

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ YÖNLÜ YÖNLENDİRİLMİŞ POLİMERLERİN MEKANİKSEL
ANİZOTROPİSİNİN TEK YÖNLÜ YÖNLENDİRİLMİŞ POLİMERLERİN
MEKANİKSEL ANİZOTROPİSİ CİNSİNDEN İFADESİ**

DOKTORA TEZİ

A. Uğur KAYA

Anabilim Dalı: Fizik

Tez Danışmanı: Prof.Dr. A. Taner OSKAY

KOCAELİ, 2006

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ YÖNLÜ YÖNLENDİRİLMİŞ POLİMERLERİN
MEKANİKSEL ANİZOTROPİSİNİN TEK YÖNLÜ
YÖNLENDİRİLMİŞ POLİMERLERİN MEKANİKSEL
ANİZOTROPİSİ CİNSİNDEN İFADESİ**

DOKTORA TEZİ

A. Uğur KAYA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Eylül 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Ekim 2006

Tez Danışmanı
Prof.Dr. Taner OSKAY


(.....)

Üye
Prof.Dr. H.Yüksel
GÜNEY


(.....)

Üye
Doç.Dr. Tamer
SINMAZÇELİK


(.....)

Üye
Doç.Dr Kadir ESMER


(.....)

Üye
Yrd.Doç.Dr. Selim KARA


(.....)

KOCAELİ, 2006

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günlük yaşamda sıkça kullandığımız polimerler, teknolojik uygulamalarda da oldukça yoğun kullanım alanları bulmaktadır. Düşük üretim maliyeti, kimyasalların çoğuna karşı mukavemetli olması ve kolayca işlenebilme gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda diğer malzemelerin yerini hızla almaktadır. Özellikle optik uygulamalarda cam yerine kullanılabilmesi PMMA'ya ve PVC'ye ilgiyi oldukça arttırmıştır.

Bu çalışmanın tamamının Üniversitemizin Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olması ayrı bir öneme sahiptir. Çalışmanın zor ve uzun süre gerektiren kısmı, iki yönlü yönlendirme işlemi için bir çekme sisteminin hazırlanmasıdır. Ultrasonik dalga hızı ölçümleri Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans tezi olarak sunulan çalışmada hazırlanmış dört dönüştürücülü Ultrasonik Spektrometrede gerçekleştirilmiştir.

Doktora tezi olarak böyle bir problemin ortaya çıkarılması ve bu konuda bana çalışma imkanı sağlayan, özellikle laboratuvar çalışmaları gibi her konuda desteğini gördüğüm danışman hocam Sayın Prof.Dr. A. Taner OSKAY'a (KOÜ.F.E.F), araştırma laboratuvarının yeniden düzenlenmesi ve geliştirilmesinde önemli katkıları olan ve her zaman desteğini gördüğüm Sayın Prof.Dr. H.Yüksel GÜNEY'e (KOÜ.F.E.F), deneysel çalışmalar sırasında teknik ve malzeme desteğini gördüğüm Elk. Müh. M. Cumhur DURMUŞ'a (HİTAŞ ASANSÖRLERİ), çekme sisteminin tasarlanmasında büyük desteğini gördüğüm Mak. Müh. Gökhan ÖZER'e (ELİMSAN A.Ş.) Dört Dönüştürücülü Ultrasonik Spektrometreyi tasarlayan Yrd.Doç.Dr. Selim KARA'ya (TRAKYA ÜNİVERSİTESİ) ölçümler sırasında bana yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Öğr. Gör. Ersel ÖZKAZANÇ'a (KOÜ.F.E.F), Arş. Gör. Ufuk ABACI'ya (KOÜ.F.E.F), Arş. Gör. Gülbeden LİKOĞLU'na (KOÜ.F.E.F) ve Teknisyenimiz Hakan YAZICIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	x
ÖZET.....	xii
İNGİLİZCE ÖZET.....	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. POLİMERLERİN YAPISI.....	4
2.1. Kimyasal Yapı.....	4
2.2. Fiziksel Yapı.....	8
BÖLÜM 3. POLİMERLERİN MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	12
3.1. Mekaniksel Davranışın Farklı Tipleri.....	12
3.2. Elastik Katı ve Polimerlerin Davranışı.....	14
3.3. Polimerlerin Termal Davranışları ve Camsı Geçiş Sıcaklığı.....	15
3.4. Yönelmiş Polimerlerin Elastik Özellikleri.....	18
3.5. Polimerlerde Viskoelastik Davranış ve Mekaniksel Relaksasyon.....	21
3.5.1. Viskoelastik davranış.....	21
3.5.2. Lineer viskoelastik davranış.....	21
3.5.3. Sünme.....	24
3.5.4. Zorlama (stress) relaksasyonu.....	27
BÖLÜM 4. KATILARIN ELASTİK ÖZELLİKLERİ ve AKUSTİK DALGA YAYILIMI.....	30
4.1. Katılarda Şekil Değişimi ve Zorlanma.....	30
4.2. Zorlanma ve Akustiğin Dinamik Eşitlikleri.....	34
4.3. Elastik Katılarda Zorlama ve Zorlanma İlişkisi.....	40
4.4. Ortogonal Dönüşüm Matrisinin Hekzagonal Yapıya Uygulanması.....	44
4.5. Katılarda Akustik Dalgaların Yayılması.....	47
4.5.1. İzotrop ortam.....	52
4.5.2. Hekzagonal simetrik ortam.....	53
4.5.3. Ortorombik simetrik ortam.....	54
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	57
5.1. Giriş.....	57
5.2. Yönlendirme İşlemi.....	57
5.3. Ultrasonik Dalga Hızı ölçümleri.....	66
5.3.1. Atma-Yansıma (pulse-echo) tekniği.....	66
5.3.2. Daldırma Tekniği.....	67
5.3.3. Dört dönüştürücülü daldırma tekniği.....	68
5.3.4. Ultrasonik Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu.....	73
5.4. PMMA (Polimetilmetakrilat).....	79
5.5. PVC (Polivinilklorür).....	86
BÖLÜM 6. ÖLÇÜM ve HESAPLAMALAR.....	97
6.1. PMMA'da Hız Ölçümleri ve Elastik Sabitlerin Hesaplanması.....	97

6.1.1. İsootrop yapı (yönlendirilmemiş PMMA) elastik sabitlerinin belirlenmesi	99
6.1.2. Hekzagonal yapı (tek yönlü yönlendirilmiş PMMA) elastik sabitlerinin belirlenmesi.....	101
6.1.3. Ortorombik yapı (iki yönlü yönlendirilmiş PMMA) elastik sabitlerinin belirlenmesi	107
6.2. PVC’de Hız Ölçümleri ve Elastik Sabitlerin Hesaplanması.....	112
6.2.1. İsootrop yapı (PVC) elastik sabitlerinin belirlenmesi.....	112
6.2.2. Hekzagonal Yapı (PVC) Elastik Sabitlerinin Belirlenmesi.....	113
6.2.3. Ortorombik Yapı (PVC) Elastik Sabitlerinin Belirlenmesi.....	118
6.3. PVC için Hekzagonal Yapı Elastik Sabitleri ile Ortorombik Yapı elastik sabitleri Arasında Analitik Yaklaşım.....	123
BÖLÜM 7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	130
7.1. Deneysel Şartlar ve Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	130
KAYNAKLAR.....	135
EKLER.....	138
ÖZGEÇMİŞ.....	144

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İki monomerden meydana gelen kopolimerin değişik düzenlemeleri.	5
Şekil 2.2. Polimer moleküllerinde ortaya çıkabilecek dallanma tipleri.....	6
Şekil 2.3. Yönlendirilmemiş amorf polimer, b) Yönlendirilmiş amorf polimer..	9
Şekil 2.4. Polietilenteraftalat'ın kristal yapısı.....	10
Şekil 2.5. Yarı kristalin polimerlerde saçaklı misel yapısı	11
Şekil 2.6. Katlanmış zincir lamel yapısı.....	11
Şekil 3.1. Bir polimerin farklı sıcaklıklardaki davranışı	14
Şekil 3.2. Kristallenebilen bir polimerde hacim-sıcaklık eğrileri (A) sıvı bölgesi, (B) bir miktar esneklik gösteren sıvı, (C) kauçuksu bölge, (D) camı bölge, (E) lastiksi bölge, (F) camı yapı içerisinde kristalin bulunan bölge	16
Şekil 3.3. Polimer zincirlerinin çekme kuvveti altında kalıcı yönelmesi	18
Şekil 3.4. Yönelmenin tanımı.....	19
Şekil 3.5. Hız gradyenti.....	22
Şekil 3.6. Voigt veya Kelvin modeli.....	23
Şekil 3.7. a) Elastik bir katının şekil değişimi, b) Lineer viskoelastik bir katının deformasyon.....	25
Şekil 3. 8. Zamanın bir fonksiyonu olarak $J(t)$ sünme uyumu. τ' ise, karakteristik (geciktirme) zamandır.....	26
Şekil 3.9. Zorlama relaksasyonu.....	27
Şekil 3.10. Zamanın bir fonksiyonu olarak zorlama-relaksasyon modülü $G(t)$. τ , karakteristik zaman (relaksasyon zamanı).....	28
Şekil 4.1. Katı bir cismin denge ve şekil değiştirmiş durumunda parçacıkların konumu.....	30
Şekil 4.2. Şekil değiştirmiş bir katıda diferansiyel yer değiştirme alanının tanımı.....	31
Şekil 4.3. Bir elemanter parçacığa etkiyen çekme kuvvetleri.....	35
Şekil 4.4. Bir katının tetrahedral hacim elemanında yüzeylere etkiyen çekme kuvvetleri.....	36
Şekil 4.5. Katı bir cisim için zorlama - zorlanma ilişkisi.....	40
Şekil 4.6. Anizotrop ortam içinde yayılan akustik dalgaların değişik polarizasyon biçimi.....	51
Şekil 5.1. İki yönlü çekme sistemi.....	58
Şekil 5.2. Çekme sistemi.(alttan görünüş).....	60
Şekil 5.3. Malzeme tutucusu.....	61
Şekil 5.4. Malzeme tutucular ve soğutma sistemi.....	61
Şekil 5.5. Sıcak yağ teknesi.....	63
Şekil 5.6. Çekme sistemi.....	63
Şekil 5.7. Çekme sistemi (Tamamlanmış yapı).....	64
Şekil 5.8. Atma-Yansıma blok yapısı.....	67
Şekil 5.9. Daldırma tekniği blok yapısı.....	67

Şekil 5.10. Daldırma tekniğinde örnek var ve yokken atmalar arasındaki zaman farkı.....	68
Şekil 5.11. Dört dönüştürücülü daldırma tekniği.....	69
Şekil 5.12. Örneğin dik yerleştirilmesi.....	70
Şekil 5.13. Örneğin açılı yerleştirilmesi.....	71
Şekil 5.14. Ölçüm Hücresi.....	72
Şekil 5.15. Ultrasonik ölçüm sistemi.....	73
Şekil 5.16. Yazılım ile alınmış izotrop (PMMA) örnek hız ölçümleri.....	76
Şekil 5.17. Osiloskop yardımıyla referans ve ölçüm işaretleri arasındaki zaman farkının belirlenmesi.....	76
Şekil 5.18. Ölçüm ve referans pikleri arasında zaman farkının okunması.....	78
Şekil 5.19. Osiloskop yardımıyla gerçekleştirilmiş hız ölçümü.....	78
Şekil 5.20. Tek yönlü çekme için örnek boyutları.....	81
Şekil 5.21. İki yönlü çekme işlemi için örnek boyutları.....	81
Şekil 5.22. a) Çekilmemiş PMMA Örnek $\lambda=1,0$, b) $\lambda_z=2,0$ oranında çekilmiş PMMA örnek.....	82
Şekil 5.23. İki yönlü çekme için hazırlanmış PMMA örnek.....	82
Şekil 5.24. $\lambda_z=1,5$ değerinde çekilmiş PMMA için çekme değerinin Belirlenmesi.....	84
Şekil 5.25. Tek yönlü çekme için hazırlanmış PVC örnek.....	88
Şekil 5.26. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler.....	88
Şekil 5.27. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler için çekme sürelerine karşılık çekme oranları (λ_z).....	89
Şekil 5.28. Tek yönlü çekilmiş PVC’de z eksenindeki uzamalara karşılık y ve x eksenindeki daralmalar.....	90
Şekil 5.29. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin yoğunluk değişimi.....	91
Şekil 5.30. İki yönlü çekme işlemi için hazırlanmış PVC örnek.....	91
Şekil 5.31. İki yönlü çekilmiş PVC’de $\lambda_x=1,2$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık yoğunluk değerleri.....	92
Şekil 5.32. İki yönlü çekilmiş PVC’de $\lambda_x=1,2$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık kalınlık değerleri.....	93
Şekil 5.33. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,25$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.....	93
Şekil 5.34. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,30$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.....	94
Şekil 5.35. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,40$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.....	94
Şekil 5.36. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,50$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.....	95
Şekil 5.37. İki yönlü çekilmiş PVC’de çekme oranlarının çekme süresine göre değişimi (mavi λ_x , kırmızı λ_z).....	96
Şekil 6.1. z eksenine paralel dilimlenerek yeniden birleştirilmiş örnek.....	98
Şekil 6.2. Dairesel şekle getirilmiş örnek.....	98
Şekil 6.3. ($\lambda_z=1,75$) PMMA örneği için $R_L=40^\circ$ de V_L hızının belirlenmesi.....	104
Şekil 6.4. ($\lambda_z=1,75$) PMMA örneği için örnek için $R_T=40^\circ$ de V_{T1} hızının Belirlenmesi.....	105
Şekil 6.5 Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekler için çekme oranına bağlı elastik sabit değişimi.....	107
Şekil 6.6. İki yönlü çekilmiş PMMA’da $\lambda_x=1,25$ sabit iken λ_z değerlerine karşılık c_{33} değişimi.....	111
Şekil 6.7. İki yönlü çekilmiş PMMA’da $\lambda_x=1,5$ sabit iken λ_z değerlerine karşılık c_{33} değişimi.....	111

Şekil 6.8. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler için (z,y) düzleminde boyuna hız dağılımı.....	114
Şekil 6.9. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için (z,y) düzleminde enine hız dağılımı.....	115
Şekil 6.10. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,y) düzleminde hız değerlerinin çekme oranlarına göre değişimi.....	116
Şekil 6.11. Tek yönlü çekilmiş örneklerde (hekzagonal yapı) elastik sabitlerin çekme oranına bağlı değişimi.....	117
Şekil 6.12. $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{11} , c_{22} ve c_{33} değerleri.....	118
Şekil 6.13. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin c_{66} ve c_{12} elastik sabitlerin çekme oranına bağlı değişimi.....	122
Şekil 6.14. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{44} ve c_{23} elastik sabitlerin değişimi.....	122
Şekil 6.15. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{55} ve c_{13} elastik sabitlerin değişimi.....	123
Şekil 6.16. Tek yönlü çekilmiş PVC’de elastik sabitlerin ($\lambda_x+\lambda_z$) çekme oranları toplamına göre değişimi.....	124
Şekil 6.17 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x+\lambda_z$) toplamına göre c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitlerinin değişimi.....	125
Şekil 6.18 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x+\lambda_z$) toplamına göre c_{12} , ve c_{66} elastik sabitlerinin değişimi.....	126
Şekil 6.19 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x+\lambda_z$) toplamına göre c_{23} , ve c_{44} elastik sabitlerinin değişimi.....	136
Şekil 6.20 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x+\lambda_z$) toplamına göre c_{13} , ve c_{55} elastik sabitlerinin değişimi.....	127

TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. Elektromanyetik ve Akustik alan eşitlikleri.....	49
Tablo 5.1. PMMA’da İki yönlü çekme için örnek merkezinde farklı aralıklarda çekme oranları.....	65
Tablo 5.2. İzotrop örnek (PMMA) için elektronik sistem ile gerçekleştirilmiş hız ölçümü.....	75
Tablo 5.3. PMMA’nın genel özellikleri.....	80
Tablo 5.4. Tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerde geometrik büyüklükler ve yoğunluk değerleri	85
Tablo 5.5. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler için kalınlık değerleri.....	85
Tablo 5.6. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler için kütle değerleri	85
Tablo 5.7. İki yönlü yönlendirilmiş örnekler için yoğunluk değerleri.....	86
Tablo 5.8. PVC’nin özellikleri.....	87
Tablo 5.9. Tek yönlü çekilmiş örnekler için (PVC) z eksenindeki uzamalara karşılık x, y eksenindeki daralmalar ve çekme süresi.....	89
Tablo 5.10. Tek yönlü çekilmiş ve çekilmemiş ($\lambda=1,0$) PVC örnekler için yoğunluk değerleri	90
Tablo 5.11. İki yönlü çekilmiş örneklerde kütle, çap, kalınlık ve yoğunluk değerleri.....	92
Tablo 5.12. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,50$ PVC örneği için çekme süreleri ve çekme oranları	95
Tablo 6.1. Çekilmemiş PMMA örneği için dalga hızı ölçümleri.....	97
Tablo 6.2. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için (x,y) düzleminde dalga hızı ölçümleri	102
Tablo 6.3. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekler için (x,y) düzleminde saf boyuna ve saf enine hız değerleri	102
Tablo 6.4. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için c_{11} , c_{12} ve c_{66} elastik sertlik sabitleri	103
Tablo 6. 5. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için V_L hızları ve c_{33} elastik sertlik sabitleri	103
Tablo 6.6. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri (z,y) düzleminde hız değerleri ve yayılma açıları.....	104
Tablo 6.7. Tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerinde c_{44} elastik sabitleri	105
Tablo 6.8. Tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerinde c_{13} elastik sabitleri.....	106
Tablo 6.9. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için çekme oranına bağlı elastik sabitler.....	106
Tablo 6.10. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için ($\lambda_x=1,25$ sabit) z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları.....	110
Tablo 6. 11. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için ($\lambda_x=1,5$ sabit) z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları	110
Tablo 6.12. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için ($\lambda_x=1,75$ sabit) z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları.....	110
Tablo 6.13. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler için c_{33} elastik sabitleri.....	110

Tablo 6.14. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için (x,y) düzleminde dalga hızı ölçümleri.....	113
Tablo 6.15. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için c_{11} , c_{66} ve c_{12} değerleri.....	113
Tablo 6.16. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için (z,y) düzleminde ölçülen hız değerleri	114
Tablo 6.17. Tek yönlü çekilmiş PVC örneğinin (z,y) düzleminde ölçülen hızlardan belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.....	115
Tablo 6.18. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerde z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları ve bu hızlarla hesaplanmış c_{33} elastik sabitleri	116
Tablo 6.19. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler (heksagonal yapı) için elastik Sabitler.....	117
Tablo 6.20. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin esas eksen doğrultularında ölçülen hızlar ve hesaplanan elastik sabitler	118
Tablo 6.21. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (x,y) düzleminde ölçülen dalga Hızları.....	119
Tablo 6.22. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (x,y) düzleminde $R_L, R_T=32^\circ$ de belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.....	119
Tablo 6.23. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{66} ve c_{12} elastik sabitleri.....	119
Tablo 6.24. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,y) düzleminde ölçülen dalga hızları ($\lambda_x=1,20$ sabit).....	120
Tablo 6.25. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,y) düzleminde $R_L, R_T=32^\circ$ de belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.....	120
Tablo 6.26. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{44} ve c_{23} elastik sabitleri	120
Tablo 6.27. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,x) düzleminde ölçülen dalga hızları.....	121
Tablo 6.28. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,x) düzleminde $R_L, R_T=32^\circ$ de belirlenen V_L ve V_{T1} hızları	121
Tablo 6.29. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{55} ve c_{13} elastik sabitleri.....	121
Tablo 6.30. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerinde elastik sabitleri	121
Tablo 6.31. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x+\lambda_z$) toplamına göre elastik sabit değerleri	125

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
T_c	: Erime sıcaklığı
σ	: Zorlama
ϵ	: Zorlanma
η	: Viskozite
G	: Makaslama modülü
τ	: Relaksasyon zamanı
λ_x	: x ekseninde yönlendirme değeri
λ_z	: z ekseninde yönlendirme değeri
λ	: Ultrasonik atma dalga boyu
J	: Sünme uyumu
E	: Young modülü
G_r	: Denge modülü
$G(t)$: Zorlama relaksasyon modülü
τ	: Relaksasyon zamanı
ρ	: Yoğunluk
c	: Elastik sertlik sabiti
s	: Elastik uyum sabiti
ϵ	: Dielektrik sabiti
k	: Dalga vektörü
μ	: Manyetik geçirgenlik
\vec{E}	: Elektrik alan
\vec{H}	: Manyetik uyarım
D	: Manyetik uyarım
$[S]$: Zorlanma matrisi
$[T]$: Zorlama matrisi
$[M]$: Bond matrisi
$[N]$: Bond matrisi
$[a]$: Ortogonal dönüşüm matrisi
$ c $: Elastik sertlik tensörü
$ c $: Elastik uyum tensörü
e_{ij}	: Piezoelektrik zorlama tensörü
V_L	: Saf boyuna dalga hızı
V_T	: Saf enine dalga hızı
r_L	: Boyuna dalga kırılma açısı
r_T	: Enine dalga kırılma açısı
$\overline{V_L}$: Saf boyuna dalga hızı ortalaması
$\overline{V_T}$: Saf enine dalga hızı ortalaması
NMR	: Nükleer manyetik rezonans

PMMA: Polimetilmetakrilat
PVC : Polivinilklorür

İKİ YÖNLÜ YÖNLENDİRİLMİŞ POLİMERLERİN MEKANİKSEL ANİZOTROPİSİNİN TEK YÖNLÜ YÖNLENDİRİLMİŞ POLİMERLERİN MEKANİKSEL ANİZOTROPİSİ CİNSİNDEN İFADESİ

A. Uğur KAYA

Anahtar Kelimeler: PMMA, PVC, Tek Yönlü Çekme, İki Yönlü Çekme, Mekanik Anizotropi, Elastik sabit, Ultrasonik Dalga Hızı.

Özet: Bu çalışmada optik uygulamalar gibi bir çok kullanım alanı olan PMMA'nın (Polimetilmetakrilat) ve yapı sektöründe sık kullanılan PVC'nin (Polivinilklorür) tek yönlü ve iki yönlü mekanik anizotropisi deneysel olarak incelenmiştir. Tek yönlü mekanik anizotropi ile iki yönlü mekanik anizotropi arasında kuramsal ilişki aranmıştır.

Ticari olarak temin edilen PMMA ve PVC, belirli çekme oranlarında özel olarak tasarlanmış bir çekme düzeneği ile sabit hızda tek yönlü ve iki çekildi. Çekilen örneklerin üç esas eksen doğrultusunda ve üç esas düzlemde dalga hızları ultrasonik spektrometre ile ölçüldü. Ölçümler 748 kHz frekansta ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Yönlendirilmiş örnek kalınlıklarının dönüştürgen çaplarından çok küçük olmasından dolayı daldırma tekniği kullanılarak her iki çekme eksenini içeren düzlemde hız ölçümü yapma zorluğu, özel bir dilimleme tekniği kullanılarak ortadan kaldırıldı. Bu hızlarla, tek yönlü çekilmiş örneklerin elastik sabitleri hegzagonal simetriye ve iki yönlü çekilmiş örneklerin elastik sabitleri ortorombik simetriye göre hesaplandı.

PVC örnekler için, her iki yönde çekme oranları toplamının fonksiyonları olarak hegzagonal yapı ve ortorombik yapı elastik sabitlerinin eşitlikleri verilmiştir. Böylece ortorombik yapı elastik sabitleri, hegzagonal yapı elastik sabitleri cinsinden çekme oranları toplamını içerecek şekilde doğrusal fonksiyonlar olarak verilmiştir.

**EXPRESSION OF MECHANICAL ANISOTROPY OF BIAXIALLY
ORIENTED POLYMERS FROM KIND OF MECHANICAL ANISOTROPY
OF UNIAXIALLY ORIENTED POLYMERS**

A. Uğur KAYA

Keywords: PMMA, Uniaxially Drawing, Biaxially Drawing, Mechanical Anisotropy, Elastic Constant, Ultrasonic Wave Velocity.

Abstract: In this study, uniaxially and biaxially mechanical anisotropy of PMMA, which is used in many areas such as optical application and PVC which is used in construction sector, were investigated experimentally. Theoretical relationship was investigated between uniaxially mechanical anisotropy and biaxially mechanical anisotropy.

Commercial PMMA and PVC were drawn uniaxially and biaxially in constant speed and temperature using a specially designed drawing system. Wave velocities of drawn samples were measured in three principal directions and three principal planes by ultrasonic spectrometer. Measurements were carried out at a constant frequency of 748 kHz and room temperature. Since the thickness of oriented samples are greater than the diameter of transducers, difficulty in measuring in each of two drawing lanes by using the immersion technique was solved by using a special slicing method. With this velocities, elastic constants of uniaxially were calculated considering hexagonal symmetry and biaxially drawn samples were calculated due to orthorhombic symmetry.

For PVC samples, elastic constants equations of hexagonal and orthorhombic structure were given as functions of sum of draw ratio in two directions. Elastic constants of orthorhombic structure were given kinds of elastic constants of hexagonal structure as linear functions including draw ratio by experimental results.

BÖLÜM 1 GİRİŞ

Günümüzde oldukça yaygın kullanım alanı bulunan polimer malzemeler, birbirlerine kovalent bağlarla bağlanmış atomların uzun molekül zincirlerinden oluşurlar. Yün reçine, ipek gibi doğal polimerlerin yanı sıra özellikle 1920'lerden sonra gelişen polimerizasyon teknikleriyle birçok yapay polimer elde edilmiştir. Düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve kimyasal ajanlara karşı dayanıklı olan polimerler, kullanım alanlarına göre, metaller gibi birçok malzemenin yerini almaya başlamışlardır. Polimerler, mekanik, elektrik, manyetik ve optik özelliklerinden dolayı bilgi saklama (manyetik bant), enerji depolanması (polimer piller), uçak camı yapımı, ve inşaat sektöründe yapı elemanları ve dekorasyon malzemeleri gibi birçok kullanım alanı bulmaktadırlar. Son yıllarda iletken polimer yapımındaki büyük gelişmeler sonucunda, polimer diodların yanı sıra piezoelektrik özellik gösteren malzemeler de üretilmiştir.

Polimer moleküllerinin fiziksel ve kimyasal yapısı, mekaniksel özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir. Molekül zincirlerinin birbirine göre düzeni (yönelme ve kristalinlik) yapının fiziksel özelliklerinin yöne bağlı değişimine neden olmaktadır. Doğal moleküllerde yönelme, oluşumları sırasında meydana gelir. Polioksümetilen ve polietilen gibi bazı polimerlerde polimerizasyon sırasında yönelme oluşumları gözlenmesine karşın birçok polimer bir takım işlemler sonucu yönlendirilebilir. En çok kullanılan yönlendirme tekniği, sıcak çekme işlemidir. Bu teknikte polimer, camsı geçiş sıcaklığı ile erime sıcaklığı arasında bir sıcaklık değerinde çekilerek yönlendirilir.

Tek yönlü yönlendirme sonucu polimerler, yönelme eksenini içeren tüm düzlemlerde mekaniksel anizotropi kazanırlar. Yönelme eksenine dik düzlem ise hemen hemen izotrop kalır. Böyle bir yapı enine izotrop olarak bilinir ve beş bağımsız elastik sabit ile betimlenir (Ward, 1971). Birçok araştırmacı, tek yönde yönlendirilmiş yapıların mekaniksel anizotropisini incelemek için değişik polimerler üzerinde çalışmışlardır.

D.W. Hadley, P.R. Pinnock ve arkadaşları polietilenteraftalat, naylon, polietilen ve polipropilen için beş bağımsız elastik sabitini, moleküler yönelmenin fonksiyonu olarak elde etmişlerdir. O.K. Chan ve arkadaşları, değişik kristalinite değerine sahip polipropilen ve polietilenteraftalat, J.G. Rider ve arkadaşları, değişik sıcaklıkta tavlansak yönlendirilmiş polietilenin elastik sabitlerini ultrasonik puls tekniği kullanarak elde etmişlerdir. Kalıplanarak katı halde biçimlendirilmiş polipropilenin mekaniksel anizotropisi K. Thomas ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Leung ve arkadaşları, yüksek düzeyde yönlendirilmiş polioksümetilenin beş bağımsız elastik sabitini ve Young modülünü sıcaklığa ve çekme oranına bağlı olarak değişimini elde etmişlerdir. F.F. Rawson ve arkadaşları yönlendirilmiş polivinilklorürün elastik sabitlerini ultrasonik daldırma tekniği kullanarak elde etmişlerdir.

Polimerlerde haddeleme (Rolling) ve bazı tek yönlü çekme işlemleri sonucu oluşan yönelme, yapıya ortorombik simetri kazandırır (Ward, 1971). Ortorombik simetri gösteren yapılar dokuz bağımsız elastik sabite sahiptir. W.B. Gupta ve arkadaşları haddelenerek tavlansak ortorombik simetridli polietilenin germe modüllerini elde etmişlerdir. Ortorombik simetri için iki yönde yönlendirilmiş polimerler üzerine haddeleme ile yönlendirme (rolling, press) gibi birçok çalışma yapılmasına karşın özellikle kontrollü çekme işlemi ile yönlendirmeye sık rastlanılmamıştır.

Bu iki tipte yönlendirme (tek ve iki yönlü) işleminden, iki yönlü yönlendirme işlemi, hem malzemelerin hazırlanması hem de yönlendirme işleminin yapılması sırasında kopma, yırtılma ya da sünme gibi deneysel zorluklar içerir. İki yönlü yönlendirme işlemi tek yönde yönlendirmeye göre daha zahmetli ve uzun bir deneysel çalışma süresi gerektirir.

Bu çalışmada, bu gibi zorlukların aşılması için tek yönlü yönlendirilmiş polimerlerin beş bağımsız elastik sabitinden iki yönlü yönlendirilmiş polimerlerin dokuz bağımsız elastik sabitini tayin etme amacı hedeflenmiştir. Bunun için, tek yönlü yönlendirilmiş örneklerin beş bağımsız elastik sabiti deneysel olarak elde edilmiş ve yine deneysel olarak elde edilen iki yönlü yönlendirilmiş polimerin dokuz bağımsız elastik sabiti ile aralarında bir matematiksel ilişki aranmıştır. Bu işlem için, tek yönlü yönlendirilen yapı, Bond matrisleri ile 90° döndürülerek yeni bir tek yönlü yönlendirilmiş yapı elde

edilmiştir. Birbirine göre tamamen dik duran iki adet tek yönlü yapıdan çift yönlü yönlendirilmiş bir yapı elde edilmiştir. Elde edilen bu yapının, iki yönlü yönlendirilmiş yapıya matematiksel benzerliği araştırılarak bir model tasarlanmıştır.

Bu çalışma için seçilen PMMA ve PVC’de hem tek yön hem de çift yön için örnekler hazırlanarak, bu örnekler için tasarlanmış bir çekme düzeneği ile istenen oranlarda yönlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2. POLİMERLERİN YAPISI

2.1. Kimyasal Yapı

Polimerlerin yapı taşı monomerdır. Monomerler kimyasal bağlarla bağlanarak uzun molekül zincirlerini oluştururlar. Polimerler, molekül zincirlerinin içerdiği monomerlerin türüne ve bunların diziliş şekillerine bağlı olarak değişik sınıflara ayrılırlar.

Tek tür monomerden oluşan polimer zinciri homopolimer, iki ya da daha fazla monomer içeren polimerler ise kopolimer olarak adlandırılırlar. En basit polimer türü, aynı cins monomerden oluşan homopolimerlerdir. Bu tür polimerler;

$X(A)_i Y$

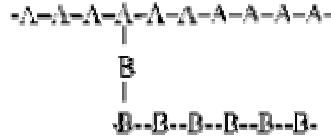
kimyasal sembolüyle gösterilirler. Burada A tekrarlanan birimi, X ve Y zincirin başında ve sonunda bulunan grupları, i birim sayısını göstermektedir. Bir homopolimer doğrusal olabileceği gibi, dallanabilir veya üç boyutlu ağ yapısı da gösterebilir (Baysal, 1981).

Kopolimerler ise genellikle farklı monomerlerin düzensiz birleşmesinden oluşarak rastgele (random) kopolimeri oluştururlar. Bununla beraber, alternatif (ardışık), blok (düzenli), graft (dallanmış) ve stereoblok kopolimerler bu kuralın dışındadır. Alternatif kopolimerde monomer birimleri birbiri ardına gelir. Blok kopolimer farklı homopolimerlerin uzun segmentlerini içerir. Dallanmış kopolimer ise asıl mevcut bir polimer zinciri üzerinde bir dallanma olarak ikinci bir monomer içerir.

-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B- Alternatif (ardaşık) kopolimer

-A-B-A-A-A-B-B-A-B-A-A-A-B-A-B-B- Random (Rastgele) Kopolimer

-A-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-B-B-B- Blok (düzenli) Kopolimer



Graft (dallanmış) Kopolimer

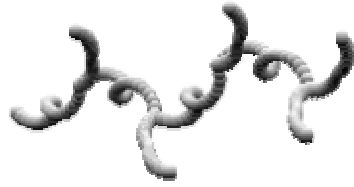
Şekil 2.1. İki monomerden meydana gelen kopolimerin değişik düzenlemeleri (Baysal, 1981)

Ayrıca polimerler doğrusal (lineer), dallanmış ve ağ olarak da tanımlanırlar. Doğrusal polimerde hiçbir dallanma yoktur (A). Graft kopolimerler dallanmış polimerlerin bir örneğidir (B). Ağ (Network) polimerler, difonksiyonlu monomerler yerine, polifonksiyonlu monomerler kullanıldığında meydana gelirler. Ağ polimerler ayrıca çapraz bağlı polimerleri de kapsarlar (C). Çünkü çapraz bağlanmayla polimer zincirleri hareketliliklerini kaybederler. Bu nedenle erimeyecekleri ya da akmayacakları için kalıpla da şekillendirilemezler (Baysal, 1981).



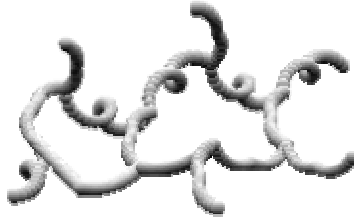
(A)

Doğrusal (Lineer) Polimer



(B)

Dallanmış (Branched) Polimer



(C)

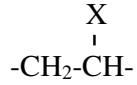
Ağ (Network) Polimer

Şekil 2.2. Polimer moleküllerinde ortaya çıkabilecek dallanma tipleri (Baysal, 1981).

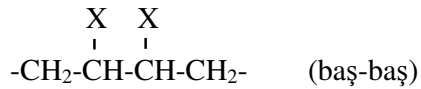
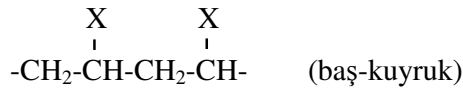
Polimerlerin bu bağlanım türleri, fiziksel özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Örneğin, doğrusal polimerler sıcaklık ve basınç altında yumuşadığı halde; çapraz bağlı ve üç boyutlu şebeke yapısına sahip polimerler iyi ısı dayanımı gösterirler (Baysal, 1981).

Polimerlerin kimyasal yapısında diğler bir karmaşıklık, tekrarlama birimi veya tekrarlama biriminin bir takımı için farklı kimyasal izomerik şekillenimlerin varlığıdır (Ward, 1971).

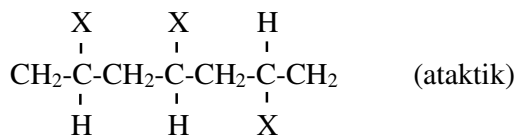
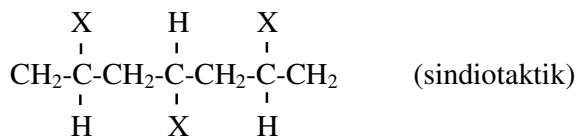
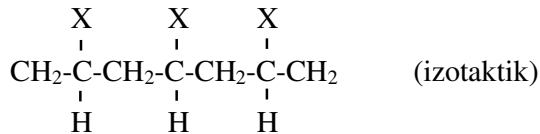
Örneğın,



vinil monomeri için,



şeklinde iki bağlanım biçimi olasıdır. Bu bağlanım şekilleri polimerlerin kristalizasyon derecesini ve böylece mekaniksel özelliğini etkileyen önemli faktörler arasındadır. Diğler karmaşık izomerizma biçimi de sterik izomerizmadır. Örneğın aynı vinil monomeri için,



şeklinde üç ayrı izomer biçimi vardır. Özellikle sindiotaktik düzenlenim, polimere kristalizasyon ve yüksek erime noktası kazandırır (Ward,1971).

2.2. Fiziksel Yapı

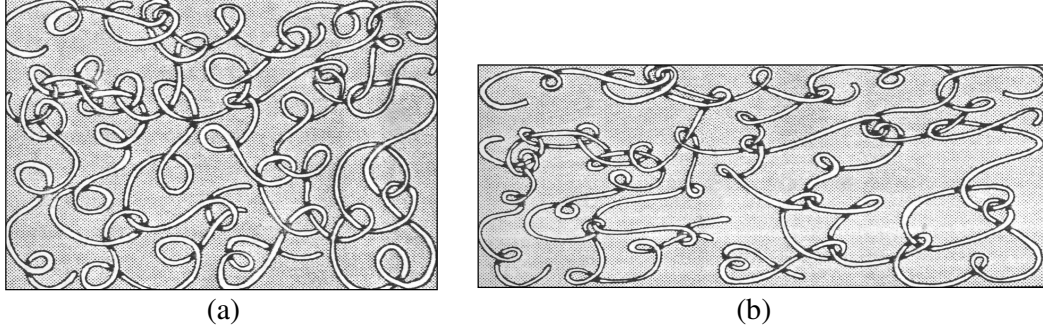
Polimerler, sahip olduğu uzun molekül zincirlerinin uzaydaki konumuna göre iki yönden incelenmelidir. Birincisi, komşu zincirlere bakılmaksızın tek bir zincirin düzenlenimi (rotasyon izomeri), ikincisi de zincirlerin birbirine göre düzenidir (yönlenme ve kristalinlik).

Yapıdaki pek çok bağın etrafında dönmelerin mümkün olmasından ötürü molekül için alternatif şekillenimler söz konusudur. Bu şekillenimler rotasyon (rotation) izomeri olarak adlandırılır. Zincirlerin bir izomerik biçiminden diğerine geçiş yapabilmesi için bir potansiyel engelinin aşılması gerekir. Bu da termal enerji ve uygulanan zorlamalarla sağlanabilir.

Molekül zincirlerinin birbirine göre düzenlenişi göz önüne alındığında iki durum ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri yönelme, diğeri de kristalinliktir. Pek çok polimer, zincir dizilişi bakımından hiçbir özellik taşımayan çok karmaşık bir yapıya sahiptir (Şekil 2.3a).

Bu tür polimerler, amorf yapıdadır. Polimetil metakrilat, polistiren bu tür polimerlere örnektirler. Böyle polimerler çekilirse molekül zincirleri çekme yönü boyunca dizilme eğilimi gösterirler. Dışardan zorlama ile az da olsa bir düzenin sağlandığı böyle polimerlere yönelmiş amorf polimerler denir.

Moleküler yönelme optik ölçümlerle gözlenebilir. X-ışını kırınım (diffraction) teknikleri, yönelmiş amorf polimer için üç boyutlu düzene ait hiçbir bilgi vermez. Yönelmiş polimerlere karışık yumakların uzaması olarak bakılabilir (Şekil 2.3b).

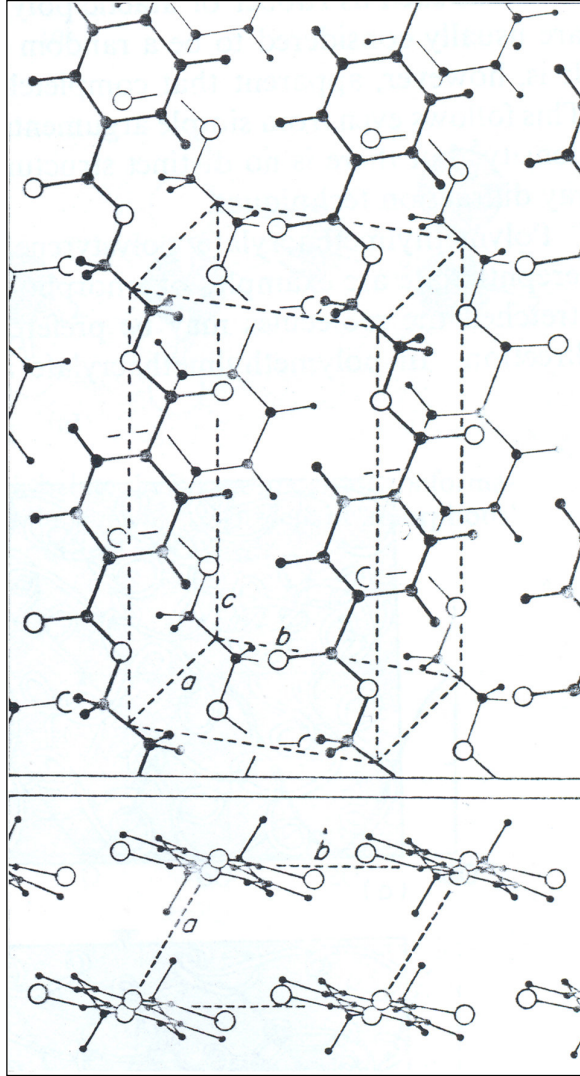


Şekil 2.3. a) Yönlendirilmemiş amorf polimer, b) Yönlendirilmiş amorf polimer (Ward, 1971).

Polimerler, polimerizasyon sırasında yönlenebildiği gibi, yönelmenin oluşturulması için en genel uygulama tekniği soğuk çekme işlemidir. Bu yöntemde polimer, cam geçiş sıcaklığı üzerinde, fakat erime sıcaklığının altında çekilir.

Bazı polimerler çekildiklerinde moleküler yönelmenin yanı sıra küçük yerel (local) lamel kristalleri de oluşabilir. Bu davranış, dizilmiş moleküllerin yan yana gelerek uygun üç boyutlu bir yerleşim almalarıyla açıklanabilir. Pek çok polimer kristallendirilebilir.

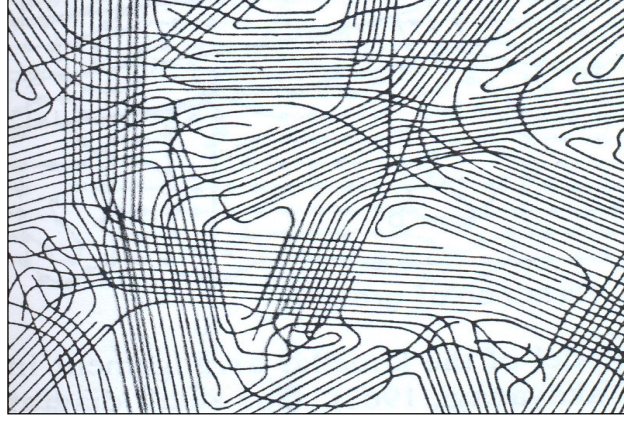
Örneğin, polietilenteraftalat içeren polimer eriyiği yavaşça soğutulursa kristalize olur. Böyle örnekler makroskobik anlamda yönlendirilmemişlerdir. Yani, yapı isotrop mekaniksel özelliğe sahiptir. Kristalin bölgelerin kristal yapıları x-ışını teknikleriyle elde edilirler (Fava, 1980). Şekil 2.4, polietilenin kristal yapısını göstermektedir.



Şekil 2.4. Polietilenteraftalat'ın kristal yapısı (Ward, 1971).

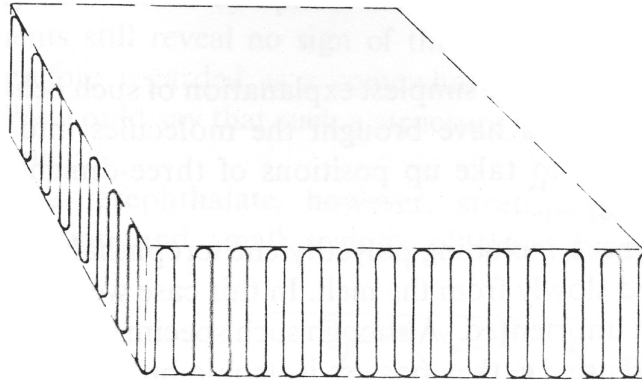
Kristalin polimerler x-ışınları altındaki kesikli yansımalara ek olarak çok geniş difuze saçılma gösterirler. Difuz saçılmalar amorf bölgelerden kaynaklanmaktadır. Yarı kristalin polimerlerde hem kesikli yansımaların hem de difuz saçılmaların gözlenmesi, kristalin polimerler için yeni bir yapı modelinin ortaya konmasına neden olmuştur.

Molekül zincirlerinin düzensiz amorf bölgeden düzenli kristalin bölgeye geçiş yaptıklarını ifade eden bu modele saçaklanmış misel (fringed micelle) modeli adı verilir. Şekil 2.5, bu modelin temsili resmini göstermektedir.



Şekil 2.5. Yarı kristalin polimerlerde saçaklı misel yapısı (Ward, 1971).

Bu model, seyreltilmiş polimer çözeltisinden büyütülmüş polimer kristalleri içinde molekül zincir kıvrımlarının keşfi ile önemli düzeltmelere uğradı (Fischer, 1957, Keller, 1957, Till, 1957). Örneğin, polietilen sıvı halden kristalize edildiğinde 10-20 mikron genişliğinde ve 100°A kalınlıklı tek kristal lamelleri oluşmaktadır. Elektron kırınımı deneylerinin, molekül zincirlerinin lameller yüzeyine yaklaşık olarak dik olduğunu göstermesi, 1000°A mertebesinde uzunluğa sahip molekül zincirlerinin, kristal içinde ileri ve geri katlanabildiğinin bir kanıtı olmuştur. Şekil 2.6, katlanmış zincir yapısını göstermektedir.



Şekil 2.6. Katlanmış zincir lamel yapısı (Ward, 1971).

BÖLÜM 3. POLİMERLERİN MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİ

3.1 Mekanik Davranışın Farklı Tipleri

Polimerleri, zorlama miktarı, sıcaklık ve yük uygulama oranı gibi nedenlerden dolayı bir camsı katı ya da viskoz bir sıvı olarak belirli bir malzeme tipinde sınıflandırmak oldukça güçtür.

Bir polimer, ölçümün zaman aralığı ve sıcaklığına bağlı olarak bir viskoz sıvı, elastik bir kauçuk (lastik), kırılğan bir katı ya da bir camsının tüm özelliklerini gösterebilir. Polimerler genelde, elastik katılarla viskoz sıvılar arasında bir orta konumda viskoelastik davranış gösteren malzemeler olarak tanımlanır. Ölçümün düşük sıcaklıkları ya da yüksek frekanslarında bir polimer, 10^{10} - 10^{11} dyn/cm² Young modülü ile bir camsı gibidir ve % 5 in üzerindeki zorlamalarda kırılır. Yüksek sıcaklıklar ya da düşük frekanslarda aynı polimer, 10^7 - 10^8 dyn/cm² Young modülü ve yaklaşık %100 uzama ile kalıcı olmayan deformasyonlarla lastik gibidir. Daha yüksek sıcaklıklarda yük altında kalıcı deformasyon oluşur ve polimer, viskoz sıvı gibi davranır. Orta sıcaklık ve frekans aralığında (genelde camsı geçiş oranı olarak adlandırılır) polimer ne camsı ne de lastik benzeridir. Orta seviyede modüle sahiptir ve viskoelastik davranış gösterir. Örneğin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak tanımlanan bir sıcaklıkta, yapıdaki genişleme hacim katsayısında bir değişime neden olur. Camsı geçiş olarak tanımlanan bu bölge iki nedenden dolayı mekanik davranışının merkezinde yer alır. Bunlardan ilki, T_g camsı geçişiyle viskoelastik davranışın zaman-sıcaklık dengesine bağımlılığının olması, ikincisi de camsı geçişlerin, NMR ve dielektrik relaksasyon gibi tekniklerle moleküler bir seviyede incelenebilir olmasıdır. Bu yolla, viskoelastisitenin, moleküler orijinini anlamak mümkündür (Ward, 1971).

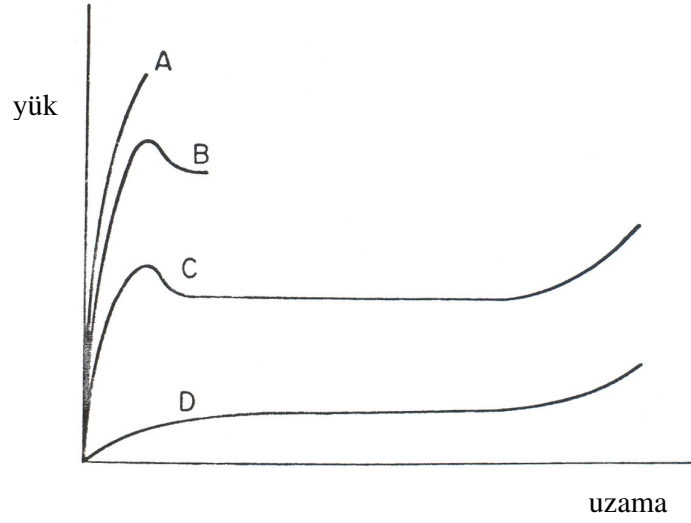
Polimer davranışının, sünme (creep) ve geri alma (recovery), gevrek kırılma, boğumlanma (necking) ve soğuk çekme gibi farklı özellikleri farklı polimerlerin karşılaştırmalı çalışmalarıyla ayrı ayrı ele alınmıştır.

Oda sıcaklığında benzer davranış gösteren PMMA, polisitiren ve diğer polimerlerin gevrek kırılmasını mukayese etmek mümkündür. Benzer bir şekilde polietilen polipropilen ve diğer polyolefinlerin sünme-geri alma özellikleri incelenmiştir. Böyle çalışmalar, sıcaklığın değişmesiyle olayın tümünü tek bir polimerle göstermenin genelde ne kadar zor olduğunu gösterir. Şekil 3.1 dört farklı sıcaklıkta polimerin yük-uzama eğrilerini gösterir.

Camsı geçişin altındaki sıcaklıklarda (A eğrisi) gevrek kırılma oluşur, artan uzamayla yük kırılma noktasına kadar çıkar, %10 gibi düşük uzamalarda kopma gözlenir. Yüksek sıcaklıklarda (D eğrisi) polimer, lastik benzeri olur ve yük-uzama ile ilişkili bir sigmoidalle kırılma noktasına çıkar ve % 30-1000 gibi yüksek uzamalarda kopma oluşur.

Camsı geçişin üzerinde orta sıcaklık bölgesinde (B eğrisi) yük-deformasyon ilişkisi, kopmadan önce bir bükülme noktası göstererek sünek bir metale benzer. Camsı geçişin altında biraz daha yüksek sıcaklıklarda (C eğrisi) boğumlanma ve soğuk çekme davranışı gözlenir.

Geleneksel bir yük-uzama eğrisi bir bükülme noktasını ve ardından zorlamada bir düşüşü gösterir. Bununla birlikte uygulanan zorlanmada aşırı bir artışla, yük, deformasyonun %300-1000 mertebelerinde olduğu sabit bir değere düşer. Bu safhada numunede boğumlanma (ya da boyun oluşumu) oluşur ve numunedeki zorlama düzgün değildir. Bu noktada yükleme tekrar yükselmeye başlar ve kırılma oluşur.



Şekil 3.1. Bir polimerin farklı sıcaklıklardaki davranışı (Ward 1971).

3.2. Elastik Katı ve Polimerlerin Davranışı

Mekanik davranış, yükleme altında oluşan deformasyonla ilişkilidir. Herhangi bir özel durumda deformasyonlar, örneğin geometrik şekil yada hangi yolla yük uygulandığı gibi detaylara bağlıdır. Bu tip konular, belirli bir kullanımdaki polimerin performansını belirleyen plastik mühendisliğinin alanına girer. Bu nedenle, pratik uygulamalardaki çözümler yerine, genelleştirilmiş denklemlerle ifade edilmiş belirli bir tipte malzemenin zorlanma ve zorlama ile ilişkili kuramsal bağıntıları incelenmiştir. İlk olarak mekanik davranışın uygun bir tanımını veren kuramsal bağıntıları incelemek yeterlidir. Ardından mümkün olduğu kadar kuramsal bağıntıları belirleyen bir moleküler modelle, davranışın moleküler anlamını belirtmek gerekir. Bir ideal elastik katının tek yönlü deformasyonu için σ zorlanması ile e zorlaması arasındaki ilişkiyi veren en basit kuramsal bağıntı Hooke yasasıdır (Ward 1971).

$$\sigma = Ee \quad (3.1)$$

Burada E Young modülüdür.

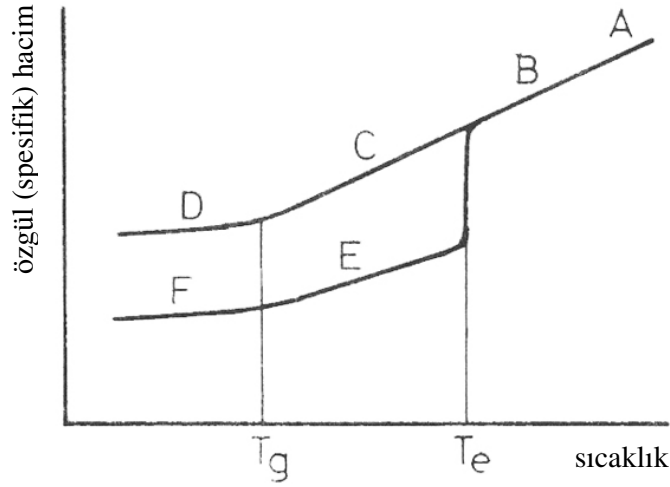
Hooke yasasına uyan elastik bir katının mekanik davranışından, polimerlerin mekanik davranışı beş konuda farklılık gösterir. Birincisi, yükleme altındaki elastik

bir katının deformasyonu, yükleme uygulamalarının oranı ya da geçmişinden bağımsızdır. Oysa polimer deformasyonları bu uygulamalardan güçlü bir şekilde etkilenir. Polimer için kuramsal bağıntı, zorlanma ve zorlamaya ek olarak zaman ya da frekans değişkeni içermesi gerekir. İkincisi, elastik bir katıda zorlanma ve zorlamayla ilgili tüm durumlar tersinirdir. Böylece eğer bir zorlanma uygulanırsa belirli bir deformasyon oluşur. Bu zorlanma ortadan kalktığında deformasyon da tam olarak ortadan kalkacaktır. Polimerlerde bu durum tam olarak doğru değildir. Üçüncüsü, küçük zorlama elastisite teorisi temeli olan daha genel anlamlarda Hooke yasasına uyan elastik bir katıda gözlenen tepkiler, uygulanan etkilere doğrusal olarak (lineer) bağlıdır. Bu, Hooke yasasının temelidir ve zorlama, zorlanmayla tam olarak orantılıdır. Elastik katılar için ifade geçerli iken, polimerlerde bu yaklaşım tam olarak geçerli değildir. Bununla birlikte oldukça düşük zorlamalarda, bu yaklaşım geçerliliğini korur. Metallerin tersine, polimerler, herhangi bir kalıcı deformasyon olmaksızın orantılı bir limite doğru, tekrar eski halini (recovering) alabilir.

Dördüncüsü Hooke yasasında zorlama ve zorlanma tanımları, sadece küçük deformasyonlar için geçerlidir. Daha büyük deformasyonlar dikkate alındığında, zorlama ve zorlanmanın daha genel tanımlandığı yeni bir teori geliştirilmelidir. Sonuçta birçok pratik uygulamada (filmler ve sentetik fiberler) polimerler, Hooke yasasının genelleştirilmiş bir formunu gerektiren yönlendirilmiş ya da anisotropik bir şekilde kullanılır.

3.3. Polimerlerin Termal Davranışları ve Camsı Geçiş Sıcaklığı

Doğrusal bir polimer, yeterince yüksek sıcaklıklarda amorf kauçuksu bir eriyiktir. Yumak görünümündeki polimer zincirleri, rahatlıkla dönme ve bükülme hareketlerini gerçekleştirir. Aynı polimer çok düşük sıcaklıklarda ise sert bir katıdır. Erimiş bir polimerin soğutularak katılaşması iki farklı şekilde olur. Bunlardan biri camsılaşma, diğeri de kristallenmedir. Düzenli moleküler yapıya sahip bir polimerin hacim sıcaklık davranışları Şekil 3.2'de gösterilmektedir (Baysal 1981).



Şekil 3. 1. Kristallenebilen bir polimerde hacim-sıcaklık eğrileri (A) sıvı bölgesi, (B) bir miktar esneklik gösteren sıvı, (C) kauçuksu bölge, (D) camsı bölge, (E) lastiksi bölge, (F) camsı yapı içerisinde kristalin bulunan bölge (Baysal, 1981).

Erimiş haldeki bir polimer yavaşça soğutulursa T_e erime sıcaklığının biraz altındaki sıcaklıklarda kristallenme başlar ve içerisinde amorf madde içeren kristalin polimer elde edilir. Aynı polimerin hızla soğutulması halinde kristallenme olmaksızın erime sıcaklığının altına inilebilir. Bu durumda yarı kararlı hızlı soğumuş amorf polimer elde edilir. Sıcaklığın belli bir kritik değerin (T_g) altına düşürülmesiyle polimer sert kırılğan camsı hal alır. T_g camsı geçiş sıcaklığı olarak adlandırılır

Polimer zincirlerinin, kopolimerlerde olduğu gibi çeşitli yapı birimlerinden oluşması halinde, zincir parçalarının tek bir kristal örgüsüne yerleşebilmeleri olanaksızdır. Böyle polimerler ABCD eğrisini izlerler. Bir polimerin her iki termal geçişi (T_e , T_g) yada sadece bunlardan birini göstermesi, tamamen morfolojisine bağlıdır. Tamamen amorf polimer sadece (T_g) geçişi gösterirken, tümüyle kristal bir polimer ise sadece (T_e) geçişi gösterir. Polimerlerin çoğu T_e sıcaklığında bir miktar kristallendikleri için genellikle her iki geçiş sıcaklığını da gösterirler (Baysal, 1981).

Camsı geçiş sıcaklığının altında, polimerlerin amorf yada kristalin bölgelerindeki zincirlerde yer alan atomlar, ötelenme, titreşim ve makaslama gibi hareketleri gerçekleştirebilirken, polimer zincirleri eğilip-bükülme tarzı hareketler yapamazlar. Bundan dolayı polimer zincirleri dış etkilerle biçimlerini değiştiremezler ve aşırı

zorlanma durumunda ise kırılırlar. Amorf bölgelerdeki zincirlerin kimyasal bağlar etrafında dönmesi için gereken enerji camsı geçiş sıcaklığına ulaşıldığında karşılanabilir ve böylece polimer zincirleri eğilip-bükülme hareketi yapabilirler.

Yarı-kristalin polimerlerde kristalin bölgelerin varlığından dolayı, makaslama ve koparma gibi bir dış etki uygulanmadığı sürece zincirler erime noktasına kadar birbirlerinden ayrılmazlar. Bu nedenle, yarı-kristalin polimerler camsı geçiş ve erime sıcaklıkları arasında esnek termoplastik davranış gösterirler.

Tümüyle amorf polimerlerde, camsı geçiş sıcaklığı geçildikten sonra sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak zincir hareketliliği kademeli olarak artar. Polimer, kauçuk, zamksı davranışlar üzerinden geçerek yeterince yüksek sıcaklıklarda sıvı hale geçer (Saçak 2002).

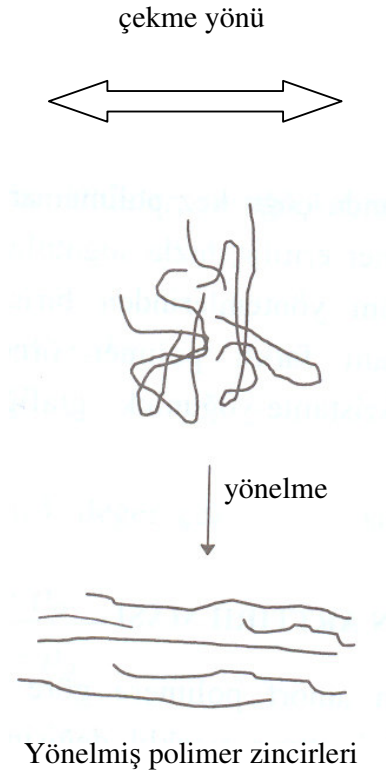
Polimerlerin genel özellikleri ve kullanım yerleri camsı geçiş sıcaklıkları ile yakından ilişkilidir. Polimerin kullanıldığı sıcaklık, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde ise dış etkiler zincir hareketleri ile karşılanarak enerji polimer örgüsü üzerine dağıtılabilir. Alışveriş poşetlerinin yapımında kullanılan polietilen bu tip bir polimerdir.

Cam geçiş sıcaklığı, serbest hacim kavramı üzerinden de açıklanabilir. Polimerin kırılğan yapıdan yumuşak bir yapıya geçebilmesi için, zincir etrafında eğilip-bükülme hareketlerini gerçekleştirebilecekleri bir hacme gereksinimleri vardır. Serbest hacim, toplam polimer hacmi içinde, zincirlerin kendi hacimleri dışında kullanabilecekleri diğer boş yerlerin tamamı anlamındadır. Başka bir ifadeyle, toplam polimer hacmi içerisinde polimer molekülleri tarafından kullanılmayan hacimdir.

Serbest hacmin sayısal değeri, toplam polimer hacminin yaklaşık % 2.5'ine ulaştığında, polimer zincirleri eğilip-bükülebilirler. Buna göre camsı geçiş sıcaklığı, serbest hacmin, toplam polimer hacminin % 2.5'ine karşılık geldiği sıcaklık olarak da tanımlanır. Serbest hacim için verilen sayı yaklaşık bir değerdir ve polimerden polimere değişebilir.

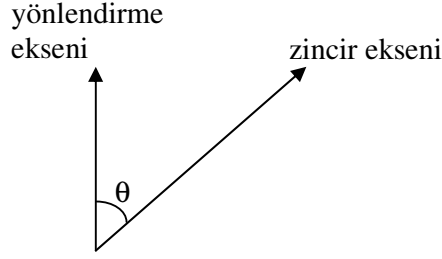
3.4. Yönelmiş Polimerlerin Elastik Özellikleri

Yönelme, polimer zincirlerinin tercihli bir eksen boyunca birbirlerine paralel olacak şekilde düzenlenme eğilimleri olarak tanımlanır (Şekil 3.3). Yönelme ile polimer zincirleri birbirlerine yaklaşması sonucu zincirler arası ikincil etkileşimler artar ve kristalin polimerlerde yönelme ile kristalinite yükselir (Saçak 2002).



Şekil 3.3. Polimer zincirlerinin çekme kuvveti altında kalıcı yönelmesi (Saçak, 2002).

Tek yönlü yönlendirmede molekül zincirlerinin yönelme dağılımı, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, yönelme eksenini ve zincir eksenleri arasındaki açının fonksiyonu ile tanımlanır (Fava, 1980).



Şekil 3.4. Yönelmenin tanımı (Fava 1980).

Polimerler, genelde az veya çok hem amorf hem de kristalin fazı içerdiklerinden, yönelmenin tam bir analitik tanımını yapmak zordur. Kristal fazın yönelim dağılımı x-ışını kırınımı deneylerinden elde edilebilir. Amorf fazın yönelimini tam olarak veren bir teknik yoktur. Ancak amorf yönelim,

$$f = \frac{P_p - P_d}{P_p^0 - P_d^0} \quad (3.2)$$

şeklinde bir yönelim fonksiyonu ile ifade edilebilmektedir. Burada P_p ve P_d yöne bağlı bir fiziksel büyüklüğün, yönelme yönünde ve ona dik yönde ölçülen değerlerini göstermektedir. P_p^0 ve P_d^0 ise yöne bağlı değişen fiziksel büyüklüğün, molekül zincirleri tamamen yönelmiş olduğunda alacakları değerleri göstermektedir. Böylece, f tamamen yönelmiş haldeki molekül zincirlerin kesrini, $1-f$ ise rasgele yönelmiş molekül zincirlerin kesrini verecektir. Yönelme fonksiyonunun hesaplanabilmesi ve bunun yönlendirme miktarı ile değişiminin gözlenmesi için pek çok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan spektroskopik tekniklere örnek olarak x-ışını kırınımı, çift kırıcılığın ölçümü, infrared dicroism, ve NMR verilebilir (Fava, 1980, Ward 1971, Lee ve diğ. 1988, Kaito ve diğ. 1988, Kretz ve diğ. 1988, Mirabella, 1987, Rawson ve diğ. 1974).

Yönlendirilmiş polimerlerin göstereceği simetri ile tek kristal yapıların simetrisi arasındaki fark önemlidir. Polimerlerde yönelme ile oluşan anizotropi, tamamen yönlendirme biçimine bağlıdır. Özellikle her türlü yönlendirme ile oluşan

anizotropinin belli bir simetriye sahip olacağını beklemek yanlış olur. Çünkü, amorf yapılı katı polimerlerdeki anizotropinin esas kaynağı, molekül zincirlerinin yöne bağlı düzenlenimleridir. Bu düzenlenim, makroskobik anlamda yapının tümünde bir simetriyi sağlayacak şekilde ise ancak o zaman simetriden söz edilebilir. Yönlendirilmiş polimerlerin simetrisi kristal simetri ile karıştırılıp, sanki yönlendirme işlemi ile malzemenin kristal yapıya dönüştüğü şeklinde yanlış bir yorumlama yapılmamalıdır.

Yönlendirilmiş polimerlerde sözü edilen simetri, yönlendirme eksenleri ile tanımlanan makroskobik yapı için geçerlidir. Böyle yapılarda, makroskobik yapı ile aynı simetriyi gösteren en küçük yapı birimi, esas yapı ile aynı molekül zincir yönelimine sahip olmalıdır. Birkaç molekül zincirinden oluşan en küçük yapı birimi için böyle bir simetriden söz edilemez. Oysa, tek kristal katılarda, katının makroskobik anlamda gösterdiği simetri ile katının en küçük yapı birimi olan birim hücrelerinin gösterdiği simetri aynıdır.

Yönlendirilmiş polimerlerdeki anizotropinin sahip olabileceği simetri, ancak makroskobik anlamda gözlenebilir. Örneğin, katı polimerler tek yönlü yönlendirme ile enine izotrop elastik simetri kazanırlar. Böyle bir yapıya makroskobik anlamda bakıldığında, yönelme eksenini içeren tüm düzlemlerde aynı anizotropiye sahip oldukları, yönelme eksenine dik düzlemlerin ise izotrop kaldığı görülür.

Bu özelliklerin, hegzagonal simetrik kristallerinki ile aynı olması nedeniyle böyle bir yapının elastik özellikleri beş bağımsız elastik sabit ile belirlenir. Aynı şekilde yapının ortorombik elastik simetri göstermesi demek, yapının elastik özellikleri, ortorombik kristal yapılı katılardaki gibi dokuz bağımsız elastik sabitiyle belirlenebilmesi demektir (Güney, 1989).

3.5. Polimerlerde Viskoelastik Davranış ve Mekaniksel Relaksasyon

3.5.1. Viskoelastik davranış

Elastik katı belirli bir şekle sahiptir ve bir dış kuvvetle şekli bozularak yeni bir denge şeklini alır. Bu dış kuvvetlerin kaldırılması durumunda cisim, tam olarak orijinal şeklini yeniden alır. Katı, şekil değiştirme sırasında dış kuvvetlerle yapılan işten elde edilen tüm enerjileri depolar. Bu enerji, kuvvetler ortadan kaldırıldığında cismin tekrar eski halini almasını sağlar. Diğer yandan viskoz bir sıvı, belirli bir şekle sahip değildir ve dış kuvvetler altında tekrar geri dönmeyecek şekilde akma gösterir. Polimerler, viskoz sıvılar ile elastik katılar arasında orta bölgede yer alırlar.

3.5.2. Lineer viskoelastik davranış

Viskoziteyi tanımlayan Newton'un viskozite yasası, sıvı içinde σ zorlamasının (stress), hız gradyentiyle doğru orantılı olduğunu ifade eder .

$$\sigma = \eta \frac{\partial V}{\partial y} \quad (3.3)$$

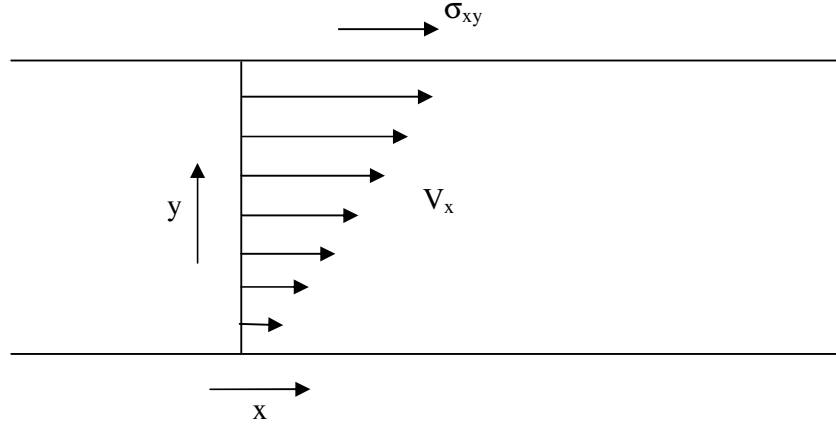
Burada V hız, η viskozite ve y ise hız gradyentinin yönüdür.

xy düzleminde zorlama bileşeni,

$$\sigma_{xy} = \eta \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada $\frac{\partial V_x}{\partial y}$ ve $\frac{\partial V_y}{\partial x}$ sırasıyla y ve x yönlerinde hız gradyentidir (Şekil 3.5, y yönündeki hız gradyentini gösterir).



Şekil 3.5. Hız gradyenti (Ward, 1971).

$V_x = \frac{\partial u}{\partial t}$ ve $V_y = \frac{\partial v}{\partial t}$ olduğundan u ve v , sırasıyla x ve y yönünde yer değiştirmelerdir.

$$\sigma_{xy} = \eta \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) \right] = \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \eta \frac{\partial \epsilon_{xy}}{\partial t} \quad (3.5)$$

Görüldüğü üzere, makaslama zorlaması (σ_{xy}), makaslama zorlanmasının zamanla değişimiyle orantılıdır. Orantı katsayısı ise viskozluğu ifade eder. Dikkatle bakıldığında, zorlama ve zorlanma arasındaki bu ilişki, diğer elastik katılardaki ilişkiden farklıdır. İdeal elastik katılarda zorlama, zorlanmanın kendisiyle doğru orantılıken (Hooke yasası) viskoz sıvılarda zorlanmanın zamanla değişimiyle orantılıdır (Ward 1971).

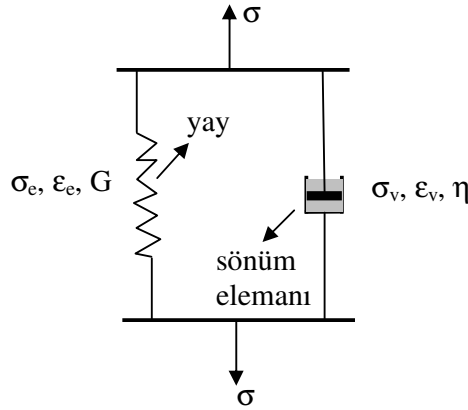
Lineer viskoelastik özellik gösteren maddelerde, zorlama-zorlanma ilişkisi, Voigt veya Kelvin modeli için Denklem 3.6 ile verilir. Bu denklem, viskoelastik davranışın basit bir modelini göstermektedir.

$$\sigma_{xy} = (\sigma_{xy})_E + (\sigma_{xy})_V = G\epsilon_{xy} + \eta \frac{\partial \epsilon_{xy}}{\partial t} \quad (3.6)$$

Burada $(\sigma_{xy})_E$ elastik davranışı, $(\sigma_{xy})_V$ viskos davranışı temsil ederken, G makaslama modülü olarak ifade edilir.

Voigt veya Kelvin modeli, viskoelastik malzemelerin davranışını belirlemek için öne sürülen modellerden en basit olanıdır. Bu model, bir yay ve bir sönüm elemanını (amortisör) içermektedir. Yay, malzemenin elastik özelliğini, sönümleme elemanı ise viskoz özelliğini yansıtmaktadır.

Malzemenin sünme davranışını ifade eden Voigt veya Kelvin modelinde, yay ve sönüm elemanı birbirine paralel bağlıdır (Şekil 3.6). Sisteme dışardan bir kuvvet uygulandığında, elemanlarda meydana gelen zorlanmalar eşittir ($\epsilon = \epsilon_e = \epsilon_v$). Sistemdeki zorlama ise, elemanlarda meydana gelen zorlamaların toplamıyla ifade edilir ($\sigma = \sigma_e + \sigma_v$).



Şekil 3.6. Voigt veya Kelvin modeli (Ward 1971).

Yay ve sönüm elemanı için zorlama (σ) ve zorlanma (ϵ) arasındaki ilişkiler sırasıyla

$\sigma_e = G\epsilon_e$ ve $\sigma_v = \eta \frac{d\epsilon_v}{dt}$ şeklindedir. ($\epsilon = \epsilon_e = \epsilon_v$) ve ($\sigma = \sigma_e + \sigma_v$) ifadelerinden

yaralanarak $\sigma = G\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$ elde edilir (Ward, 1971).

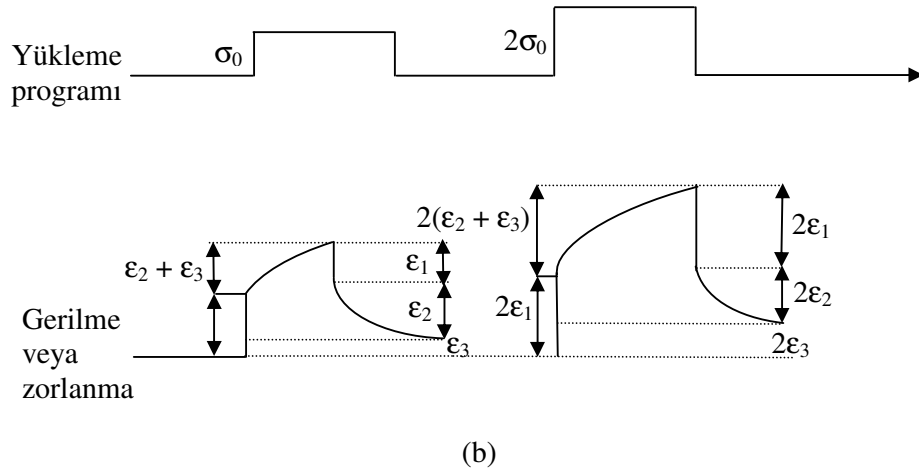
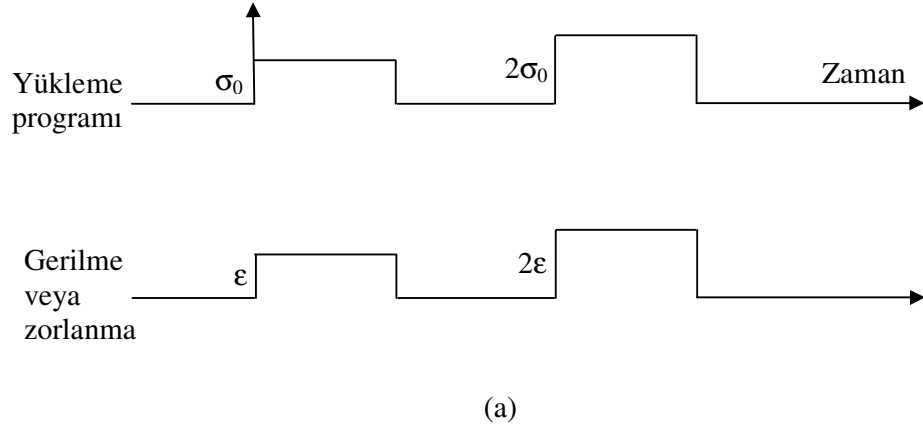
Lineer viskoelastik davranış üzerine yapılan deneysel çalışmaların çoğu, Young modülü veya makaslama modülü ölçümlerine karşılık gelen şekil değişiminin tek bir biçimiyle sınırlıdır. Genelde lineer viskoelastik özellikle ilgili tartışmalar, tek boyutlu modeller üzerinde yapılmaktadır. Tam bir viskoelastik davranışı ifade edebilmek için daha kompleks tanımlamalar gereklidir.

Elastik bir katıda temel bağıntıların tanımlanmasında, zorlanmaların küçük olduğu, zorlama ve zorlanma arasında lineer ilişki olduğu varsayılır. Viskoelastik malzemelerde zamana bağlı şekil değişimi söz konusu olduğundan, genel bağıntıların daha da geliştirilmesi gerekmektedir (Ward 1971).

3.5.3. Sünme

Lineer viskoelastik davranışın tartışılmasında sabit bir yükleme altında tek boyutlu sünme halini göz önüne alalım. Elastik bir katı için σ_0 ve $2\sigma_0$ zorlamalarına karşılık gelen şekil değişimleri, şekil 3.7a'da görülmektedir. Şekil 3.7a'dan görüldüğü gibi, oluşan zorlanma ile zorlama tam olarak doğru orantılıdır.

Aynı yükleme programının lineer viskoelastik katıya uygulanması ile oluşan zorlanma ise Şekil 3.7b'de gösterilmiştir. Toplam zorlanma ϵ , anlık şekil değişimi ϵ_1 , gecikmiş (delayed) elastik şekil değişimi ϵ_2 ve ϵ_3 ise, Newton'un viskozluk yasasına uyan bir sıvının şekil değişimine özdeş bir şekil değişimine karşılık gelen Newton akmasını temsil eder. ϵ_1 ve ϵ_2 sırasıyla anlık ve deformasyondur. ϵ_3 ise Newtonian akması olarak adlandırılan, viskozitenin Newton yasasına uyan bir viskoz sıvının deformasyonu ile tanımlanan deformasyon kısmıdır.



Şekil 3.7. a) Elastik bir katının şekil değişimi, b) Lineer viskoelastik bir katının deformasyonu (Ward 1971).

Örnek, lineer davranış sergilediğinden zorlamanın ϵ_1 , ϵ_2 ve ϵ_3 genlikleri, uygulanan zorlamanın genliği ile tam orantılıdır. Bu basit yüklemeye deneyi, sadece zamanın fonksiyonu olan $J(t)$ sünme uyumunu öngörmektedir (Denklem 3.7).

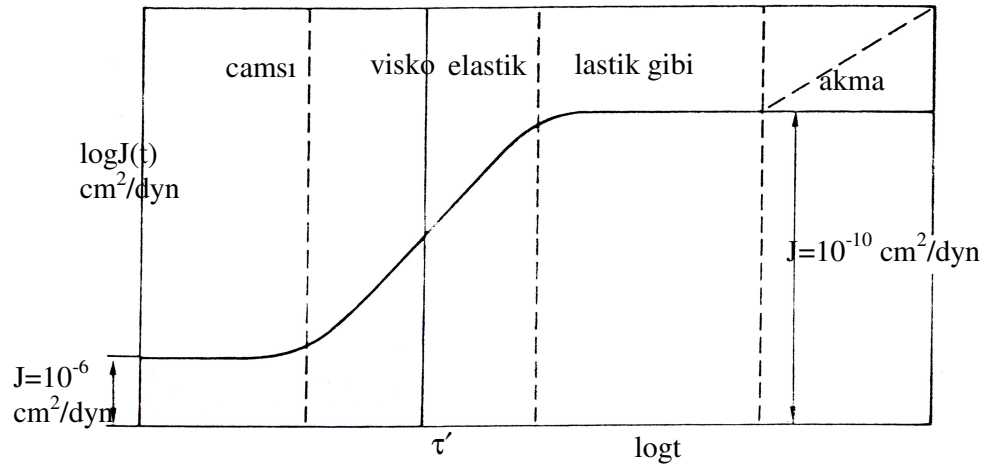
$$\frac{\epsilon(t)}{\sigma} = J(t) = J_1 + J_2 + J_3 \quad (3.7)$$

Burada J_1 , J_2 ve J_3 sırasıyla ϵ_1 , ϵ_2 ve ϵ_3 'e karşılık gelir.

Katı polimerlerin oda sıcaklığında çok büyük viskozitelerinden dolayı Newtonian akmasını ifade eden J_3 terimi, ihmal edilebilir. Lineer amorf polimerler camsı

geçişlerinin üzerindeki sıcaklıklarda sonlu bir J_3 değerine sahiptirler, fakat daha düşük sıcaklıklardaki davranışlarında J_1 ve J_2 terimleri baskındır. Çapraz bağlı polimerlerde J_3 terimi görülmez, ancak kristalin oranı yüksek polimerlerde de çok iyi bir yaklaşıklık durumunda geçerlidir. Elastik ve gecikmiş tepkiler arasında gerçek bir ayırım söz konusudur. Bazı makalelerdeki sünme deneylerinde anlık elastik tepki, oluşumuna değişik relaxasyon mekanizmalarının neden olduğu ve yeterince uzun bir sürede gözlenebilen gevşemiş (relaxed) tepkiden ayırt etmek için gevşememiş (unrelaxed) tepki olarak isimlendirilir.

Şekil 3.8, yalnızca tek relaxasyon geçişli ideal bir amorf polimer için, geniş bir zaman eşeli üzerinde sabit bir sıcaklıkta uyumun değişimini göstermektedir. Şekil 3.8'den görüldüğü gibi, çok kısa süren (büyük frekans) deneyler için 10^{-10} cm^2/dyn 'lik bir uyum gözlenmektedir ve polimer camsı bir katı gibi davranmaktadır. Çok uzun süren (küçük frekans) deneyler için uyum, 10^{-6} cm^2/dyn düzeyindedir ve polimer bir lastik katı gibi davranır. Camsı bölgede olduğu gibi, bu bölgede de uyum zamandan bağımsızdır. Orta düzeyli zamanlarda (orta frekans) ise uyum zamana bağlıdır ve sayısal olarak bu iki değer arasında kalmakta ve polimer viskoelastik bir katı davranışı sergilemektedir.



Şekil 3.8. Zamanın bir fonksiyonu olarak $J(t)$ sünme uyumu. τ' ise, karakteristik (geciktirme) zamandır (Ward, 1971).

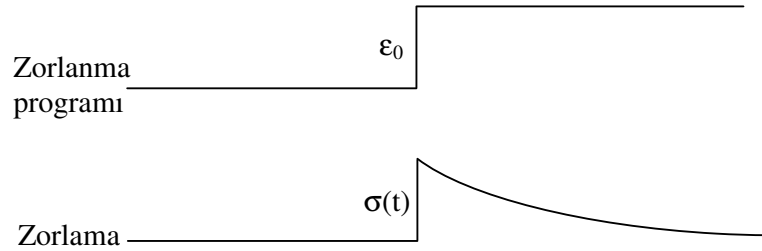
Bu tartışmalar, polimerlerin davranışında gözlem süresinin önemli olduğunu ve deneyin zaman eşelinin davranış biçimini doğrudan belirlediğini göstermiştir.

Yapılacak deneyin zaman eşelinde, her polimer için temel bir parametre söz konusudur. Sünme için bu parametre, τ' gecikme süresi olarak adlandırılır ve diyagramda zaman eşelinin orta bölgesine düşer.

Polimerlerde sıcaklığın etkisinin anlaşılmasında, τ' 'nün sıcaklığa bağlılığının bilinmesi önemlidir. Sıcaklığın artması ile moleküler yeniden düzenlenim frekansı artmaktadır. Bu durumda, çok düşük sıcaklıklarda bir lastik camsı katı gibi davranırken, çok yüksek sıcaklıklarda yumuşak bir lastik gibi davranır (Ward 1971).

3.5.4. Zorlama (Stress) relaksasyonu

Sabit bir ϵ zorlanması (strain) altındaki polimerin davranışında, zorlamanın ($\sigma(t)$) zamana bağlı değişimini göz önüne alalım (Şekil 3.9). Herhangi bir sistemin dengede olmadığı bir durumdan denge durumuna geçişi, relaksasyon olarak adlandırılır.

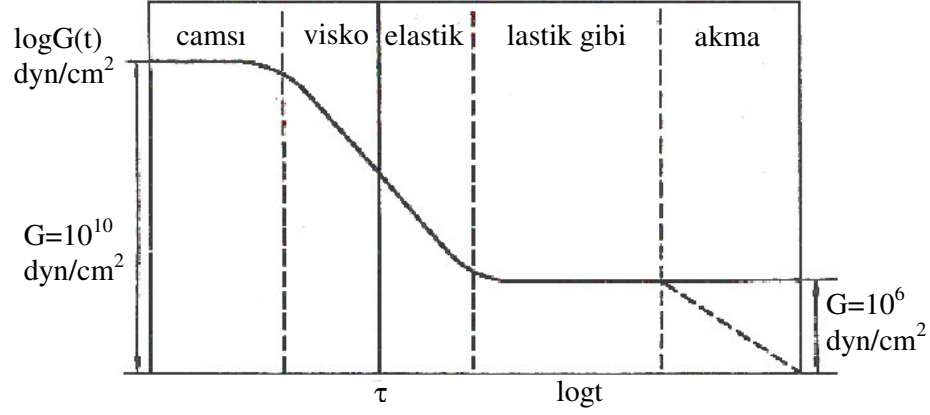


Şekil 3.9. Zorlama relaksasyonu (Ward 1971).

Doğrusal davranış, zorlama relaksasyon modülünün zorlama ile zorlanma arasındaki doğrusal bağımlığı gösterir ($G(t) = \sigma(t)/\epsilon$). Zorlama relaksasyonunda viskoz akışın varlığı, zorlamayı sınırlayan değeri etkiler.

Viskoz akış durumunda (oldukça uzun zaman sonra) zorlama sıfır değerine ulaşır. Zorlama, belirli bir değerde sabit kaldığında viskoz akıştan bahsedilemez ve sonsuz zamanda gevşemiş (relakse) yada denge modülü (G_r) elde edilir. (Ward, 1971).

Şekil 3.10, bir polimer için sabit bir sıcaklıkta, zorlama relaksasyon modülünün, zamanın fonksiyonu olarak değişimini göstermektedir.



Şekil 3.10. Zamanın bir fonksiyonu olarak zorlama-relaksasyon modülü $G(t)$. τ , karakteristik zaman (relaksasyon zamanı) (Ward, 1971).

Örnek içindeki zorlanma σ ile gösterilirse, zorlanmanın değişim hızı yani zorlanmamış duruma dönme hızı, uygulanan zorlama ile orantılıdır,

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{\tau}\sigma \quad (3.8)$$

burada $1/\tau$ polimerin yapısına ve özelliklerine bağlı bir orantı faktörüdür. Zamanı $t=0$ 'dan herhangi bir t anına ve zorlamayı da σ_0 'dan herhangi bir σ değerine integre ettiğimizde

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau} \quad (3.9)$$

elde edilir.

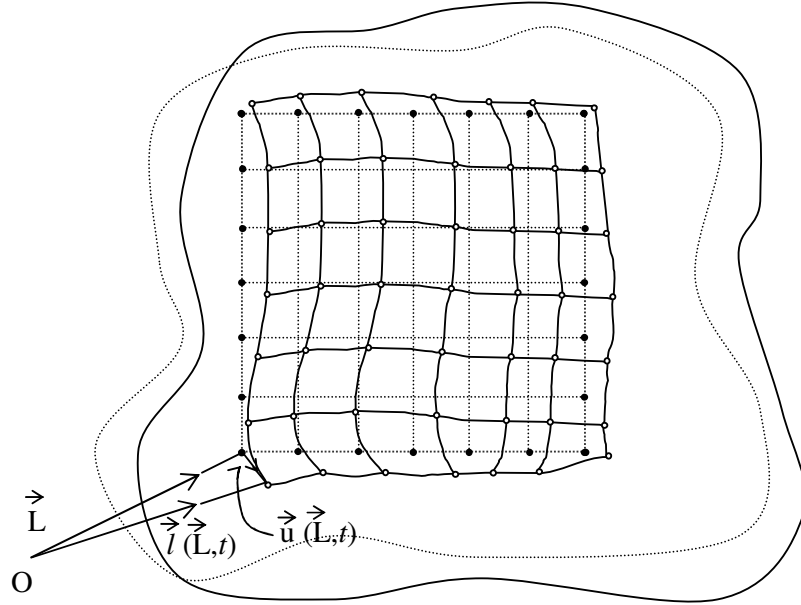
τ , çok küçük olduğunda relaksasyon hızı çok büyük olacaktır. Aynı zamanda, segmentlerin termal hareket hızları yüksek olduğunda τ çok küçük olacaktır. Buradan, sıcaklığın yükselmesiyle τ 'nın azalacağı sonucu çıkmaktadır.

Sıcaklık değişiminin zorlama relakzasyonu üzerine etkisi sünmedekine benzerdir. Zaman-sıcaklık eşdeğerliği, polimerlerde tüm lineer viskoelastik davranış üzerine uygulanabilir. Polimerlerin relakzasyon özelliklerinin çalışılmasında, zamanla periyodik olarak değişen zorlama veya zorlanmalar altında polimerin test edilmesi, elastik davranışın tipi hakkında önemli bilgiler verir.

BÖLÜM 4 KATILARIN ELASTİK ÖZELLİKLERİ ve AKUSTİK DALGA YAYILIMI

4.1. Katılarda Şekil Değişimi ve Zorlanma

Tüm katılar, kendi denge konumları etrafında titreşim hareketine zorlanabilen atomlardan meydana gelmiştir. Parçacıkların denge konumları değiştirildiğinde iç geri çağırıcı kuvvetler doğar. Parçacıklar arasındaki bu elastik geri çağırıcı kuvvetler, ortamı titreşim hareketine götürür. Bu yer değiştirme hareketi yerelleşmiş veya ilerleyen bir dalga şeklinde olabilir. Zorlanmış bir katının maddesel parçacıklarının yer değiştirmeleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

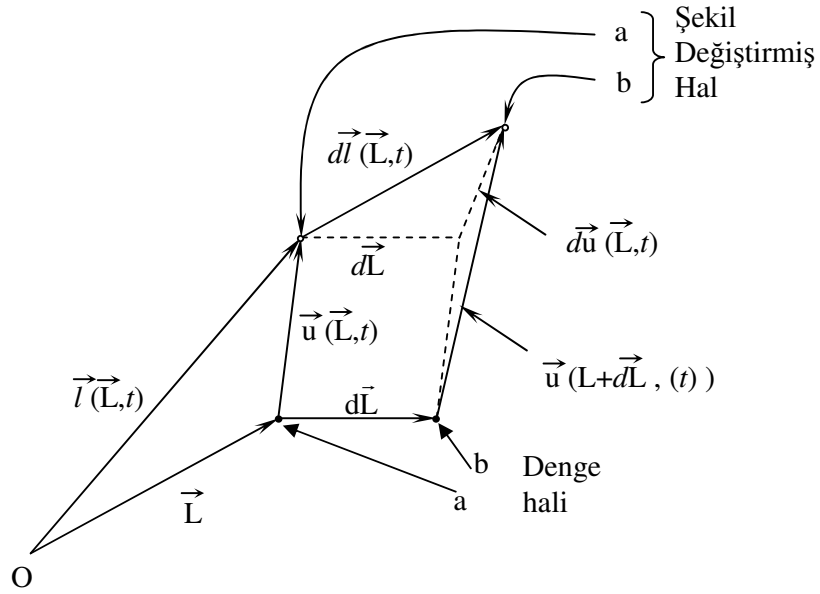


Şekil 4.1. Katı bir cismin denge ve şekil değiştirmiş durumunda parçacıkların konumu (Auld, 1973).

Denge konumu \vec{L} yer vektörü ile verilen bir atomun yer değiştirme alanı,

$$\vec{u}(\vec{L}, t) = \vec{\ell}(\vec{L}, t) - \vec{L} \quad (4.1)$$

şeklinde tanımlanır. Katılardaki şekil değişimi, her parçacığın bağıl yer değişimi olarak ele alınmalıdır. Çünkü (4.1) de tanımlanan yer değiştirme alanı, katının şekil değiştirmeden (rijid) ötelenmesi halinde de bir yer değiştirme alanı verir. Oysa katı, bu tür ötelemede şekil değiştirmez. Bu nedenle parçacıkların görelî yer değiştirmelerini tanımlayan Şekil 4.2 de gösterildiği gibi diferansiyel yer değiştirme alanını tanımlamak gereklidir.



Şekil 4.2. Şekil değiştirmiş bir katıda diferansiyel yer değiştirme alanının tanımı (Auld, 1973).

Şekil 4.2 den de görüleceği gibi diferansiyel yer değiştirme alanı,

$$d\vec{u}(\vec{L}, t) = d\vec{\ell}(\vec{L}, t) - d\vec{L} \quad (4.2)$$

olacaktır. (4.2) ifadesinin cismin şekil değiştirmeden yapacağı dönme hareketi durumunda şekil değişimi vermesi, bunun vektörel değil de skaler biçimde gösterilmesi zorunluluğunu getirir. Böylece şekil değişiminin en uygun tanımı,

$$\Delta' = d\bar{\ell}^2(\bar{\mathbf{L}}, t) - (d\bar{\mathbf{L}})^2 \quad (4.3)$$

ile verilir. $\vec{d\ell}$ ve $\vec{d\mathbf{L}}$ nin kartezyen koordinat sisteminde bileşenleri cinsinden yazılması ve

$$\begin{aligned} d\ell_x &= dL_x + du_x = dL_x + \frac{du_x}{dL_x} dL_x + \frac{du_x}{dL_y} dL_y + \frac{du_x}{dL_z} dL_z \\ d\ell_y &= dL_y + du_y = dL_y + \frac{du_y}{dL_x} dL_x + \frac{du_y}{dL_y} dL_y + \frac{du_y}{dL_z} dL_z \\ d\ell_z &= dL_z + du_z = dL_z + \frac{du_z}{dL_x} dL_x + \frac{du_z}{dL_y} dL_y + \frac{du_z}{dL_z} dL_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

bağıntılarının kullanılması ile

$$\Delta' = 2 \left(\begin{bmatrix} dL_x & dL_y & dL_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dL_x \\ dL_y \\ dL_z \end{bmatrix} \right) \quad (4.5)$$

elde edilir. Burada sonuç, matris çarpımları şeklinde ifade edildi. [S] matrisi zorlanma matrisi olarak adlandırılır. Zorlanma matrisi elemanları

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial L_j} + \frac{\partial u_j}{\partial L_i} + \frac{\partial u_k}{\partial L_i} \frac{\partial u_k}{\partial L_j} \right) \quad i,j,k=x,y,z \quad (4.6)$$

ile verilen simetrik bir matristir. (10^{-4} - 10^{-3}) mertebesindeki yer değişimler için (4.6) eşitliğindeki ikinci dereceden terimler ihmal edilebilir. Böylece, katılarda küçük yer değiştirmeler için lineerleştirilmiş yaklaşımda zorlanma ile yer değiştirme arasındaki bağıntı,

$$S_{ij}(\bar{\mathbf{r}}, t) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial r_j} + \frac{\partial u_j}{\partial r_i} \right) \quad (4.7)$$

olur.

Akustikte özel koordinat sistemlerindeki problemlerin çözümünde ve akustiğin temel eşitliklerinin yazılışında büyük kolaylıklar sağladığından çoğunlukla kısaltılmış indis gösterimi kullanılır. Zorlanma matrisi simetrik olduğundan, zorlanma bileşenleri iki alt indis yerine Woigt notasyonu kullanılarak

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & \frac{1}{2}S_6 & \frac{1}{2}S_5 \\ \frac{1}{2}S_6 & S_2 & \frac{1}{2}S_4 \\ \frac{1}{2}S_5 & \frac{1}{2}S_4 & S_3 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

şeklinde tek alt indisle gösterilebilir (Auld, 1973; Nye, 1957). Böylece zorlanma, dokuz elemanlı kare matrisi yerine altı elemanlı bir sütun matrisi

$$[S] = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

şeklinde yazılarak zorlanma ile yer değiştirme arasındaki bağıntı, iki matrisin çarpımı biçiminde ifade edilebilir.

$$S_i = \nabla_{ij} u_j \quad (4.10)$$

Burada ∇_{ij} ,

$$\nabla_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

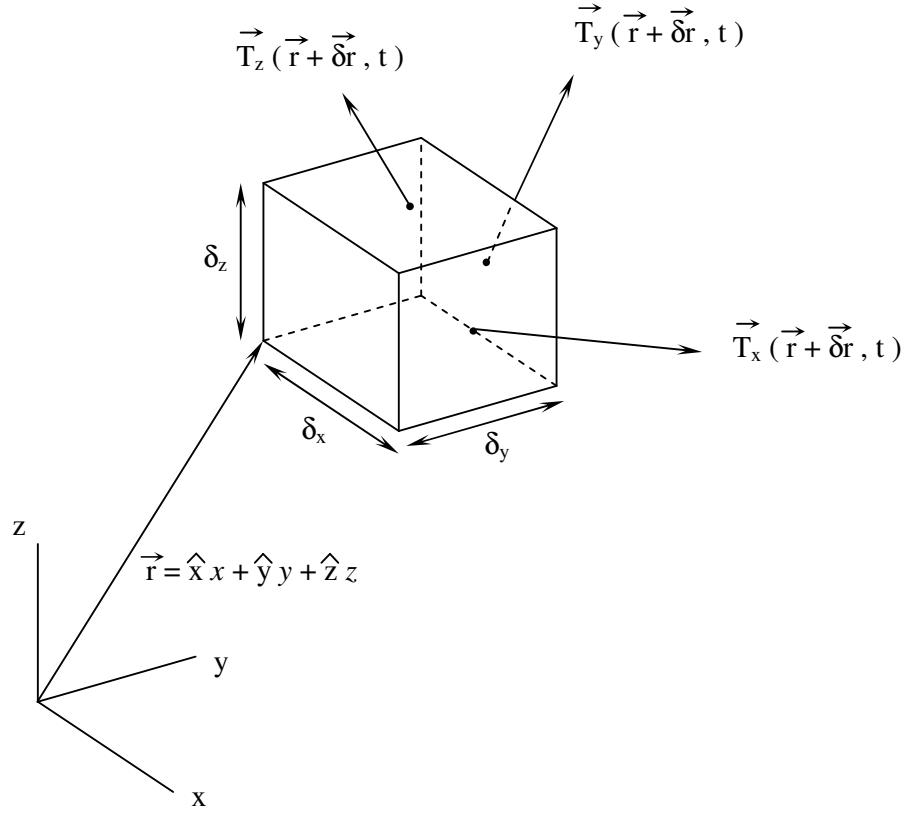
şeklinde matris gösterimine sahip simetrik gradient işlemcisidir. Yer değiştirme alan bileşenlerinin bilinmesiyle (4.10) matris çarpımı kullanılarak istenilen zorlanma bileşenleri doğrudan elde edilebilir.

4.2. Zorlanma ve Akustiğın Dinamik Eşitlikleri

Cismin şekil değişimine neden olan dış etkenler, katı sınırlarına uygulanan yüzey kuvvetleri olabileceği gibi, doğrudan parçacıklar üzerine etki eden cisim kuvvetleri de olabilir. Katı bir cisme etki eden dış zorlama kuvvetleri, tüm parçacıkları doğrudan etkilemez.

Komşu parçacıklar arasındaki elastik kuvvetlerin etkisi ile cismin tümüne iletilir. Cismin sınırlarına uygulanan çekme kuvvetleri ve parçacıklar arasındaki zorlamalar hacimden çok yüzeye etki ederler. Bu kuvvetler $N.m^{-2}$ biriminde ölçülürler. Titreşen bir ortamdaki zorlamalar, cismin dik koordinat sistemindeki bir hacim elemanın göz önüne alınması ile tanımlanabilir (Şekil 4.3).

Şekil 4.3 deki her yüz, komşu hacim elemanına uyguladığı kuvvetle karşılaşır. Bu kuvvetleri betimlemek için üç kuvvet bileşeni gereklidir. $+\hat{x}$ yönüne yönelmiş yüzey elemanı üzerine etkileyen çekme kuvveti;



Şekil 4.3. Bir elemanter parçacığa etkiyen çekme kuvvetleri(Auld, 1973).

$$\vec{T}_x = \hat{x}T_{xx} + \hat{y}T_{yx} + \hat{z}T_{zx} \quad (4.12)$$

şeklinde bileşenleri cinsinden yazılabilir. Benzer şekilde $+\hat{y}$ ve $+\hat{z}$ yönüne yönelmiş yüzey elemanlarına etki eden çekme kuvvetleri de

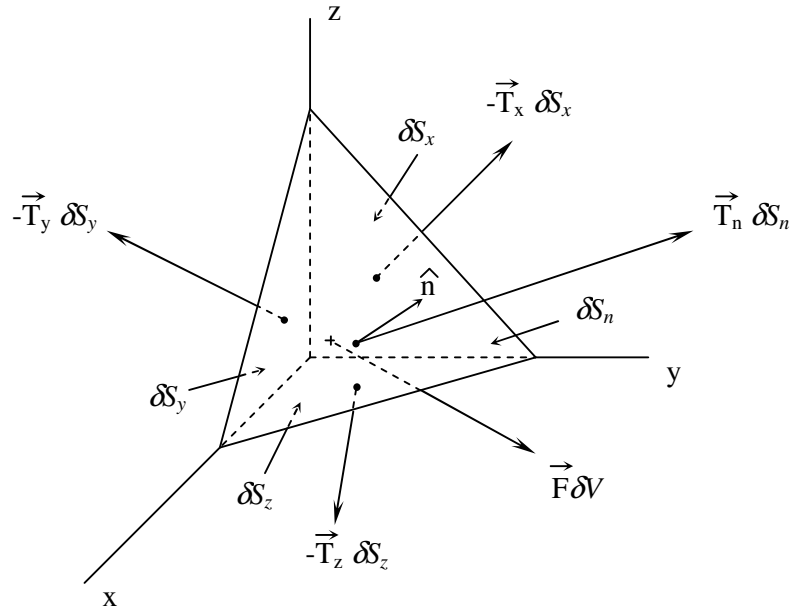
$$\vec{T}_y = \hat{x}T_{xy} + \hat{y}T_{yy} + \hat{z}T_{zy} \quad (4.13)$$

$$\vec{T}_z = \hat{x}T_{zx} + \hat{y}T_{yz} + \hat{z}T_{zz} \quad (4.14)$$

olacaktır.

$\bar{T}_x, \bar{T}_y, \bar{T}_z$ yüzey birimi başına etkiyen kuvvetlerdir. T_{ij} ($i,j=x,y,z$) zorlama bileşenleri olarak adlandırılır. $\bar{r} = \bar{x}x + \bar{y}y + \bar{z}z$ noktasındaki zorlama alanını tanımlamak için $\delta_x, \delta_y, \delta_z \rightarrow 0$ limiti alınmalıdır. Böylece, $T_{ij}(\bar{r}, t); \bar{r}$ konumunda sonsuz küçük bir hacim elemanının $+j$ yüzeyi üzerine etkiyen kuvvetin i . bileşeni olarak tanımlanabilir.

Şekil değiştirmiş ortamlarda zorlamalar, koordinat düzlemlerine paralel yüzeylere etkiyen çekme kuvvetlerinin cinsinden tanımlanabileceği gibi, keyfi bir yöne yönelmiş yüzey için de hesaplanabilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Bir katının tetrahedral hacim elemanında yüzeylere etkiyen çekme kuvvetleri(Auld, 1973).

Şekil 4.4; dik koordinat düzlemlerinden ve keyfi bir yönde yönelmiş düzlemlerle oluşan tetrahedral bir hacim elemanını göstermektedir. $-\bar{x}, -\bar{y}, -\bar{z}$ yönelimli yüzeylere sırası ile $-\bar{T}_x, -\bar{T}_y, -\bar{T}_z$ çekme kuvvetleri etki etmektedir. \hat{n} yönelimli yüzeye de \bar{T}_n kuvveti etki etmektedir. F , birim hacme etkiyen cisim kuvvetini göstermektedir. Bu kuvvetlerin dengede olması koşulu kullanılarak her bir bileşen için,

$$T_{in} \delta S_n - T_{ix} \delta S_x - T_{iy} \delta S_y - T_{iz} \delta S_z + F_i \delta V = 0 \quad (i = x, y, z) \quad (4.15)$$

yazılabilir. $\delta_x, \delta_y, \delta_z \rightarrow 0$ limiti alınarak \hat{n} yönelimli sonsuz küçük yüzeye etkiyen zorlama bileşenleri (T_{xn}, T_{yn}, T_{zn}) elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} T_{xn} \\ T_{yn} \\ T_{zn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Burada, $\vec{T}_n = T_{xn}\hat{x} + T_{yn}\hat{y} + T_{zn}\hat{z}$, $\hat{n} = n_x\hat{x} + n_y\hat{y} + n_z\hat{z}$ dir ve $[T]$ zorlama matrisi olarak adlandırılır.

Akustik olarak titreşen bir cismin şekil değişimi; yer değiştirme alanı ($\vec{u}(\vec{r}, t)$) ve zorlanma alanı ($\vec{S}(\vec{r}, t)$) ile betimlenebilir. Bu şekil değişimine neden olan kuvvetler de zorlama alanı ($\vec{T}(\vec{r}, t)$) cisim kuvvet alanı ($\vec{F}(\vec{r}, t)$) ve cisim tork alanı ($\vec{G}(\vec{r}, t)$) ile betimlenebilir. Titreşen maddesel parçacıklar genel olarak dönme ve öteleme hareketi yaparlar. Öteleme hareketinin denklemi

$$\nabla \vec{T} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \vec{F} \quad (4.17)$$

ve dönme hareketinin denklemi;

$$T_{ji} - T_{ij} + G_k = 0 \quad \begin{matrix} i & j & k \\ x & y & z \\ y & z & x \\ z & x & y \end{matrix} \quad (4.18)$$

eşitlikleri ile verilir.

(4.17) eşitliğindeki zorlama tensörünün diverjansı $(\nabla \cdot \underline{\underline{T}})$; dik koordinat sistemindeki açık şekli

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \underline{\underline{T}} = & \bar{x} \left(\frac{\partial}{\partial x} T_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} T_{xy} + \frac{\partial}{\partial z} T_{xz} \right) + \bar{y} \left(\frac{\partial}{\partial x} T_{yx} + \frac{\partial}{\partial y} T_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} T_{yz} \right) \\ & + \bar{z} \left(\frac{\partial}{\partial x} T_{zx} + \frac{\partial}{\partial y} T_{zy} + \frac{\partial}{\partial z} T_{zz} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

biçimindedir. Bu ifade indis gösterimi ile

$$\left(\nabla \cdot \underline{\underline{T}} \right)_i = \frac{\partial}{\partial r_j} T_{ij} \quad (4.20)$$

biçiminde yazılabilir. (4.18) den görüleceği gibi cisim torkunun olmadığı tüm hallerde

$$T_{ji} = T_{ij} \quad (4.21)$$

olacaktır. Cisim torkları, ferroelektrik ve ferromagnetik malzemelerde elektrik veya magnetik polarizasyonla oluşurlar. Şiddetli polarizasyona sahip malzemelerde bile lineerleştirilmiş teoride cisim torku ihmal edilir. Bu koşullar altında zorlama matrisi simetrik olacaktır ve titreşim hareketinde dönme hareketinin bir önemi yoktur.

Zorlama matrisinin simetrik olduğu bu koşullarda zorlama bileşenleri, zorlanma bileşenlerine benzer şekilde, kısaltılmış indis gösterimi ile betimlenebilir. Bu durumda

$$\begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_6 & T_5 \\ T_6 & T_2 & T_4 \\ T_5 & T_4 & T_3 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

yazılabilir ve dokuz elemanlı zorlama matrisi altı elemanlı bir sütun matrisi ile gösterilebilir.

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

bu gösterim yardımı ile (4.17) eşitliğindeki zorlama matrisinin diverjansı, bir matris operatörü ile bir sütun matrisinin çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

$$\nabla_{\vec{T}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

∇_{ij} ; diverjans matris işlemcisi olarak adlandırılır. Görüleceği gibi diverjans matrisi, simetrik gradient matrisinin transpozesidir.

Böylece öteleme hareketinin denklemi kısaltılmış indis gösteriminde

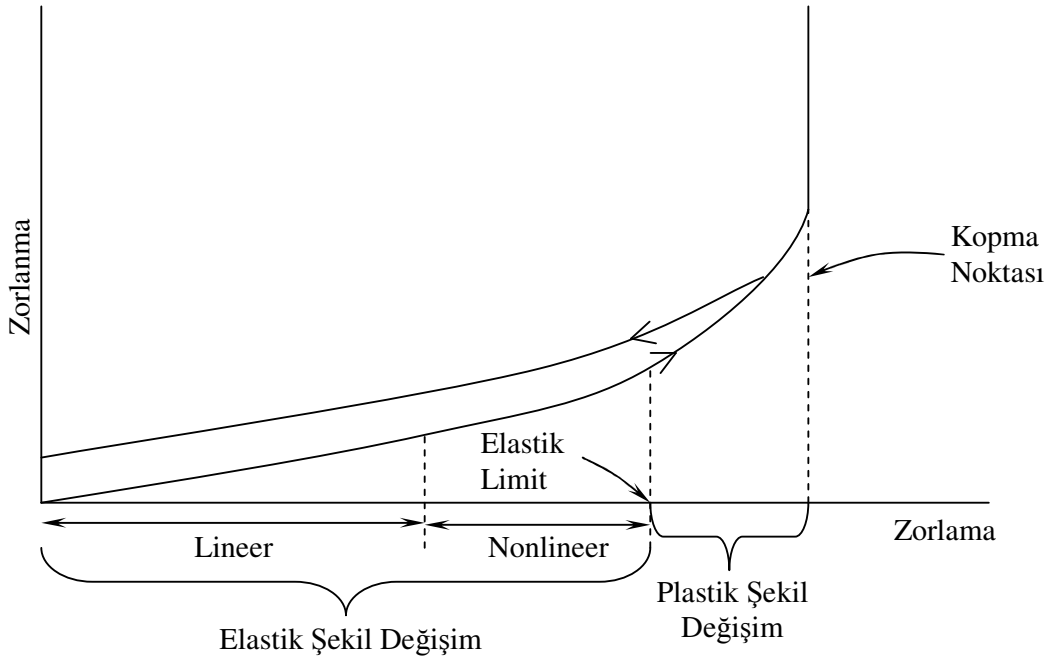
$$\nabla_{ij} T_j = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial t^2} - F_i \quad (4.25)$$

olacaktır.

4.3. Elastik Katılarda Zorlama ve Zorlanma İlişkisi

Şekil 4.5 katı bir cisim için zorlama ve zorlanma ilişkisini göstermektedir. Küçük yer değiştirmeler için zorlanma, zorlama ile doğrusal olarak artar. Şekil değişiminin artması ile zorlama ve zorlanma arasındaki ilişki gittikçe doğrusallıktan ayrılır. Zorlamanın kaldırılması ile cisim ilk haline geri döner. Cismin eski haline dönebildiği bu bölge elastik şekil değişim bölgesi olarak adlandırılır. Zorlamanın belli bir limit değerinin (katı cisimler için bu limit 10^{-4} ile 10^{-3} aralığında değişmektedir) aşılması ile ortam sürekli şekil değiştirir. Plastik şekil değişim bölgesi olarak adlandırılan bu bölge katının, zorlamanın kalkması ile ilk haline dönmesi beklenemez. Bu bölgenin ötesindeki zorlamalarda katı kırılır.

Katının mikroskobik yay sabitinin belirlenmesinde zorlama ve zorlanma ilişkisinin Hooke yasası ile verildiği lineer elastik bölge kullanılır. Hooke yasası, zorlamanın zorlanma ile doğru orantılı olduğunu ifade eder. Diğer bir ifade ile zorlama matrisinin her bir bileşeni zorlamanın bileşenlerinin lineer bir fonksiyonudur.



Şekil 4.5. Katı bir cisim için zorlama - zorlanma ilişkisi (Auld, 1973)

(4.16) eşitliğindeki zorlama tensörünün T_{xx} bileşeni için bu ilişki açık olarak

$$\begin{aligned}
T_{xx} = & C_{xxxx} S_{xx} + C_{xxyy} S_{yy} + C_{xxzz} S_{zz} \\
& + C_{xxyx} S_{yx} + C_{xyyy} S_{yy} + C_{xyyz} S_{yz} \\
& + C_{xxzx} S_{zx} + C_{xxzy} S_{zy} + C_{xxzz} S_{zz}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

bağıntısı ile verilir. İndis gösteriminde zorlama-zorlanma ilişkisi

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} \quad i, j, k, l = x, y, z \tag{4.27}$$

$$S_{ij} = s_{ijkl} T_{kl} \quad i, j, k, l = x, y, z \tag{4.28}$$

şeklinde yazılabilir. c_{ijkl} : elastik sertlik (stiffness constant) s_{ijkl} : elastik uyum (compliance constant) sabitleri olarak adlandırılır. (4.27) ve (4.28) ifadeleri ortamın elastik özelliklerini betimleyen temel bağıntılardır. c_{ijkl} $N.m^{-2}$, s_{ijkl} ise $N^{-1}.m^2$ boyutundadır. Metal gibi katı maddeler ve tek kristal yalıtkanlar 10^{11} $N.m^{-2}$ den büyük elastik sertlik sabitine sahipken, polimerik maddeler yaklaşık 10^9 $N.m^{-2}$ mertebesinde elastik sertlik sabitine sahiptirler. Katı maddeler için elastik sınırdaki zorlama $10^7 - 10^8$ $N.m^{-2}$ arasında değişmektedir. Bu maddeler için elastik zorlanma sınırı $10^{-4} - 10^{-3}$ arasında değişir.

(4.27) ve (4.28) bağıntıları iç enerji kayıplarının olmadığı ideal katılar için geçerlidir. İç enerji kaybının olmaması katı içindeki akustik titreşimlerin zayıflamaksızın yayılmasını gerektirir. Böyle ideal bir katının doğada olmadığı gerçeği dikkate alınarak bu temel bağıntılar, elastik sönümü de içerecek şekilde düzenlenmelidir.

Elastik sönüm, genelde titreşimin tipine ve frekansına bağlı olduğu kadar sıcaklığa da bağlıdır. Tüm bu bağıllığı basit şekilde ifade etmek olası değildir. Bunun yanı sıra oda sıcaklığındaki pek çok katı için bu kayıplar viskoz sönüm terimi ile ifade edilebilir. Bu kayıp teriminin eklenmesi ile (4.27) elastik temel bağıntısı sönümü de kapsayacak şekilde ifade edilebilir.

$$T_{ij} = c_{ijk\ell} + \eta_{ijk\ell} \frac{\partial S_{kl}}{\partial t} \quad (4.29)$$

Burada $\eta_{ijk\ell}$ viskozite tensörüdür ve $c_{ijk\ell}$ ler ile aynı simetri özelliğine sahiptir. Viskoz kayıpların önemli olduğu durumlarda (4.29) eşitliği kullanılmalıdır.

$c_{ijk\ell}$, $s_{ijk\ell}$, $\eta_{ijk\ell}$ dördüncü mertebeden tensörlerdir. Bu nedenle $3^4=81$ tane bileşeni vardır. Zorlanma ve zorlama tensörlerinin simetrik ($S_{ij}=S_{ji}$, $T_{ij}=T_{ji}$) olmasından ve enerji iç değişimlerinden ötürü (Auld, 1973, Mason, 1964)

$$c_{ijk\ell} = c_{jik\ell} = c_{ij\ell k} = c_{ji\ell k} \quad (4.30)$$

$$c_{ijk\ell} = c_{k\ell ij} \quad (4.31)$$

simetri özellikleri geçerlidir. Böylece bağımsız bileşen sayısı en düşük simetriye sahip triklinik kristal simetridir bir katı için 21'e indirgenir. Simetrisi yüksek katılarda bu sayı daha da azdır. (Nye, 1957). Örneğin ortorombik yapı için 9, hekzagonal yapı için 5, kübik için 3 bağımsız elastik sabiti vardır.

4.27 , 4.28 ve 3.29 bağıntıları kısaltılmış indis gösterimleriyle

$$T_I = c_{IJ} S_J \quad (4.32)$$

$$S_I = s_{IJ} T_J \quad (4.33)$$

$$T_I = c_{IJ} S_J + \eta_{IJ} \frac{\partial S_J}{\partial t} \quad (4.34)$$

şeklinde yazılabilir.

Elastik sertlik ve uyum tensörleri arasında

$$[C] = [S]^{-1} \quad (4.35)$$

bağıntısı geçerlidir. Katının elastik özelliklerinin araştırılmasında bir koordinat sisteminden , problemin geometrisine uygun başka bir koordinat sistemine geçerek çalışmak gerekebilir. Bu durumda tüm bu tensörlerin dönüşüm özelliklerinin bilinmesi gerekir.

[a] matrisi bu iki koordinat sistemi arasında dönüşümü sağlayan ortogonal dönüşüm matrisi ise , zorlama ve zorlanma matrislerinin yeni koordinatlardaki gösterimleri

$$\begin{aligned} [T'] &= [a][T][\tilde{a}] \\ [S'] &= [a][S][\tilde{a}] \end{aligned} \quad (4.36)$$

dönüşümleri ile elde edilir. Elastik sertlik ve uyum tensörlerinin yeni koordinatlardaki gösterimleri ise

$$\begin{aligned} [c'] &= [M][c][\tilde{M}] \\ [s'] &= N[s][\tilde{N}] \end{aligned} \quad (4.37)$$

olacaktır. Burada [M] , [N] ; Bond matrisleri olarak adlandırılır ve aralarında

$$[\tilde{M}] = [N]^{-1} \quad (4.38)$$

bağıntısı geçerlidir.

4.4. Ortogonal Dönüşüm Matrisinin Hekzagonal Yapıya Uygulanması

Burada amaç, hegzagonal simetrisinin beş bağımsız elastik sabitiyle uygun bir yaklaşım kullanarak ortorombik simetrisinin dokuz bağımsız elastik sabitini elde etmektir.

Bu işlem için ilk olarak Bond matrisleri kullanılmıştır. İki koordinat sistemi arasında dönüşümü sağlayan ortogonal dönüşüm matrisi olan $[a]$ matrisi ile $[M]$ ve $[N]$ Bond matrislerinin 90° döndürülmüş halleri yazılır. y ekseninde $\xi=\pi/2$ kadar saat yönünde dönme işlemi ile $[a]$ matrisi

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos \xi & 0 & \sin \xi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \xi & 0 & \cos \xi \end{bmatrix} \Rightarrow [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} a_{xx} = 0 \quad a_{xy} = 0 \quad a_{xz} = 1 \\ a_{yx} = 0 \quad a_{yy} = 1 \quad a_{yz} = 0 \\ a_{zx} = -1 \quad a_{zy} = 0 \quad a_{zz} = 0 \end{array}$$

olacaktır. Döndürme matrisi elemanları yardımıyla (4.39) ve (4.40) eşitliğinde verilen Bond matrisleri elde edilmiş olur.

$$[M] = \begin{bmatrix} a_{xx}^2 & a_{xy}^2 & a_{xz}^2 & 2a_{xy}a_{xz} & 2a_{xz}a_{xx} & 2a_{xx}a_{xy} \\ a_{yx}^2 & a_{yy}^2 & a_{yz}^2 & 2a_{yy}a_{yz} & 2a_{yz}a_{yx} & 2a_{yx}a_{yy} \\ a_{zx}^2 & a_{zy}^2 & a_{zz}^2 & 2a_{zy}a_{zz} & 2a_{zz}a_{zx} & 2a_{zx}a_{zy} \\ a_{yx}a_{zx} & a_{yy}a_{zy} & a_{xy}a_{zz} & a_{yy}a_{zz} + a_{yz}a_{zy} & a_{yx}a_{zz} + a_{yz}a_{zx} & a_{yy}a_{zx} + a_{yx}a_{zy} \\ a_{zx}a_{xx} & a_{zy}a_{xy} & a_{zz}a_{xz} & a_{xy}a_{zz} + a_{xz}a_{zy} & a_{xz}a_{zx} + a_{xx}a_{zz} & a_{xx}a_{zy} + a_{xy}a_{zx} \\ a_{xx}a_{yx} & a_{xy}a_{yy} & a_{xz}a_{yz} & a_{xy}a_{yz} + a_{xz}a_{yy} & a_{xz}a_{yx} + a_{xx}a_{yz} & a_{xx}a_{yy} + a_{xy}a_{yz} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} a_{xx}^2 & a_{xy}^2 & a_{xz}^2 & a_{xy}a_{xz} & a_{xz}a_{xx} & a_{xx}a_{xy} \\ a_{yx}^2 & a_{yy}^2 & a_{yz}^2 & a_{yy}a_{yz} & a_{yz}a_{yx} & a_{yx}a_{yy} \\ a_{zx}^2 & a_{zy}^2 & a_{zz}^2 & a_{zy}a_{zz} & a_{zz}a_{zx} & a_{zx}a_{zy} \\ 2a_{yx}a_{zx} & 2a_{yy}a_{zy} & 2a_{xy}a_{zz} & a_{yy}a_{zz} + a_{yz}a_{zy} & a_{yx}a_{zz} + a_{yz}a_{zx} & a_{yy}a_{zx} + a_{yx}a_{zy} \\ 2a_{zx}a_{xx} & 2a_{zy}a_{xy} & 2a_{zz}a_{xz} & a_{xy}a_{zz} + a_{xz}a_{zy} & a_{xz}a_{zx} + a_{xx}a_{zz} & a_{xx}a_{zy} + a_{xy}a_{zx} \\ 2a_{xx}a_{yx} & 2a_{xy}a_{yy} & 2a_{xz}a_{yz} & a_{xy}a_{yz} + a_{xz}a_{yy} & a_{xz}a_{yx} + a_{xx}a_{yz} & a_{xx}a_{yy} + a_{xy}a_{yz} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [\tilde{M}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [\tilde{N}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[c'_{ij}] = [M][c_{ij}][N'] \quad [N'] = [\tilde{M}] \quad [c'_{ij}] = [M][c][\tilde{M}] \quad (4.41)$$

(4.41) eşitliğinin kullanılması ile

$$[c_{ij}]_{\lambda_x} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

hegzagonal yapı tensörü; $\xi=\pi/2$ dönme şartı ile $[c'_{ij}]_{\lambda_x} = [c_{ij}]_{\lambda_z}$ döndürülmüş

$$\left[c_{ij}' \right]_{\lambda_x} = \begin{bmatrix} c_{33} & c_{13} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

hegzagonal yapı elde edilir.

Sonuç olarak x ekseninde λ_x oranında çekilmiş tek yönlü yapı ve bu yapının $\xi=\pi/2$ dönmesi ile z ekseninde λ_z ($x=z$) tek yönlü çekilmiş yapı elde edilir. Burada döndürme işlemi, 6×6 matris yapısının köşelerindeki 3×3 matris bölümlerini sağ yönde köşegen etrafında dönmesini sağlamıştır. Tek yönlü yapının c_{11} sabiti 90° döndürülmüş yapının c_{33} sabitinin yerini almaktadır.

Benzer durum, c_{12} ile c_{13} ve c_{44} ile c_{66} arasında mevcuttur. 3×3 köşe matrislerinin orta elemanları c_{22} ve c_{44} dönme işleminden etkilenmemektedir. Çift yönlü çekilmiş yapının elastik sertlik tensörü 4.44 da verilmiştir.

$$\left[c_{ij} \right]_{\lambda_x-\lambda_z} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

4.5. Katılarda Akustik Dalgaların Yayılması

Akustik olarak titreşen bir katıda, şekil değişiminin zamana bağlı gelişimini inceleyebilmek için (\bar{u}, S, T) alanlarını içeren

$$S_i = \nabla_{ij} u_j \quad (4.45)$$

$$\nabla_{ij} T_j = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - F_i \quad (4.46)$$

eşitliklerine ek olarak;

$$T_i = c_{ij} S_j + \eta_{ij} \frac{\partial S_{ij}}{\partial t} \quad (4.47)$$

elastik temel eşitliğinin birlikte ele alınması gerekir. Hooke yasası, bazı malzemelerin zorlama-zorlanma ilişkisini tam olarak betimleyemez. Bazı katılar akustik olarak zorlandıklarında piezoelektrik ve piezomagnetik özellik gösterirler.

Böyle katılarda zorlama-zorlanma ilişkisi, bu tür çiftlenimi karşılayacak şekilde yeniden düzenlenmelidir. Piezoelektrik özellik gösteren bir katıda bu ilişki,

$$T_i = -e_{ij} E_j + c_{ij}^E S_j \quad (4.48)$$

şeklindedir (Auld, 1973). Burada e_{ij} piezoelektrik zorlama tensörüdür.

$$\bar{v} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (4.49)$$

parçacık yer değiştirme hızının tanımlanması ile (4.45), (4.46) ve (4.47) eşitlikleri

$$\nabla_{ij} T_j = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} - F_i \quad (4.50)$$

$$(1 + \tau_{JK} \frac{\partial}{\partial t}) \nabla_{KI} v_i = s_{JI} \frac{\partial T_I}{\partial t}, \quad \tau_{JK} = s_{JI} \eta_{IK} \quad (4.51)$$

şeklinde akustiğin temel iki alan büyüklüğü olan T ve \vec{v} cinsinden iki temel eşitliğe indirgenir. Akustikteki bu iki eşitlik ile elektromanyetizmadaki

$$-\vec{\nabla} \times \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4.52)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (4.53)$$

Maxwell eşitlikleri arasında bire bir benzerlik vardır. Elektromanyetik alan işlemcileri arasında;

$$-[\nabla \times] = \left[\tilde{\nabla} \right] \quad (4.54)$$

ilişkisi vardır. Benzer ilişki, akustik temel eşitliklerindeki simetrik gradient işlemcisi ve diverjans matris işlemcisi arasında da geçerlidir.

$$[\nabla_{IJ}] = \left[\tilde{\nabla}_{JI} \right] \quad (4.55)$$

Bu özellikler elektromanyetik alan eşitliği ile akustik alan eşitlikleri arasındaki benzerliğin temel kaynağıdır.

Bu durumda elektromanyetik alan büyüklükleri $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{B}, \vec{D}, \mu, \epsilon)$ ile akustik alan büyüklükleri $(T, \vec{v}, \vec{P}, S, \rho, c)$ arasında benzerlik Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1.Elektromanyetik ve Akustik alan eşitlikleri.

elektromanyetik		Akustik	
Elektrik alan	$\vec{E}(\text{V/m})$	Zorlama	$T(\text{N/m}^2)$
Manyetik uyarım	$\vec{H}(\text{A/m})$	Yer değiştirme hızı	$\vec{v}(\text{m/s})$
Manyetik alan	$\vec{B}(\text{wb/m}^2)$	Momentum Yoğ.	$\vec{P}(\text{kg/m}^2\text{s})$
Elektrik uyarım	$\vec{D}(\text{C/m}^2)$	Zorlanma	$S(\text{~})$
Manyetik geçirgenlik	$\mu(\text{H/m})$	Yoğunluk	$\rho(\text{kg/m}^3)$
Dielektrik sabiti	$\epsilon(\text{F/m})$	Elastik sertlik	$c_{ij}^{-1}(\text{N/m}^2)^{-1}$

(4.47) ve (4.48) eşitlikleri sadece \vec{v} hız alanını içerecek şekilde düzenlenirse kayıpsız ortam için, aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$\nabla_{ik} c_{kl} \nabla_{lj} v_j = \rho \frac{\partial^2 v_i}{\partial t^2} - \frac{\partial F_i}{\partial t} \quad (4.56)$$

Burada, ∇_{ik} ve ∇_{lj} ve (4.11)'de tanımlanmış işlemcilerdir. (4.53) eşitliği, $\vec{I} = \hat{x}l_x + \hat{y}l_y + \hat{z}l_z$ birim dalga vektörü doğrultusunda ilerleyen $e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ ile orantılı düzlem dalga ozmlerine sahip, akustik dalga denklemdir. $e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ ozmnn (4.53) eşitliğinde yerine konması ile cisim kuvveti (\vec{F})'nin sıfır olduğu bir katı için,

$$k^2 (\ell_{ik} c_{kl} \ell_{lj}) v_j = k^2 \Gamma_{ij} v_j = \rho \omega^2 v_i \quad (4.57)$$

dağıtkanlık bağıntısı elde edilir. Bu eşitlik, Christoffel eşitliği olarak adlandırılır ve

$$\Gamma_{ij} = \Gamma_{ji} \quad (4.58)$$

simetri özelliğine sahiptir. ℓ_{ik} ve ℓ_{lj} elemanları birim dalga vektörünün doğrultu kosinüsleri olan matrislerdir.

$$l_{iK} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 & 0 & l_z & l_y \\ 0 & l_y & 0 & 0 & 0 & l_x \\ 0 & 0 & l_z & l_y & l_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

$$l_{LJ} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 \\ 0 & l_y & 0 \\ 0 & 0 & l_z \\ 0 & l_z & l_y \\ l_z & 0 & l_x \\ l_y & l_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

(4.57) Christoffel eşitliğinin

$$[k^2 \Gamma_{ij} - \rho \omega^2 \delta_{ij}] [v_j] = 0 \quad (4.61)$$

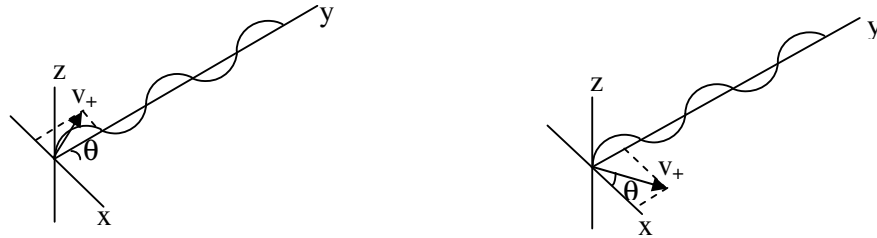
biçiminde yazılması ile hız ölçümleri elde edilir. (4.58) eşitliği, verilen bir yayılma yönü için $\left(\frac{\omega}{k}\right)$ 'nın üçüncü dereceden fonksiyonudur. Bu nedenle farklı polarizasyon ve farklı yayılma hızına sahip üç çözüm verecektir. Bu çözümler;

$$\begin{aligned} (v_i)_1 &\rightarrow \left(\frac{\omega}{k}\right)_1 \\ (v_i)_2 &\rightarrow \left(\frac{\omega}{k}\right)_2 \\ (v_i)_3 &\rightarrow \left(\frac{\omega}{k}\right)_3 \end{aligned} \quad (4.62)$$

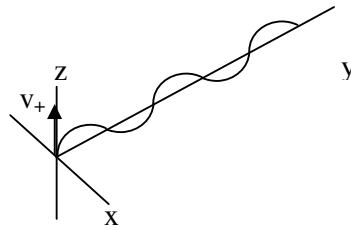
olacaktır.

Akustik dalganın yayılması sırasında bu üç farklı polarizasyon doğrultusu birbirine diktir (Auld, 1973). Bu üç çözüm, yayılma ortamının mekaniksel anisotropisine bağlı olarak saf boyuna, saf enine, boyunamsı (quasilongitudinal) ve eninemsiz (quasitransverse) özellik taşırlar. Dalga polarizasyonu yayılma yönünde ise saf boyuna yayılma yönüne dik ise saf enine olarak adlandırılırlar. Bazen çözüm, hem enine hem de boyuna polarizasyonu içerir.

Mekaniksel anisotropiye sahip katılarda yayılma düzlemi içinde polarizasyonlar, boyunamsı ve eninemsiz olmaktadır. Polarizasyonun enine bileşeni büyük ise eninemsiz, boyuna bileşeni büyükse boyunamsı olarak adlandırılır (Şekil 4.6).



a) \hat{y} yönünde yayılan boyunamsı dalga b) \hat{y} yönünde yayılan eninemsiz dalga



c) \hat{y} yönünde yayılan saf enine dalga

Şekil 4.6. Anizotrop ortam içinde yayılan akustik dalgaların değişik polarizasyon biçimi (Güney, 1989).

(4.57) eşitliğinin katsayılar determinanı

$$\Omega(\omega, k_x, k_y, k_z) = [k^2 \Gamma_{II}(\ell_x, \ell_y, \ell_z - \rho \omega^2 \delta_{II})] = 0 \quad (4.63)$$

\bar{k} uzayında ve sabit frekansta yayılma yönünün bir fonksiyonu olan üç farklı yüzey belirler. Bu, dalga vektör yüzeyi olarak adlandırılır.

Dağıtkanlık bağıntısının $\frac{k}{\omega}$ değişkeni cinsinden ifade edilmesi ile yayılma yönünün fonksiyonu olan yavaşlık yüzeyleri (slowness surface) elde edilir. Yavaşlık yüzeyleri, katı cisim anizotropisinin \bar{k} uzayında gösterilmesini sağlar.

(4.54) Christoffel eşitliğinin değişik simetrilere sahip ortamlar için çözümlü, olası tüm yayılma hallerinde dağıtkanlık bağıntıları çıkarılmış ve örnekler verilmiştir (Musgruve, 1970; Auld, 1973). Burada sadece izotrop, hekzagonal ve ortorombik simetriye sahip ortamlar için hız çözümleri verilmiştir.

4.5.1. İzotrop ortam

İzotrop yapı, iki bağımsız elastik sabitle betimlenir (c_{11} , $c_{12}=c_{11}-2c_{44}$). İzotrop yapıda mekaniksel özellikler, seçilen düzleme ve yöne bağımlı değildir. Yapıda yayılan üç dalga modunun hızları;

Saf boyuna dalga için,

$$V_L = \left(\frac{c_{11}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.64)$$

ve yayılma yönüne dik polarize iki saf enine dalga için,

$$V_{T_1, T_2} = \left(\frac{c_{44}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.65)$$

şeklinde yazılır.

4.5.2. Hekzagonal Simetrili Ortam

Yapı,beş bağımsız elastik sabite (c_{11} , c_{33} , c_{44} , c_{130} , $c_{12}=c_{11}-2c_{66}$) sahiptir. z eksenin simetri eksenini göstermek üzere x,y düzleminde;

Saf boyuna dalga,

$$V_L = \left(\frac{c_{11}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.66)$$

z eksenine dik polarize olmuş saf enine dalga,

$$V_{T_1} = \left(\frac{c_{66}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.67)$$

z eksenine paralel polarize olmuş saf enine dalga,

$$V_{T_2} = \left(\frac{c_{44}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.68)$$

hızları ile yayılırlar. Görüldüğü gibi (x,y) düzlemindeki yayılmada dalga hızları yayılma doğrultusundan bağımsızdırlar.

(y,z) ve (x,z) düzleminde herhangi bir doğrultuda yayılma hali;

hekzagonal simetrili ortamda dağıtkanlık bağıntısı, z eksenini etrafında keyfi bir dönme ile elde edilen tüm meridyen düzlemleri için aynıdır. Bu nedenle bu düzlemler aynı hız ölçümlerine sahiptir. Örneğin, (y,z) düzlemi için bu düzleme dik polarize olmuş saf enine dalga,

$$V_{T_2} = \left(\frac{(c_{66} \sin^2 \theta + c_{44} \cos^2 \theta)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.69)$$

x eksenine dik polarize olmuş eninemsı dalga,

$$V_{T_1} = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + c_{44} - \left(\frac{[(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta + (c_{44} - c_{33}) \cos^2 \theta]^2}{(c_{13} + c_{44})^2 \sin^2 2\theta} \right)^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.70)$$

x eksenine dik polarize olmuş boyunamsı dalga,

$$V_L = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + c_{44} + \left(\frac{[(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta + (c_{44} - c_{33}) \cos^2 \theta]^2}{(c_{13} + c_{44})^2 \sin^2 2\theta} \right)^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.71)$$

hızları ile yayılacaktır.

Burada θ , dalga yayılma yüzünün z eksenine ile yaptığı açıdır.

4.5.3. Ortorombik simetrlili ortam

Yapı dokuz bağımsız elastik sabite sahiptir ($c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{12}, c_{23}, c_{13}, c_{44}, c_{55}, c_{66}$). Dik kartezyen koordinat eksenleri (x,y,z) kristal eksenlerini göstermek üzere

(x,y) düzleminde keyfi bir yayılma hali;

z eksenine polarize olmuş saf enine dalga,

$$V_{T_2} = \left(\frac{(c_{44} \cos^2 \phi + c_{55} \sin^2 \phi)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.72)$$

z eksenine dik polarize olmuş eninemsı dalga,

$$V_{T_1} = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{66} + c_{11} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi - \left[(c_{66} + c_{11} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi)^2 - 4c_1 \right]^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.73)$$

z eksenine dik polarize olmuş boyunamsı dalga,

$$V_L = (2\rho)^{1/2} \left(c_{66} + c_{11} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi + \left[(c_{66} + c_{11} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi)^2 - 4c_1 \right]^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.74)$$

hızları ile yayılacaktır. Burada ϕ , dalga yayılma yönünün x eksenine ile yaptığı açıdır.

(y,z) düzleminde keyfi bir doğrultuda yayılma hali;

x eksenine paralel polarize olmuş saf enine dalga,

$$V_{T_2} = \left(\frac{(c_{66} \sin^2 \theta + c_{55} \cos^2 \theta)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.75)$$

x eksenine dik polarize olmuş eninemsı dalga,

$$V_{T_1} = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{44} + c_{22} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta - \left[(c_{44} + c_{22} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta)^2 - 4c_2 \right]^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.76)$$

x eksenine dik polarize olmuş boyunamsı dalga,

$$V_L = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{44} + c_{22} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + \left[(c_{44} + c_{22} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta)^2 - 4c_2 \right]^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.77)$$

hızları ile yayılacaktır. Burada θ , dalga yayılma yönünün z eksenine ile yaptığı açıdır.

(x,z) düzleminde keyfi bir doğrultuda yayılma hali;

y eksenine paralel polarize olmuş saf enine dalga,

$$V_{T_2} = \left(\frac{(c_{66} \sin^2 \theta + c_{44} \cos^2 \theta)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.78)$$

y eksenine dik polarize olmuş eninemsiz dalga,

$$V_{T_1} = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{55} + c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta - \left[(c_{55} + c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta)^2 - 4c_3 \right]^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.79)$$

y eksenine dik polarize olmuş boyunamsız dalga,

$$V_L = (2\rho)^{-1/2} \left(c_{55} + c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta - \left[(c_{55} + c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta)^2 - 4c_3 \right]^{1/2} \right)^{1/2} \quad (4.80)$$

hızları ile yayılacaktır.

Burada θ , dalga yayılma yönünün z eksenine ile yaptığı açıdır. (4.73), (4.74), (4.76), (4.77), (4.79) ve (4.80) eşitliklerinde kullanılan c_1 , c_2 ve c_3 değerleri;

$$c_1 = (c_{11} \cos^2 \phi + c_{66} \sin^2 \phi)(c_{66} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi) - (c_{12} + c_{66})^2 \cos^2 \phi \sin^2 \phi \quad (4.81)$$

$$c_2 = (c_{22} \sin^2 \theta + c_{44} \cos^2 \theta)(c_{44} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta) - (c_{23} + c_{44})^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (4.82)$$

$$c_3 = (c_{11} \sin^2 \theta + c_{55} \cos^2 \theta)(c_{55} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta) - (c_{13} + c_{55})^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (4.83)$$

eşitlikleri ile verilir.

BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Giriş

Yönlendirme işlemi sonucunda polimerlerin, yönelme eksenine paralel düzlemlerde termal genleşme, termal iletkenlik, kırılma indisi ve elastik sabitler gibi fiziksel büyüklüklerinde değişim gözlenir. Yönelme eksenine dik düzlemlerde ise böyle bir değişim göze çarpmadığı birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Takanayagi ve diğ. 1966; Ward. 1971, Schultz, 1977, Wright ve diğ. 1971, Nakamura ve diğ. 1974, Choy ve diğ. 1978, Fava, 1980).

Bu çalışmada örnekler, $1000 \times 1000 \times 10$ (mm) boyutlarında ticari olarak üretilmiş polimetilmetakrilat (PMMA) plakadan hem tek yönlü çekme hem de iki yönlü çekme işlemi için kesilerek çıkarılmış ve herhangi bir kopma ya da yırtılmanın yaşanmaması için çekme işleminden önce örneklerin kesme yüzeyleri taşlanmış ardından zımpara ile parlatılmıştır (sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200A su zımparası). Benzer işlem, GoodFellow firmasından temin edilen 4,50 mm kalınlığa sahip PVC örnekler için de gerçekleştirilmiştir.

Çekme işleminin kontrollü bir şekilde sabit çekme hızında yapılması için bu işleme uygun bir çekme sistemi tasarlanmıştır. Bu nedenle istenilen çekme değerleri (sistemik olarak artan), çekme işleminden önce belirlenmiştir.

