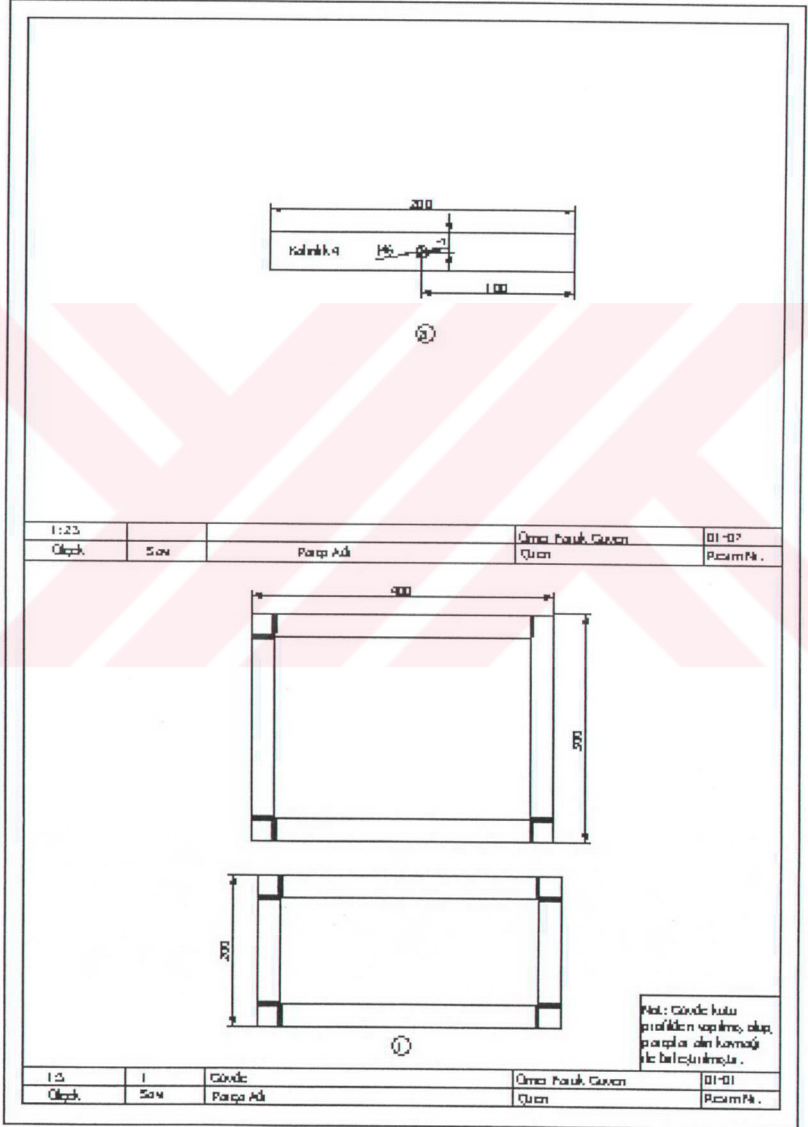
[1] www.analiz.infotron.com.tr

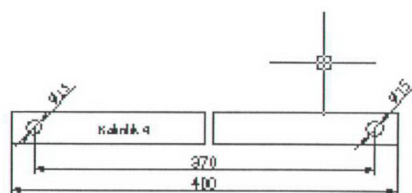
[2] www.eksenotomasyon.com

[3] www.turkcdcam.net

EKLER

Ek 1 Fotoelastisite Düzeneğinin Parça Resimleri





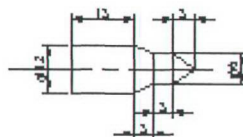
①

1:2.5	2	Falaj, Sabitkama Lamasu	Ömer Faruk Güven	01-10
Ölçek	Sayı	Parça Adı	Çizim	Resim No.



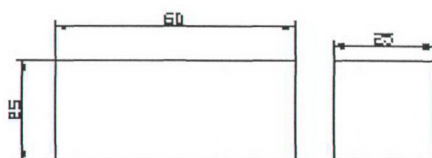
②

1:2.5	1	Düvey Basık Halkı	Ömer Faruk Güven	01-02
Ölçek	Sayı	Parça Adı	Çizim	Resim No.



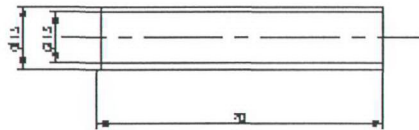
⑤

1:1	1	Dikay Basku Ucu	Ömer Faruk Güven	01-02
Çizim	Sayı	Parça Adı	Çizim	Form N.



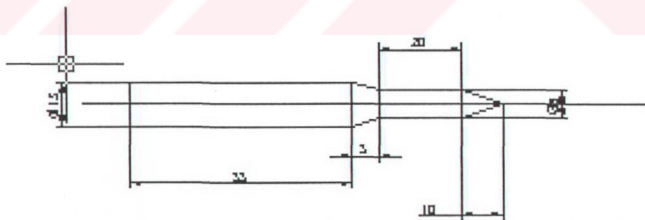
⑥

1:1	1	Dikay Basku Gövdesi	Ömer Faruk Güven	01-03
Çizim	Sayı	Parça Adı	Çizim	Form N.