5.2 Yönlendirme İşlemi

Polimerlerde yönlendirme işlemi birçok araştırmacı tarafından farklı tekniklerle değişik polimerler üzerinde hem tek yönlü (uniaxial) hem de iki yönlü (biaxial) olarak çalışılmıştır (Takayanagi ve diğ. 1966, Stachurski ve Ward. 1966, Wright ve diğ. 1971, 1971; Nakamura ve diğ. 1974, Buckley ve McCrum 1973, Rider ve Rawson 1973, Rider ve Watkinson 1978, Güney ve diğ. 1991, Dooling ve diğ. 2001).

Bu teknikler, çekme (drawing-expansion), sıkıştırma (compression) ve dönen diskler arasından haddeleme (rolling) olarak sıralanabilir. Çekme işlemi, camsı geçiş sıcaklığının (T_g) altında bir sıcaklık için soğuk çekme (cold drawing), üstünde bir sıcaklık değeri için sıcak çekme (hot drawing) adını alır. Yönlendirme işlemi sabit bir yük ya da sabit bir çekme hızında da gerçekleştirilebilir.

Bazı araştırmacılar yönlendirme işlemlerini kendi düzenekleriyle gerçekleştirirken, bazı araştırmacılar da ticari kuruluşların ürettikleri sistemleri çalışmalarında kullanmışlardır. Şekil 5.1'de Instron Co. şirketine ait hem tek yönlü hem de çift yönlü yönlendirme yapabilen bir çekme sistemi görülmektedir.



Şekil 5.1. İki yönlü çekme sistemi (Instron Co.).

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen özel bir çekme sistemi gibi oldukça maliyetli bir sistemin satın alınması yerine istenilen çekme işlemini gerçekleştirecek daha basit ve ucuz bir sistemin üretilmesine gidilmiştir.

İlk olarak, bir fırın içerisine (ısıtılmış hava ortamı) yerleştirilmiş çekme düzeneği tasarlanmıştır. Bunun için, bir motor ile sürülen iki dişli sisteminin çevirdiği mekanik gerdirmeler kullanılmıştır. Bu gerdirmelerin her bir ucuna çelik halat bağlanmış ve bu halatlar çekme ekseninin geometrisine ($\pm x$ veya $\pm z$) göre fırın içerisindeki malzeme tutucularına bağlanmıştır.

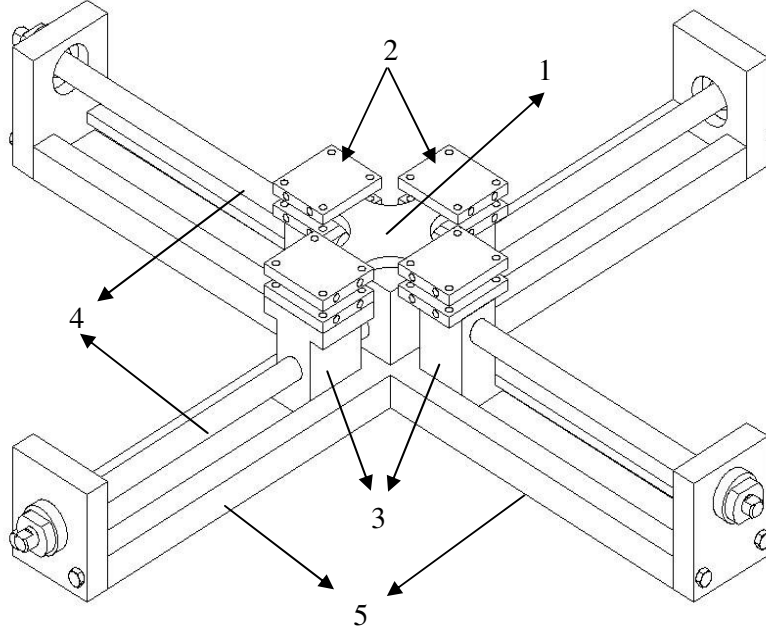
Bu malzeme tutucuları, örneğin tutuculardan ayrılmaması için içerisinde dolaşan su ile soğutulmuştur. Bu çekme sisteminden aşağıda sıralanan olumsuzluklardan dolayı vazgeçilmiştir.

1. Çekme değerler, gerdirmeler üzerindeki dişli çaplarına bağlı olduğundan istenilen değerlerin elde edilmesindeki zorluklar.
2. Çekme işlemi halatlarla gerçekleştirildiğinden her bir çekme ekseninin her iki ucunda çekme öncesinde halatlardaki farklı gerilmeler sonucunda çekme işleminin simetrisizliği (iki yönlü çekilmiş örnekler).
3. Fırın içerisinde sıcaklık dağılımındaki anormallikler nedeniyle örnek üzerinde homojen olmayan sıcaklık ve bunun sonucunda yerel sünmeler ve kopma.
4. Fırın içerisinde örneğin tutuculara bağlanmasında ve çıkarılmasındaki zorluklar.

Karşılaşılan bu olumsuzlukları ortadan kaldıracak yeni bir sistemin tasarlanılmasına gidilmiştir. Bu sistemin en önemli özelliği, aynı çekme ekseninde malzeme tutucularından birinin diğeriyle aynı oranda yer değiştirmesini sağlamasıdır. Bunun için, ortasından sağa ve sola dış açılmış çelik mil ve bu milin dönmesi ile somun bloklarından birinin sağa, diğeri sola doğru eşit mesafede hareketi düşünülmüştür. Bu somunlar dış açılmış çelik mile (cıva çeliği) geçirildikten sonra üst kısımlarında kızaklanmış metal (ST-50 çelik) bir şaseye yerleştirilmiştir.

Somun bloklarının alt kısımları, malzeme tutucularının sabitlenmesi için düz bir plaka halinde hazırlanmış ve kenarlarına iki adet delik açılmıştır. Böylece malzeme tutucuları bu bloklara rahat bir şekilde monte edilmiştir. Çelik millerin her iki ucu metal şaseye birer rulman ile monte edilmiş ve kolay bir dönme imkanı sağlanmıştır.

Millerin birer ucu metal yapının dışına çıkarılmış ve redüktör miline kaplin aracılığıyla aktarılmıştır. Metal şase, mil ve somun blokları Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



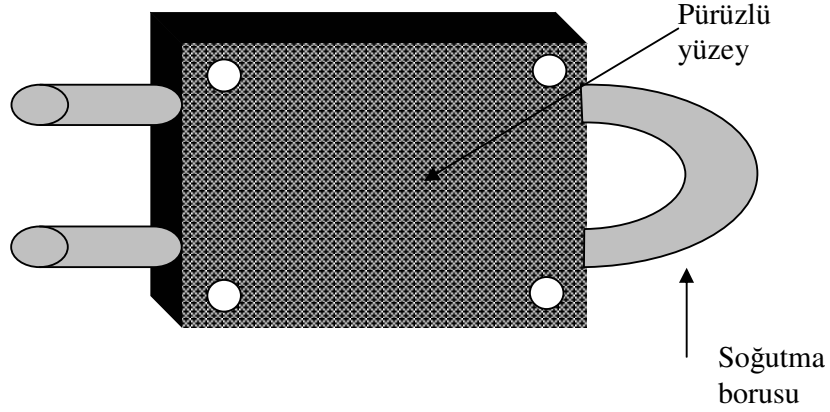
Şekil 5.2. Çekme sistemi.(alttan görünüş) 1. Malzeme , 2. Malzeme tutucular, 3. Somun bloklar, 4. Çelik Miller (dişli). 5. Metal kızaklar.

Malzeme tutucular, sağlıklı bir çekme işleminin gerçekleşmesinde önemli araçların başında gelir. Bunun nedeni, yüksek sıcaklıkta bir çekme işleminde, tutucunun malzemeye zarar vermeden (kopma, tutucular arasından sıyrılma veya kayma) çekme işlemi sonuna kadar malzemeyi kavramasıdır.

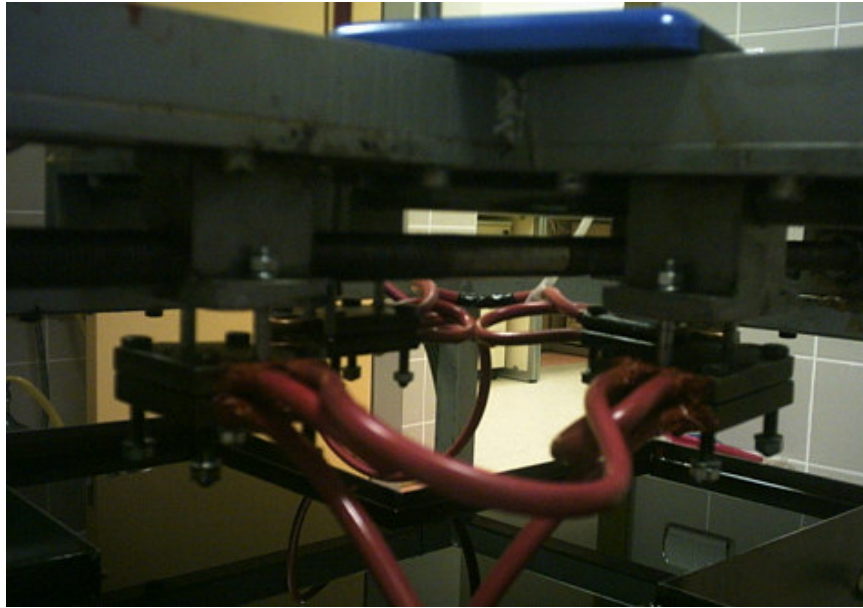
Metallerin polimerlere göre daha iyi ısı iletibildikleri bilindiğinden malzeme tutucularının ortam ısını malzemeye aktarmamaları için soğutulmaları gerekir. Bu amaçla tutucuların içerisinden U şeklinde dolaşacak bakır borular geçirilmiş (Şekil 5.3) ve uç kısımlarına yüksek sıcaklık hortumları (makaron) bağlanmıştır.

Soğutma işlemi bu yapıdan su dolaşımıyla gerçekleştirmiştir (Şekil 5.4). Tutucu yüzeyleri, malzemeye zarar vermeden kavrama işlemini yapması için pürüzlü hale getirilmiştir.

Çekilecek malzemenin tutuculara kolay bağlanabilmesi için tutucu köşelerine birer adet delik açılmış ve bu noktalardan vida-somun yardımıyla malzeme tutuculara sıkıca bağlanmıştır.



Şekil 5.3. Malzeme tutucusu.



Şekil 5.4. Malzeme tutucular ve soğutma sistemi.

Böylece, yeni sistemin en büyük avantajı olarak, aynı eksen üzerinde karşılıklı eşit yer değiştirme olanağı sağlanmıştır. Motor-redüktör sisteminde her parça olabildiğince özdeş seçilmiş ve millerde $\approx 0,07 \text{ dev/dk}$ dönme hızı elde edilmiştir.

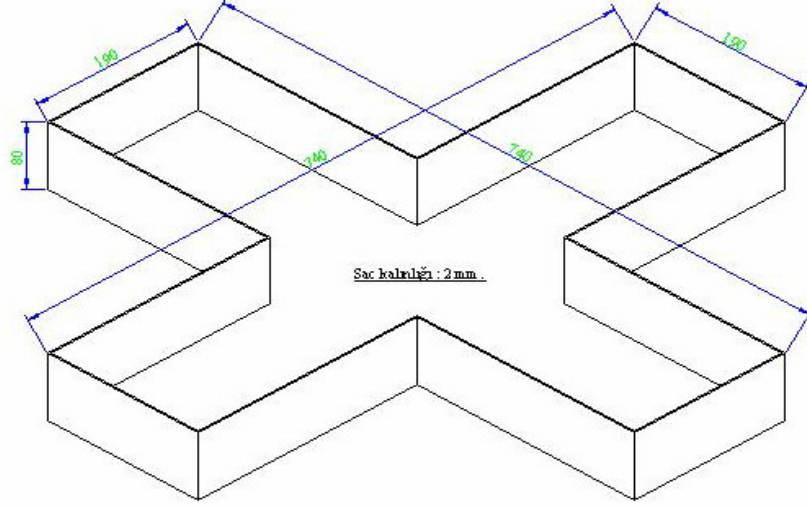
Sistem, her ne kadar güçlü bir yapı olarak görünse de, (metal yapı-ST50 Çelik, mil-Cıva Çeliği) sistemin uzun bir süre boyunca çekme sıcaklığında tutulması (110°C) metal yapıda gerilmelere neden olacağı ve kızaklanmış somun bloklarının hareketinin, dolayısıyla çekme işleminin olumsuz sonuçlanacağı endişesini doğurmuştur. Bu nedenle, sadece çekilecek malzemeyi kapsayacak bir sıcaklık ortamı düşünülmüştür. Bazı araştırmacıların, böyle bir ısı ortam için sıvı (silikon yağı) ya da sıvıya daldırılmış kuru hava ortamlarını kullandıkları bilinmektedir (Buckley ve McCrum. 1973). Bu gibi nedenlerden, böyle bir ortam için uygun malzeme olarak ısı transfer yağı (Shell Thermia B) seçilmiştir.

Polimerlerin gres ve yağlara karşı dirençlerinin yüksek olmasına rağmen çekilecek malzemenin (PMMA) bu tip bir yağdan etkilenip etkilenmeyeceği sorusuna cevap aranmıştır. İlk olarak katalog bilgilerinden PMMA'nın yüksek sıcaklıkta bu tip bir yağa dirençli olduğu bilgisine ulaşılmış ardından belirli sıcaklık ve sürelerde bu yağ içerisinde PMMA'nın yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, çekme sıcaklığı civarında (110°C) malzeme, 1, 2 ve 4 saat boyunca bu yağ içerisinde tutulmuş ve bir hassas terazi yardımıyla kütle farkı olup olmadığına bakılmıştır. Aynı işlem, oda sıcaklığında 2 gün için tekrarlanmış ve herhangi bir aşınma veya kütle farkı gözlenmemiştir. Benzer işlem PVC için de gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca hava yerine ısı kararlılığı yüksek böyle bir yağın kullanılması, düzgün bir sıcaklık dağılımının elde edilmesini de sağlamıştır. Böyle bir yağı taşıyacak tekne boyutları hesaplanmış ve içerisine 800W'lık iki boru tipi rezistans, çekilecek malzemenin uzak bir şekilde döşenmiştir. Bu rezistansların gerilim beslemeleri için, $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyette sıvı sıcaklığını dengede tutacak bir sıcaklık kontrol devresi kullanılmıştır. Bu tekne, hareket edebilen bir kaldıraç sistemine yerleştirilmiştir. Böylece malzemenin tutuculara rahat bir şekilde bağlanması için yağ teknesi, çekme sisteminin altından aşağı indirilerek geri çekilebilmekte, malzeme bağlandıktan sonra tekrar yükseltilerek malzemenin yağ batması sağlanmaktadır.

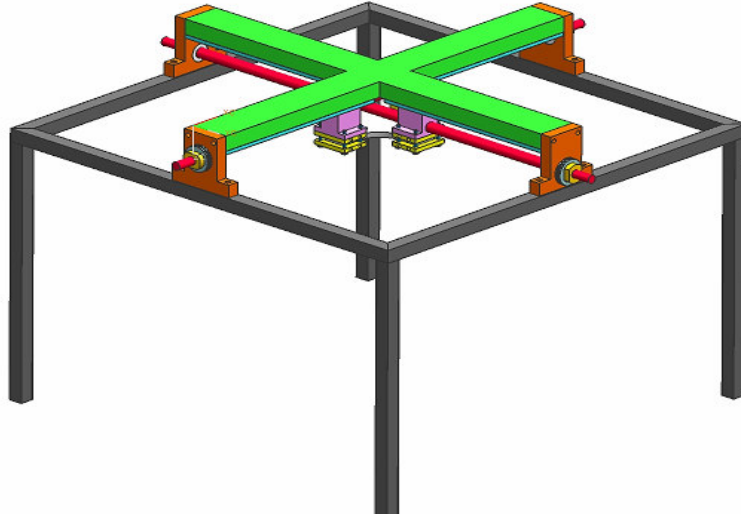
Burada dikkat edilmesi gerekenler, örneğin tamamen sıvıya batmasını sağlamak ve yağ teknesin yükseltip alçaltılmasında, malzeme tutucularının soğutulması için

kullanılan yüksek sıcaklık hortumlarına zarar verilmemesidir. Şekil 5.5’de kullanılan yağ teknesinin boyutları verilmiştir.

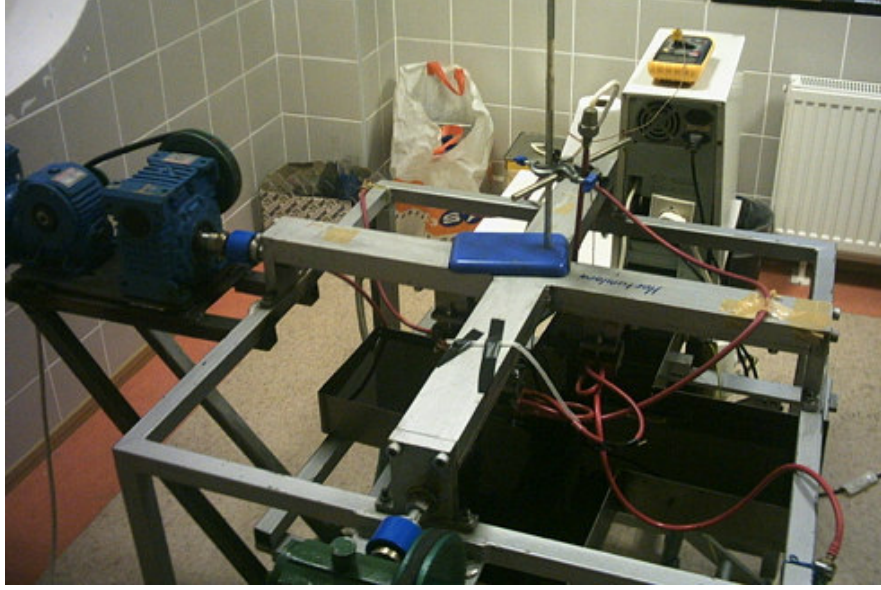


Şekil 5.5. Sıcak yağ teknesi (değerler mm boyutundadır).

Tamamlanmış çekme sistemi, alt kısımdan yağ teknesini taşıyacak kaldırıcın rahat girip çıkması için bir metal masaya monte edilmiştir. Yapının tamamı, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Çekme sistemi



Şekil 5.7. Çekme sistemi (Tamamlanmış yapı).

Çekme sistemi tamamlandıktan sonra deneme çalışmaları yapılmış ve daha önceki sistemde görülen birçok sorunun ortadan kalktığı görülmüştür. Bununla birlikte çift yönlü örnekler için, sürekli çekme işleminin istenilen çekme değerine olumsuz etki yarattığı gözlenmiştir. Bunun yerine toplam boydaki uzama ile merkezde 1mm ızgara aralıkları için uzamaların hemen hemen eşit olduğu 70 dk'lık çekme periyotlarına geçilmiştir. Her 70 dk'lık çekme işleminin ardından malzeme, tekrar ilk (200 mm) şekline ulaşıncaya kadar taşlanmış, yırtılma ve kopmaların engellenmesi için sırasıyla 320'den 1200'lük zımparaya kadar bu taşlanmış bölgeler parlatılmıştır.

Tablo 5.1'de farklı çekme oranı için süreye bağlı uzamalar verilmiştir. Tablo 5.1'de de görüldüğü her 70 dk'lık çekme periyotları için, örnek merkezinde üç farklı aralık için (1mm, 10mm ve 40mm) uzamaların yaklaşık eşit olduğu görülür. Bu çekme periyodundan daha uzun çekme süreleri için örnek merkezinden uzaklaştıkça uzamaların, merkezdeki 1mm ve 10mm'lik aralıklara nazaran daha yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir.

Tablo 5.1. PMMA’da İki yönlü çekme için örnek merkezinde farklı aralıklarda çekme oranları (çekme Periyodu.70dk).

	X eksenini $\lambda_x=1,5$			Z eksenini $\lambda_z=2.0$			
Çekme Süresi (dk)	70	140	210	70	140	210	255
Uzama (1 mm)	1.15	1.3	1.5	1.25	1.5	1.8	2
Uzama (10 mm)	1.15	1.3	1.5	1.25	1.5	1.85	2.1
Uzama (40 mm)	1.2	1.3	1.6	1.26	1.52	1.9	2.2

Bir çekme deneyinde örnek, malzeme tutucularına uygun bir geometride sıkıca monte edilir, yağ teknesi malzemeye doğru yavaşça yükseltılarak malzemenin tamamının yağa batması sağlanır.

Tutucuların soğutulması için her iki tutucu çiftinden eşit debide suyun dolaşması sağlanır. Çekme sıcaklığına kadar (110 °C) yağın ısınması için sıcaklık kontrol devresi rezistansları yaklaşık bir saat besler. Sıcaklık kontrol devresinin, yağ sıcaklığını 110 °C’de çok kısa sürede sabitlemeyi başarmasına rağmen (2-3 dk.) çekilecek malzeme yaklaşık 30 dk. bu sıcaklıkta tutulur. Ardından çekme işlemine geçilir ve her 5 dakikalık çekme süresinin ardından 3’er dk. bekleme süreleri uygulanır. Toplam 70 dk çekme süresinin ardından sıcaklık kontrol devresi kapatılıp sistem soğumaya bırakılır. Yağ sıcaklığı oda sıcaklığına ulaştığında yağ teknesi örnekten aşağıya indirilir ve çekilmiş örnek 1 saat ortam sıcaklığında tutulduktan sonra örnek tutucularından çıkarılır.

Bu tipte çekme denemelerinden sonra, asıl örnekler üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Örnekler, istenilen çekme oranında çekildikten sonra ultrasonik hız ölçümlerinin yapılabilmesi için orta bölgelerinden 44 mm çapında örnekler çıkarılmıştır. Örneklerin ultrasonik ölçüme hazır hale getirilmesi için, tornada ,çapları yaklaşık 40 mm’ye (ultrasonik hız ölçüm sistemi örnek tutucu çapı) ultrasonik dalga ile etkileşecek yüzeyleri de 0.05 mm hassasiyette eğriliklere tornalanıp parlatılmıştır.

Yüzeylerin parlatılması için, düzgün bir cam yüzey üzerine sıkıca monte edilmiş zımparalar (600,800,1000 ve 1200A) ve özel bir aparat kullanılmıştır. Parlatılan örneklerin ultrasonik hız ölçümleri yapılmadan önce geometrik olarak (kalınlık ve çap) hacimleri hesaplanmış, kütleleri de hassas terazi (± 0.0001 g) yardımıyla ölçülmüştür.

5.3. Ultrasonik Dalga Hızı ölçümleri

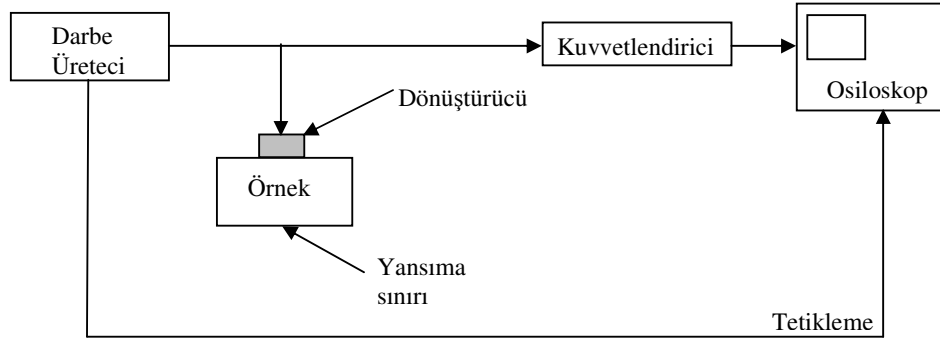
Polimerlerin ultrasonik özelliklerinin incelenmesinde değişik teknikler kullanılmıştır (Markham. 1970, McSkimin et.al. 1971, Wright et.al. 1971, Thomas et.al. 1973, Hartman et.al. 1974, Wilkinson et.al. 1974, Rawson et.al. 1974, Rider et.a. 1978, Chan et.al. 1978, Choy et.al. 1988). Bu tekniklere örnek olarak, puls-eko, overlap ve daldırma teknikleri gösterilebilir. Bu tekniklerin incelenecek materyal ve ölçüm koşullarına bağlı olarak ayrı ayrı üstünlükleri vardır (Güney, 1989).

Her iki yöntemde de ultrasonik dalgaları elde etmek ve algılamak için kullanılan dönüştürücüler (transducer) incelenecek örneğin yapısına ve frekansa göre quartz yada piezoelektrik seramiklerdir. Bunlar, yüzeylerine uygulanan elektriksel işareti, titreşerek mekanik dalgaya veya bu dalgaların yüzeylerine çarpması sonucu meydana gelen mekanik basıncı elektriksel işarete dönüştürebildiklerinden bu ismi almışlardır (Kara, 1997).

5.3.1. Atma-Yansıma (pulse-echo) tekniği

Bu yöntemin blok yapısı Şekil 5.8'de verilmiştir. Bu teknikte bir adet dönüştürücü kullanılır ve darbe üretici tarafından örneğin bir ucundan gönderilen kısa süreli bir atmanın, diğer ucundan yansyarak geri gelme süresini ölçme şeklinde çalışır. Dönüştürücü ile örnek arasındaki teması sağlamak için özel yapıştırmacılar kullanılır.

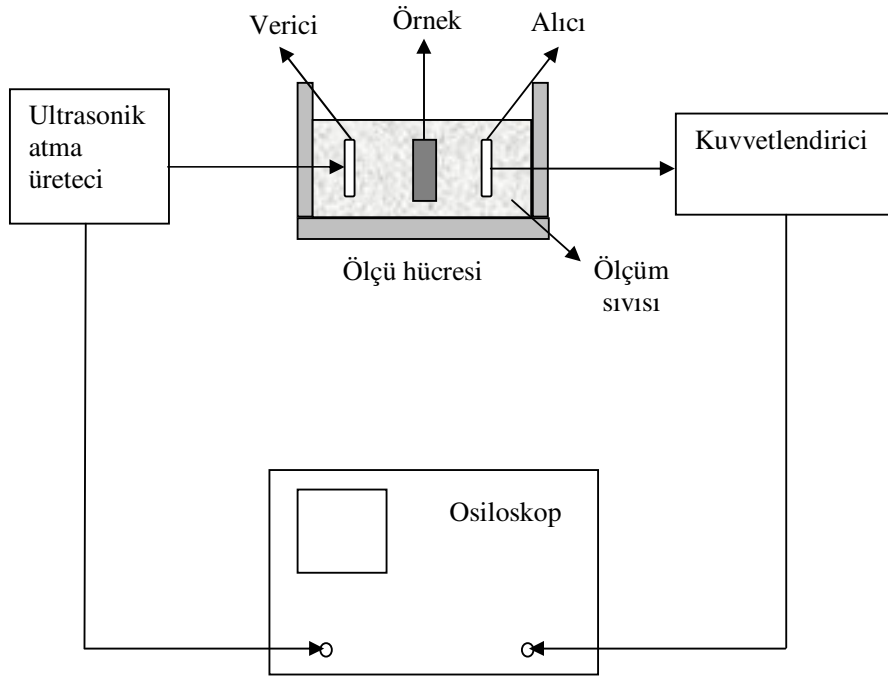
Bu yöntemde, örneğin ölçülecek doğrultuya uygun kesilmesi ve hem enine hem de boyuna hız ölçümleri yapmak için iki tip dönüştürücü kullanılması gerekmektedir (Kara, 1997).



Şekil 5.8. Atma-Yansıma blok yapısı (Kara, 1997).

5.3.2. Daldırma Tekniği

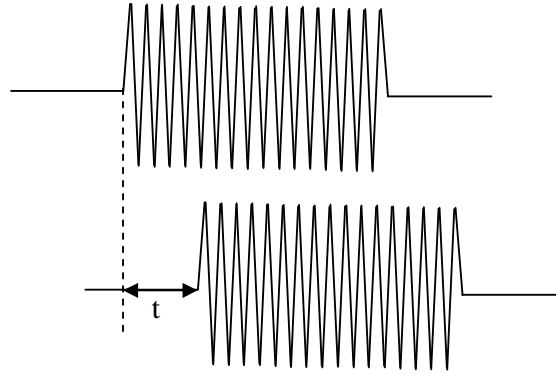
Bu yöntemde, birisi ultrasonik verici ve diğeri de alıcı olarak kullanılan iki dönüştürücü mevcuttur. İncelenecek örnek ve dönüştürücüler, ölçü hücresi adı verilen bir kaptaki sıvı içerisinde bulunurlar. Dönüştürücüler sızdırmazlık özelliğine sahip tutucular içerisinde.



Şekil 5.9. Daldırma tekniği blok yapısı (Kara, 1997)

Şekil 5.9’da bu metodun en yalın halde bir blok diyagramı görülmektedir. Bu teknikte ölçüm esası, vericiye boyuna bir atma (pals) gönderildiğinde titreşen dönüştürücüden yayılan dalgaların, aradaki sıvı ve incelenecek örnekten geçerek karşıdaki alıcıya ulaşması için geçen zamanın tespitine dayanır.

Bunun için önce dönüştürücüler arasında örnek varken geçen zaman, gönderilen atmaya göre geciken işaretin osiloskopta gözlenmesiyle tayin edilir. Örnek kaldırıldığında aynı atma alıcıya daha geç ulaşacağından osiloskop ekranında konumu sağa kayacaktır (Şekil 5.10).

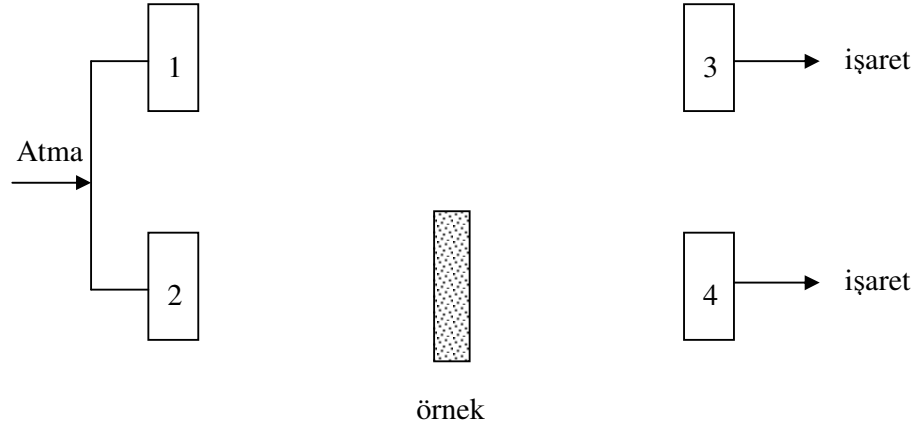


Şekil 5.10. Daldırma tekniğinde örnek var ve yokken atmalar arasındaki zaman farkı (Kara, 1997).

5.3.3. Dört Dönüştürücülü Daldırma Tekniği

Atma-yansıma tekniğinin aksine daldırma tekniğinde, örnek belirli açılarda döndürülerek de ölçüm yapılabildiğinden, enine ve boyuna uyarımları elde etmek için farklı tipte iki dönüştürücüye ve dönüştürücü ile örnek temasını sağlayan özel yapıştırıcılara gereksinim duyulmamaktadır. Bununla birlikte, günlük deney koşullarına ve ölçüm sisteminin ısıl kararsızlığına bağlı olarak ölçme hataları oluşabilir. Bu nedenle, daldırma tekniğinde bu tür hataları bir dereceye kadar önleyebilecek dört dönüştürücülü daldırma sistemi kullanılabilir (Kara, 1997).

Bu yöntemde, dönüştürücülerin ikisi verici, diğer ikisi de alıcı olarak karşılıklı yerleştirilir. Verici-alıcı çiftlerinin biri referans diğeri de ölçüm çiftidir.



Şekil 5.11. Dört dönüştürücülü daldırma tekniği (Kara, 1997).

Şekil 5.11’de 1 ve 2 numaralı dönüştürücüler verici, 3 ve 4 numaralı dönüştürücüler alıcı olarak çalışır. İki verici paralel bağlıdır ve gönderilen atma ikisine de aynı anda uygulanmış olur. 3 numaralı referans alıcısı ile 4 numaralı örnek alıcısı arasında ΔD kadar mesafe varsa ve arada örnek yoksa alınan yol farkı yüzünden iki alıcı arasında bir Δt zaman farkı oluşur. Bu yol ve zaman değerlerinden dalgaların sıvı içerisindeki yayılma hızı bulunur.

$$V_0 = \Delta D / \Delta t \quad (5.1)$$

1-3 numaralı referans çifti ile, 2-4 numaralı ölçüm çifti arasındaki mesafe aynı iken ve arada örnek yoksa, uygulanan atma alıcılara aynı anda ulaşacaktır. İki alıcı çıkışı arasında bir faz farkı gözlenemez. Araya bir örnek yerleştirildiğinde ise örneğin yapısına ve kalınlığına bağlı olarak, alıcı çıkışlarında bir faz farkı meydana gelecektir.

Örnek dik olarak yerleştirildiğinde, örnek içinde dalga geliş yönünde saf boyuna dalga yayılacaktır (Şekil 5.16). Başlangıçta dönüştürücüler arasında örnek yokken ultrasonik dalga, X yolunu T_0 zamanında ve araya ℓ kalınlığında örnek yerleştirildiğinde ise $X_1+X_2+\ell$ yolunu T zamanında alacaktır. Dalganın örnek içinde gecikme süresi,

$$T=T_0-T \quad (5.2)$$

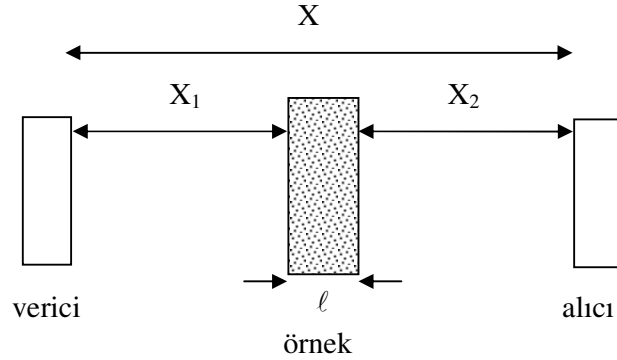
Olarak belirlenebilir. V_0 , boyuna dalganın sıvı içindeki, V_L ise örnek içindeki yayılma hızı olmak üzere ℓ kalınlığındaki örnek ve sıvı içinden dalganın geçiş süreleri

$$T_0 = \frac{\ell}{V_0} \quad \text{ve} \quad T = \frac{\ell}{V_L} \quad (5.3)$$

olarak ifade edilir. Buradan;

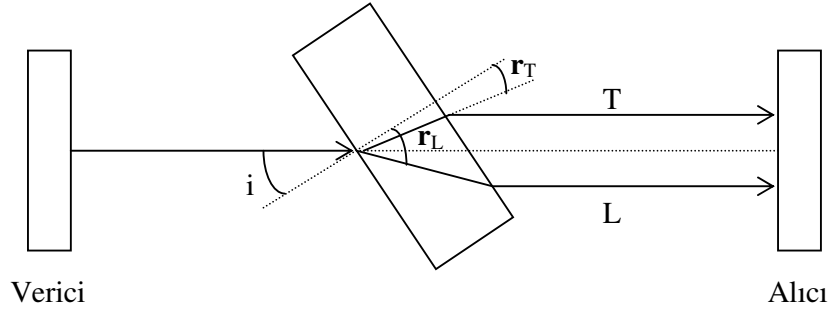
$$t = \ell \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_L} \right) \quad (5.4)$$

elde edilir.



Şekil 5.12. Örneğin dik yerleştirilmesi.

Örnek belirli bir açıda tutulduğunda, katı içerisinde hem boyuna hem de edine dalgalar yayılacaktır (Şekil 5.13). Bu durumda katı içerisindeki iki dalga farklı hızlara sahip olduklarından farklı açılarda yayılacaklardır. i ; katı yüzeyine gelen boyuna dalganın gelme açısını, r_L ve r_T katı içinde yayılan boyuna ve enine dalganın yayılma (kırılma) açılarını, V_L ve V_T yayılma hızlarını göstermek üzere, katı sıvı ara yüzeyinde Snell yasası yazılabilir.



Şekil 5.13. Örneğin açılı yerleştirilmesi.

$$\frac{\sin i}{V_0} = \frac{\sin r_L}{\sin i} = \frac{\sin r_T}{V_T} \quad (5.5)$$

buradan katı içinde boyuna ve enine dalga hızları,

$$V_L = V_0 \frac{\sin r_L}{\sin i} \quad \text{ve} \quad V_T = V_0 \frac{\sin r_T}{\sin i} \quad (5.6)$$

yazılabilir. Şekil 5.13'deki geometride trigonometrik ifadelerin kullanılmasıyla yayılma açıları,

$$r_{L,T} = \text{tg}^{-1} \frac{\sin i}{\cos i \pm \frac{v_0 t}{\ell}} \quad (5.7)$$

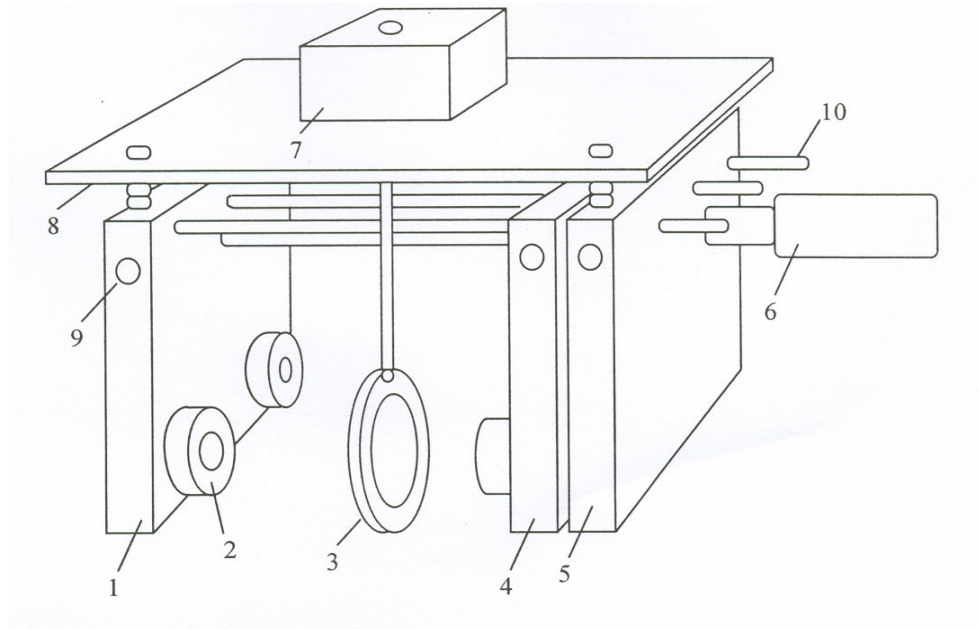
yazılır. Burada, (-) boyuna, (+) enine dalgaların yayılma açılarının hesaplanmasında kullanılır.

Bu çalışmada daha önce Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans tez çalışmasında imal edilen bir dört dönüştürücülü ultrasonik spektrometre kullanılmıştır (Kara, 1997). Bu spektrometre, bir elektronik kutusu, ölçüm hücresi ve özel bir yazılımın çalıştırıldığı PC'den oluşmaktadır. Bu spektrometrenin avantajı, klasik yöntemde zaman farklarının osiloskopa ölçülmesi yerine elektronik devreler ve uygun bir yazılım ile ölçümlerin kısa zamanda ve güvenle yapılabilmesidir. Örnek tutucunun her bir açısında sistem 100 ölçüm almakta ve bu 100 ölçümün ortalaması

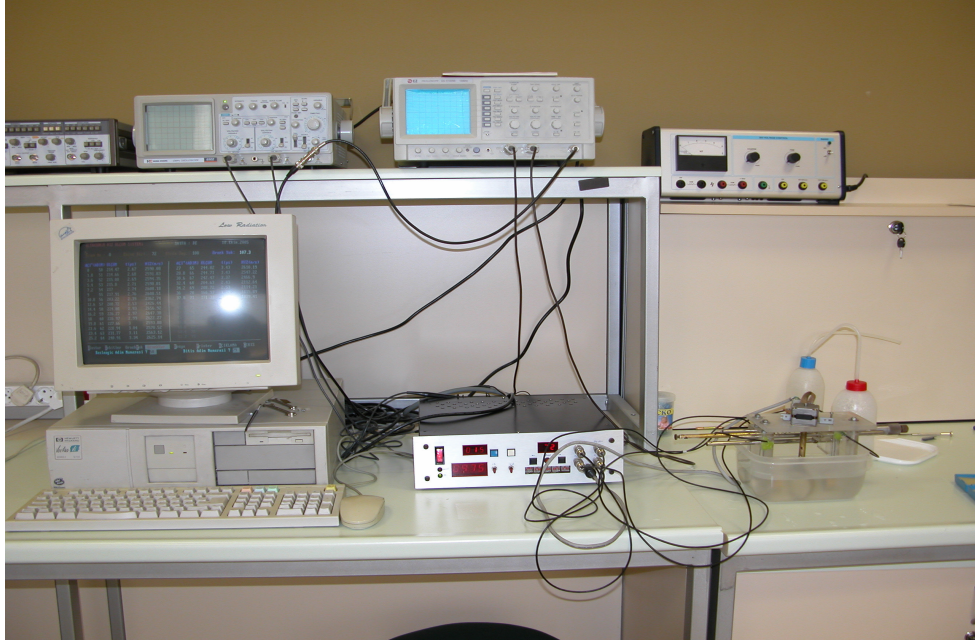
yazılımda kullanılarak her açı değeri için periyot, zaman farkı ve hız değeri PC ekranında görülebilmektedir.

Kullanılan yazılımda ölçümü yapılan örneğin numarası, dönüştürücülerin titreşim frekansı (748 kHz), örnek kalınlığı, ölçümün başlangıç ve bitiş adım değeri ile enine dalgaların hesaplanmasına başlanacak adım değeri girilir.

Örnek tutucunun dönmesini sağlayan motorun her bir dönme adımına karşılık örnek tutucu $1,8^\circ$ döndürülmüş olur. Spektrometrenin ölçüm hücresi Şekil 5.14'de görülmektedir. Şekil 5.15'de ölçüm sisteminin genel bir görünüşü verilmiştir.



Şekil 5.14. Ölçüm Hücresi (1.Vericilerin bulunduğu tutucu, 2.Dönüştürücü, 3. Örnek tutucu, 4. Hareketli parça, 5. Referans alıcısının bulunduğu parça, 6.Mikrometre, 7.Adım motoru, 8. Motor taşıyıcı levha, 9.Kablo kanal girişi, 10. Çelik çubuk) (Kara, 1997).



Şekil 5.15. Ultrasonik ölçüm sistemi.

5.3.4. Ultrasonik Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu

Özellikle iki yönlü çekilmiş PMMA örneklerin elastik sabitlerinin belirlenmesinin ardından, artan çekme oranlarına karşın elastik sabitlerde sistematik bir değişim gözlenmemesinden dolayı, çekme işleminde veya ultrasonik hız ölçümlerinde bir hatanın oluşup oluşmadığı sorusu akla gelmiştir. Çekme şartları incelendiğinde, özellikle yeni çekme sisteminin çekme işlemi ve çekme sıcaklığındaki kararlılığı, buradan kaynaklanacak hata şüphesini ortadan kaldırmıştır. Aynı zamanda örnek üzerindeki serigrafik desenler, çekme işleminin istenilen şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Ultrasonik hız ölçümleri incelendiğinde, özellikle izotrop örnek için hem boyuna hem de enine dalga hızlarındaki dalgalanmalar, hataların hız ölçümlerinden kaynaklanabileceğini göstermektedir.

İlk olarak ultrasonik spektrometrenin, klasik yöntem yerine (işaretler arası zaman farkının osiloskop ekranı üzerinden okunması), uygun elektronik düzenek ve yazılım kullanılarak kendi kendine ölçüm yapabilmesi tercih edilmiştir.

Elektronik düzeneğin tetikleme sistemi, hem referans hem de ölçüm alıcı dönüştürücülerine gelen işaretleri tetikleyerek iki işaret arasındaki zaman farkını belirlemektedir. Referans dönüştürücüleri arasındaki işaret, ölçümün tüm adımlarında (her açı değerinde) sabit bir genlikte iken (keskin işaret), ölçüm dönüştürücüleri arasındaki işaret, özellikle yüksek açı değerlerine doğru örnek döndürüldüğünde zayıflamakta ve böylece referans ve ölçüm işaretleri arasındaki zaman farkı doğru tespit edilememektedir. Böyle bir hata değeri daha önceden % 1-2 mertebesinde belirtilmesine karşın özellikle düşük anizotropi gösteren polimerlerde yüksek bir hata değeri sayılabilir.

Tetikleme ile ilgili diğer bir sorun, ölçüm alıcı-verici dönüştürgen çifti arasında oluşan işaretin daha öncesinde kaynağı bilinmeyen (parazit) bir işaretin varlığıdır. Özellikle, örneğin döndürülmesiyle ölçüm dönüştürgenleri arasındaki işaretinin genlik değeri azaldığından, tetikleme noktası ölçüm işaretinin önünde beliren parazit işarete kaymaktadır. Bu durum, yüksek açı değerlerinde boyuna hız ölçümlerinde ve enine hızların gözlemlendiği düşük genlik bölgesinde, ölçümde hataya neden olabilir.

Bu tür hataların giderilmesi ve enine işaretin tam olarak hangi açı değerlerinde başladığını gözlemek için, sistemin elektronik yapı ve yazılım sayesinde ölçüm alması yerine, osiloskop ekranı üzerinde işaretlerin seçilmesi ve yatay eksende zaman farkı okunması yoluna gidilmiştir.

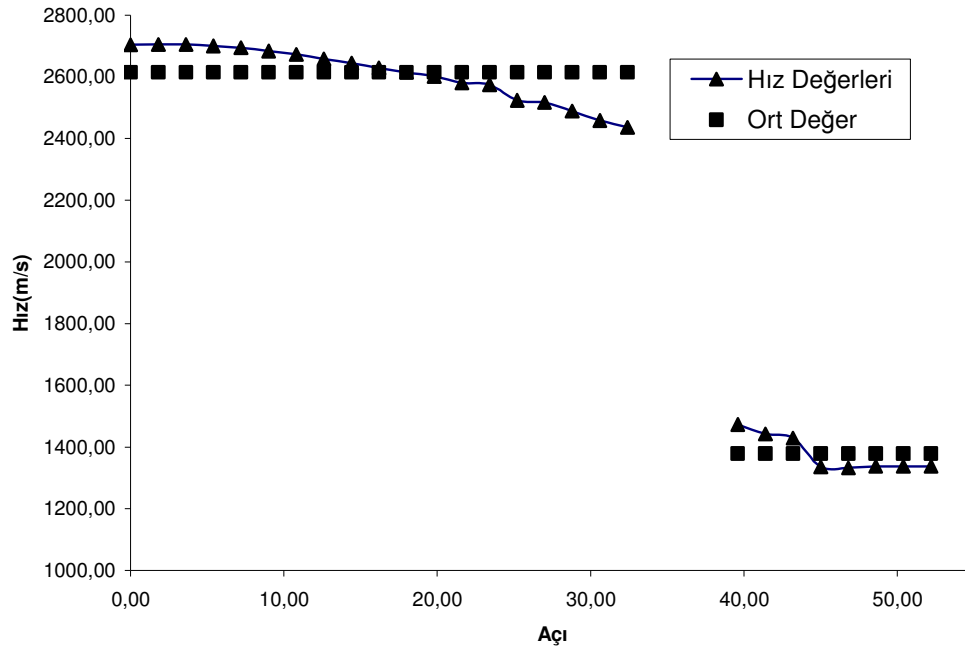
Ultrasonik spektrometrede dikkat çeken diğer bir sorun alıcı dönüştürgenin bağlı olduğu yapının sabitlenmesindeki zorluktur. Spektrometrenin alıcı dönüştürgeni, uygun bir genlik değerinin elde edilebilmesi için, iki çelik mil üzerinde bir mikrometre yardımıyla, konumu değiştirilebilir.

Her ne kadar vidalar yardımıyla çelik miller üzerinde yapının sabitlenmesi sağlanmış olsa da, özellikle örnek değişimi ya da ölçüm sıvısının değişimi gibi sık tekrarlanan olaylar neticesinde yapının çok küçük de olsa yer değiştirmesi, referans olarak seçilen örnek yok değerlerinin ve ölçüm değerlerinin daha önceki ölçüm değerlerinden farklılaşmasına neden olmaktadır. Alıcı dönüştürgeni tutan bu yapı, vidaların yanı sıra bir yapıştırıcı kullanılarak sabitlenmiştir.

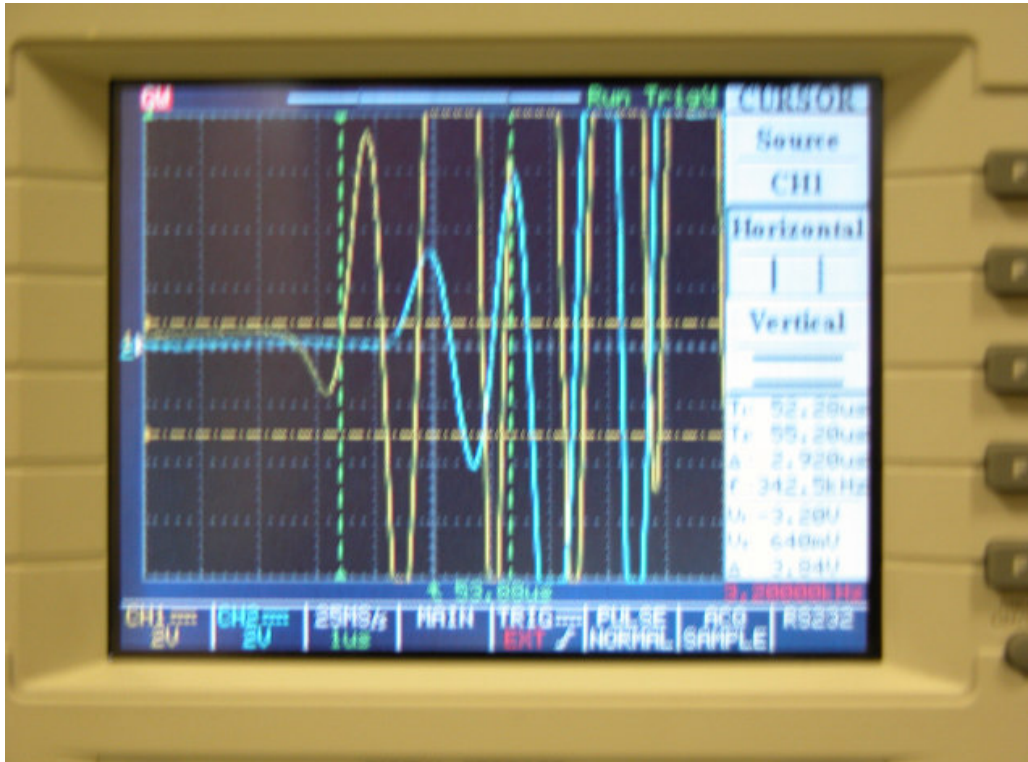
Tablo 5.2’de hatalar giderilmeden önce gerçekleştirilmiş hız ölçümü verilmiştir. 0°-32° arası boyuna hızların gözlemlendiği bölgede ortalama hız değerinden % 3-7 arasında değişen 5.16’da bu değerlerin açığa bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 5.17’de osiloskop ekranı üzerinde ölçüm işlemi gösterilmektedir.

Tablo 5.2. İzotrop örnek (PMMA) için elektronik sistem ile gerçekleştirilmiş hız ölçümü

Açı(i)	$\Delta t(\mu s)$	$V_L, V_T(m/s)$	Ortalama	ort.fark	Yüzde hata
0,00	2,62	2703,58	2613,69	89,89	3
1,80	2,63	2704,96	2613,69	91,27	3
3,60	2,63	2704,24	2613,69	90,55	3
5,40	2,64	2699,95	2613,69	86,26	3
7,20	2,65	2693,93	2613,69	80,24	3
9,00	2,66	2682,95	2613,69	69,26	3
10,80	2,67	2672,97	2613,69	59,28	2
12,60	2,68	2658,30	2613,69	44,61	2
14,40	2,70	2643,84	2613,69	30,15	1
16,20	2,73	2628,60	2613,69	14,91	1
18,00	2,76	2614,30	2613,69	0,61	0
19,80	2,80	2601,48	2613,69	-12,21	0
21,60	2,28	2580,09	2613,69	-33,60	1
23,40	2,37	2574,42	2613,69	-39,27	2
25,20	2,90	2523,72	2613,69	-89,97	3
27,00	2,99	2517,27	2613,69	-96,42	4
28,80	3,04	2488,97	2613,69	-124,72	5
30,60	3,11	2458,05	2613,69	-155,64	6
32,40	3,21	2435,68	2613,69	-178,01	7
ENİNE BÖLGE					
39,60	0,08	1472,82	1378,31	94,51	7
41,40	0,25	1442,73	1378,31	64,42	5
43,20	0,33	1429,21	1378,31	50,90	4
45,00	-0,90	1336,14	1378,31	-42,17	3
46,80	-0,95	1332,48	1378,31	-45,83	3
48,60	-0,95	1337,41	1378,31	-40,90	3
50,40	-0,97	1338,05	1378,31	-40,26	3
52,20	-1,00	1337,62	1378,31	-40,69	3



Şekil 5.16. Yazılım ile alınmış izotrop (PMMA) örnek hız ölçümleri.



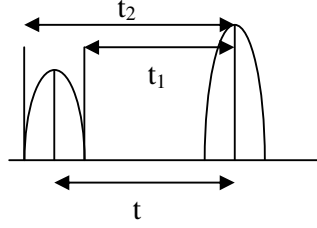
Şekil 5.17. Osiloskop yardımıyla referans ve ölçüm işaretleri arasındaki zaman farkının belirlenmesi (sarı-ölçüm işareti, mavi-referans işareti).

Osiloskop ile ölçüm işleminde hem referans hem de ölçüm genlik kazanç ayarlarının yapılması gerekir. Bu kazanç ayarı, özellikle enine hızların osiloskobun aynı düşey kazanç değerleri için (2 Volt/div.) uygun bir şekilde yapılmasında gereklidir. Spektrometrenin referans ve ölçüm kazanç değerleri yeterince iyi ayarlanmadığı takdirde ölçüm işaretinin genliğindeki zayıflamalar neticesinde enine hızlar rahat gözlenememektedir.

İşaretler arasındaki zaman farkının gözlenmesinde dikkat edilmesi gereken konu, zaman işaretleyicilerinin, ölçüm ve referans işaretlerinin ilk piklerinin hangi noktasına konmasıdır. Özellikle ölçüm pikinin yükselen açılış değerlerinde genliğinin ve şeklinin bozulması nedeniyle zaman işaretleyicisini pikin yükselen alternansına konumlandırmak hata değerlerini arttırmaktadır. Zaman işaretleyicisinin her bir adımı zaman ekseninde 0,04 μ s'ye karşılık gelmektedir. Bu değerde bir kademelik okuma hatası ölçümler üzerinde % 3 mertebesinde hataya neden olmaktadır. Bu sorununun önlenmesi için pikin yatay eksenini kestiği iki noktanın ortalaması alınmıştır.

Referans işareti, ölçümün tüm açılış değerlerinde genlik değerini koruduğundan, pik genişliğinde herhangi bir değişim göstermez. Bu nedenle ilk olarak referans pikinin genişliği belirlenmelidir. İki zaman işaretleyicisi bu pikin yatay eksenini kestiği noktalara ayarlanır ve pik genişliği belirlenir (0,64 μ s). İşaretleyicilerinde biri aradaki zaman farkının 0,32 μ s olduğu noktaya getirilir. Diğer işaretleyici ölçüm pikinin alçalan alternansının zaman eksenini kestiği noktaya ayarlanarak t_1 ölçümü yapılır. Ardından işaretleyici bu pikin yükselen alternansının zaman eksenini kestiği noktaya kaydırılarak t_2 ölçümü gerçekleştirilir. $(t_2-t_1)/2$ şeklinde ölçüm pikinin orta noktası bulunur. Bu değer, t_1 değerine eklenerek referans pikinin orta noktasından ölçüm pikinin orta noktasına kadar zaman farkı (t) okunmuş olur. Böylece 0,04 μ s olan osiloskobun zaman farkı okuma hata değeri 0,02 μ s'ye düşürülür.

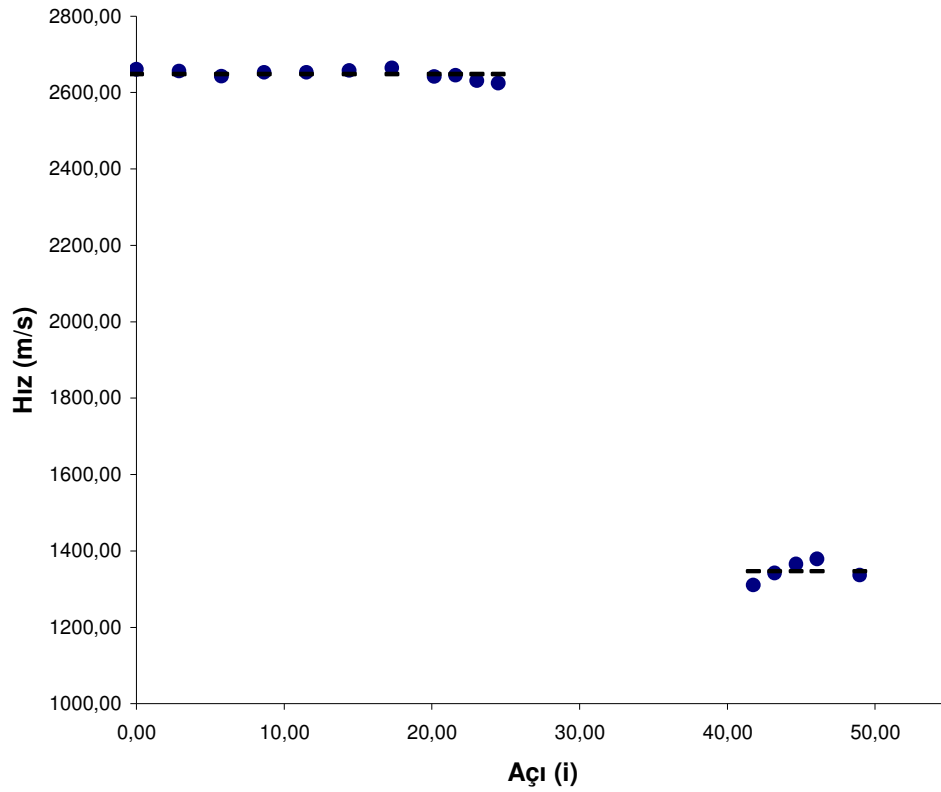
Hız ölçümlerindeki yüzde hata değeri % 1 mertebesine çekilir. Bu işlem, Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Ölçüm ve referans pikleri arasında zaman farkının okunması.

Ölçüm sistemindeki değişikliklerin ardından PMMA ve PVC örneklerde hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler daha önceki ölçümler için dilimlendiğinden bu örneklerde sadece z yönünde (kalınlık z) yayılan saf boyuna dalga hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.19'da $\lambda=1,0$ PMMA örneğinde osiloskop yardımıyla yapılan hız ölçümü verilmiştir.



Şekil 5.19. Osiloskop yardımıyla gerçekleştirilmiş hız ölçümü.

5.4. PMMA (Polimetilmetakrilat)

Bu çalışmada kullanılan PMMA (polimetilmetakrilat), $-\text{[CH}_2\text{-C(CH}_3\text{)CO}_2\text{CH}_3\text{]}_n-$ genel formülü ile verilir. Ticari ismi, lucite, oroglas, perspex ve plexiglas şeklindedir. Orijinal PMMA, bir camsı polimer olmasından optik uygulamalarda cam yerine sıkça kullanır. Sert ve düzgün şekilli ve atmosferik şartlara dayanıklıdır. Düşük çizilme direncinden dolayı otomobil camı olarak kullanılmamasına karşın uçak camı olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

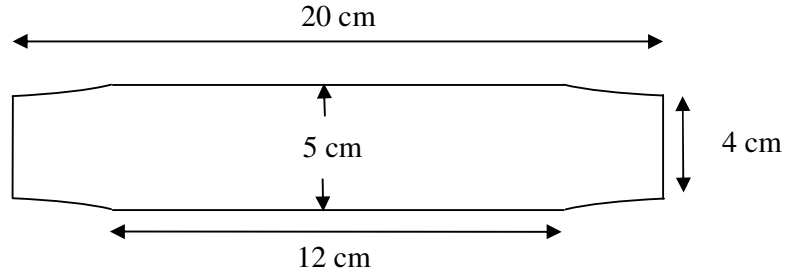
PMMA, amorf yapıda camsı polimerdir. Yoğunluğu, $1,19 \text{ g/cm}^3$ tür ve düşük su absorpsiyonu gösterir. Malzemenin tipine göre kırılma indisi, 1,49 ile 1,51 arasında değişir. Mekanik mukavemeti ve boyut kararlılığı yüksektir (düzgün şekilli). Düşük bir kopma uzaması gösterir ve yüksek Young Modülü ve sertliğe sahiptir. En sert termoplastiklerden biridir.

Termal kararlılık standardı 65°C 'tır. 100°C 'nin üzerinde -70°C 'nin altında ısıl kararlılıktan uzaklaşır ve verimli olarak kullanılamaz. Yüksek dielektrik mukavemeti ile iyi bir elektriksel yalıtım gösterir. Optik özelliği, tamamen saydam ve renksizdir. Adı ışık için % 92 oranında optik geçirgenliğe sahiptir.

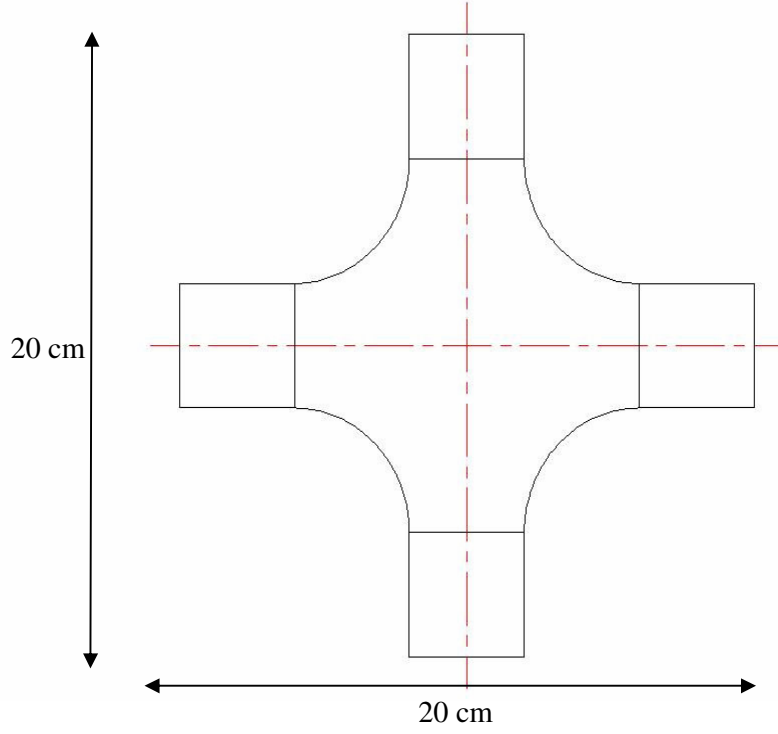
Tablo 5.3'te PMMA'nın genel özellikleri verilmiştir. Ticari olarak üretilmiş 1cm kalınlıkta $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ alanında PMMA plakadan uygun parçalar kesilerek, tek yönlü çekme işlemi için $20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ boyutlarında, çift yönlü çekme işlemi için $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ boyutlarında örnekler hazırlanmıştır (Şekil 5.20 ve Şekil 5.21).

Tablo 5.3. PMMA'nın genel özellikleri (Goodfellow 2005 Kataloğu).

Asitler (konsantre)	Güçlü-Orta
Asitler (seyreltik)	Güçlü-Orta
Alkoller	Güçlü-Orta
Alkaliler	Güçlü
Aromatik hidrokarbonlar	Zayıf
Gres ve yağlar	Güçlü
Halojenize Hidrokarbonlar	Zayıf
Halojenler	Zayıf
Ketonlar	Zayıf
Dielektrik sabit (1MHz'de)	2.6
Dielektrik mukavemet (kV mm-1)	15
Kayıp faktörü (1MHz'de)	0.014
Yüzey direnci (Ohm/s)	1014
Hacim direnci (Ohmcm)	2-14 x 1015
Kopma uzaması(%)	2.5-4
Sertlik (Rockwell)	M92-100
Poisson oranı	0.35 - 0.4
Gerilme modülü (GPa)	2.4-3.3
Gerilme mukavemeti (MPa)	80
Yoğunluk (g.cm ⁻³)	1.19
Sınırlı oksijen indisi (%)	17-20
Radyasyon direnci	Orta
Kırılma indisi	1.49
Ultraviyole ışığa direnç	Zayıf
Su absorpsiyonu – (24 saatin üzerinde) (%)	0.2
Termal genişleme katsayısı (x10-6 K-1)	70-77
Isı yansıtma sıcaklığı (0.45MPa'da) (°C)	105
Isı yansıtma sıcaklığı 1.8MPa'da) (°C)	95
Özgül ısı (J K-1 kg-1)	1400 - 1500
Termal iletkenlik(W m-1 K-1)	0.17-0.19 (23°C'da)

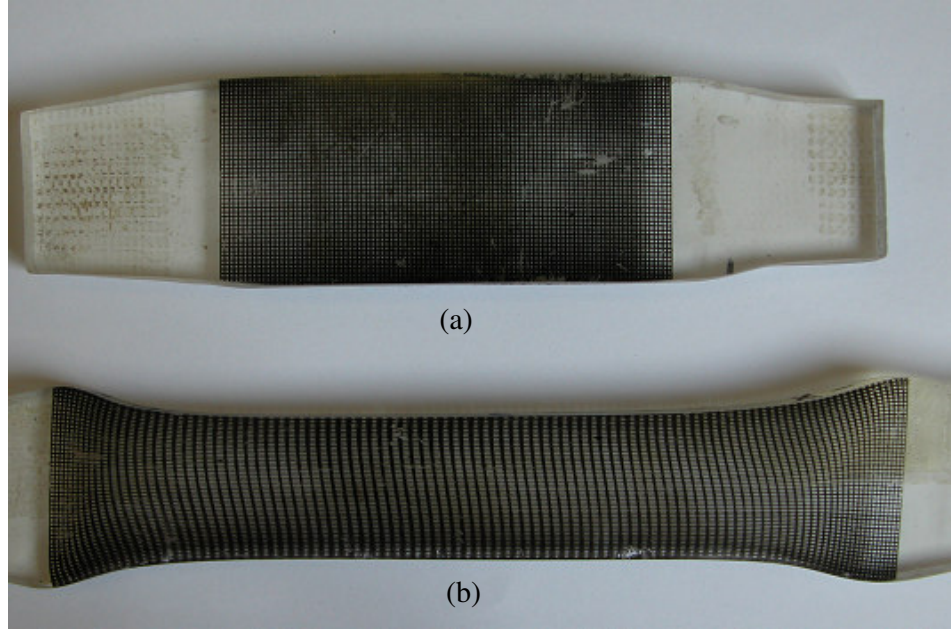


Şekil 5.20. Tek yönlü çekme için örnek boyutları.

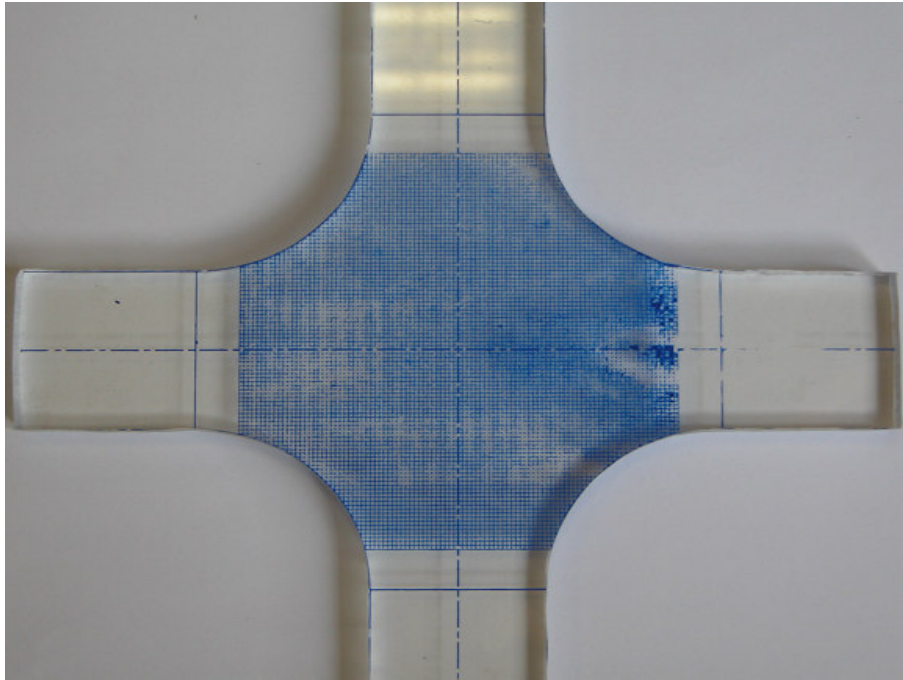


Şekil 5.21. İki yönlü çekme işlemi için örnek boyutları.

Tek yönlü ve iki yönlü çekme işlemi için hazırlanmış örnekler, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.22. a) Çekilmemiş PMMA Örnek $\lambda=1$, b) $\lambda_z=2,0$ oranında çekilmiş PMMA örnek



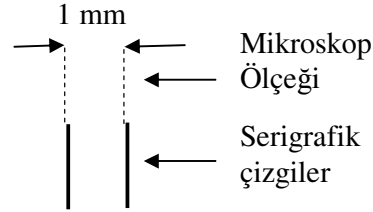
Şekil 5.23. İki yönlü çekme için hazırlanmış PMMA örnek.

Tek yönlü örnekler, büyük plakadan kesilen, 5 cm eninde uzun çیتالardan 20 cm boyunda 10 adet örnek olarak hazırlanmıştır. Kesilmiş yüzeyler üzerinde oluşabilecek çatlakların çekme işlemi boyunca herhangi bir yırtılmaya (kopma) neden olmaması için, bu yüzeyler farklı zımparalar sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200A su zımparası) ile pürüzsüz hale getirilmiştir. İki yönlü örnekler, önce 20 cm × 20 cm parçalar kesilmiş daha sonra bu parçalar bir el testeresi (dekopaj) ile kesilerek Şekil 5.21’de görüldüğü gibi iki yönlü çekme işlemine hazır hale getirilmiştir.

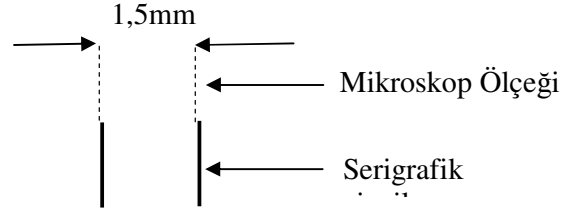
Çift yönlü çekme işleminin zorlukları iyi bilindiğinden, tek yönlü örneklerde olduğu gibi yine çift yönlü örnekler için de, özellikle dairesel kesilmiş yüzeyleri oldukça iyi parlatılmıştır. Bu yüzeyler önce yüksek devirde dönen ince bir taş ile kabaca parlatılır ardından hassas bir şekilde, zımpara yardımıyla istenen şekle getirilir.

Tüm bu kesme ve parlatma işlemlerinden sonra, çekilecek örneklerin, çekme oranlarına ulaşip ulaşmadığını gözlemek üzere, 1mm aralıklara sahip bir ızgara deseni serigrafî yöntemi ile örneklerin üzerine çizilmiştir. Serigrafî yöntemi ile, ilk olarak kağıt üzerindeki milimetrik ızgara deseni, bir ipek dokuya düşürülür ardından bu ipek doku ile sadece selülozik tinerde çözülebilen özel bir boya yardımıyla bu desen malzemeye aktarılır.

Çekme işlemi sonrasında 1mm’lik aralıklar bir optik mikroskop yardımıyla gözlenir ve istenilen çekme oranına malzemenin ulaşip ulaşmadığı kontrol edilir. λ_z ve λ_x çekme oranları, serigrafîk desenin sırasıyla 1 mm, 2 mm ve 10 mm aralıkları için mikroskop yardımıyla ($\times 24$ büyütme) çekme sonrası boyları ölçülerek ilk boy değerlerine oranı ile belirlenmiştir. Bu üç aralık için belirlenen λ_z veya λ_x değerlerinin ortalaması incelenen çekme ekseninin çekme oranı olarak kaydedilmiştir. Kalınlık ekseni olan y eksenindeki sıkışmalar, bir mikrometre yardımıyla çekme sonrası yeni kalınlık değerinin ölçülmesi ve ölçülen bu değer çekme öncesi kalınlık değerine (PMMA için 10 mm ve PVC için 4,50 mm) bölünmesi ile hesaplanmıştır (Şekil 5.24). bu işlemde ölçümler, serigrafîk çizgilerin sol kenarından referans alınarak yapılmıştır.



a)



b)

Şekil 5.24. $\lambda_z=1,5$ değerinde çekilmiş PMMA için çekme değerinin belirlenmesi (a) Çekme öncesi ölçüm, b) Çekme sonrası ölçüm).

Çekme işlemine hazır hale getirilmiş örneklerin, çekme işleminden önce herhangi bir yüzeyinde yırtılma veya kopmaya neden olacak zararlara karşı çok iyi korunmalıdır (düşme, çizilme, üzerine cisim düşürme v.b). Zira gözle görülemeyecek kadar küçük bir yüzey deformasyonu, camsı geçiş sıcaklığı üzerinde çekilen bir malzemeye çekme işlemi sırasında oldukça büyük zarar verebilir. Böyle bir kusur, çekme işlemi sırasında malzemenin kopmasına, istenmeyen bir sünmenin (creep) oluşmasına veya malzemedede çatlamaya neden olabilir.

Elastik sabitlerin belirlenmesinde kullanılacak örneklerin kalınlık, kütle ve yoğunlukları elde edilmiştir. Bu değerler, Tablo 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerde geometrik büyüklükler ve yoğunluk değerleri.

Çekme Oranı (λ)	1.25	1.5	1.75	2	2.25
çap (mm)	40.25	40.35	38.20	38.35	37.05
Kalınlık (mm)	7.62	7.19	5.26	6.04	5.42
Kütle (g)	11.3718	10.8060	6.9297	8.1674	6.8694
hacim (cm ³)	9.6907	9.1894	6.0253	6.9733	5.8404
Yoğunluk (g/cm ³)	1.1735	1.1759	1.1501	1.1712	1.1762

Tablo 5.5. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler için kalınlık değerleri (mm).

λ_x \ λ_z	1	1.25	1.5	1.75	2
1	8.72	7.16	6.54	4.4	3.66
1.25		5.17	4.39	3.06	2.74
1.5			3.39	3.21	2.83
1.75				2.78	2.54
2					1.47

Tablo 5.6. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler için kütle değerleri (g).

λ_x \ λ_z	1	1.25	1.5	1.75	2
1	11,6611	9,7676	9,4711	6,2741	5,4769
1.25		7,0900	6,2383	4,3428	4,0614
1.5			4,6007	4,7814	4,1086
1.75				4,1424	3,8509
2					2,2323

Tablo 5.7. İki yönlü çekilmiş örnekler PMMA için yoğunluk değerleri (g/cm^3).

$\lambda_z \backslash \lambda_x$	1	1.25	1.5	1.75	2
1	1,1674	1,1909	1,1617	1,1943	1,1796
1.25		1,1909	1,1902	1,1856	1,1626
1.5			1,1910	1,1771	1,1588
1.75				1,1630	1,1602
2					1,1480

5.5. PVC (Polivinilklorür)

Amorf bir termoplastik olan PVC (PolyVinylChloride), saf halinde renksiz olmasına karşın, değişik katkılarla farklı renklerde temin edilebilir. Mekanik mukavemeti yüksek sert bir polimerdir. Birçok kimyasal ajana karşın güçlü olmasına rağmen özellikle çözücüler karşında zayıftır. Ultraviyole ışığa karşın güçlüdür. Çalışma sıcaklığı dar bir bölgededir ($5^{\circ}C$ ' un altında kırılğan, $50^{\circ}C$ 'un üzerinde sürekli kullanılamaz). Sıkça kullanım alanı bulduğu sektör, yapı sektörüdür. Pencere çerçevesi, atık su boruları, tesisat boruları, bidon ve şişe imalatında kullanılır. Çapraz bağlı ve plastikleştirici katılmış PVC, kablo yalıtımında kullanılır. Ticari olarak, Corvic, Evipol, Geon, Hostalit, Lacovyl ve Lucorex olarak ta bilinir.

İlk önce yerel kaynaklardan sağlanan katkılanmış, renkli (siyah-gri) pvc örneklerle çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerin kalınlıkları 10 mm olmasına karşın katkılamadan veya karışımın homojen olmamasından dolayı çekme işlemlerinde sorunlarla karşılaşmış, yırtılma gözlenmiştir.

Daha sonra GoodFellow Cambridge Limited şirketinden temin edilen plastikleştirici katılmamış (Unplasticized) saf PVC, yönlendirme işleminde kullanılmıştır. 4,50 mm kalınlıktaki PVC tabakalardan daha önce PMMA için tariflenen örnek geometrilerinde örnekler hazırlanmıştır ve üzerlerine 1 mm aralıklara sahip serigrafik baskı yapılmıştır. Tablo 5.8'de PVC'nin değişik özellikleri verilmiştir.

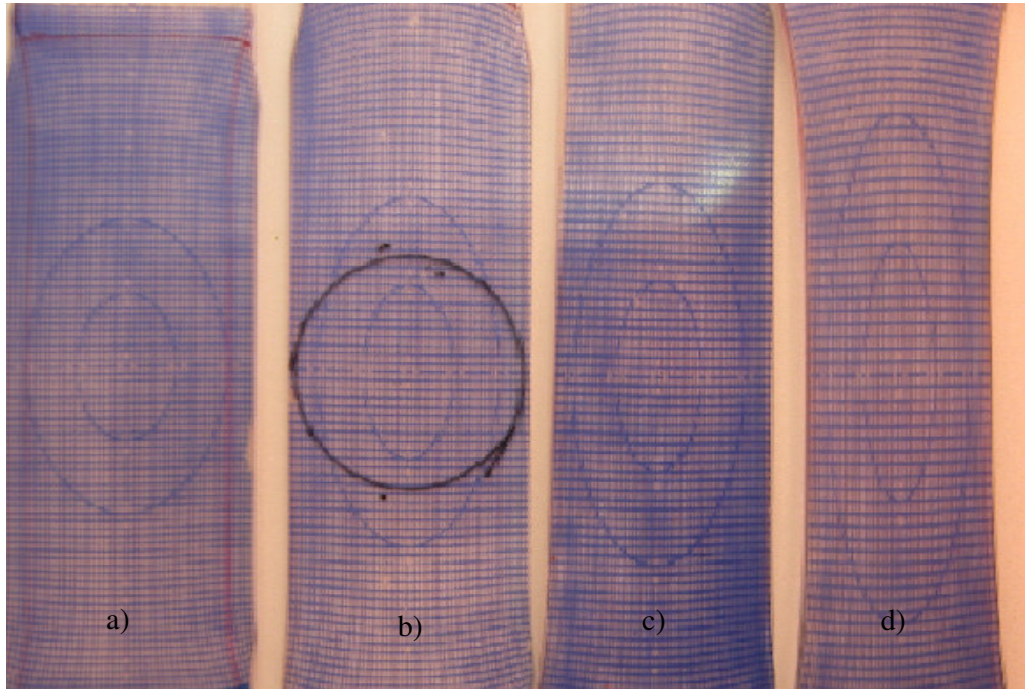
Tablo 5.8. PVC'nin özellikleri.

Asitler (konsantre)	Orta-zayıf
Asitler (seyreltik)	Güçlü-Orta
Alkoller	Güçlü
Alkaliler	Güçlü
Aromatik hidrokarbonlar	Zayıf
Gres ve yağlar	Güçlü
Halojenize Hidrokarbonlar	Zayıf
Halojenler	Zayıf
Ketonlar	Zayıf
Dielektrik sabit (1MHz'de)	2.7-3,1
Dielektrik mukavemet (kV mm-1)	14
Kayıp faktörü (1MHz'de)	0.025
Hacim direnci (Ohmcm)	10^{16}
Kopma uzaması(%)	60
Sertlik (Rockwell)	R106-120
Gerilme modülü (GPa)	2.5-4
Gerilme mukavemeti (MPa)	25-70
Yoğunluk (g.cm ⁻³)	1.4
Radyasyon direnci	zayıf
Kırılma indisi	1.54
Ultraviyole ışığa direnç	iyi
Su absorpsiyonu – (24 saatin üzerinde) (%)	0.03-0,4
Termal genişleme katsayısı (x10-6 K-1)	70-100
Isı yansıtma sıcaklığı (0.45MPa'da) (°C)	70
Isı yansıtma sıcaklığı 1.8MPa'da) (°C)	67
Özgül ısı (J K-1 kg-1)	1000 - 1500
Termal iletkenlik(W m-1 K-1)	0.12-0.25 (23°C'da)

Şekil 5.25 ve 5.26'de tek yönlü çekme için hazırlanmış ve sırasıyla $\lambda_z=1,25$, $\lambda_z=1,50$, $\lambda_z=1,68$ ve $\lambda_z=2,25$ oranında çekilmiş pvc örnekler verilmiştir. Örneklerin orta kısımlarına, farklı uzunluklar için çekme değerlerinin belirlenmesini kolaylaştırmak amacıyla 40 ve 20 mm çapında daireler çizilmiştir.



Şekil 5.25. Tek yönlü çekme için hazırlanmış PVC örnek ($\lambda=1.0$).



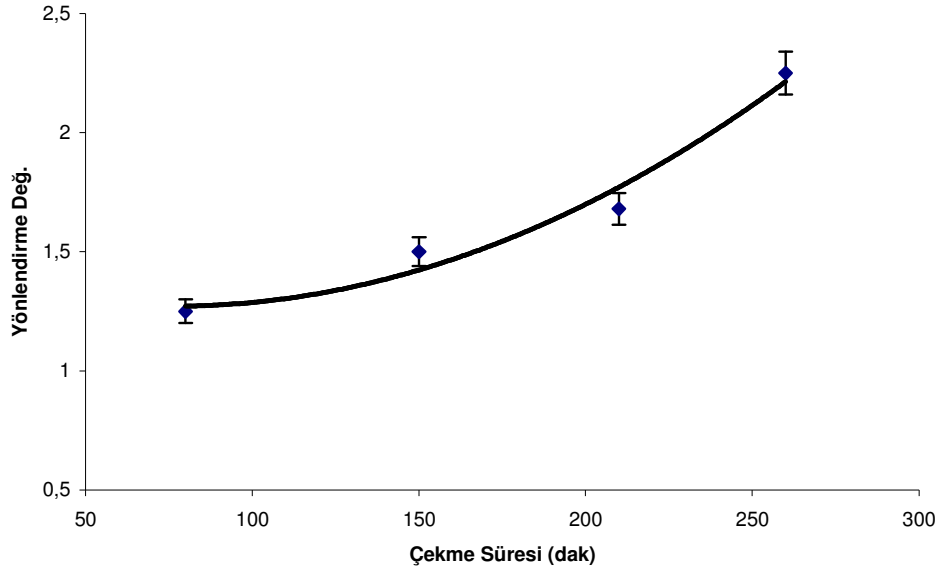
Şekil 5.26. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler, a) $\lambda_z=1.25$, b) $\lambda_z=1.50$, c) $\lambda_z=1.68$, d) $\lambda_z=2.25$.

Tablo 5.9’da çekme süreleriyle birlikte z eksenindeki uzamalara karşılık y ve x eksenindeki daralmalar verilmiştir. Uzamalardaki Lineer artışa karşılık y ve x eksenindeki sıkışmalar da lineerdir.

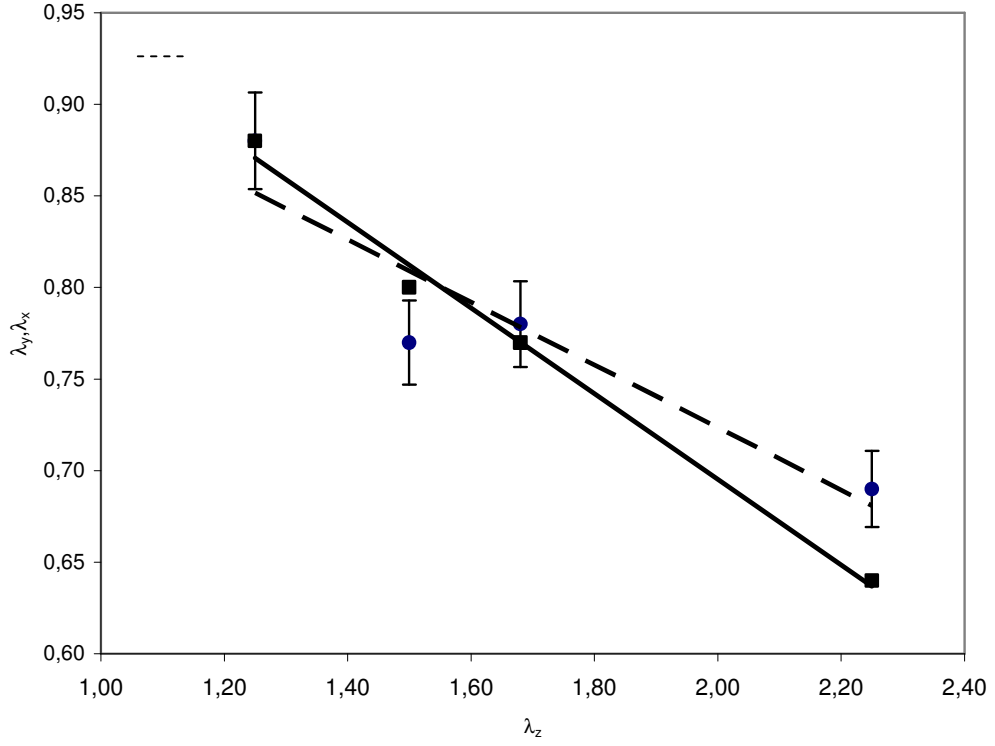
Çekme sürelerine bağlı olarak çekme değerlerindeki değişim, Şekil 5.27’de verilmiştir. Her iki eksendeki (y ve x) sıkışmaların z eksenindeki uzamalara karşılık grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir.

Tablo 5.9. Tek yönlü çekilmiş örnekler için (PVC) z eksenindeki uzamalara karşılık x, y eksenindeki daralmalar ve çekme süresi.

λ_z	λ_y	λ_x	T_c (dak)
1,25	0,88	0,88	80
1,50	0,77	0,80	150
1,68	0,78	0,77	210
2,25	0,69	0,64	260



Şekil 5.27. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler için çekme sürelerine karşılık çekme oranları (λ_z).

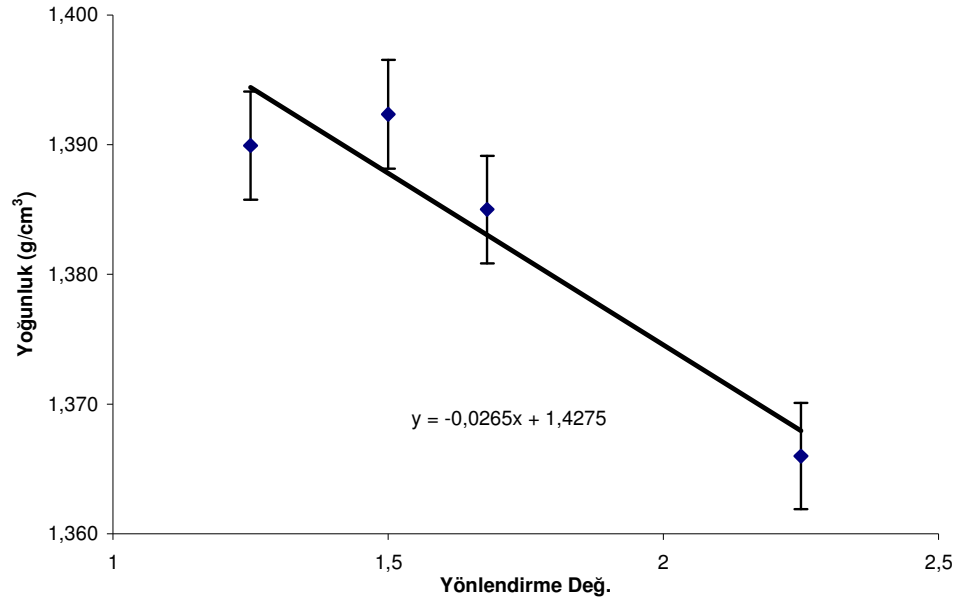


Şekil 5.28. Tek yönlü çekilmiş PVC’de z eksenindeki uzamalara karşılık y ve x eksenindeki daralmalar.($\lambda_z-\lambda_x$ değişimi, $\lambda_z-\lambda_y$ değişimi).

Çekilmemiş ve tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin yoğunlukları PMMA örneklerde olduğu gibi kütle hacim oranı şeklinde hesaplanmıştır. Hacim değerleri geometrik yolla dairesel disklerin hacmi şeklinde hesaplanmıştır. Kütle ölçümleri hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir ($\pm 0,0001g$). Tablo 5.10’da PVC örneklerin yoğunlukları verilmiştir. Şekil 5.29’da çekme oranına bağlı olarak yoğunluk değişimi verilmiştir.

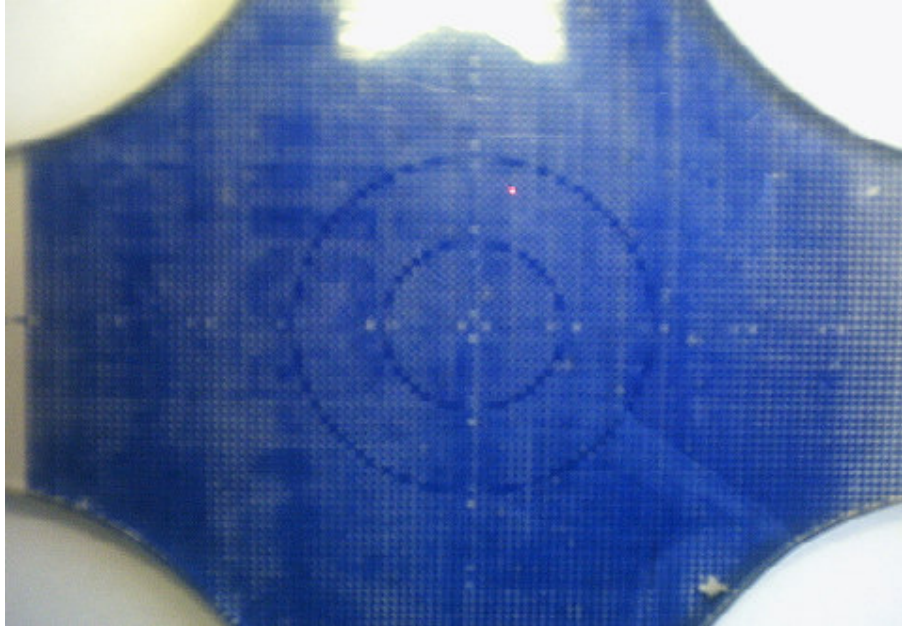
Tablo 5.10. Tek yönlü çekilmiş ve çekilmemiş ($\lambda=1,0$) PVC örnekler için yoğunluk değerleri.

$\lambda(z)$	Yoğunluk (g/cm^3)
1	1,391
1,25	1,390
1,5	1,392
1,68	1,385
2,25	1,366



Şekil 5.29. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin yoğunluk değişimi.

İki yönlü çekme için hazırlanmış PVC örneklerin üzerine 1 mm aralıklara sahip desen serigrafik baskı ile düşürülmüştür (Şekil 5.30).



Şekil 5.30. İki yönlü çekme işlemi için hazırlanmış PVC örnek.

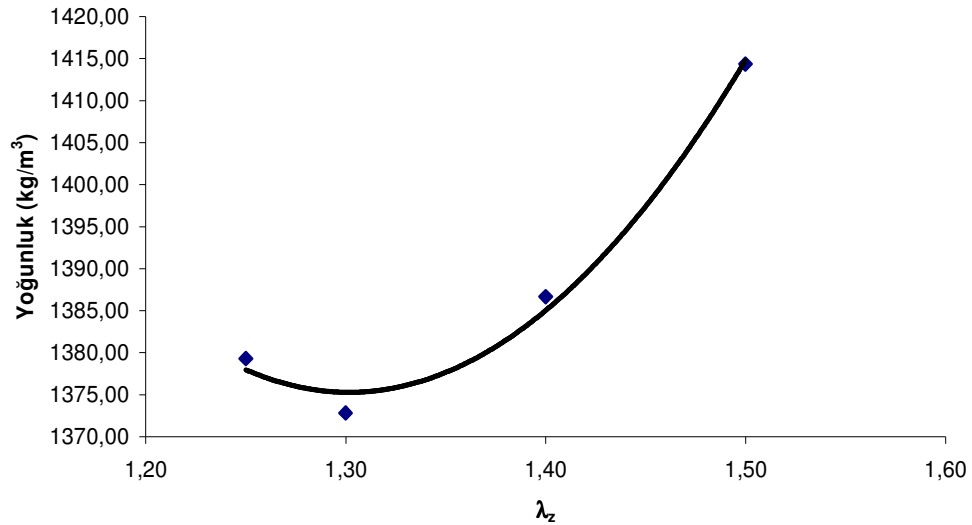
PVC örneklerin kalınlıkları 4,5 mm olduğundan yüksek çekme oranlarına ulaşmak zor olmuştur. Camsı geçiş sıcaklığının yaklaşık 20°C üzerinde (105°C) çekme işlemi yapılmasına rağmen çekilmiş bazı örneklerde kopmalar görülmüştür.

İki yönlü çekilmiş örnekler, çekme oranlarıyla birlikte kütle, çap, kalınlık, hacim ve yoğunluk değerleri Tablo 5.11’de verilmiştir.

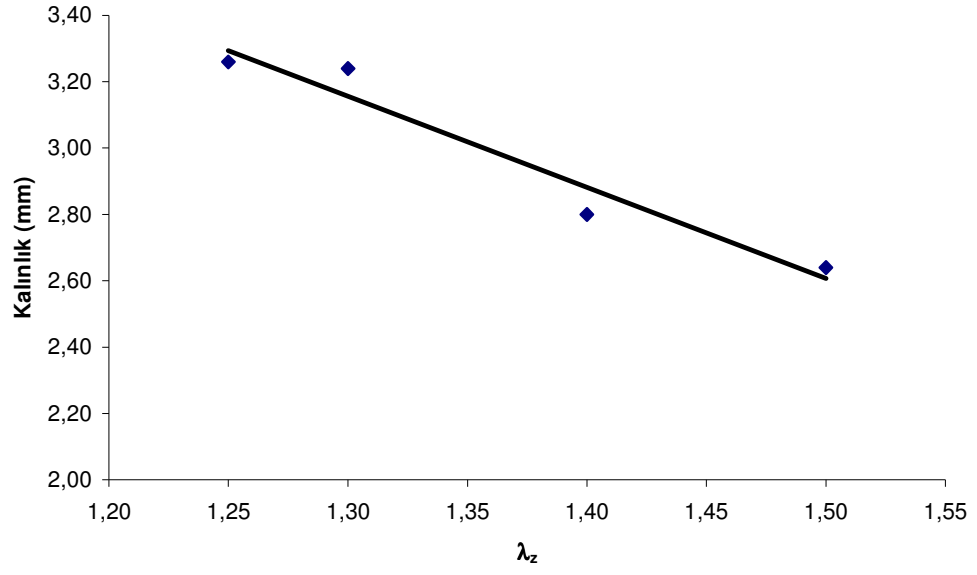
Tablo 5.11. İki yönlü çekilmiş örneklerde kütle, çap, kalınlık ve yoğunluk değerleri.

λ_x	λ_z	Kütle (g)	2r (mm)	r (mm)	Kal.(mm)	Hacim (m ³)	Yoğ (kg/m ³)
1,20	1,25	5,69	40,15	20,08	3,26	4,13E-06	1379,31
1,20	1,30	5,52	39,75	19,88	3,24	4,02E-06	1372,85
1,20	1,40	4,94	40,25	20,13	2,80	3,56E-06	1386,67
1,20	1,50	4,57	39,50	19,75	2,64	3,23E-06	1414,34

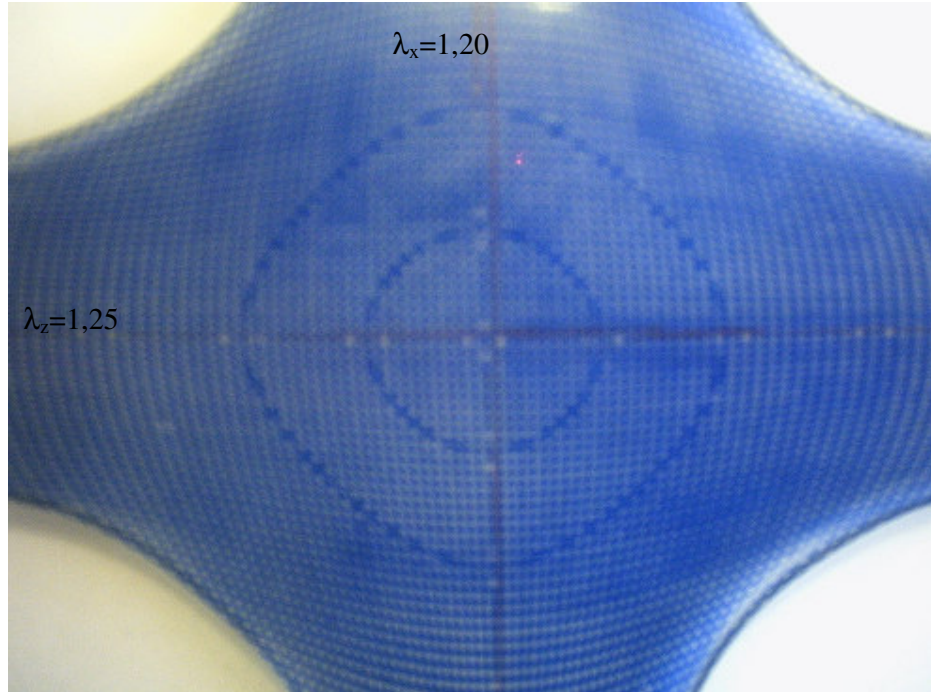
Şekil 5.31 ve 32’de $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık yoğunluk ve kalınlık değişimleri verilmiştir. Şekil 5.33,34,35 ve 36’de iki yönlü çekilmiş PVC örnekler verilmiştir.



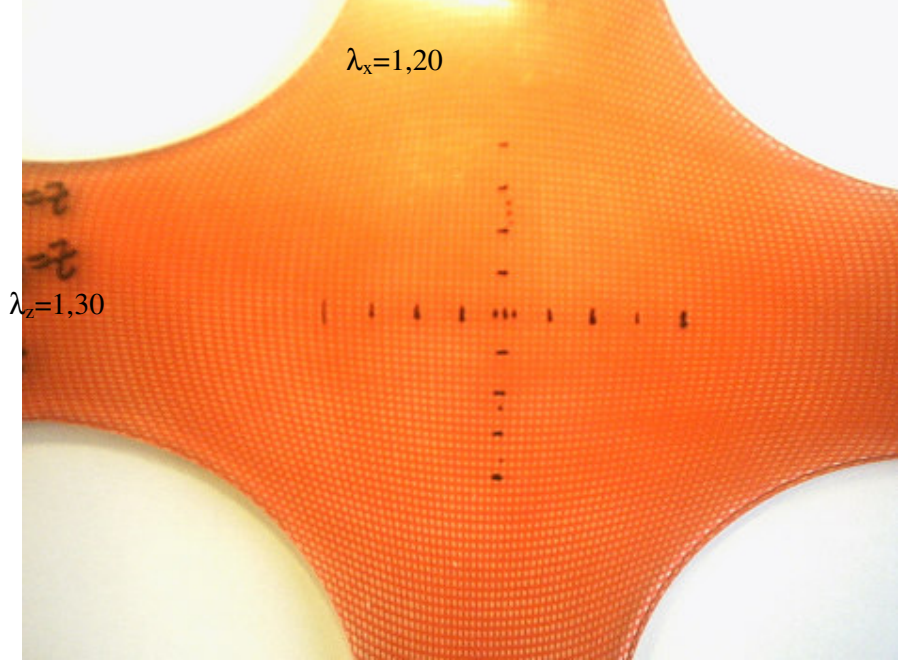
Şekil 5.31. İki yönlü çekilmiş PVC’de $\lambda_x=1,2$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık yoğunluk değerleri.



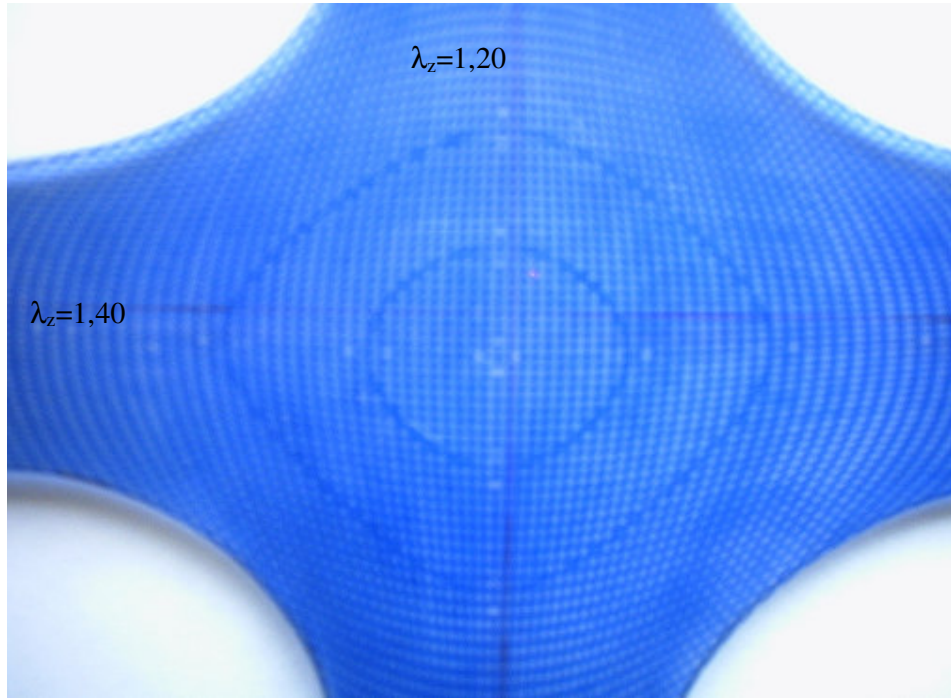
Şekil 5.32. İki yönlü çekilmiş PVC’de $\lambda_x=1,2$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık kalınlık değerleri.



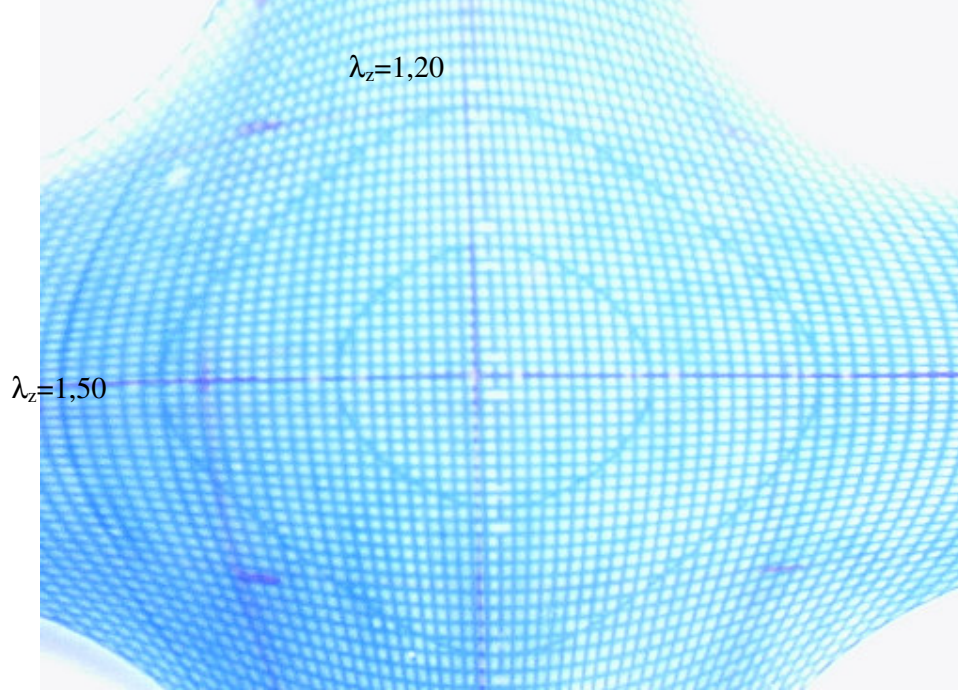
Şekil 5.33. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,25$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.



Şekil 5. 34. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,30$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.



Şekil 5.35. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,40$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.



Şekil 5.36. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,50$ değerlerinde çekilmiş iki yönlü PVC örnek.

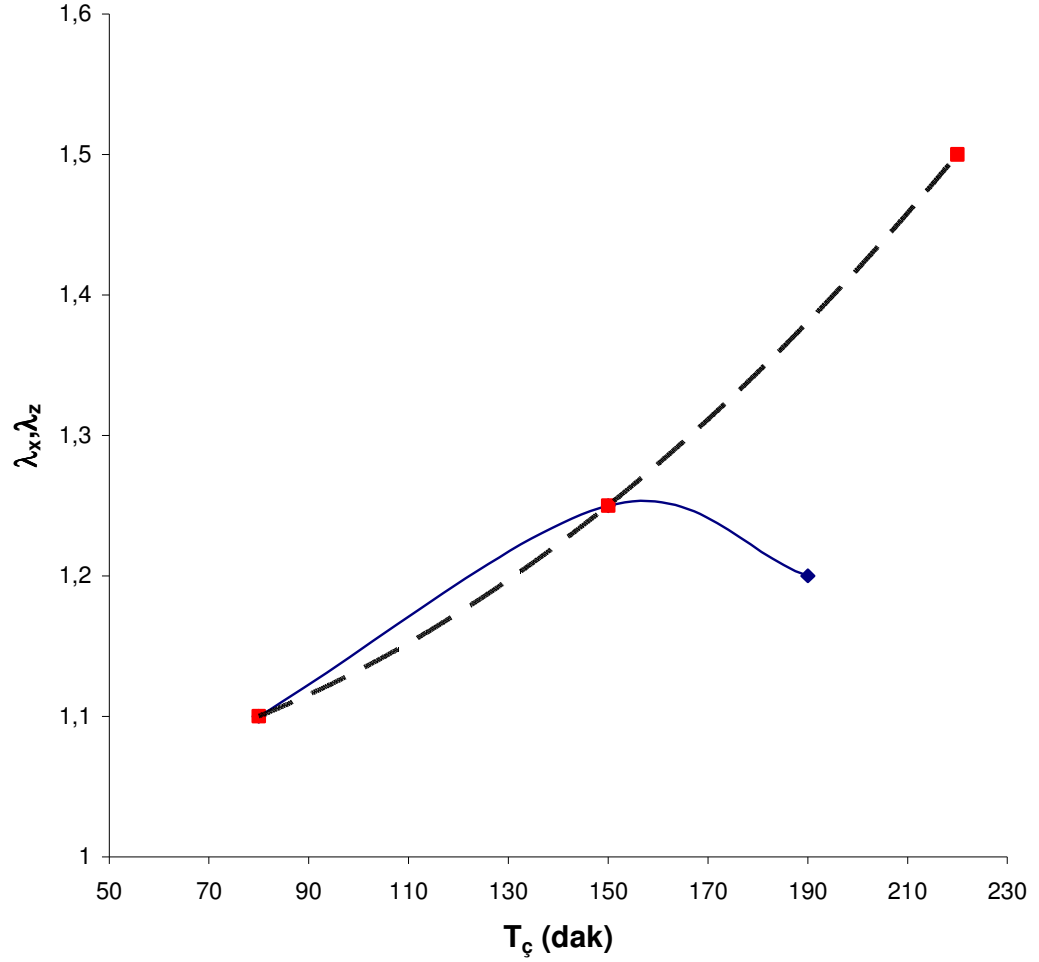
İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin çekme oranı ile çekme süreleri incelenmiş ve PMMA'da olduğu gibi 80 dak'lık çekme sürelerinden sonra uzamaların örneğin merkezinden çok kenar kısımlarına kaydığı görülmüştür. 80 dak'lık çekme işleminden sonra örnek, tekrar ilk geometrisine uygun hale getirilmiştir. Tablo 5.12'de $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,50$ örneği için çekme süreleri ve çekme oranları verilmiştir.

Tablo 5.12. $\lambda_x=1,20$, $\lambda_z=1,50$ PVC örneği için çekme süreleri ve çekme oranları.

	X eksenini $\lambda_x=1,20$			Z eksenini $\lambda_z=1,50$		
Çekme Süresi (dak)	80	150	190	80	150	220
Uzama (40 mm)	1,12	1,26	1,20	1,13	1,27	1,55
Uzama (20 mm)	1,10	1,25	1,20	1,10	1,25	1,50
Uzama (2 mm)	1,10	1,25	1,20	1,10	1,25	1,50

Şekil 5.37'de her iki çekme eksenini için, çekme oranlarının çekme sürelerine göre değişimi verilmiştir.

T_ç-λ_x,λ_z değişimi



şekil 5.37. İki yönlü çekilmiş PVC’de çekme oranlarının çekme süresine göre değişimi (mavi λ_x, kırmızı λ_z).

Eşit çekme sürelerinde (150 dak.) her iki eksen de uzamalar eşitken (λ_x=1,25, λ_z=1,25) bu süreden sonra 70 dak’lık z eksenindeki çekmeye karşılık x eksenini 40 dak. çekilmiştir. 150 dak’lık çekme ile x ekseninde 1,25 değerinde çekme oranı sağlanmışken +40 dak’lık çekmeye karşın z eksenindeki +70 dak’lık çekme işlemi sonucunda, x ekseninde 1,25 değerindeki çekme oranı, 1,20’ye düşmüştür.

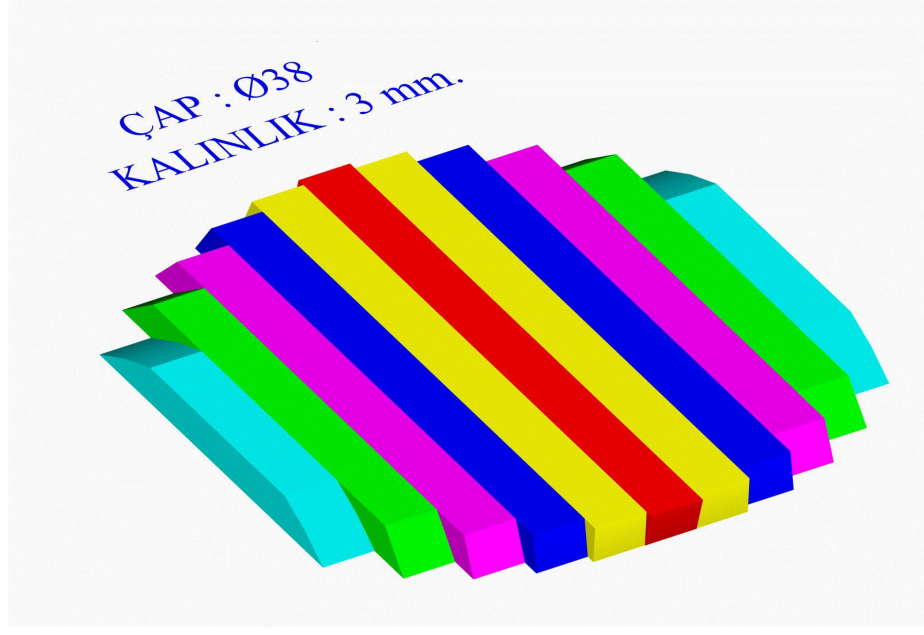
BÖLÜM 6 ÖLÇÜM ve HESAPLAMAR

6.1. PMMA'da Hız Ölçümleri ve Elastik Sabitlerin Hesaplanması

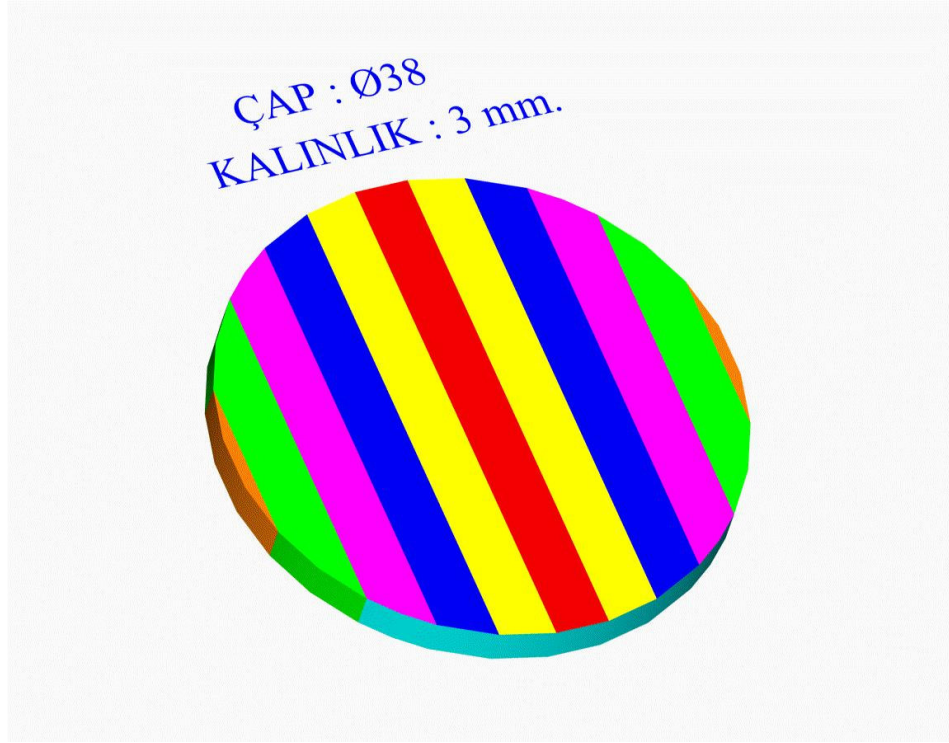
Tablo 5.1 ve 5.2'de verilen örnek numaralarına göre çekilmemiş örnek, tek yönlü çekilmiş örnek ve çift yönlü çekilmiş örnekler için hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. y eksenini kalınlık eksenine iken, (x,y) ve (z,y) düzlemlerinin herhangi bir yönündeki yayılımlar için, örneğin z ve x eksenini sırası ile örnek tutucu eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu iki ölçüm şeklinde gelme açısı (i), sudaki boyuna atmaların yayılma yönü ile y eksenini arasındaki açıdır. Çekilmiş örnek kalınlıklarının dönüştürge çaplarına göre çok küçük olmasından, daldırma tekniği kullanılarak z eksenini yönünde ve (x,z) düzleminde herhangi bir yönde yayılımlar için hız ölçümü yapmak imkansızdır. Bu olanaksızlık özel bir dilimleme tekniği ile ortadan kaldırılır. Böylece, daldırma tekniği kullanılarak ince plaka şeklindeki örneklerin istenilen yönde hız ölçümleri yapılabilir (Güney, 1989).

Örnekler, (x,y) ve (z,y) düzlemlerinde hız ölçümleri yapıldıktan sonra z eksenine paralel bir şekilde istenilen genişlikte dilimlendi. Dilimleme işlemi 0,4 mm kalınlıkta bir bıçakla gerçekleştirildi. Dilimlenen örnekler, z eksenini dönme eksenini olmak üzere x eksenleri 90° döndürüldü. Böyle bir dilimleme işlemi Şekil 6.1 ve 6.2'de gösterilmiştir.

Dilimlenerek yapıştırılmış parçalardan oluşan yapı, örnek tutucusunun geometrisine uygun hale gelmesi için kenarları taşlanmış ve çapı 38 mm'ye düşürülmüştür (Şekil 6.2). Dilimlemeden önce çap eksenleri x ve z, kalınlık eksenini y olan örneğin, böyle bir dilimlemeden sonra çap eksenleri z ve y, kalınlık eksenini x olacaktır. Böylece bu örnekte (z,x) düzleminde ölçümler yapılabilir.



Şekil 6.1. z eksenine paralel dilimlenerek yeniden birleştirilmiş örnek.



Şekil 6.2. Dairesel şekle getirilmiş örnek.

z yönünde yayılan saf boyuna dalganın ölçülmesi için, dilimlenmiş örneklerden z eksenine dik parçalar dilimlenmiş ve bu parçalar dönme eksenini y eksenine olmak üzere 90° döndürülerek kalınlık eksenini z olan dilimlenmiş örnek elde edilmiştir.

c_{33} elastik sabitinin belirlenmesinde sadece bu saf boyuna dalga hızına ihtiyaç duyulduğundan suda yayılan dalganın z eksenine ile yaptığı açının (i) 0° olduğu durumda ölçüm yapmak yeterli olacaktır. Bu durumda, iki kez dilimlenerek çap değeri oldukça düşen örneğin yeni bir örnek tutucu ile dönüştürücüler arasında konması gerekir. Bunun için, ölçüm dönüştürgenine tam olarak uyan bir örnek tutucu yapılmıştır.

Halka şeklindeki bu tutucunun bir ucuna örnek düzgün bir geometri ile yapıştırılır ve bu tutucu silindirik yapıdaki dönüştürgen bloğuna sabitlenir. Böylece, z yönünde yayılan saf boyuna dalga ölçümü yapılabilir.

6.1.1. İsootrop yapı (çekilmemiş PMMA) elastik sabitlerinin belirlenmesi

Çekilmemiş örnek, Bölüm 4.5.1’de tariflenen iki bağımsız elastik sabitle betimlenir. Yapının elastik sertlik tensörü,

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

şeklinde. Bu yapının iki bağımsız sertlik sabiti (c_{11}, c_{44}), (4.64) ve (4.65) eşitliklerinden elde edilir.

$$c_{11} = \rho \bar{V}_L^2 \quad (6.2)$$

$$c_{44} = \rho \bar{V}_T^2 \quad (6.3)$$

Burada, \bar{V}_L ve \bar{V}_T yöne bağlı olarak ölçülen saf boyuna ve saf enine dalga hızlarının ortalamasıdır. Çekilmemiş örnek için ölçülen hız değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Burada, örnek tutucuyu döndüren gonyometrenin açı ölçeri 500 eşit parçaya bölündüğünden 1 parçası $0,72^\circ$ dereceleye karşılık gelir.

Tablo 6.1. Çekilmemiş PMMA örneği için dalga hızı ölçümleri.

Açı(i)	$\Delta t(\mu s)$	kal(mm)	V_L, V_T
0,00	2,36	7,99	2661,19
2,88	2,36	7,99	2656,48
5,76	2,36	7,99	2642,53
8,64	2,40	7,99	2653,33
11,52	2,44	7,99	2653,38
14,40	2,50	7,99	2658,06
17,28	2,58	7,99	2664,70
20,16	2,64	7,99	2641,96
21,60	2,70	7,99	2645,47
23,04	2,74	7,99	2631,20
24,48	2,80	7,99	2624,90
Enine		Bölge	
41,76	-0,94	7,99	1310,73
43,20	-0,78	7,99	1341,73
44,64	-0,66	7,99	1365,71
46,08	-0,60	7,99	1378,83
48,96	-0,88	7,99	1336,75

\bar{V}_L boyuna dalga hızı, ilk 3 adet boyuna dalga hızının ortalaması alınarak elde edilmiştir. \bar{V}_T ise 41° ile 49° arasındaki 5 değerlerin ortalaması ile elde edilmiştir.

$$\bar{V}_L = 2653,40 \text{ m/s} \quad \bar{V}_T = 1346,75 \text{ m/s}$$

Bölüm 5’te Tablo 5.9’dan $\lambda=1$ (çekilmemiş örnek) için yoğunluk değeri $\rho(\lambda=1)=1167.4 \text{ kg/m}^3$ değeri ve ölçülen hız değerleri, (6.2) ve (6.3) eşitliklerinde yerine konularak c_{11} ve c_{44} elastik sabitleri belirlendi.

$$c_{11} = 8.22 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad c_{44} = 2.12 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$c_{12}=c_{11}-2c_{44}$ eşitliğinde, c_{11} ve c_{44} değerlerinin yerine konmasıyla;

$c_{12}=3,98 \times 10^9$ N/m² elastik sabiti hesaplandı. Böylece (6.1) ifadesi ile belirtilen çekilmemiş örnek ($\lambda=1$) için elastik sertlik tensörü;

$$\begin{bmatrix} 8,22 & 3,98 & 3,98 & 0 & 0 & 0 \\ 3,98 & 8,22 & 3,98 & 0 & 0 & 0 \\ 3,98 & 3,98 & 8,22 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,12 \end{bmatrix}$$

G.N/m² boyutunda elde edilmiştir.

6.1.2. Hekzagonal yapı (tek yönlü çekilmiş PMMA) elastik sabitlerinin belirlenmesi

Bölüm 4.5.2’de tariflendiği şekliyle hekzagonal simetrlili yapı, beş bağımsız elastik sabite (c_{11} , c_{33} , c_{44} , c_{130} , $c_{12}=c_{11}-2c_{66}$) sahiptir. y eksenini kalınlık eksenini iken, (x,y) ve (z,y) düzlemlerinin herhangi bir yönündeki yayılımlar için, örneğin z ve x eksenini sırası ile örnek tutucu eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilerek dalga hızını ölçümleri gerçekleştirilmiştir. c_{11} elastik sabiti, (x,y) düzleminde ölçülen saf boyuna dalga hızının, (4.66) eşitliğinin yeniden düzenlenmiş halinde yerine konması ile elde edilir.

$$c_{11} = \rho \bar{V}_L^2 \quad (6.4)$$

c_{66} elastik sabiti, yine (x,y) düzleminde ölçülen saf enine dalga hızını ile elde edilir.

$$c_{66} = \rho \bar{V}_T^2 \quad (6.5)$$

Tablo 6.2’de tek yönlü çekilmiş örneklerin (x,y) düzleminde ölçülen hız değerleri verilmiştir. Buradan saf boyuna (V_L) ve saf enine (V_T) hız değerleri belirlenerek c_{11} ve c_{66} elastik sabitleri hesaplanır.

Tablo 6.2. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için (x,y) düzleminde dalga hızı ölçümleri.

Açı(i)	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,75$	$\lambda_z=2,0$
0,00	2579,47	2583,86	2650,78	2563,71
2,88	2575,36	2579,71	2646,15	2559,70
5,76	2563,14	2567,41	2632,42	2547,81
8,64	2576,43	2619,09	2661,16	2550,85
11,52	2580,17	2605,93	2653,12	2567,29
14,40	2573,86	2617,55	2634,62	2573,18
17,28	2587,21	2600,26	2628,35	2567,80
20,16	2558,51	2572,22	2609,18	2550,89
21,60	2580,50	2611,61	2614,66	2556,34
23,04	2570,84	2615,76	2615,08	2557,33
24,48	2557,51	2614,33	2610,30	2553,73
41,76	1250,15	1237,33	1228,84	1241,59
43,20	1281,21	1269,76	1276,83	1268,54
44,64	1309,16	1295,31	1310,81	1295,81
46,08	1326,57	1313,55	1334,69	1323,26
48,96	1295,94	1316,91	1306,31	1292,89

Tablo 6.3. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekler için (x,y) düzleminde saf boyuna ve saf enine hız değerleri.

Çekme Değ. Hız	$\lambda=1,25$	$\lambda=1,5$	$\lambda=1,75$	$\lambda=2,0$
\bar{V}_L (m/s)	2572,66	2576,99	2643,12	2557,07
\bar{V}_T (m/s)	1292,61	1286,57	1291,50	1284,42

6.4 ve 6.5 eşitliklerinde bu hız değerlerinin kullanılmasıyla c_{11} ve c_{66} elastik sabitleri hesaplandı. $c_{12}=c_{11}-2c_{66}$ eşitliği ile c_{12} elastik sertlik sabitleri de hesaplanmıştır.

Tablo 6. 4. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için c_{11} , c_{12} ve c_{66} elastik sertlik sabitleri.

Çekme Or. Hız	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,75$	$\lambda_z=2,0$
$c_{11} (\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	7,77	7,81	8,03	7,69
$c_{66} (\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	1,96	1,95	1,92	1,94
$c_{12} (\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	3,85	3,92	4,2	3,81

c_{33} elastik sabiti, z yönünde yayılan saf boyuna dalga hızlarının (6.6) eşitliğinde yerine konması ile elde edilmiştir.

$$c_{33} = \rho V_L^2 \quad (6.6)$$

Tablo 6.5'de z yönünde ölçülen saf boyuna dalga hızları ve bu hız değerleri ile hesaplanmış c_{33} sertlik sabitleri verilmiştir.

Tablo 6. 5. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için V_L hızları ve c_{33} elastik sertlik sabitleri.

Çekme Or.	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,75$	$\lambda_z=2,0$
V_L	2682	2694	2729	2814
$c_{33} (\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	8,44	8,54	8,57	9,31

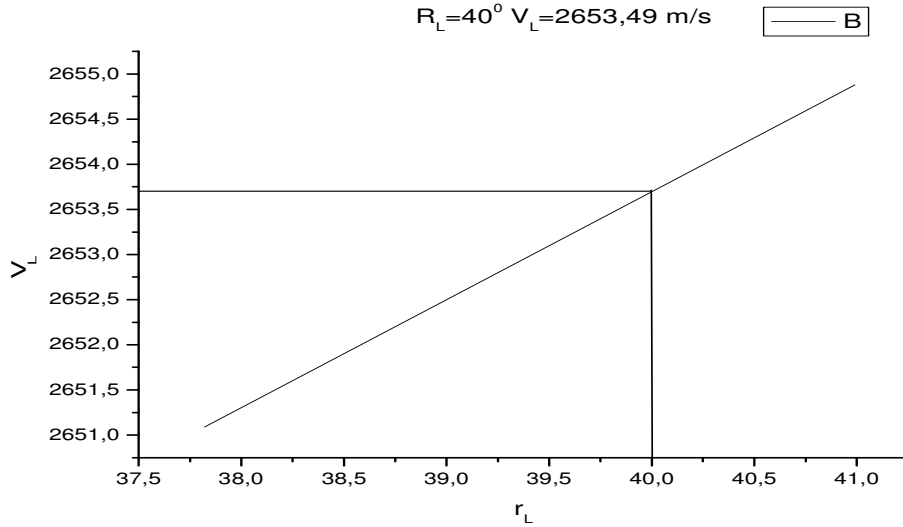
(z,y) düzlemindeki yayılımlar için örneğin x eksenine örnek tutucu eksenine paralel olacak şekilde yerleştirildi.

Bu düzlemde gerçekleştirilen ölçümlerden (5.7) eşitliği kullanılarak örnek içerisinde boyunamsı ve eninemsı dalgalar için yayılma açıları belirlenmiştir. Örnek tutucu, $1,44^\circ$ nin katları şeklinde bir dönme sağladığından boyunamsı ve eninemsı hızların belirleneceği eşit bir yayılma açısı tayini oldukça zordur. Bunun için, belirlenen bölgede yayılma açılarının iki yakın değeri arasında belirlenen bir yayılma açısı (r_L ve r_T) çizilen grafik üzerinden belirlenir (Güney, 1989). Bu işlemde, i gelme açısı 20° - 23° dereceler arasında boyunamsı hızlar, 44° - 48° arası ise eninemsı hızlar için kullanılmıştır.

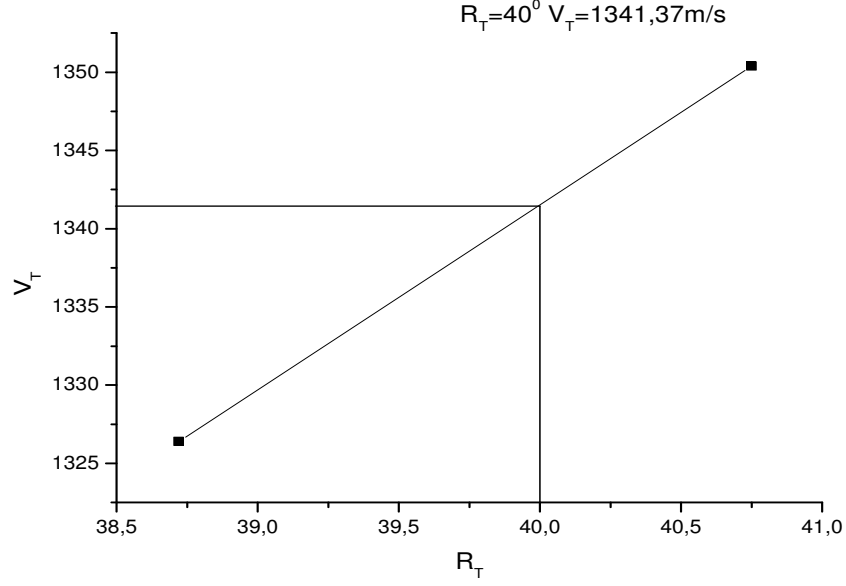
Tablo 6.6. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri (z,y) düzleminde hız değerleri ve yayılma açıları(Gri bölge boyunamsı ve eninemsı hızlar).

Çek. Değ.	$\lambda_z=1,25$		$\lambda_z=1,5$		$\lambda_z=1,75$		$\lambda_z=2,0$	
	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T
0,00	0,00	2579,47	0,00	2547,19	0,00	2650,78	0,00	2636,79
2,88	4,98	2575,36	4,92	2543,30	5,12	2646,15	5,09	2632,27
5,76	9,94	2563,14	9,82	2531,73	10,21	2632,42	10,16	2618,84
8,64	15,06	2576,43	15,09	2582,72	15,56	2661,16	15,46	2644,70
11,52	19,97	2547,76	20,30	2588,32	20,63	2628,23	20,88	2659,47
14,40	25,28	2558,25	25,54	2583,61	26,09	2634,62	26,38	2662,00
17,28	30,65	2557,39	31,22	2600,26	31,90	2650,97	31,91	2651,62
20,16	36,06	2544,72	37,00	2602,09	37,82	2651,09	37,77	2648,15
21,60	39,12	2553,75	39,92	2597,14	40,99	2654,88	40,54	2630,76
23,04	41,96	2545,40	43,40	2615,76	44,18	2653,32	43,66	2628,27
24,48	45,34	2557,51	46,34	2601,29	47,39	2646,28	47,59	2654,80
41,76	33,76	1243,38	34,24	1258,93	33,92	1248,35	35,03	1284,28
43,20	35,83	1274,27	36,29	1288,19	36,58	1297,23	37,07	1312,01
44,64	37,88	1302,11	38,42	1317,78	38,72	1326,40	39,36	1344,95
46,08	39,76	1323,03	39,96	1328,52	40,75	1350,39	40,84	1352,78
48,96	41,25	1302,61	41,12	1299,06	41,59	1311,21	41,59	1311,26
51,84	43,76	1310,53	43,47	1303,63	44,51	1328,45	44,49	1327,97

Seçilen bu bölgeler içindeki iki yayılma açısı arasında $r_L=r_T=40^\circ$ için boyunamsı ve eninemsı hız değerleri grafik üzerinden belirlenmiştir. Şekil 6.3 ve 6.4’de boyunamsı ve eninemsı hızların belirlenmesinde kullanılan grafikler gösterilmiştir.



Şekil 6.3. ($\lambda_z=1,75$) PMMA örneği için $R_L=40^\circ$ de V_L hızının belirlenmesi.



Şekil 6.4. ($\lambda_z=1,75$) PMMA örneği için örnek için $R_T=40^\circ$ de V_{T1} hızının belirlenmesi.

(z,y) düzleminde belirlenen eninemsiz ve boyunamsız hız değerleri ile (4.64) ve (4.65) eşitliklerinin yeniden düzenlenmesi ile elde edilen 6.7 eşitliğiyle c_{44} elastik sabitleri hesaplanmıştır. Burada θ yayılma yönünün z eksenine ile yaptığı açıdır ($\theta=90-r$).

$$c_{44} = \rho(V_L^2 + V_{T1}^2) - c_{11} \sin^2 \theta - c_{33} \cos^2 \theta \quad (6.7)$$

Belirlenen hız değerleri ile hesaplanan c_{44} değerleri Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7. Tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerinde c_{44} elastik sabitleri.

Çekme Oranı	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,75$	$\lambda_z=2,0$
V_L (m/s)	2551,19	2597,81	2653,49	2634,14
V_{T1} (m/s)	1319,75	1327,4	1341,36	1348,39
$c_{44}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	1,62	1,90	1,91	1,89

Hesaplanan c_{11} , c_{33} ve c_{44} değerleri ile V_L ve V_{T1} hızları, (6.8) eşitliğinde kullanılarak c_{13} elastik sabitleri hesaplanmıştır.

$$c_{13} = \left(\frac{\left[\rho^2 (V_L^2 - V_{T1}^2)^2 - [(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta + (c_{44} - c_{33}) \cos^2 \theta]^2 \right]^{1/2}}{\sin 2\theta} \right) - c_{44} \quad (6.8)$$

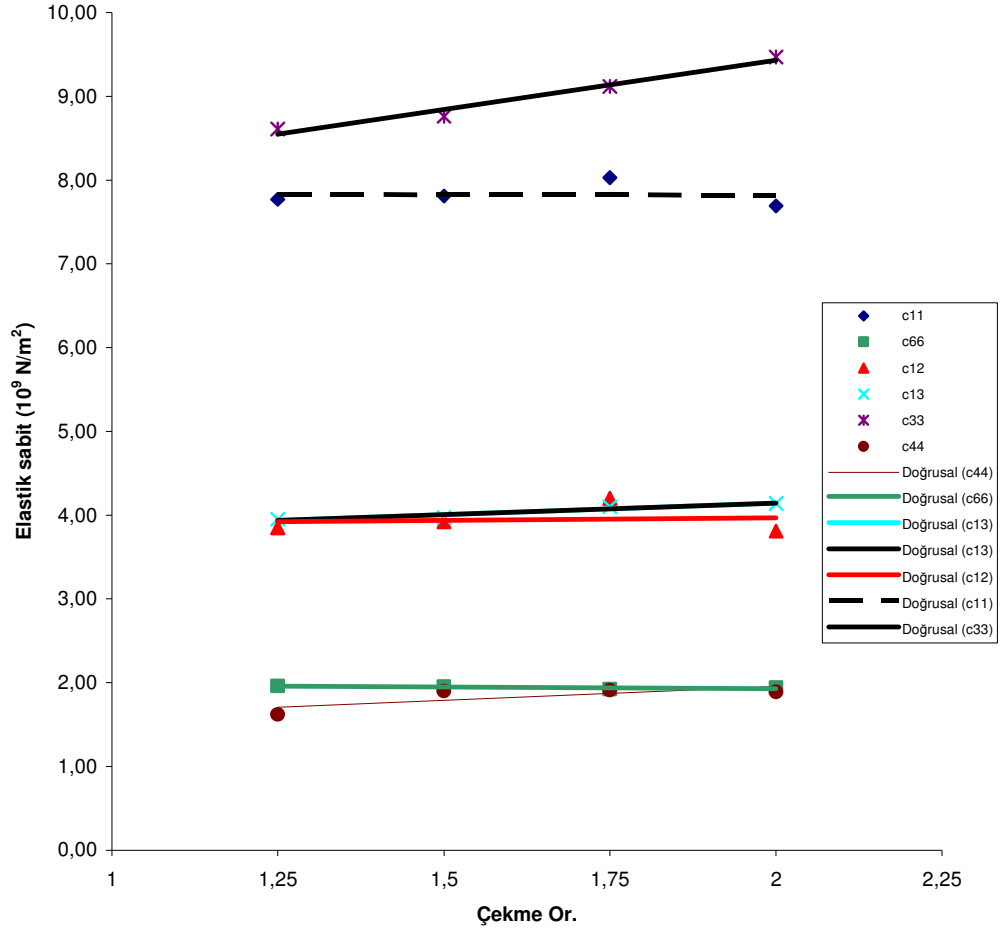
Tablo 6.8. Tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerinde c_{13} elastik sabitleri.

Çekme Oranı	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,75$	$\lambda_z=2,0$
V_L (m/s)	2695,88	2678,46	2689,94	2624,37
V_{T1} (m/s)	1313,51	1322,37	1299,37	1341,43
$c_{13}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	3,95	3,97	4,10	4,14

Tablo 6.9. Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için çekme oranına bağlı elastik sabitler.

Çekme Or.	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,75$	$\lambda_z=2,0$
Elastik sabit				
$c_{11}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	7,77	7,81	8,03	7,69
$c_{66}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	1,96	1,95	1,92	1,94
$c_{12}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	3,85	3,92	4,2	3,81
$c_{13}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	3,95	3,97	4,10	4,14
$c_{33}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	8,61	8,76	9,12	9,47
$c_{44}(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	1,62	1,90	1,91	1,89

Böylece hekzagonal sistemin tüm elastik sabitleri belirlenmiş olur. Tablo 6.9'da 4 farklı çekme oranları için elastik sabitlerin değerleri verilmiştir. Şekil 6.5'de hekzagonal yapının tüm elastik sabitlerinin çekme oranına bağlı değişimleri verilmiştir.



Şekil 6.5 Tek yönlü çekilmiş PMMA örnekler için çekme oranına bağlı elastik sabit değişimi.

6.1.3. Ortorombik yapı (iki yönlü çekilmiş PMMA) elastik sabitlerinin belirlenmesi

Yapının dokuz bağımsız elastik sabitinin bulunması için üç esas eksen doğrultusunda saf boyuna dalga hızları (V_{xx} , V_{yy} , ve V_{zz}) ve üç esas düzlemde (xy , zy ve zx) düzlemlerinde eninensi ve boyunamsı hızlar ölçülür.

c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitleri esas eksen doğrultularında ölçülen saf boyuna dalga hızları kullanılarak (6.9) eşitliği ile hesaplanır.

$$c_{11} = \rho V_{xx}^2 \quad c_{22} = \rho V_{yy}^2 \quad c_{33} = \rho V_{zz}^2 \quad (6.9)$$

(x,y) düzleminde ölçülen V_L ve V_{T1} hızları (4.73) ve (4.74) eşitliklerinin yeniden düzenlenmesi ile elde edilen (6.10) ve (6.11) eşitliklerinde kullanılarak c_{66} ve c_{12} hesaplanır.

$$c_{66} = \rho (V_L^2 + V_{T1}^2) - c_{11} \cos^2 \phi - c_{22} \sin^2 \phi \quad (6.10)$$

$$c_{12} = \left[\frac{\left(\rho^2 (V_L^2 - V_{T1}^2)^2 - (c_{66} + c_{11} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi)^2 + 4(c_{11} \cos^2 \phi + c_{66} \sin^2 \phi) \right)^{1/2}}{(c_{66} \cos^2 \phi + c_{22} \sin^2 \phi)} \right] - c_{66} \quad (6.11)$$

Burada kalınlık eksenini y ve ϕ dalga yayılma yönünün x eksenine ile yaptığı açıdır ($\phi=90-r$).

(y,z) düzleminde ölçülen V_L boyunamsı ve V_{T1} eninamsı dalga hızlarıyla, c_{44} ve c_{23} elastik sabitleri (4.75) ve (4.76) eşitliklerinin yeniden düzenlenmesi ile,

$$c_{44} = \rho (V_L^2 + V_{T1}^2) - c_{22} \sin^2 \theta - c_{33} \cos^2 \theta \quad (6.12)$$

$$c_{23} = \left[\frac{\left(\rho^2 (V_L^2 - V_{T1}^2)^2 - (c_{44} + c_{22} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta)^2 + 4(c_{22} \sin^2 \theta + c_{44} \cos^2 \theta) \right)^{1/2}}{4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} \right] - c_{44} \quad (6.13)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Burada kalınlık eksenini y ve θ dalga yayılma yönünün z eksenine ile yaptığı açıdır ($\theta=90-r$).

(z,x) düzleminde ölçülen V_L boyunamsı ve V_{T1} eninamsı dalga hızlarıyla, (4.79) ve (4.80) eşitliklerinin yeniden düzenlenmesi ile c_{55} ve c_{13} elastik sabitleri;

$$c_{55} = \rho (V_L^2 + V_{T_1}^2) - c_{11} \sin^2 \theta - c_{33} \cos^2 \theta \quad (6.14)$$

$$c_{13} = \left(\frac{\left(\rho^2 (V_L^2 - V_{T_1}^2)^2 - (c_{55} + c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta)^2 + 4(c_{11} \sin^2 \theta + c_{55} \cos^2 \theta) \right)^{1/2}}{4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} \right) - c_{55} \quad (6.15)$$

eşitliklerinden hesaplanmıştır. Burada kalınlık eksenini x ve θ , dalga yayılma yönünün z eksenini ile yaptığı açıdır ($\theta=90-r$).

Bu düzlemdeki ölçümler için örnekler, z eksenine paralel şekilde dilimlenmiş ve dilimler 90° döndürülerek yeniden birleştirmiştir. Z ekseninde yayılan saf boyuna dalga hızları ölçümü için dilimlenmiş yapı z eksenine dik dilimlenmiş ve dilimler 90° döndürülerek yeniden birleştirmiştir. Böylece örnek kalınlık eksenini z olmuştur.

Ortorombik yapı için yapılan tüm ölçümler ultrasonik spektrometrenin kalibrasyonu yapılmadan alındığından, bu ölçümleri hesaplamalarda kullanmak hatalara neden olmuştur. (z,x) düzleminde ölçüm yapmak için dilimlenmiş örnekler, daha sonra z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızı ölçümü yapılmak üzere z eksenine dik dilimlendiğinden kalibrasyondan sonra (z,x) düzleminde ölçüm yapmak imkansızdır. Bu nedenle iki yönlü çekilmiş PMMA örneklerin sadece c_{33} sabitinin belirlenmesinde kullanılan z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızı ölçümü yapılabilmektedir.

Tablo 6.10, 11 ve 12’de farklı λ_x değerleri için değişen λ_z değerlerinde dalga hızları verilmiştir. Tablo 6.13’te bu çekme oranlarından c_{33} elastik sabitleri verilmiştir.

Tablo 6.10. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için ($\lambda_x=1,25$ sabit) z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları.

λ_x	λ_z	V_L (m/s)
1,25	1,25	2694,39
1,25	1,50	2737,06
1,25	1,75	2783,37
1,25	2,0	2737,06

Tablo 6.11. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için ($\lambda_x=1,5$ sabit) z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları.

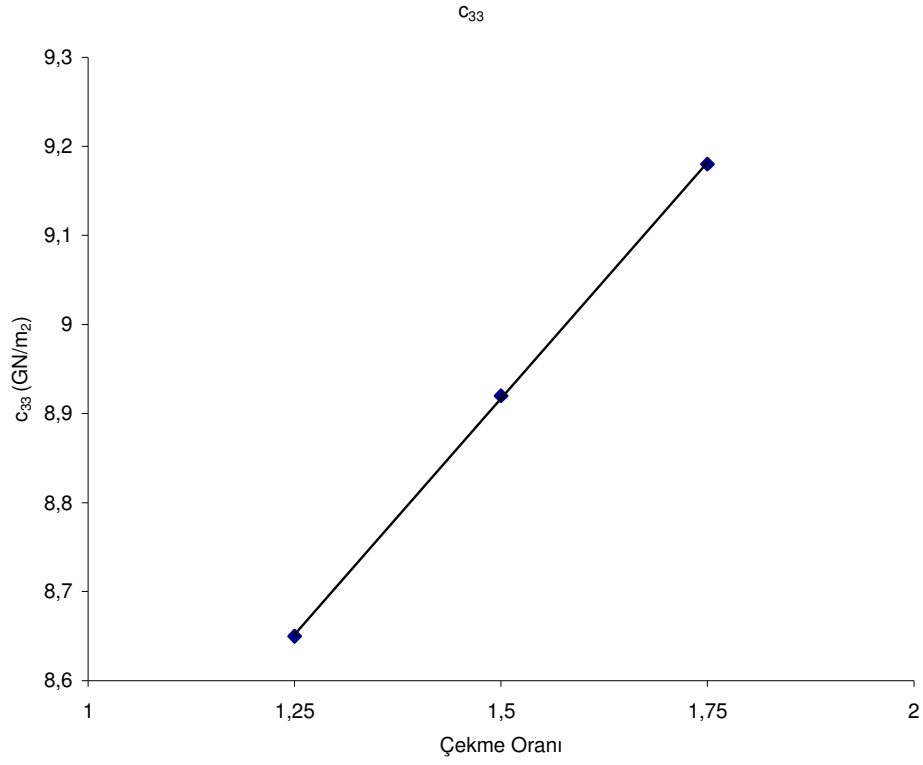
λ_x	λ_z	V_L (m/s)
1,5	1,50	2659,74
1,5	1,75	2704,95
1,5	2,0	2728,19

Tablo 6.12. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekleri için ($\lambda_x=1,75$ sabit) z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları.

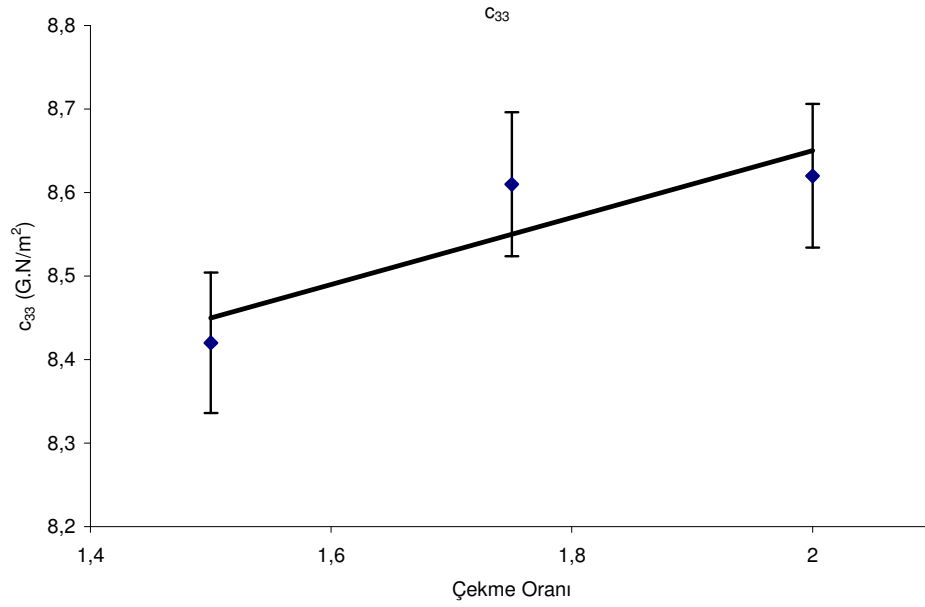
λ_x	λ_z	V_L (m/s)
1,75	1,75	2663,20
1,75	2,0	2694,39

Tablo 6.13. İki yönlü çekilmiş PMMA örnekler için c_{33} elastik sabitleri.

λ_x	λ_z	c_{33}
1,25	1,25	8,65E+09
1,25	1,5	8,92E+09
1,25	1,75	9,18E+09
1,25	2	8,71E+09
1,5	1,5	8,42E+09
1,5	1,75	8,61E+09
1,5	2	8,62E+09
1,75	1,75	8,25E+09
1,75	2	8,42E+09



Şekil 6.6. İki yönlü çekilmiş PMMA'da $\lambda_x=1,25$ sabit iken λ_z değerlerine karşılık c_{33} değişimi.



Şekil 6.7. İki yönlü çekilmiş PMMA'da $\lambda_x=1,5$ sabit iken λ_z değerlerine karşılık c_{33} değişimi.

6.2. PVC’de Hız Ölçümleri ve Elastik Sabitlerin Hesaplanması

Bölüm 6.1’de tariflendiği şekliyle PVC örneklerde hız ölçümleri gerçekleştirilmiş ve her üç yapı için elastik sabitler hesaplanmıştır.

6.2.1. İsootrop yapı (PVC) elastik sabitlerinin belirlenmesi

Çekilmemiş PVC örnek için hız ölçümleri gerçekleştirilerek, Bölüm 6.1.1’de PMMA örnek için verilen tüm hesaplamalar bu örnek içinde kullanılmıştır.

$$\bar{V}_L = 2282,14 \text{ m/s} \quad \bar{V}_T = 1037,7 \text{ m/s}$$

Bu hız değerlerinde, c_{11} ve c_{44} elastik sabitleri hesaplanarak,

$$c_{11} = 7,25 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad c_{44} = 1,48 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$c_{12} = c_{11} - 2c_{44}$ eşitliğinde, c_{11} ve c_{44} değerlerinin yerine konmasıyla; $c_{12} = 4,29 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ elastik sabiti hesaplandı. Böylece (6.1) ifadesi ile belirtilen çekilmemiş PVC örneği ($\lambda=1$) için elastik sertlik tensörü;

$$\begin{bmatrix} 7,25 & 4,29 & 4,29 & 0 & 0 & 0 \\ 4,29 & 7,25 & 4,29 & 0 & 0 & 0 \\ 4,29 & 4,29 & 7,25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,48 \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılır.

6.2.2. Hekzagonal Yapı (PVC) Elastik Sabitlerinin Belirlenmesi

PMMA'da olduğu gibi (Bölüm 6.1.2) tek yönlü çekilmiş PVC örneklerde hız ölçümleri gerçekleştirilerek hekzagonal yapı elastik sabitleri belirlenmiştir. Tablo 6.14'te tek yönlü çekilmiş örneklerin (x,y) düzleminde ölçülen hız değerleri verilmiştir. Özellikle $\lambda_z=1,68$ örneği incelendiğinde enine dalgaların $48^\circ-52^\circ$ arasında gözlenebileceği görülür. c_{11} ve c_{66} elastik sabitleri, bu düzlemde ölçülen saf boyuna ve saf enine hız değerleri ile hesaplanmıştır. Saf boyuna dalga hızları boyuna hızların ilk değerlerinden, saf enine hızlar ise $48^\circ-52^\circ$ arasında ölçülen hızların ortalamasından hesaplanmıştır.

Tablo 6.14. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için (x,y) düzleminde dalga hızı ölçümleri.

Açı(i)	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,68$	$\lambda_z=2,25$
0,00	2275,82	2296,08	2280,07	2242,28
2,88	2273,50	2293,67	2277,74	2240,13
5,76	2266,62	2286,48	2270,79	2233,72
8,64	2255,29	2302,59	2288,62	2288,82
11,52	2264,12	2285,41	2300,87	2272,13
14,40	2267,35	2290,22	2278,69	2282,77
17,28	2264,69	2288,72	2306,36	2286,86
20,16	2255,97	2280,70	2298,90	2254,96
21,60	2281,48	2285,99	2305,21	2294,15
23,04	2282,68	2288,90	2284,51	2273,93
44,64	839,64	0,00	0,00	983,01
46,08	907,12	842,06	0,00	999,34
47,52	958,95	919,55	0,00	1028,06
48,96	993,51	981,25	968,47	1051,69
51,84	1016,37	1035,13	1018,94	1015,08

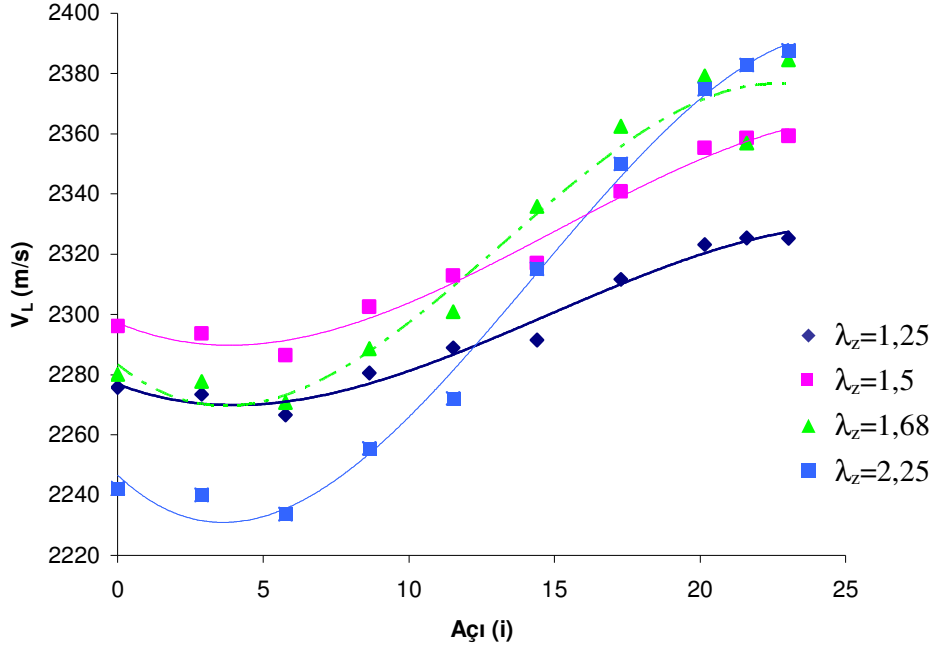
Tablo 6.15. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için c_{11} , c_{66} ve c_{12} değerleri.

Çekme Oranı	$\lambda_z=1,25$	$\lambda_z=1,5$	$\lambda_z=1,68$	$\lambda_z=2,25$
V_T (m/s)	1024,9	1008,19	993,7	1023,54
V_L (m/s)	2275,82	2296	2280,07	2242,28
Yoğ. (kg/m ³)	1390	1392	1385	1366
c_{11} (N/m ²)	7,20E+09	7,34E+09	7,20E+09	6,87E+09
C_{66} (N/m ²)	1,98E+09	1,95E+09	1,91E+09	1,91E+09
C_{12} (N/m ²)	3,24E+09	3,43E+09	3,39E+09	3,05E+09

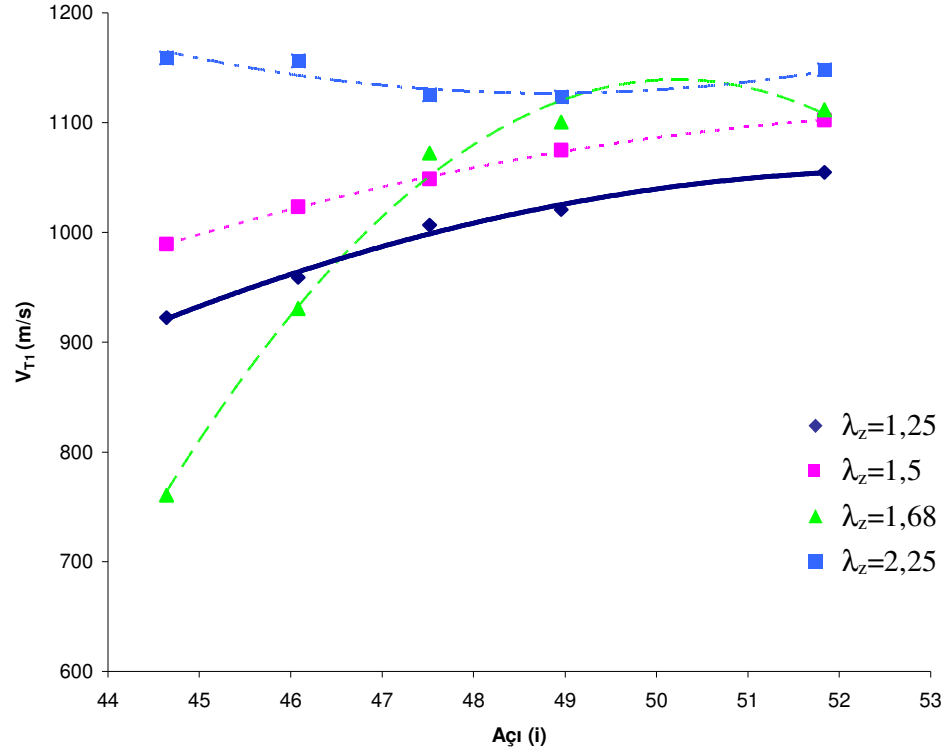
Tablo 6.16'da (z,y) düzleminde ölçülen hız değerleri verilmiştir. Burada V_L ve V_{T1} hızları $R_L, R_T=32^\circ$ için bulunmuştur.

Tablo 6.16. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için (z,y) düzleminde ölçülen hız değerleri.

Çekme. D.	$\lambda_z=1,25$		$\lambda_z=1,5$		$\lambda_z=1,68$		$\lambda_z=2,25$	
	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T
0,00	0,00	2275,82	0,00	2296,08	0,00	2280,07	0,00	2242,2
2,88	4,40	2273,50	4,44	2293,67	4,41	2277,74	4,33	2240,1
5,76	8,78	2266,62	8,86	2286,48	8,80	2270,79	8,65	2233,72
8,64	13,29	2280,52	13,42	2302,59	13,34	2288,62	13,14	2255,54
11,52	17,87	2288,98	18,06	2312,96	17,96	2300,87	17,73	2272,13
14,40	22,49	2291,56	22,75	2317,06	22,95	2335,81	22,73	2315,09
17,28	27,44	2311,63	27,82	2340,81	28,10	2362,44	27,94	2349,98
20,16	32,50	2323,16	33,01	2355,24	33,39	2379,14	33,32	2374,77
21,60	35,07	2325,43	35,64	2358,59	35,61	2356,86	36,07	2382,80
23,04	37,64	2325,25	38,29	2359,21	38,78	2384,59	38,84	2387,66
43,20	24,07	887,90					31,58	1139,71
44,64	25,78	922,33	27,81	989,38	21,01	760,45	33,13	1158,96
46,08	27,62	958,95	29,65	1023,46	26,74	930,57	33,98	1156,19
47,52	29,89	1006,64	31,28	1048,84	32,05	1072,23	33,85	1125,33
48,96	31,12	1020,85	32,97	1075,05	33,85	1100,50	34,66	1123,56
51,84	33,83	1054,92	35,57	1102,26	35,91	1111,54	37,30	1148,23



Şekil 6.8. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler için (z,y) düzleminde boyuna hız dağılımı .

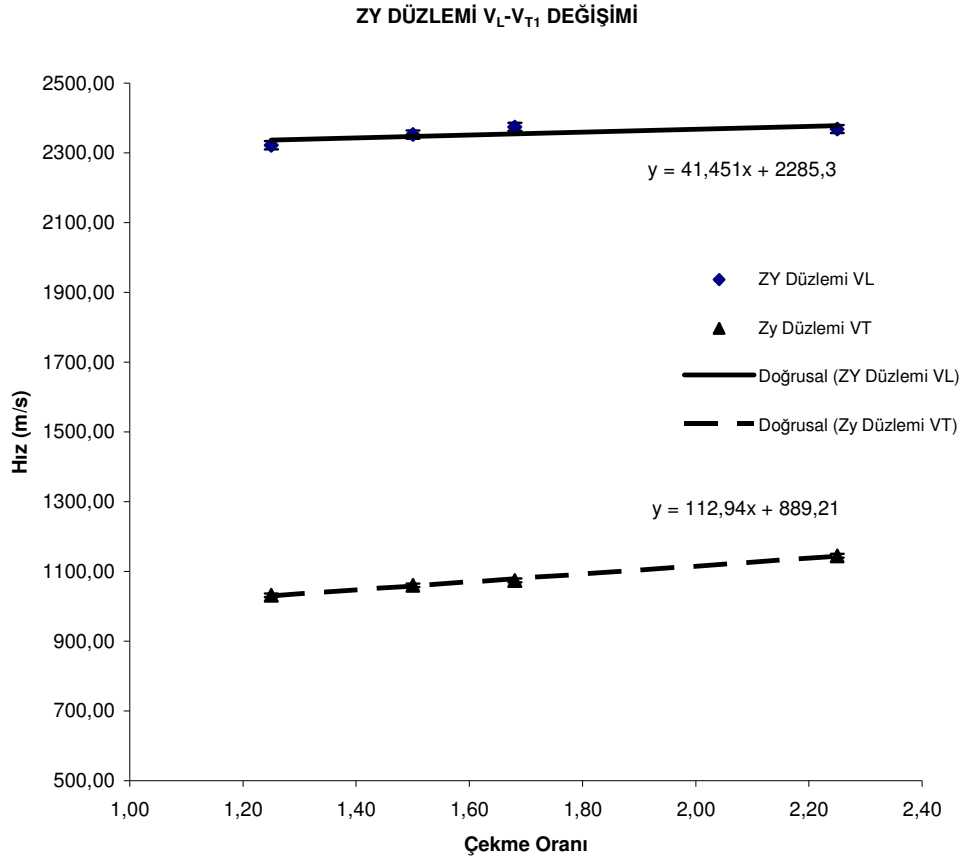


Şekil 6.9. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekleri için (z,y) düzleminde enine hız dağılımı.

Şekil 6.8 ve 6.9 incelendiğinde, özellikle $\lambda_z=2,25$ örneğinde hem boyuna hem de enine hızlar için dağılımın diğer üç çekme oranına gözlenen dağılımdan farklılık gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni Bölüm 5.3.4'te belirtilen şekli ile spektrometre dönüştürgenlerinin düşük frekansta(748 kHz) titreşimi nedeniyle hızların belirlenmesi için ölçülen zaman farkının hassas okunamamasıdır. Tablo 6.17'de bu düzlemden belirlenen V_L ve V_{T1} hızları verilmiştir. Şekil 6.10'da bu hız değerlerinin çekme değerlerine göre değişimleri verilmiştir.

Tablo 6. 17. Tek yönlü çekilmiş PVC örneğinin (z,y) düzleminde ölçülen hızlardan belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.

λ_z	V_L (m/s)	V_{T1} (m/s)
1,25	2322,00	1031,95
1,50	2352,46	1060,10
1,68	2374,73	1074,24
2,25	2368,74	1144,97



Şekil 6.10. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,y) düzleminde hız değerlerinin çekme oranlarına göre değişimi.

Tek yönlü çekilmiş örnekler, z eksenine dik dilimlenerek kalınlık ekseninde 90° döndürülerek yeniden birleştirilmiş ve z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Bu hızlarla c_{33} elastik sabitleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 6.18’de verilmiştir.

Tablo 6.18. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerde z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızları ve bu hızlarla hesaplanmış c_{33} elastik sabitleri.

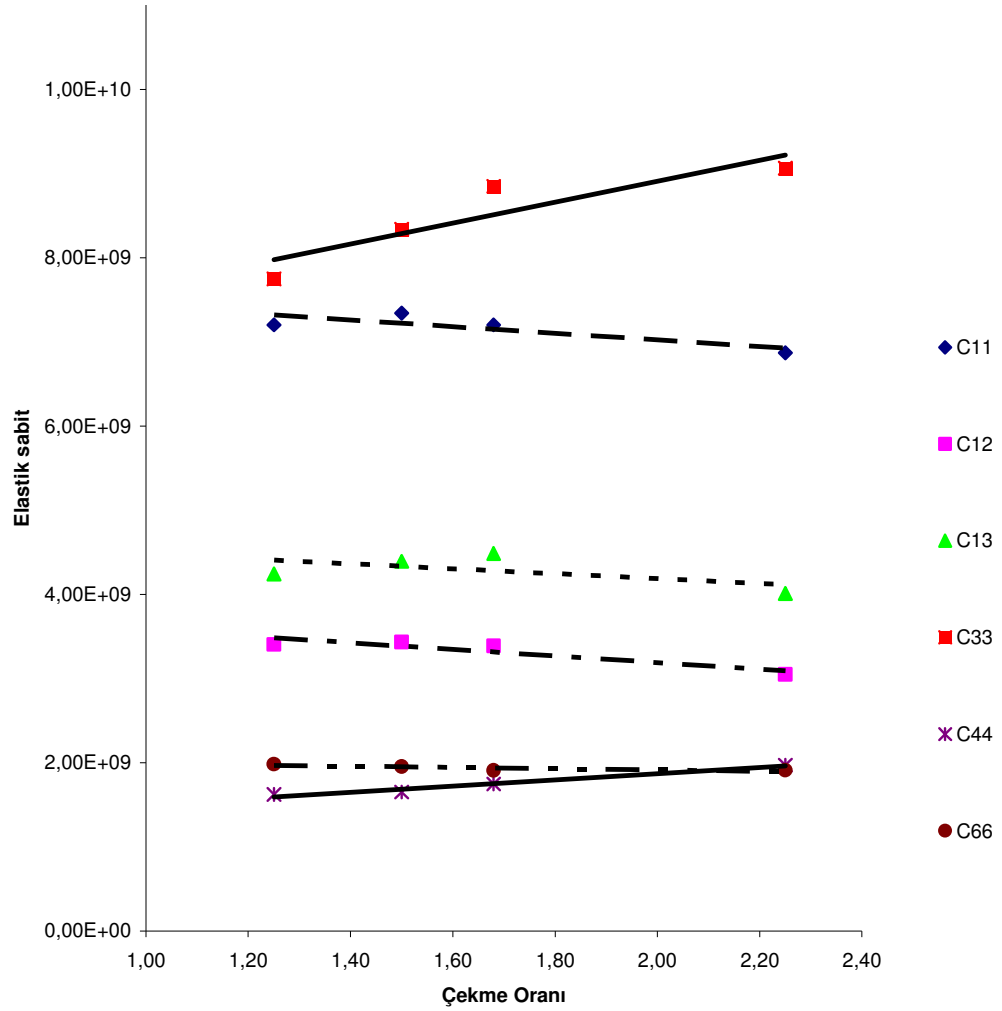
λ_z	V_z (m/s)	Yoğ (kg/m ³)	c_{33}
1,25	2360,44	1390	7,74E+09
1,50	2447,08	1392	8,34E+09
1,68	2527,43	1385	8,85E+09
2,25	2575,244	1366	9,06E+09

Hekzagonal simetrisinin tüm elastik sabitleri hesaplanmış ve Tablo 6.19’da verilmiştir.

Tablo 6.19. Tek yönlü çekilmiş PVC örnekler (hekzagonal yapı) için elastik sabitler.

Çekme Or.	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{33}	c_{44}	c_{66}
1,25	7,20E+09	3,41E+09	4,24E+09	7,74E+09	1,62E+09	1,98E+09
1,5	7,34E+09	3,43E+09	4,39E+09	8,34E+09	1,65E+09	1,95E+09
1,68	7,20E+09	3,39E+09	4,48E+09	8,85E+09	1,75E+09	1,91E+09
2,25	6,87E+09	3,05E+09	4,01E+09	9,06E+09	1,97E+09	1,91E+09

Elastik sabitlerin çekme oranına göre değişimi, Şekil 6.11’de verilmiştir.



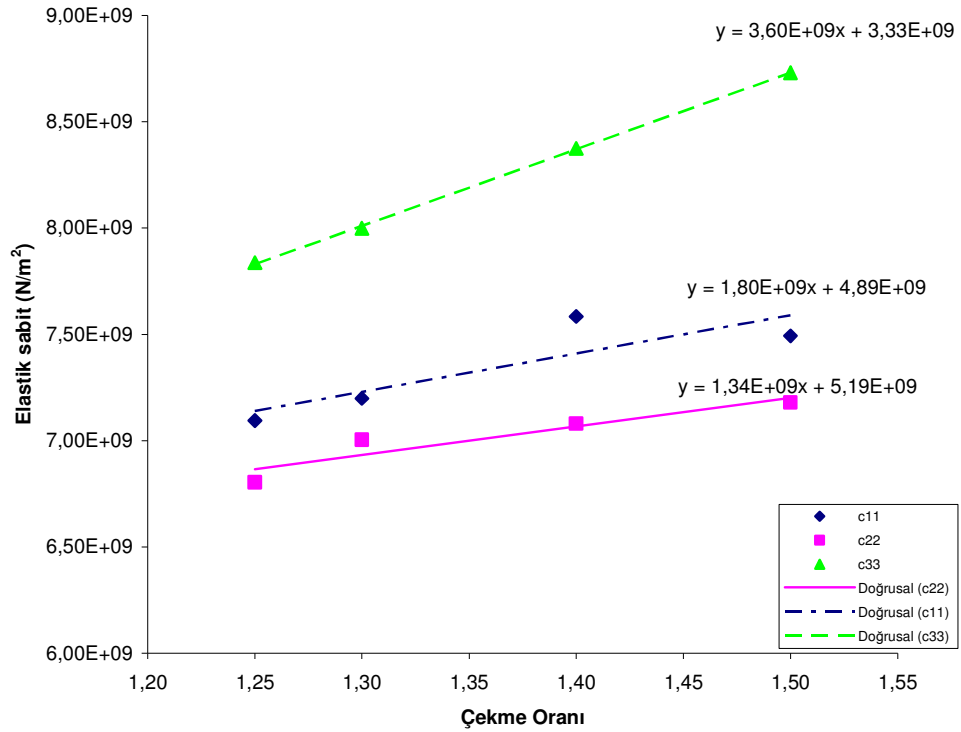
Şekil 6.11. Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerde (hekzagonal yapı) elastik sabitlerin çekme oranına bağlı değişimi.

6.2.3. Ortorombik Yapı (PVC) Elastik Sabitlerinin Belirlenmesi

c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitleri esas eksen doğrultularında ölçülen saf boyuna dalga hızları kullanılarak (6.9) eşitliği ile hesaplanmıştır. Tablo 6.20'de esas eksen doğrultularında ölçülen saf boyuna dalga hızları ve bu hızlarla hesaplanmış elastik sabitler verilmiştir. Şekil 6.12'de c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitlerin ($\lambda_x=1,20$ sbt) çekme oranına bağlı değişimleri verilmiştir.

Tablo 6.20. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin esas eksen doğrultularında ölçülen hızlar ve hesaplanan elastik sabitler (10^9 N/m²).

λ_x	λ_z	V_x (m/s)	c_{11}	V_y (m/s)	c_{22}	V_z (m/s)	c_{33}	Yoğ.(kg/m ³)
1,20	1,25	2267,96	7,09	2220,83	6,80	2383,63	7,84	1379,31
1,20	1,30	2289,86	7,20	2258,63	7,00	2413,94	8,00	1372,85
1,20	1,40	2338,64	7,58	2259,53	7,08	2457,42	8,37	1386,67
1,20	1,50	2301,50	7,49	2252,92	7,18	2484,57	8,73	1414,34



Şekil 6.12. $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{11} , c_{22} ve c_{33} değerleri.

(x,y) düzleminde ölçülen V_L ve V_{T1} hızları, (6.10) ve (6.11) eşitliklerinde kullanılarak c_{66} ve c_{12} hesaplanmıştır ($R_L, R_T=32^\circ$). (x,y) düzleminde ölçülen dalga hızları Tablo 6.21’de verilmiştir.

Tablo 6.21. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (x,y) düzleminde ölçülen dalga hızları ($\lambda_x=1,20$ sabit).

Çek. Or.	$\lambda_z=1,25$		$\lambda_z=1,30$		$\lambda_z=1,40$		$\lambda_z=1,50$	
	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T
0,00	0,00	2220,83	0,00	2258,63	0,00	2259,53	0,00	2252,92
2,88	4,29	2218,78	4,36	2256,40	4,37	2257,30	4,35	2250,72
5,76	8,57	2212,68	8,72	2249,77	8,72	2250,65	8,69	2244,17
8,64	13,01	2232,03	13,23	2269,39	13,05	2239,71	13,24	2270,80
11,52	17,52	2246,43	17,58	2253,38	17,62	2258,94	17,59	2254,74
14,40	21,82	2226,70	22,18	2262,26	21,94	2238,66	21,90	2234,65
17,28	26,40	2230,42	26,84	2264,97	27,02	2279,18	27,48	2314,71
20,16	31,43	2254,43	31,54	2261,18	31,33	2247,79	31,84	2280,88
21,60	33,56	2237,30	33,67	2243,79	33,96	2260,89	34,55	2295,24
23,04	36,12	2244,23	36,24	2250,71	36,08	2242,09	37,29	2306,73
24,48	38,71	2248,72	38,84	2255,16	38,75	2250,63	39,44	2284,31
43,20	27,36	1000,18	27,95	1020,27	24,91	916,83	23,48	867,37
44,64	28,62	1015,89	29,26	1036,45	26,77	955,19	25,41	909,91
46,08	30,29	1043,44	30,98	1064,91	28,40	983,83	26,96	937,85
48,96	33,68	1095,43	34,26	1112,15	32,16	1051,65	31,01	1017,70
51,84	34,41	1070,79	33,50	1045,81	35,38	1097,06	34,66	1077,77

Tablo 6.22. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (x,y) düzleminde $R_L, R_T=32^\circ$ de belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.

λ_x	λ_z	V_L (m/s)	V_{T1} (m/s)
1,20	1,25	2249,84	1069,55
1,20	1,30	2257,44	1079,80
1,20	1,40	2251,14	1048,85
1,20	1,50	2281,71	1033,97

Tablo 6.23. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{66} ve c_{12} elastik sabitleri.

(λ_z)	1,25	1,3	1,4	1,5
c_{66}	1,67E+09	1,54E+09	1,33E+09	1,61E+09
c_{12}	3,83E+09	3,87E+09	4,19E+09	4,35E+09

(y,z) düzleminde ölçülen V_L boyunamsı ve V_{T1} eninemsı dalga hızlarıyla, c_{44} ve c_{23} elastik sabitleri (6.12) ve (6.13) eşitlikleri ile hesaplanmıştır ($R_L, R_T=32^\circ$). (z,y) düzleminde ölçülen dalga hızları Tablo 6.24’te verilmiştir.

Tablo 6.24. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,y) düzleminde ölçülen dalga hızları ($\lambda_x=1,20$ sabit).

Çek. Or.	$\lambda_z=1,25$		$\lambda_z=1,30$		$\lambda_z=1,40$		$\lambda_z=1,50$	
	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T
0,00	0,00	2220,83	0,00	2290,57	0,00	2334,90	0,00	2292,04
2,88	4,29	2218,78	4,43	2288,18	4,51	2332,28	4,43	2289,65
5,76	8,57	2212,68	8,84	2281,07	9,01	2324,49	8,84	2282,52
8,64	13,01	2232,03	13,41	2300,76	13,70	2349,41	13,24	2270,80
11,52	17,52	2246,43	17,82	2283,64	18,20	2330,50	17,89	2292,03
14,40	22,11	2255,28	22,80	2322,18	23,02	2342,50	22,65	2306,93
17,28	26,75	2258,06	27,21	2293,54	28,35	2382,21	27,48	2314,71
20,16	31,43	2254,43	31,96	2288,34	33,35	2376,78	32,37	2314,76
21,60	34,00	2263,12	34,57	2296,46	36,73	2420,36	35,12	2328,48
23,04	36,12	2244,23	37,20	2301,98	39,59	2426,31	37,91	2339,11
24,48	38,71	2248,72	39,86	2304,78	42,48	2428,53	40,08	2315,11
43,20	27,36	1000,18	28,29	1031,73	25,56	939,08	24,42	899,79
44,64	29,15	1032,80	29,62	1048,13	27,49	978,97	26,47	945,06
46,08	30,86	1060,99	31,38	1077,03	29,39	1015,06	27,91	968,38
48,96	33,57	1092,37	34,71	1124,88	33,10	1078,95	32,43	1059,39
51,84	33,57	1047,96	33,91	1057,17	37,00	1140,33	35,76	1107,32

Tablo 6.25. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,y) düzleminde $R_L, R_T=32^\circ$ de belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.

λ_x	λ_z	V_L (m/s)	V_{T1} (m/s)
1,20	1,25	2256,39	1074,20
1,20	1,30	2288,41	1085,93
1,20	1,40	2378,24	1060,18
1,20	1,50	2314,75	1051,13

Tablo 6.26. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{44} ve c_{23} elastik sabitleri.

(λ_z)	1,25	1,3	1,4	1,5
c_{44}	1,52E+09	1,53E+09	1,96E+09	1,53E+09
c_{23}	4,09E+09	4,20E+09	4,71E+09	4,77E+09

(z,x) düzleminde ölçülen V_L boyunamsı ve V_{T1} eninemsı dalga hızlarıyla, (6.14) ve (6.15) eşitlikleri ile c_{55} ve c_{13} elastik sabitleri ($R_L, R_T=32^\circ$) hesaplanmıştır. (z,x) düzleminde ölçülen dalga hızları Tablo 6.27’de verilmiştir.

Tablo 6.27. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,x) düzleminde ölçülen dalga hızları.

Çek. Or.	$\lambda_z=1,25$		$\lambda_z=1,30$		$\lambda_z=1,40$		$\lambda_z=1,50$	
	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T	R_L, R_T	V_L, V_T
0,00	0,00	2267,96	0,00	2289,86	0,00	2338,64	0,00	2301,50
2,88	4,38	2265,69	4,42	2287,47	4,52	2336,01	4,45	2299,06
5,76	8,75	2258,91	8,84	2280,38	9,02	2328,16	8,88	2291,78
8,64	13,31	2283,73	13,44	2306,01	13,50	2315,27	13,29	2279,84
11,52	17,98	2302,98	17,86	2288,70	18,24	2335,27	17,97	2301,32
14,40	22,74	2315,79	22,60	2302,44	23,08	2348,37	22,74	2316,34
17,28	27,13	2287,53	27,41	2309,18	27,53	2318,17	27,14	2288,04
20,16	32,45	2319,46	31,76	2275,74	32,94	2351,01	31,98	2289,60
21,60	34,62	2299,74	34,99	2321,11	35,15	2329,96	34,70	2304,05
23,04	36,78	2279,28	37,16	2299,70	38,54	2371,89	37,46	2315,57
24,48	39,49	2286,95	39,92	2307,27	40,73	2346,21	39,61	2292,72
44,64	26,00	929,68	25,46	911,66	27,13	967,00	25,67	918,46
46,08	27,94	969,15	27,36	950,52	28,81	997,00	27,63	959,30
48,96	31,63	1035,92	30,97	1016,45	32,49	1061,12	31,62	1035,57
51,84	34,77	1080,80	34,81	1081,76	35,52	1100,84	35,11	1089,92

Tablo 6.28. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (z,x) düzleminde $R_L, R_T=32^\circ$ de belirlenen V_L ve V_{T1} hızları.

λ_x	λ_z	V_L (m/s)	V_{T1} (m/s)
1,20	1,25	2316,87	1041,20
1,20	1,30	2279,30	1033,93
1,20	1,40	2345,37	1052,86
1,20	1,50	2289,80	1041,61

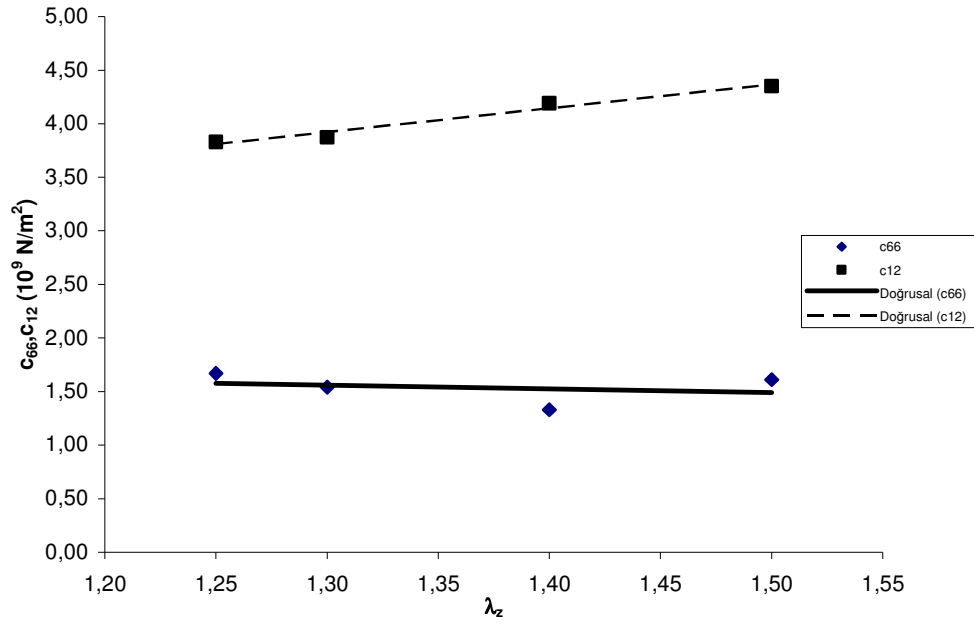
Tablo 6.29. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{55} ve c_{13} elastik sabitleri.

(λ_z)	1,25	1,3	1,4	1,5
c_{55}	1,60E+09	1,18E+09	1,36E+09	1,11E+09
c_{13}	4,50E+09	4,53E+09	4,81E+09	4,84E+09

Ortorombik yapının dokuz bağımsız elastik sabiti Tablo 6.30'da verilmiştir.

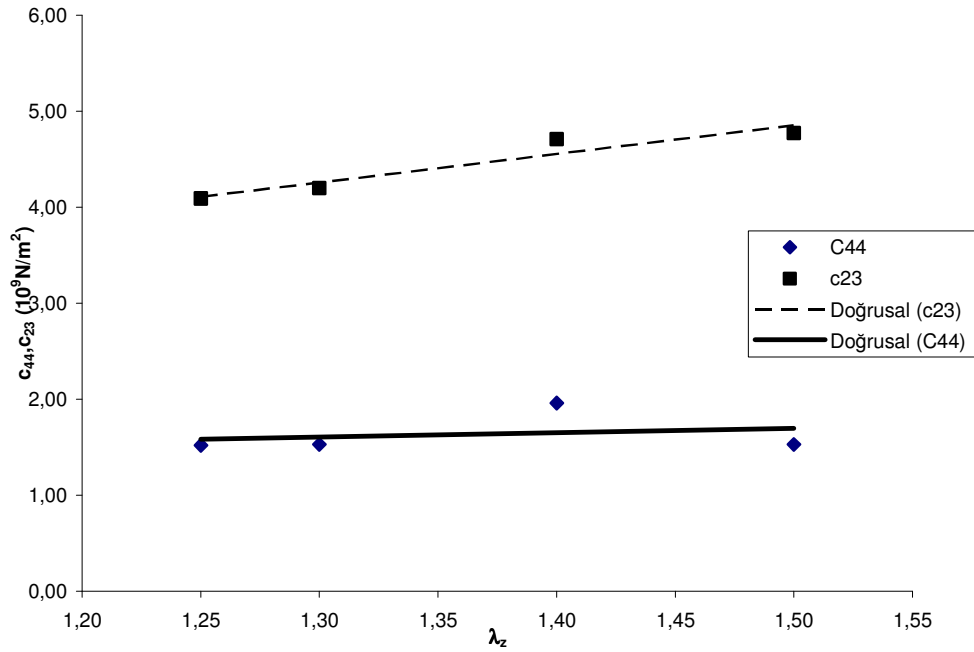
Tablo 6.30. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerinde elastik sabitleri.

λ_x	λ_z	c_{11}	c_{22}	c_{33}	c_{66}	c_{12}	c_{44}	c_{23}	c_{55}	c_{13}
1,20	1,25	7,09	6,80	7,84	1,67	3,83	1,52	4,09	1,60	4,50
1,20	1,30	7,20	7,00	8,00	1,54	3,87	1,53	4,20	1,18	4,53
1,20	1,40	7,58	7,08	8,37	1,33	4,19	1,96	4,71	1,36	4,81
1,20	1,50	7,49	7,18	8,73	1,61	4,35	1,53	4,77	1,11	4,84

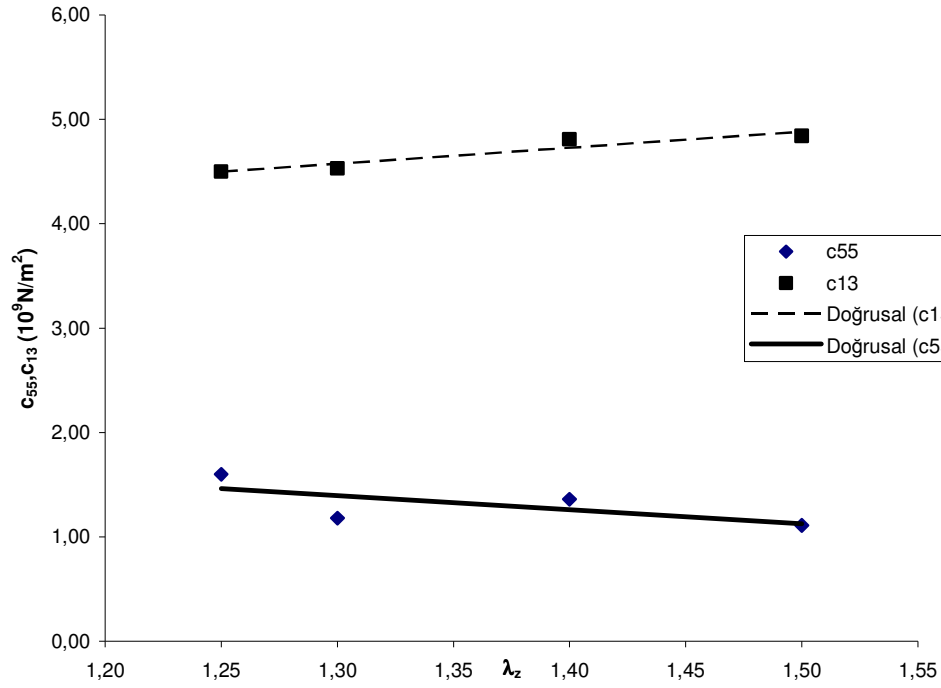


Şekil 6.13. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{66} ve c_{12} elastik sabitlerin değişimi..

Şekil 6.14 ve 15’de sırasıyla c_{44} , c_{23} ve c_{55} , c_{13} elastik sabitlerinin çekme oranına göre değişimleri verilmiştir.



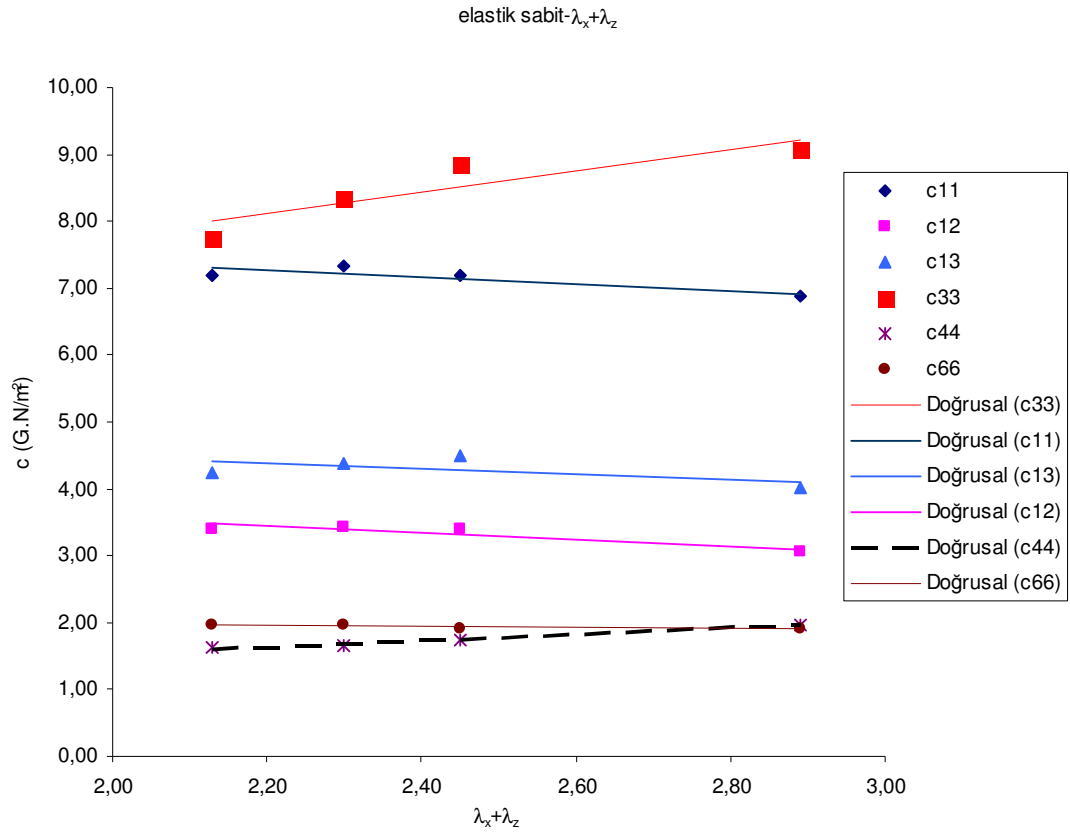
Şekil 6.14. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{44} ve c_{23} elastik sabitlerin değişimi.



Şekil 6.15. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $\lambda_x=1,20$ sabit iken değişen λ_z değerlerine karşılık c_{55} ve c_{13} elastik sabitlerinin değişimi.

6.3. PVC için Hekzagonal Yapı Elastik Sabitleri ile Ortorombik Yapı elastik sabitleri Arasında Analitik Yaklaşım

Tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin, z eksenindeki uzamalara (λ_z) karşılık, x eksenindeki sıkışmalar (λ_x) belirlendiğinden (Tablo 5.10), her iki eksenindeki çekme oranlarının toplamına ($\lambda_x+\lambda_z$) göre elastik sabitlerin dağılımları belirlenebilir. Şekil 6.16'da tek yönlü çekilmiş PVC örneklerin elastik sabitlerinin ($\lambda_x+\lambda_z$) çekme oranları toplamına göre dağılımları verilmiştir. Elastik sabitlerin, ($\lambda_x+\lambda_z$) toplamını içeren eşitlikleri; (6.40), (6.41), (6.42), (6.43), (6.44) ve (6.45)'de verilmiştir. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin elastik sabitlerinin, ($\lambda_x+\lambda_z$) çekme oranları toplamına göre değerleri Tablo 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6.16. Tek yönlü çekilmiş PVC’de elastik sabitlerin ($\lambda_x+\lambda_z$) çekme oranları toplamına göre değişimi.

$$c_{11} = -0,53(\lambda_x + \lambda_z) + 8,44 \quad (6.40)$$

$$c_{12} = -0,51(\lambda_x + \lambda_z) + 4,57 \quad (6.41)$$

$$c_{13} = -0,39(\lambda_x + \lambda_z) + 5,23 \quad (6.42)$$

$$c_{33} = 1,61(\lambda_x + \lambda_z) + 4,57 \quad (6.43)$$

$$c_{44} = 0,48(\lambda_x + \lambda_z) + 0,57 \quad (6.44)$$

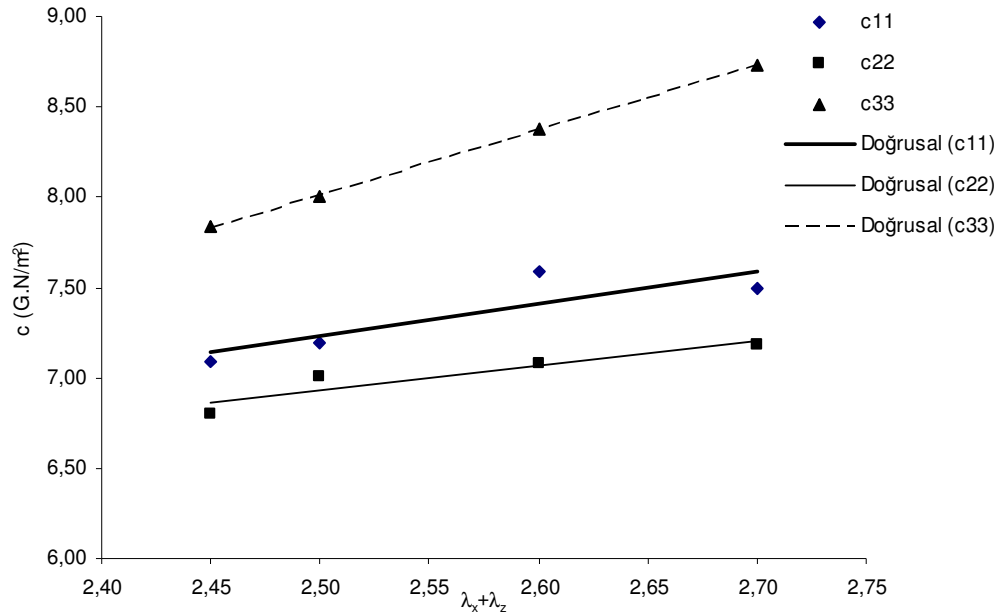
$$c_{66} = -0,09(\lambda_x + \lambda_z) + 2,15 \quad (6.45)$$

Tablo 6.31. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamına göre ve elastik sabit değerleri (G.N/m²).

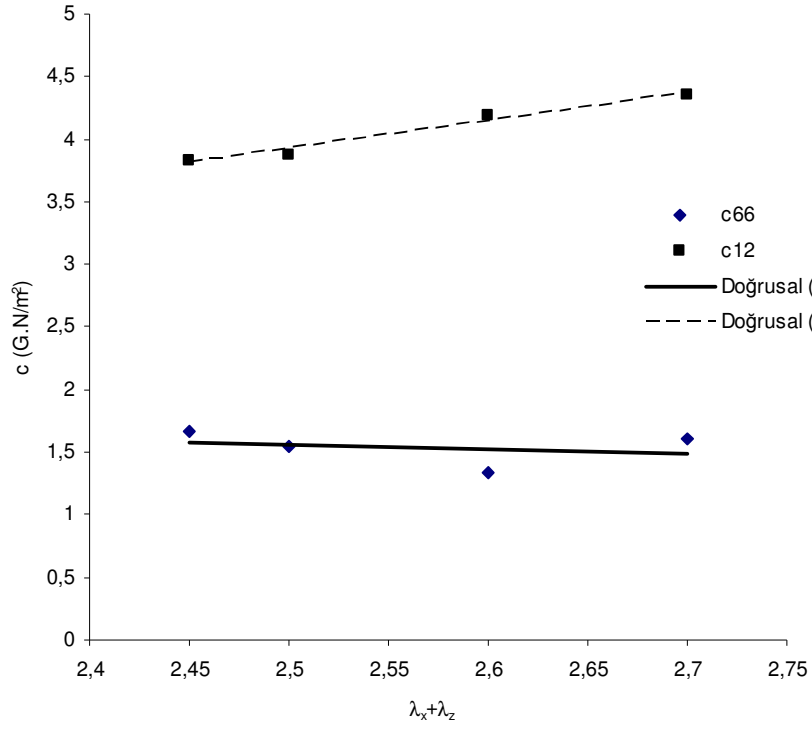
$\lambda_x + \lambda_z$	c_{11}	c_{22}	c_{33}	c_{66}	c_{12}	c_{44}	c_{23}	c_{55}	c_{13}
2,45	7,09	6,80	7,84	1,67	3,83	1,52	4,09	1,60	4,50
2,50	7,20	7,00	8,00	1,54	3,87	1,53	4,20	1,18	4,53
2,60	7,58	7,08	8,37	1,33	4,19	1,96	4,71	1,36	4,81
2,70	7,49	7,18	8,73	1,61	4,35	1,53	4,77	1,11	4,84

Bu değerlerle Şekil 6.17, 6.18, 6.19 ve 6.20'de ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamına göre elastik sabitlerin değişimleri verilmiştir. Şekil 6.17'deki c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitlerinin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamını içeren eşitlikleri, (6.46), (6.47) ve (6.48)'de verilmiştir.

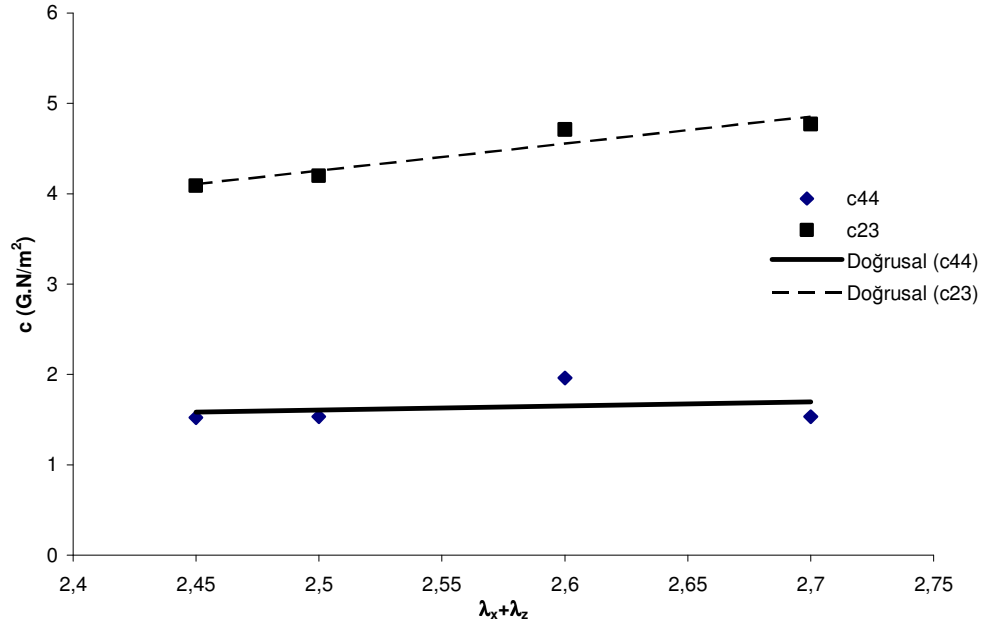
Şekil 6.18'den c_{12} ve c_{66} elastik sabitlerinin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamını içeren eşitlikleri (6.49) ve (6.50)'de, Şekil 6.19'dan c_{23} ve c_{44} elastik sabitlerinin, ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamını içeren eşitlikleri (6.51) ve (6.52)'de ve Şekil 6.20'den c_{13} ve c_{55} elastik sabitlerinin, ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamını içeren eşitlikleri (6.53) ve (6.54)'de verilmiştir.



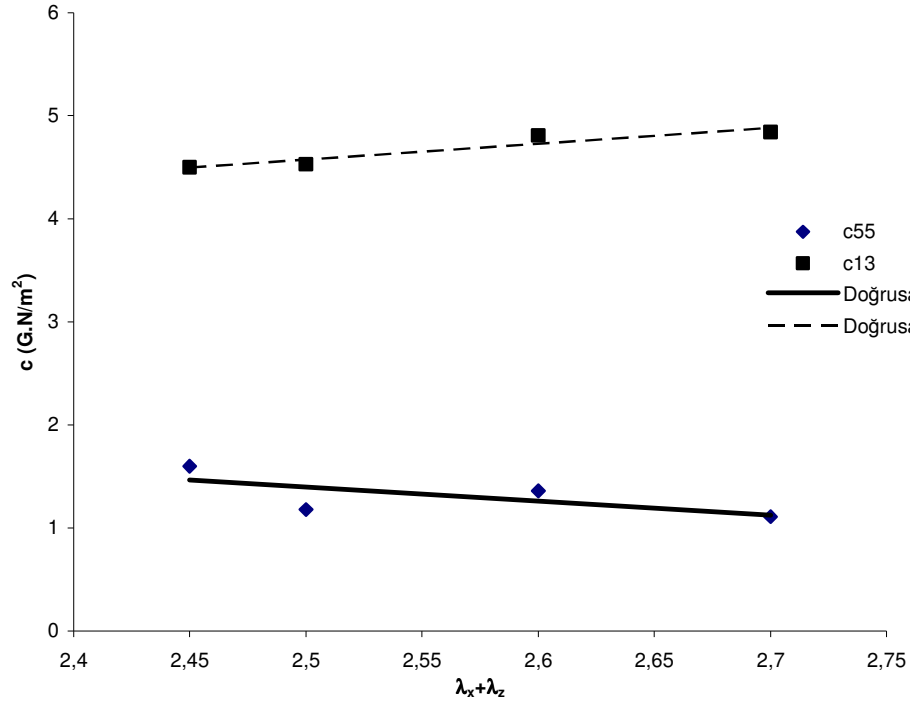
Şekil 6.17. İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamına göre c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitlerinin değişimi.



Şekil 6.18 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamına göre c_{12} ve c_{66} elastik sabitlerinin değişimi.



Şekil 6.19 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamına göre c_{23} ve c_{44} elastik sabitlerinin değişimi.



Şekil 6.20 İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin $(\lambda_x + \lambda_z)$ toplamına göre c_{13} , ve c_{55} elastik sabitlerinin değişimi.

$$c_{11} = 1,80(\lambda_x + \lambda_z) + 2,73 \quad (6.46)$$

$$c_{22} = 1,34(\lambda_x + \lambda_z) + 3,58 \quad (6.47)$$

$$c_{33} = 3,60(\lambda_x + \lambda_z) - 1 \quad (6.48)$$

$$c_{12} = 2,24(\lambda_x + \lambda_z) - 1,67 \quad (6.49)$$

$$c_{66} = -0,35(\lambda_x + \lambda_z) + 2,43 \quad (6.50)$$

$$c_{23} = 2,98(\lambda_x + \lambda_z) - 3,19 \quad (6.51)$$

$$c_{44} = 0,47(\lambda_x + \lambda_z) + 0,44 \quad (6.52)$$

$$c_{13} = 0,53(\lambda_x + \lambda_z) + 0,74 \quad (6.53)$$

$$c_{55} = -1,36(\lambda_x + \lambda_z) + 4,80 \quad (6.54)$$

İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (ortorombik yapı) c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabit eşitlikleri ((6.46), (6.47) ve (6.48)) ve tek yönlü çekilmiş örneklerin (hekzagonal yapı) c_{33} elastik sabit eşitliği (6.43) birinci dereceden eşitlikler olduğundan, ortorombik yapı elastik sabitini, hekzagonal yapı elastik sabiti ve $(\lambda_x + \lambda_z)$ toplamına bağlı bir eşitlik olarak yazmak mümkündür.

İki yönlü çekilmiş PVC örneklerin (ortorombik yapı) c_{11} , c_{22} ve c_{33} elastik sabitlerinin, tek yönlü çekilmiş örneklerin (hekzagonal yapı) c_{33} elastik sabiti ve $(\lambda_x + \lambda_z)$ toplamına bağlı eşitlikleri; (6.55), (6.56) ve (6.57)'de verilmiştir.

$$c_{11}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{33}(\lambda_x + \lambda_z)_1 + 0,19(\lambda_x + \lambda_z) - 1,84 \quad (6.55)$$

$$c_{22}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{33}(\lambda_x + \lambda_z)_1 - 0,27(\lambda_x + \lambda_z) - 0,99 \quad (6.56)$$

$$c_{33}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{33}(\lambda_x + \lambda_z)_1 + 1,99(\lambda_x + \lambda_z) - 5,57 \quad (6.57)$$

Benzer ilişkiler tek yönlü çekilmiş PVC'nin c_{12} , c_{13} , c_{44} , ve c_{66} elastik sabitleri ile iki yönlü çekilmiş PVC'nin c_{12} , c_{13} , c_{23} , c_{55} , c_{44} , ve c_{66} elastik sabitleri arasında kurularak eşitlikler yazılmıştır.

$$c_{12}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{12}(\lambda_x + \lambda_z)_1 + 2,75(\lambda_x + \lambda_z) - 6,24 \quad (6.58)$$

$$c_{66}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{66}(\lambda_x + \lambda_z)_1 - 0,44(\lambda_x + \lambda_z) - 0,28 \quad (6.59)$$

$$c_{13}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{13}(\lambda_x + \lambda_z)_1 + 0,92(\lambda_x + \lambda_z) - 4,49 \quad (6.60)$$

$$c_{55}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{44}(\lambda_x + \lambda_z)_1 - 1,84(\lambda_x + \lambda_z) + 4,23 \quad (6.61)$$

$$c_{23}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{44}(\lambda_x + \lambda_z)_1 + 2,5(\lambda_x + \lambda_z) - 3,76 \quad (6.62)$$

$$c_{44}(\lambda_x + \lambda_z)_2 = c_{44}(\lambda_x + \lambda_z)_1 - 0,01(\lambda_x + \lambda_z) - 0,13 \quad (6.63)$$

Böylece doğrusal yaklaşımla iki yönlü çekilmiş yapının elastik sabitleri çekme oranları toplamını içerecek şekilde tek yönlü çekilmiş yapı sabiti cinsinden elde edilmiştir. Burada eşitliklerin sol tarafındaki (2) indisi iki yönlü çekmeyi, sağ tarafındaki (1) indisi ise tek yönlü çekmeyi temsil eder.

BÖLÜM 7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temeli olan iki yönlü çekilmiş polimerlerin mekanik anizotropisinin, tek yönlü çekilmiş polimerlerin mekanik anizotropisi cinsinden elde etmek için dört farklı çekme oranında tek yönlü örnekler çekilmiş ve elastik sabitleri belirlenmiştir. PMMA örnekler, bu dört farklı çekme oranını her iki ekseninde elde edecek şekilde iki yönlü çekilmiştir. PVC örnekler, dört farklı oranda ($\lambda_z=1,25$, $\lambda_z=1,50$, $\lambda_z=1,68$, $\lambda_z=2,25$) tek yönlü çekilmiştir. İki yönlü çekilmiş PVC örnekler, $\lambda_x=1,20$ sabit tutularak, $\lambda_z=1,25$, $\lambda_z=1,30$, $\lambda_z=1,40$, $\lambda_z=1,50$ değerlerinde çekilmiştir. Bunun nedeni, 4,5 mm kalınlıkta temin edilen plastikleştirici katılmamış PVC örneklerin yüksek çekme oranlarına ulaşamadan kopmasıdır.

Burada iki temel sonuç üzerinde durulmuştur. Birincisi problemin temelini oluşturan deneysel şartlar ve ölçümler, ikincisi ise problemin çözümü için matematik bir yaklaşım aranmasıdır. İki yönlü çekilmiş örneklerin elastik sabitlerini, deney ve ölçüm şartları daha kolay olan tek yönlü çekilmiş örnek elastik sabitleri ile bir matematik yaklaşım yardımıyla elde etmek, hem bilimsel çalışmalarda hem de özellikle sanayide strain sertleştirilmesi olarak adlandırılan işlemlerle elde edilmiş polimerlerin elastik sertlik parametrelerinin belirlenmesinde kolaylık sağlar.

7.1 Deneysel Şartlar ve Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Literatürde özellikle dönen diskler arasından çekme (Rolling), haddeleme, sıkıştırma ile çekme yada sabit yük altında çekme işlemine sıkça rastlanmasına karşın sabit hızda kontrollü çekme işlemi nadir görülmektedir.

Bu çalışmada, Bölüm 5'te detaylı olarak verilen sabit hızda çekme sistemi hazırlanmıştır. Bu çekme sistemi farklı bir çalışma konusuna da deneysel katkıda bulunmuştur. Bu sistem, polimerler gibi yüksek sıcaklıklarda aşırı çekme kuvveti gerektirmeyen birçok malzemede kullanılabilir.

Elastik sabitlerin belirlenmesinde ultrasonik yöntem kullanılmıştır. Bir yüksek lisans çalışmasında hazırlanmış bu sistemin, elektronik kısmında ölçüm işaretinin tetiklenmesindeki hatalar dikkat çekmiştir. Referans dönüştürücüleri arasındaki işaret, ölçümün tüm adımlarında (her açı değerinde) sabit bir genlikte iken (keskin işaret), özellikle yüksek açı değerlerine doğru örnek döndürüldüğünde ölçüm dönüştürücüleri arasındaki işaret zayıflamakta ve böylece referans ve ölçüm işaretleri arasındaki zaman farkı doğru tespit edilememektedir. Böyle bir hata değeri daha önceden % 1-2 mertebesinde belirtilmesine karşın (elektronik sistem), özellikle aynı örnek için osiloskop yardımıyla gerçekleştirilen ölçümlerle mukayese edildiğinde bu hatanın daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür (% 7) (Tablo 5.2). Böylece hız ölçümlerinde elektronik sistemin kullanılmasından vazgeçilerek osiloskop yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Dört örnek tipi için (çekilmemiş örnek, tek yönlü çekilmiş örnek, çift yönlü hazırlanmış tek yönü çekilmiş örnek ve çift yönlü çekilmiş örnek) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Çift yönlü çekilmiş örneklerin (z,x) düzleminde ölçüm yapılabilmesi için daha önceki çalışmalarda tariflenen dilimleme tekniği kullanılmıştır (Güney, 1989). Bu çalışmada, z yönünde yayılan saf boyuna dalga hızı ölçümleri için z eksenine dik dilimlenerek elde edilen z kalınlıklı örneklerin hız ölçümleri verici dönüştürgen bloğuna tam olarak uyan ve örnek ile dönüştürücü arasında daldırma sıvısının varlığına izin veren özel bir örnek tutucu kullanılmıştır. Böylece ince plaka halindeki örnekler için z ekseninde saf boyuna dalga hızı ölçümleri oldukça basit bir hale dönüştürülmüştür.

Ultrasonik sistemin kalibrasyonunun ardından, tek yönlü çekilmiş PMMA örneklerin dalga hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İki yönlü çekilmiş PMMA örneklerin (z,x) düzlemi ve z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızı ölçümlerinin yapılması için ultrasonik spektrometrenin kalibrasyonundan önce dilimlendiğinden, bu örneklerin (z,x) ve (x,y) düzlemindeki ölçümleri yapılamamıştır. PMMA'nın düşük anizotropi göstermesinden dolayı, ölçüm sisteminin kalibrasyonundan sonra daha yüksek anizotropi gösteren PVC örneklerin çekme işlemine geçilmiştir. PVC'de de örnek kalınlıklarının düşük olması, yüksek çekme oranlarına çıkılmasına izin vermemiştir.

Tek yönlü çekilmiş PMMA'nın c_{11} ve c_{33} elastik sabitleri grafik olarak incelendiğinde c_{33} değerlerinin $c_{33} = 1,18\lambda_z + 7,08$ denklemine uyan bir artış gösterdiği görülmektedir.

c_{11} elastik sabiti ise $c_{11} = -0,01\lambda_z + 7,84$ denklemi ile küçüğe olsa lineer bir azalış göstermektedir (Tablo 6.9 ve Şekil 6.5). Her iki elastik sabit için çizilen doğrularda hesaplanan değerlerin, çizilen doğru üzerindeki y sapma miktarı $\pm\%1-2$ mertebesindedir. Bu sapma, yaklaşık ultrasonik ölçümlerdeki sapma miktarı mertebesindedir. c_{11} elastik sabitindeki düşüş, çekilen örneklerin genişlik eksenini olan x ekseninin artan çekme oranlarıyla ilişkilendirilebilir.

Çift yönlü çekilmiş PMMA örneklerin sadece z yönünde ilerleyen saf boyuna dalga hızı ölçümleri yapılabilmektedir. Bu değerlerin özellikle $\lambda_x=1,25$ sabit iken değişen λ_z değerlerinde, ilk üç değer lineer bir artış göstermesine karşın $\lambda_z=2,0$ örneğinde bu artışa uymayan bir değer göze çarpmaktadır.

Bunun nedeni ilk önce x eksenine daha sonra z eksenine dik dilimleme ile örnek hazırlanması sırasında dilimlerden bazılarının yön ve sırasında hatalar oluşabilmesidir. $\lambda_x=1,50$ sabit iken değişen λ_z değerlerinde, doğrusal gösterim kabul edilebilir mertebededir (Şekil 6.7).

PVC örneklerde de tek yönlü çekilmiş örneklerin elastik sabitlerinin, izotrop örnek sabitleriyle grafiği çizildiğinde, c_{33} elastik sabitinin $c_{33} = 1,24\lambda_z + 6,42$ denklemine uyan lineer artan bir dağılım gösterdiği görülür. c_{11} elastik sabiti de, $c_{11} = -0,40\lambda_z + 7,82$ şeklinde azalan bir dağılımın göstermektedir (Şekil 6.11).

c_{12} , c_{13} ve c_{66} elastik sabitleri artan çekme oranlarına karşılık küçük bir azalma göstermektedirler. c_{44} ise artan çekme oranlarına karşılık hafifçe artmaktadır.

Bölüm 4.4'te verilen şekli ile ortogonal dönüşüm matrisinin hegzagonal simetriye uygulanması ile (4.43) ifadesine uygun olarak tek yönlü çekilmiş PVC'nin elastik sabit tensörünün 90° döndürülmüş hali verilmiştir.

Tek yönlü yapı ve döndürülmüş tek yönlü yapı sabitlerinin lineer toplamının iki yönlü yapının elastik sabitlerini belirlemesi üzerine bir yaklaşıma gidilmiştir. Döndürme işlemiyle tensörel gösterimde birbirinin yerine geçen c_{11} ve c_{33} elastik sabitleri arasında yazılan eşitliklerle elde edilen m ve n katsayılar yardımıyla diğer elastik sabitler için çözümler gerçekleştirilmiştir.

Bu çözümler sonucunda c_{12} ve c_{44} elastik sabitlerinde deneysel olarak elde edilen sonuçlara yaklaşım başarısız olmuştur (%20-30 hata). Böylece tüm yapı sabitlerinin tek bir m, n katsayılarıyla çözülemeyeceği açıkça görülür.

Böyle bir çözüm şeklinin dışında artan çekme oranlarıyla elastik sabit değişimlerinin doğrusallığı kullanılarak, PVC için hegzagonal yapı sabitleri ile ortorombik yapı sabitleri arasında her iki çekme oranını içeren ilişkiler Bölüm 6.3'te incelenmiştir.

Tek yönlü çekilmiş örneklerin x yönündeki sıkışmalar bilindiğinden bu örneklerin elastik sabitleri ($\lambda_x + \lambda_z$) fonksiyonu olarak yazılmıştır (Bölüm 6.3). İki yönlü çekilmiş örneklerde de elastik sabitlerin ($\lambda_x + \lambda_z$) toplamına bağlı eşitlikler yazılmıştır. Böylece iki yönlü çekilmiş yapının elastik sabitleri, tek yönlü çekilmiş yapı sabiti ve ($\lambda_x + \lambda_z$) cinsinden elde edilmiştir.

Deneysel şartlardan özellikle çift yönlü çekme işlemindeki zorluklar, hesaplanan elastik sabitlerin dağılımlarının çizgisellikten uzaklaşmasına neden olabilir (% 7-8 Y sapma değeri). Çift yönlü çekilmiş yapı c_{22} , ve c_{33} sabitleri arasındaki çizgisellikten uzaklaşma c_{44} ve c_{23} arasındaki ilişkiyi de etkilemektedir. Benzer bir durum c_{11} ve c_{22} dolayısı ile c_{66} ve c_{12} arasındaki ilişkide de söz konusudur.

Yapının sağlıklı gözlenmesi için x yönündeki yönelme değerinin sabit tutulduğu ve z yönünde yönelmenin belirli oranda yükseltildiği örneklerin sayısı arttırılabilir.

Bu çalışmada (% 100 çekilmiş örnek) $\lambda_x=\lambda_z=2,0$ örneğinde bile ultrasonik ölçümün imkanını zorlayacak örnek kalınlıklarına ulaşıldığı düşünüldüğünde örnek sayısı arttırma çözümünün zorluğu açıkça görülebilir.

Bu sorunun giderilmesi için daha kalın plakalar temin edilebilir (ticari ve bilimsel kaynaklarda max. 30-40 mm). Bu kalınlıktaki örneklerin çekme işleminde zorluklarla karşılaşılabilir. Bu durum ancak yük altında sıkıştırma deneyleriyle çözülebilir. (z,x) düzlemi ile z eksenine doğrultusunda yayılan dalga hızları için önerilen dilimleme tekniğinden gelebilecek hataların minimuma düşürülebilmesi için silindirik şekilde örnekler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- AULD, B.A., "Acoustic Fields and Waves in Solids", Vol. 1, *John Wiley*, (1973)
- BAYSAL, B., "Polimer Kimyası", *Çağlayan Basımevi*, (1981)
- BUCKLEY, C.P., McCRUM, N.G., Anisotropy of the Mechanical α -Relaxation in Biaxially Oriented Linear polyethylene", *Journal of Materials Science*, 8, 928-940 (1973).
- CHAN, O.K., CHEN, F.C., CHOY, C.L., WARD, I.M., The Elastic Constants of Extruded Polypropylene and Polyethylene Terephthalate", *Journal of Phys, D. Appl. Phy.* Vol.11, 617, (1978).
- CHOY, C.L., LUK, W.H., CHEN, F.C., "Thermal Conductivity of Oriented Crystalline Polymers", *Journal of Polymer Science*, Vol.18 , 1187-1207, (1980).
- DOOLING, P.J., "Hot-Drawing of Poly(methyl methacrylate) and Simulation Using a Glass-Rubber Constitutive Model", *Polymer*. Vol. 43, 2451-2465, (2001).
- FAVA, R., "Methods of Experimental Physics", V.16, Part B-C, *Academic Press*, (1980).
- GUPTA, V.B., WARD, I.M., "Orientation in Low-Density Polyethylene Due to an Elementary Slip Process" *Journal of Macromolecular Science (Phys)*, B, 2, 373, (1967)
- GÜNEY, H.Y., "Tek Yönlü ve İki Yönlü Yönlendirilmiş Polivinilklorür (PVC) de Mekaniksel Anizotropinin Ultrasonik Teknikle İncelenmesi", Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (1989).
- GÜNEY, H. Y., OSKAY, T.A., ÖZKAN, S.H., "Mechanical Anisotropy in Biaxially Oriented Polyvinyl Chloride" *J. Polymer Sci. B. Poly Phy.* 29, 897-906, (1991).
- HADLEY, D. W., PINNOCK, P.R., WARD, I.M., "The Mechanical and Optical Properties of Oriented Fibres of Semicrystalline Polymers" *Journal of Material Science*. 4, 152, (1969).
- HARTMAN, B., JARZYNSKI, J., "Immersion Apparatus for Ultrasonic Measurements in Polymers" *J. Acoustic Society of America*, 56, (1469).
- KARA, S., "Bilgisayar Kontrollü Ultrasonik Ölçme Sistemi", Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (1997).

- KAITO, A., NAKAYAMA, K., KANETSUNA, H., "Polarized Reflection Spectrum and Molecular Orientation in Uniaxially Drawn Poly(ethylene terephthalate)", *J. Polymer Science Poly. Part B.*, Vol. 26, 1439-1455, (1988)
- KRETZ, M., MEUREN, B., SPEAT, P., WEILL, G., "Plastic Deformation of Poly(tetramethylene oxide). II. Molecular Orientation as Measured by X-ray Diffraction and NMR Measurements" *J. Polymer Science Poly. Part B.*, 26, 1553, (1988)
- LEE, Y., LEFEBVRE, J.M., PORTER, R.S., "Uniaxial Draw Of Poly(aryl-ether-ether-ketone) by Solid-State Extrusion" *J. Polymer Science Poly. Part B.*, 26, 795-805, (1988)
- LEVNG, W.P. , CHOY, C.L., NAKAGAWA, K., KONAKA, T., "Ultrasonic Measurements of the Elastic Moduli of Ultradrawn Polyoxymethylene" (p 2059-2072). *J. Polymer Science Poly. Part B.*, 25, 2059-2072, (1987)
- MARKHAM, M.F., Measurements of the Elastic Constants of Fibre Composites by Ultrasonics" *Composites*, Vol. 1,(145-149) (1970).
- MASON, W.P., "Physical Acoustics", Vol.1, , *Academic Press*, (1964).
- McSKIMIN, H.J., "A Water Immersion Technique for Measuring Attenuation and Phase Velocity of Longitudinal Waves in Plastics", *Journal of Acoustic Society of America*, Vol.49, 713721, (1970).
- MIRABELLA, F.M., "Determination of the Crystalline and Noncrystalline Molecular Orientation in Oriented Polypropylene by Infrared Spectroscopy" *J. Polymer Science, Part B*, 25, 591-602, (1987).
- MUSGRAVE, M.J.P., "Crystal Acoustics", *Holdan-Day*, (1970)
- NAKAMURA, K. IMADA, K., TAKAYANAGI, M., "Cold Forming of Polymeric Materials", *Polymer*, 15, 446-450, (1974)
- NYE, J.F., "Physical Properties of Crystals", *Clarendon*, (1957).
- RAWSON, F.F., RIDER, J.G., The Elastic Constants of Polyvinylchloride" *Journal of Physics D.*, Vol. 7, 41-49, (1974).
- RIDER, J.G., WATKINSON, K.M., "Ultrasonic Measurements of the Elastic Constants of Oriented polyethylene" *Polymer*, Vol.19, 645-652,(1978).
- SAÇAK, M., "Polimer Kimyası", *Gazi Kitabevi*, (2002).
- SCHULTZ, J.M., 1977. Properties. of Solid Polymeric Materials, Part A, *Academic. Pres*, (1977).

TAKAYANAGI, M., IMADA, K., KAJIYAMA, T., "Mechanical Properties and Fine Structures of Drawn Polymers", *Journal of Polymer Science Part C*, Vol.13, 263-278, (1966).

THOMAS, K., MEYER, D.E., FLEET, E.C., ABRAHAMS, M., "Ultrasonic Anisotropy Measurements and mechanical Properties of Polymeric Materials", *Journal of Physics. D.*, Vol. 6, 1336-1352, (1973).

TILL, P.H., "The Growth of Single Crystals of Linear Polyethylene", *Journal of Polymer Science*, Vol.24, 301-306, (1957)

WARD, I.M., "Mechanical Properties of Solid Polymers" *John Wiley*, (1971)

WILKINSON, S.J., REYNOLDS, W.N., "The propagation of ultrasonic Waves in Carbon-Fibre-Reinforced Plastics", *Journal of Physics. D.* Vol.7, 50-57 (1974).

WRIGHT, H., FARADAY, C.S.N., WHITE, E.F.T., TRELOAR, L.R.G., "The Elastic Constants of Oriented Glassy Polymers", *Journal of Physics. D.* Vol.4, 2002-2014, (1971)

EKLER

EK A

ULTRASONİK DALGA HIZI ÖLÇÜMLERİNDE HATA HESABI

Ultrasonik dalga hızı ölçüm sisteminde hataya sebep olacak başlıca nedenler:

- (i) Kullanılan dönüştürücülerin temel titreşim frekansları düşüktür ve ayrıca bunlara uygulanan darbenin genliğinin yeterince yüksek olmaması sonucu gürültü oranı büyük olmakta ve bu, işaret değerlendirmede hatalara yol açmaktadır.
- (ii) Kuvvetlendirilen alıcı dönüştürücü işaretlerine kilitlenme olayında, işaret şekillendirici devresinin çıkışındaki işaret, gerçek bir kare dalgaya değil, absorpsiyona bağlı olarak genliği değişen bir sinüs dalgaya kilitlenme sonucunda üretilmektedir. Absorpsiyondaki değişiklik sonucu kilitlenme gerilimi zaman ekseninde kaymakta ve bu da ölçümde küçük de olsa dalgalanmalara yol açmaktadır.
- (iii) Elektronik devre elemanlarının kalitesinin sınırlı olması sonucu meydana gelebilen ısı kaymaları ölçüm sonuçlarını etkilemektedir.

9,3 mm kalınlıkta yönlendirilmemiş PMMA örneği için aynı şartlarda (748kHz dönüştürücü frekansı, 23°C ölçüm sıvısı sıcaklığı) 7 ölçüm tekrarlanarak hem boyuna hem de enine hız ölçümlerinde bağıl hatalar hesaplanmıştır (KARA, 1997).

Tablo A.1’de bu 7 ölçüm için hız değerleri verilmiştir. Hız değerlerindeki dalgalanmaların nedeni, açıyla birlikte gidilen yolun ve soğurulmanın artması nedeniyle kuvvetlendirilen işaretin genliğinde meydana gelen değişikliklerin ölçüm hatalarına yol açmasıdır.

Boyuna hız değerlerinin tutarlı olduğu aralık içinde (0°-21,6°) hesaplanan hızların maksimum ve minimum değerlerinin farkı alınarak bunun, seçilen aralıktaki tüm değerlerin aritmetik ortalamasına bölünmesiyle bağıl hata hesaplanmıştır.

Benzer işlem, enine hız değerleri için de (37,8°-52,2°) tekrarlanmıştır. Tablo A.2 ve A.3’te bu değerler verilmiştir. Bağıl hata ortalamaları, boyuna hız ölçümü için %1,21, enine hız ölçümü için %0,88 olarak hesaplanmıştır.

Tablo A. 1. PMMA örneği için hız ölçümleri.

Açı (°)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. ölçüm	5. ölçüm	6. ölçüm	7. ölçüm
0	2679,25	2663,71	2674,24	2674,24	2673,28	2673,86	2686,02
1,8	2685,27	2668,73	2680,63	2680,63	2678,70	2677,93	2691,28
3,6	2690,71	2673,03	2685,11	2684,53	2686,27	2683,57	2697,03
5,4	2700,44	2679,17	2688,90	2688,33	2690,05	2686,61	2703,15
7,2	2705,00	2679,94	2694,12	2692,60	2693,36	2690,90	2707,30
9	2709,72	2691,85	2697,85	2696,53	2696,53	2693,35	2713,32
10,8	2717,24	2689,34	2701,28	2701,47	2700,55	2697,78	2717,98
12,6	2721,29	2692,54	2702,24	2701,70	2702,78	2698,64	2720,25
14,4	2721,55	2693,25	2702,51	2699,19	2701,64	2697,61	2718,54
16,2	2720,29	2699,20	2695,99	2696,05	2699,87	2696,33	2714,48
18	2715,59	2686,67	2692,64	2691,67	2693,61	2690,38	2710,19
19,8	2708,42	2678,51	2684,64	2684,18	2685,87	2682,03	2701,75
21,6	2696,52	2667,84	2672,88	2571,58	2673,75	2670,72	2689,97
23,4	2686,17	2653,06	2657,48	2657,48	2658,41	2657,21	2679,54
25,2	2682,17	2640,63	2645,31	2646,41	2647,89	2648,02	2674,47
27	2665,97	2630,79	2638,13	2637,35	2638,58	2641,58	2659,85
28,8	2630,19	2613,13	2608,61	2610,38	2612,74	2613,23	2621,57
30,6	2589,73	2579,45	2570,63	2573,10	2574,54	2577,84	2576,91
32,4	2175,77	2546,82	2333,30	2492,81	2528,85	2536,75	2159,16
34,2	2003,70	2499,13	2151,01	2156,73	2158,50	2152,25	1955,44
36	1860,58	2459,50	1834,38	1835,50	1838,94	1834,94	1849,54
37,8	1317,45	1861,18	1855,91	1856,69	1358,60	1855,01	1555,72
39,6	1312,47	1315,12	1318,16	1318,04	1317,81	1317,16	1316,73
41,4	1317,50	1312,71	1315,99	1315,99	1315,73	1315,27	1319,13
43,2	1323,96	1320,75	1323,18	1322,62	1322,92	1322,88	1327,45
45	1321,97	1324,80	1327,62	1326,96	1327,22	1327,00	1329,10
46,8	1318,33	1320,90	1323,66	1323,05	1322,87	1322,87	1323,63
48,6	1318,72	1319,67	1321,59	1321,01	1321,52	1320,75	1323,35
50,4	1317,66	1320,47	1321,80	1321,94	1322,08	1321,43	1323,11
52,2	1315,28	1318,58	1320,69	1320,55	1320,55	1320,25	1320,65

Tablo A. 2. Boyuna hız ölçümlerinde bağıl hata.

	Min. Hız	Max. Hız	Fark	Ortalama	B. Hata (%)
ÖLÇÜM 1	2679.25	2721.55	42.3	2705.48	1.56
ÖLÇÜM 2	2663.71	2699.2	35.49	2681.84	1.32
ÖLÇÜM 3	2672.88	2702.51	29.63	2690.23	1.1
ÖLÇÜM 4	2671.58	2701.7	30.12	2689.47	1.11
ÖLÇÜM 5	2673.28	2702.78	29.5	2690.48	1.09
ÖLÇÜM 6	2670.72	2698.64	27.92	2687.67	1.03
ÖLÇÜM 7	2686.02	2720.75	34.73	2705.54	1.28

Tablo A. 3. Enine hız ölçümlerinde bağıl hata.

	Min. Hız	Max. Hız	Fark	Ortalama	B. Hata (%)
ÖLÇÜM 1	1312,47	1323,96	11,49	1318,24	0,87
ÖLÇÜM 2	1312,71	1324,80	12,09	1319,13	0,91
ÖLÇÜM 3	1315,99	1327,62	11,63	1321,59	0,88
ÖLÇÜM 4	1315,99	1326,96	10,97	1321,28	0,83
ÖLÇÜM 5	1315,73	1327,22	11,49	1321,34	0,86
ÖLÇÜM 6	1315,27	1327,0	11,73	1320,95	0,88
ÖLÇÜM 7	1316,73	1329,10	12,37	1322,89	0,93

KÜTLE, HACİM ve YOĞUNLUK DEĞERLERİNDE HATA HESABI

Kütle ölçümleri, SCALTEC SPB 31 marka hassas terazi ile 0,0001g duyarlılık ile gerçekleştirilmiştir. $\delta m=10^{-7}$ kg olduğuna göre kütle değerleri $m \pm \delta m$ şeklinde yazılabilir. Örneğin $\lambda_x=\lambda_z=1,25$ örneği için ölçülen kütle değeri $9,7676 \times 10^{-3}$ kg terazinin belirsizliği ile $9,7676 \times 10^{-3} \pm 10^{-7}$ kg şeklinde yazılır.

Örnekler, torna ile sabit bir çap değerinde tornalandığından buradaki belirsizlik ölçü aletinden kaynaklanır. Çap değerleri kumpas kullanılarak belirlendiğinden $\delta r=5 \times 10^{-5}$ m yazılır. Örnekler, farklı noktalarında maksimum 5×10^{-5} m kalınlık değeri gösterene kadar parlatıldığından kalınlık değerlerindeki belirsizlik $\delta h=5 \times 10^{-5}$ m olarak kullanılır.

Silindir şeklindeki örneklerin hacim hesapları, $V=\pi r^2 \cdot h$ eşitliği ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamadaki mutlak hata,

$$\delta V = \frac{\partial V}{\partial r} \delta r + \frac{\partial V}{\partial h} \delta h \quad \text{B.1}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, r ve h üzerinden türevler alınarak B.1 eşitliği,

$$\delta V = 2\pi r h \cdot \delta r + \pi r^2 \cdot \delta h \quad \text{B.2}$$

eşitliği yazılır. $\lambda_x=\lambda_z=1,25$ örneği için $\delta h=5 \times 10^{-5}$ m, $\delta r=5 \times 10^{-5}$ m, $h=7,16 \times 10^{-3}$ m ve $r=19,1 \times 10^{-3}$ m değerleri kullanılarak hacim için hata hesabı yapılmıştır.

$$\delta V=1,002 \times 10^{-7} \text{m}^3$$

Bu örnek için mutlak hata ile hacim değeri, $(8,20 \pm 0,1) \times 10^{-6} \text{m}^3$ olarak belirlenir.

Yönlendirilen değerlerin yoğunlukları $\rho=m/V$ şeklinde hesaplandığından, yoğunluk değerlerindeki hata hesabı için,

$$\delta \rho = \frac{\partial \rho}{\partial m} \delta m + \frac{\partial \rho}{\partial V} \delta V \quad \text{B.3}$$

eşitliği kullanılır. Bu eşitlik,

$$\delta \rho = \frac{1}{V} \delta m - \frac{m}{V^2} \delta V \quad \text{B.4}$$

halini alır. Hata hesabında $m= 9,7676 \times 10^{-3}$ kg, $\delta m=10^{-7}$ kg, $V=8,20 \times 10^{-6} \text{m}^3$ ve $\delta V=1,002 \times 10^{-7} \text{m}^3$ değerleri kullanıldığında,

$$\delta\rho=14,54\text{kg/m}^3$$

değeri elde edilir. Böylece mutlak hata ile hesaplanan yoğunluk değeri $\rho\pm\delta\rho$,

$$1190,9\pm14,54 \text{ kg/m}^3$$

şeklinde olacaktır. Tablo 5.9'da verilmiş olan yoğunluk değerleri 1000 çarpanı ile kg/m^3 birimine çevrildiğinde en düşük değerin $1148.\text{kg/m}^3$ ve en yüksek değerin $1190,9 \text{ kg/m}^3$ olduğu görülür. $\delta\rho=14,54\text{kg/m}^3$ gibi bir mutlak hata değeri ile yönelmenin yoğunluk değişimine etkisi dikkate alınmadan dahi geometrik olarak yoğunluk hesabının olumlu sonuçlar vereceği görülür.

Piknometre ile yoğunluk tayininde toz halinde örnek gereksinimi bulunduğundan bu çalışmada bu teknik kullanılamamıştır. Vizkozimetrik yöntem ise bu çalışmanın devamında ve diğer çalışmalarda da yukarıdaki klasik yöntemi pekiştirecek yönde kullanılabilir.

ELASTİK SABİT DEĞERLERİNDE HATA HESABI

Elastik sabitler, cismin yoğunluğu ve cisim içerisinde ilerleyen ultrasonik dalganın hızına bağımlılık gösterdiğinden yukarıda belirlenen yoğunluk ve hız değerlerindeki mutlak hatalarla elastik sabitler için hata hesabı yapılabilir. Elastik sabit için mutlak hata ifadesi,

$$\delta c = \frac{\partial c}{\partial \rho} \delta \rho + \frac{\partial c}{\partial V} \delta V \quad \text{C.1}$$

şeklinde olacaktır. Bu ifadenin türevler alındıktan sonra açık hali,

$$\delta c = V^2 \delta \rho + 2\rho V \delta V \quad \text{C.2}$$

şeklinde dir. Daha önce kütle, yoğunluk ve hacim hata hesaplarında örnek olarak verilen $\lambda_x = \lambda_z = 1,25$ örneği incelenecek olursa, $\delta \rho = 14,54 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1190,9 \text{ kg/m}^3$, $V = 2704,12 \text{ m/s}$ ve $\delta V = 32,71 \text{ m/s}$ değerleri ile

$$\delta c = 0,112 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

elastik sabit için mutlak hata değeri hesaplanmış olur. $c + \delta c$ değeri ise,

$$(8,71 \pm 0,112) \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

şeklinde yazılır. elastik sabit için bağıl hata değeri belirlenecek olursa,

$$\frac{\delta c}{c} \quad \text{C.3}$$

eşitliği ile %1,28 olarak hesaplanır.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında İskenderun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İskenderun'da tamamladı. 1989 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünden 1994 yılında mezun oldu. Eylül 1994-Aralık 1997 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

1996 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.