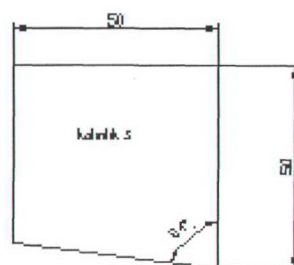
(a)

1:1	1	Yataş Başlı Ucu Yatağı	Ömer Faruk Güven	01-02
Çizim	Son	Parça Adı	Çizim	Parça No.



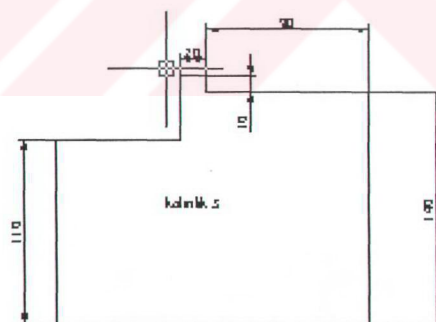
(b)

1:1	1	Yataş Başlı Ucu	Ömer Faruk Güven	01-02
Çizim	Son	Parça Adı	Çizim	Parça No.

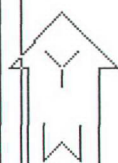


10

1:1	1	Fahim Madick	Ölçme Parçaları Güven	01-03
Ölçek	Sayı	Parça Adı	Çizim	Parçanın No.

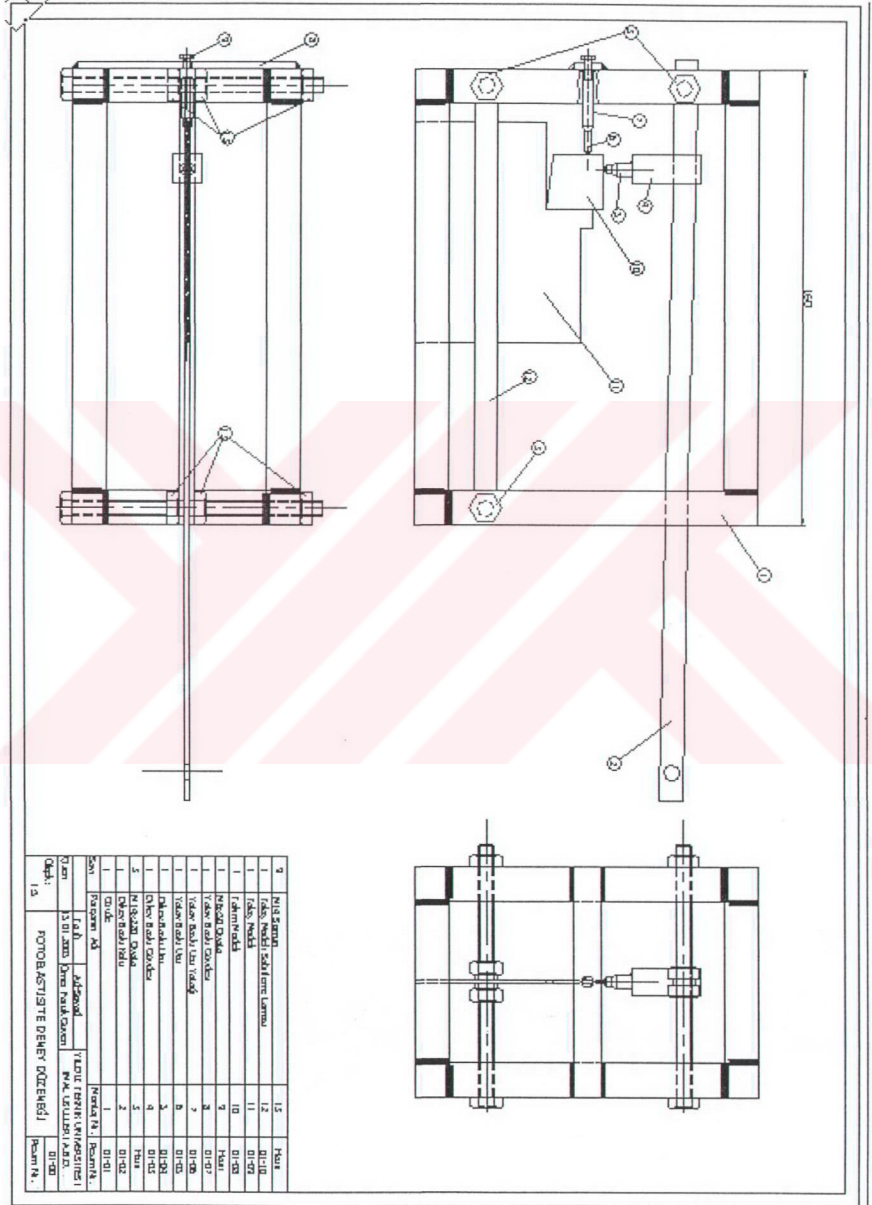


11



1:2.5	1	Zeynep Madick	Ölçme Parçaları Güven	01-03
Ölçek	Sayı	Parça Adı	Çizim	Parçanın No.

Ek 2 Fotoelastisite Düzeninein Montaj Resmi



ÖZGEÇMİŞ

- Doğum tarihi 29. 10 1980
- Doğum yeri Eskişehir
- Lise 1995-1998 Eskişehir Motor Anadolu Meslek Lisesi
- Lisans 1998-2002 Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Makina Müh. Bölümü
- Yüksek Lisans 2002-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı