

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKŞİ HAMURUN DOĞRUSAL OLMAYAN BÖLGEDEKİ
VİSKOELASTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Çiğdem YILDIRIM MAVİŞ

DOKTORA TEZİ

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Gıda Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Muhammet ARICI

Ekim, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKŞİ HAMURUN DOĞRUSAL OLMAYAN BÖLGEDEKİ VİSKOELASTİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Çiğdem YILDIRIM MAVİŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 30.10.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Gıda Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Muhammet ARICI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muhammet ARICI, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Osman SAĞDIÇ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ertan ERMİŞ, Üye

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Said TOKER, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim PALABIYIK, Üye

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Muhammet ARICI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Ekşi Hamurun Doğrusal Olmayan Bölgedeki Viskoelastik Özelliklerinin Belirlenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

Çiğdem YILDIRIM MAVİŞ

İmza



*Aileme
ve
biricik eşime*

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim sürecinde bilgi, tecrübe ve destekleriyle kazandırdıkları her şey için çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Muhammet ARICI'ya saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimimin ilk gününden beri vermiş olduğu tüm destekler için sayın Prof. Dr. Osman SAĞDIÇ'a, bilgi ve tecrübesiyle katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Tahsin YILMAZ'a, tez çalışmalarım süresince, değerli vaktini ayırıp verilerimin yorumlanmasında bana yol gösteren sayın Dr. Öğr. Üyesi Ertan ERMİŞ'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarımı yürütürken her zaman manevi destek veren, tez konumla ilgili öğrendiği yeni bilgileri benimle paylaşarak yardımlarını asla esirgemeyen Arş. Gör. Duygu ÖZMEN'e;

Laboratuvar çalışmalarına başladığım ilk günden beri sıcak bir çalışma ortamı sağlayan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen başta Arş.Gör. Ruşen Metin YILDIRIM'a, Arş.Gör. Perihan Kübra AKMAN'a ve Arş.Gör. Gör. Fatih BOZKURT'a ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bütün eğitim hayatım boyunca benden maddi manevi emeklerini esirgemeyen annem Gülseren YILDIRIM'a, babam Hikmet YILDIRIM'a ve kardeşim Esra YILDIRIM SERVİ' ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora eğitimim boyunca yaşadığım her sıkıntıda yanımda olan bana her zaman destek veren bu zorlu süreçte yanımda olmaktan asla vazgeçmeyen sabrını sınırlarının ötesine zorladığım canım eşim Murat Emrah MAVİŞ'e gönülden teşekkür ederim.

Çiğdem YILDIRIM MAVİŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	6
2 Genel Bilgiler	7
2.1 Ekşi Hamur	7
2.1.1 Ekşi Hamur Mikrobiyolojisi	8
2.1.2 Ekmek Üretiminde Ekşi Hamur Etkileri	11
2.2 Hamur Reolojisi	17
2.3 Büyük Genlikli Salınımlı Kayma (LAOS) Testi	21
2.3.1 Sabit Frekans Değerinde Deformasyon Genlik Fonksiyonunda G' ve G'' Analizi	27
2.3.2 Zaman Serileri Analizi ve Fourier Dönüşüm Reolojisi (FTR)	29
2.3.3 Lissajous-Bowditch Eğrilerinin Değerlendirilmesi ve Geometrik Analizi	31
3 Materyal ve Yöntem	38
3.1 Materyal	38

3.1.1 Kullanılan Ham Maddeler	38
3.1.2 Laktik Asit Bakterisi (LAB)	38
3.2 Yöntem.....	38
3.2.1 Unun Kalite Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Analizler	38
3.2.2 Starter Kültür Hazırlanması	39
3.2.3 Ekşi Hamur Üretimi.....	39
3.2.4 Ekşi Hamur Katkılı Hamur Üretimi.....	40
3.2.5 Ekşi Hamur ve Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örneklerinin Kimyasal ve Mikrobiyolojik Özelliklerinin Belirlenmesi	41
3.2.6 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi	43
3.2.7 Ekmek Formülasyonu.....	43
3.2.8 Ekmek Analizleri	44
3.2.9 İstatistiksel Analizler	45
4 Bulgular ve Tartışma	46
4.1 Kullanılan Buğday Ununun Kimyasal/Teknolojik Özellikleri	46
4.2 Ekşi Hamur Örneklerinin Mikrobiyolojik ve Kimyasal Özellikleri.....	47
4.2.1 Ekşi Hamurların pH ve Titre Edilebilir Titrasyon Asit Değerleri.....	47
4.2.2 Ekşi Hamurlarının Mikrobiyolojik Özellikleri.....	48
4.2.3 Ekşi Hamurların Serbest Amino asit Miktarları.....	49
4.3 Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örneklerinin Fizikokimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikleri	50
4.4 Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örneklerinin Ekstensografik Özellikleri	54
4.5 Ekşi Hamur Örneklerinin LAOS Özellikleri	57
4.5.1 SH, OSH ve LH Örneklerinin G', G" Değerlerinin Değişimi	57
4.5.2 Ekşi Hamur Örneklerinin Normalize Edilmiş Lissajous Eğrileri ile Reolojik Davranışının Analizi	59

4.5.3 Ekşi Hamur Örneklerinin Doğrusal Olmayan Bölgedeki Elastik Parametreleri	62
4.5.4 Ekşi Hamur Örneklerinin Doğrusal Olmayan Bölgedeki Viskoz Parametreleri	63
4.6 Ekşi Hamur Katkılı Hamurların Doğrusal Olmayan Reolojik Özelliklerin Değerlendirilmesi	65
4.6.1 G' , G'' Değerlerinin Değişimi	65
4.6.2 Lissajous-Bowditch Eğrilerinin Normalize Edilmemiş Projeksiyonunun Değerlendirilmesi	73
4.6.3 Lissajous-Bowditch Eğrilerinin Normalize Elastik Projeksiyonunun Değerlendirilmesi	78
4.6.4 Lissajous-Bowditch Eğrilerinin Normalize Viskoz Projeksiyonunun Değerlendirilmesi	87
4.6.5 Ekşi Hamur Türü, Zaman ve Konsantrasyon Miktarının Bir Fonksiyonu Olarak Doğrusal Olmayan Elastik Özellikler	94
4.6.6 Ekşi Hamur Türü, Zaman ve Konsantrasyon Miktarının Bir Fonksiyonu Olarak Doğrusal Olmayan Viskoz Özellikler	104
4.7 Ekmek Örneklerinin Fizikokimyasal ve Duyusal Özellikleri	115
4.7.1 Ekmek Kabuk Rengi	115
4.7.2 Ekmek İçi Rengi	117
4.7.3 Ekmek Örneklerinin Hacim, Spesifik Hacim Değerleri	119
4.7.4 Ekmek Sertlik Değeri Analizi	122
5 Sonuç ve Öneriler	125
A Detaylı Normalize Edilmiş Lissajous Eğrileri	130
Kaynakça	157
Tezden Üretilmiş Yayınlar	170

SİMGE LİSTESİ

G'	Depolama Modülü (Storage modulus, Pa)
G''	Kayıp Modülü (Loss modulus, Pa)
G'_L	Yüksek gerinim modülü (large strain modulus, Pa)
G'_M	Düşük gerinim modülü (minimum strain modulus, Pa)
η'_L	Yüksek gerinim hızı viskozitesi (the large-rate dynamic viscosity, Pa.s)
η'_M	Düşük gerinim hızı viskozitesi(the minimum-rate dynamic viscosity, Pa.s)
S	Katılaşma oranı (stiffening ratio)
T	Kalınlaşma oranı (thickening ratio)
e_3/e_1	3. derece elastik Chebyshev katsayısının 1. derece elastik katsayıya oranı (the ratio of the 3 rd order elastik Chebyshev coefficient to the 1st order)
v_3/v_1	3. derece viskoz Chebyshev katsayısının 1. derece viskoz katsayıya oranı (the ratio of the 3 rd order viscous Chebyshev coefficient to the 1st order)
γ	Gerinim (strain) (%)
$\dot{\gamma}$	Gerinim hızı (strain rate) (1/s)
σ	Gerilim (stress) (Pa)
ω	Frekans (rad/s)
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
CO ₂	Karbondioksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
L^*	Beyazlık renk değeri
a^*	Kırmızılık/mavilik renk değeri
b^*	Yeşillik/sarılık renk değeri

KISALTMA LİSTESİ

dak	Dakika
EPS	Ekzopolisakkarit
FTR	Fourier Transformation Rheology
g	Gram
LAB	Laktik Asit Bakterisi
LAOS	Large Amplitude Oscillatory Shear (Büyük Genlikli Salınımlı Kayma)
Log	Logaritma
LVER	Linear Viscoelastic Region (Doğrusal Viskoelastik Bölge)
MAOS	Medium Amplitude Oscillatory Shear (Orta Genlikli Salınımlı Kayma)
mL	Mililitre
MRS	De Man-Rogosa-Sharpe
N-LVER	Doğrusal Olmayan Viskoelastik Bölge
SAOS	Small Amplitude Oscillatory Shear (Küçük Genlikli Salınımlı Kayma)
SDA	Sabouraud %2 Dextrose Agar
TTA	Toplam Titrasyon Asitliği

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Ekşi hamurun ekmek tekstürü, aroması ve raf ömrüne etkisi	11
Şekil 2.2	Ekşi hamur ve ekmek aroma bileşenleri	14
Şekil 2.3	Ekşi hamur ekmeğinin kalitesini etkileyen faktörler	16
Şekil 2.4	Sabit frekansta gerçekleştirilen gerinim tarama testinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.5	Gerinim (strain) ve gerilim (stress) kontrollü reometrelerde alınan ölçümlerin şematik gösterimi	24
Şekil 2.6	Faz açısı (δ) farklılıklarına bağlı giriş ve cevap fonksiyonlarının şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.7	LAOS genlik taramasında normalize G' ve G'' için dört davranış türü ..	28
Şekil 2.8	Gerinim genliğinin fonksiyonunda Fourier spektrumu	30
Şekil 2.9	Faz düzlemi ve Lissajous eğrilerinin oluşumu.....	31
Şekil 2.10	İdeal materyallerin reolojik davranışının Lissajous eğrileri ile yorumlanması	32
Şekil 2.11	2D Lissajous figürlerinin ve Chebyshev harmoniklerinin geometrik ayrışımı.....	32
Şekil 2.12	Doğrusal bölgede viskoelastik yanıtı ait elastik modül (a) ve dinamik viskozite (b) , doğrusal olmayan bölgede viskoelastik yanıtı ait elastik modül (c) ve dinamik viskozite (d)	36
Şekil 4.1	Kullanılan unun farinograf grafiği	46
Şekil 4.2	SH, OSH, LH hamur örnekleri için gerinim noktalarına karşı elastik modül (G'), viskoz modül (G'') değerlerinin değişimi	58
Şekil 4.3	a.SH, b.OSH, c. LH hamur örneklerinin elastik bileşenine ait Lissajous-Bowditch eğrileri	59
Şekil 4.4	a.SH, b.OSH, c. LH hamur örneklerinin viskoz bileşenine ait Lissajous-Bowditch eğrileri	61
Şekil 4.5	Ekşi hamur örneklerine ait e_3/e_1 , S değerleri.....	63
Şekil 4.6	Ekşi hamur örneklerine ait v_3/v_1 , T değerleri.....	64
Şekil 4.7	Dört (4) farklı zamanda EH-1 (SH) katkılı ekşi hamur ekmeklerinin elastik ve viskoz modül değerlerinin değişimi	66
Şekil 4.8	Dört (4) farklı zamanda EH-2 (OSH) katkılı ekşi hamur ekmeklerinin elastik ve viskoz modül değerlerinin değişimi	67
Şekil 4.9	Dört (4) farklı zamanda EH-3 (LH) katkılı ekşi hamur elastik ve viskoz modül değerlerinin değişimi.....	68
Şekil 4.10	Kontrol hamurunun (KH) stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri	75
Şekil 4.11	LH katkılı hamur örneklerinin stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri	76
Şekil 4.12	OSH katkılı hamur örneklerinin stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri	77

Şekil 4.13 SH katkılı hamur örneklerinin stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri	78
Şekil 4.14 KH ve LH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş elastik Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi ...	84
Şekil 4.15 KH ve SH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş elastik Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi ..	85
Şekil 4.16 KH ve OSH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş elastik Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi	86
Şekil 4.17 KH ve SH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş viskoz Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi.....	88
Şekil 4.18 KH ve OSH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş viskoz Lissajous eğrilerinin değişimi.....	89
Şekil 4.19 KH ve EH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş viskoz Lissajous eğrilerinin değişimi.....	90
Şekil 4.20 SH katkılı hamur örneklerine ait e_3/e_1 ve S değerlerinin artan gerinime karşı değişimi	96
Şekil 4.21 OSH katkılı hamur örneklerine ait e_3/e_1 ve S değerlerinin artan gerinime karşı değişimi	97
Şekil 4.22 LH katkılı hamur örneklerine ait e_3/e_1 ve S değerlerinin artan gerinime karşı değişimi	98
Şekil 4.23 SH katkılı hamur örneklerinin yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerleri	101
Şekil 4.24 OSH katkılı hamur örneklerinin yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerleri	102
Şekil 4.25 LH Katkılı hamur örneklerinin yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerleri	103
Şekil 4.26 SH katkılı hamur örneklerine ait v_3/v_1 ve T değerlerinin artan gerinime karşı değişimi	108
Şekil 4.27 OSH katkılı hamur örneklerine ait v_3/v_1 ve T değerlerinin artan gerinime karşı değişimi	109
Şekil 4.28 LH katkılı hamur örneklerine ait v_3/v_1 ve T değerlerinin artan gerinime karşı değişimi	110
Şekil 4.29 SH Katkılı hamur örneklerinin minimum gerinim hızı dinamik viskozite (η'_M) ve yüksek gerinim hızı dinamik viskozite (η'_L) değerleri	112
Şekil 4.30 OSH Katkılı hamur örneklerinin minimum gerinim hızı dinamik viskozite (η'_M) ve yüksek gerinim hızı dinamik viskozite (η'_L) değerleri	113
Şekil 4.31 LH Katkılı hamur örneklerinin minimum gerinim hızı dinamik viskozite (η'_M) ve yüksek gerinim hızı dinamik viskozite (η'_L) değerleri	114
Şekil 4.32 Ekşi hamur katkılı ekmek örnekleri	119
Şekil A.1 KH örneklerinin zamana bağlı elastik Lissajous eğrileri	131
Şekil A.2 KH örneklerinin zamana bağlı viskoz Lissajous eğrileri	132
Şekil A.3 0. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	133

Şekil A.4 1. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	134
Şekil A.5 2. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	135
Şekil A.6 3. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	136
Şekil A.7 0. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	137
Şekil A.8 1. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	138
Şekil A.9 2. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	139
Şekil A.10 3. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	140
Şekil A.11 0. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	141
Şekil A.12 1. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	142
Şekil A.13 2. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	143
Şekil A.14 3. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	144
Şekil A.15 0. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri.....	145
Şekil A.16 1. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri.....	146
Şekil A.17 2. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	147
Şekil A.18 3. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	148
Şekil A.19 0. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri	149
Şekil A.20 1. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri.....	150
Şekil A.21 2. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri.....	151
Şekil A.22 3. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri.....	152
Şekil A.23 0. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	153
Şekil A.24 1. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	154
Şekil A.25 2. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	155
Şekil A.26 3. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri	156

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Ekşi hamurların sınıflandırılması ve içerdikleri karakteristik mikrobiyota	10
Tablo 2.2 Buğday ununda bulunan başlıca proteaz grupları	13
Tablo 2.3 Ekşi hamur ilave edilerek üretilen ekmeklerin aroma bileşenleri	15
Tablo 2.4 Gluten proteinlerinin özellikleri	18
Tablo 3.1 Hamur formülasyonu	41
Tablo 3.2 Ekmek formülasyonu	44
Tablo 4.1 Un örneğine ait kimyasal ve teknolojik özellikler	46
Tablo 4.2 Ekşi hamur örneklerinin pH ve TTA değerleri	47
Tablo 4.3 Ekşi hamur örneklerinin LAB ve Maya sayıları	48
Tablo 4.4 Hamur örneklerine (0. ve 20. Saat) ait serbest amino asit miktarları	50
Tablo 4.5 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin pH değerleri	51
Tablo 4.6 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin TTA değerleri	52
Tablo 4.7 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin LAB (kob/g) sayıları	53
Tablo 4.8 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ekstensograf değerleri (45. ve 90. dak)	56
Tablo 4.9 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ekstensograf değerleri (135. dak)	57
Tablo 4.10 Eğrilerin iç bükey ve dış bükey olma durumuna göre reolojik davranışın değerlendirilmesi [89]	60
Tablo 4.11 Minimum (%0.05) ve maksimum (%200) gerinim noktalarındaki G' ve G'' değerleri	69
Tablo 4.12 Hamur örneklerine ait G'' değerlerinin G' değerlerini aştığı gerinim noktaları (%)	71
Tablo 4.13 %200 gerinim noktasında $G'_L(Pa)$ değerleri	100
Tablo 4.14 Ekmek örneklerinin kabuk renk değerleri (L^* , a^* , b^*)	115
Tablo 4.15 Ekmek örneklerinin iç renk değerleri (L^* , a^* , b^*)	117
Tablo 4.16 Ekmek örneklerinin hacim ve spesifik hacim değerleri	120
Tablo 4.17 Ekmek hacim değerleri ile v_3/v_1 parametresi arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (r)	121
Tablo 4.18 Ekmek örneklerinin sertlik değerleri	123
Tablo 4.19 Ekmek örneklerinin sertlik değerleri ile G'_L ve η'_L parametreleri arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (r)	124

Ekşi Hamurun Doğrusal Olmayan Bölgedeki Viskoelastik Özelliklerinin Belirlenmesi

Çiğdem YILDIRIM MAVİŞ

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muhammet ARICI

Ekşi hamur fermentasyonu geleneksel biyoteknolojik bir süreçtir. Son yıllarda sağlık sorunları konusunda giderek artan endişeler, doğal ve sağlıklı olarak kabul gören ekşi hamurun üretimini dikkat çekici duruma getirmiştir. Ekşi hamur fermentasyonu sırasında asidifikasyon ve enzim aktivasyonu (proteolitik ve amilolitik aktivite) gerçekleşir. Buğday ekmeği üretiminde ekşi hamurun eklenmesi, hamurun reolojik davranışında önemli değişikliklere neden olur. Klasik reolojik yöntemler (küçük genlikli salınım testleri), ekmek hamuru gibi karmaşık çok fazlı sistemler olan gıda malzemesinin doğrusal olmayan reolojik davranışını karakterize ve ayırt etmede yetersizdir. Büyük genlikli osilasyon kayma (Large Large Amplitude Oscillatory Shear, LAOS) testleri, doğrusal olmayan mekanik tepkinin doğru karakterizasyonu için faydalıdır. Bu çalışmada, farklı konsantrasyonda (%0, 10, 20, 30 ve 40) farklı yöntemlerle elde edilen ekşi hamur içeren buğday hamuru örneklerinin 10 rad/s frekans değerinde % 0,005 ila 200 gerinim aralığında doğrusal olmayan mekanik tepkileri araştırılmıştır. Ekşi hamur ilavesinin hamurun doğrusal olmayan viskoelastik tepkisi üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir. Ekşi hamur ve ekşi hamur katkılı hamur

örneklerinin LAOS parametreleri (G'_M , G'_L , η'_M , η'_L , e_3/e_1 , v_3/v_1 , S ve T) ile “faz içi” ve “faz dışı” gerilim bileşenlerinin fermentasyon yöntemine göre farklı şekillerde etkilendiği görülmüştür. Ekşi hamur ilavesinin hamur örneklerinin gerinim katılaşması ve kayma incelmesi davranışlarına etki ettiği belirlenmiştir. Bu reolojik davranışlarda yüksek deformasyonlarda (%200) belirgin düşüşler gözlenmiştir. Ekşi hamur fermentasyonu sırasında gelişen mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri, gluten ağı ve nişasta matrisinin doğrusal olmayan bölgede farklı reolojik özellikler göstermesine neden olmuştur. LAOS parametreleri ile elde edilen nitel sonuçlar, elastik ve viskoz Lissajous-Bowditch eğrilerinin incelenmesiyle edinilen değerlendirmelerin birbirini desteklediği bulunmuştur. LAOS parametrelerinden G'_L ve η'_L değerleri ile ekmek örneklerinin sertlik değerleri arasındaki korelasyon incelenmiştir. %200 gerinim noktasında spontan (SH) ve olgun spontan (OSH) ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için pozitif korelasyon, *Lactobacillus brevis* E25 katkılı hamur örnekleri (LH) için negatif korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Fizikokimyasal (pH ve TTA), mikrobiyolojik özellikler (LAB sayımı sonuçları) ve ekstensografik özelliklerin LAOS sonuçlarını desteklediği belirlenmiştir. Elastik (e_3/e_1 , $G'_M-G'_L$, S) ve viskoz özellikleri (v_3/v_1 , $\eta'_M-\eta'_L$, T) ifade eden LAOS parametreleri, ekşi hamur içeren örneklerde doğrusal olmayan viskoelastik özelliklerin kuvvetli bir gerinim bağımlılığını ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak LAOS testleri, işleme koşullarının (ekşi hamur içeriği ve büyük gerilme genliği ile deformasyon) doğrusal olmayan mekanik üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için etkili ve açık bir şekilde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Ekşi hamur, LAOS, Lissajous-Bowditch eğrisi, reolojik davranış

Determination of Viscoelastic Properties of Sourdough in Non-Linear Region

Çiğdem YILDIRIM MAVİŞ

Department of Food Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Muhammet ARICI

Sourdough fermentation is a traditional biotechnological process. In recent years, increasing concerns about health problems have made the production process of sour dough (accepted as natural and healthy) attractive. During the fermentation of sour dough, acidification and enzyme activation (proteolytic and amylolytic activity) occurs. Addition of sourdough in wheat bread throughout the production causes significant changes in the rheological behavior of the dough. Classical rheological methods (small amplitude oscillation tests) are insufficient to characterize and differentiate the nonlinear rheological behavior of foodstuffs, which are complex multiphase systems such as bread dough. Large amplitude oscillatory shear (LAOS) tests are useful for accurate characterization of the non-linear mechanical response. This study was undertaken to investigate the non-linear mechanical response of dough prepared with different amounts (0, 10, 20 30 and 40%) of sourdough obtained by different methods in a strain values ranging from 0.005 to 200% (frequency at 10 rad/s). As a result, sourdough was determined to have considerable effects on the non-linear viscoelastic response of dough. It was observed that sourdough and sourdough-based dough samples were affected by LAOS parameters (G'_M , G'_L , η'_M , η'_L , e_3/e_1 , v_3/v_1 , S and T) and “in phase” and “out of phase” components of stress in

different ways according to fermentation method. It was observed that sourdough addition had effect on strain stiffening and shear thinning behavior of the dough samples. Remarkable decreases were determined in the magnitude of rheological behaviors at high deformations (200%). Due to the metabolic activities of growing microorganisms during sourdough fermentation, gluten network and starch matrix were affected and led to different rheological properties in nonlinear region. Qualitative results obtained by LAOS parameters were found to support the evaluations obtained by examining elastic and viscous Lissajous-Bowditch curves. The correlation between G'_L and η'_L values of LAOS parameters and hardness values of bread samples were investigated. When G'_L and η'_L values of 200% strain point were examined, positive correlation was obtained for SH and OSH dough samples and negative correlation coefficient was obtained for LH dough samples. The physicochemical (pH and TTA), microbiological properties (LAB count) and extensographic properties were also shown to support the LAOS results. The other LAOS parameters involved with elastic (e_3/e_1 , G'_M , G'_L , S) and viscous properties (v_3/v_1 , η'_M , η'_L , T) revealed the strong strain dependence of the non-linear viscoelastic properties. In conclusion, LAOS tests could be effectively and clearly used to unearth the effect of processing conditions (sourdough content and deformation by large strain amplitude) on the non-linear mechanical response of wheat dough.

Keywords: LAOS, Lissajous-Bowditch curve, rheological behavior, sourdough

1.1 Literatür Özeti

Olgunlaşma sırasında reolojik özelliklerin değerlendirilmesi asidifikasyon ve lezzet gelişimi açısından ekşi hamurun kontrolünde önemli bir yöntemdir [1]. Homojen ve heterojen maddeler olan gıdalar birçok farklı bileşenin karışımlarıdır (yağlar, karbohidratlar, proteinler). Gıda maddelerinin bileşimi yapı, fizikokimyasal stabilite ve beslenmede önemli rol oynar [2]. Endüstriyel ölçekte gerçekleşen birçok işlem sırasında kullanılan ve yüksek oranda deformasyona neden olan makina/ekipmanların uygulamış olduğu gerilmeler ve gerinimler (örneğin: işleme, pompalama ve ekstrüzyon) gıdanın özelliklerini değiştirebilir. Reolojik ölçümler, gıda endüstrisinde, işlenmeden önce hammaddelerin fiziksel karakterizasyonu için, üretim sırasında oluşan ara ürünler ve son gıda ürünü için oldukça önemlidir. Dinamik salınım kayma testleri malzemeye sinüzoidal deformasyon uygulayarak zamanın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkan mekanik cevabın ölçülmesi ile gerçekleştirilir [3]. Salınlı kayma testlerinde, gerinim genellikle sabit bir frekansta sinüzoidal bozulma ile değişmektedir. Küçük genlikli osilasyonlu gerinim (SAOS), reolojik olarak gerinim genliği değerinin altındaki bölge olarak tanımlanırken, bu değerden sonra doğrusal olmayan bölge, yüksek genlikli osilasyonlu gerinim (LAOS) olarak tanımlanır [4, 5]. SAOS ölçümü, depolama (G') ve kayıp (G'') modüllerinin nicelleştirilmesi yoluyla gıda malzemelerinin yapısındaki değişiklikleri araştırmak için kullanılabilecek tahribatsız bir tekniktir [6]. LAOS testleri, gıda işleme, uygulama koşulları ve kesme, yayma veya çiğneme ile ilgili olan büyük deformasyonlar altında viskoelastik modüllerin ölçülmesinde kullanılabilir [7, 8]. Küçük genlikli salınlı kayma gibi klasik reolojik yöntemler (SAOS) testleri genellikle karmaşık çok fazlı sistemler olan gıda malzemesinin doğrusal olmayan reolojik davranışını karakterize etmek ve ayırt etmek için genellikle yetersizdir [9, 10]. SAOS testleri doğrusal bölgede yapılmaktadır;

bununla birlikte, yüksek deformasyon doğrusal olmayan bölgelerde materyalin tepkisini doğru bir şekilde ölçemeyebilmektedir. Bu bağlamda büyük genlikli osilasyon kayma (LAOS) testleri kullanılabilmektedir [5]. LAOS testleri, reolojik çalışmalarda son zamanlarda dikkat çekmiştir, çünkü geleneksel yöntemlerle değerlendirilemeyen karmaşık gıda sistemlerinin mikroyapısal davranışları hakkında yararlı bilgiler sağlayabilmektedir [11]. Doğrusal olmayan bölgede Fourier dönüşümü reolojisine dayanan LAOS testleri (FT-reoloji) viskoelastik davranışı tanımlamak için Chebyshev polinomları ile birleştirilen Fourier dönüşümleri kullanılarak uygulanmaktadır [5, 12, 13].

LAOS testleri, ton balığı myofibriller proteini [14], farklı açıl derecesine sahip gellan jeller [15], keten tohumu gamı-soya protein izolatu dispersiyonu [16], polisakkarit (karragenan, nişasta) dispersiyonları [17], ticari peynir [18], salça ve mayonez [19], patates püresi ürünleri [20], değişken hacim, partikül boyutu ve soya lesitin konsantrasyonu ile siyah çikolata [21], gluten jel yapısı [22], jelatinleştirilmiş çapraz bağlı tapyoka nişasta-ksantan gum/konjak glukomannan karışımı [23] örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında gluten ve buğday unundan üretilmiş hamur örnekleri için LAOS testinin uygulandığı görülmektedir. Buğday unu hamuru üretimi sırasında yapılan herhangi bir ilavenin hamur reolojisi üzerine etkisini değerlendirmek için LAOS tekniğinin kullanılması hamurun doğrusal olmayan bölgedeki davranışının karakterize edilmesine imkan sağlamaktadır. Ekmek üretimi sırasında hamur %100'den %500000'e kadar değişen gerinimlere uğrayak deformasyonlara maruz kalmaktadır [24]. Buğday unu hamurlarının küçük gerinim noktalarında reolojik davranışı üzerine yapılan çalışmalar çok yayginken, son yıllarda buğday unu hamurlarının yüksek deformasyonlara karşı davranışının karakterize edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Phan-Thiean vd. [25] yaptıkları çalışmada buğday unu hamuruna gerinim kontrollü yüksek genlikli osilasyon ölçümü uygulamıştır. %1'den daha yüksek gerinim değerlerinde hamurun yumuşama davranışını tanımlayabilmek için çeşitli eşitlikler öne sürmüştür. Yapılan başka bir çalışmada $0,02 < \gamma_0 < 6$ gerinim aralığında LAOS deformasyonuna uğrayan gluten jelinin doğrusal olmayan davranışının belirlenebilmesi için Lissajous eğrilerinde

meydana gelen değişimlerden yararlanılmıştır. K gerinim noktalarında ($\gamma_0 < 1$) Lissajous eğrilerinin eliptik olması doğrusal viskoelastik davranışı temsil ettiği ifade edilmiştir. Kritik gerinim noktasından sonra ana eksenin gerinim eksenine doğru yönlenmesi yumuşama davranışı olarak değerlendirilirken yüksek gerinim noktalarında kayma geriliminin saat yönünün tersi yönlenmesi katılaşma davranışı olarak tanımlanmıştır. Aynı çalışmada gluten hamurunun doğrusal olmayan davranış göstermesinde viskoz bileşenin etkin rol aldığı ifade edilmiştir [22].

Yazar vd. [26] buğday hamurunun doğrusal olmayan bölgedeki reolojik davranışını karakterize etmek için yaptığı çalışmada farinograf cihazında hamur örnekleri dört farklı süre ile yoğurma işlemine tabi tutularak hazırlanmıştır. Bu sreler farinografda ilk pik noktası, yoğurma toleransı indeksinin belirlendiği nokta, yumuşama değerinin belirlediği nokta ve 20. dakikadır. Bu srelerde hamurlar alınarak %0,01'dan %200 gerinim noktası aralığındaki dokuz gerinim noktasında analizler gerçekleştirilmiştir. Her LAOS test analizi için 20, 10, 1 ve 0,1 rad/s olmak üzere dört farklı frekans belirlenmiştir. Yoğurmaya bağlı olarak LAOS verileri değerlendirildiğinde bütün hamur örnekleri gerinim katılaşması ve kayma incelemesi reolojik davranışı gösterdiği belirtilmiştir. Yazar vd. [27] yaptığı başka bir çalışmada LAOS parametrelerinin son ürünün özellikleri hakkında verdiği bilgileri doğruluğunu kanıtlamak amacıyla 10 rad/s'de farklı glutensiz un hamurları (pirinç, kinoa, karabuğday, soya) ile çalışmıştır. LAOS parametreleri (e_3/e_1 , v_3/v_1 , S, T) ile ekmek hacimleri arasında korelasyon olup olmadığına bakılmıştır. Korelasyon sonuçları zayıf çıkmasına rağmen glutensiz un hamur rneklerinin LAOS parametreleri, sonucu ekmek hacmi hakkında olumlu bilgiler sağlamıştır. Ayrıca aynı çalışmada Lissajous grafikleri kullanılarak glutensiz ekmek hamurlarının doğrusal olmayan bölgedeki davranışı karakterize edilebilmiştir. Doğrusal olmayan bölgede pirinç unu hamurunun en düşük elastik ve en yüksek viskoz davranış özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Duvarcı vd. [19] yaptığı çalışmada sert ve yumuşak buğday unu hamurlarının reolojik davranışı Ewoldt-McKinley Büyük Genlikli Salınımlı Kayma Akışı (LAOS) teorisi kullanılarak incelenmiştir. Bu rnlerde LAOS parametreleri (G'_M , G'_L , η'_M , η'_L , e_3/e_1 , v_3/v_1 , S ve T) 0,5 ila 15 rad/s aralığında farklı frekanslarda ve %0,01-200

aralığındaki gerinim noktalarında yapısal değişiklikleri anlamak için kullanılmıştır. Polimer yapılar olan yumuşak ve sert buğday hamurlarının LAOS özelliklerinde uygulanan %200 gerinimlik yüksek deformasyonda anlamlı bir fark göstermediği belirtilmiştir. Doğrusal olmayan bölgede göstermiş olduğu davranışın kanıtı ham gerilme dalgalarının zamana göre bozulması ile ifade edilmiştir. Her iki hamur örneğinin gerinim katılaşması ve kayma incelemesi reolojik davranışlarını pozitif e_3/e_1 değerleri ve negatif v_3/v_1 değerleri ile koruduğu gösterilmiştir. Aynı çalışmada Lissajous-Bowditch eğrileri kullanılarak hamur örneklerinin doğrusal olmayan viskoelastik davranışlarının gözlemlenmesi ile ekstra yapısal bilgiler ortaya çıkarılmıştır. Yumuşak ve sert hamurun yavaşça doğrusal olmayan geçiş bölgesine girdiği gerinimlerde eliptik şekilli Lissajous eğrilerinin daha genişlediği belirlenmiştir.

Melito vd. [28] tarafından peynir altı suyu proteini izolatu/k-karragenan jellerinin doğrusal olmayan viskoelastik özellikleri LAOS ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar duysal ve oral işleme özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Üç farklı frekans değerinde (3,1, 0,031, 31 rad/s) elde ettiği G'_L/G'_M değerleri ile tekstür özellikleri (sıkıştırılabilirlik, yapışkanlık) arasındaki korelasyonun analizi sonucunda sıkıştırılabilirlik değerleri ile negatif yönde, yapışkanlık değerleri ile pozitif yönde ilişki saptamıştır. Gıdaların doğrusal olmayan viskoelastik özelliklerinin anlaşılması ile deformasyon mekanizmasının gıda dokusunu nasıl etkilediği konusunda yararlı bilgiler sağladığı ifade edilmiştir.

Özyiğit [29] yaptığı çalışmada portakal lifi ilave edilen kek hamurlarının sertlik değerleri ile G'_L/G'_M , η'_L/η'_M değerleri arasında ilişkiyi değerlendirme amacıyla yaptığı Pearson korelasyon analizi sonucunda yüksek katsayılar saptamıştır. Ancak çalışmada gıdaların kompleks sistemler olmasına bağlı olarak tek bir parametre üzerinden net sonuca varılmaması gerektiği ifade edilmiştir.

Başka bir çalışmada ekmek hacimleri ile maksimum e_3/e_1 , minimum v_3/v_1 , değerleri, % 200 gerinim noktasındaki S, T, G'_L , η'_L değerleri ile arasındaki korelasyon incelenmiştir. En yüksek korelasyonlar G'_L ($r=0,76$) ve η'_L ($r=0,77$) parametrelerinde elde edilmiştir. Diğer parametrelerle zayıf korelasyon katsayısı bulunmuştur [30].

Buğday hamuruna ekşi hamur ilavesi temel reolojik özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Değişen reolojik özelliklerle beraber yapı yumuşak, daha az elastik ve bunun sonucu olarak daha kolay uzatılabilir forma dönüşmektedir [31]. Clarke vd. [32] *Lactobacillus brevis* 1242 starter kültürünü kullanarak ekşi hamur katkılı (% 20 un ağırlığına) hamur örneği hazırlamış, kontrol hamur örneği ile temel reolojik özellikleri üzerine asidifikasyonun etkisini değerlendirmiştir. Asit varlığının elastikiyet ve sertliği azalttığı belirtilmiştir. Aynı etki izole edilmiş gluten üzerinde de görülmüştür. Buna bağlı olarak asidik optimal koşullarda tahıl proteazlarının ekşi hamur fermentasyonu sırasında meydana gelen reolojik değişikliklerde merkezi rol oynadığı ifade edilmiştir.

Komlenic vd. [33] kimyasal ve biyolojik asitlendirme işleminin hamurun reolojik özelliklerine ve ekmek kalitesi üzerine etkisini araştırmıştır. *Lactobacillus brevis* starter kültürünü kullanarak ekşi hamur üretmiş, bu ekşi hamurdan unun ağırlığının %10' u olacak şekilde hamura katarak biyolojik olarak asitlendirilmiş hamur elde etmiştir. Ayrıca aynı çalışmada laktik asit katkılı kimyasal asitlendirilmiş hamur hazırlanmıştır. Kimyasal ve biyolojik asitlendirmenin stabilite, uzayabilirlik ve jelatinizasyon üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Asitlendiricilerin eklenmesiyle stabilitesi ve uzayabilirliği daha düşük hamur elde edilmiştir. Genel olarak, biyolojik ve kimyasal asitlendirmenin ekmek sertliğini azalttığı belirtilmiştir.

Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin tiksotropik indeksi farklılıkları, kullanılan başlangıç kültürünün metabolik aktivitesine bağlıdır. Tiksotropik indeksi akış zamanına bağlı sorumlu yapıyı yok etmek için gerekli enerjiyi yansıtmaktadır. Kontrol örneği (ekşi hamur ilavesiz) tüm kayma oranları alanı için kayma gerilmesinin en yüksek değerlerine sahip olduğu görülmüş bu durum kayma oranını düşürürken (%6,4 tiksotropi indeksi) karmaşık yapının hızlı bir şekilde yeniden yapılandırılmasıyla karakterize edilmiştir [34].

Nantawan vd. [35] buğday unu ekmeğinin tekstür analizi sonucunda hamur örneğinde ekşi hamur içeriğinin artışı ile sertliğin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Azalma sebebi ekşi hamur ilavesinin ekmek hamurunda gaz tutmasının arttırılması ile ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte, 100 g hamur

başına 30 g kadar ekşi hamur eklenmesi buğday unu ekmeğinin sertliğini önemli ölçüde arttırdığı saptanmıştır. Çok fazla ekşi hamur eklenmesinin mayanın gelişmesini dolayısıyla ekmek hacminin genişmesini ve yoğunluğunu etkilediği bildirilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Geleneksel yöntemlerle değerlendirilemeyen karmaşık gıda sistemlerinin mikroyapısal davranışları hakkında yararlı bilgiler sağlayabileceği düşünülen büyük genlikli salınımlı kayma (LAOS) testi son yıllarda dikkat çekmektedir. Ekmek hamuru, üretim prosesi sırasında %100' den %500000 gerinim değerlerine karşılık gelen deformasyonlara uğramaktadır. Uygulanan bu deformasyon hamur reolojisini ve dolayısıyla ortaya çıkan ekmek yapısını etkiler. Bu nedenle, ekşi hamur ilavesi yapılarak hazırlanan hamur, doğrusal olmayan bölgelerde hamur reolojisi açısından incelenmelidir. Bu doğrultuda Ewoldt-McKinley Büyük Genlikli Salınımlı Kayma Akışı (LAOS) teorisi ile ortaya konan LAOS parametrelerinin (Chebyshev sabitleri; G'_M , G'_L , η'_M , η'_L , e_3/e_1 , v_3/v_1 , S ve T)) ekşi hamur eklenmesi ile buğday hamurunun doğrusal olmayan viskoelastik davranışlarındaki yapısal değişiklik hakkında daha fazla bilgi elde etmek için kullanılması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Literatürde ekşi hamur miktarının buğday hamurunun doğrusal olmayan viskoelastisitesi üzerindeki etkileri belirlenmemiş ve gerinime karşı elde edilen stres dalga formunda meydana gelen değişiklikler bildirilmemiştir. Bu bağlamda elde edilecek sonuçlar, ekşi hamurun daha iyi işlenmesi için gerekli parametrelerin (karıştırma süresi, ekşi hamur konsantrasyonu, fermentasyon tipi) belirlenmesi için değerli bilgiler önerebilir. Ayrıca ekşi hamur örneklerine ait LAOS parametrelerine ait sonuçlar ile ekmek tekstür özelliği arasında bir korelasyon olabileceği düşünülmektedir.

2.1 Ekşi Hamur

Tüketicilerin gıdaların sağlık yönüne etkisine ilgisi gün geçtikçe artarak devam etmektedir. Geleneksel gıdalar sağlığı olumlu yönde etkileyen ürünler olarak algılanır. Ekmek, dünya çapında milyonlarca insan için diyetin önemli bir parçası olan temel gıda maddesidir. Kompleks yapısı enerji, protein, mineral ve diğer birçok makro ve mikro besinleri sağlar [37]. Ekmek tüketim alışkanlıkları oldukça farklı olup çoğu ülkede yılda kişi başına ortalama 50 kg ekmek tüketilmektedir [38]. Fermentasyon işlemi ekmeğin özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerden birisidir. Gıdaları koruyabilme ve uzun süre saklayabilmek için kullanılan yöntemler arasında fermentasyon önemli yere sahiptir. Tahıl fermentasyonu, hem bira hem de ekmeğin mayalar ve laktik asit bakterilerinin yardımı ile üretildiği antik Mısır' a dayanan en eski biyoteknolojik süreçlerden biridir. 5000 yıldan uzun süredir kullanılan en eski fermente gıda teknolojisi örneklerinden biri ekşi hamurdur. Gıda fermentasyonu esnasında fermente edici organizmaların ürettiği metabolitlerle gıdanın bozulması ve patojenik organizmaların gelişmesi engellenir böylece bozulabilir ürünün raf ömrü uzar [39, 40]. Günümüzde ekşi hamur ekmek, kek ve kraker gibi bir dizi ürünün üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda sağlık sorunları konusunda giderek artan endişeler doğal ve sağlıklı olarak algılanan ekşi hamur üretimini dikkat çekici duruma getirmiştir. Fermentasyon sırasında mayalar ve laktik asit bakterilerin (LAB) çeşitli organik asitler, alkoller, aldehytler ve esterler gibi özel lezzet verici maddeler üreterek ekşi hamur ekmeğine eşsiz lezzetini verirken bir taraftan da hamurun ekmek yapısını iyileştirdiği, raf ömrünü uzattığı ve beslenme özelliklerini değiştirdiği gözlenmiştir [33, 41]. Buğday fırınında ekşi hamur kullanımı isteğe bağlıdır. Ancak ekşi hamur kullanımı ekmek kalitesini arttırmak için kullanılan zorlu bir yöntemdir. Tüketiciler çoğu buğday ürünlerinde hafif asitliği kabul edebilmektedir [42].

2.1.1 Ekşi Hamur Mikrobiyolojisi

Spontan fermentasyon, ekşi hamur üretiminde kullanılan çok kademeli biyoteknolojik süreçtir. Geleneksel ekşi hamur üretim prosesi sırasında uygulanan geri besleme (back-slopping) yöntemi, uzun zaman ve ciddi iş yükü gerektirmektedir. Ayrıca gerçekleşen süreç içerisinde fermentasyon koşullarını yönetmek daha zordur. Bu nedenle, ekşi hamurun endüstriyel kullanımı birçok ülkede endüstriyel olarak kabul görmemiştir. Son yıllarda, farklı teknolojik özelliklere sahip *Lb. brevis*, *Lb. plantarum*, *Lb. delbrueckii*, *Lb. sanfranciscensis* ve *Lb. fermentum* gibi LAB'leri kullanılarak kontrollü fermentasyon işlemi gerçekleştirilmektedir [43]. Ekşi hamurda LAB-maya oranı genellikle 100:1'dir. Fermente gıdaların çoğunda homofermantatif LAB önemli bir rol oynar, heterofermantatif LAB özellikle geleneksel olarak hazırlandığında, ekşi hamurda baskındır. Ekşi hamurdaki zorunlu heterofermantatif laktobasillerin baskınlığı, esas olarak rekabet edebilirlikleri ve bu özel çevreye adaptasyonları ile açıklanabilir. Laktobasil ve mayalar arasındaki antagonistik ve sinerjistik etkileşimlerin önemi, karbonhidratların ve amino asitlerin metabolizmasına ve karbondioksit üretimine dayanır [44].

Mikroorganizmaların gelişme ortamı mikrobiyolojik olarak değerlendirildiğinde spesifik ve stresli ekosistem olarak nitelendirilen düşük pH, yüksek karbohidrat konsantrasyonu, limitli oksijen ve mayalara (10^7 kob/g) göre kıyaslandığında yüksek LAB (10^8 - 10^9 kob/g) içeriğine sahiptir. Ekşi hamur mikrobiyotasının başlıca metabolik aktivitesi asidifikasyon, aroma oluşumu ve mayalandırmadır (Tablo 2.1) [45]. Hamur mayalama işleminde kullanılan ekşi hamur, undan, sudan, çevreden gelen mikroorganizmaların etkisiyle doğal hamur fermentasyonu veya un/su karışımına başlangıç olarak laktik asit bakterileri (LAB) ve/veya maya eklenerek oluşturulur [46, 47, 48, 49]. Tanımlı laktik asit bakterileri (LAB) ile hazırlanan hamur fermentasyonunu etkileyen faktörler başlangıç kültürü, fermentasyon süresi, kullanılan katkı maddeleri ve hamur verimidir [34, 50].

Ekşi hamur tipleri, spesifik bir ekşi hamur mikrobiyotası (Tablo 2.1) ile karakterize edilmiştir.

Ekşi hamur üç farklı grupta sınıflandırılmaktadır [44]:

Tip I: Geleneksel tekniklerle üretilir. Mikroorganizmaları aktif durumda tutabilmek için günlük tazeleme işlemi uygulanır. İşlem 20-30°C'de gerçekleştirilir. pH değeri yaklaşık 4 civarındadır. Örnek: San Francisco Fransız ekmeğinin üretimi için *Lb. sanfranciscensis* içeren başlangıç ekşi hamurudur.

Tip 1a: Farklı kaynaklardan geliştirilmiş saf kültür ile hazırlanan ekşi hamurudur.

Tip 1b: Buğday, çavdar veya bunların karışımından çok kademeli spontan fermentasyon işlemi ile elde edilen ekşi hamurlardır.

Tip 1c: Tropik bölgelerde yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen fermentasyon ile elde edilen ekşi hamurlardır. Örnek: Afrika Sorgum Ekşi Hamur (fermentasyon sıcaklığı >35°C)

Tip II (Hızlandırılmış): Tip II işlemleri genel olarak 2-5 gün sürer ve işlemi hızlandırmak için hazırlanan hamur yüksek fermentasyon sıcaklığında (genellikle >30°C) bekletilir. 24 saatlik fermentasyon sonunda elde edilen ekşi hamurlar pH 3,5 gibi düşük pH (yüksek asit) değerlerine ulaşır. Mikroorganizmalar genellikle geç durağan fazdadır ve bu nedenle yalnızca sınırlı metabolik aktivite gösterirler. Yerel fırınlarda sıklıkla kullanılırlar. Ekşi hamurlar kullanıma kadar (yaklaşık bir haftaya) taze olarak depolandığından, büyük miktarlarda üretilbilirler. Fermentasyona başlamak için kullanılan starter kültürler endüstriyel hamur üretiminde sıklıkla tercih edilirler. Bu ekşi hamur sıvı olabildiğinden endüstriyel bir fırında kolayca pompalanabilir.

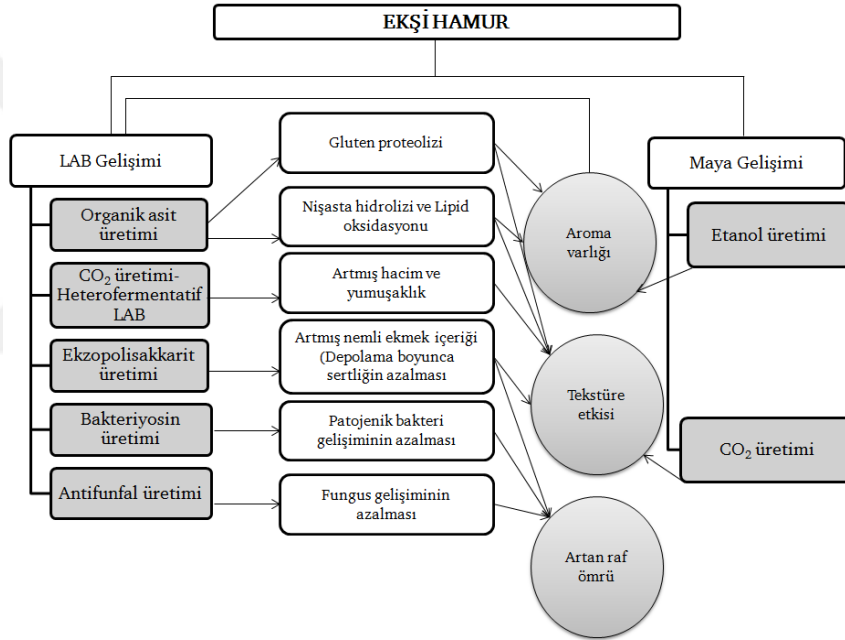
Tip III (Kurutulmuş): Bu hamur türü, endüstriyel fırıncılık tarafından genellikle kalitenin sabit olması nedeniyle kullanılır. Sıvı formda bulunan ekşi hamur sıcak hava ortamına püskürtülmektedir. Suyun %90 değerine kadar buharlaşması ile elde edilen kuru partiküller sistemin alt kısmında toplanmaktadır. Sistemin çalışma prensibinin kısa süreli ve hızlı soğutmalı olması nedeniyle üründe herhangi bir esmerleşme reaksiyonu olmaz. Tip III ekşi hamurları, günümüzde yüksek teknolojiye fırıncılık endüstrisinde otantik ekmek tadı vermenin en kolay yoludur [51].

Tablo 2.1 Ekşi hamurların sınıflandırılması ve içerdikleri karakteristik mikrobiyota [45]

Tip Ia	Tip Ib	Tip Ic	Tip II	Tip III
Obligat heterofermentatif	Obligat heterofermentatif	Obligat heterofermentatif	Obligat heterofermentatif	Obligat heterofermentatif
<i>Lb. sanfranciscensis</i>	<i>Lactobacillus</i> spp. <i>a</i>	<i>Lactobacillus</i> spp. <i>b</i>	<i>Lb. brevis</i>	<i>Lb. brevis</i>
	<i>Lb. brevis</i>	<i>L. fermentum</i>	<i>Lb. fermentum</i>	
	<i>Lb. buchneri</i>	<i>L. reuteri</i>	<i>Lb. frumenti</i>	
	<i>Lb. fermentum</i>		<i>Lb. pontis</i>	
	<i>Lb. fructivorans</i>		<i>Lb. panis</i>	
	<i>Lb. pontis</i>		<i>Lb. reuteri</i>	
	<i>Lb. reuteri</i>		<i>Lb. sanfranciscensis</i>	
	<i>Lb. sanfranciscensis</i>		<i>W. confusa</i>	
	<i>W. cibaria</i>			
	Fakültatif heterofermentatif			Fakültatif heterofermentatif
	<i>Lb. alimentarius</i>			<i>Lb. plantarum</i>
	<i>Lb. casei</i>			<i>P. pentosaceus</i>
	<i>Lb. paralimentarius</i>			
	<i>Lb. plantarum</i>			
	Obligat homofermentatif	Obligat homofermentatif	Obligat homofermentatif	
	<i>Lb. acidophilus</i>	<i>L. amylovorus</i>	<i>Lb. acidophilus</i>	
	<i>Lb. delbrueckii</i>		<i>Lb. delbrueckii</i>	
	<i>Lb. farciminis</i>		<i>Lb. amylovorus</i> (rye)	
	<i>Lb. mindensis</i>		<i>Lb. farciminis</i> , <i>Lb. johnsonii</i>	
	a Filogenetik olarak <i>Lb. brevis</i> ile ilgilidir.			
	b Filogenetik olarak <i>Lb. pontis</i> ile ilgilidir.			
Mayalar	Mayalar	Mayalar	Mayalar	
<i>Candida humilis</i>	<i>Candida humilis</i>	<i>Issatchenkia orientalis</i>	<i>Maya yok</i>	
(<i>Torulopsis holmii</i> , <i>Candida milleri</i>), <i>Saccharomyces exiguus</i>		(<i>Candida krusei</i>)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> eklenebilir.	

2.1.2 Ekmek Üretiminde Ekşi Hamur Kullanımı

Ekmek üretiminde önemli role sahip olan ekşi hamurun kullanımı uzun bir geçmişe dayanmaktadır. Ekşi hamur kullanımı, ekmek ürünlerinin besin değerini ve duyu özelliklerini (aroma, lezzet, doku) iyileştirmenin bir yoludur. LAB ve mayalar arasındaki birleştirici fermentasyon nedeniyle, nişasta hidrolize edilir, hamur daha fazla asitlik kazanır ve gluten yapısı bozulur, bunların tümü ekmek tekstürünün, uçucu bileşiklerin konsantrasyonunun ve hamurun yapısal ve mikrobiyolojik raf ömrünün geliştirilmesine katkıda bulunur. Şekil 2.1’de ekşi hamurun nihai pişmiş ürünlerin tekstür özelliklerine, besin değerine, aroma bileşimine, raf ömrüne etkisi verilmiştir [52].



Şekil 2.1 Ekşi hamurun ekmek tekstürü, aroması ve raf ömrüne etkisi [52]

2.1.2.1 Asidifikasyon

Ekşi hamur fermentasyonu sırasında hamurun pH'ı ve titre edilebilir asitliği önemlidir. İlk aşamada hem asitlik hem pH sabit kalırken ara faz sırasında titre edilebilir asitlik maya varlığına bağlı olarak artmaktadır. Uzun süreli fermentasyon aşamasında, maya varlığı negatif duruma gelerek titre edilebilir asitlik ve hamurun pH'ı esas olarak sisteme giren LAB'ye bağlı hale gelir. Ekşi hamurda bulunan mayalar, üretilen laktik asitten az oranda etkilenirken asetik asitten fazla oranda etkilenmektedir [53, 54]. Ekşi hamurun etkilerinin çoğu,

fermentasyon sırasında çeşitli organik asitlerin üretilmesiyle ortaya çıkan pH düşüşünden kaynaklanmaktadır [55]. Laktik asit ve asetik asit, ekşi hamurda başlıca metabolik ürünlerdir [33, 56]. Fermentasyon sırasında üretilen asitler, hamurun karıştırma davranışını güçlü bir şekilde etkiler ve düşük pH değerine sahip hamur, daha kısa süreli bir karıştırma prosesi gerektirir. Kullanılan işlemin niteliğine ve başlangıç kültürüne göre olgun bir ekşi hamurun pH değerleri 3,5 ila 4,3 arasında değişir. Asit, buğday unundan ekstrakte edilen glutenin fraksiyonunun çözünürlüğünü artırır ve ayrıca glutenin şişme gücünü etkiler. Unun doğal yapısı, özellikle kül içeriği, asitlenme üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Organik asitler arasında, heterofermentatif LAB tarafından üretilen asetik ve propiyonik asitler laktik asitten daha etkilidir. Üretilen bu organik asitler antimikrobiyal etki göstermektedir. *Lb. sanfranciscensis* CB1 tarafından üretilen kaproik asit asetik, formik, propiyonik, bütirik ve n-valerik asit karışımları, ekmeklerde *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus* ve *Monilia*'nın gelişmesini inhibe edilmesinde kilit rol oynar. *Lb. plantarum* çok geniş antimikrobiyal aktivite gösterir ve ürettikleri fenillaktik asitler özellikle de 4-hidroksifenillaktik asit bileşikler, fungisidal aktiviteye sahiptir [54].

2.1.2.2 Enzim Aktivitesi

Ekmek üretiminde ekşi hamur eklenmesi nedeniyle pH'daki değişiklikler, gluten, nişasta ve hemiselüloz, fitik asit gibi hamur bileşenlerinde çeşitli değişikliklere neden olur. Fermentasyon sırasında değişen koşullar mevcut enzimlerin aktivasyonuna katkıda bulunur ve pH değerinin değişimi seçici olarak amilaz, proteaz, hemiselülaz ve fitaz gibi bazı enzimlerin performansını artırır [31, 57]. Ekşi hamur fermentasyonu sırasında proteolize, hem LAB bakterilerinin hücre duvarlarına bağlı proteinaz ve peptidaz enzimleri, hem de tahıl enzimleri katkıda bulunmaktadır. Laktik asit bakterilerinde proteolitik sistem, hücre dışı olarak yerleştirilmiş bir serin-proteinaz, di/tri-peptidler ve oligopeptitler (> 3 amino asit tortusu) için spesifik taşıma sistemleri ve çok sayıda hücre içi peptidazdan oluşur. Genel olarak, proteolitik enzimler (proteazlar), proteinaz ve peptidazlara ayrılır. Proteinazlar protein parçalanmasını daha küçük peptit fraksiyonlarına katalize eder; peptidazlar spesifik peptit bağlarını hidrolize eder veya peptitleri

tamamen amino asitlere parçalar. Buğday ve çavdar unlarının proteolitik aktivitesi, asidik koşullar altında aktif olan aspartik proteinazlar ve karboksipeptidazdan oluşur (Tablo 2.2) [58].

Tablo 2.2 Buğday ununda bulunan başlıca proteaz grupları [58]

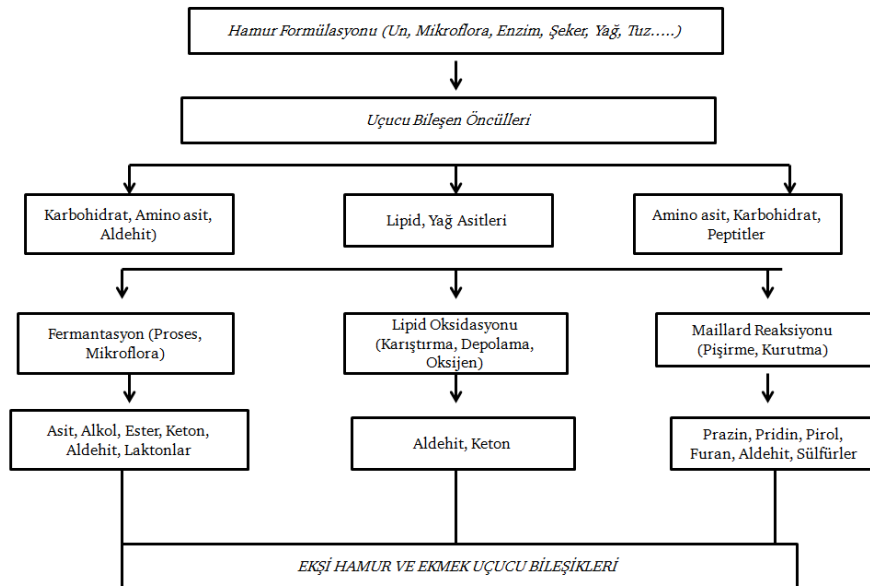
Proteaz tipi	Aspartik Proteaz	Serin Karboksipeptidaz II
Bulunduğu yer	Endosperm	Endosperm
pH aralığı	3-4,5	4-6
Özgüllük	Hidrofobik amino asitler arasındaki bölünme	Aromatik amino asitleri serbest bırakır
Gluten proteinlerine karşı aktivite	Gluteninler	Proteinazlarla birlikte çalışır

Yapılan çalışmalarda, proteinaz ve peptidaz enzimlerinin pH 4-9'da aktivite gösterdiği pH 4'te ise en yüksek aktivite sergilediği ifade edilmektedir. Ekşi hamur fermentasyonu sırasında gerçekleşen proteoliz, laktik asidin proteolitik aktivitesi ile ilişkilendirilmektedir [31, 57]. Heterofermantatif laktobasiller, hamurda asidifikasyonu sağlayarak tahıl proteazlarının primer aktivitesini artırır ve gluten disülfid bağlarının azalmasına neden olur. Ekşi hamur laktik asit bakterilerinin hücre içi peptidazları, proteolizi tamamlar ve serbest mikro amino asitleri serbest bırakırlar [42, 54, 59]. Ekşi hamur fermentasyonları sırasında ortaya çıkan protein yıkımı, hamur yapısına ve ekşi hamurun lezzetine doğrudan etki eden anahtar metabolik yoldur. Hamur fermentasyonu sırasında, LAB, mikrobiyal gelişme ve hamurun asitlenmesi için önemli olan küçük peptitler ve serbest amino asitleri salgılar. Gerez vd. [60] gluten bazlı ortamda fermentasyon yapan LAB kültürlerin esansiyel aminoasit miktarını (treonin, valin, lizin ve fenil alanin) arttırdığını ifade etmektedir [33]. LAB ile yapılan ekşi hamur fermentasyonu süresince, aminoasit konsantrasyonu artarken maya ile fermentasyonda serbest aminoasit konsantrasyonu azalmaktadır [57]. Serbest aminoasit miktarı hamurun pH seviyesine, fermentasyon zamanına ve fermentatif mikrobiyotanın amino asit tüketimine bağlı olarak değişmektedir. Literatür verilerine göre ekşi hamurda *Lb. brevis* subsp. *linderi*, *Lb. safransciensis*, *Lb. brevis* ve *Lb. plantarum* gibi bakteriler alifatik, dikarboksilik ve hidroksil aminoasit miktarlarını yükseltmektedir. Mayalar, *S. cerevisiae* ve *S. exiguous* toplam amino asit seviyesini düşürmektedirler [61, 62].

Ekşi hamur fermentasyonu sırasında tahıl proteinlerinin hidrolize olması, unlu mamullerin genel kalitesini belirgin şekilde etkiler [31, 57]. Ekşi hamur fermentasyonu sırasında gelişen asitlik endojen tahıl fitaz enzimlerinin aktivitesini artırır. Endojen fitaz dışında etkinliği türe özgü bazı LAB ve mayalar da fitaz aktivitesi göstermektedir. Buğdayda bulunan fitaz enzimin optimum aktivite gösterdiği pH değeri 5,0 iken maya fitazının optimum pH değeri 3,5 seviyesindedir. Yapılan bir çalışmada ortamın uygun pH' ya ($\text{pH} < 5,5$) düşmesi buğday endojen fitazındaki aktivite artışına bağlı olarak fitik asit içeriğinin %70 oranında azaldığı saptanmıştır. Sonuç, ekşi hamur mikroflora fitaz aktivitesi üzerine endojen un fitaz aktivitesinin baskın olduğunu vurgulamıştır [40, 63].

2.1.2.3 Uçucu Bileşen Üretimi

Ekşi hamur fermentasyonu sırasında uçucu bileşen üretimi enzimatik ve mikrobiyal işlemlere dayanmaktadır. Uçucu bileşen profilinin değerlendirilmesinde kullanılan bileşikler içerisinde aldehytler, asitler, alkoller, ketonlar, esterler ve pirazinler yer almaktadır. Ekmek ve ekşi hamurda uçucu bileşen oluşumu (Şekil 2.2) ham maddelerden ve uygulanan proseslerden kaynaklanmaktadır [64].



Şekil 2.2 Ekşi hamur ve ekmek aroma bileşenleri [64]

Ekşi hamurda, aroma aktif bileşikleri, LAB ve mayalar tarafından ayrı ayrı ve etkileşimleri yoluyla üretilir. Heterofermentatif LAB, esas olarak etil asetat, bazı alkoller ve aldehitler üretirken, homofermentatif LAB'lar diasetil ve diğer karbonilleri sentezlemektedir. Buna karşılık, izo-alkoller maya fermentasyonunun ürünleri olmakla beraber nihai ekmek lezzetine çok az katkıda bulunmaktadır [41]. Sıcaklık, zaman ve besleme sayısı, maya ve laktik asit bakterilerini (LAB) sayısını, fermentasyonu ve lipid oksidasyonunu etkilemesi sonucunda ekşi hamurun uçucu profili değişmektedir. Ekşi hamur uçucu bileşen profili, ekşi hamur ekmeğinin profilini (Tablo 2.3) ve dolayısıyla duyuusal özelliklerini etkiler [64]. Hamura fruktoz/glukoz/maltoz veya sitrat ilavesi, fırınlama işleminde uçucu bileşen üretimine LAB etkisini artırır, ancak Maillard ve karamelizasyon reaksiyonları, pişmiş tahıl ürünlerinde lezzet oluşumundan da sorumludur [41].

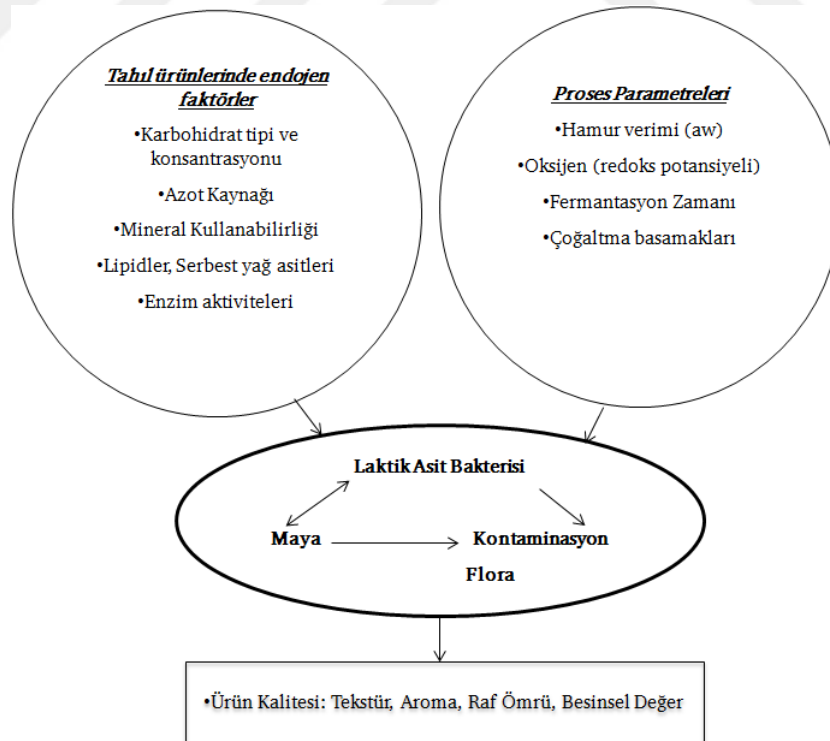
Tablo 2.3 Ekşi hamur ilave edilerek üretilen ekmeklerin aroma bileşenleri [53]

Asitler	Alkoller	Esterler	Karbonil Bileşikleri
Laktik asit Asetik asit Bütirik asit Propiyonik asit Prüvik asit Valerik asit İsobütirik asit İsovalerik asit n-Bütirik asit Formik asit Kaproik asit Palmitik asit	Etanol n-Propanol 2-Metil-1-propanol n-Bütanol 2-Bütanol n-Pentanol n-Hekzanol 2-Hekzanol n-Heptanol Benzil alkol 2-Fenil etanol İsoamilalkol 2,3-Bütandiol 3-Metil bütanol 2-Metil bütanol	Etil asetat Etil n-propanat n-Bütıl asetat 2 Metil bütıl asetat Bütıl-n-propanat n-Pentıl asetat Etil n-hekzanat n-Hekzil asetat Etil laktat Etil n-oktanat Etil2-hidroksi propanat	Diasetil 3-Metil-1-bütanol 2-Metil-1-bütanol n-Hekzanal 2-Heptanon n-Nonanal Benzaldehit 2-Propanon 2,3-Bütandion 3-Hidroksi-2-bütanon Asetoin Aseton Asetaldehit İsovalerik aldehit Metiletil keton

Laktik asit bakterileri (LAB), ekmeğın dokusu ve bayatlaması üzerinde olumlu bir etkiye sahip bir takım metabolitleri üretmektedir; organik asitler, ekzopolisakaritler (EPS) ve/veya enzimlerdir. EPS, hamurun viskoelastik özelliklerini iyileştirebilir, ekmek hacmini arttırabilir, kırıntı sertliğini azaltabilir ve raf ömrünü uzatabilir. Bununla birlikte ekşi hamurun fermentasyonu

sırasında bakterilerin metabolik aktivitelerine bağılı olarak ürettiğı organik asitler EPS'nin pozitif teknolojik etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yapılan çalışmalarda özellikle üretilen laktat ve asetatın hamur reolojisi, ekmek hacmi ve kırıntı sertliğini önemli derecede etkilediğı tespit edilmiş ve EPS'nin pozitif etkisini dengelediğı görülmüştür [65]. EPS dışında üretilen amino asitlerin veya peptidlerin aroma bileşiklerine dönüştürülmesi, gıda lezzetine büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Özellikle, glutamatın LAB ile dönüştürülmesi, gıda lezzetinin hedeflenen optimizasyonunu mümkün kılmaktadır. Ekşi hamurun ekmeğın beslenme kalitesi üzerine etkileri (Şekil 2.3):

- Fitat içeriğini azaltır
- Daha düşük postprandiyal glukoz seviyesi sağlar.
- Mineral biyoyararlılığını artırır.
- Bazı EPS'ler prebiyotik rol oynar.
- Hamur mayalanma işlemi sırasında tahıl protein fraksiyonundaki değişikliklere neden olur (Gluten hassasiyetinin azaltılması)



Şekil 2.3 Ekşi hamur ekmeğının kalitesini etkileyen faktörler [66]

Ekmek yapımının aşamalarında önemli bir ara ürün olan hamurun reolojik özellikleri, fırın ürünlerinin kalitesini doğrudan etkilemesi ve hamur yapısı hakkında bilgi vermesi nedeniyle önemlidir.

2.2 Hamur Reolojisi

Reoloji maddenin akış davranışını ve deformasyonunu inceleyen bilim dalıdır [9, 67]. Reolojik ölçümler, gıda endüstrisinde, işlenmeden önce hammaddelerin fiziksel karakterizasyonu, üretim sırasında elde edilen ara ürünler ve son ürün gıdalar için oldukça önemlidir [9, 10]. Reolojik çalışmalar malzemenin uygulanan gerilim veya gerinimine karşı gösterdikleri yanıtları kapsamaktadır [9, 67]. Gıdalar, yapısal ve reolojik özellikleri bakımından karmaşık malzemelerdir ve çoğu durumda, akışkan yapısal bileşenlerin yanı sıra katı karışımlardan oluşur. Gıda dokusu doğrudan tüketici tarafından kabul edilmeyeyle ilgili olduğundan, arzu edilen tekstürün oluşturulması gıda endüstrisi için büyük önem taşımaktadır. Gıda tekstürünün anlaşılması için, gıdanın mekanik özelliklerinin temel ölçümleri gereklidir [18, 67]. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan reolojik ölçümlerin temel amaçları şunlardır:

- Malzemenin mekanik özelliklerinin kantitatif bir tanımını belirlemek,
- Malzemenin moleküler yapısı ve bileşimi ile ilgili bilgi edinmek,
- Malzemenin işleme sırasındaki performansını ve kalite kontrolünü karakterize ve tahmin etmektir [68].

Buğday endospermi, hamur karıştırma sırasında karmaşık viskoelastik yapılar (üç boyutlu ağ) oluşturmalarını sağlayan spesifik bileşimler, yapılar ve özellikler içeren depo proteinleri içerir. Karıştırma sırasında, un ve diğer tarif bileşenleri mekanik enerji girişi ile beraber hidrasyona uğrar [69]. Nişasta granüllerini çıkarmak için buğday hamuru yıkandığında kalan elastik kütlesi “gluten” olarak tanımlanır. Yıkamanın hassasiyetine bağlı olarak geriye kalan kütle %75-85 protein ve % 5-10 lipit içerir; kalanların çoğu nişasta ve nişasta olmayan karbohidratlardır. Uygulamada, "gluten" terimi, proteinleri belirtir ve buğdaya pişirme kalitesi belirlenmesinde etkin rol oynayan su emme kapasitesi, yapışkanlık, viskozite ve elastikiyet özelliklerini belirler [70, 71]. Gluten ağı fermentasyon gazını korur, genleşme sırasında gaz hücrelerinin stabilitesini

belirleyebilir, yumuşak (sünger) ve esnek (elastik) ekmek iç yapısına katkıda bulunur ayrıca buğday esaslı ekmek ve pişmiş ürünlerin karakteristik görünümünü etkiler. Gluten, monomer olarak bulunan, zincirler arası disülfid bağlarıyla oligo ve polimer olarak bağlanmış yüzlerce protein bileşeni içerir. Çeşitli gluten proteinlerinin özellikleri Tablo 2.4'de özetlenmiştir.

Tablo 2.4 Gluten proteinlerinin özellikleri [72]

Gluteninlerin Yüksek Molekül Ağırlıklı (HMW) alt birimleri	Polimerik	6-10	65-90000	0-35 Gln 10-16 Pro 15-20 Gly 0,5-1,5 Cys 0,7- 1,4 Lys
Gluteninlerin Düşük Molekül Ağırlıklı (HMW) alt birimleri	Polimerik	70-80	30-45000	30-40 Gln 15-20 Pro 2-3 Cys
α -Gliadinler β -Gliadinler γ -Gliadinler	Monomerik Monomerik Monomerik	70-80	30-45000	30-40 Gln 15-20 Pro 2-3 Cys
ω - Gliadinler	Monomerik	10-20	40 - 75000	40-50 Gln 20-30 Pro 8-9 Phe 0 Cys 0-0,5 Lys

¹Gln: Glutamin, Pro: Prolin, Phe: Fenilalanin, Cys: Sistein, Lys: Lizin; Gly: Glisin

Gluten proteinleri alkol-su (örneğin, % 60 etanol) çözeltilerindeki çözünürlüğüne göre eşit iki fraksiyona bölünmüştür: Çözünür gliadin (prolamin) ve çözünmez gluteninlerdir. Gluten, gliadinlerin gluteninler için bir "plastikleştirici" veya "çözücü" olarak ifade edildiği bir "iki bileşenli yapıştırıcıdır". Gliadinlerin ortalama molar kütlesi yaklaşık 30-80 kg/mol'dür. Gliadinlerin yapısı, heliks (bobin) ve rastgele kıvrımlardan (halka, bağlanmamış) oluşan tek zincirli bir makromoleküldür. Çok sayıda hidrojen bağı, helezonu stabilize ederken intramoleküler disülfid bağları (S-S), gliadin makromoleküllerinde rastgele kıvrımları bir arada tutar. Gluteninler, gliadinlerden daha büyük bir nispi molar kütleye sahiptir (tipik olarak 70 kg/mol ila 20000 kg/mol, genellikle yaklaşık 2000 kDa). Gliadinlerin aksine, gluteninlerin yapısı esas olarak moleküller arası (zincirler arası) disülfid bağları ile bağlanmış birçok farklı uzun zincirlerden oluşur. Gliadin ve glutenin, glutende 2:3 oranında bulunur [69]. Her iki fraksiyon, hamurun reolojik özelliklerine önemli katkıda bulunur, ancak

fonksiyonlar birbirinden farklıdır. Hidratlanmış gliadinler çok az esnekliğe sahiptir ve gluteninlerden daha az yapışkandır; temel olarak hamur sisteminin viskozitesine ve uzayabilirliğine katkıda bulunur. Hamurun viskoelastik özelliği yeterli miktar su ile hidratize olmuş unun gluten yapısı ve diğer bileşenler arasındaki etkileşime bağlıdır [70, 71]. Buğday hamuru Hookean katı ve non newtonian viskoz bir akışkanın birleşmesiyle oluşan viskoelastik bir materyaldir [73]. Ekmek yapımı üç aşamalı karmaşık bir süreçtir: kuru maddelerin (un, tuz, maya) karıştırılması-hidratasyon, fermentasyon (aralarında havalandırma işlemi olan birkaç fermentasyon aşaması) ve fırında pişirmedir [74]. Fermentasyon sırasında uygulanan havalandırma işlemi, hamur içinde absorbe edilen gazın dağıtıldığı ve büyük gaz hücrelerinin parçalandığı mekaniksel işlemdir. Hamurun içindeki iskelet yapısı, yoğurma hız ve süresi ile fermentasyon aşamalarının süre ve sayısı ile büyük değişimler göstermektedir [71]. Hamurun kompleks özelliği sadece kimyasal bileşimlerinden değil aynı zamanda fiziksel özelliklerinden de kaynaklanmaktadır. Bu fiziksel özellikler, hem küçük ölçekli hem de endüstriyel ortamlarda sadece hamur ve hamur işleyicilerinin işlem özelliklerini değil, aynı zamanda nihai ürünlerin kalitesini de belirlediğinden son derece önemlidir. Fiziksel özelliklerin tanımlama girişimleri birçok reolojik cihazın tasarımıyla sonuçlanmıştır. Hamurun reolojik özelliklerini ölçmek için reometre, penetrometre, konsistometre, amilograf, farinograf, miksograf, ekstensograf ve alveograf kullanılmaktadır. Bu ölçümler içerisinde en sık kullanılan dinamik salınımlı kayma testleridir. Dinamik salınımlı kayma testlerinde analiz edilecek malzeme sinüzoidal deformasyona maruz bırakılır ve elde edilen mekanik cevap zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür [3, 5]. Buğday unu hamurunun reolojik özellikleri büyük ölçüde nişasta, protein ve suyun katkısı ile değişmektedir. Buğday unu hamurunun reolojik davranışını karakterize etmek için küçük genlikli salınımlı kayma (SAOS) testleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı kalitedeki buğday unu hamurlarının reolojik çalışmaları göstermektedir ki dinamik salınımlı kayma test ölçümlerinin sonuçlarını nişasta-nişasta, nişasta-protein ve protein-protein etkileşimleri etkilemektedir [75]. Buğday unu hamurunun reolojik özelliklerinin tüm ekmek yapım sürecinde yer aldığı ve son ürünlerin kalitesini büyük ölçüde kontrol ettiği bilinmektedir [73]. Hamur

doğrusal olmayan reolojik davranış gösterir, ancak çok düşük gerinim noktalarında doğrusal reolojik davranışı söz konusudur. Düşük gerinimlerde hamurun doğrusal davranışı hamur türüne, karıştırma ve test yöntemine bağlıdır [67]. Hamur karışımında, genellikle işleme yardımcıları olarak sınıflandırılabilir ve hamur reolojisi üzerinde ikincil etkileri olabilecek çok çeşitli maddeler vardır. Sıklıkla hamur reolojisi üzerine etkileri belirlenmiş bileşenler, su, D₂O (döteryum oksit - ağır su, glutamin için esterleyici maddeler, kalıntılar, üre, tuzlar, disülfid bağını etkileyen ajanlar, mevcut protein alt birimleridir [68].

Fiziksel ve kimyasal küçük değişiklikler hamurun reolojik özelliklerinde önemli değişikliklere sebep olmaktadır [31]. Ekmek üretiminde ekşi hamur eklenmesi ile meydana gelen pH değişimi gluten, nişasta ve hemiselüloz gibi hamur bileşenlerinin hidrolizine neden olur. Ekşi hamur fermentasyonu sırasında tahıl proteinlerinin pH'a ve metabolik aktiviteye bağlı olarak hidrolize olması, unlu mamullerin genel kalitesini belirgin şekilde etkiler [31, 57]. Ekşi hamur ilave edilen buğday hamurunun temel reolojik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin sonucunda hamurun yumuşak, daha az esnek hale geldiği dolayısıyla kolayca genişletilebilir formda olduğu kaydedilmiştir. [76]. Reolojik özellikler, asidifikasyon ve aroma gelişimi ekşi hamur fermentasyon prosesinin kontrolü ve kaliteli ekmek üretimi için önemli parametrelerdir. Mikroorganizma tipi, metabolik aktivitesi ve zamana bağlı pH gelişimi hamurun reolojik özelliklerini etkilemektedir [1, 50, 76]. Fermentasyon sırasında üretilen asitler, pH düşüşüne neden olarak hamurun karışma süresini, uzayabilirliğini azaltırken jelatinizasyonu arttırmaktadır. Buğday ekşi hamur reolojisi ile ilgili çalışmalar sıklıkla gluten ağının çözülmesinin değişmiş reolojik davranışlar için nedensel faktör olduğu sonucuna varır. Bununla birlikte, doğal ekşi hamurların reolojik davranışlarının kimyasal olarak asitlendirilmiş buğday hamurlarından büyük ölçüde farklı olduğunu vurgulamak gerekir. Organik asit ilave edilen hamurun optimum koşullar altında karıştırılması sonucunda faz açısının azalmasına bağlı olarak daha elastik yapı gösterdiği düşünülmektedir. Ancak biyolojik asitlendirme ile meydana gelen asitlik seviyesinin artışına bağlı olarak faz açısı yükselmekte ve kompleks modulüs değeri düşmektedir [50]. Genel olarak, doğal

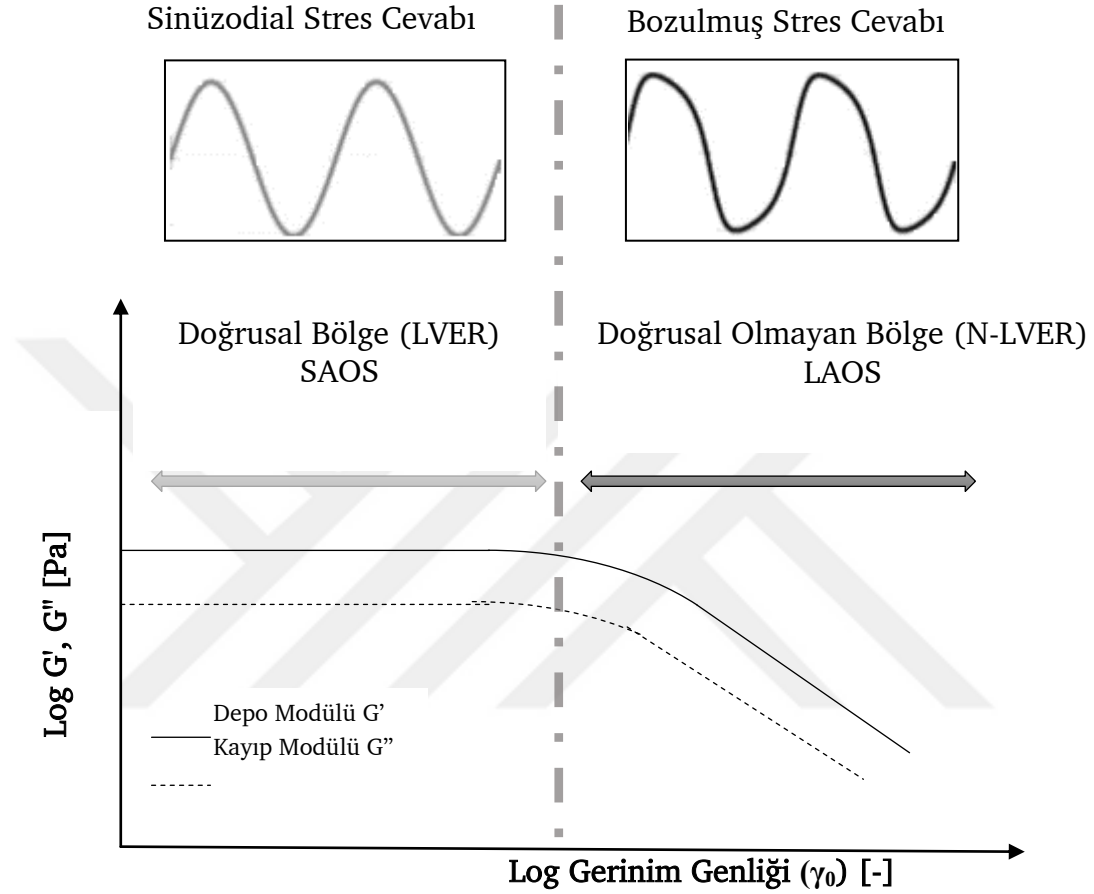
bir hamur mayası (ekşi hamur) kimyasal olarak asitleştirilmiş formundan daha az elastik bir hamur yapısının meydana gelmesine neden olmaktadır [31, 54].

2.3 Büyük Genlikli Salınımlı Kayma (LAOS) Testi

Reolojide dinamik salınımlı kesme testlerinden polimer eriyikleri ve çözeltileri, blok kopolimerleri, biyolojik makromoleküller, polielektrolitler, yüzey aktif cisimleri, süspansiyonlar, emülsiyonlar, çok çeşitli yumuşak madde ve kompleks akışkanları analiz etmek için yararlanılmaktadır [5]. Kayma modülüsün kullanılmasında kayma gerilimi ve kayma gerinimi değişken olarak kullanılmaktadır. Her iki parametre de testin değişkeni ya da sonucu olmaktadır. Ham verileri reolojik parametrelere dönüştürmek için mevcut iki dönüşüm faktörü vardır: biri torku kayma gerilimine dönüştürmek için kullanılır, diğeri sapma açısını kayma gerilimine veya dönme hızını kayma hızına dönüştürmek için kullanılır [77]. Bir küçük genlikli salınımlı kayma (SAOS) testi, malzeme tepkisinin, reometrenin doğruluğu dahilinde doğrusal bölgede olduğunu ve dolayısıyla malzemenin, örneğin; G' (Depolama Modülü) ve G'' (Kayıp Modülü), malzeme tepkisini tamamen tanımlamaktadır. Salınımlı kayma testlerinde, sabit bir frekansta gerinim genellikle sabit bir frekansta sinüzoidal bozulma ile değişmektedir. Şekil 2.4' de gösterildiği üzere SAOS, reolojik olarak kritik gerinim genliği değerinin altındaki bölge olarak tanımlanırken, bu değerden sonra doğrusal olmayan bölge, büyük genlikli salınımlı kayma (LAOS) olarak tanımlanır [4, 5]. SAOS testi, depolama (G') ve kayıp (G''), modüllerinin nicelleştirilmesi yoluyla gıda malzemelerinin yapısındaki değişiklikleri araştırmak için kullanılabilen tahribatsız bir tekniktir [6]. Viskoelastik özelliklerle ilgili çoğu çalışma SAOS testini kullanır; malzemenin test edilmesi uygulanan stres, gerinim veya gerinim oranının büyüklüğünden bağımsız olarak tepkilere neden olur. Ek olarak, gerilme ve gerinme arasındaki ilişkiler doğrusal viskoelastik bölgede sağlam bir şekilde oluşturulmuştur [5, 7, 11].

Küçük genlikli salınımlı kayma (SAOS) bölgesinde G' ve G'' değerleri sabitlenmiş frekansta uygulanan gerinim genliğinden bağımsızken, büyük genlikli salınımlı kayma (LAOS) bölgesinde viskoz ($G''(\gamma_0)$) ve elastik modülüs ($G'(\gamma_0)$) gerinim genliğinin bir fonksiyonu olmaktadır (Şekil 2.4). Buna bağlı olarak sinüzoidal

dalgalanmalarda bozulmalar meydana gelmektedir. LAOS testleri, gıda işleme, uygulama koşulları ve kesme, yayma veya çiğneme ile ilgili olan büyük deformasyonlar altında viskoelastik modüllerin ölçülmesinde kullanılabilir [7, 8].

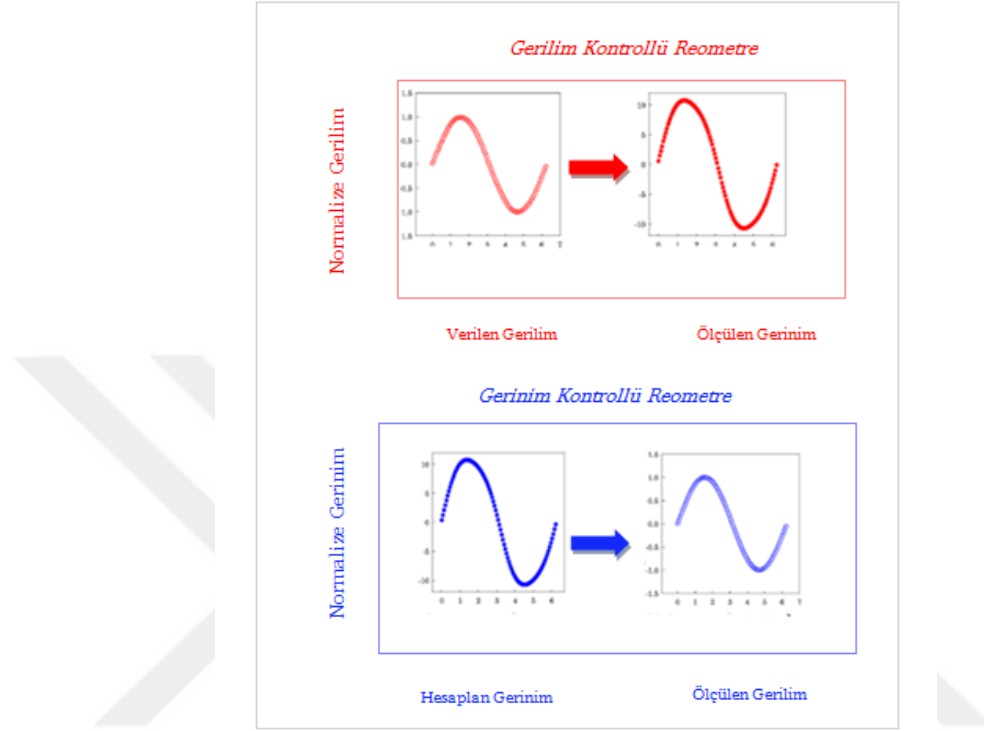


Şekil 2.4 Sabit frekansta gerçekleştirilen gerinim tarama testinin şematik gösterimi [5]

Birçok gıda sisteminin viskoelastik özellikleri küçük veya büyük gerinim testleri kullanılarak belirlenebilir [15, 67]. Endüstriyel ölçekte gerçekleştirilen birçok işlem sırasında malzemeler üzerinde doğrusal viskoelastik (LVE) bölgenin ötesinde gerinimler ve gerilimler uygulanmaktadır [10]. LAOS testi, 40 yıldan uzun süredir çeşitli polimerleri ve polimer eriyiklerini incelemek için kullanılmış olmasına rağmen, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çoğu çalışma, SAOS testini gıdaların reolojik özelliklerini ölçmek için bir araç olarak kullanmaktadır. Son yıllarda gıdaların doğrusal olmayan viskoelastik

davranışlarını ölçmek için yeni teknik geliştirme çabası artmıştır. Bu tekniklerden biri, büyük genlikli salınımlı kayma (LAOS)dır. Lineer viskoelastik modülü $G'(\omega)$ ve $G''(\omega)$ veya lineer viskoelastik uyum değerleri $J'(\omega)$ ve $J''(\omega)$ frekans tarama ölçümleri için hazırlanırken küçük genlikli doğrusal viskoelastik bölgeyi tanımlamak amacıyla kullanılır. Doğrusal olmayan LAOS testi, malzeme yapısı, işlenmesi, kullanım koşulları ve işlevi ile ilgili zengin veriler üretir; doğrusal olmayan reoloji, kurucu modellerin geliştirilmesinde de güçlü bir rehberdir. LAOS parametreleri, karmaşık yapıya sahip materyallerin doğrusal olmayan davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılan yeni kaynaktır [12]. Büyük deformasyonlar altında malzeme tepkilerini ölçmek için LAOS kullanımı, gıda işlemleri sırasında reolojik özelliklerin incelenmesine olanak sağlamaktadır [15, 20]. Geleneksel reoloji, küçük gerilimli mekanik özelliklere odaklanmaktadır. Küçük gerinim testleri, bir numunedeki stres ve zorlanma için ilk yanıtı tanımlamak için kullanışlıdır. Ancak, küçük gerinim testleri doğrusal viskoelastik veya örnek ideal davranış gösterdiği bölgede gerçekleşmektedir. Çiğneme ve yeme süresince yiyecekler üzerinde olan gerinim daha yüksektir. Büyük gerinimli mekanik davranışının, küçük gerinimli davranışdan ziyade oral işleme ve duyuusal davranış ile daha yakından ilişkili olduğu bulunmuştur. Geleneksel küçük genlikli salınım testine benzer şekilde, örnekler bir osilasyon torku veya deformasyonu altına yerleştirilir. Küçük gerinim testlerinde, numunelere uygulanan gerinim genellikle % 1'i geçmez. LAOS testleri genelde %25-%100 gerinim aralığında değişen yüksek gerinimlerde gerçekleşir. Bu büyük gerinimler, gerinime karşı gerilim grafiklerini gösteren Lissajous eğrilerinde sapmalar olarak görülen önemli doğrusal olmayan davranışlara neden olabilir. İleri matematiksel çözümleme üçüncü dereceden harmonik verilerin doğrusal olmayan davranışların hem kapsamını hem de türünü belirlemek için kullanılmasına izin verir. Doğrusal olmayan davranışların kapsamı üçüncü harmonik viskoelastik modüller (G_3' ve G_3'') kullanılarak ölçülebilir [20]. Kontrol mekanizmasından bağımsız olarak, salınım testi, numuneye salınımlı bir tork veya deformasyon vermek için reolojik bir araç kullanır. Gerilim (stress) kontrollü reometreler (LAOStress), numune üzerinde salınımlı bir tork verir ve deformasyon tepkisini kaydederken gerinim (strain) kontrollü reometreler

(LAOStrain), numuneye salınan deformasyon uygular tork tepkisini kaydeder (Şekil 2.5). Gerinim kontrollü reometrenin LAOS verileri, daha az olan atalet etkisinden dolayı stres kontrollü reometrenin verilerinden daha üstünlük sağlar [12, 78].



Şekil 2.5 Gerinim (strain) ve gerilim (stress) kontrollü reometrelerde alınan ölçümlerin şematik gösterimi [78]

LAOS tekniği, son ürünlerin viskoz, elastik ve plastik özelliklerine katkıda bulunan gıda katkı maddelerinin (örneğin proteinler ve polisakaritler) seçimi için kullanılabilir [11]. Endüstriyel ölçekte gerçekleştirilen birçok işlem sırasında (örneğin: işleme, pompalama ve ekstrüzyon) malzemelere uygulanan gerininin yüksek oranda olması nedeniyle gıdanın özellikleri değişebilir. Gıda endüstrisinde reolojik ölçümler, işlenmeden önce hammaddelerin fiziksel karakterizasyonu için üretim sırasında ara ürünler ve son ürünlerin özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir [9, 10]. Hamur reolojisi bir çok çalışmanın konusu olmasına rağmen tekrarlayan bir konudur, araştırmaların çoğu deneysel yaklaşıma veya özünde ampirik olmayan ancak ampirik şekilde ele alınan

reolojik verilere dayanmaktadır. Tahıl bilimi alanındaki reolojik yöntemlerin daha iyi anlaşılması, hamur reolojisi konusunda daha temel araştırmalara neden olmuştur [73]. Doğrusal viskoelastisite teorisinde, depolama ve kayıp modülleri, depolama modülünün malzemenin elastik doğasını temsil ettiği ve kayıp modülünün enerjinin viskoz dağılımını temsil ettiği fiziksel anlamlara sahiptir. Ancak, bu parametreler doğrusal olmayan bölgedeki fiziksel önemini yitirir [79]. Salınım teknikleri, test malzemesinin zaman içinde değişken olan gerinime maruz bırakılmasını içermektedir. Analiz edilmesi en kolay sinyal sinüzoidaldir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Şekil 2.6). Dinamik salınımlı kayma reolojisinde, sinüzoidal bir gerinim (veya stres) sinyali aşağıdaki gibi verilen bir malzemeye uygulanır [80].

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$\dot{\gamma} = \gamma_0 \cos \omega t \quad (2.2)$$

Denklemlerde verilmiş olan γ gerinim değerini, $\dot{\gamma}$ gerinim hızı değerini, γ_0 giriş gerinim genliğini, ω frekans değerini, t zamanı ifade etmektedir [81].

Doğrusal reolojik analiz, LAOS analizine benzer ve her ikisi de, sinüzoidal bir gerinim girişi için malzemenin zaman değişkenli bir gerinime maruz kalmasına dayanır. Küçük gerilme genlikleri için ortaya çıkan stres tepkisi aynı zamanda sinüzoidaldir. Doğrusal viskoelastik (LVE) tepkisi aşağıda belirtildiği gibi ifade edilebilmektedir:

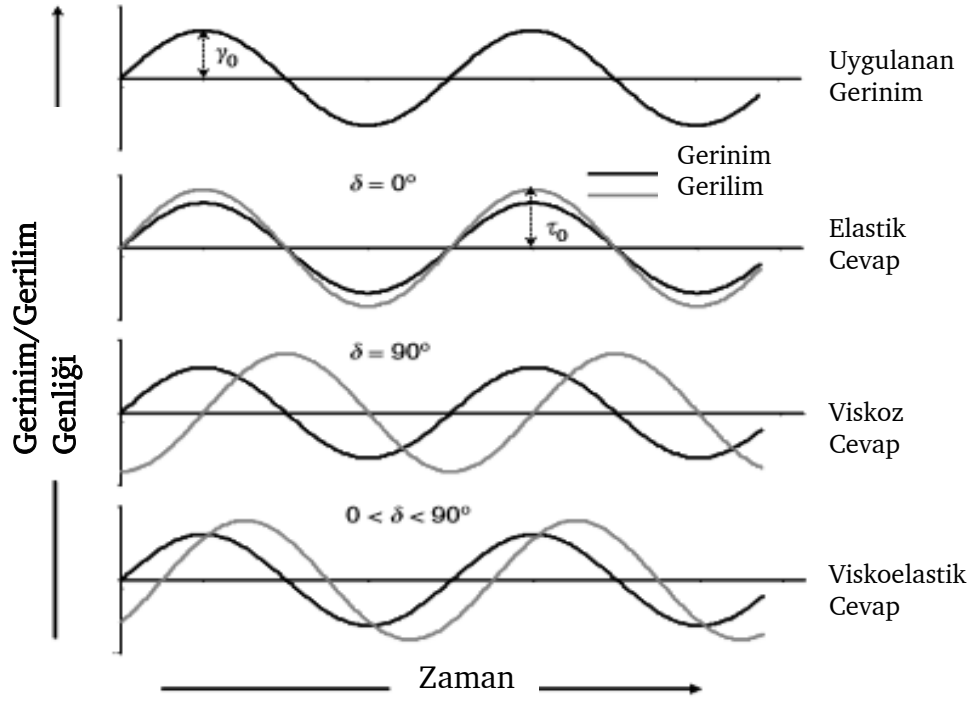
$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.3)$$

Denklemden belirtilen σ_0 değeri stresin genliğini, δ değeri ise faz açısını göstermektedir [82].

$\delta = 0^\circ$ ise Hookean katı

$\delta = 90^\circ$ ise Newtonian sıvı

$0 < \delta < 90^\circ$ ise Viskoelastik materyaldir.



Şekil 2.6 Faz açısı (δ) farklılıklarına bağlı giriş ve cevap fonksiyonlarının şematik gösterimi [82]

Denklem 2.3 aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$\sigma(t) = \gamma_0 [G'_n(\omega, \gamma_0) \sin n\omega t + G''_n(\omega, \gamma_0) \cos n\omega t] \quad (2.4)$$

Burada stresin faz içi bileşeni depolama modülü G' , faz dışı bileşeni ise kayıp modülüdür (G''). Küçük gerinimler (SAOS) için sadece bir harmonik vardır ve dolayısıyla viskoelastikliği açıklayan kompleks modülün ($G^* = G' + jG''$) gerçek ve sanal parçaları sırasıyla G'_1 , G''_1 olarak ifade edilmektedir. Giriş gerilimi genliği kritik bir değerin üstüne çıkarıldığında, stres tepkisi doğrusal değildir ve şu şekilde temsil edilebilir:

$$\sigma(t) = \sum \sigma_n \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (2.5)$$

Uygulanan deformasyon genliklerinin değerleri ne kadar yüksek olursa, bir malzemenin doğrusal olmayan tepkisinin tipik davranışı olarak gözlemlenen harmoniklerin sayısı o kadar fazladır. Doğrusal reolojik analiz, LAOS analizine benzer ve her ikisi de, sinüzoidal bir gerinim girişi için malzemenin zaman değişkenli bir gerinime maruz kalmasına dayanır:

$$\sigma(t) = \sum_{n \text{ odd}} \{ G'_n(\omega, \gamma_0) \sin n\omega t + G''_n(\omega, \gamma_0) \cos n\omega t \} \quad (2.6)$$

Deformasyon genliği değerindeki artış, doğrusal alandan doğrusal olmayan bir alana geçişe neden olarak malzemenin yapısında geri dđnüşü olmayan değişiklikler olduğu anlamına gelmektedir. LAOS yöntemi kullanılarak elde edilen test sonuçlarının analizi, SAOS yöntemlerinde olduğundan daha karmaşıktır ve çeşitli hesaplama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir:

1. Sabit frekans değerinde deformasyon genlik fonksiyonunda G' ve G'' analizi
2. Fourier dönüşümü–FTR kullanılarak zaman serilerinin analizi
3. Lissajous figürlerinin faz düzleminde geometrik ayrışma ve Chebyshev dönüşümü ile analizi [81].

2.3.1 Sabit Frekans Değerinde Deformasyon Genlik Fonksiyonunda G' ve G'' Analizi

Sabit frekans değerinde deformasyon genliğinin fonksiyonunda G' ve G'' eğrilerinin analizi doğrusal viskoelastiğinin belirlenmesinde birincil metot olarak kullanılmaktadır. Ancak bu eğrileri kullanarak doğrusal olmayan davranışların bir analizini yapmak da mümkündür. Deformasyon genliği işlevinde G' ve G'' değişimleri, doğrusal olmayan aralıktaki tipik reolojik davranışları temsil eden birkaç spesifik duruma bölünebilir [84, 85].

Doğrusal olmayan bölgede G' ve G'' eğrileri için dört tipik davranış grubu vardır (Şekil 2.7) [5, 81, 84, 85]:

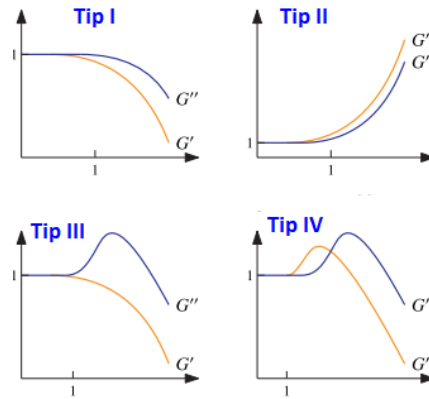
1. Tip I (Gerinim incelmesi): Bu davranış süspansiyonlar ve biyopolimer çözeltileri için tipiktir. Zayıf moleküler etkileşimlerin bir sonucudur ve genellikle karmaşıklıkların oluşabileceği zayıf ilişkili sistemler için gözlemlenir. Büyük genliklerin varlığı deformasyonlara ve oluşturulan yapının tahrip olmasına ve agrega parçacıklarının akış yönüne uygun olarak yeniden şekillenmesine neden olur.

2. Tip II (Gerinim sertleşmesi): Hem elastik hem de viskoz modüller artan genlikle artar. Bu davranış karmaşık ve güçlü bir mikro yapıya sahip sıvılar için elde edilmiştir. Tip II davranışının arkasındaki mekanizma, sıvı molekülleri arasındaki güçlü etkileşimlere dayandırılır. Salınımın genliği arttıkça akışa direnci artıracak şekilde moleküller etkileşime girer. Kayma kuvvetlerinin varlığı

kayma kaynaklı ağ veya jel gibi yapıların oluşturulmasını kolaylaştırır. Bu yapılar genellikle akış yönüne dik olarak yönlendirilir, bu da deformasyon genliğinin artmasıyla G' ve G'' değerlerinde bir artışa neden olur. Bu davranış gıda sistemlerinde nadiren görülür.

3. Tip III (Zayıf gerinim aşımı): Gerilim incelmesi ve gerinim sertleşmesi tepkisini birleştiren davranıştır. Sistem, dinlenme durumunda ve orta derecede kesme kuvvetleri varlığında kararlı bir moleküler yapıya sahiptir. Zayıf gerinim aşımı davranışı G'' eğrisinde görünür bir maksimum oluşumu ile ortaya çıkar. Maksimum değerin varlığı, çalışılan malzemenin kayma kaynaklı bir yapı oluşturabildiğini gösterir. Artan kayıp modülüs lineer bölgenin ötesinde artan gerinim ile azalmaya başlar. Büyük genlikli salınımlı kesme (LAOS) testlerinde gerinim yumuşaması ile birlikte ortaya çıkar [81, 83]. Bu tepki, konsantre emülsiyonlar, süspansiyonlar, macunlar, suda dağılmış yumuşak hidrojel küreler ve elektoreolojik (ER) sıvılar gibi yumuşak camsı malzemelerin olağanüstü bir özelliğidir. Aynı zamanda polimer çözelti sistemlerinde, örneğin blok kopolimer çözeltileri, birleştirici polimer çözeltileri veya ksantan gam çözeltilerinde gözlenmiştir.

4. Tip IV (Güçlü gerinim aşımı): Hem elastik hem de viskoz modüller, başlangıçta ikisi de artmasına rağmen, artan genlikle sonunda azalır. Buradaki mekanizma Tip III ile aynıdır, ancak daha güçlü moleküller arası etkileşime sahiptir (ancak Tip II'deki kadar güçlü değildir). Bu davranış birleştirici polimer çözeltilerinde ve miseler yapılarında meydana gelmektedir.



Şekil 2.7 LAOS genlik taramasında normalize G' ve G'' için dört davranış türü [85]

2.3.2 Zaman Serileri Analizi ve Fourier Dönüşüm Reolojisi (FTR)

Fourier serileri, periyodik olmayan doğrusal bir salınım tepkisinin bir nicel gösterimidir [12]. Bir Fourier dönüşümü temelde zamana bağlı bir sinyalin doğal periyodik katkılarını filtreler ve genliklerini/fazlarını (veya gerçek ve hayali bölümü) frekansın bir fonksiyonu olarak görüntüler [86]. LAOS testlerinin ölçülmesinde kullanılan en yaygın yöntem Fourier dönüşümü (FT) reolojisidir [13, 81]. Sinüzoidal bir gerinim girişi

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad (2.7)$$

için, uygulanan kayma gerilmesinin $\sigma(t; \omega, \gamma_0)$ zamanla değişen sinyali kayma gerilmesine aittir ve gerilme tepkisi, sırasıyla elastik veya viskoz davranışı temsil etmek için iki alternatif versiyon olarak sunulan bir Fourier serisi tarafından tamamen ifade edilebilir [12, 46, 87]:

$$\sigma(t; \omega, \gamma_0) = \gamma_0 \sum_{n \text{ odd}} \{ G'_n(\omega, \gamma_0) \sin n\omega t + G''_n(\omega, \gamma_0) \cos n\omega t \} \quad (\text{elastik}) \quad (2.8)$$

$$\sigma(t; \omega, \gamma_0) = \dot{\gamma}_0 \sum_{n \text{ odd}} \{ \eta''_n(\omega, \gamma_0) \sin n\omega t + \eta'_n(\omega, \gamma_0) \cos n\omega t \} \quad (\text{viskoz}) \quad (2.9)$$

Bu gösterime yalnızca tek harmonikler eklenmiştir, çünkü stres tepkisi kayma geriniminin veya kayma hızının yönüne göre tek simetri olduğu varsayılır, yani koordinat sistemi tersine çevrilirse malzeme tepkisi değişmez [12,13]. Doğrusal bir mekanik sergileyen malzemelere gelince tepki $G'_1(\omega, \gamma_0)$ ve $G''_1(\omega, \gamma_0)$ sabittir ve $n > 1$ olduğu durumlarda ise $G'_n(\omega, \gamma_0) = 0$ ve $G''_n(\omega, \gamma_0) = 0$ 'dır. Ancak, bu yaygın bir durum değildir çünkü materyaller pratikte doğrusal olmayan mekanik tepki göstermektedir. Diğer açılardan, SAOS (küçük genlikli osilatör) testleri, mekanik cevabın birinci harmonik bileşenleri tarafından baskın olduğu reolojik analizlerdir. Bu, $n > 1$ olduğu durumlarda $|G'_1(\omega, \gamma_0)| \gg |G'_n(\omega, \gamma_0)|$ ve $|G''_1(\omega, \gamma_0)| \gg |G''_n(\omega, \gamma_0)|$ anlamına gelir [46].

Alt-harmoniklerin harmonik yoğunluğa oranı, aşağıda görüldüğü gibi, doğrusal olmayan etkileri ölçmek için kullanılır.

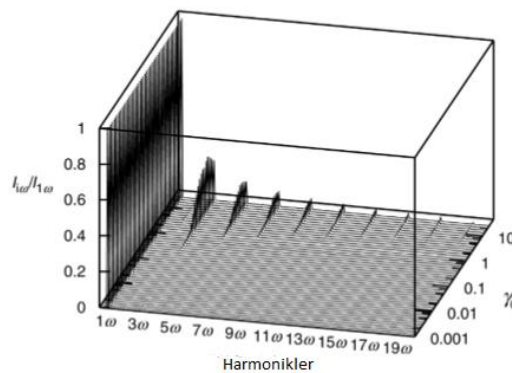
$$I_{n/1}(\omega, \gamma_0) \equiv \frac{I_n(\omega, \gamma_0)}{I_1(\omega, \gamma_0)}, \quad n > 1 \quad (2.10)$$

En sık kullanılan oran olan $I_{3/1}(\omega, \gamma_0)$, cevap sinyalinin tamamen harmonik yanıtta sapmasını temsil eden bir endekstir. Uyarma harmonik sinyali

$\gamma(\omega t) = \gamma_0 \sin(\omega t)$ ifade etmedir ki kayma gerilmesinin tepki sinyali $\sigma(t; \omega, \gamma_0)$, denklem 2.8 tarafından ortaya konduğu gibi, çok yüksek dereceli harmonik bileşenlerin dahil edilmesine rağmen periyodiktir. Yüksek harmonik bileşenlerin analizi için en popüler yöntem,

$$F^*(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.11)$$

tanımına göre integral Fourier dönüşümünün uygulanmasıdır. Materyalin cevabının analizi durumunda, $f(t)$ fonksiyonu, esas olarak stresi $\sigma(t)$ ifade eden zaman serileri şeklinde gösterilen materyalin cevabını temsil eder. Zaman serilerinin doğrudan analizi zaman alıcıdır ve malzemenin cevabında daha yüksek harmonik bileşenlerin varlığının kesin olarak belirlenmesine izin vermez. Bu sorun, deformasyon genliğinin değerlerinin doğrusal viskoelastisite aralığı ile doğrusal olmayan viskoelastisitenin başlangıcındaki bir geçiş aralığında olduğu çalışmalarda özellikle önemlidir. Fourier spektrumunda daha yüksek harmoniklerin ortaya çıkması, sistemin doğrusal viskoelastisite aralığından doğrusal olmayan viskoelastisite aralığına geçişini gösterir. Küçük gerinimlerde (SAOS) için sadece bir harmonik (n) varken, malzemenin doğrusal olmayan tepkisinin tipik davranışı artan harmonik sayılarında görülmektedir. Deformasyon genliği fonksiyonunda bir dizi Fourier spektrumu, Şekil 2.8'de sunulmuştur. Başlangıçta, doğrusal viskoelastik özelliklere karşılık gelen yalnızca ilk harmonik mevcuttur. Daha sonra, üçüncü harmonik belirir ve bu, doğrusallıktan doğrusal olmayan özelliklerin değişimini gösterir. Yüksek harmoniklerin (beşinci, yedinci, vb.) oluşumları, elde edilen yanıtın karmaşıklığını gösterir; bu da karmaşık reolojik özellikleri ifade eder [81].



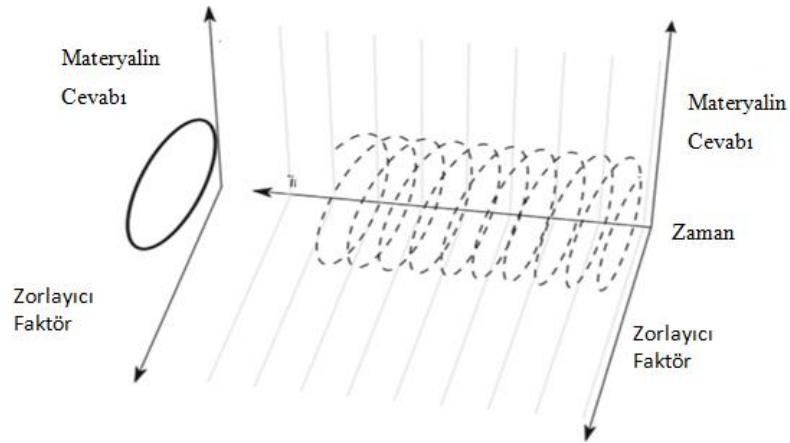
Şekil 2.8 Gerinim genliğinin fonksiyonunda Fourier spektrumu [81]

2.3.3 Lissajous-Bowditch Eğrilerinin Değerlendirilmesi ve Geometrik Analizi

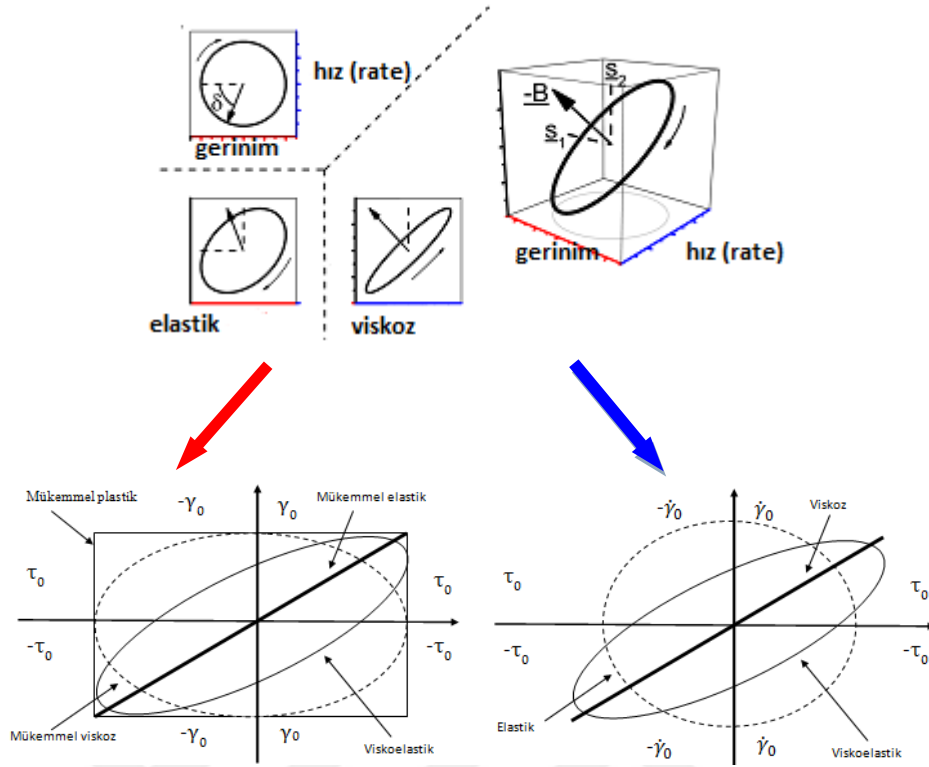
LAOS verilerinin analizi için başka bir alternatif faz düzleminin kullanılmasıdır. Bu düzlem, iki zaman serisinin $x(t)$ ve $y(t)$ dizilerinin x - y düzlemine projeksiyonunun bir sonucu olarak elde edilir (Şekil 2.9). Reolojik araştırmalar söz konusu olduğunda, bu düzlem en yaygın şekilde zamanla sinüs biçimli bir deformasyon olan ve aynı zamanda harmonik bir fonksiyon olan malzemenin tepkisine dayanarak yapılır. Böyle bir dönüşümün sonucunda “Lissajous-Bowditch” adı verilen yeni bir geometrik figür elde edilir. LAOS verilerinin Lissajous rakamlarını kullanarak analizinde kapalı ve simetrik olması gerekir. Uygun Lissajous eğrilerinin analizi, temel reolojik davranışların kolay bir şekilde sınıflandırılmasını sağlar. Lissajous rakamlarının bir başka analizi de bölgelerini ilgilendirmektedir. Gerilim-gerinim Lissajous grafiği, gerinim-gerilme fazı ilişkisindeki bir sınır döngüsüne karşılık gelen $\sigma(t; \omega, \gamma_0)$ ile $\gamma(\omega t)$ grafiğini oluşturur. Limit çevrimin tanımlanmasında yararlanılan yol integrali, enerji dağılım katsayısı (ϕ) elde etmek için kullanılabilir:

$$\phi = Ed/(Ed) = \oint \tau(\omega t) \cdot d\gamma(\omega t) / 4 \cdot \gamma_{max} \cdot \tau_{max} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) ile tanımlanan ϕ dağılım katsayısı, bir döngü içinde dağılan enerjinin miktarını belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Denklemden γ_{max} uygulanan gerinimin genliğini (γ_0), τ_{max} gerilimin en yüksek değerini ifade etmektedir. Denklemin integrali $\gamma(\omega t)$ ve $\tau(\omega t)$ faz düzleminde oluşan Lissajous eğrilerinin alanı ile ideal materyallerin ideal reolojik davranışının yorumlama grafikleri (Şekil 2.10) gösterildiği gibidir [81].

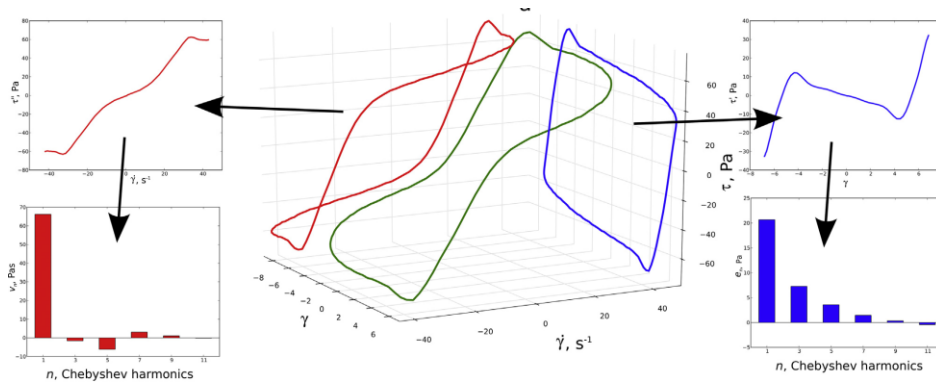


Şekil 2.9 Faz düzlemi ve Lissajous eğrilerinin oluşumu [81]



Şekil 2.10 İdeal materyallerin reolojik davranışının lissajous eğrileri ile yorumlanması [81, 88, 89]

LAOS verilerinin fiziksel olarak anlamlı bir şekilde doğru yorumlanması için, Ewoldt ve Bharadwaj [12] tarafından sunulan 2D Lissajous figürlerinin (Şekil 2.11) doğrusal olmayan stres tepkisi, elastik stres ($\sigma'(x)$) ve viskoz stresin ($\sigma''(y)$) varsayımı olarak ayrıştırılmıştır [79]. Bu ayrışma, ortogonal stres ayrışma yönteminin bir uzantısıdır [13]. Burada $x = \gamma/\gamma_0 = \sin \omega t$ ve $y = \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0 = \cos \omega t$ 'dir.



Şekil 2.11 2D Lissajous figürlerinin ve Chebyshev harmoniklerinin geometrik ayrışımı [90]

Elastik ve viskoz etkilerin toplamı, aşağıda gösterildiği gibi Fourier dekompozisyonu ile ilişkili olup toplam salınımlı gerilme $\sigma(t) = \sigma'(t) + \sigma''(t)$ olarak belirlenmiştir:

$$\sigma' \equiv \frac{\sigma(\gamma, \dot{\gamma}) - \sigma(-\gamma, \dot{\gamma})}{2} = \gamma_0 \Sigma G_n'(\omega, \gamma_0) \sin n\omega t \quad (2.13)$$

$$\sigma'' \equiv \frac{\sigma(\gamma, \dot{\gamma}) - \sigma(\gamma, -\dot{\gamma})}{2} = \gamma_0 \Sigma G_n''(\omega, \gamma_0) \cos n\omega t \quad (2.14)$$

Yapılan aşamalarda Chebyshev polinomları setinin LAOS verilerini anlamak için en mantıklı seçim olduğu savunulmaktadır. Bu fonksiyonların sınırlandırılması, $x=0$ için simetri göstermesi, $[-1, +1]$ alanı üzerinde dikey olması ve LAOS reolojisine hükmedilen Fourier katsayılarıyla ilgili olabilmektedir.

Stres tepkisi üzerindeki elastik ve viskoz etkiler, Chebyshev polinomları ile temsil edilir [12, 91]:

$$\sigma'^{(e)}(\gamma; \omega, \gamma_0) = \gamma_0 \sum_{n \text{ odd}} e_n(\omega, \gamma_0) T_n\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right), n: \text{tek} \quad (2.15)$$

$$\sigma''^{(v)}(\dot{\gamma}; \omega, \gamma_0) = \dot{\gamma}_0 \sum_{n \text{ odd}} v_n(\omega, \gamma_0) T_n\left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right), n: \text{tek} \quad (2.16)$$

Burada, γ/γ_0 ve $\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0$ ortogonalite için $[-1, +1]$ uygun alanlarını türetir. Denklemden gösterilmiş olan $T_n\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)$ ve $T_n\left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right)$ n. dereceden Chebyshev polinomudur. $\gamma/\gamma_0 = \sin \omega t$ ile $\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0 = \cos \omega t$ olmak üzere elastik Chebyshev katsayıları $e_n(\omega, \gamma_0)$, viskoz chebyshev katsayıları $v_n(\omega, \gamma_0)$ ile gösterilir. Birinci derecede $T_1(x) = x$, üçüncü derecede $T_3 = 4x^3 - 3x$ ve beşinci derecede $T_5 = 16x^5 - 20x^3 + 5x$ Chebyshev polinomları e_n ve v_n değerlerinin formülasyonuna yol açar [13, 19]:

$$e_n = G'_n(-1)^{(n-1)/2} \quad n: \text{tek} \quad (2.17)$$

$$v_n = \frac{G''_n}{\omega} \quad n: \text{tek} \quad (2.18)$$

Üçüncü dereceden Chebyshev katsayıları aşağıdaki gibi üçüncü dereceden Fourier katsayılarıyla ilgilidir:

$$e_3 = -|G_3^*| \cos \delta_3 \quad (2.19)$$

$$v_3 = |G_3^*/\omega| \omega \sin \delta_3 \quad (2.20)$$

δ_3 , üçüncü dereceden harmonik katkının başlangıç değeridir ve 0 ile 2π arasında değişmektedir. Böylece, üçüncü harmonik Chebyshev katsayıları, üçüncü dereceden Fourier katsayılarına fiziksel anlam kazandırır [12, 18]. Üçüncü katsayılar, e_3 ve v_3 , ağırlıklı olarak doğrusal olmayan davranışın ana parametreleri olarak analiz edilir. Tipik olarak malzemenin özelliklerinin yorumlanması e_3 ve v_3 'ün değerleri belirlenerek gerçekleştirilir ve viskoelastik davranış, aşağıdaki gibi altı ana kategoriye ayrılır [14, 17, 81]:

$$e_3 = -|G_3^*| \cos \delta_3 \begin{cases} \pi/2 < \delta_3 < 3\pi/2 & > 0 & \text{Gerinim katılaşması} \\ \delta_3 = \pi/2, 3\pi/2 & = 0 & \text{Doğrusal Elastik} \\ -\pi/2 < \delta_3 < \pi/2 & < 0 & \text{Gerinim Yumuşaması} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$v_3 = \frac{|G_3^*|}{\omega} \sin \delta_3 \begin{cases} 0 < \delta_3 < \pi & > 0 & \text{Kayma-kalınlaşması} \\ \delta_3 = 0, \pi & = 0 & \text{Doğrusal Viskoz} \\ \pi < \delta_3 < 2\pi & < 0 & \text{Kayma-incelmesi} \end{cases} \quad (2.22)$$

Stres tepkisinin Chebyshev'in bu ayrışmasının bir sonucu olarak gösterildiği gibi $e_3 > 0$ elastik gerinim katılaşmasını (1), $e_3 < 0$ elastik gerinim yumuşamasını (2), $e_3 = 0$ lineer elastik (3) davranışı tanımlamaktadır. Benzer şekilde, $v_3 > 0$ viskoz kayma kalınlaşması (4), $v_3 < 0$ viskoz kayma incilmesi (5) ve $v_3 = 0$ lineer viskoz (Newtonian) (6) davranışına karşılık gelir. Bu nedenle üçüncü dereceden Fourier katsayılarına üçüncü dereceden Chebyshev katsayılarıyla tamamen aynı şekilde fiziksel bir yorum verilebilir. Chebyshev e_n , v_n katsayıları ve Lissajous eğrilerinin analizi malzemenin doğrusal olmayan özelliklerini tanımlayan değerlerin belirlenmesine olanak sağlar. Bu değerlere dayanarak, aşağıdaki sabitleri tanımlamak mümkündür [7, 13, 19, 80]:

$$G'_M(\omega, \gamma_0) \equiv \frac{d\sigma}{d\gamma} \Big|_{\gamma=0} = \sum_{n \text{ odd}} n G'_n(\omega, \gamma_0) \approx e_1 - 3e_3 + 5e_5 - 7e_7 + \dots \quad (2.23)$$

$$G'_L(\omega, \gamma_0) \equiv \frac{\sigma}{\gamma} \Big|_{\gamma=\pm\gamma_0} = \sum_{n \text{ odd}} (-1)^{(n-1)/2} G'_n(\omega, \gamma_0) \approx e_1 + e_3 + e_5 + e_7 + \dots \quad (2.24)$$

Elastik modül matematiksel çözümleme ile büyük boyutlu bir elastik modül ve minimum boyutlu bir elastik modüle dönüştürülebilir. $G'_M(\omega, \gamma_0)$, $\gamma=0$ 'da ölçülen minimum gerinim modülü veya tanjant modül olarak, $G'_L(\omega, \gamma_0)$ ise $\gamma = \pm \gamma_0$ ' de (maksimum gerinim) ölçülen yüksek gerinim modülü veya sekant modül olarak tanımlanır. Doğrusal viskoelastik bölgede $G'_M = G'_L = G'_1 = G'(\omega, \gamma_0)$ ' dir. Sinüzoidal bir gerinim girişi için, gerinimin sıfır olduğu noktada, gerinim hızı lokal bir maksimumdur ve bu nedenle strese viskoz katkısı lokal olarak sabittir. Bu, streste herhangi bir değişikliğin sadece elastikiyetle ilişkili olması gerektiği anlamına gelir.

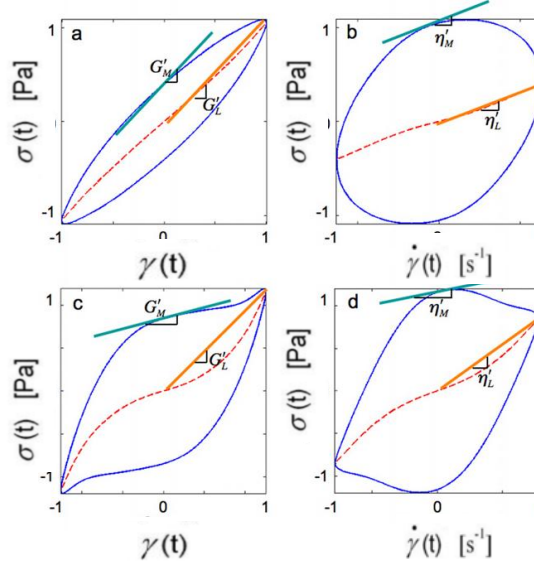
Uygulanan büyük gerinim için, $G'_L > G'_M$ döngü içinde bir malzemenin gerinim sertleşmesi davranışının $G'_L < G'_M$ ise döngü içi gerinim yumuşaması davranışının göstergesidir. Yüksek ve minimum gerinim elastik modüllerine uygun olarak, benzer bir şekilde bir çift viskoz modül de tanımlanmıştır. Gerilim oranına göre gerilme tepkisinin türetilmesi minimum gerinim hızı dinamik viskozite (η'_M) ve yüksek gerinim hızı dinamik viskozite (η'_L) olarak ifade edilir. Doğrusal bölgede $\eta'_M = \eta'_L = \eta'_1 = \eta'(\omega)$ ' ye eşittir [12, 18, 91]

$$\eta'_M \equiv \frac{d\sigma}{d\dot{\gamma}}_{\dot{\gamma}=0} = \frac{1}{\omega} \sum_{n \text{ odd}} n G''_n (-1)^{n-1/2} = v_1 - 3v_3 + \dots \quad (2.25)$$

$$\eta'_L \equiv \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}_{\dot{\gamma}=0} = \frac{1}{\omega} \sum_{n \text{ odd}} G''_n = v_1 + v_3 + \dots \quad (2.26)$$

Daha önce yapılan tanımlamalara benzer şekilde $\eta'_L / \eta'_M > 1$ olduğunda malzemenin döngü içi kayma kalınlaşması davranışı sergilediği, $\eta'_L / \eta'_M < 1$ olduğunda ise döngü içi kayma incelmesi davranışı sergilediği anlamına gelmektedir. Belirtilen $G'_L, G'_M, \eta'_L, \eta'_M$ parametrelerinin Lissajous eğrilerinde geometrik bir yorumu Şekil 2.12' de gösterilmiştir. G'_L/G'_M ve η'_L/η'_M oranının hesaplanması şekil değiştirme ve kaymaya bağlı davranışın belirlenmesi için tamamlayıcı yorum oluşturmaktadır. Elastik modüllerden ve dinamik viskozitelerden hesaplanabilen gerinim katılaşma (S) ve kayma kalınlaşma (T) oranları olarak da adlandırılan iki başka parametre daha vardır:

$$S(\omega, \gamma_0) \equiv \frac{G'_L(\omega, \gamma_0) - G'_M(\omega, \gamma_0)}{G'_L(\omega, \gamma_0)} = \frac{4e_3 + \dots}{e_1 + e_3 + \dots} \quad (2.27)$$



Şekil 2.12 Doğrusal bölgede viskoelastik yanıtı ait elastik modül (a) ve dinamik viskozite (b), doğrusal olmayan bölgede viskoelastik yanıtı ait elastik modül (c) ve dinamik viskozite (d) [28]

Belirtilen denklemine göre $S(\omega, \gamma_0) = 0$ doğrusal elastik bir yanıtı, $S(\omega, \gamma_0) > 0$ döngü içi gerinim katılaşması ve $S(\omega, \gamma_0) < 0$ döngü gerinim yumuşaması yanıtına karşılık gelir.

$$T(\omega, \gamma_0) \equiv \frac{\eta'_L(\omega, \gamma_0) - \eta'_M(\omega, \gamma_0)}{\eta'_L(\omega, \gamma_0)} = \frac{4\nu_3 + \dots}{\nu_1 + \nu_3 + \dots} \quad (2.28)$$

burada tek bir harmonik değerinde lineer viskoz yanıt için $T(\omega, \gamma_0) = 0$ dır. $T(\omega, \gamma_0) > 0$ olduğunda döngü içi kayma kalınlaşması ve $T(\omega, \gamma_0) < 0$ döngü içi kayma incilmesi reolojik davranışını yansıtır [7, 13, 19, 80].

Son yıllarda üretim prosesi sırasında gerçekleşen yüksek deformasyonlara karşı reolojik davranışın karakterize edilebilmesi için LAOS çalışmalarına yoğunlaşmaya başlanılmıştır. Fırın ürünlerinin üretim basamaklarında başlangıç ve ara ürüne yüksek deformasyonlar uygulanmaktadır. LAOS parametrelerinden elde edilen sonuçlar buğday ürünlerinin doğrusal olmayan bölgedeki davranışı hakkında yeni bilgiler sunmaktadır. Ekşi hamur üretimi boyunca mikroorganizma gelişimine bağlı pH düşüşü ve enzim aktivitesi hamurun reolojik özelliklerini değiştirmektedir. Ekmek üretim aşamasında ilave edilen ekşi hamurun proses basamaklarında hamurun reolojik özelliklerine etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için farklı konsantrasyonlarda ekşi hamur

katkılı ekmek hamur üretimi yapılmış ve LAOS parametreleri ölçülmüştür. Fermentasyon koşullarının (sıcaklık, süre gibi), hamur yoğurma süresi ve hızının belirlenmesi için LAOS parametrelerinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca tez çalışmasında ekmek sertlik değerleri ile LAOS verileri arasındaki korelasyon incelenmiştir. Elde edilen veriler ekşi hamur katkılı hamur üretiminde yeni kontrol yöntemleri için önemli bir kaynak oluşturacağı ve bunun sonucu olarak istenen tekstürel özelliklere sahip ekmeklerin üretileceği düşünülmektedir.



3.1 Materyal

3.1.1 Kullanılan Ham Maddeler

Ekşi hamur ekmek üretiminde özel amaçlı buğday unun kullanılabileceği Türk Gıda Kodeksi Tebliğinde yer almaktadır. Bu bilgi doğrultusunda tez çalışmasında özel amaçlı buğday unu tercih edilmiştir. Ekmeklerin üretimi sırasında ilave edilen kuru malzemeler (maya, tuz, şeker) yerel marketten satın alınmıştır. Una ilave edilen kuru maddelerin % değerleri un ağırlığı esas alınarak yapılmıştır.

3.1.2 Laktik Asit Bakterileri (LAB)

Ekşi hamur üretiminde starter kültür olarak obligat heterofermantatif *Lactobacillus brevis* E25 kullanılmıştır. Kullanılan *Lactobacillus brevis* E25, Pamukkale Üniversitesi'ndeki Gıda Mühendisliği kültür koleksiyonundan (WDCM 1019) alınan ekşi hamur izolatıdır [92, 93].

3.2 Yöntem

3.2.1 Unun Kalite Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Analizler

3.2.1.1 Rutubet Miktar Tayini

Sabit tartıma getirilerek daraları belirlenen tartım kaplarına 2 g un tartılmış, etüvde 135°C'de 3 saat bekletilerek sabit tartıma gelmesi sağlanmıştır. Sabit tartıma gelen örnek oda sıcaklığına gelmesi için desikatörde bekletilmiş ve tekrar tartım alınarak % rutubet miktarı tayin edilmiştir [94].

3.2.1.2 Su kaldırma kapasitesi

Buğday unun su kaldırma değeri Farinograf (Brabender, Almanya) cihazı kullanılarak ICC Metod: 115/1 (1992)' ye göre belirlenmiştir. Analiz sonucunda

elde edilen farinogram değerinden ekmek üretimi sırasında una katılacak su hacminin tayininde yararlanılmıştır [95].

3.2.1.3 Protein Miktar Tayini

Kjeldal prensibine göre protein cihazı (Büchi, İsviçre) ile unun protein değeri belirlenmiştir. Çevirme faktörü olarak 5,7 değeri kullanılmıştır [94].

3.2.1.4 Kül Tayini

Sabit tartıma getirilen porselen krozelere 2,5-3 g un örneğinden tartılmış beyaz kül olana kadar kül fırınında (WiseTherm-Daihan FH-03, Kore) 550°C de yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına gelmesi için desikatörde soğutulduktan sonra % kül değeri hesaplanmıştır [94].

3.2.2 Starter Kültür Hazırlanması

Sükrozlu (%1) 10 mL MRS broth'a gliserol stoktaki kültürlerden 100 µL ekim yapılmıştır. 37°C'de 1 gece ön geliştirmeye bırakılmıştır. Ön gelişmeyi tamamlayan kültürlerden %1 sukroz içeren 250 mL MRS broth'a %1 olacak şekilde 37°C'de 1 gece inkübasyona bırakılmıştır. Gelişen kültürleri 50 mL'lik 5 adet santrifüj tüpüne aktarılmış ve 8000 rpm de 15 dk santrifüj edilmiştir. Süpernatantı uzaklaştırılmış, biriken bakteri hücreleri üzerine 30 mL steril PBS ilave edip iyice karıştırıldıktan sonra 8000 rpm de 15 dk santrifüjlenmiştir. Süpernatantı uzaklaştırılmış ve PBS ile yıkama işlemini bir kez daha tekrarlanmıştır. İkinci yıkama işleminden sonra santrifüjlenen örneklerin süpernatantını uzaklaştırılmış ve son olarak 5 mL PBS ilave edilerek çözündürülmüştür [92, 93].

3.2.3 Ekşi Hamur Üretimi

Ekşi hamur hazırlanmasında spontan ve kontrollü (starter kültür ilaveli) olmak üzere iki farklı fermentasyon yöntemi kullanılmıştır. Ekşi hamur üretimi sırasında kullanılan un ve suyun miktarları ürünün kalitesi etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. Literatür çalışmalarında 200 hamur verimi esas alınarak hazırlanan ekşi hamur örneklerinin daha etkili sonuç verdiği belirtilmektedir [33, 65, 96]. Bu nedenle tez çalışmasında hamur verimi 200

olan örnekler hazırlanmıştır (Hamur verimi: $[(\text{tartılan un (g)} + \text{ilave edilen su (mL)})/\text{tartılan un (g)}]$). Ekşi hamur hazırlanmasında spontan ve kontrollü (starter kültür ilaveli) olmak üzere iki farklı fermentasyon yöntemi kullanılmıştır.

3.2.3.1 Tek Kademeli Spontan Ekşi Hamur Fermentasyonu (EH-1 (SH)):

Un ve su eşit miktarda karıştırıldıktan sonra iyice homojenize olması için 3 dak boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen hamur örneği 30°C de 20 saat boyunca %85 bağıl nemli ortamda fermentasyona bırakılmıştır.

3.2.3.2 İki Kademeli Spontan Ekşi Hamur Fermentasyonu (EH-2 (OSH)):

100 g un ve 100 ml su karıştırılarak 30°C de 20 saat fermentasyona bırakılmıştır. Elde edilen spontan ekşi hamurdan 40 g tartılarak 180 g su ve 180 g un karışımına ilave edilmiş ve 30°C de 20 saat boyunca %85 bağıl nemli ortamda fermentasyona bırakılmıştır.

3.2.3.3 Starter Kültür İlaveli Ekşi Hamur Fermentasyonu (EH-3 (LH)):

Un ve su eşit miktara karıştırıldıktan sonra üzerine yaklaşık 5×10^7 Log kob/g canlı hücre olacak şekilde bakteri solüsyonundan ilave edilmiştir. Hazırlanan hamurun iyice homojenize olması için bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen hamur örneği 30°C de 20 saat boyunca %85 bağıl nemli ortamda fermentasyona bırakılmıştır.

3.2.4 Ekşi Hamur Katkılı Hamur Üretimi

Ekşi hamur katkıli hamur üretimine ait formülasyonlar Tablo 3.1' de gösterilmiştir. Belirlenen formülasyona göre hazırlanan hamur örnekleri iklimlendirme kabininde (Nuve TK252, Türkiye) fermentasyona bırakılmıştır. Tüm analizler 0., 1., 2. ve 3. saatte gerçekleştirilmiştir [97, 98].

Tablo 3.1 Hamur formülasyonu

Ekşi Hamur İlave Hamur Örnekleri (SH/LH/OSH)					
Bileşenler	%0	%10	%20	%30	%40
Un ¹	250	225	200	175	150
Tuz	4	4	4	4	4
Şeker	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Maya	-	-	-	-	-
Ekşi Hamur	-	50	100	150	200
Su ²	145,5	120,5	95,5	70,5	45,5

¹250 g un esas alınarak hesaplanan miktarlar (g)

²Farinograf su absorpsiyon değeri (%) esas alınarak ilave yapılmıştır.

3.2.5 Ekşi Hamur ve Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örneklerinin Kimyasal ve Mikrobiyolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.5.1 Toplam Titre Edilebilir Asit ve pH Tayini

Ekşi hamurun (20. saat) ve ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin belirlenen dört süre için (0., 1., 2., ve 3. Saat) pH değeri, pH metre (HANNA Instruments, Almanya) kullanılarak potansiyometrik ölçüm ile belirlenmiştir. Toplam titre edilebilir asitlik (TTA) ise volumetrik yöntem ile tayin edilmiştir. TTA değeri, pH değerinin 8,5'e yükselmesi için 10 g hamur için litrede tüketilen 0,1 mol equi NaOH miktarı olarak ifade edilmiştir. Yüksek viskozitesinden dolayı ekşi hamurun pH değeri ölçülürken prob örneğe direkt daldırılmıştır. Titre edilebilirlik tayininde ise örnekler 90 mL su ile homojenize edildikten sonra analiz gerçekleştirilmiştir [99, 100, 101].

3.2.5.2 Mikrobiyolojik Analizleri

Laktik asit bakteri (LAB) sayısının belirlenmesi için 10 g hamur 90 ml steril pepton su (% 1 w/v) ve NaCl (% 0.9, w/v) çözeltisi kullanılarak stomacherde homojen hale getirilmiş ve bu örneklerden dilüsyon serileri hazırlanmıştır. Uygun dilüsyonlardan Man Rogosa Sharpe Agara (MRS Agar) (Merck 1.10660) spot yöntemi kullanılarak ekim yapılmış (her spot hacmi 20 µL) ve 37°C'de 24-48 saat inkübasyona bırakılmıştır. Maya sayımları Saboraud dextrose agar (Merck, Almanya) kullanılarak yapılmıştır. Ekim yapılan besiyerleri 25-27°C'de

en az üç gün inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonucu yapılan sayımların sonucu log kob/g olarak verilmiştir.

3.2.5.3 Amino asit Analizi

Ekşi hamur örneklerinin (20. Saat) amino asit profillerinin tespitine yönelik amino asit konsantrasyon ölçümleri LC-MS/MS sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, beş farklı konsantrasyondaki standartları içeren kalibratör seti, kararlı izotop etiketli iç standart karışımı, mobil fazlar, reaktifler, kromatografik ayırım ve kütle dedeksiyon metot parametreleri ile, numune hazırlık prosedürünün bulunduğu Jasem LC-MS/MS kantitatif amino asit analiz kiti (SEM Laboratuvar Cihazları Pazarlama San. ve Tic. A.Ş., İstanbul, Türkiye) uygulanmıştır. Hedef amino asitlerin konsantrasyonu, elektrosprey iyonizasyonu (ESI) temelli çoklu reaksiyon izleme (MRM) modu kullanılarak belirlenmiştir. Türevlendirme işlemi gerektirmeyen kit numune hazırlığı şu şekilde uygulanmıştır: 0,5 g örnek %1 formik asit içeren ACN:H₂O (5 mL) karışımında 50 µL numune viale transfer edilmiş ve üzerine sırasıyla, 50 µL kararlı izotop etiketli iç standart karışımı ile 700 µL reaktif-1 ilave edilmiştir. Karışım 5 saniye boyunca vortekslenmiştir. Tüm numuneler yukarıda belirtilmiş prosedürler doğrultusunda hazırlanarak LC-MS/MS sistemine enjekte edilmiştir. Amino asitlerin miktarlandırılması için gerekli olan kalibrasyon eğrisi, beş nokta kalibrasyon setinin kit numune hazırlığı gereğince hazırlanması ve LC-MS/MS sisteminde okutulmasıyla elde edilmiştir. Agilent 1260 Infinity HPLC sistemi (Agilent Technologies, Santa Clara, ABD) kullanılarak, 30°C'ye ayarlanmış Jasem amino asit analitik kolonuna, hazırlanmış numuneden 3 µL enjekte edilmiştir. Kromatografik ayırım, 0,7 mL/dk akışla gradient programlı mobil faz A ve B ile 7,5 dakikalık analiz süresinde tamamlanmıştır. Kütle spektrofotometrik deteksiyon ise pozitif iyonlaşma modunda ESI donanımlı Agilent 6460 tandem kütle spektrometresi (Agilent Technologies, Santa Clara, ABD) cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Kütle dedektörü parametreleri şu şekilde ayarlanmıştır: gaz sıcaklığı 150°C, gaz akışı 10L/dak, nebulizer basıncı 40 psi ve +2000 volt kapiler voltaj.

3.2.6 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

3.2.6.1 Ekstensograf Denemeleri

Hamur örneklerinin gerilme karakteristikleri ekstensograf cihazı ile belirlenmiştir. Bu amaçla, ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin uzayabilirlik (E), uzamaya karşı maksimum direnç (R_{max}), R_{max} ve E arasındaki oran (R_{max}/E) üzerindeki etkisini incelemek için bir Brabender ekstensograf (Brabender, Duisburg, Almanya) cihazı kullanılmıştır. 150 g olacak şekilde silindirik kalıplanmış hamur örnekleri 30°C'de ekstensograf kabininde 45, 90 ve 135 dakika bekletilerek ölçümler alınmıştır [102].

3.2.6.2 Küçük ve Büyük Genlikli Salınımlı Kayma (SAOS ve LAOS) Testlerinin Uygulanması

SAOS ve LAOS ölçümleri, gerinim kontrollü modda sıcaklık kontrollü reometre (Anton Paar MCR 302, Avusturya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kayma etkisini ortadan kaldırmak ve suyun buharlaşmasını azaltmak için 25 mm'lik zımpara kaplı bir paralel plaka geometrisi ve zımpara kapak plaka kullanılmıştır. Ölçümler plakalar arasında 2 mm boşluk bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm plakası sistemine hamur örneği yerleştirildikten sonra yapı geri kazanımı için normal kuvvet 1 N olana kadar bekletilmiştir. Hamur örneklerinin doğrusal olmayan özellikleri, 25°C' de 0,005 ve % 200 gerinim değerleri arasında yirmi dört gerinim noktası için iki tekrarlı gerçekleştirilmiştir. Ölçümler belirlenen fermentasyon süreleri için gerçekleştirilmiştir. Ortalama değerler üzerinde grafikler çizilmiştir. Mikserde hamur oluşumu sırasında deformasyon dinamik aralığını simüle etmek için frekans değeri 10 rad/s seçilmiştir. Tüm doğrusal olmayan veriler (Lissajous eğirleri, LAOS dataları) Anton Paar™ tarafından sağlanan RheoCompass™ Yazılımı ve Option Raw verileri kullanılarak elde edilmiştir. Lissajous-Bowditch eğrilerine ait grafikler OriginPro (ver. 2017) kullanılarak çizilmiştir [87].

3.2.7 Ekmek Formülasyonu

Ekmek denemelerinde Angioloni vd. [104] ve Gocmen vd. [48] tarafından belirlenmiş formülasyonlar modifiye edilerek uygulanmıştır. Tablo 3.2'de

belirtilen formülasyonlara göre direkt hamur üretim yöntemi kullanılmıştır. Tüm hamur örnekleri 250 g un kullanılarak mutfak mikserinde (Kitchen-Aid, ABD) karıştırılarak hazırlanmıştır. Hamuru hazırlamada kanca tipi mikser başlığı kullanılmıştır ve 6 dak boyunca yoğrulmuştur (2 dak 2. seviyede, devamındaki 2 dak boyunca 4. seviyede, son 2 dak boyunca ise 2. seviyede yoğurma işlemi uygulanmıştır). Fermentasyon basamağı için iklimlendirme kabini (Nüve, Türkiye) kullanmıştır. Ekmek hamuru fermentasyon basamakları: Ana fermentasyon (30°C’de %85 bağıl nemde 60 dak), Havalandırma (30°C’de %85 bağıl nemde 30 dak), Şekil verme (30°C de %85 bağıl nemde 30 dak). Fermentasyon tamamlandığında ekmek hamurları üst sıcaklığı 200°C ve alt sıcaklığı 190°C olan endüstriyel fırında (Fimak, Türkiye) 40 dak boyunca pişirilmiştir.

Tablo 3.2 Ekmek formülasyonu

Ekşi Hamur İlave Hamur Örnekleri (SH/LH/OSH)					
Bileşenler	%0	%10	%20	%30	%40
Un ¹	250	225	200	175	150
Tuz	4	4	4	4	4
Şeker	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Maya	-	-	-	-	-
Ekşi Hamur	-	50	100	150	200
Su ²	145,5	120,5	95,5	70,5	45,5

¹250 g un esas alınarak hesaplanan miktarlar (g)

²Farinograf su absorpsiyon değeri (%) esas alınarak ilave yapılmıştır.

3.2.8 Ekmek Analizleri

Piştirilen ekmek örneklerine renk, ekmek spesifik hacim belirlenmesi ve tekstür analizleri yapılmıştır.

3.2.8.1 Renk Analizi

Çalışmada farklı ekşi hamur konsantrasyonu içeren ekmek örneklerinin kabuk ve kırıntı renginin L*, a* ve b* değerleri renk ölçüm cihazı kullanılarak (Konica Minolta CR-100, Japonya) ölçülmüştür. L* değeri 0’ dan 100’e beyazlığı, a* değeri pozitif değerde kırmızı rengi, negatif değerde yeşil rengi, b* değeri pozitif değerde sarı, negatif değerde mavi rengi ifade etmektedir [105].

3.2.8.2 Ekmek hacmi

Ekmek örneklerinin hacim değerleri AACC [106] tarafından onaylanmış bir metot olan (metot 10-05) kolza tohumu yer değiştirme metodu kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler 25°C’ de iki paralel ve iki tekerrür olarak hazırlanan ekmek örnekleri üzerine ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve hacim değerlerinin ortalaması alınmıştır. Ayrıca her bir ekmek örneği için spesifik hacim hesaplanmıştır.

3.2.8.3 Ekmek Sertlik Değeri Analizi

Ekmek örneklerinin sertlik değerleri Texture Analyzer (Stable Mycro Systems TA TX Plus, İngiltere) kullanılarak yapılmıştır. Tekstür ölçümünde cihaz parametrelerinden yük hücresi kuvveti 5 g, test hızı 1 mm/s, tekrar test etme hızı 5 mm/s, birinci ve ikinci sıkıştırma arasındaki bekleme süresi 5 saniye olacak şekilde ayarlanmış, 36 mm çapında silindirik sıkıştırma probu kullanılmıştır. Hazırlanan ekmek örneklerinden 1,25 cm eninde parçalar kesilmiş, iki parça üst üste konularak cihazın ölçüm tablasına yerleştirilmiştir. Her örnek için %30 oranında sıkıştırma için gerekli olan kuvvet ölçülmüş ve analiz sonunda sertlik değeri “g” olarak kaydedilmiştir [107].

3.2.9 İstatistiksel Analizler

İstatistiksel analizler, “JMP yazılım programının 9. Sürümü” kullanılarak (SAS Institute, Inc.) yapılmıştır. Örneklerle ait ortalamalar arasında farkı belirlemek için tek yönlü Varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Ortalamaların istatistiksel değerlendirmesinde Tukey HSD çoklu varyans analizi uygulanmıştır. %200 gerinim noktasında ekşi hamur katkılı hamur örneklerine ait G'_L ve η'_L değerleri ile ekmek sertlik değerlerinin ilişkisini irdelemek ve v_3/v_1 değerleri ile ekmek hacim değerlerinin ilişkisini incelemek için Pearson korelasyon analizi yapılmıştır.

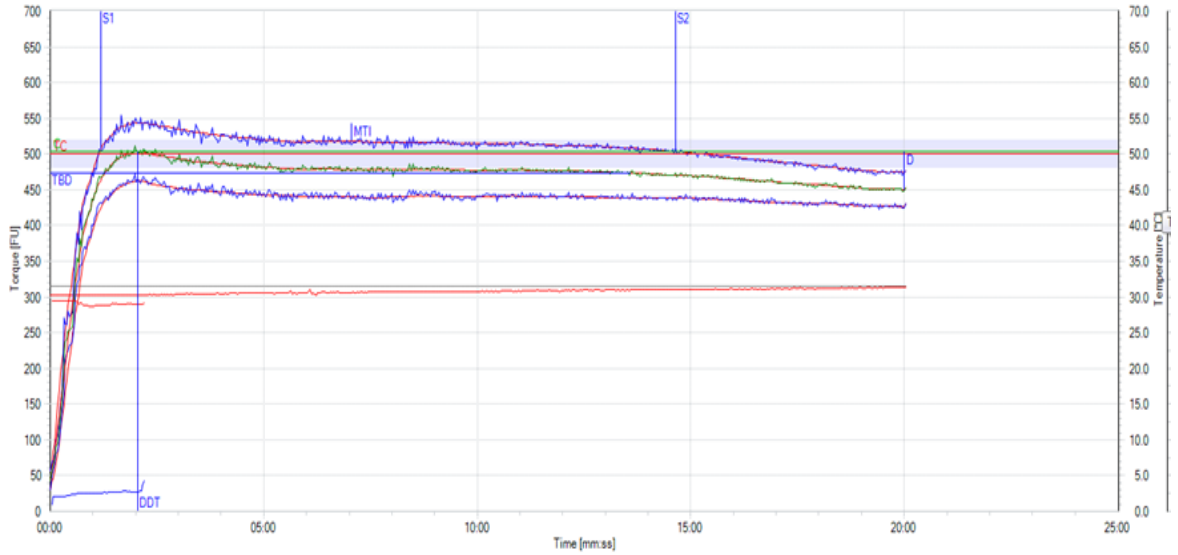
4.1 Kullanılan Buğday Ununun Kimyasal/Teknolojik Özellikleri

Ekşi hamur üretiminde kullanılan özel amaçlı buğday ununa ait özellikler belirlenerek Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Un örneğine ait kimyasal ve teknolojik özellikler

Rutubet (%)	Kül (%)	Protein (Nx5,7) (%)
13,1	0,63	10,32

Hamur hazırlamada kullanılan unun farinograf grafiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Unun farinogram su absorpsiyonu %58,2, farinogram gelişme süresi 2,2 dak, farinogram stabilite süresi 13,28 dak olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1 Kullanılan unun farinograf grafiği

4.2 Ekşi Hamur Örneklerinin Mikrobiyolojik ve Kimyasal Özellikleri

4.2.1 Ekşi Hamurların pH ve Titre Edilebilir Titrasyon Asit Değerleri

Tek kademeli, iki kademeli spontan fermentasyon ve *Lb. brevis* E25 katılarak hazırlanan tek kültürlü ekşi hamur örneklerinin 20. Saat pH ve TTA sonuçları Tablo 4. 2' de verilmiştir.

Tablo 4.2 Ekşi hamur örneklerinin pH ve TTA değerleri

Ekşi Hamur Örneği	pH	TTA
Spontan (EH-1)	4,63±0,02 ^c	6,05±0,3 ^c
Olgun Spontan (EH-2)	3,81±0,05 ^b	9,6±0,2 ^b
<i>Lb. brevis</i> E25 ilaveli (EH-3)	3,58±0,06 ^a	13,7±0,3 ^a

*Aynı kolonda farklı harfler ile gösterilen ortalamalar istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0,05$).

Lb. brevis E25 ilave edilerek hazırlanan EH-3 örneği spontan örneklerle göre karşılaştırıldığında pH değeri daha düşük ve TTA sonuçları daha yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Spontan fermentasyon sırasında ortamda yeterli miktarda LAB olmaması nedeniyle laktik asit, asetik asit gibi organik asit metabolitlerinin üretilmediği buna bağlı olarak pH değerinin daha yüksek ve TTA değerinin ise daha düşük çıktığı düşünülmektedir. Yıldırım and Arici [107] tarafından yapılan çalışmada starter kültür ve iki kademeli spontan fermentasyon yöntemi kullanılarak aynı sıcaklık koşullarında (30°C'de) elde edilen hamur örneklerinin pH değerleri sırasıyla 3,91 ve 3,98 olarak bildirilmiştir. Mantzaourani vd. [101] tarafından yapılan başka bir çalışmada starter kültür ile hazırlanan ekşi hamur örneğinin aynı sıcaklık ve süre içerisinde pH değerinin 3,8 olduğu tespit edilmiştir. Banu and Aprodu [34] tarafından yapılan çalışmada starter kültür ilavesi ile hazırlanan ekşi hamur örneklerinin pH değeri (3,56; 3,88) spontan fermentasyon (pH: 4,88) ile elde edilenlere göre daha düşük bulunmuştur. Kim vd. [84] tarafından yapılan çalışmada tek kademeli spontan (preferment) fermentasyonla hazırlanan 20. saat ekşi hamur örneğine ait grafik incelendiğinde pH değerinin yaklaşık 5 seviyesine indiği TTA değerinin ise 20 mL değerlerine yükseldiği belirlenmiştir.

Ekşi hamur üretiminde spontan hamur örnekleri için kademe sayısının artışı ortamda bulunan LAB sayısının yeterli düzeye gelmesini sağlaması ile yeterli miktarda oluşan metabolit pH ve TTA değerlerinin starter kültür ilaveli hamura yaklaşmasını sağlamıştır. Bu doğrultuda literatürde verilen sonuçlar tespit ettiğimiz bulgular ile paralellik göstermiştir.

4.2.2 Ekşi Hamurların Mikrobiyolojik Özellikleri

Ekşi hamur örneklerinin 20. saatine ait LAB ve Maya-Küf sayıları Tablo 4.3’de verilmiştir. En düşük LAB (log kob/g) sayısına tek kademeli spontan fermentasyon ile elde edilen EH-1 (SH) örneği sahip iken ($p<0,05$), en düşük maya-küf gelişimine *Lb.brevis* E25 ile elde edilen EH-3 (LH) örneği sahiptir ($p<0,05$). Maya gelişimi $7,01\pm0,01$ log kob/mL değeri ile en yüksek iki kademeli fermentasyon ile gerçekleşen EH-2 (OSH) örneğinde tespit edilmiştir.

Tablo 4.3 Ekşi hamur örneklerinin LAB ve Maya sayıları

Ekşi Hamur Örneği	LAB (Log kob/g)	Maya (Log kob/g)
EH-1 (SH)	$7,92\pm0,84^c$	$4,26\pm0,02^b$
EH-2 (OSH)	$9,58\pm0,28^a$	$7,01\pm0,01^a$
EH-3 (LH)	$9,33\pm0,11^b$	$4,11\pm0,08^c$

*Aynı sütundaki farklı küçük harfler, fermentasyon yönteminin LAB ve maya sayısı üzerine etkisini göstermektedir ($p<0,05$).

Bir önceki spontan ekşi hamurdan ilave edilerek hazırlanan EH-2 (OSH) örneğinde kademe sayısının artması ile LAB artışı net olarak görülmektedir. EH-2 (OSH) hamurunda LAB sayısının yeterli düzeye ulaşması EH-3 (LH) hamuruna yakın sonuç vermesini sağlamıştır. LAB starter kültürünün ekşi hamur ortamına adaptasyonun iyi olması nedeniyle gelişme kapasitesi yüksektir ve buğday ürünleri için starter kültür olarak kullanılma özelliği kazandırmaktadır [108]. Minervini vd. [109] tarafından yapılan çalışmada aynı sürede fermentasyona tabi tutulan kontrol ve starter kültür ilaveli ekşi hamur örnekleri arasında 10.000 katlık LAB sayımı farkı olduğu rapor edilmiştir. Elde edilen bu bilgi LH hamurunun OSH’ a göre daha yüksek LAB sayımı vermesini destekler niteliktedir.

4.2.3 Ekşi Hamurların Serbest Amino Asit Miktarları

Hamurun 20. saat fermentasyonu sonucunda elde edilen serbest amino asit sonuçları, Tablo 4.4'de verilmiştir. LC-MS/MS ile analiz edilen üç ekşi hamur örneğinde 24 aminoasit tespit edilmiştir. SH örneğinde glutamik asit miktarı açısından ($11,718 \pm 1,25$ mg/100 g) en yüksek değere sahip iken OSH ve LH örneklerinde lösin miktarı en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür (sırasıyla $17,469 \pm 2,58$; $28,479 \pm 0,29$ mg/100 g). *Lb. brevis* E-25 ilave edilerek hazırlanan LH örneğinde toplam serbest amino asit miktarının ($166,98 \pm 4,96$ mg/100 g) spontan hamur örneklerine göre anlamlı düzeyde daha fazla olduğu görülmektedir ($p < 0,05$). Ekşi hamur fermentasyonları sırasında ortaya çıkan protein yıkımı, hamur yapısına ve ekşi hamurunun lezzetine doğrudan etki eden anahtar metabolik yoldur. Ekşi hamurda mikrobiyotaya metabolizması ve tahıl enzimlerinin aktivitesi birbirine bağlıdır. Mikrobiyal metabolizma ile asitlenme, oksijen tüketimi ve tiyollerin birikmesi, tahıl enzimlerinin aktivitesini düzenler [110]. Hamur fermentasyonu sırasında, LAB mikrobiyal gelişme ve hamurun asitlenmesi için önemli olan küçük peptitler ve serbest amino asitleri salgılar [111]. Gluten bazlı ortamda fermentasyon yapan LAB kültürlerinin esansiyel aminoasit miktarını (treonin, valin, lizin ve fenil alanin) arttırdığı ifade edilmektedir [33]. Thiele vd. [57] fermentasyon süresine bağlı olarak (0-50 saat) asitlendirilmiş hamur içerisindeki aminoasit miktarının asitlendirilmemiş hamura göre daha fazla olduğu bildirilmiştir. Birçok çalışmada hamurdaki aminoasit miktarının; hamur pH' ısı, fermentasyon zamanı ve fermentatif mikrobiyotaya bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir. Literatürde prolin, fenil alanin ve lösin miktarındaki artış gerçekleşen proteolizin indikatörü olarak kullanıldığı bildirilmiştir [112, 113]. Thiele vd. [57] tarafından yapılan çalışmada prolin oluşumunun pH 5,5'ten daha yüksek değerlerle desteklendiği fenilalanin, lösin ve sistein salınımının esasen düşük pH'da meydana geldiği ifade edilmiştir. Tablo 4.4'de belirtildiği üzere serbest lösin ve fenil alanin miktarları OSH ve LH örneklerinde daha yüksek, bir kademeli örnek olan SH' da ise prolin miktarı daha yüksek bulunmuştur. Minervini vd. [109] tarafından yapılan çalışmada geri besleme sayısı arttıkça toplam serbest amino asit miktarının arttığı belirtilmiştir. Gelişen asitliğe bağlı olarak proteaz enziminin

daha aktif olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler literatür verilerini desteklemektedir.

Tablo 4.4 Hamur örneklerine (0. ve 20. saat) ait serbest amino asit miktarları

Amino asitler (mg/100 g)		0. Saat	SH (20. Saat)	OSH (20. Saat)	LH (20. Saat)
1	γ -Aminobütirik asit	2,736 $\pm$ 0,20	7,428 $\pm$ 0,12	6,623 $\pm$ 1,03	5,586 $\pm$ 0,05
2	2-aminobütirik asit	0,762 $\pm$ 0,03	1,001 $\pm$ 0,33	0,174 $\pm$ 0,11	1,102 $\pm$ 0,02
3	Alanin	3,455 $\pm$ 0,21	10,766 $\pm$ 1,22	8,500 $\pm$ 1,21	7,314 $\pm$ 1,28
4	Arginine	4,177 $\pm$ 0,16	1,715 $\pm$ 0,11	1,874 $\pm$ 0,01	1,643 $\pm$ 0,05
5	Asparajin	9,053 $\pm$ 0,28	8,186 $\pm$ 0,15	4,895 $\pm$ 0,12	8,434 $\pm$ 1,12
6	Aspartik asit	5,923 $\pm$ 0,35	2,406 $\pm$ 0,12	4,136 $\pm$ 0,15	5,870 $\pm$ 0,58
7	Sistin	0,202 $\pm$ 0,05	0,146 $\pm$ 0,02	0,155 $\pm$ 0,03	0,183 $\pm$ 0,06
8	Glutamik asit	2,942 $\pm$ 0,25	11,718 $\pm$ 1,25	9,717 $\pm$ 1,28	10,695 $\pm$ 1,05
9	Glutamin	2,987 $\pm$ 0,18	8,202 $\pm$ 1,42	2,891 $\pm$ 0,25	3,823 $\pm$ 0,02
10	Glisin	1,062 $\pm$ 0,12	4,129 $\pm$ 1,11	5,349 $\pm$ 1,42	5,871 $\pm$ 0,03
11	Histidin	0,722 $\pm$ 0,17	1,349 $\pm$ 0,32	1,288 $\pm$ 0,25	1,312 $\pm$ 0,05
12	İzolösin	0,769 $\pm$ 0,15	1,003 $\pm$ 0,78	5,327 $\pm$ 1,35	8,398 $\pm$ 0,02
13	Lösin	1,508 $\pm$ 0,01	10,383 $\pm$ 2,51	17,469 $\pm$ 2,58	28,479 $\pm$ 0,29
14	Lizin	1,792 $\pm$ 0,03	3,522 $\pm$ 0,55	5,385 $\pm$ 1,23	4,719 $\pm$ 0,17
15	Metiyonin	0,487 $\pm$ 0,02	1,549 $\pm$ 0,43	2,772 $\pm$ 0,23	5,408 $\pm$ 0,03
16	Ornitin	0,165 $\pm$ 0,01	6,817 $\pm$ 1,02	9,114 $\pm$ 2,15	12,293 $\pm$ 0,05
17	Fenilalanin	1,305 $\pm$ 0,02	5,831 $\pm$ 1,03	10,141 $\pm$ 2,18	15,296 $\pm$ 1,28
18	Prolin	1,063 $\pm$ 0,01	10,442 $\pm$ 1,89	8,336 $\pm$ 1,03	5,976 $\pm$ 0,01
19	Serin	0,534 $\pm$ 0,02	0,193 $\pm$ 0,02	0,958 $\pm$ 0,02	0,485 $\pm$ 0,02
20	Treonin	1,570 $\pm$ 0,03	0,532 $\pm$ 0,03	4,419 $\pm$ 1,23	4,890 $\pm$ 0,11
21	Tritofan	9,053 $\pm$ 0,41	11,024 $\pm$ 1,42	9,860 $\pm$ 1,25	11,572 $\pm$ 1,12
22	Trozine	1,195 $\pm$ 0,43	3,418 $\pm$ 0,03	3,710 $\pm$ 0,92	6,937 $\pm$ 0,12
23	Valin	1,479 $\pm$ 0,27	5,705 $\pm$ 1,25	8,551 $\pm$ 1,23	10,599 $\pm$ 1,13
24	Trans-4-hidroksi L-prolin	0,070 $\pm$ 0,01	0,099 $\pm$ 0,02	0,211 $\pm$ 0,02	0,095 $\pm$ 0,01
	TOPLAM	55,012$\pm$3,58	117,562$\pm$4,75^C	131,855$\pm$5,25^B	166,977$\pm$4,96^A

*Aynı satırdaki farklı büyük harfler, fermentasyon yönteminin serbest aminoasit üzerine etkisini göstermektedir ($p < 0,05$)

4.3 Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örneklerinin Fizikokimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikleri

Tek kademeli spontan ekşi hamur örneği (SH), iki kademeli spontan ekşi hamur örneği (OSH) ve *Lb. brevis* E25 starter kültürü kullanılarak hazırlanan ekşi

hamur (LH) örneklerinden un ağırlığınca % 10, 20, 30 ve 40 olacak şekilde örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örneklerle sırasıyla SH10, SH20, SH30, SH40, OSH10, OSH20, OSH30, OSH 40, LH10, LH20, LH30, LH40 kodları verilmiştir. Hazırlanan tüm örneklerde ekşi hamur etkisini gözlemleyebilmek için ekşi hamur ilavesiz kontrol (KH) örneği de hazırlanmıştır. Tek kademeli spontan (SH), iki kademeli spontan (OSH) ve *Lb. brevis* E-25 katılarak hazırlanan tek kültürlü ekşi hamur (LH) örneklerinden hazırlanan ekşi hamur katkılı hamur örneklerine ait pH ve TTA sonuçları Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilmiştir. Ölçümler 0., 1., 2. ve 3. saatte gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.5 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin pH değerleri

Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örnekleri	pH			
	0. dak	60. dak	120. dak	180. dak
KH (Kontrol)	6,56 ±0.12a	6,36 ±0.08a	6,29±0,01a	6,41±0,08a
LH10	5,25±0,04bAB	5,10±0,12bB	4,95±0,02aB	4,96±0,04bB
LH20	4,67±0,02cB	4,50±0,19cB	4,34±0,03bB	4,58±0,05cB
LH30	4,46±0,02dB	4,26±0,10dC	4,17±0,02cB	4,18±0,08dB
LH40	4,19±0,01eB	4,20±0,10dB	3,98±0,11dB	4,11±0,06dB
KH (Kontrol)	6,56 ±0.12a	6,36 ±0.08a	6,29±0,01a	6,41±0,08a
SH10	5,60±0,03bA	5,8±0,01bA	5,85±0,12bA	5,87±0,02bA
SH20	5,56±0,07bcA	5,48±0,02cA	5,46±0,16cA	5,48±0,03cA
SH30	5,42±0,06cA	5,25±0,11dA	5,27±0,13dA	5,25±0,08dA
SH40	5,16±0,10dA	5,06±0,12eA	5,01±0,12eA	5,07±0,07eA
KH (Kontrol)	6,56 ±0.12a	6,36 ±0.08a	6,29±0,01a	6,41±0,08a
OSH10	5,04±0,10bB	5,08±0,11bB	4,95±0,03bB	4,60±0,03bC
OSH20	4,68±0,01cB	4,69±0,12cB	4,48±0,02cB	4,50±0,02cB
OSH30	4,47±0,11dB	4,47±0,13dB	4,48±0,02cB	4,13±0,02dB
OSH40	4,18±0,12eC	4,09±0,15eB	4,04±0,02dB	4,03±0,02eC

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$)

SH katkılı tüm hamur örneklerinde belirtilen dört süre için pH değerleri daha yüksek, TTA değerleri ise daha düşük çıkmıştır ($p<0,05$). Ekşi hamur ilavesi hamur pH değerini düşürmüştür.

Tablo 4.6 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin TTA değerleri

	TTA			
Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örnekleri	0. dak	60. dak	120. dak	180. dak
KH (Kontrol)	1,12±0,02e	1,70±0,02d	1,85±0,21d	1,40±0,14e
LH10	2,11±0,02dA	2,80±0,13cAB	4,15±0,14bA	2,76±0,01dB
LH20	5,14±0,02cA	3,05±0,05cB	4,35±0,28cA	5,08±0,01cA
LH30	6,47±0,03bA	5,10±0,03bA	5,35±0,14cA	6,98±0,02bA
LH40	7,46±0,01aA	7,00±0,04aA	5,95±0,28aB	7,80±0,20aA
KH (Kontrol)	1,12±0,02e	1,70±0,02d	1,85±0,21d	1,40±0,14e
SH10	1,95±0,02cB	2,40±0,03cB	2,56±0,07cC	2,40±0,01cB
SH20	2,85±0,10bC	3,00±0,14bB	3,26±0,35bB	3,00±0,02bB
SH30	3,93±0,05aC	3,10±0,02bB	3,45±0,35bB	3,10±0,01bC
SH40	4,05±0,03aC	3,90±0,03aB	4,35±0,14aC	3,90±0,02aC
KH (Kontrol)	1,12±0,02e	1,70±0,02d	1,85±0,21d	1,40±0,14e
OSH10	4,14±0,02dA	3,60±0,01cA	3,26±0,21cB	4,15±0,07bA
OSH20	4,24±0,03cB	4,05±0,04cA	4,86±0,21bA	3,40±0,40cB
OSH30	5,34±0,12bB	5,30±0,01bA	5,06±0,30bA	4,70±0,40bB
OSH40	6,55±0,10aB	6,00±0,02aA	7,16±0,21aA	7,10±0,14aB

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0.05$)

Katkılı hamur örnekleri biyolojik olarak asitlendirme işlemine tabi tutulduğundan sonuçlar beklenildiği gibi tespit edilmiştir. Angioloni vd. [104] tarafından yapılan çalışmada % 20 ekşi hamur içeren hamur örneğinin pH seviyelerinin dört saatlik fermentasyon süresi sonunda 4,5'e düştüğü bildirilmiştir. Benzer sonuçlara literatürde yapılan farklı çalışmalarda da rastlanılmıştır [33, 114, 115]. Elde edilen pH düşüşleri başlıca metabolik ürün olan laktik asit oluşumuna dayandırılabilir [116]. Mantzourani vd. [101] tarafından yapılan çalışmada starter kültür (*Lactobacillus paracasei*) ilavesiyle hazırlanan ekşi hamurdan % 20 ve % 30 oranında hamur örneklerine katılarak pH değerleri incelenmiştir. pH değerleri sırasıyla 4,7 ve 4,5 olarak bulunmuştur. Aynı çalışmada bölge fırınından alınmış ekşi hamur kullanılarak % 20 ve % 30

katkılı hamur örnekleri hazırlanmıştır. Elde edilen hamur örneklerinin pH değerleri sırasıyla 5,2 ve 4,8 olarak bulunmuştur. İlgili çalışmada spontan fermentasyona bırakılan hamur örnekleri için yer alan bulgular tez çalışması kapsamındaki verileri destekler niteliktedir.

Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin LAB (kob/g) sayıları Tablo 4.7’de verilmiştir. Tablo 4.7’de görüldüğü gibi, bütün örnekler için LAB (log kob/g) sayıları üç saatlik süre içerisinde değerlendirildiğinde LH10-40 örnekleri için 8,21-9,07 log kob/g, SH10-40 örnekleri için 5,41-7,92 log kob/g, OSH 10-40 örnekleri için ise 8,12-9,95 log kob/g olarak bulunmuştur. 0., 60. ve 120. dakikalar için aynı konsantrasyonda farklı hamur örnekleri için 180. dakikada LH10 ve OSH10 örnekleri hariç LAB sayımı sonuçları istatistiksel olarak farklılık göstermiştir ($p<0,05$).

Tablo 4.7 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin LAB (kob/g) sayıları

Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örnekleri	LAB(log kob/g)			
	0. dak	60. dak	120. dak	180. dak
KH (Kontrol)	2,26±0,01e	2,47±0,05c	2,65±0,03e	2,97±0,01d
LH10	8,21±0,05dA	7,58±0,02bB	8,29±0,17bB	8,50±0,12cA
LH20	8,29±0,01cA	8,05±0,11aB	7,97±0,05dB	8,54±0,04cB
LH30	8,70±0,03bA	8,03±0,07aB	8,22±0,07cB	8,88±0,09bB
LH40	8,94±0,02aB	8,00±0,10aB	8,37±0,05aB	9,07±0,07aB
KH (Kontrol)	2,26±0,01e	2,47±0,05c	2,65±0,03e	2,97±0,01d
SH10	5,41±0,03dC	5,69±0,12dC	6,31±0,12dC	7,08±0,10cB
SH20	5,61±0,11cC	6,50±0,05cC	6,78±0,19aC	7,01±0,12dC
SH30	6,04±0,12bB	6,27±0,03bC	6,61±0,06cC	7,92±0,13aC
SH40	7,12±0,15aC	6,79±0,12aC	6,71±0,05bC	7,26±0,05bC
KH (Kontrol)	2,26±0,01e	2,47±0,05c	2,65±0,03e	2,97±0,01d
OSH10	8,12±0,11dB	8,12±0,20dA	8,37±0,11bA	8,26±0,03dA
OSH20	8,21±0,02cB	8,98±0,18cA	9,17±0,07aA	9,03±0,08cA
OSH30	8,75±0,17bA	9,11±0,25bA	9,20±0,12aA	9,50±0,18bA
OSH40	9,33±0,13aA	9,26±0,02aA	9,07±0,13aA	9,95±0,20aA

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$)

İki kademeli spontan fermentasyon ile elde edilen OSH katkılı hamur örneklerinde LAB sayılarının tek kademeliye göre istatistiksel olarak daha yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur. Hamur mayalama işleminde kullanılan ekşi hamur, undan, sudan, çevreden gelen mikroorganizmaların etkisiyle gerçekleşen spontan fermentasyonda geri besleme basamağı arttıkça mikroorganizmaları ortama adapte olmaları ve gelişmeler için imkan sağlanmış olmaktadır [46-49].

4.4 Ekşi Hamur Katkılı Hamur Örneklerinin Ekstensograf Özellikleri

Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin 45, 90 ve 135 dakikalık üç zaman aralığındaki ekstensografik özellikleri (R_{max} , uzayabilirlik, oran sayısı) Tablo 4.8 ve Tablo 4.9’ da verilmiştir. Farklı yöntemlerle elde edilen hamurların uzayabilirlik, maksimum direnç ve oran sayısı istatistiksel olarak değerlendirildiğinde ekşi hamur çeşidine göre sonuçların farklılık gösterdiği belirlenmiştir ($p<0,05$). Bütün analiz süreleri için kontrol örneği (KH) ile ekşi hamur katkılı hamur örnekleri karşılaştırıldığında uzamaya karşı maksimum direncinin (R_{max}) azaldığı görülmektedir. Her bir ekşi hamur katkılı hamur örneği için ekşi hamur konsantrasyonu arttıkça genel olarak R_{max} değeri düşmüştür ($p<0,05$). Asidik ortamda, gluten ağını oluşturan proteinler, pozitif yükleri nedeniyle birbirlerini iterler, bu dönüşümler gluten yapısının zayıflamasına ve hamurun yumuşamasına neden olduğu düşünüldüğünde [61, 109, 110] hamur örneklerinin R_{max} değerinin kontrol hamuruna göre azalmasından sorumlu tutulabilir. Çalışılan hamur örneklerinde aynı konsantrasyonlarda farklı hamur türlerine göre istatistiksel olarak farklılık gösterdiği R_{max} değerleri belirlenmiştir ($p<0,05$). Üç zaman aralığı için iki kademeli spontan hamur örnekleri daha yüksek R_{max} değeri göstermiştir ($p<0,05$). Literatürde dört kademeli spontan fermentasyon ile elde edilen ekşi hamurda asetik asit miktarı 0,206 mg/g iken starter heterofermentatif LAB ilavesi ile elde edilen hamur örneğinde bu miktarı 0,447 mg/g olarak bulunmuştur. Asetik asit gluten yapısını daha kısa ve sert form kazanmasına neden olduğu ifade edilmiştir ve bu bilgi tek kademeli spontan hamur örneklerinde daha düşük görülen R_{max} değerini destekler niteliktedir [63]. Asidik bir ortamın varlığı, gluten proteinlerinin şişmesine ve

daha yüksek çözünürlüğe sahip olmasına neden olur. İntramoleküler kuvvetlerin artması, hidrofobik bölümünün daha fazla maruz kalmasıyla protein yapısının yayılmasına neden olur. Sonuç olarak, büyük protein agregası proteolize maruz kalır ve daha fazla uzayabilirliği olan daha kararlı ve daha az elastik bir emülsiyon üretir [52]. Bu bilgiler doğrultusunda hamur örneğinde ekşi hamur konsantrasyonu arttıkça hamurun direncinin azalması beklenen sonuçtur. Hamurların uzayabilirlik değerleri incelendiğinde ise genel olarak kontrol örneği ile karşılaştırıldığında ekşi hamur ilavesiyle bir artma belirlenmiştir (Tablo 4.8, Tablo 4.9). Di Cagno vd. [113] tarafından yapılan çalışmada ekşi hamur içeren hamur örneklerinin hamur direncinin azaldığı ve uzayabilirliğin arttığı bildirilmiştir. Komlenic vd. [33] yaptıkları çalışmada ise ekşi hamur ilavesinin genellikle hamurun uzayabilirliğini azalttığını ifade etmiştir. Çalıştığımız hamur örneklerinin de uzayabilirlik belirli konsantrasyona kadar artmış, daha fazla ekşi hamur miktarı (%30 ve %40) uzayabilirlik derecesi ile ters bir eğilim vermiştir. SH katkılı hamur örneklerinde uzayabilirlik derecesi daha yüksek olduğu görülmektedir. Spontan fermentasyon sırasında protein yapısı daha az zarar görmesine bağlı olarak daha yüksek sonuca neden olduğu düşünülmektedir. Çalışmamızda ekşi hamur miktarı ile azalan oran sayısı (R_{max}/E) değerleri de gözlenmiştir. Ozulku and Arici [117] tarafından yapılan çalışmada düşük oran değerlerinin, düşük uzama direncini ve yüksek uzayabilirliğini yansıttığını belirtmiştir. Literatürde fermentasyon süresinin 45 dakikadan 135 dakikaya arttırılması ve hidrokolloid (EPS gibi) içeren hamurun daha iyi stabilite kazandığını ifade edilmektedir [118]. Özellikle LH ve SH hamur örneklerine ait R_{max} değerlerinde zaman artışı ile görülen yükseliş verilen bilgiyi destekler niteliktedir.

Tablo 4.8 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ekstensograf değerleri
(45. ve 90. dak)

Ekşi Hamur İlaveli Örnek	45. dak		
	R _{maks.} (BU)	Uzayabilirlik (mm)	Oran (BU/mm)
KH	476±29,10a	141±4,91b	3,38±0,14a
LH10	366±15,60bA	148±3,72aB	2,47±0,21bA
LH20	263±3,01cB	143±2,92bB	1,83±0,06eB
LH30	182±1,70dB	98±0,14cB	1,88±0,07dB
LH40	122±0,92eB	57±0,20dC	2,14±0,12cA
KH	476±29,10a	141±4,91b	3,38±0,14a
SH10	246±10,10bB	160±4,52bA	1,55±0,50bB
SH20	229±8,90bC	169±5,21aA	1,36±0,30bC
SH30	149±3,50cC	116±4,90dA	1,28±0,20bC
SH40	56±4,60dC	99±8,20eA	0,57±0,01cB
KH	476±29,10a	141±4,91b	3,38±0,14a
OSH10	367±5,80bA	153±5,10aAB	2,40±0,13bA
OSH20	379±1,10bA	137±0,72bB	2,78±0,25eA
OSH30	294±12,10cA	102±4,50cB	2,89±0,50dA
OSH40	152±13,40dA	80±3,20dB	1,90±0,02cA
Ekşi Hamur İlaveli Örnek	90. dak		
	R _{maks.} (BU)	Uzayabilirlik (mm)	Oran (BU/mm)
KH	524±25,25a	136±12,56b	3.85±0,77a
LH10	467±26,12bA	140±4,89aB	3.34±0,11bA
LH20	313±17,67cB	131±5,65cB	2.38±0,14cA
LH30	203±6,57dB	112±4,65dB	1.81±0,04dB
LH40	150±3,58eB	81±2,28eB	1.86±0,07eB
KH	524±25,25a	136±12,56b	3.85±0,77a
SH10	213±4,8bC	199±3,32aA	1.07±0,12bC
SH20	94±3,5cC	157±3,60bA	0.60±0,05cC
SH30	105±7,6cC	155±2,80bA	0.57±0.02cC
SH40	58±4,7dC	109±3.2das	0.55±0,01cC
KH	524±25,25a	136±12,56b	3.85±0,77a
OSH10	405±8,5bB	156±4.28aB	2.61±0,03cB
OSH20	368±7,2cA	136±2.26bB	2.74±0,04bcA
OSH30	319±1,8dA	107±3.12cB	2.99±0,12bA
OSH40	186±2,5eA	79±2.1dB	2.35±0,14cA

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$)

Tablo 4.9 Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ekstensograf değerleri (135. dak)

Ekşi Hamur İlaveli Örnek	135 dak		
	$R_{maks.}$ (BU)	Uzayabilirlik (mm)	Oran (BU/mm)
KH	588±6.36a	129±2,12b	4,55±0,01a
LH10	417±15,55bA	142±10,60aB	2,94±0,09bA
LH20	331±12,70bA	128±5,24bB	2,56±0,06cA
LH30	181±5,65cB	81±4,80cC	2,23±0,07dB
LH40	260±17,32bcA	130±12,04bA	2,00±0,13eB
KH	588±6,36a	129±2,12d	4,55±0,01a
SH10	212±5,21bC	211±3,52aA	1,00±0,02bB
SH20	114±8,20cC	177±4,10bA	0,64±0,03cB
SH30	112±3,20cC	166±12,10cA	0,67±0,04cC
SH40	101±7,01cC	134±7,20dA	0,75±0,02cC
KH	588±6,36a	129±2,12b	4,55±0,01a
OSH10	379±2,54bB	150±1,90aB	2,53±0,12bA
OSH20	287±3,15bB	127±7,60bB	2,26±0,01cA
OSH30	363±12,10cB	124±5,04bB	2,93±0,02dA
OSH40	205±7,30dB	76±2,30cB	2,70±0,01eA

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$)

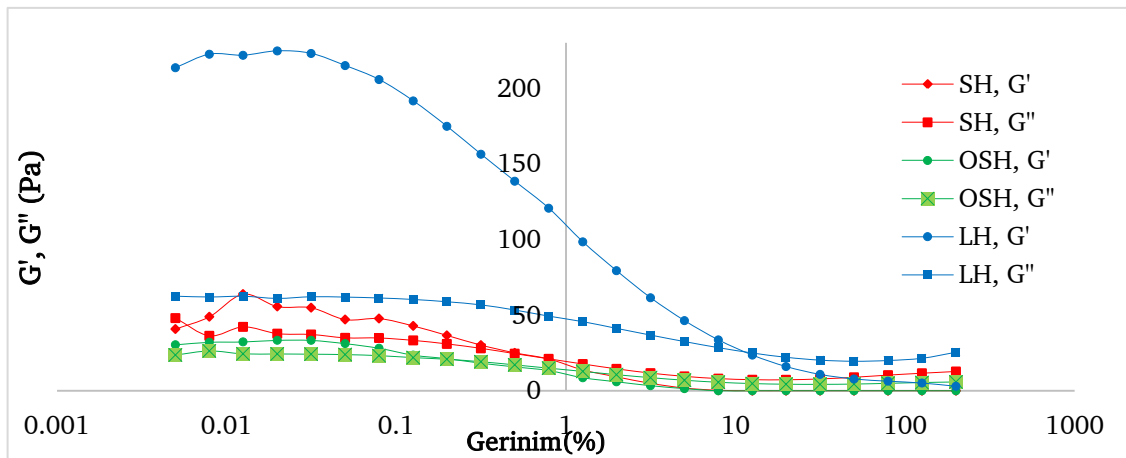
4.5 Ekşi Hamur Örneklerinin LAOS Özellikleri

Yirmi (20) saat fermentasyona bırakılarak hazırlanan ekşi hamur örneklerinin doğrusal ve doğrusal olmayan bölgedeki reolojik özelliklerinin değerlendirilmesinde % 0,005-200 gerinim aralığında 24 farklı noktadaki gerinim değerlerine karşı çizilen G' , G'' , e_3/e_1 , v_3/v_1 , S , T grafiklerinden ve normalize edilmiş toplam gerilim(stress), elastik gerilim (stress) ve viskoz gerilim (stress) Lissajous eğrilerinden yararlanılmıştır.

4.5.1 SH, OSH ve LH Örneklerinin G' , G'' Değerlerinin Değişimi

Dinamik reoloji ölçümlerinde doğrusal ve doğrusal olmayan bölgede frekansın bir fonksiyonu olarak elastik modülüs (G') ve viskoz modülüs (G'') tayin edilmektedir. Elastik modülüs materyal içerisinde depolanan ve uygulanan deformasyon döngü içinde yenilenen enerjiyi, viskoz modülüs ise materyalin dağıttığı ya da kaybolan enerjiyi belirlemektedir [119]. Bu bilgiler doğrultusunda üç farklı yöntem ile elde edilen ekşi hamurların 20. saat fermentasyonu sonunda kesme kontrollü reometre kullanılarak 25°C'de gerinime

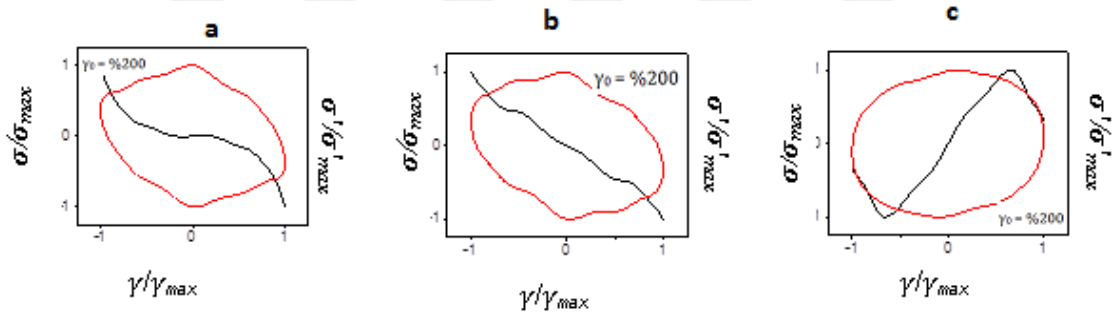
karşı salınım reogramları alınarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2’ye bakıldığında doğrusal bölgede üç örnek için elastik modülüs (G'), viskoz modülüs (G'')’e baskın geldiği görülmektedir. Üç hamur örneğinde Tip I reolojik davranışını göstermiştir [85]. Ekşi hamurun fermentasyonu sırasında asitlenmesi ve ilave edildiği ekmek hamurunu kısmi asitlendirilmesi yapı ve şekillendirme üzerine etkili olan gluten, nişasta ve arabinoksilanlar gibi bileşenler üzerine etkili olmaktadır. Undaki bileşenler amilaz, ksilanaz, β -glukanaz, esteraz, proteaz ve hemiselülaz enzimleri ile yıkılmaktadır [120]. Şekil 4.2’ ye bakıldığında *Lactobacillus brevis* E25 ilave edilerek hazırlanan ekşi hamur örneğinin (LH) spontan fermentasyona bırakılarak hazırlanan ekşi hamur örneğine göre doğrusal rejimde G' ve G'' değerinin birbirinden daha farklı olduğu görülmektedir. Doğrusal bölgede üç hamur örneği yeterli esnetilmeye uğramadıkları için elastik davranışları baskın gelmiştir. Artan gerinim değerleri ile hamurda gelişen asitlik gluten yapısının yumuşaması ile beraber ağ yapısının kaybolmasına neden olarak G' değerinin G'' değerlerine yaklaşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yüksek deformasyonlarda (%200) proteolitik aktivitesinin daha fazla olduğu düşünülen LH örneğinde G'' değerinin G' ’ne göre en baskın olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, doğrusal bölgeden doğrusal olmayan bölgeye geçişte LH örneğinin en fazla enerji depolama özelliğini kaybeden hamur örneği olduğu söylenebilir.



Şekil 4.2 SH, OSH, LH hamur örnekleri için gerinim noktalarına karşı elastik modülüs (G'), viskoz modülüs (G'') değerlerinin değişimi

4.5.2 Ekşi Hamur Örneklerinin Normalize Edilmiş Lissajous Eğrileri ile Reolojik Davranışının Analizi

Elastik ve viskoz geriliminin etkisini gözlemleyebilmek için gerilimin faz içi ve faz dışı bileşenleri dikkate alınarak toplam gerilim salınımı elastik gerilim ve viskoz gerilim salınımı olmak üzere iki kısımda değerlendirilmiştir [89, 90, 121, 122]. Eğrilerin analizi sırasında gerinime bağlı değişiklikleri daha net bir şekilde belirleyebilmek için gerinim ve gerilim dataları normalize edilmiştir [123]. Ekmek hamuru prosesi sırasında hamurun maruz kaldığı deformasyon %500.000 değerlerine çıkabildiğinden [24] ve hamur örnekleri ile yapılan çalışmalarda LAOS parametrelerinin değerlendirilmesinde %200 gerinim değeri kullanıldığından [19, 26, 27] üretilen ekşi hamur örneklerine ait Lissajous-Bowditch eğrilerinin değerlendirilmesinde %200 gerinim noktası esas alınmıştır. Üç farklı ekşi hamurun elastik gerilime ait Lissajous-Bowditch eğrilerini elde etmek için normalize edilen gerinime karşı normalize edilen toplam gerilim ve normalize edilen elastik gerilim grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 a. SH, b. OSH, c. LH hamur örneklerinin elastik bileşenine ait Lissajous-Bowditch eğrileri

Lissajous-Bowditch eğrilerinde görülen elips formdaki halkalar elastik özelliğin baskın geldiği viskoelastik davranışı simgelerken, dairesel formda olan halkalar viskoz özelliğin baskın geldiği viskoz ağırlıklı viskoelastik davranışı gösterir [13]. Başlangıçta protein ve nişasta molekülleri arasında etkileşim en fazladır buda hamurun viskoelastik özellik göstermesini sağlamaktadır. Fermentasyon sonunda artan asitliğe bağlı olarak gluten yapısının daha zayıf oluşu ile elastik bileşenin daha viskoz özellik kazandığı görülmüştür. Ekşi hamur örneklerinin elastik bileşenine ait Lissajous eğrileri incelendiğinde (Şekil 4.3), LH örneğinde elastik bileşenin enerji alanının daha fazla alan içine yayımlanarak viskoz karakterinin

arttığı görülmektedir (Şekil 4.3). Bu davranış %200 gerinim noktasında LH hamurunun en az elastik özelliğe sahip viskoelastik davranışı sergilediğini göstermektedir. Yüksek gerinim değerlerinde enerji alanını en çok SH örneği koruduğundan elastik bileşen en az bu hamur örneğinde yüksek deformasyondan etkilendiği çıkarımı yapılmıştır. Spontan ekşi hamur örneğinin fermentasyonu sırasında pH değerinin düşüşünün yavaş gerçekleşmesi ile gluten yapısının en az etkilendiği buna bağlı olarak da en fazla elastik özelliği baskın viskoelastik davranış sergilediği düşünülmektedir. LH hamurunda fermentasyon süresince yapısındaki proteinin daha fazla parçalanmasından dolayı bu hamura ait elastik bileşenin viskoz özelliği spontan örnek olan SH ve OSH' dan daha fazla olduğu çıkarımı yapılabilir. Hamurun elastik bileşeninden sorumlu olan yapı gluten yapısıdır. Literatürde proteinaz ve peptidaz aktivitesinin pH 4'de en yüksek aktivite gösterdiği ifade edilmiştir [31]. Fermentasyon sırasında heterofermentatif laktobasiller, tahıl proteazlarının primer aktivitesini arttırarak glutenin disülfid bağlarının hızla azalmasına neden olmaktadır [31, 50, 61]. Asidifikasyon ile güçlü molekül içi elektrostatik itici kuvvetler yapının zayıflamasına neden olur ve yeni bağların oluşumunu önleyerek yapının yumuşamasına neden olmaktadır [104]. Verilen bu literatür bilgileri LH hamurunun SH ve OSH' a göre reolojik davranışının farklılığını destekler niteliktedir. Üç hamur örneği için yüksek gerinim değerlerinde viskoelastik sıvı özellik gösterdiği çıkarımı yapılabilmektedir [89, 124]. Tablo 4.10'a göre normalize gerinime karşı normalize elastik gerilim değerleri ile elde eğrilerin pozitif ve negatif büyüklüğünden yararlanılarak bir örneğin gerinim katılaşması ve gerinim yumuşaması davranışı sergilediği belirlenebilmektedir [5, 89].

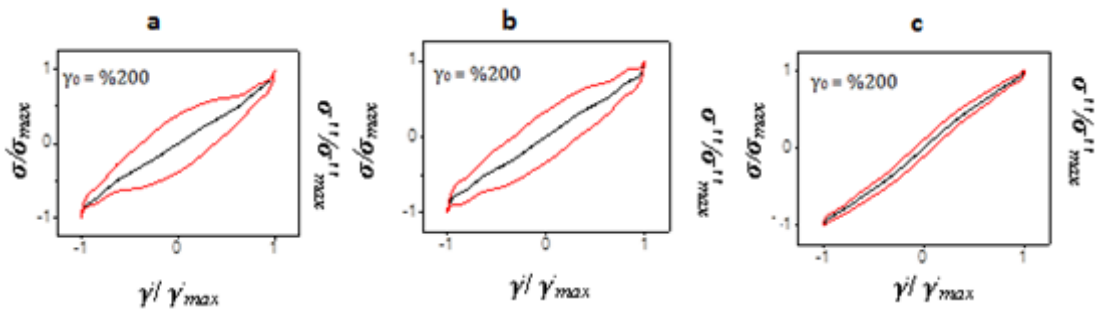
Tablo 4.10 Eğrilerin iç bükey ve dış bükey olma durumuna göre reolojik davranışın değerlendirilmesi [89]

Pozitif iç bükeylik/Pozitif Eğriler	$d^2\sigma'/d^2\gamma > 0$	Gerinim katılaşması/ Kayma kalınlaşması
Negatif iç bükeylik/Negatif Eğriler	$d^2\sigma'/d^2\gamma < 0$	Gerinim yumuşaması/ Kayma incilmesi

Şekil 4.3' de kırmızı halkalar toplam gerilimi, siyah eğriler gerilimin elastik bileşenini göstermektedir. İç eğrilere bakıldığında EH-3 hamur örneğinin elastik bileşeninin SH ve OSH örneklerine göre %200 gerinim değerinde deformasyondan en fazla etkilendiği görülmektedir. LH örneğinin elastik gerilim eğrisinin negatif iç bükeylik ile gerinim yumuşaması reolojik davranışını sergilemesi gluten yapısının en fazla proteolize uğradığını desteklemektedir. SH hamurunda mikroorganizma faaliyetinin daha az gerçekleşmesi sonucunda elastik bileşen olan gluten yapısının daha az zarar gördüğü ifade edilebilir. Ayrıca pozitif iç bükey eğrileri ile gerinim katılaşması davranışı göstermesi bu çıkarımı destekler niteliktedir.

Wehrle vd. [36] tarafından yapılan çalışmada 20 saat boyunca fermente edilen hamurların yüksek viskozite özelliği gösterdiği ifade edilmektedir. Aynı çalışmada 20 saatlik inkübasyondan sonra starter katkılı ekşi hamur özellikle düşük frekanslarda, 90°'ye yakın faz açıları ile tamamen viskoz bir tarzda yanıt verdiği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışma ile tespit ettiğimiz bulgular örtüşmektedir.

Üç farklı ekşi hamurun viskoz gerilime ait Lissajous-Bowditch eğrilerini elde etmek için normalize edilen gerinim hızına karşı normalize edilen toplam gerilim (kırmızı halkalar) ve normalize edilen viskoz gerilim (siyah eğriler) grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.4) .



Şekil 4.4 a. SH, b. OSH, c. LH hamur örneklerinin viskoz bileşenine ait Lissajous-Bowditch eğrileri

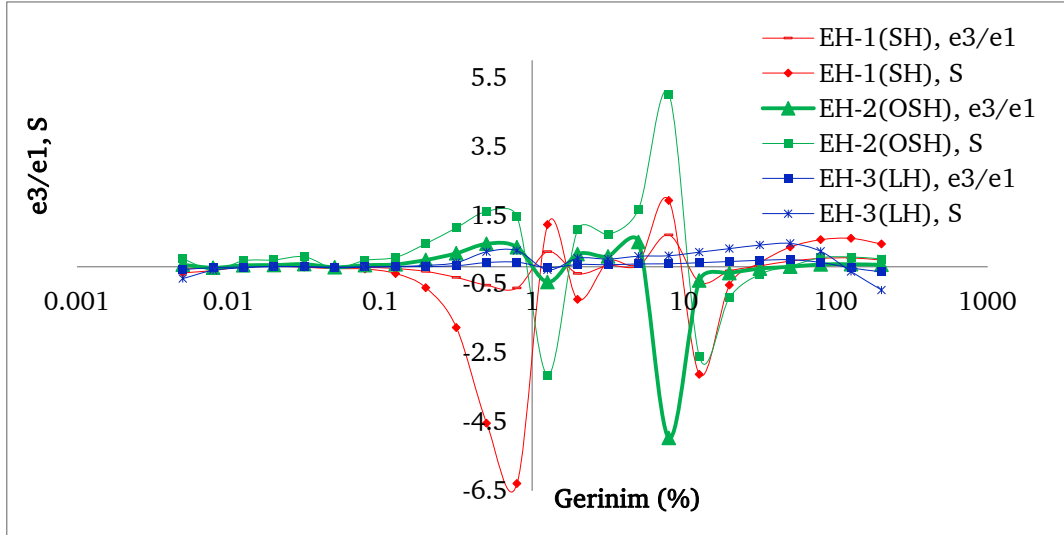
Uygulanan deformasyon karşısında Lissajous eğrilerinde kalan alan LH örneğinde korunduğundan viskoz karakterin en çok bu hamur örneğinde korunduğu söylenebilir. Hamurun viskoz bileşeninden sorumlu olan yapılarından biri gliadin diğeri de nişasta yapısıdır. Yapılan bir çalışmada glutensiz unların

protein miktarı ile hamurun viskoelastik davranışındaki etkisi değerlendirilmiştir. Karabuğday unun protein değerinin (% 12.5) soya unundan (% 46) daha düşük olduğu buna bağlı olarak karabuğday hamurunun viskoz ağırlıklı viskoelastik davranış sergilediği ifade edilmiştir [30]. Verilen bu literatür bilgisi protein yapısının daha fazla hidroliz olduğu LH örneğinde viskoz karakterinin baskınlığını destekler niteliktedir. Thiele vd. [57] spontan fermentasyon sırasında nişasta yapısının pH düşüşünün yavaş gerçekleşmesine bağlı olarak meydana gelen amilaz enzimi aktivitesinden daha fazla etkilendiğini ifade etmiştir. Fermentasyon sırasında starter kültür (*Lactobacillus helveticus* ve *Kluyveromyces marxianus*) kullanılarak hazırlanan ekşi hamur örneklerinin daha düşük amilaz aktivitesine sahip olmasına bağlı olarak daha viskoz davranış sergilendiği bildirilmektedir [38]. Wehrle vd. [36] tarafından yapılan çalışmada fermentasyona bağlı olarak kompleks viskozitenin starter kültür içermeyen ekşi hamur örneğinde daha düşük değerlere ulaştığı görülmüştür. Viskoz bileşen karakterinin etkilenme durumuna göre değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlara göre SH ve OSH hamurları literatür verilerini destekleyecek şekilde sonuçlar vermiştir. Tablo 4.9’da belirtilen normalize gerinime karşı normalize edilmiş viskoz gerilim değerleri ile elde edilen eğrilerin negatif ve pozitif büyüklüğü bir örneğin kayma kalınlaşması ve kayma incelmesi davranışının belirlenmesinde kullanılmaktadır [5, 89]. SH, OSH örnekleri ile LH örneği karşılaştırıldığında nişasta yapısının EH-3 örneğinde daha az etkilendiği çıkarımı yapılabilmektedir. SH ve OSH örnekleri kayma kalınlaşması davranışı (pozitif iç eğriler) gösterirken, LH örneği ise kayma incelmesi (negatif iç eğriler) davranışı göstermiştir. Literatürde karşılaştırılabilecek çalışmalara rastlanılmamıştır.

4.5.3 Ekşi Hamur Örneklerinin Doğrusal Olmayan Bölgedeki Elastik Parametreleri

Doğrusal olmayan bölgedeki yüksek dereceli harmoniklerin yorumlanmasında kullanılan “ e_3/e_1 ” Chebyshev katsayısı oranı ve döngü içi gerinim davranışını gösteren katılma oranı “S” örnekler hakkından destekleyici bilgiler edinilmesini sağlamıştır. Ewoldt vd. [13] tarafından e_3/e_1 değerlerine bağlı reolojik davranışlar $e_3/e_1 > 0$ olduğunda gerinim katılma davranışı, $e_3/e_1 < 0$

olduğunda gerinim yumuşaması davranışı olarak; S değerlerine bağlı reolojik davranışlar ise $S > 0$ olduğunda döngü içi gerinim katılaşması davranışı, $S < 0$ olduğunda ise döngü içi gerinim yumuşaması davranışı olarak tanımlanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda üç hamur örneği için gerinim değerlerine karşı S ve e_3/e_1 grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.5).



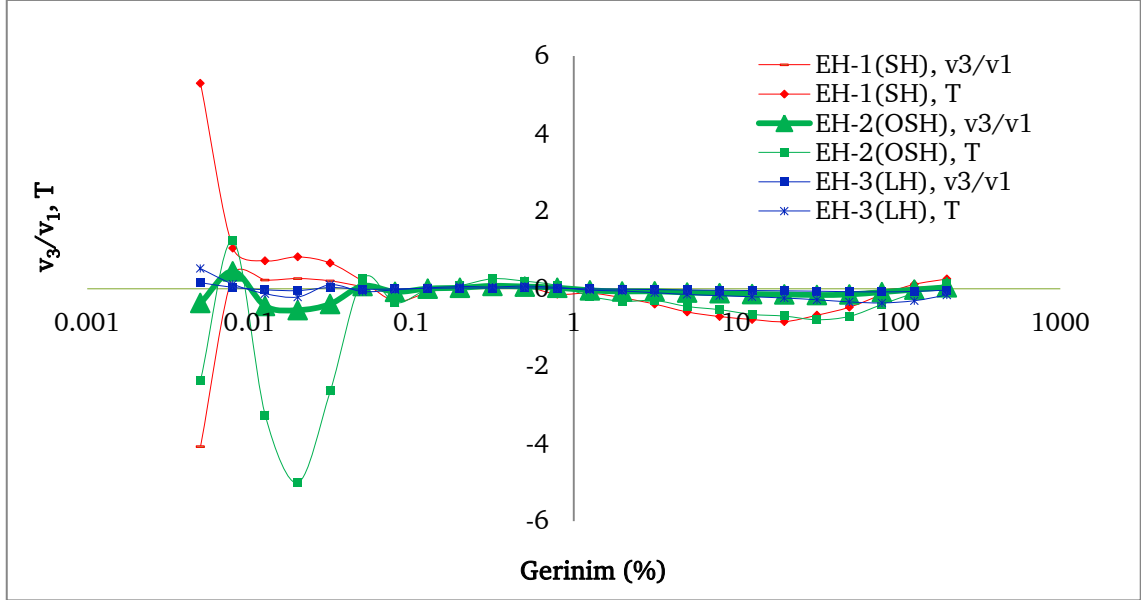
Şekil 4.5 Ekşi hamur örneklerine ait e_3/e_1 , S değerleri

Her bir ekşi hamur örneği için S ve e_3/e_1 grafikleri birbirini destekleyecek şekilde sonuçlar vermiştir. Bütün ekşi hamur örneklerinin S ve e_3/e_1 değerleri için %19,9 gerinim noktasından sonra doğrusallaşma başlamıştır. % 200 gerinim değerinde SH ve OSH örnekleri doğrusal olmayan reolojik davranışı ifade eden S ve e_3/e_1 parametresi “>0” değerleri ile döngü içi gerinim katılaşması davranışı sergilerken LH örneği ise S ve e_3/e_1 parametresi “<0” değeri ile döngü içi gerinim yumuşaması davranışı sergilemiştir. Elde edilen bilgiler elastik Lissajous-Bowditch grafikleri ile uyumluluk sağlamaktadır.

4.5.4 Ekşi Hamur Örneklerinin Doğrusal Olmayan Bölgedeki Viskoz Parametreleri

Doğrusal olmayan bölgedeki yüksek dereceli harmoniklerin yorumlanmasında kullanılan “ v_3/v_1 ” Chebyshev katsayısı oranı ve viskoz bileşene ait döngü içi gerinim davranışını gösteren kalınlaşma oranı “ T ” örnekler hakkında destekleyici bilgiler edinilmesinde katkı sağlamıştır. Ewoldt vd. [13] tarafından v_3/v_1 değerlerine bağlı reolojik davranışlar $v_3/v_1 > 0$ olduğunda kayma kalınlaşması

davranışı, $v_3/v_1 < 0$ olduğunda kayma incelmesi davranışı olarak; T değerlerine bağlı reolojik davranışlar ise $T > 0$ olduğunda döngü içi kayma kalınlaşması, $T < 0$ olduğunda ise kayma incelmesi davranışı olarak tanımlanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda üç hamur örneği için gerinim değerlerine karşı T ve v_3/v_1 grafikleri çizilerek yorumlanmıştır.



Şekil 4.6 Ekşi hamur örneklerine ait v_3/v_1 , T değerleri

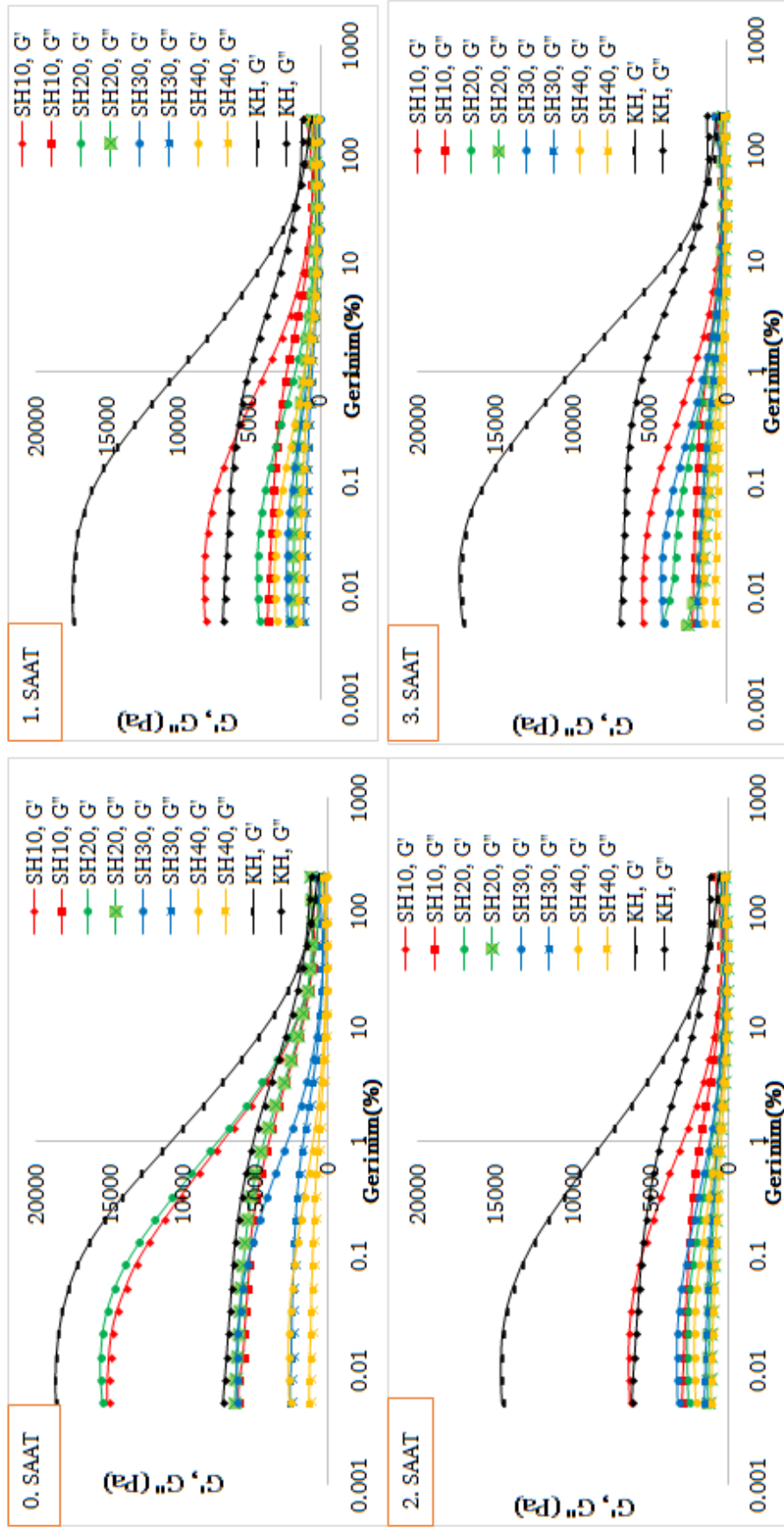
Her bir ekşi hamur örneği için T ve v_3/v_1 değerleri birbirini destekleyecek şekilde sonuçlar vermiştir. % 200 gerinim değerinde SH ve OSH örnekleri doğrusal olmayan reolojik davranışı ifade eden T ve v_3/v_1 parametresi “>0” değerlerini vererek kayma kalınlaşması davranışını gösterirken EH-3 örneği ise T ve v_3/v_1 parametresi “<0” değerini vererek kayma incelmesi davranışı göstermiştir. Gerinim arttıkça yaklaşık %20 gerinim noktasında kadar SH ve OSH örneklerinde T değerleri düşme eğilimi gösterirken bu değerden sonra kalınlaşma oranı artarak pozitif değerler vermiştir. Doğrusal olmayan bölgede uygulanan deformasyon karşısında viskoz bileşeni en az etkilenen örnek LH’ tır. Fermentasyon türüne bağlı olarak kayma incelmesi davranışında belirgin farklılık gözlenmiştir. Elde edilen bilgiler viskoz bileşene ait Lissajous-Bowditch grafikleri ile uyumluluk sağlamaktadır.

4.6 Ekşi Hamur Katkılı Hamurların Doğrusal Olmayan Reolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

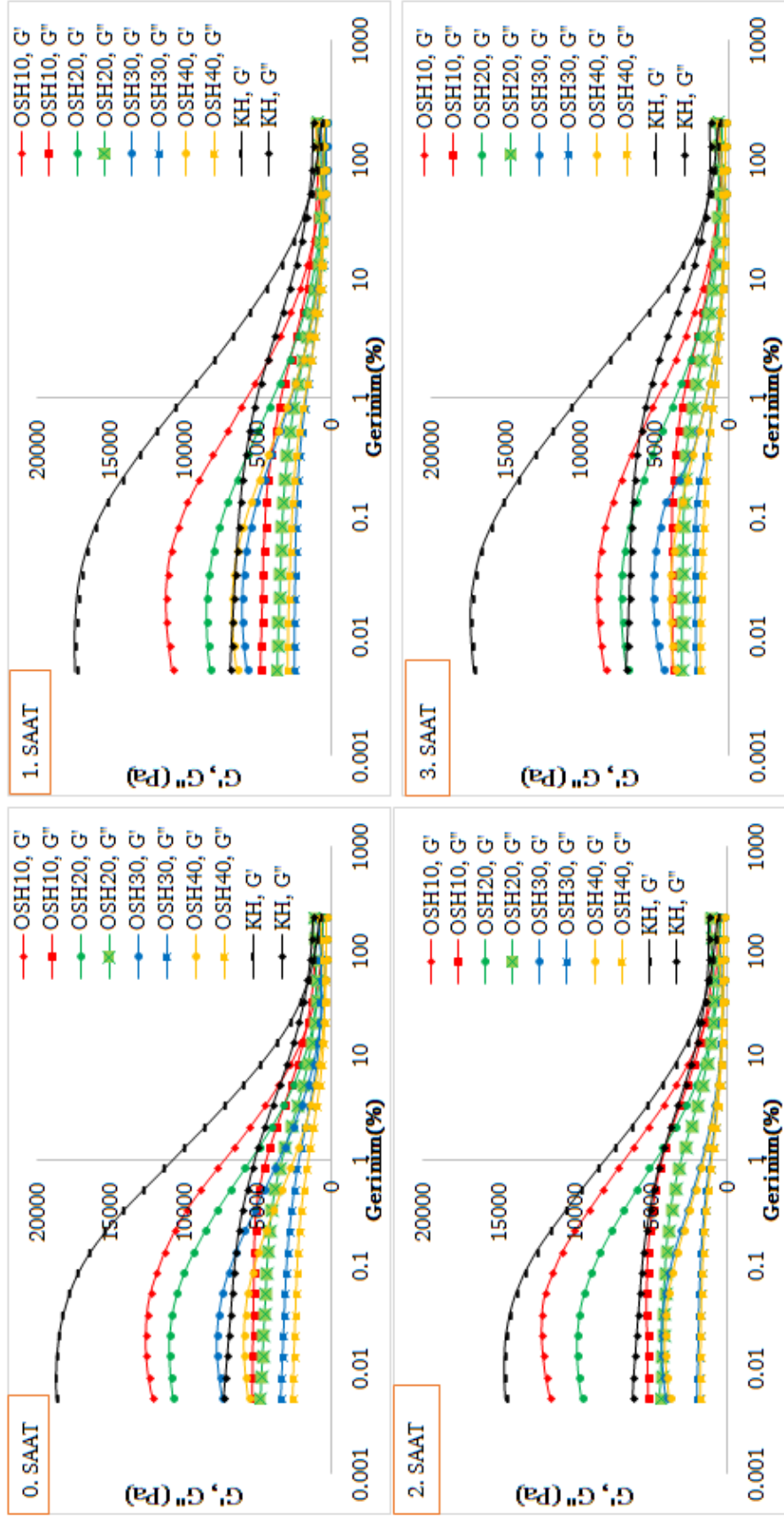
Ekşi hamur katkılı hamur üretiminde üç ekşi hamurdan ayrı ayrı 4 farklı konsantrasyon kullanılarak SH10, SH20, SH30, SH40, OSH10, OSH20, OSH30, OSH 40, LH 10, LH20, LH30, LH40 kodlu ekşi hamur katkılı hamur örnekleri hazırlanmıştır. Ekşi hamur katkısız hamur örneği ise KH (kontrol) olarak tanımlanmıştır. Her bir hamur için 0., 1., 2. ve 3. saatte doğrusal olmayan bölgede reolojik özelliklerinin değerlendirilmesi için analizler gerçekleştirilmiştir.

4.6.1 G' , G'' Değerlerinin Değişimi

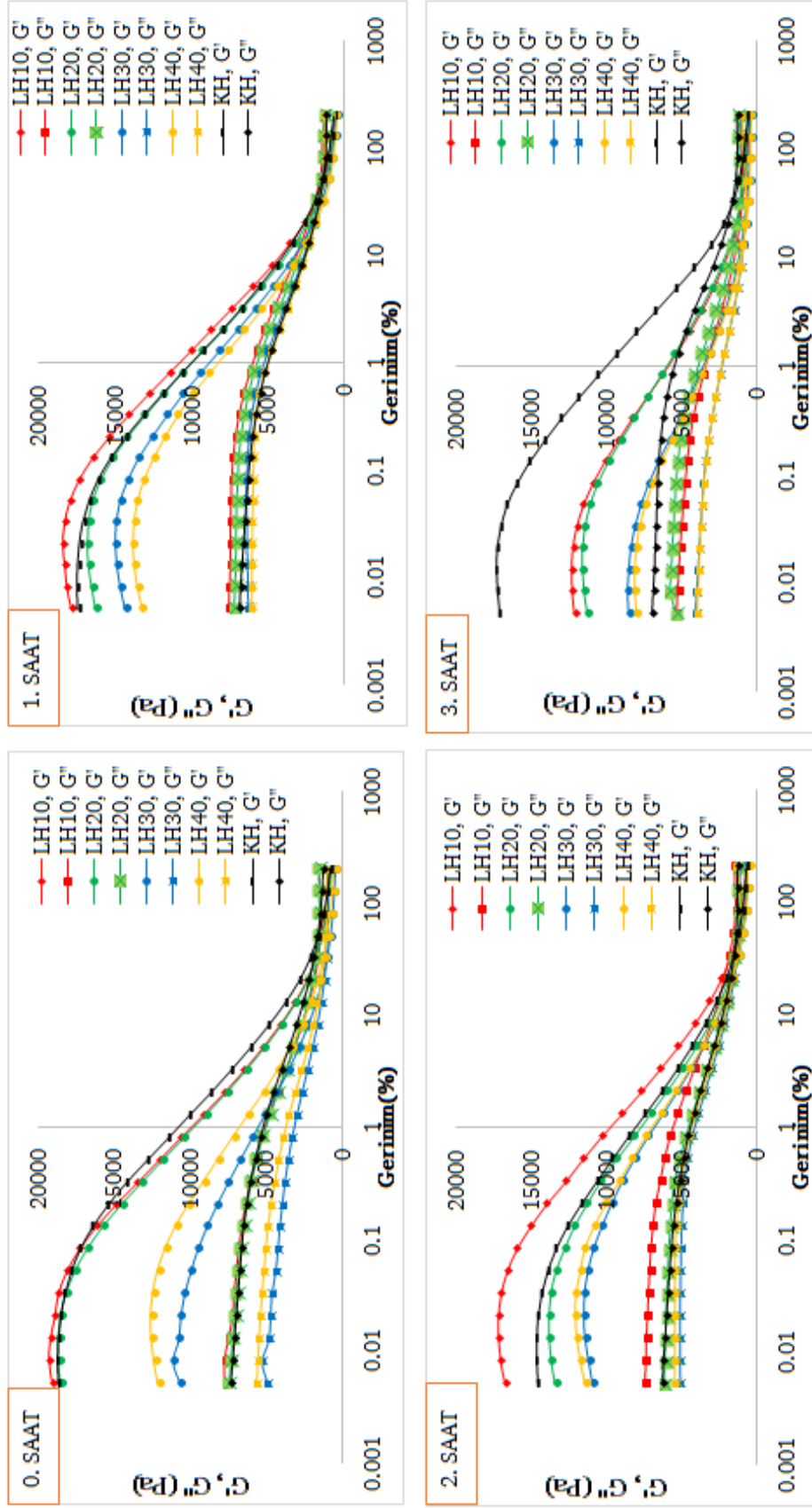
Gluten ağındaki fiziksel ve kimyasal değişiklikler, reolojik özelliklerde önemli değişikliklere neden olmaktadır [125]. Farklı fermentasyon yöntemi ile hazırlanan hamur örneklerinin dört farklı zamana ait SAOS ve LAOS bölgesinde ilave edilen ekşi hamur konsantrasyonu ve türüne bağlı olarak G' , G'' değişimlerini gösteren gerinim tarama testine ait osilasyon reogramları Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9' da verilmiştir. Gerinim ölçümü %0,005' ten %200 gerinim değerine kadar alınmıştır. Minimum (%0.005) ve maksimum (%200) gerinim noktalarındaki G' ve G'' değerlerinin daha net görülebilmesi için tablolaştırılarak sunulmuştur (Tablo 4.11).



Şekil 4.7 Dört (4) farklı zamanda SH (EH-1) katkılı ekşi hamur ekmeklerinin elastik ve viskoz modülüs değerlerinin değişimi



Şekil 4.8 Dört (4) farklı zamanda OSH (EH-2) katkılı ekşi hamur ekmeklerinin elastik ve viskoz modülüs değerlerinin değişimi



Şekil 4.9 Dört (4) farklı zamanda LH (EH-3) katkılı ekşi hamur ekmeklerinin elastik ve viskoz modülüs değerlerinin değişimi

Tablo 4.11 Minimum (%0,005) ve maksimum (% 200) gerinim noktalarındaki G' ve G'' değerleri

	Minimum				Maksimum				Minimum				Maksimum			
	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)
0. SAAT	KH	18713	7313	1268	KH	18713	7313	1268	KH	18713	7313	1268	KH	18713	7313	1268
	LH10	19071	7675	804	SH10	15131	6174	626	OSH10	12112	5341	603	OSH10	12112	5341	603
	LH20	17856	7573	718	SH20	8154	3698	475	OSH20	10772	4843	448	OSH20	10772	4843	448
	LH30	16769	7403	445	SH30	6369	2922	409	OSH30	11638	5172	529	OSH30	11638	5172	529
	LH40	12146	5332	501	SH40	5468	2190	295	OSH40	8308	3795	370	OSH40	8308	3795	370
1. SAAT	KH	17412	6883	678	KH	17412	6883	678	KH	17412	6883	678	KH	17412	6883	678
	LH10	18482	7454	618	SH10	15450	6463	573	OSH10	10725	4830	511	OSH10	10725	4830	511
	LH20	16259	7178	666	SH20	4262	2033	281	OSH20	8254	3691	409	OSH20	8254	3691	409
	LH30	13406	6133	602	SH30	2581	1311	166	OSH30	9595	4399	495	OSH30	9595	4399	495
	LH40	11219	5309	562	SH40	4200	2582	207	OSH40	6826	3171	370	OSH40	6826	3171	370
2. SAAT	KH	14571	6255	647	KH	14571	6255	647	KH	14571	6255	647	KH	14571	6255	647
	LH10	10606	4902	748	SH10	6265	2610	327	OSH10	7435	3391	341	OSH10	7435	3391	341
	LH20	14394	6352	572	SH20	2335	1129	135	OSH20	5677	2550	287	OSH20	5677	2550	287
	LH30	10917	5124	533	SH30	3222	1540	189	OSH30	4068	1955	234	OSH30	4068	1955	234
	LH40	8559	4079	538	SH40	4135	1960	326	OSH40	4413	2129	210	OSH40	4413	2129	210
3. SAAT	KH	17109	6967	626	KH	17109	6967	626	KH	17109	6967	626	KH	17109	6967	626
	LH10	12054	5591	510	SH10	2722	1311	155	OSH10	5585	2647	289	OSH10	5585	2647	289
	LH20	13190	6065	533	SH20	3171	1480	232	OSH20	6411	2968	397	OSH20	6411	2968	397
	LH30	11430	5388	418	SH30	2086	1107	136	OSH30	3838	1789	249	OSH30	3838	1789	249
	LH40	7963	3919	387	SH40	1555	764	109	OSH40	3662	1869	217	OSH40	3662	1869	217

Doğrusal bölgede bütün ekşi hamur katkıli hamur örnekleri için tüm zaman dilimleri değerlendirildiğinde LH hamuruna ait örnekler için G' ve G'' değerlerinde fermentasyon süresine bağlı olarak belirgin şekilde azalma gözlenmiştir. Özellikle %10 oranında katkıli hamur örneklerine ait G' ve G'' değerleri ilk iki saat kontrol hamur örneğinden daha yüksek iken 3. Saatte daha düşük olduğu görülmektedir. Angiolini vd. [96] tarafından hamur viskoelastik özelliklerinin fermentasyona bağlı olarak değiştiği; fermentasyon türünün ve pH seviyesinin son reolojik özellikler üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir. Nişasta parçacıkları gluten nişasta karışımında sürekli bir matriks oluşturduğundan gluten polipeptitleri daha sert form kazanmaktadır. Büyük deformasyonlarda elastikiyet başlangıçta nişasta-nişasta temasının ayrıldığı gluten elastikiyetine bağlıdır. Gluten-nişasta ara gerinimlerde etkindir. Yüksek deformasyonlarda nişasta granülleri yeniden sıralanarak yapılandırılır. Yüksek deformasyonlarda nişasta moleküllerinin yeniden düzenlenmesi gluten iplikleri arasında gerilmenin artması sonucunda glutenin kendi yırtılması olasılığının artmasına bağlı olarak modülde düşmeye neden olmaktadır [75]. Hamur örnekleri SAOS bölgesinde yeteri kadar esnetilmedikleri için elastik karakteri daha baskın gelmektedir ancak yüksek gerinim değerlerinde, gluten ağının yumuşaması birlikte gluten yapı bütünlüğünü kaybetmeye başlarken G' değeri, G'' değerine yaklaşmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde kontrol örneğinin G' değerleri ile G'' değerleri arasındaki fark daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak kuvvetli gluten ağına bağlı olarak tüm gerinim aralığında salınım akışına yüksek direnç göstermesi olarak açıklanabilir. Spontan ekşi hamur katkıli hamurlarda G' ve G'' değerlerinde düşüş *Lb. brevis* E25 içeren hamur örneklerine göre daha yavaş gerçekleşmiştir. Fermentasyon prosesi sadece kimyasal kompozisyonu değiştirmez ayrıca akış davranışı, viskozite ve hamur yoğunluğunu da değiştirmektedir. Ekşi hamur örneklerinde pH değerleri daha düşük olduğundan uygulanan gerinime bağlı olarak kontrol hamuruna göre deformasyon daha hızlı gerçekleşmiştir. Fermentasyon prosesi boyunca gelişen organik asitler nişasta viskozitesinin azalmasına neden olmaktadır. Asit gelişimine bağlı olarak nişasta degradasyonu meydana gelmektedir [126,127]. Kontrol hamuru diğer ekşi hamur katkıli hamurlara göre değerlendirildiğinde SAOS bölgesinde gluten yapısı viskoelastik

özelliğini tam olarak koruyabildiği için G' , G'' değerleri birbirinden daha uzak olduğu görülmüştür. Tüm ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için ise gluten yapısının daha az oluşumuna bağlı olarak G' ve G'' daha düşük ve değerleri birbirine daha yakın olduğu sonuçları vermiştir. Bütün hamur örnekleri için gluten ağının büyük gerinim değerlerinde (%200 gerinim) yumuşamasına bağlı olarak gluten ağıdaki bütünlüğün kaybolması ile G'' değerleri G' değerlerini aşmıştır [26]. Bu olay malzemin viskoelastik katıdan viskoelastik sıvıya geçişi olarak adlandırılmaktadır [124]. Bu değişim hamur yapısının verilen enerjiyi depolama yeteneğini kaybetmesi olarak ifade edilebilmektedir. Bütün örnekler için ekşi hamur konsantasyonu arttıkça G'' değerinin G' değerini aştığı nokta genel olarak azalmıştır. Bu farklılık ekşi hamur ilavesi ile hamurun elastikiyetinin azalttığı literatür bilgisini desteklemektedir [119]. Zamana bağlı olarak G'' değerinin G' değerini aştığı noktalar Tablo 4.12'de verilmiştir. Özellikle asit düzeyinin yüksek olduğu OSH ve LH hamur örneklerinde üç saatlik fermentasyon süresi aşım noktalarını düşürdüğü görülmektedir.

Tablo 4.12 Hamur örneklerine ait G'' değerlerinin G' değerlerini aştığı gerinim noktaları (%)

	Hamur Örnekleri												
	SH				OSH				LH				KH
Süre	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	
0. SAAT	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	19,9	31,6	50,1	50,1	31,6	31,6	79,5
1. SAAT	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	50,1
2. SAAT	31,6	50,1	50,1	31,6	19,9	31,6	19,9	19,9	31,6	31,6	31,6	31,6	50,1
3. SAAT	50,1	50,1	50,1	31,6	31,6	19,9	19,9	31,6	31,6	31,6	19,9	19,9	50,1

Belirtilen noktalarda meydana gelen değişimler, hamurun esnekliğini azaltan ekşi hamurun eklenmesiyle ilgilidir. Asit, buğday unundan ekstrakte edilen glutenin çözünürlüğünü artırır [55, 128]. Heterofermantatif özellikteki laktobasiller ekşi hamur ortamında gelişirken, ekstraselüler enzim olan glutatyon redüktaz enzimi aktif hale gelerek oksitlenmiş formda olan disülfid formundaki glutatyonu (GSSG) sülfidril formu olan GSH'ye indirgeyebilmektedir. Molekül içi ve moleküller arasında oluşmuş disüfidril bağ sayısının indirgenerek azalması, gluten protein yapısının çözünürlüğünü arttırarak proteolitik enzimlerin daha ulaşılır olmasını sağlamaktadır [129, 130]. Enzimatik aktivite, özellikle proteaz etkinliği ve asit oluşumu, ekmek hamurlarında gözlenen reolojik değişikliklerin başlıca nedenleridir [50]. Yapılan çalışmaların sonuçlarına [32, 57] göre hamurların reolojisini belirleyen ana faktör, optimum asidik koşullarda tahıl proteazlarının aktivitesidir. Bu sonuçlar, asidik optimal koşullarda tahıl proteazlarının, ekşi hamur ekmeği fermentasyonu sırasında meydana gelen reolojik değişikliklerde merkezi bir rol oynadığını göstermektedir. Fermentasyon sırasında üretilen asitler, hamurun reolojik davranışını etkiler ve düşük pH değerine sahip hamur daha kısa karıştırma süresi gerektirir. Literatür çalışmalarında LAB starter kültürü ile hazırlanan hamur örneklerinin faz açısı değerlerinin kontrol hamuruna göre arttığı ifade edilmektedir [31]. Tahıl proteaz enzimleri ekşi hamur üretiminde merkez rolü üstlendiğinden G' değerleri konsantrasyon artışına bağlı olarak düşmüştür. Proteaz enzimi dışında amilolitik enzimler pH 3,6-6,2 arasında aktivite göstermektedir. Ekşi hamur üretimi sırasında spontan hamur üretimlerinde pH düşüşü yavaş gerçekleştiğinden amilaz enzimi aktif rol oynamaktadır [131]. Buna bağlı olarak nişasta yapısı fermentasyon sırasında hidroliz olarak gluten yapısını doldurucu etkisini kaybetmiştir. Angioloni vd. [104] tarafından yapılan çalışmada daha yüksek depolama modüllünün hamurun daha sert yapıda olduğunu gösterdiği ifade edilmiştir. Ekşi hamur ilaveli hamur örneğinde düşük depolama modülü ekşi hamur ilavesinin elastik bileşeni azalttığı belirtilmiş, fermentasyon süresi boyunca disülfid bağları kırılırken ve lipoksigenaz enzimi tarafından glutenin yapısının hidrofobisitesi değiştii ifade edilmiştir [132]. Clarke vd. [31] buğday hamurunun reolojik özelliklerinin değerlendirdiğı çalışmada tek starter kültür ve

geleneksel karışık başlangıç starterlerinin etkisi değerlendirilmiş elde ettiğimiz bulgularla uyumlu olarak faz açısını önemli ölçüde arttırdığını bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada ekşi hamur ilavesi yapılarına göre hem asitsiz hem de kimyasal olarak asitlendirilmiş glutensiz hamurların her ikisinin de önemli ölçüde daha yüksek $|G^*|$ değerlerine sahip olduğu, bu nedenle ekşi hamur ilavesinin yapıyı yumuşattığı ifade edilmiştir [133]. Yapılan bu çalışmalar tespit ettiğimiz bulguları destekler niteliktedir. Sonuçlar fermentasyonun depolama modüllerinde daha büyük bir düşüşle azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Böylece, hamurun viskoz davranışı, fermentasyon sırasında daha belirgin hale gelmiştir.

4.6.2 Lissajous Bowditch Eğrilerinin Normalize Edilmemiş Projeksiyonunun Değerlendirilmesi

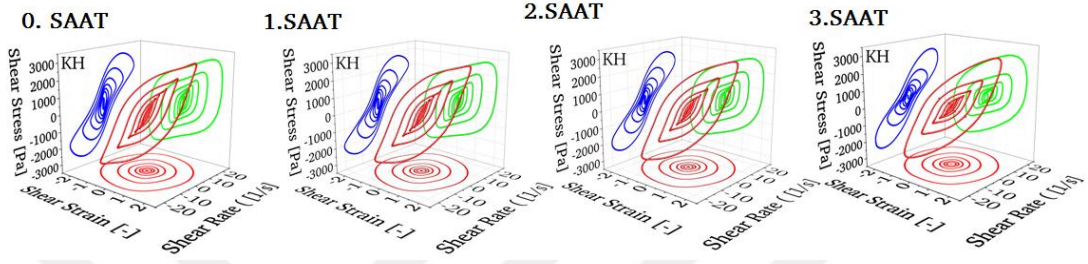
Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13 çalışılan bütün hamur örnekleri için elastik ve viskoz bileşenlerin değerlendirilmesinde gerilim tepkisi artışını ve gerinim (%), gerinim hızı (1/s) düzlemleri üzerindeki çıkarımlarını görselleştirmek için kullanılan 3-D normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrilerini göstermektedir. Gerilim (Pa)-gerinim (%) düzlemi elastik perspektifine (yeşil eğriler) denk gelirken gerilim-gerinim hızı (1/s) malzemenin viskoz perspektifine (mavi eğriler) denk gelmektedir. Çalışılan bütün hamur örneklerinin döngü içi doğrusal olmayan davranışının değerlendirilmesi için farklı gerinim (%0,0126, %0,316, %0,795, % 5,2, %19,9, %31,7, %50,3, %79,7, %126 ve %200) noktaları kullanılmıştır. Ölçümler 10 rad/s'de gerçekleştirilmiştir. Bütün hamur örnekleri için gerinim değeri % 0'dan % 200'e kadar artarken Lissajous eğrilerinde genişleme görülmüştür. Lissajous-Bowditch eğrilerinin karşılaştırılması kullanılan ekşi hamur türüne ve ekşi hamur konsantrasyonuna bağlı olarak gerilim-gerinim halklarının şekillerini değiştirdiğini ortaya koymuştur. Elastik normalize olmayan Lissajous-Bowditch eğrilerinde görülen farklılıklar hamur örneklerinin viskoelastik davranışlarında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Hamur örneklerinin doğrusal olmayan reolojik analizlerinin karşılaştırılmasında elips şeklinde meydana gelen sapma ile yapılabilmektedir [122]. Kontrol hamuruna kıyasla ekşi hamur katkılı

hamur örneklerinin doğrusal olmayan reolojik özellikleri için genel olarak bir değerlendirme yapıldığında artan gerinim ve konsatrasyona karşı elips şeklinden sapma artış yönündedir.

Dar olan gerinim-gerilim eğrilerinin eliptik şekli daha büyük boyuta ve daha dairesel bir şekle dönüşmüştür. Gerilim-gerinim tarafından temsil edilen elastik izdüşüm olarak ifade edilen 10 rad/s'de kontrol numunesine ait olan halkalar, doğrusal olmayan bölgede daha sert ve katı davranış sergileyen dar elipsler sergilemiştir. Bununla birlikte, numunelerin elastik tepkisini temsil eden gerilme-gerinme halkalarının şekli ve ebadı (Şekil 4.13) sırasıyla LH10, LH20, LH30 ve LH40, daha dairesel ve daha büyük hale gelmiştir. Bu değişikliğin daha yüksek miktarda LH içeren örnekler için daha belirgin olduğu görülmektedir. Lissajous eğrilerinin şeklindeki ve büyüklüğündeki bu değişiklikler, hamurun ekşi hamur miktarında meydana gelen artışla daha yumuşak ve viskoz bir yapı kazandığını ifade etmektedir. Bu, asidik ortamda pozitif yük ile proteinin çözünürlüğünü artırarak ekşi hamur içeren örneklerin dağılan enerjisine bağlanabilir [31, 134]. Gerilme-gerinme hızı döngüleriyle temsil edilen viskoz bileşene ait Lissajous halkaları elastik bileşende meydana gelen değişimi destekler sonuçlar vermiş, ekşi hamur içeren örneklerin kontrol hamura göre olduğundan daha dar boyutta ve daha eliptik şekil göstermiştir. Ekşi hamur miktarı arttıkça viskoz projeksiyonda daha dar elipsler görülmüştür. Gerinim arttıkça sistemler doğrusal olmayan viskoelastisite aralığına girer ve harcanan mekanik enerji miktarı her döngüde artmıştır.

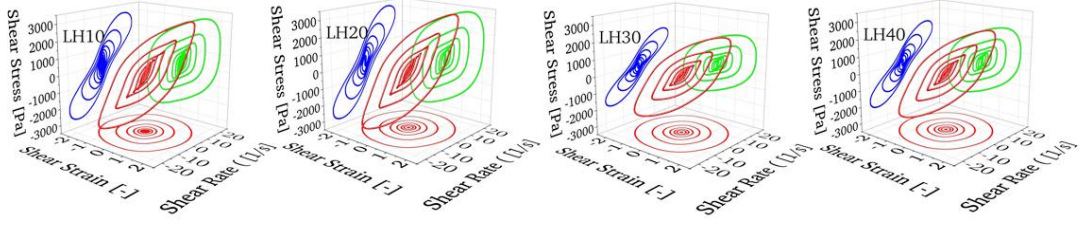
SH ve OSH ekşi hamur türünü içeren hamur örneklerinin 3-D normalize olmayan dataları değerlendirildiğinde örnekler her zaman dilimi için konsantrasyonu arttıkça gerilim-gerinim projeksiyonu değerlendirildiğinde Lissajous eğrileri daha küçük ve dairesel formda olduğu görülmektedir. Yapısal bozulmaya bağlı olarak örnekler daha az katı davranışı göstermiştir [135]. Elastik bileşenin yüksek gerinimlerde yapıyı koruyamadığı görülmektedir. Aynı örneklerin viskoz bileşenlerine ait projeksiyonlar değerlendirildiğinde tek kademeli spontan hamur katkılı hamur örneklerinde viskoz bileşenin doğrusal olmayan davranışta etkin rol aldığı görülmektedir. LH katkılı hamur örneklerine kıyasla SH örneklerinde viskoz bileşen için meydana gelen değişim daha belirgin

düzeydedir. SH katkı örneklerde özellikle yüksek gerinim noktalarında ulaşılan maksimum gerilim değerlerinin çok daha düşük olduğu görülmüştür. SH hamurun 3-D görüntülerinde konsantrasyon ve zamanın artmasına bağlı olarak belirgin farklılaşma görülmektedir. Bu farklılaşma SH katkıli hamur örneklerinde hem elastik hem de viskoz bileşenin reolojik özelliklerini daha az koruyabildiği çıkarımına ulaşılabilir.

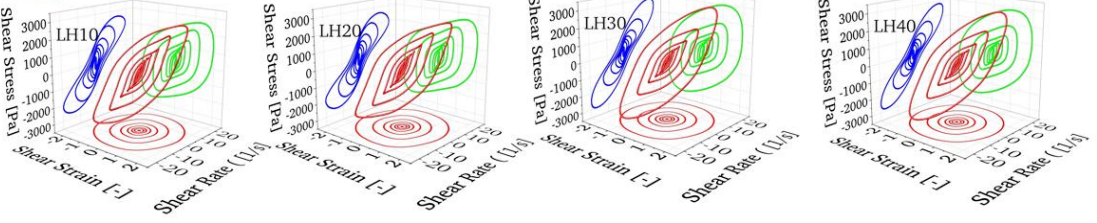


Şekil 4.10 Kontrol hamurunun (KH) stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri

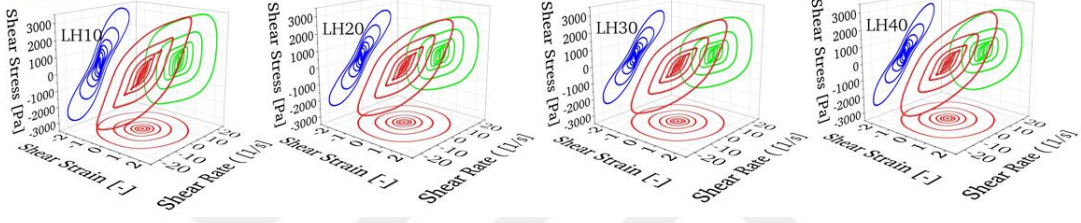
0.SAAT



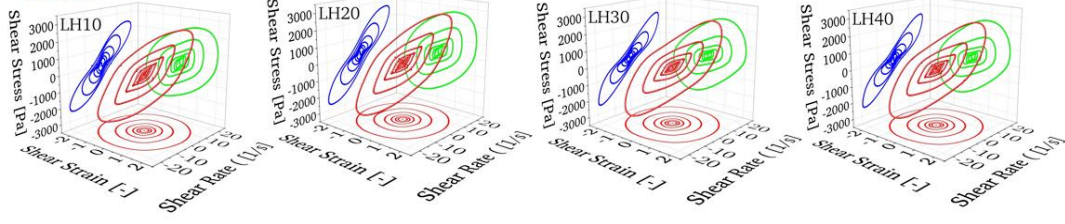
1.SAAT



2.SAAT

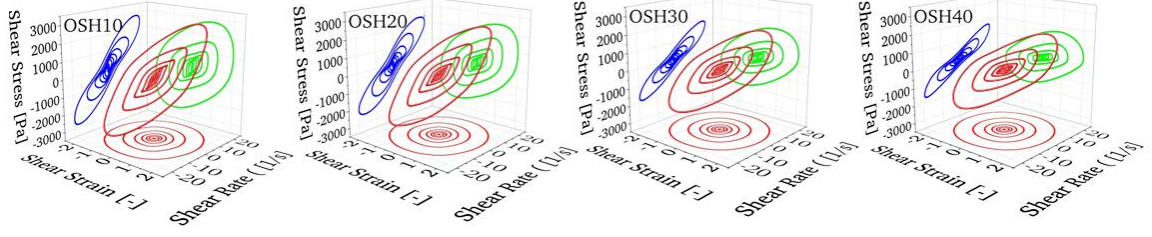


3.SAAT

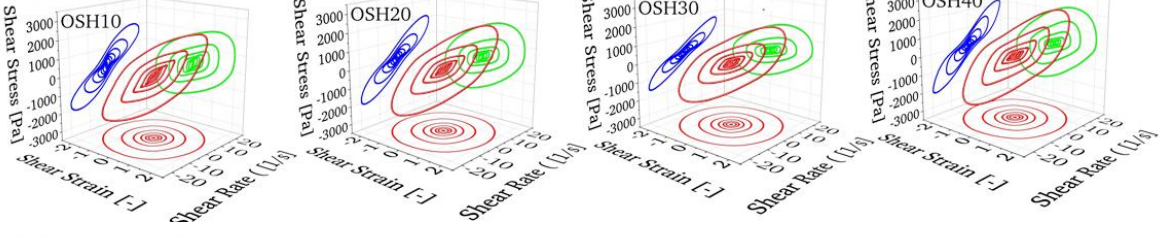


Şekil 4.11 LH katkılı hamur örneklerinin stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri

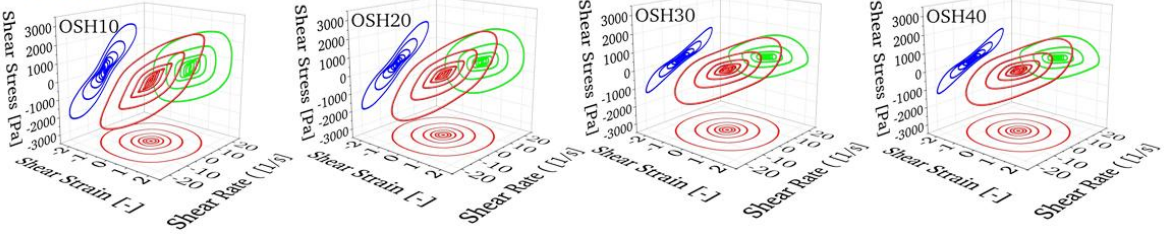
0.SAAT



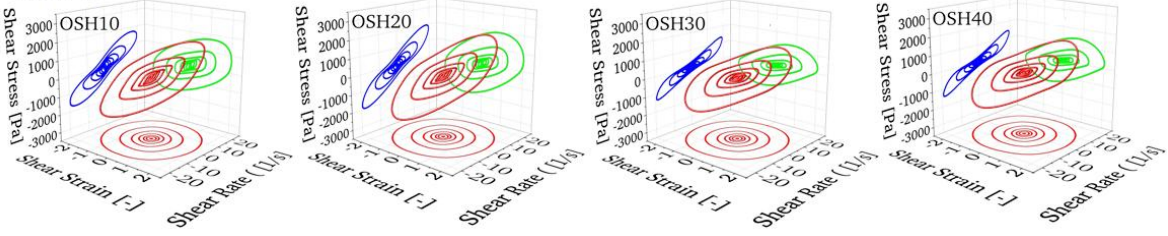
1.SAAT



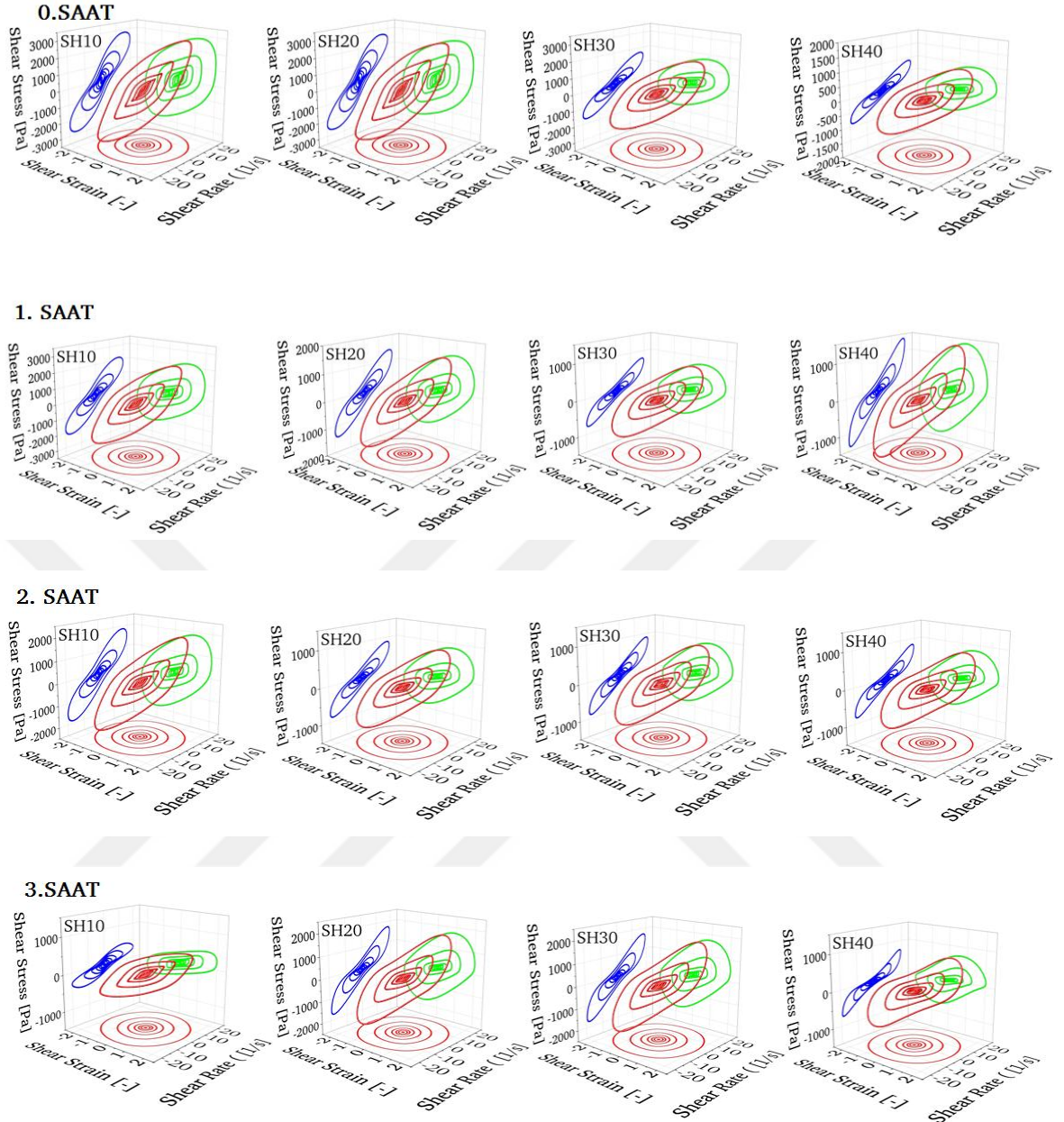
2. SAAT



3. SAAT



Şekil 4.12 OSH katkılı hamur örneklerinin stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri



Şekil 4.13 SH katkılı hamur örneklerinin stres yanıtının üç boyutlu normalize edilmemiş Lissajous-Bowditch eğrileri

4.6.3 Lissajous-Bowditch Eğrilerinin Normalize Elastik Projeksiyonunun Değerlendirilmesi

Depolanan ve dağılan enerji, sırasıyla gerilim-gerinim ve gerilim-gerinim hızı grafikleri üzerindeki alanla ilgilidir [121]. Veriler normalize edilmiş Lissajous-Bowditch döngüleri olarak sunulduğunda, doğrusal olmayan davranış daha belirgin hale gelmektedir. Normalleştirme prosedürü ile döngüler yörünge yönlerine göre değişmektedir [13]. Toplam gerilim (σ) değeri, elastik (σ') ve

viskoz (σ'') bileşenlerine ayrılabilir. Doğrusal olmayan davranışın gerometrik yorumu olan yöntemde malzemenin tepkisi, stres sinyallerinin elastik ve viskoz bileşenlere ayrıştırılmasıyla incelenir [136]. Elastik bileşenin doğrusal olmayan özelliklerinin değerlendirilmesi için toplam stres tepkisi ve elastik stres bileşenin maksimum değerlerine bölünmesiyle normalize edilmiş gerilim (σ/σ_{max}) ve normalize edilmiş elastik gerilim (σ'/σ'_{max}) parametreleri elde edilir. Doğrusal bölgede minor eksen ana eksene göre oldukça küçük olduğundan elde edilen toplam normalize gerilim-gerinim grafiklerinin elips şekilleri simetriktir. Elips formunda bu eğrilerde elastik gerilim sabit eğilimli düz çigi formundadır [136]. Doğrusal bölgeden doğrusal olmayan bölgeye geçişle beraber simetri bozularak elips formunda eğrilerde şekil bozuklukları meydana gelir ve rhomboid forma benzer şekil oluşumları gözlemlenir [13]. Hazırlanan ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ve kontrol hamurunun elastik bileşenin uygulanan deformasyona karşı doğrusal ve doğrusal olmayan tepkisini yansıtmak amacıyla normalize gerinime (γ/γ_{max}) karşı normalize elastik gerilim(σ'/σ'_{max}) ve normalize toplam gerilim (σ/σ_{max}) grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16). Örneklerin Lissajous-Bowditch eğrilerinin 10 gerinim noktası için normalize edilmiş detaylı değişimleri Ek A' da verilmiştir. Ekşi hamur türünün, konsantrasyonun ve zamanın doğrusal olmayan elastik özelliklere etkisi elastik izdüşümler analiz edilerek açığa çıkarılabilir.

Lissajous-Bowditch eğrilerinde gerilim değerlerinin belirlendiği her gerinim noktasında gerinim genliği artmıştır. Normalize edilen datalar üç gerinim noktası için gösterilmiştir. SAOS bölgesi için (siyah eğriler) % 0,0126 gerinim noktası, MAOS bölgesi için %5,2 (mavi eğriler) gerinim noktası ve LAOS bölgesi için (kırmızı eğriler) %200 gerinim noktası kullanılmıştır. Belirlenen bu üç gerinim noktası için çizilmiş olan eğriler üst üste olacak şekilde çizilmiş ve ilave edilen ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana göre gruplandırılmıştır. Oldukça elastik malzemeler için, uygulanan gerinime (γ/γ_{max}) gerilme yanıtı, düşük gerinimde doğrusal veya daralmış eliptik bir şekil olarak yansıtırken gerinim arttıkça daha geniş eliptik şekiller olarak gösterilmektedir [123]. Başka bir ifade ile, elips şeklindeki dar eğriler, doğrusal bölgede uygulanan küçük gerinimlere karşı materyalin deformasyon sonrası malzemenin yapısının tamamen geri

çevrilebildiğini ifade etmektedir. Nişasta yapısal olarak malzemenin elastik özelliklerini sağlayan ve döngü içi doğrusallığını koruyan protein ağını parçalamadan yeniden yapılandırılabilir. Materyal LAOS bölgesine girdiğinde, eğrilerin yönü ve şekli değişir. Materyalin “gerinim yumuşaması” davranışı ana eksenin gerilme eksenine doğru saat yönünde döndürülmesiyle gösterilirken “gerinim sertleşmesi” davranışı kayma gerilmesinin saat yönünün tersinde yükselmesiyle gösterilir [22, 25].

Buğday unu hamuru doğrusal olmayan davranışa sahip viskoelastik bir malzemedir [137]. Genel olarak bütün ekşi hamur konsantrasyonlarının elastik bileşeni değerlendirildiğinde %0,0126’dan %200 gerinim noktasına artışı sonucunda daha dar olan eğriler yuvarlak forma dönüşmüştür. Siyah ile gösterilen en küçük gerinim noktası eliptik formda, mavi ile orta gerinim noktasında, eliptik kırmızı ile gösterilen en büyük gerinim noktasında ve dairesel formdadır. Lissajous eğrilerinin gerinim arttıkça genişleyerek dairesel olması uygulanan deformasyona bağlı olarak gluten ağının kırılması sonucu viskoelastik davranışındaki değişimi yansıtmaktadır [87].

LH, SH ve OSH ekşi hamur katkılı örnekler için SAOS bölgesinde (%0,0126) elastik gerilme sabit eğilimli düz bir çizgi formundadır. Uygulanan küçük deformasyon hamurun sahip olduğu pH değerinin nişasta-nişasta, nişasta-gluten etkileşimlerine belirgin bir şekilde etki etmediği düşünülmektedir. Üç ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için ağ yapısının korunmasına bağlı olarak elastik davranış baskındır.

LH, SH ve OSH ekşi hamur katkılı örnekler için MAOS bölgesinde (%5,2) doğrusaldan doğrusal olmayan geçiş gözlenmiştir. Bütün örnekler için elastik gerilim arttıkça Lissajous eğrileri düz çizgi formunu kaybetmiştir. Gerilim değerlerinde görülen pozitif iç bükeylik ile elastik gerilim eğrilerinde gerinim katılaşması davranışı görülmektedir. MAOS bölgesi için hamur pH’ının etkisi KH hamur örnekleri ile karşılaştırıldığında net bir farklılık olmadığı görülmektedir.

LH, SH ve OSH ekşi hamur katkılı örnekler için LAOS bölgesinde (%200) doğrusal olmayan davranışlarında belirgin farklılıklar görülmektedir. Her bir ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için maksimum gerinim noktası olan %200 değerinde kırmızı renkli eğriler birbiri ile kıyaslanmıştır. Bu gerinim noktasında

eğrilerin büyüklüğü ile şeklinin değişiminin zamana ve konsantrasyon artışına bağlı olduğunu görmek mümkün olmuştur.

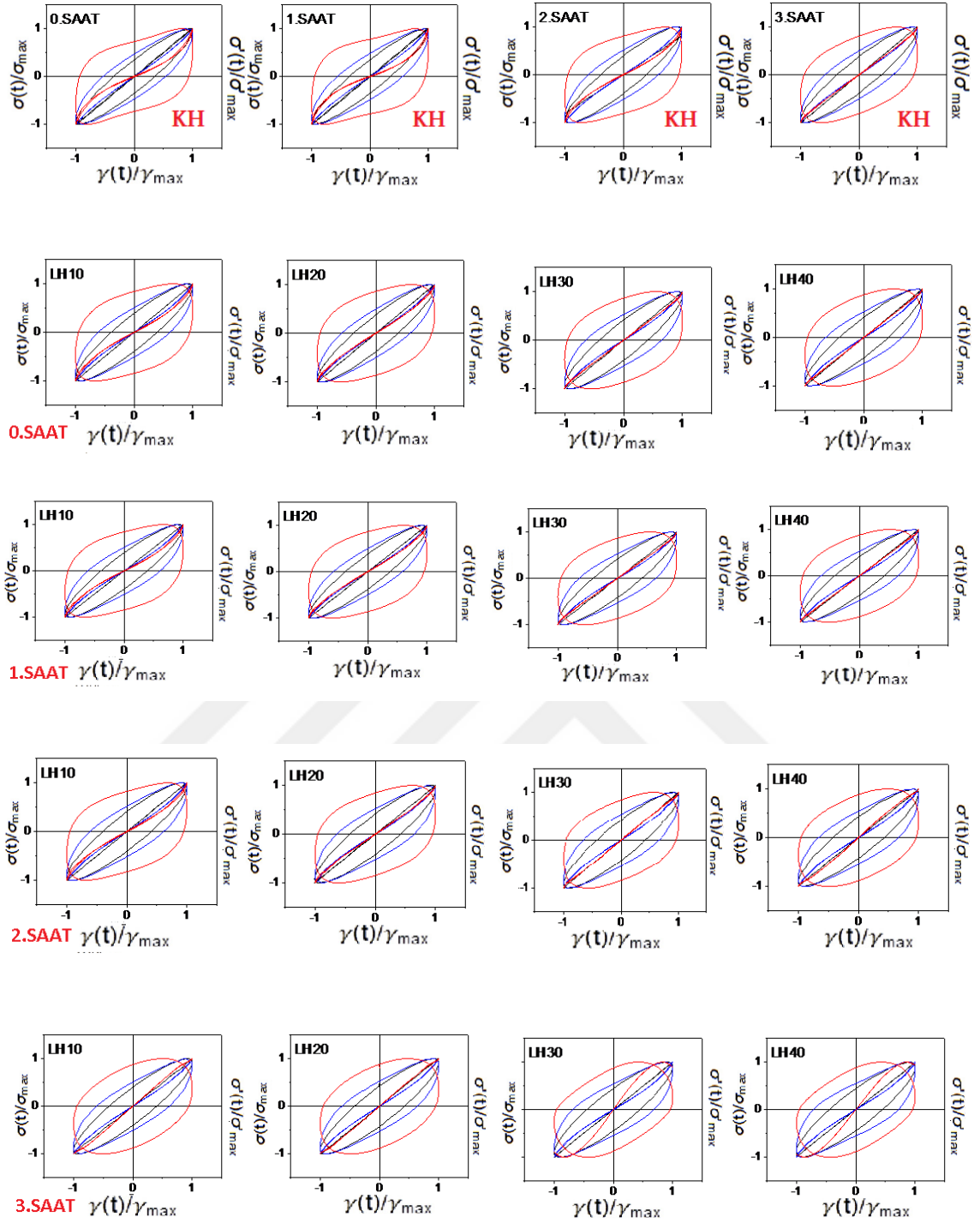
LH hamuruna ait elastik Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.14' de gösterilmiştir. Ölçüm alınan 10 gerinim noktası için elastik bileşen değişim grafikleri detaylı olarak Ek-A (3-6)'da gösterilmiştir. Kontrol hamuruna (KH) ait kırmızı eğriler doğrusal olmayan bölgede daha dar eğrilerle temsil edildiğinden sert ve katı benzeri davranış sergilediği sonucu çıkarımı yapılabilmektedir. Ancak LH katkılı örneklerle ait kırmızı halkalar kontrol hamuruna göre daha dairesel ve boyut olarak daha büyük olduğu görülmektedir. Bu değişim LH konsantrasyonunun artışına bağlı olarak daha belirginleşmiştir. LH katkısı ile hazırlanan hamurlarda kırmızı halkaların dairesel şekli ve geniş boyutu daha yumuşak ve viskoz benzeri davranış sergilediğini göstermektedir [27]. LH katkılı 0. ve 1. saat hamur örnekleri %200 gerinim noktasında iç eğrilerin göstermiş olduğu pozitif iç bükeylik ile gerinim katılaşması davranışı sergilemiştir. LH30 ve LH40 örneklerinin 2. saati ile 3. saat LH örneklerinin bütün konsantrasyonları negatif iç bükeylik ile gerinim yumuşaması davranışı sergilemiştir. Elde edilen yumuşama etkisi protein çözünürlüğünün neden olduğu yapısal zayıflamadan kaynaklanmaktadır. Protein çözünürlüğünde meydana gelen bir artış gluten proteinleri arasında molekül içi elektrostatik itmeyi teşvik etmektedir. Protein gruplarının denatürasyona daha reaktif hale gelmesi ile yeni bağların oluşumu engellenir ve bu etki sonucunda yapıda yumuşama gözlenmektedir [104]. Düşük pH değerlerinde buğday gluteninin daha çözünür olduğu bilinmektedir. Glutenin izoelektrik noktası $pI=6,1$ olup bu pH değerinde gluten çözünürlüğü minimumdur. Protein yapısının sahip olduğu nötral yük polipeptidin birleşme reaksiyonunu arttırmaktadır. Protein yapısının iyonize formda olması çözünürlüğü etkilemektedir [138]. Çalışmamızda ekşi hamur katkılı bütün örneklerin pH değerleri göz önüne alındığından izoelektrik noktanın altında olduğu görülmektedir. LH miktarı arttıkça glutenin izoelektrik noktasından uzaklaşmasına bağlı olarak KH örneğine göre hamur yapısında yumuşama meydana gelerek hamurun daha yumuşak ve yapışkan benzeri olmasına neden olmuştur. Bu etki normalize edilmiş elastik Lissajous eğirlerinde net olarak

görülmektedir. Katı benzeri davranışta salınımı tamamlama süresi, materyalin gevşeme zamanından daha az olması katılaşma davranışının daha yüksek olmasına neden olmaktadır [139]. Bu bilgi doğrultusunda kontrol hamur örneğinin uygulanan deformasyon karşısında daha çabuk yapısını toparlayabildiği söylenebilmektedir.

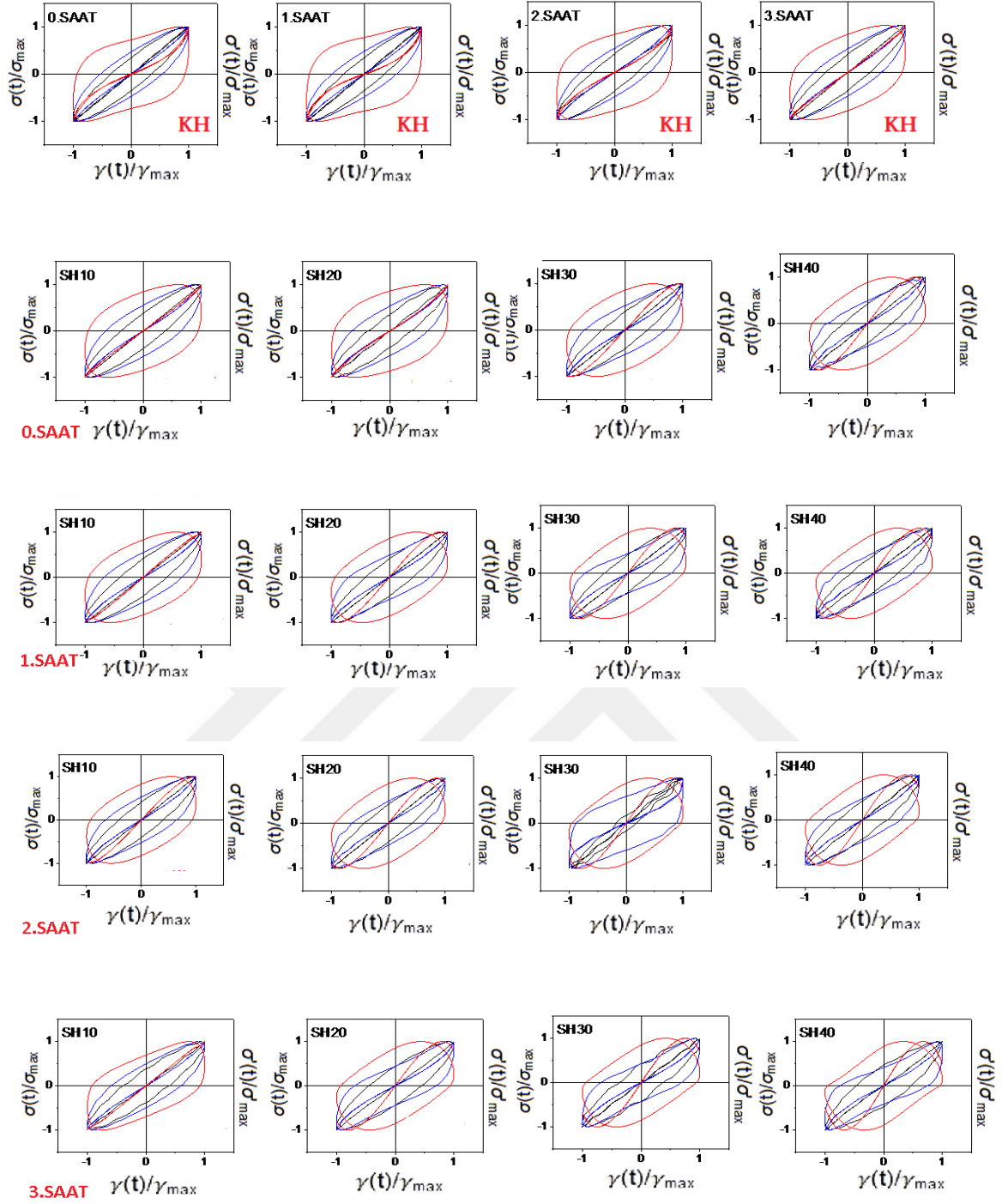
SH hamuruna ait elastik Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Ölçüm alınan 10 gerinim noktası için elastik bileşen değişim grafikleri detaylı olarak Ek-A (19-22)'da gösterilmiştir. 0. Saate ait SH10 ve SH20 örnekleri harici tüm örneklerin %200 gerinim noktasında zamana bağlı Lissajous-Bowditch elastik gerilim eğrilerinde görülen negatif iç bükeylik ile gerinim yumuşaması davranışının baskın olduğu söylenebilir. LH katkılı hamur örneklerine kıyasla SH katkılı hamur örneklerinin uygulanan yüksek deformasyonlara karşı daha hassas olduğu görülmektedir. Başka bir şekilde açıklanacak olursa; doğrusal bölgede SH konsantrasyonu azaldıkça daha elastik bir davranış meydana gelirken, doğrusal olmayan bölgede artan SH konsantrasyonu ile viskoz özelliğin baskın geldiği viskoelastik davranış sergilenmiştir. Nişasta granülleri gluten ağında homojen olarak disperse halde bulunmaktadır. Farklı buğday nişasta kaynakları ile sabit gluten içerikleri karıştırıldığından oluşan hamurların reolojik davranışında oldukça büyük farklılık oluşmakta, bu da nişastanın doğrusal olmayan davranışta aktif rol aldığını göstermektedir [68]. Yapısal bozulmanın artırılmış enerji girişi tarafından yönlendirildiği ve elastik davranışların kademeli olarak daha viskoz davranışlara dönüştüğünü düşündürmüştür [27]. Asit muamelesi nişastanın jelatinleşme davranışını etkiler. Örneğin, sakız şekerlerinde kullanılan nişastalar genellikle hidroklorik asit, sitrik asit ve laktik asit ile modifiye edilir. Nişasta asidik amino asit varlığında hidrolizlenme derecesi artarak G' ve G'' değerleri azalmaktadır. Asidik amino asitler (Aspartik asit ve Glutamik Asit) nişasta granül şişmesinin azalmasına neden olabilir. Bu sonucu olarak G' ve G'' değerleri azalmaktadır. Asidik amino asitler (Asp ve Glu), şişirme kapasitesini düşürebilir, ancak nişasta granüllerinin amiloz süzülmesini arttırabilir. Asidik ortamda nişastanın glikozidik bağları kolayca hidroliz edilmektedir. Hidroliz olan nişasta

jellerinin sertlik değerleri belirgin şekilde azalmaktadır [140]. Bu bilgiler SH hamurlarında görölen yumuşamayı destekler niteliktedir.

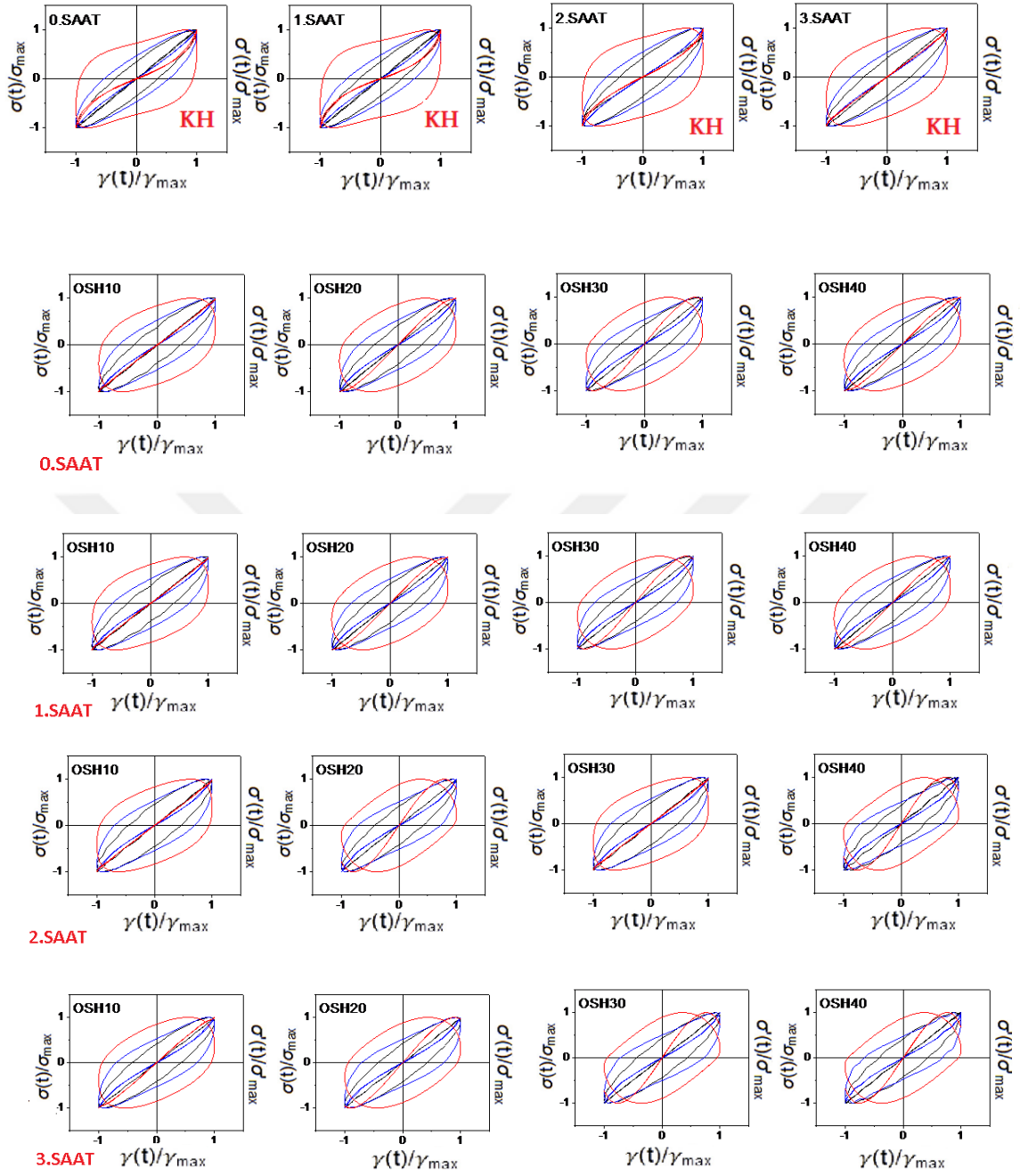
OSH hamuruna ait elastik Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri şekil 4.16'da gösterilmiştir. Ölçüm alınan 10 gerinim noktası için elastik bileşen değişim grafikleri detaylı olarak Ek-A (11-14)'da gösterilmiştir. %200 gerinim noktası için 0. saate OSH10 ve OSH20 örnekleri pozitif iç bükey eğrileri ile gerinim katılaşması, negatif iç bükeylik ile OSH30 ve OSH 40 gerinim yumuşaması davranışı; 1. saat ve 2. saatte OSH10 örneği gerinim katılaşması ve OSH20-40 örnekleri gerinim yumuşaması; 3. saatte bütün konsantrasyonlar gerinim yumuşaması davranışı sergilemiştir. Artan zamana bağlı pH etkisi net görölmektedir. Hem SH ve hem de OSH örneklerinde zamana bağlı pH düşüşü daha yavaş gerçekteşiğinden amilaz aktivitesinin etkisinin daha yüksek olduğu elde edilen eğriler ile de doğrulanmıştır. Bu varsayımla gluten ağını dolduran nişasta yapısı daha az olduğundan LH hamuruna kıyasla OSH hamur örneklerinde baskın gerinim yumuşaması davranışı görölmüştür.



Şekil 4.14 KH ve LH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zaman bağlı normalize edilmiş elastik Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi



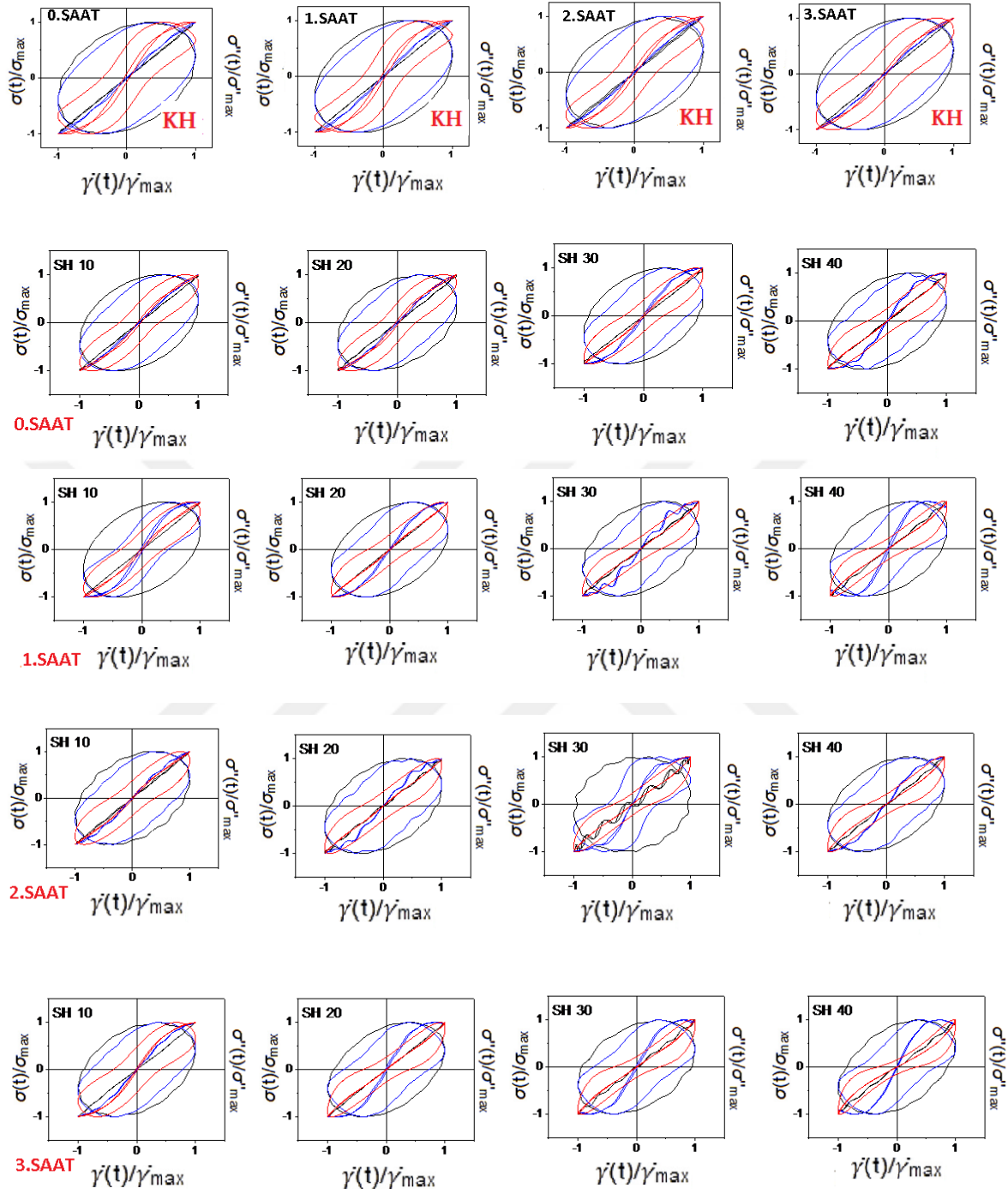
Şekil 4.15 KH ve SH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zaman bağlı normalize edilmiş elastik Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi



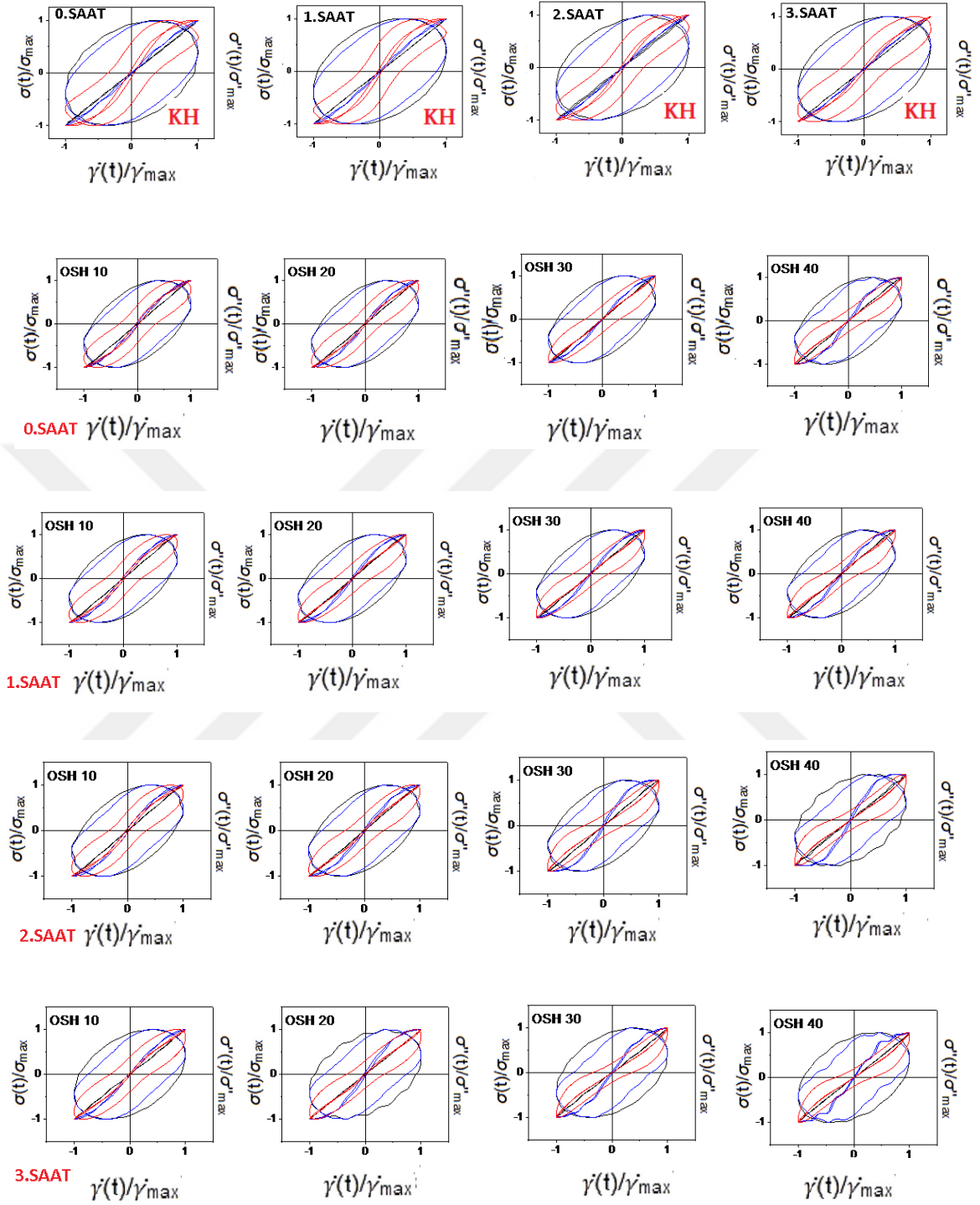
Şekil 4.16 KH ve OSH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zaman bağlı normalize edilmiş elastik Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi

4.6.4 Lissajous Eğrilerinin Normalize Viskoz Projeksiyonunun Değerlendirilmesi

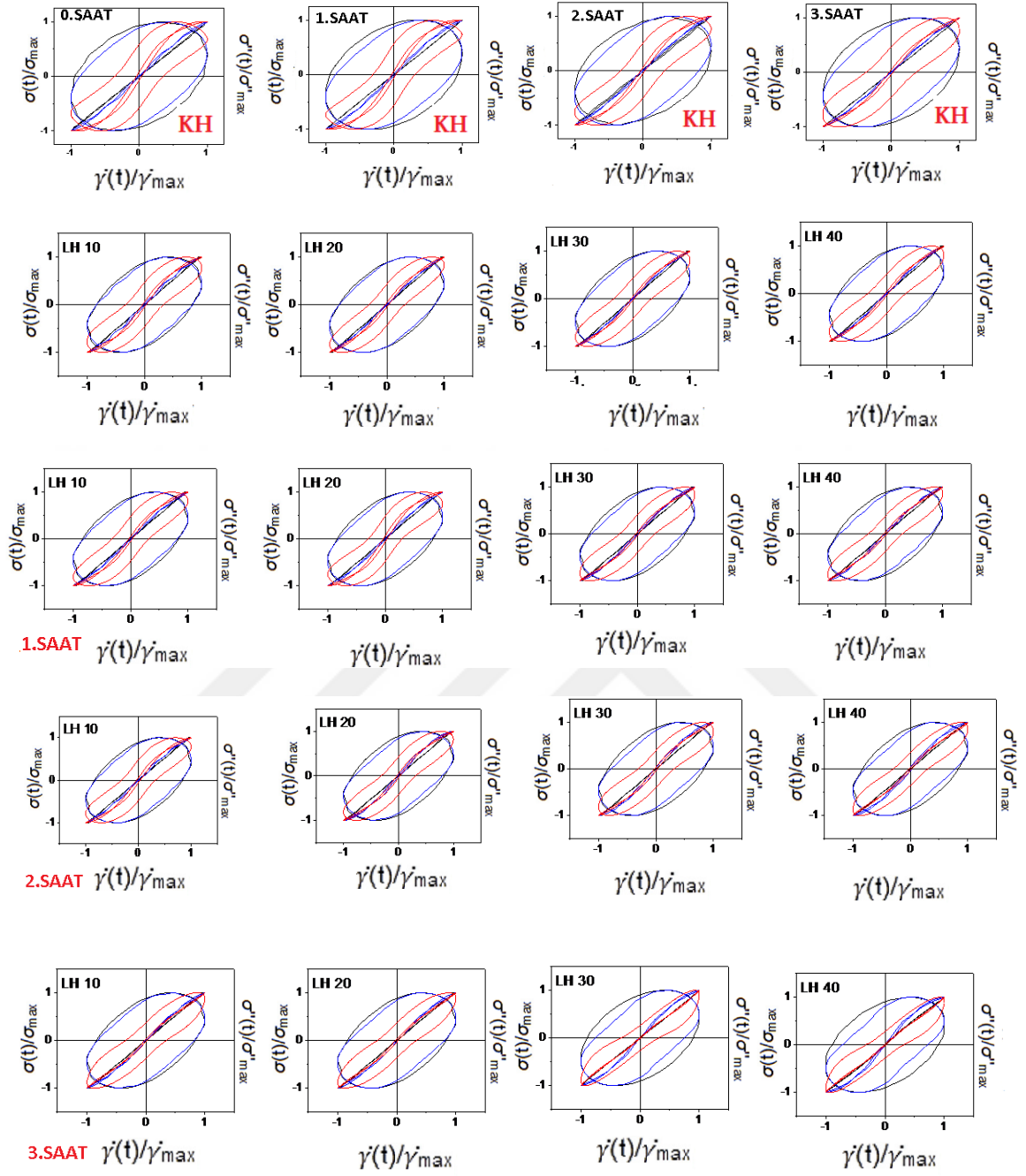
Doğrusal bölgede normalize gerilime karşı normalize gerinim grafiklerinde mükemmel viskoz özellik gösteren bir yapı dairesel eğri verirken, doğrusal olmayan bölgeye geçişle dairesel eğrilerde daralmalarla beraber eğrilmeler oluşur ve meydana gelen bu şekil değişikliği gerinim genliğinin artışı ile baskın hale gelir. Viskoz perspektifte, mükemmel viskoz malzemeler için uygulanan gerinim hızı ($\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_{\max}$) oranına gerilim yanıtı düz çizgi veya dar elips şeklinde yansırken [88, 89, 123] malzeme doğrusal viskoz davranıştan uzaklaştıkça ve daha elastik bir yapıya sahip olduklarında daha büyük elips veya mükemmel daireler [141] görülmektedir. Lissajous-Bowditch viskoz eğrilerinde dış döngüler doğrusal bölgeyi (iç kısımdaki elastik analizin aksine) temsil ederken ve iç döngüler doğrusal olmayan (dış kısımdaki elastik analizin aksine) bölgeyi temsil etmektedir [27]. LH, SH, OSH ekşi hamur katkılı hamur örneklerine ait viskoz Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19’da gösterilmiştir. Genel olarak bütün ekşi hamur konsantrasyonlarının viskoz bileşeni değerlendirildiğinde %0,0126 dan %200 gerinim noktasına artışı sonucunda viskoz eğrileri dairesel formadan eliptik forma dönüşmüştür. Siyah ile gösterilen en küçük gerinim noktasında (%0.0126) dairesel form, mavi ile gösterilen orta gerinim noktasında (%5,2) dairesel, kırmızı ile gösterilen en yüksek gerinim noktasında (%200) dairesel eğrilerin daraldığı daha eliptik form gözlenmiştir. En küçük gerinim noktasında görülen dairesel form tüm hamur örneklerinin mükemmel bir viskoz özellik göstermediği elastik özelliğinde reolojik davranışa katkıda bulunduğunu göstermektedir. Lissajous eğrilerinin gerinim arttıkça daralarak eliptik benzeri form olması hamur yapısında süspesiyon formunda bulunan viskoz bileşenin (nişasta) baskın viskoelastik davranışını yansıtmaktadır [87].



Şekil 4.17 KH ve SH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zaman bağlı normalize edilmiş viskoz Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi



Şekil 4.18 KH ve OSH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zaman bağlı normalize edilmiş viskoz Lissajous-Bowditch eğrilerinin değişimi



Şekil 4.19 KH ve LH katkılı hamur örneklerinin konsantrasyon ve zamana bağlı normalize edilmiş viskoz Lissajous-Bowditch eğrileri

Buğday unu hamuru uygulanan gerinim karşısında kayma incelmesi davranışı sergilemektedir [137]. Hamurun kayma incelme davranışı, uygulanan kayma gerilmesi nedeniyle hamur sistemlerindeki moleküler ağın zayıflamasına bağlanmaktadır [142]. Viskoz projeksiyonların doğrusal olmayan bölgede değerlendirilmesi, ekşi hamur miktarının hamurun doğrusal olmayan hem elastik hem de viskoz özellikleri üzerindeki etkisini de değerlendirmemizi sağlamıştır. Bütün örnekler %200 gerinim noktası için kırmızı halkaların büyüklükleri ve şekilleri değerlendirilmiştir. Daha büyük boyutlu ve dairesel eliptik şeklin ekşi hamur konsantrasyonunun artışına bağlı olarak daha daha dar eliptik şekillerin dönüştüğü görülmektedir. Kontrol hamur örnekleri (KH) doğrusal olmayan bölgede daha geniş elipsler vermesi bu hamurun ekşi hamur katkılı hamur örneklerine göre daha sert ve katı davranışa sahip olduğu doğrulamıştır. Diğer taraftan kırmızı halkalarda daha dar ve daha eliptik şekiller ekşi hamurun viskoz bileşen etkisini belirgin hale getirmiştir. %200 gerinim noktasında kırmızı halkaların eliptik şekli ve daralması, ekşi hamur ile hazırlanan hamur örneklerinin yumuşak ve viskoz benzeri yapısını doğrulamıştır [141]. Lissajous-Bowditch eğrilerinde halka formunda olmayan iç eğriler değerlendirilirken materyalin “kayma incelmesi” davranışı ana eksenin gerilme eksenine doğru saat yönünde döndürülmesiyle gösterilirken “kayma kalınlaşması” davranışı kayma gerilmesinin saat yönünün tersinde yükselmesiyle gösterilir [22, 25]. Verilen bu bilgiler doğrultusunda ekşi hamur katkılı hamur örneklerine ait viskoz Lissajous-Bowditch eğrilerinin değerlendirilmesi aşağıda sunulmuştur:

- SH ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ait viskoz Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. SH örneklerinin Lissajous-Bowditch eğrilerinin 10 gerinim noktası için detaylı değişimleri Ek A (23-26) da verilmiştir. Genel olarak tüm SH katkılı ekşi hamur örneklerinde %5,2 gerinim değerine kadar SAOS bölgesinde viskoz bileşenden doğrusal yanıt alınırken bu değerden %200 gerinim noktasına kadar viskoz bileşenin doğrusal yanıtında sapmalar görülmektedir. İstisna olarak SH10 ve SH40 örneklerinin 3. saatinde %0,795 gerinim noktasından itibaren hamur örneklerinin viskoz bileşenlerinde doğrusal yanıt alınamamıştır.

%19,9-%31,7 gerinim noktalarında diğer LH ve OSH katkılı hamur örneklerine kıyasla viskoz gerilme eğrilerinde baskın negatif iç bükeylik görüldüğünden bu noktalarda uygulanan gerinimin hamur yapısının kayma incelmesi davranışını arttırdığı söylenebilmektedir. %200 gerinim noktasında SH katkılı hamur örneklerinin 0., 1. ve 2. saatine ait toplam gerilim Lissajous eğrilerinin alanlarında %30 ve %40 konsantrasyonları için belirgin azalma gözlemlenirken 3. saate ait toplam gerilim Lissajous eğrilerinde %20, %30 ve %40 konsantrasyonları için azalma görülmüştür. Viskoz gerilime ait eğriler değerlendirildiğinde 0. saatte %40, 1., 2. ve 3. saatlerde %30 ve %40 konsantrasyonları için pozitif iç bükeyliği ile bu hamur örneklerinde kayma kalınlaşması davranışının olduğu ifade edilebilmektedir. Fuongfuchat vd. [23] tarafından yapılan çalışmada tapyoka nişastasına karragenan ilavesiyle elastik Lissajous eğrilerinin alanlarının genişlediği buna bağlı olarak bir döngü içerisinde daha fazla mekanik enerji harcandığı ifade edilmiştir. Bu etki karragenan ilave edildikten sonra viskozite artışı ile desteklenmiştir. Çalışmamızda spontan hamur konsantrasyonu ve zaman artışı ile elastik lissajous eğrilerinde belirgin artış viskoz lissajous eğrilerinde ise tam tersi daralma görülmüştür. Elde edilen sonuçlar verilen literatür bilgisi ile desteklendiğinde spontan ekşi hamur artışı hamur örneklerinde viskoz özelliğinin artışına neden olduğu çıkarımı yapılabilir. Bu sonuçlara bağlı olarak %200 gerinim noktasında viskozitenin belirgin artışı ile hamur örneklerinin kayma kalınlaşması davranışının baskın olduğu söylenebilir.

- OSH ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin ait normalize edilmiş viskoz Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.18' de gösterilmiştir. 0. ve 1. saat zaman dilimlerinde OSH40 örneği, 2. ve 3. Saat zaman dilimlerinde ise OSH30, OSH40 örnekleri pozitif iç bükey viskoz gerilim eğrileri ile kayma kalınlaşması davranışı sergilemiştir. OSH örneklerinin Lissajous-Bowditch eğrilerinin 10 gerinim noktası için detaylı değişimleri Ek A (15-18)' de verilmiştir. Ekte yer alan detaylı Lissajous eğrileri değerlendirildiğinde yüksek gerinim noktalarında konsantrasyon ve zaman etkisi ile viskoz

karakterin artışı dar olan Lissajous Bowditch eğrileri ile net olarak görülmektedir. %5,2 gerinim noktasından itibaren kayma incelmesi davranışının belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. Özellikle %19,9-%79,7 noktaları arasında kayma incelmesi davranışı en baskındır. LAOS bölgesi için seçilen noktada (%200) konsantrasyon artışı ile beraber kayma incelmesi davranışı azalmıştır. Konsantrasyon arttıkça gerinim artışının uyguladığı etki daha fazla görülmektedir. KH örneğine göre karşılaştırıldığında OSH ilavesi ile viskoz bileşenin hamurun viskoelastik davranışında etkin rol aldığı çıkarımı yapılabilmektedir.

- LH hamuruna ait viskoz Lissajous-Bowditch eğrileri artan ekşi hamur konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.19'de gösterilmiştir. LH örneklerinin Lissajous-Bowditch eğrilerinin 10 gerinim noktası için detaylı değişimleri Ek A (7-10)' da verilmiştir. LH katkılı hamur örneklerinden %5,2 gerinim değerine kadar doğrusal bölgede viskoz bileşenden doğrusal yanıt alınırken bu değerden sonra %200 gerinim noktasına kadar doğrusal yanıtta sapmalar gözlenmiştir. Yüksek gerinim noktalarına doğru gidildikçe viskoz gerilmeye ait olan eğrilerin negatif iç bükeyliği hamur örneklerinin kayma incelmesi davranışı sergilediğini göstermektedir. %200 gerinim noktasında konsantrasyon ve zamana bağlı olarak negatif iç bükey eğrilerinin eğiminin azalması ile kayma incelmesi davranışında azalma görülmektedir. Konsantrasyon, zaman ve gerinim artışına bağlı olarak toplam gerilmeye ait Lissajous eğrilerinin alanlarında dairesel formdan uzaklaşma belirgin şekilde gözlenmiştir. Kontrol hamuru (KH) ile LH katkılı hamur örnekleri karşılaştırıldığında viskoz bileşene ait iç Lissajous eğrilerinde belirgin farklılık olmadığı görülmektedir.

Karıştırma işleminde meydana gelen mekanik deformasyonların bir sonucu olarak hamurda ortaya çıkan viskoz karakter, nişasta matrisi ile birlikte gliadinin doğrusal olmayan reolojik davranışına bağlanabilir [141]. Nişasta granül yapısı hidroliz olduğunda doğrusal olmayan reolojik davranış ile kayma kalınlaşması davranışı göstermesi sonucu viskozitede bir artış gözlemlendiği ifade edilmektedir [102, 142, 143]. Nişasta parçacıklarının, gluten-nişasta karışımında sürekli bir

matris oluşturduğunda zaman gluten polipeptitlerinden daha sert olmaktadır. Büyük genliklerde, sert (şekilsiz) nişasta granülleri yeniden sıralanarak yapılanmaktadır. Karıştırma ile uygulanan mekanik stres, yapı elemanlarını daha hızlı bozduğu için nihayetinde yeniden tahrip olan karmaşık bir protein ağı oluşur. Bu işlem ile proteinlerin su bağlama kapasitesi değişmekte ve serbest suda artmaya neden olmaktadır. Aynı zamanda, nişasta granüllerinin dağılımı aglomeradan üniform hale gelir [144, 145]. Spontan ve olgun spontan örnekleri için yüksek gerinim noktalarında hidrolize olmuş nişastanın kayma kalınlaşma davranışında baskın faktör olduğu görülebilmektedir. Hem elastik hem de viskoz projeksiyon modelleri ekşi hamurun viskoelastik hamurun viskoz karakterine açıkça katkıda bulunduğu ortaya koymuştur. Gerinim arttıkça sistemler doğrusal olmayan viskoelastisite aralığına girer ve harcanan mekanik enerji miktarı her döngüde artmaktadır. Hem elastik hem de viskoz Lissajous verileri ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin doğrusal olmayan davranışları hakkında daha derin ve doğru bir anlayış olduğunu öne sürmektedir. Ayrıca bütün ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için ekşi hamur katkısı ile daralan viskoz Lissajous eğri alanı depolanan enerjiyi azalttığı söylenebilir. Bu bilgiler viskoz bileşenin ekşi hamur yumuşamasına etkisini desteklemektedir. Bu durum hamur süspansiyonunun parçalanmasına bağlı olarak yapısal bozulmaların meydana geldiğini göstermektedir.

4.6.5 Ekşi Hamur Türü, Zaman ve Konsantrasyon Miktarının Bir Fonksiyonu Olarak Doğrusal Olmayan Elastik Özellikler

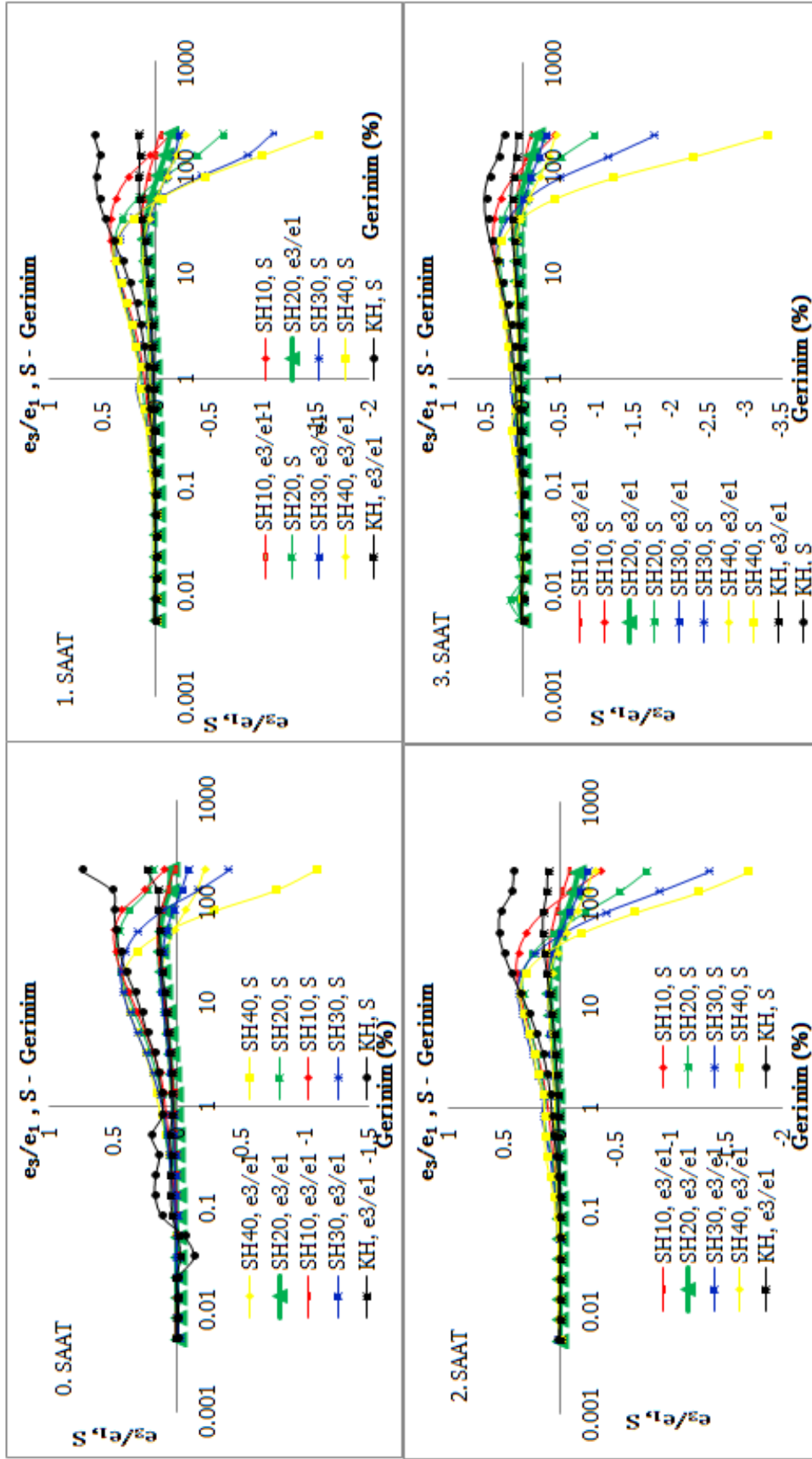
Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin reolojik davranışları hakkında daha fazla bilgi toplamak için, hamurun elastik özellikleri ile ilgili diğer LAOS parametreleri (e_3/e_1 , S ve $G'_M - G'_L$ değerleri) analiz edilmiştir. e_3/e_1 oranı doğrusal olmayan bölgede elastik bileşenin gerinim katılaşması ve yumuşması davranışının fiziksel yorumlanmasına olanak sağlayan yüksek dereceli harmonikler ile elde edilir.

Materyallerin sahip olduğu gerinim-katılaşma oranı (S); $S \equiv \frac{G'_L - G'_M}{G'_L} = \frac{4e_3 + \dots}{e_1 + e_3 + \dots}$

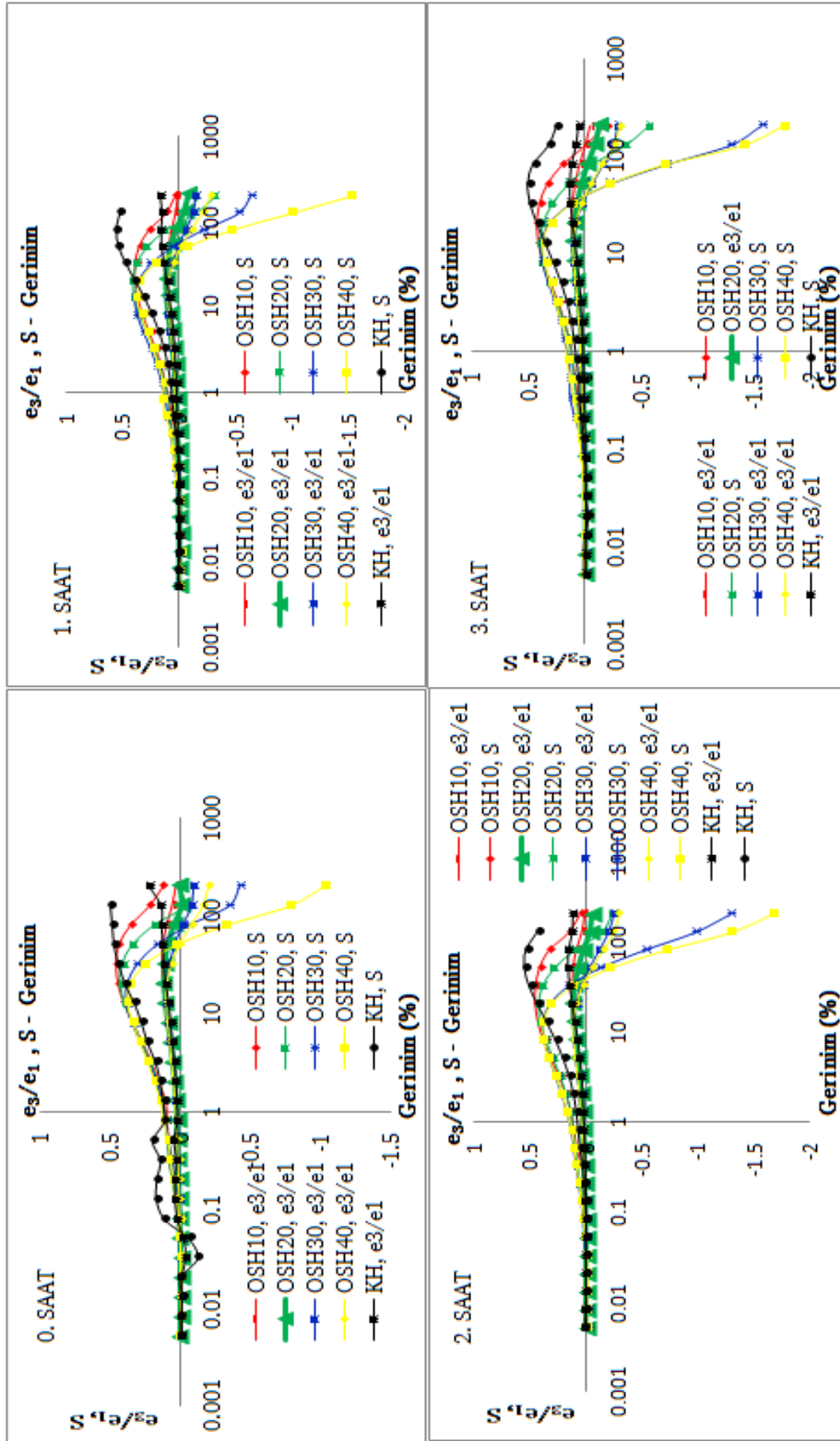
olarak tanımlanır ve materyalin döngü içi reolojik davranışlarının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [7,13, 19, 80]. SH, OSH ve LH ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için gerinim değerlerine karşı e_3/e_1 , S ve $G'_M - G'_L$

değerlerini gösteren grafikler çizilmiştir. Çalışmamızda, doğrusal olmayan bölgedeki e_3/e_1 , S değerlerinde meydana gelen değişiklikler Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de sunulmuştur.

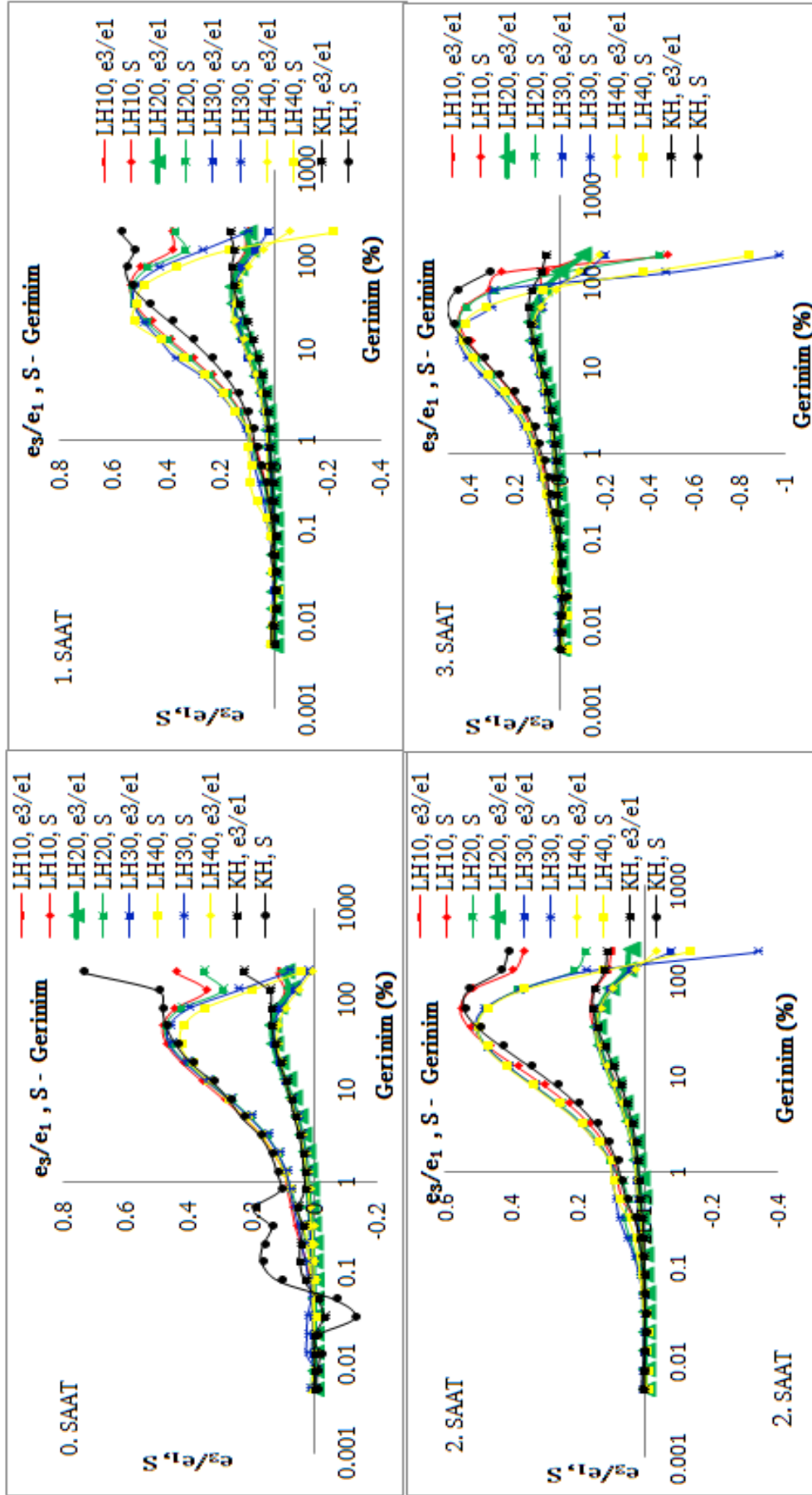
- Kontrol örneği için %70 gerinim değerine kadar S değeri (>0) maksimum artış sergilenmiş bu gerinim noktasından sonra azalan döngü içi katılaşması oranı sergilemiştir. Bütün hamur örnekleri için S değerlerinin maksimum olduğu noktadaki deformasyon değerleri muhtemelen örneklerin maksimum dayanıma sahip olduğu yaklaşık değerlerdir.
- SH katkılı hamur örnekleri için gerinime karşı e_3/e_1 grafikleri (Şekil 4.20) değerlendirildiğinde 0. saat örnekleri için %30-%50 gerinim noktası civarında, 1., 2. ve 3. saatlerde %20-%30 gerinim noktası civarında maksimum gerinim katılaşması davranışı sergilenmiştir. Öte yandan bu kritik noktadan sonra e_3/e_1 değerlerinde belirgin düşüş görülmüştür. Kritik noktadan sonra pozitif e_3/e_1 değerleri ile 0. saat SH10 ve SH 20 örnekleri azalan gerinim katılaşması gösterirken geri kalan tüm konsantrasyon ve zaman dilimleri için negatif e_3/e_1 değerleri ile gerinim yumuşaması davranışı sergilemişlerdir. Gerinim yumuşaması davranışı %200 gerinim noktasında tüm SH örnekleri için baskın rol oynamaktadır. Bu davranış ile hamur örneklerinde nişasta yapısının elastikiyet özelliğindeki rolü daha net görülebilmektedir. LH ve OSH örnekleri ile karşılaştırıldığında uygulanan deformasyona bağlı olarak elastikiyet en az SH örneklerinde korunmuştur.
- OSH katkılı hamur örnekleri için gerinime karşı e_3/e_1 grafikleri değerlendirildiğinde (Şekil 4.21) tüm hamur örnekleri için %20-%50 gerinim noktası aralığında maksimum gerinim katılaşması davranışı sergilenmiştir. Artan OSH konsantrasyonu maksimum noktaların azalmasına neden olmuştur. Bu kritik noktadan sonra e_3/e_1 değerlerinde belirgin düşüş görülmüştür.



Şekil 4.20 SH katkılı hamur örneklerine ait e_3/e_1 ve S değerlerinin artan gerinime karşı değişimi



Şekil 4.21 OSH katkılı hamur örneklerine ait e_3/e_1 ve S değerlerinin artan gerinime karşı değişimi



Şekil 4.22 LH katkılı hamur örneklerine ait e_3/e_1 ve S değerlerinin artan gerinime karşı değişimi

Kritik gerinim katılaşması noktasından sonra pozitif e_3/e_1 değerleri ile 0. saat OSH10 ve OSH20 örnekleri azalan gerinim katılaşması gösterirken geri kalan tüm konsantrasyon ve zaman dilimleri için negatif e_3/e_1 değerleri ile gerinim yumuşaması davranışı sergilemişlerdir. OSH hamur örneklerinin % 200 gerinim noktasında sahip olduğu negatif e_3/e_1 değerleri SH hamuruna göre daha yüksektir. Hamur yapısındaki viskoz bileşenin tek kademeli fermentasyonda daha etkin olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.

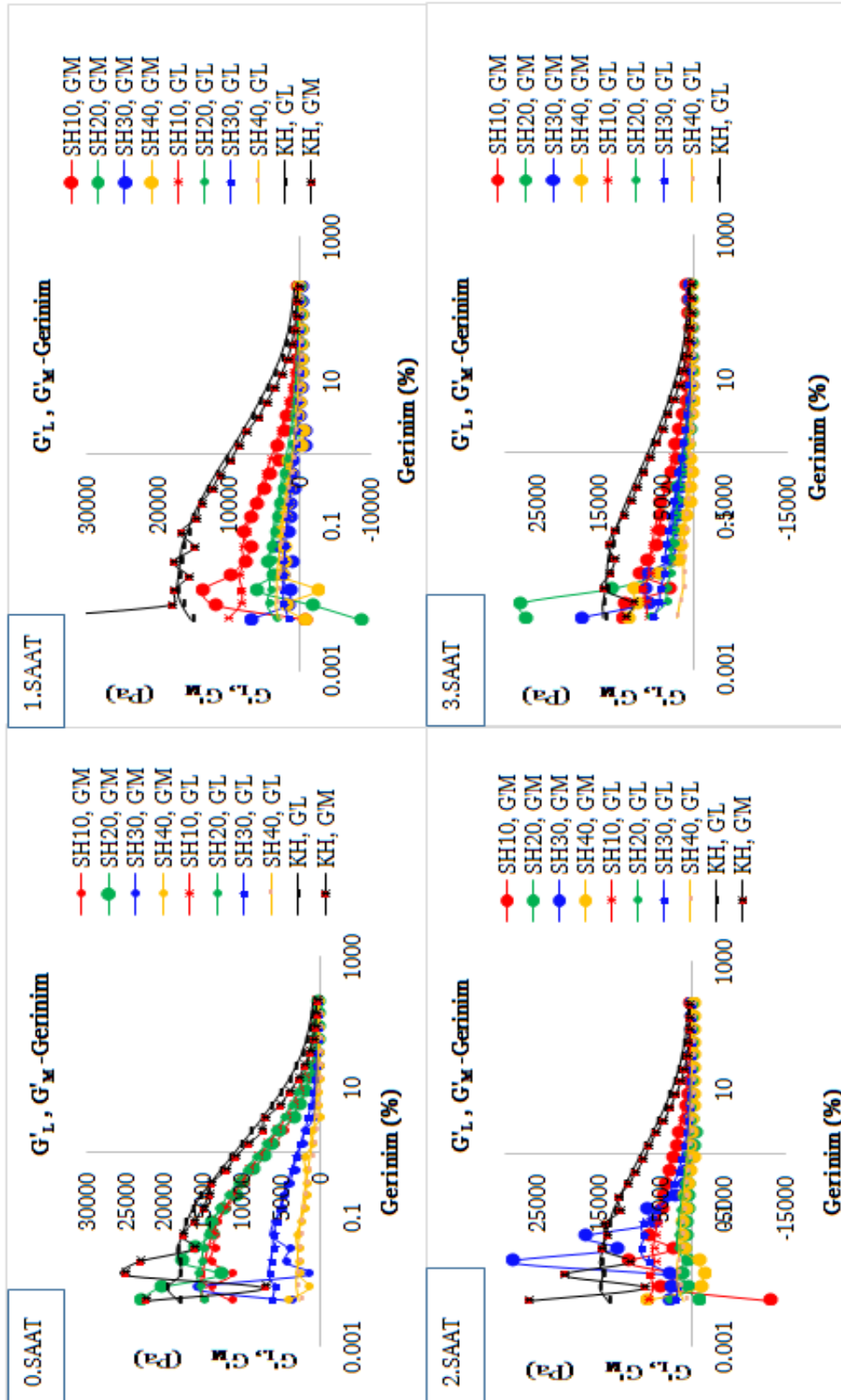
- LH katkılı hamur örnekleri için gerinime karşı e_3/e_1 grafikleri değerlendirildiğinde %50 civarında bir gerinim değerine kadar gerinim katılaşması davranışı sergilemiştir. Bu kritik noktadan sonra e_3/e_1 değerlerinde belirgin düşüş görülmüştür. 0. saat örnekleri kritik noktadan sonra pozitif e_3/e_1 değerleri ile azalan gerinim katılaşması davranışı gösterirken, 1. saat için LH40 örneği, 2. saat için LH 30 ve LH40 örneği, 3. saat için LH10-40 örnekleri sahip olduğu negatif e_3/e_1 değerleri ile gerinim yumuşaması davranışı göstermiştir. Özellikle 3. saat örnekleri için e_3/e_1 değerlerinde keskin bir azalma görülmektedir. Ölçümler sırasında e_3/e_1 değerlerinde görülen azalmalar artan gerginlik ile gluten ağındaki kopmalarla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.22’de kontrol örneği hariç yaklaşık %100 gerinimden sonra negatif e_3/e_1 değerlerini açık bir şekilde görülmektedir.

Tüm çalışılan hamur örnekleri için e_3/e_1 değerleri gerinim katılaşması oranı (S) ile korelasyon göstermiştir. Her bir hamur örneği, yukarıda verilmiş olan kritik gerinim noktasına kadar pozitif S değeri ile döngü içi katılaşma davranışı sergilerken bu noktadan sonra sahip olduğu S değerleri ile azalan döngü içi katılaşma ve döngü içi yumuşama davranışı göstermiştir. Bu sonuçlara göre ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için fermentasyon süresi ve konsantrasyonun uygulanan gerinime karşı hamurun göstermiş olduğu dirence etki ettiği çıkarımı yapılabilir. Elde edilen e_3/e_1 ve S değerleri normaliz edilmemiş ve normalize edilmiş elastik projeksiyona ait sonuçlarla uyumluluk göstererek eğrilerden elde edilen çıkarımları desteklemiştir. Hamura ekşi hamurunun ilavesinin konsantrasyon ve zaman arttıkça nişasta granül yapısı ve protein ikincil yapısının

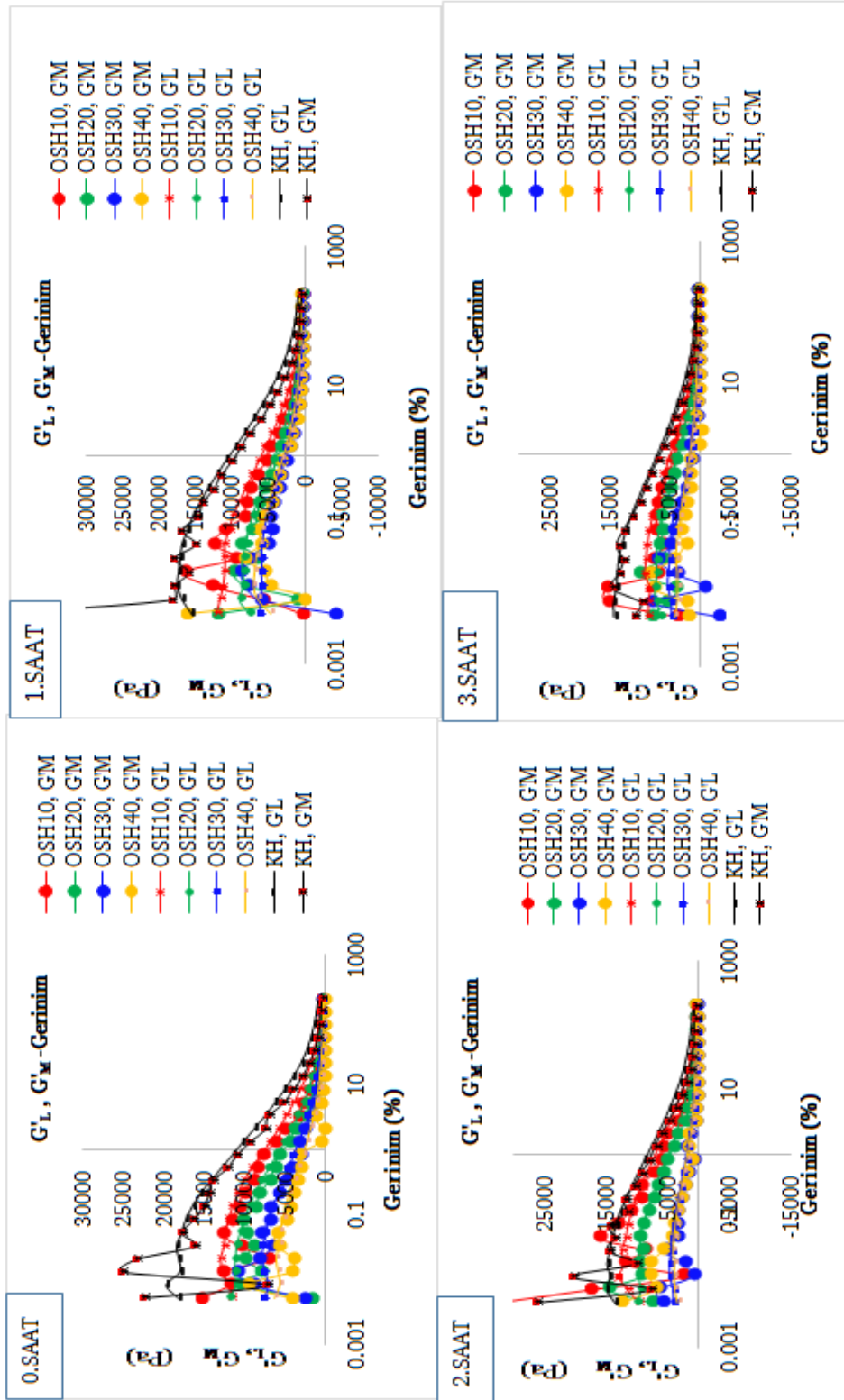
modifiye edilebileceğini ve bu etkinin S oranının yansıttığı doğrusal olmayan temel mekanik yanıtta önemli bir değişikliğe yol açtığını göstermiştir. Hamur örnekleri kritik gerinim noktasından sonra toparlanma zamanına sahip olamadığından gerinim katılaşması davranışında azalmaya neden olmuştur [26]. Duvarcı vd. [19] yaptığı çalışmada yumuşak buğday unundan hazırlanan hamur örneğinin sert buğday unu ile hazırlanan hamura göre daha düşük gerinim noktasında e_3/e_1 değerlerinde azaldığını ifade etmiştir. Bu ifade çalışmamızda elde ettiğimiz bulguları destekler niteliktedir. Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25’ de G'_L ve G'_M değerlerini zaman ve konsantrasyona bağlı değişimlerini göstermektedir; Grafiklerde görüldüğü üzere doğrusal bölgede G'_L değerleri, G'_M değerlerinden daha büyüktür. $G'_L/G'_M > 1$ olması örneklerin doğrusal viskoelastik bölgede gerinim katılaşması davranışı gösterdiğini öne sürmektedir. Gerinim değeri arttıkça yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerlerinde hızlı bir düşüş gözlenmiştir. Bu değişim doğrusal olmayan viskoelastik bölgede gerinim yumuşama davranışını ifade etmektedir. Artan konsantrasyon G'_L (Pa) değerlerini önemli ölçüde etkileyerek belirgin şekilde düşüşüne neden olmuştur (Tablo 4.13).

Tablo 4.13 % 200 gerinim noktasında G'_L (Pa) değerleri

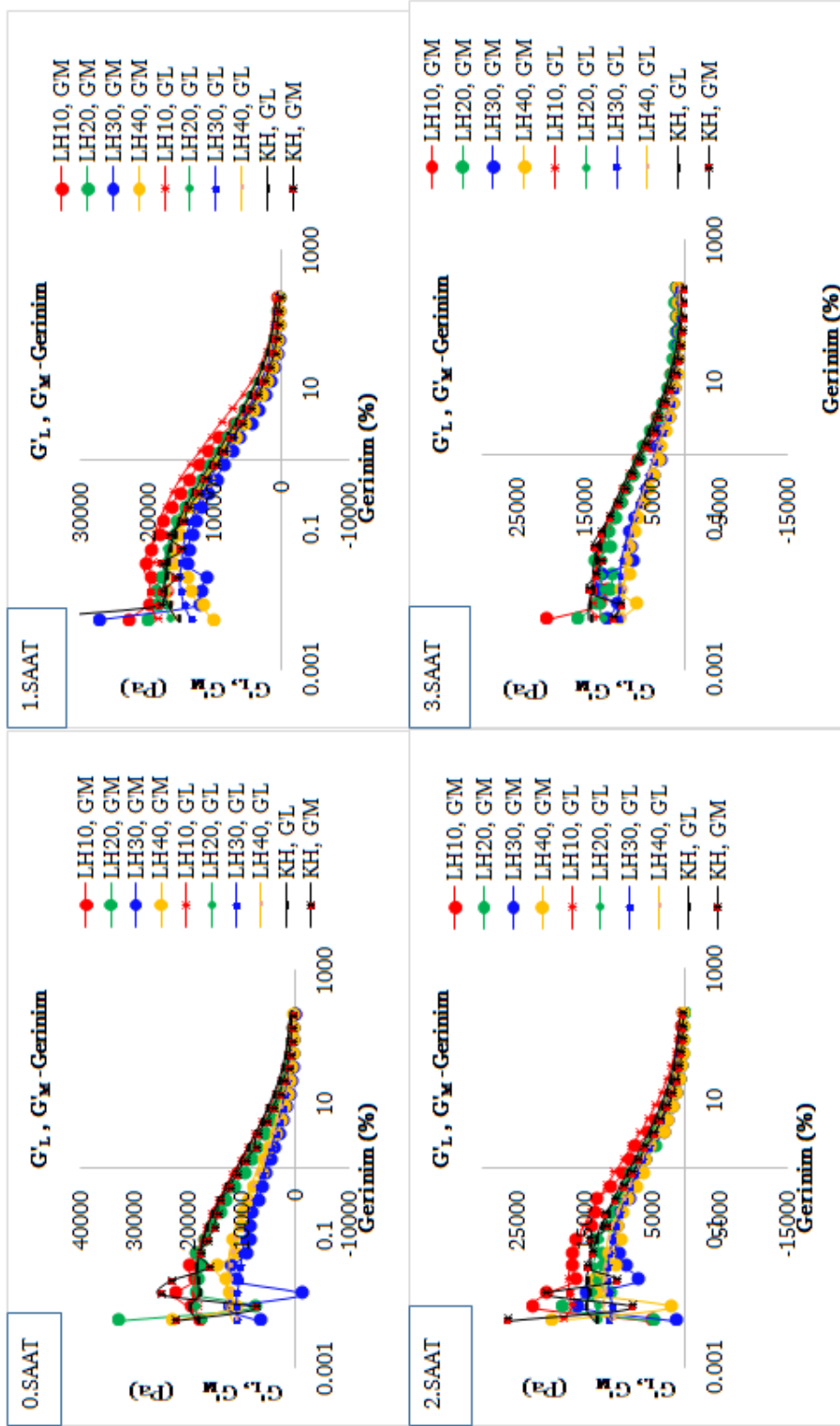
Hamur Türü	Süre	Konsantrasyon (%)			
		10	20	30	40
SH	0. saat	653	610	295	114
	1. saat	445	237	101	157
	2. saat	372	188	106	90
	3. saat	876	459	822	330
OSH	0. saat	634	513	304	219
	1. saat	459	377	243	315
	2. saat	544	464	169	165
	3. saat	356	318	143	139
LH	0. saat	747	774	464	514
	1. saat	960	701	634	589
	2. saat	852	611	546	532
	3. saat	1184	1240	1163	1010



Şekil 4.23 SH katkılı hamur örneklerinin yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerleri



Şekil 4.24 OSH katkılı hamur örneklerinin yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerleri



Şekil 4.25 LH katkılı hamur örneklerinin yüksek gerinim modülü (G'_L) ve düşük gerinim modülü (G'_M) değerleri

Tablo 4.13’de yer alan % 200 gerinim noktasındaki G'_L değerlerine bakıldığında LH katkılı hamur örneklerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuca bağlı olarak LH katkılı hamur örneklerin viskoelastik davranışında elastik özelliğin daha baskın olduğu söylenebilmektedir. Tüm örnekler için artan konsantrasyona bağlı olarak G'_L değerlerinde düşüş gözlenmiştir. G'_L değerlerinde görülen azalma trendi G' değerleri ile paralellik göstermiştir. Yazar vd. [141] gliadin ve glutenin elastik özelliklerinin değerlendirilmesinde %200 gerinim noktasında glutenin ve gliadinin G'_L değerlerini karşılaştırmış glutenine ait değerlerin gliadine kıyasla daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Bu verinin sonucu olarak glutenin yapısının doğrusal olmayan viskoelastik özelliğinde elastik karakterin baskın olduğu ifade edilmiştir. G'_L değerinin daha düşük olduğu hamur örneklerinde (SH, OSH) viskoz özelliğin baskın olduğu viskoelastik davranış sergilediği söylenebilir. Tüm sonuçlar, ekşi hamur konsantrasyonunun artışı ile gluten yapısını daha kolay yırtılmasından dolayı hamur yapısını bir arada tutamadığı gerçeğine dayanılarak açıklanabilir. G'_L (Pa) değerleri diğer LAOS parametreleri ile elde ettiğimiz sonuçlarla uyumluluk sağlamıştır.

4.6.6 Ekşi Hamur Türü, Zaman ve Konsantrasyon Miktarının Bir Fonksiyonu Olarak Doğrusal Olmayan Viskoz Özellikler

Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin viskoz özellikleri ile ilgili bilgi toplamak için viskoz LAOS parametreleri (v_3/v_1 , T ve $\eta'_L - \eta'_M$) değerleri analiz edilmiştir. v_3/v_1 oranı doğrusal olmayan bölgede viskoz bileşenin kayma incelenmesi ve kalınlaşması davranışının fiziksel yorumlanmasına olanak sağlayan yüksek dereceli harmonikler ile elde edilir. Materyallerin sahip olduğu gerinim hızı-koyulaşma(kalınlaşma) oranı $T \equiv \frac{\eta'_L - \eta'_M}{\eta'_L} = \frac{4v_3 + \dots}{v_1 + v_3 + \dots}$ olarak tanımlanır ve materyalin döngü içi reolojik davranışlarının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [7, 13, 19, 80]. Çalışmamızda, doğrusal olmayan bölgedeki v_3/v_1 , T değerlerinde meydana gelen değişiklikler Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28’de sunulmuştur.

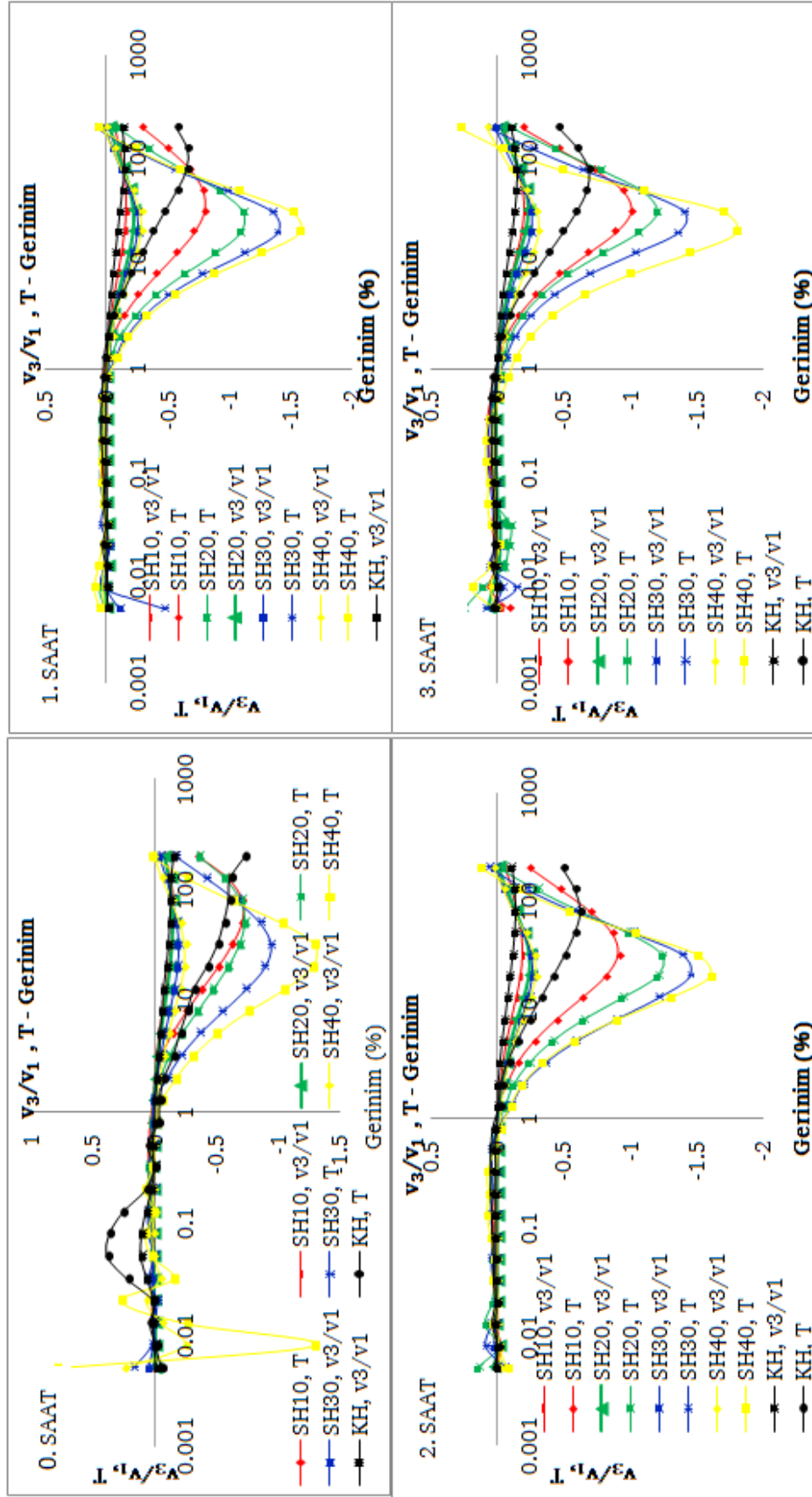
- Kritik gerinim noktasına kadar en yüksek v_3/v_1 değerleri kontrol hamuru için gözlenmiştir ve hamurdaki ekşi hamur miktarı arttıkça, v_3/v_1 değerinin negatif yönde arttığı belirlenmiştir. Kontrol hamur örneği yaklaşık % 70'lik bir gerilme değerinde maksimum bir düşüş ($T < -0.7$) gösteren T değerleri vermiş ve bu düşüşü, gerilmenin büyüklüğü olarak azalan bir kayma incelme seviyesi ($T > -0.5$) takip etmiştir.
- SH katkılı hamur örnekleri için gerinime karşı v_3/v_1 ve T grafikleri değerlendirildiğinde (Şekil 4.26) tüm zaman dilimleri için minimum değerlerini 0. saatte SH10 %79,9 gerinim noktasında, SH20 %50,1 gerinim noktasında, SH30 ve SH 40 %31,6 gerinim noktasında; 1. saat ve 2. saatte SH10 %31,6 gerinim noktasında, SH20, SH30, SH40 %19,9 gerinim noktasında, 3. saatte SH10 ve SH20 %31,6 gerinim noktasında, SH30 ve SH40 %19,9 gerinim noktasında göstermiştir. Doğrusal olmayan bölgede (%200 gerinim noktası) SH katkılı hamur örneklerinde negatif ve pozitif v_3/v_1 değerleri görülmektedir. 0. saatte SH40 için; 1. ,2. ve 3. saatte SH30 ve SH40 örnekleri için pozitif v_3/v_1 değerleri görülmüştür. Zaman ve konsantrasyon SH katkılı hamur örneklerinde kayma incelmesi davranışı üzerine etkin olduğu görülmektedir. Kritik gerinim noktalarına kadar SH katkılı hamur örneklerinde artan konsantrasyon değerleri ile negatif v_3/v_1 değerleri daha düşük değerler verirken bu değerden sonra hızlı bir şekilde negatif değerden pozitif değer yönünde yükselişe belirgin kayma kalınlaşması davranışı sergilemiştir. v_3/v_1 değerleri, T değerleri ile bir korelasyon sergilemiştir. v_3/v_1 değerlerinin aksine zamana bağlı olarak T değerlerinde kritik gerinim noktasına kadar keskin bir azalma ($T < -1,5$) kritik gerinim noktalarından sonra keskin artış göstermiştir ($T > 0,2$). Yüksek konsantrasyonlarda T değerlerinde görülen pozitif değerler kayma kalınlaşma davranışına yönelişin arttığını göstermektedir.
- OSH katkılı hamur örnekleri için gerinime karşı v_3/v_1 ve T grafikleri değerlendirildiğinde (Şekil 4.27) tüm zaman dilimleri için minimum değerlerini 0. saatte SH10, SH20 ve SH40 %31,6 gerinim noktasında SH30 %19,9 gerinim noktasında, 1. saatte SH10 %50,1, SH20 %31,6, SH30 ve SH40 %19,9, 2. saatte SH10 %50,1, SH20 %31,6, SH30 ve SH40

%19,9 , 3. saatte SH10 %31,6, SH20, SH30,SH40 %19,9 gerinim noktasında göstermiştir. Doğrusal olmayan bölgede (%200 gerinim noktası) SH katkılı hamur örneklerinde negatif ve pozitif v_3/v_1 değerleri görülmektedir. 0. ve 1. saatte SH40 için; 2. ve 3. saatte SH30 ve SH40 örnekleri için pozitif v_3/v_1 değerleri görülmektedir. Zaman ve konsantrasyon SH katkılı hamur örneklerinde olduğu gibi kritik gerinim noktalarına kadar OSH katkılı hamur örnekleri de konsantrasyon artışı ile negatif v_3/v_1 değerleri verirken bu değerden sonra pozitif yönde yükselen değerleri ile kayma kalınlaşması davranışı sergilemiştir. v_3/v_1 değerlerinin aksine zamana bağlı olarak “T” değerlerinde kritik gerinim noktasına kadar keskin bir azalma ($T < -1,4$) kritik gerinim noktalarından sonra keskin artma görülmüştür ($T > 0,1$).

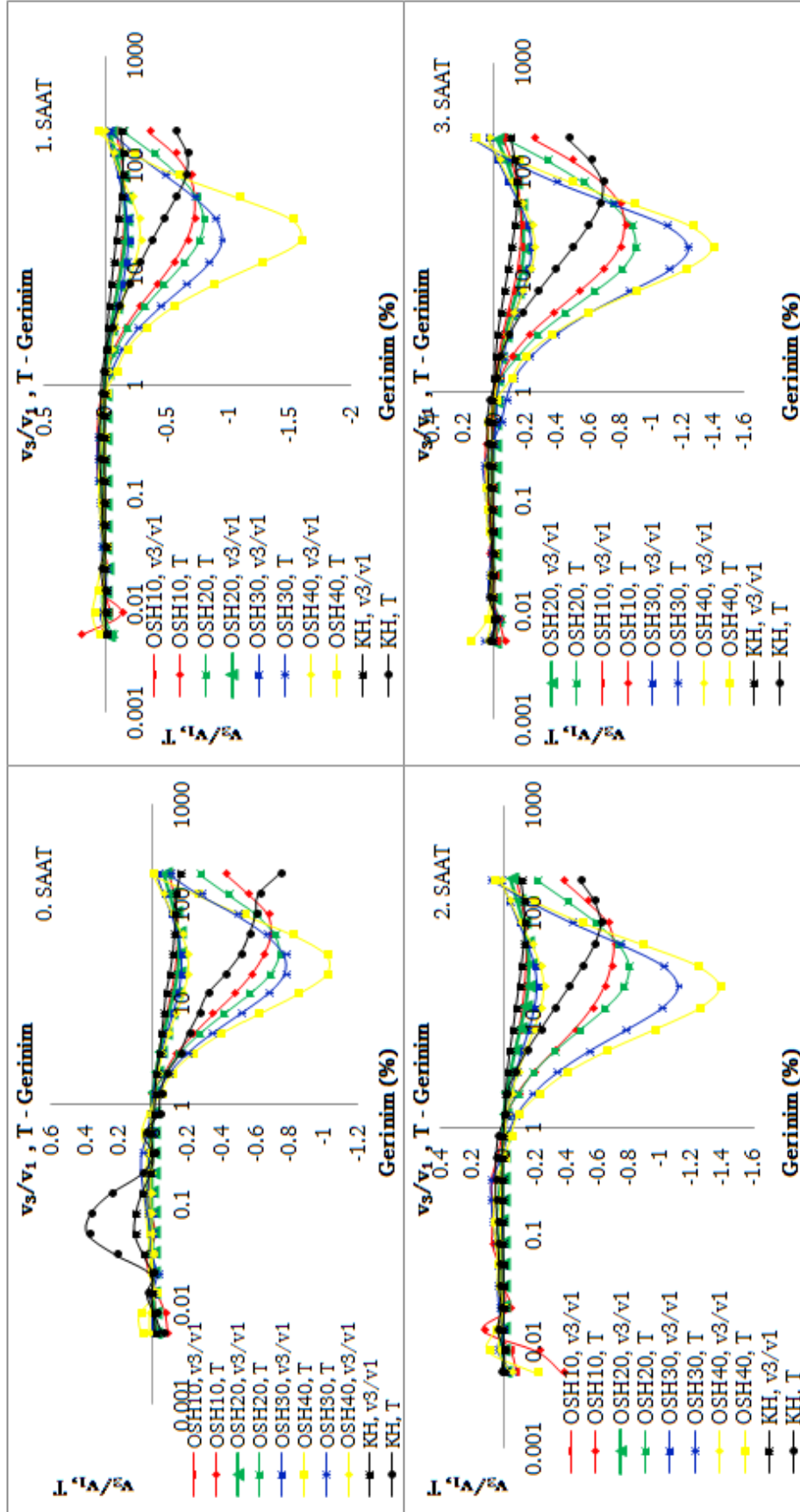
- LH katkılı hamur örneklerinin doğrusal olmayan bölgelerde negatif v_3/v_1 ve T değerleri verdikleri tespit edilmiştir (Şekil 4.28). LH katkılı hamur örnekleri için gerinime karşı v_3/v_1 ve T grafikleri değerlendirildiğinde minimum değerleri; 0. saatte LH10, LH20, LH40 %79,5 LH30 %50,1, 1. saatte LH10 ve LH20 %79,5, LH30 ve LH40 %50,1, 2. saatte LH10 örneği %79,5, LH20, LH30 ve LH40 örnekleri %50,1, 3. saatte LH10 ve LH20 %50,1, LH30 ve LH40 %31,6 gerinim noktasında vermiştir. Tüm LH örneklerin kayma incelme davranışı sergilediğini görülmektedir. Zamana bağlı olarak v_3/v_1 değerlerinin değişim grafiğinde belirgin bir farklılık görülmemektedir. %30-50 gerinim aralığında aralığında v_3/v_1 negatif değerlerinin artışı ile konsantrasyon artışı arasında aynı yönde eğilim görülmüştür. e_3/e_1 değerlerinde olduğu gibi kritik değere kadar LH katkısı v_3/v_1 değerinde negatif yönde artışa neden olmuştur. Bu sonuç, kritik gerinim noktalarına kadar LH katkısının hamurun kayma incelmesi davranışını arttırdığını göstermiştir. e_3/e_1 değerlerinin aksine, v_3/v_1 değerleri % 50 civarında belirli bir gerilme değerinden sonra keskin bir şekilde artmaya başlamıştır ve bu gerilme değerinden sonra kayma kalınlaşma davranışına doğru yönelim önerilebilmektedir. Bu durum, kayma kalınlaşma oranı (T) değerleriyle de yansıtılmıştır. v_3/v_1 değerleri, T değerleri ile bir korelasyon sergilemiştir. S değerlerinin aksine, KH

dışındaki tüm LH örnekler için yaklaşık %50 gerinim değerine kadar bir düşüş gösteren ($T < -0,8$) T değerleri gözlenmiştir. Bu düşüşü bir artış ($T > -0,2$) izleyerek, bu gerilme değerinden sonra kayma incelme davranışında belirgin bir düşüş olduğunu düşündürmektedir. Yaklaşık %50 gerinim noktasına kadar zaman artışına bağlı olarak T değerleri değerlerindeki düşüşler daha hızlı gerçekleşmiştir.

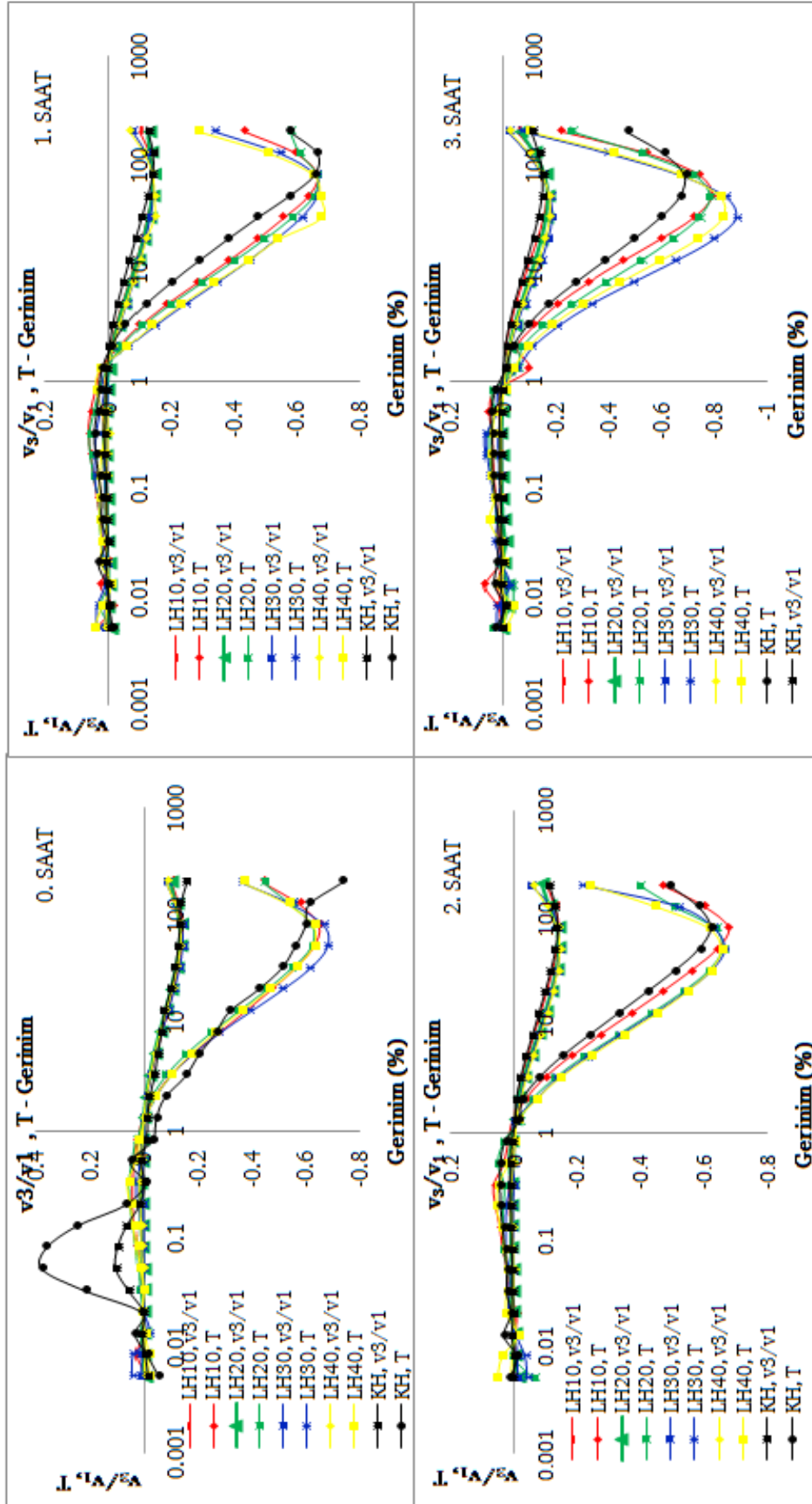
Tüm elde edilen sonuçlar doğrultusunda fermentasyon türü, konsantrasyon ve zaman v_3/v_1 ve T parametrelerinde artan gerinim değerine karşı meydana gelen değişimler spontan fermentasyon ile elde edilen örnekler için doğrusal olmayan viskoelastik davranışta viskoz özelliklere daha fazla etki ettiği sonucuna varılmıştır. Mermet-Guyennet vd. [148] ve Precha-Atsawan vd. [10] materyalin “T” parametresinin mutlak değerinin “S” faktöründen daha yüksek olması durumunda materyalin yumuşama/incelme davranışı gösterdiğini bildirmişlerdir. Bu bilgi özellikle spontan örneklerde belirgin yumuşamanın olduğu çıkarımını destekler niteliktedir. Hamur, iyonik kuvvet ve pH'daki değişikliklere karşı çok hassastır ve bu tür değişiklikler, nişasta gibi hamur yapısının gelişmesinden sorumlu olan bileşenler üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olabilir. Hamurun kayma incelmesi davranışı, süspansiyon halindeki nişasta matrisinin yeniden düzenlenmesi sonucu ortaya çıkar [87]. Her ne kadar gluten proteinleri tarafından oluşturulan gluten ağı esas olarak buğday hamurunun reolojik özelliklerini tatbik etse de, nişasta etkilerinin bu gluten polimerinde dolgu maddesi olduğu ve doldurulmuş polimerlerin, doldurulmamış polimerlere kıyasla daha büyük bir modül gösterdiği rapor edilmiştir [33]. Ekşi hamur sisteminde nişastanın kısmen hidrolize edilebileceği göz önüne alındığında [147], hamurun gözle görülür kayma incelme davranışı da bu hidrolizasyon nedeniyle nişastanın yeniden düzenlenmesine bağlanabilir. Literatürde yer alan bu çalışmalar elde ettiğimiz sonuçları destekler niteliktedir. Ayrıca, gerinim hızına karşı çizilen viskoz gerilim Lissajous eğrilerinin değerlendirilmesi yoluyla hamur örnekleri için elde edilen sonuçlar v_3/v_1 ve T nitel parametrelerini desteklemektedir.



Şekil 4.26 SH katkılı hamur örneklerine ait v_3/v_1 ve T değerlerinin artan gerinime karşı değişimi

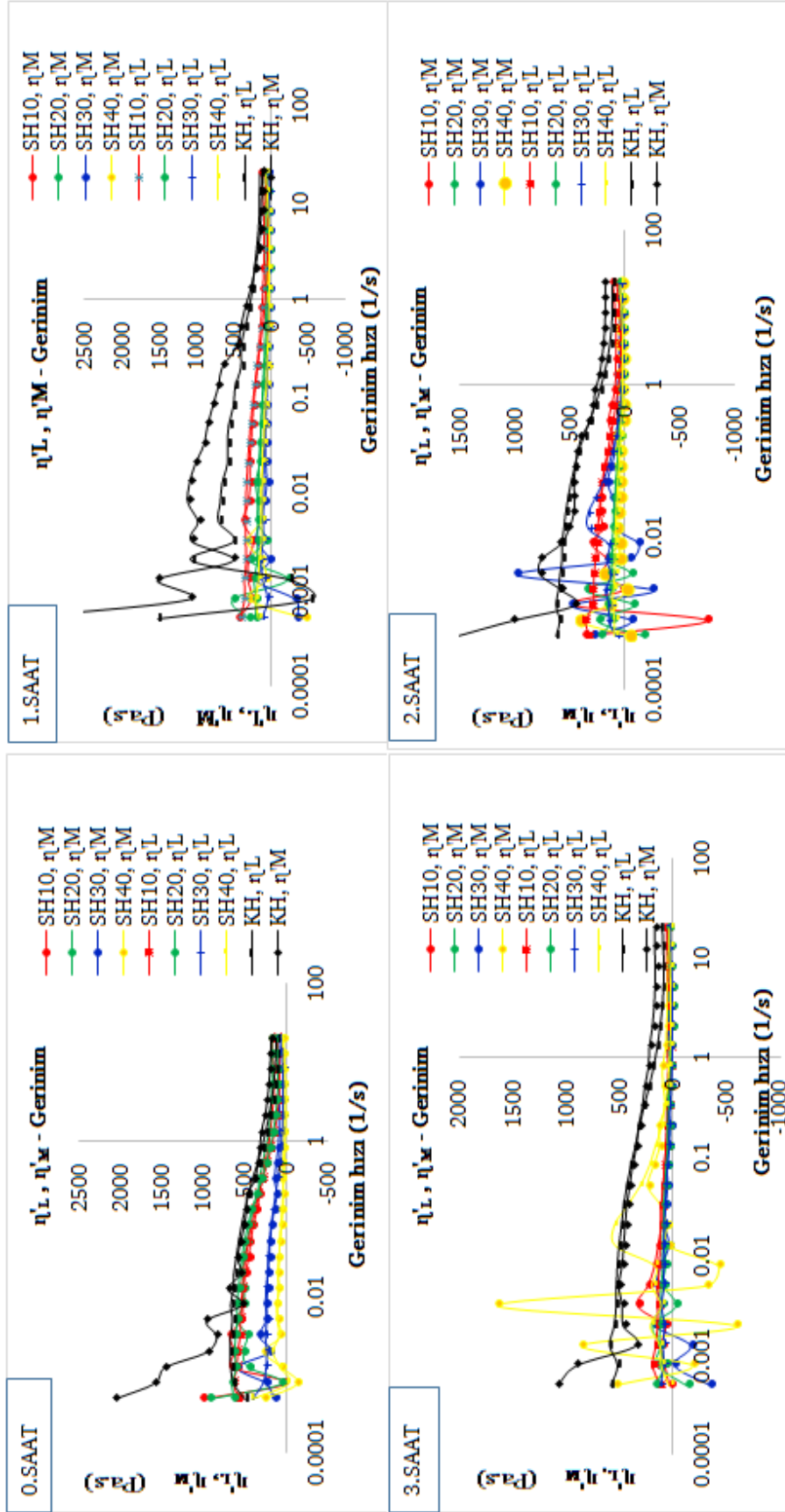


Şekil 4.27 OSH katkılı hamur örneklerine ait v_3/v_1 ve T değerlerinin artan gerinime karşı değişimi

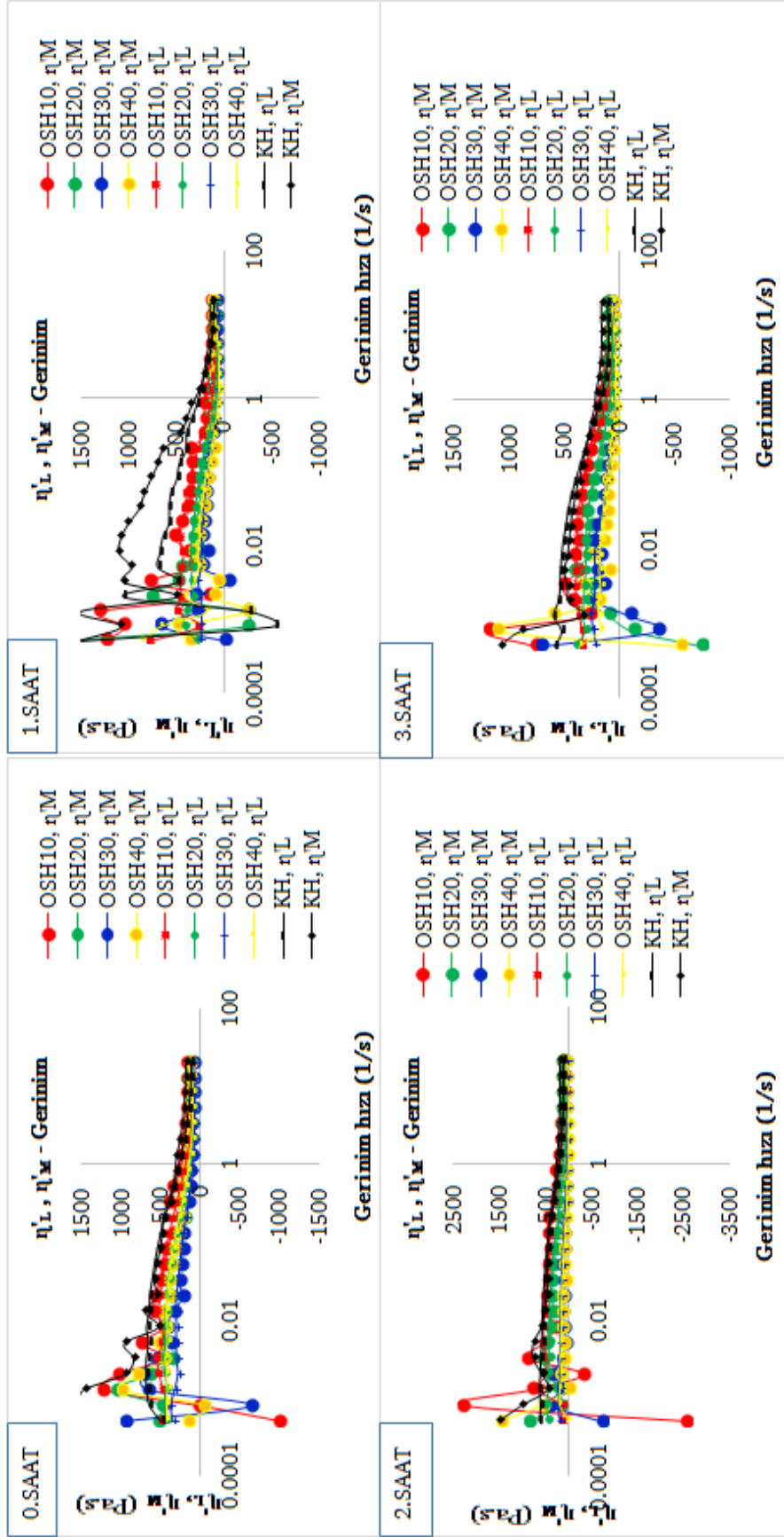


Şekil 4.28 LH katkılı hamur örneklerine ait v_3/v_1 ve T değerlerinin artan gerinime karşı değişimi

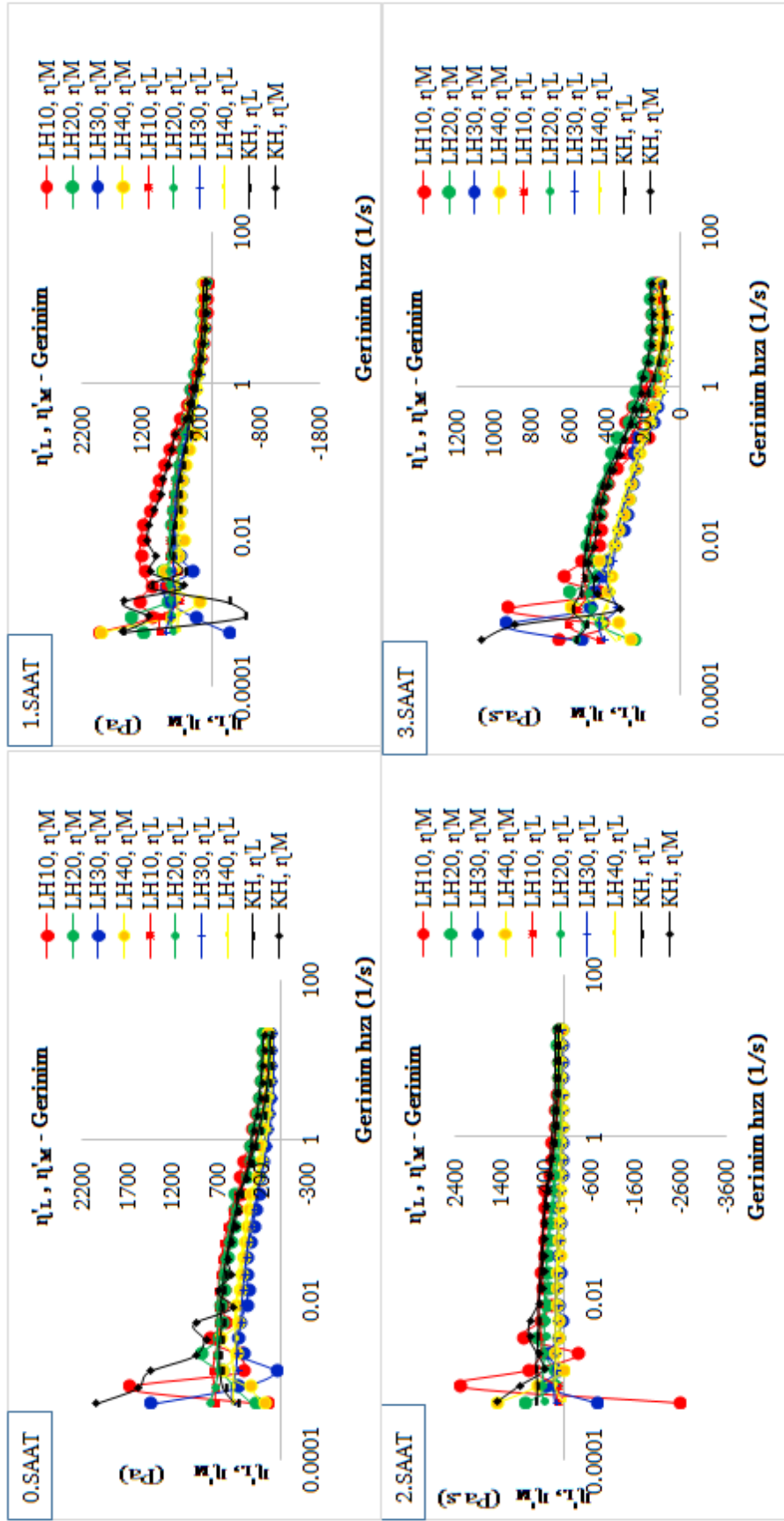
Şekil 4.29, 4.30 ve 4.31 η'_M ve η'_L değerlerini zaman ve konsantrasyona bağlı değişimlerini göstermektedir. η'_M minimum gerinim hızı dinamik viskoziteyi belirtirken η'_L yüksek gerinim hızı dinamik viskoziteyi gösterir [83]. η'_M ve η'_L değerlerinin G'_L ve G'_M değerlerine benzer şekilde tüm örnekler için aynı eğilimi takip ettiği açıkça görülmektedir. Bütün hamur örnekleri için gerinim hızı değerlerinin artması ile azalma göstermiştir. Öte yandan, ekşi hamur konsantrasyonu artışı η'_M ve η'_L değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Başka bir deyişle, kontrol numunesi (KH) en yüksek değerleri göstermiştir. Yazar vd. [141] yaptığı çalışmada gluten protein ağını oluşturan gliadin (viskoz bileşen) ve glutenin (elastik bileşen) gerinim hızına bağlı yüksek gerinim hızı dinamik viskozite değerlerini (η'_L) incelemiştir. Gliadin yapısının bütün gerinim noktalarında η'_L değerlerinin glutenin η'_L değerlerine göre daha düşük olduğu ve bunun sonucu olarak glutenin yapısında daha yüksek elastite davranışın baskın olduğu ifade edilmiştir. Yazar vd. [27] tarafından yapılan başka bir çalışmada glutensiz hamur örnekleri (pirinç, karabuğday, soya, kinoa) ile yumuşak buğday hamuru örneklerinin η'_L parametresi 0.1 rad/s, 1 rad/s ve 10 rad/s frekans değerlerinde % 200 gerinim noktasında değerlendirilmiştir. İncelenen tüm frekanslarda hamur örnekleri için en yüksek η'_L değerleri en yüksek G'_L değerine sahip soya hamurunda gözlenmiştir. Verilen literatür bilgileri doğrultusunda η'_L değerlerinin yüksek olmasının örneğin daha yüksek elastite davranışı sergileceği hipotezi söylenebilir. Artan konsantrasyon ve zamana bağlı olarak %200 gerinim noktasında η'_L değerleri için genel bir değerlendirme yapıldığında LH>OSH>SH sıralaması yapılabilmektedir. Bütün ekşi hamur katkılı hamur örnekleri değerlendirildiğinde %200 gerinim noktasında kontrol hamuruna yakın η'_L değerleri veren örnekler LH örnekleri olmuştur ki Lissajous eğrilerinde de gözlemlendiği üzere LH hamur örneklerinin viskoz özelliği uygulanan gerinimden en az etkilenen hamur türüdür. Ayrıca yüksek gerinim noktalarında η'_L ve η'_M değerleri arasındaki fark azalmıştır. Özellikle η'_L ve η'_M arasındaki farkı SH ve OSH hamur örneklerinde daha az olup η'_L/η'_M oranın sayısal değeri konsantrasyon artışı ile artış göstermiştir. Bu da hamur örneklerinin viskozite artışına bağlı olarak kayma incilmesi davranışından kayma kalınlaşması davranışına doğru yönlemine destekler niteliktedir.



Şekil 4.29 SH katkılı hamur örneklerinin minimum gerinim hızı dinamik viskozite (η'_M) ve yüksek gerinim hızı dinamik viskozite (η'_L) değerleri



Şekil 4.30 OSH katkılı hamur örneklerinin minimum gerininim hızı dinamik viskozite (η'_M) ve yüksek gerininim hızı dinamik viskozite (η'_L) değerleri



Şekil 4.31 LH katkılı hamur örneklerinin minimum gerinim hızı dinamik viskozite (η') ve yüksek gerinim hızı dinamik viskozite (η'') değerleri

4.7 Ekmek Örneklerinin Fizikokimyasal ve Duyusal Özellikleri

4.7.1 Ekmek Kabuk Rengi

Farklı fermentasyon yöntemleri ile hazırlanan ekşi hamur katkılı ekmek örneklerine ait ekmek kabağı renk analizlerinin sonuçları Tablo 4.14’ de verilmiştir. LH katkılı ekmek örneklerine LE kodu, SH katkılı ekmek örneklerine SE kodu, OSH katkılı ekmek örneklerine OSE kodu verilmiştir (Şekil 4.32). Ekmek örneklerinin renk ölçüm analizleri fırından çıkarıldıktan iki saat sonra gerçekleştirilmiştir. Kabuk rengi oluşumunda etkin rol alan en önemli esmerleşme reaksiyonları Maillard ve karamelizasyondur. Ekmek kırmızı-esmer rengini kazanabilmektedir [149].

Tablo 4.14 Ekmek örneklerinin kabuk renk değerleri (L^* , a^* , b^*)

Ekmek örnekleri	Ekmek Kabuğı		
	L^*	a^*	b^*
KE(Kontrol)	63,01±1,73a	8,78±2,83b	28,94±2,87a
LE10	56,55±3,33bA	11,02±2,29abA	27,09±1,39aB
LE20	58,14±3,38bA	9,54±1,89abA	25,23±8,44aA
LE30	57,22±2,59bA	10,79±0,68abB	25,95±3,14aA
LE40	55,11±1,63bA	11,41±2,62aA	27,64±2,60aA
KE(Kontrol)	63,01±1,73a	8,78±2,83ab	28,94±2,87a
SE10	59,58±3,93abA	8,89±1,05abA	28,20±2,34aAB
SE20	55,83±7,46bA	9,36±2,56abA	26,67±2,54aA
SE30	60,00±5,28abA	7,57±2,42bC	26,15±2,98aA
SE40	56,27±2,93bA	10,81±1,65aA	26,86±1,89aA
KE(Kontrol)	63,01±1,73a	8,78±2,83b	28,94±2,87a
OSE10	58,83±3,80bA	10,55±2,78abA	31,22±2,58aA
OSE20	55,67±3,98bA	12,05±3,44aA	29,65±2,63aA
OSE30	43,73±1,22cB	13,27±0,44aA	20,56±2bB
OSE40	40,94±2,21cB	12,88±0,70aA	17,22±2,94cB

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$) * L^* : Beyazlık renk değeri, a^* : Kırmızılık/mavilik renk değeri, b^* : Yeşillik/sarıklık renk değeri

Yapılan ekmek kabuğu renk analizleri sonucunda;

- LE ve SE örnekleri için %10'dan %40'a kadar değişen ekşi hamur konsantrasyon artışı "L*" renk analizi sonucunu etkilemediği istatistiksel olarak belirlenmiştir ($p>0,05$).
- İki kademeli spontan fermentasyon ile hazırlanan ekşi hamur katkılı ekmeklerde %30 ve %40 oranında ekşi hamur katkısı "L*" analizi sonuçlarını istatistiksel olarak anlamlı olacak şekilde düşürmüştür ($p<0,05$).
- Bütün ekşi hamur katkılı ekmek örneklerine ait "L*" değerleri ile kontrol ekmeğine ait L* değeri arasında istatistiksel olarak farklar tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Ekmek kabuk renginin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametre kırmızılık ölçüsünü veren "a*" değeridir [107].

- LE ve OSE örneklerinde ekşi hamur konsantrasyon artışı "a*" değeri sonucunu etkilemediği istatistiksel olarak belirlenmiştir ($p>0,05$).
- SE30 ve SE40 örneklerinin "a*" değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı olacak şekilde fark bulunmuştur ($p<0,05$).
- KE örneği ile OSE20, OSE30 ve OSE40 örnekleri arasında istatistiksel olarak fark bulunmuştur ($p<0,05$).
- LE ve SE örneklerinde konsantrasyon artışı "b*" değeri sonucunu etkilemediği istatistiksel olarak belirlenmiştir ($p>0,05$).
- KE örneği ile LE10-40 ve SE10-40 örneklerine ait "b*" değerleri arasında istatistiksel olarak fark bulunamamıştır ($p>0,05$).
- KE, OSE10, OSE20 örneklerine ait "b*" değeri ile OSE30, OSE40 örneklerine ait "b*" değerleri arasında istatistiksel olarak fark bulunmuştur ($p<0,05$).

Farklı hamur türlerinin aynı konsantasyonda etkisi değerlendirildiğinde;

- "L*" değeri için OSE30 ve OSE40 diğer örneklerden istatistiksel olarak farklı ve daha düşük bulunmuştur ($p<0,05$). "a*" değeri için LE30, OSE30 ve SE30 örnekleri birbiri ile istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). "a*" değerindeki artış asitliğin etkisini

göstermektedir. “b*” değeri için OSE30 ve OSE40 diğer örneklerden istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$).

4.7.2 Ekmek İçi Rengi

Farklı fermentasyon yöntemleri ile hazırlanan ekşi hamur katkılı hamur örneklerine ait ekmek içi renk analizlerine ait bulgular Tablo 4.15’ de verilmiştir. Ekmek örneklerinin ekmek içi renk ölçüm analizleri fırından çıkarıldıktan iki saat sonra gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.15 Ekmek örneklerinin iç renk değerleri (L^* , a^* , b^*)

<i>Ekmek örnekleri</i>	Ekmek içi		
	L^*	a^*	b^*
KE(Kontrol)	74,83±0,94a	-1,42±0,27c	16,93±0,93a
LE10	73,69±1,73abB	-1,15±0,15abcB	17,36±0,72aA
LE20	74,68±0,37aB	-1,21±0,08bcB	17,80±0,88aA
LE30	73,74±1,44abA	-1,03±0,16abA	17,68±0,94aA
LE40	70,80±1,92bA	-0,83±0,12aA	17,64±0,46aA
KE(Kontrol)	74,83±0,94a	-1,42±0,27b	16,93±0,93bc
SE10	71,37±0,24bB	-0,86±0,15aA	17,84±0,16aA
SE20	69,32±0,60bcC	-0,96±0,1aB	17,33±0,71abA
SE30	67,73±0,89cdB	-0,92±0,13aA	17,11±0,43abcA
SE40	66,32±1,22dB	-0,73±0,24aA	16,38±0,39cB
KE(Kontrol)	74,83±0,94ab	-1,42±0,27d	16,93±0,93b
OSE10	77,1±1,07aA	-0,87±0,03bA	16,77±0,89bA
OSE20	76,3±0,49aA	-1,1±0,09cAB	17,64±0,64abA
OSE30	72,54±1,77bcA	-0,91±0,11bcA	17,54±0,84abA
OSE40	71,69±0,69cA	-0,58±0,16aA	18,2±0,49aA

Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$). L^ : Beyazlık renk değeri, a^* : Kırmızılık/mavilik renk değeri, b^* : Yeşillik/sarıklık renk değeri

Yapılan ekmek içi renk analizleri sonucunda;

- KE örneği ile LE 40 kodlu ekşi hamur katkılı ekmek örneklerine ait “ L^* ” değerleri arasında istatistiksel olarak fark bulunmuştur ($p<0,05$).
- Tek kademli spontan fermentasyon ile hazırlanan ekşi hamur katkılı ekmek örneklerinin tüm konsantrasyonları (SE10-40) ile kontrol

ekmeğine (KE) ait “L*” değerleri istatistiksel olarak birbirinden farklı bulunmuştur ($p<0,05$).

- OSE40 örneği ile OSE10, OSE 20 örneklerine ait “L*” değerleri arasında istatistiksel olarak fark bulunmuştur ($p<0,05$).
- “a*” renk analizi sonucunda LE30, LE40 ile KE arasında istatistiksel fark bulunmuştur ($p<0,05$).
- KE örneği ile SE10-40 örneklerine ait “a*” değerleri arasında istatistiksel olarak fark bulunmuştur ($p<0,05$).
- İki kademeli spontan fermentasyon ile hazırlanan ekmeğin örneklerinde (OSE) %10, %20 ve %40 ekşi hamur katkısı “a*” renk analizi sonucunu istatistiksel olarak farklı sonuç vermesine neden olmuştur ($p<0,05$).
- *Lb. brevis* E25 starter kültürü kullanılarak hazırlanan ekşi hamur katkılı ekmeğin örneklerinde (LE) %10’dan %40’a kadar değişen ekşi hamur konsantrasyon artışı “b*” renk analizi sonucunu etkilemediği istatistiksel olarak belirlenmiştir ($p>0,05$).
- Tek kademeli spontan fermentasyon yöntemi ile hazırlanan ekşi hamurlardan %40 ve %10 oranında ilaveli ekmeğin örneklerine ait “b*” renk analizi sonucu birbirinden istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p>0,05$).
- OSE40 örneğine ait “b*” değeri KE örneğine göre istatistiksel olarak farklı ve yüksek bulunmuştur ($p<0,05$).

Farklı hamur türlerinin aynı konsantrasyonda etkisi değerlendirildiğinde; “L*” değeri için OSE20, LE20 ve SE20 istatistiksel olarak birbirinden farklı bulunmuştur ($p<0,05$). “a*” değeri için LE10 ile SE10 ve OSE10 istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$). “b*” değeri için SE40 ile OSE40 ve LE40 istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$).

Nachi vd. [150] tarafından yapılan çalışmada *Lb. brevis* S12 ilavesi ve spontan fermentasyon (tek kademe) ile üretilen ekşi hamur örneklerinden hamur ağırlığının %20’si olacak şekilde alınarak ekmeğin yapılmıştır. *Lb. brevis* S12 katkılı ekşi hamur türü için kabuk “L*” değeri ekmeğin için ticari maya ve spontan fermentasyon ile yapılanlara göre daha düşük bulunmuştur. Ekmeğin kabuğu “a*” değerleri ticari maya ile karşılaştırıldığında *Lb. brevis* S12 için daha yüksek

değer bulunmuştur. Ekmek içi “ L^* ” değeri ise spontan ekmek örneğinden daha yüksek, ticari maya ekmeğinden daha düşük bulunmuştur. “ a^* ” değerleri ise ticari mayalı ekmekte daha yüksek negatif değer vermiştir. Hem ekmek içi hem de kabuk “ b^* ” değerleri arasında istatistiksel farka rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışma tez bulgularını destekler niteliktedir. Ekşi hamur üretimi sırasında mikroorganizmalar tarafından gerçekleşen metabolik faaliyetler sonucunda üretilen basit şekerler enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonuna girerek “ a^* ” değerinin yükselttiği düşünülmektedir. Fermentasyon boyunca pH değerinde meydana gelen değişimler esmerleşme reaksiyonuna olumlu etki göstermektedir. Esmerleşme reaksiyonunun bir basamağı olan amadori düzenlenmesi zayıf asidik koşullarda meydana geldiğinden fermentasyonun renk oluşumunda etkin rol aldığı bildirilmektedir. Bu nedenle ekşi hamur fermentasyonuna bırakılmamış hamurdan üretilen ekmeklerde daha az ara ürün ve kahverengi oluşturan bileşikler oluştuğu söylenebilir [151].



Şekil 4.32 Ekşi hamur katkılı ekmek örnekleri

4.7.3 Ekmek Örneklerinin Hacim, Spesifik Hacim Değerleri

Hamur sisteminin gaz tutma kapasitesi buğday hamurunda esas olarak gluten ağı tarafından yönetilen hamurun fizikokimyasal yapısına bağlıdır [152]. Ekmek örneklerinin hacim ve spesifik hacim değerleri Tablo 4.16’da gösterilmiştir. Clarke ve Arendt [152], 15-20 saatlik fermentasyon süresi ile hazırlanan Tip II

ekşi hamur ürünlerinde laktik asit bakterileri tarafından gaz oluşumunun kuvvetle azaltıldığı ve ticari mayanın, mayalandırmayı arttırmak için hamura uygulanması gerektiğini bildirmiştir. *Lb. brevis* E25 kullanılarak hazırlanan ekşi hamur kartkılı LE10-LE40 örneklerinin hacim ve spesifik hacim değerleri KE, SE ve OSE örneklerine göre daha düşük olduğu bulunmuştur (Tablo 4.16). KE’de ilave edilen mayanın fermentasyonu sonucunda gaz üretimi meydana gelirken, OSE, LE, SE örneklerinde CO₂ hem ilave edilen maya hem de fermentasyon sırasında gelişen LAB’leri tarafından üretilmektedir [128]. Heterofermentatif özellikteki fermentasyon ile beraber üretilen organik asitler enzim aktivitesi artışına neden olarak sekonder etki göstermektedir. Bu etki sonucunda hamurdaki polisakkarit (nişasta), disakkarit (maltoz) ve monosakkarit (glukoz) yapılarının parçalanması hızlanarak maya gelişimi ile gaz üretimi artmaktadır.

Tablo 4.16 Ekmek örneklerinin hacim ve spesifik hacim değerleri

Ekmek Örnekleri	Ekmek Hacmi (mL)	Spesifik Ekmek Hacmi (mL/g)
KE(Kontrol)	313,125±7,46a	2,59±0,06a
LE10	275±4,08bC	2,24±0,03bC
LE20	241,25±8,54cB	1,98±0,07dB
LE30	261,25±4,79dC	2,07±0,03cC
LE40	222,5±6,45eC	1,78±0,05eC
KH(Kontrol)	313,125±7,47c	2,59±0,06c
SE10	337,5±2,89bA	2,78±0,03bA
SE20	340±5,77bA	2,79±0,05bA
SE30	360±5,78aB	2,94±0,06aB
SE40	357,5±2,89aB	2,96±0,06aB
KH(Kontrol)	313,125±7,47e	2,59±0,06e
OSE10	322,5±8,66dB	2,68±0,06dB
OSE20	345±5,77cA	2,86±0,05cA
OSE30	377,5±2,89bA	3,11±0,03bA
OSE40	392,5±2,90aA	3,23±0,03aA

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir ($p<0,05$)

Hamur örneğinde gerçekleşen yüksek asitlenme, ekşi hamur üretimi sırasında gerçekleşen yüksek asidifikasyon gluten yapısını depolimerize ve hidrolize olmasına neden olarak gluten bağları kırmaktadır. Bunun sonucu olarak ekmeğin spesifik hacim değeri düşmektedir [153]. Ekşi hamur örneklerinde pH değeri çok düşük ise maya fermentasyonu sonucunda oluşan CO₂ üretiminin inhibe olması ile daha düşük ekmek hacimleri elde edilir [154, 155]. Bu etki özellikle LE örneklerinde belirgin şekilde görülmüştür. Meroth vd. [156] yaptığı çalışmada geri besleme yönteminin belirli bir güne kadar maya sayısını arttırdığını ifade etmiştir. Elde edilen bu bilgi çalışmamızdaki OSE örneklerinin hacimlerinin daha yüksek değer göstermesini destekler niteliktedir.

Tablo 4.17 Ekmek hacim değerleri ile v_3/v_1 parametresi arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (r)

	Zaman	SH 0-40	OSH 0-40	LH 0-40
v_3/v_1 ¹	0.saat	0,944	0,964	-0,849
	1.saat	0,976	0,963	-0,552
	2.saat	0,949	0,984	-0,682
	3.saat	0,919	0,974	-0,758

¹ % 200 gerinim noktasındaki değerler içindir.

Ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için hacim değerleri ile v_3/v_1 değerleri arasında korelasyon incelenmiştir (Tablo 4.17). Analizlere kontrol hamur örnekleri de dahil edilmiştir. v_3/v_1 - gerinim (%) grafiklerinde SH ve OSH hamur örneklerinin viskoz bileşenin deformasyondan daha fazla etkilendiği görülmektedir. Korelasyon analizi sonucunda SH ve OSH örnekleri için pozitif korelasyon katsayıları elde edilirken, LH hamur örnekleri için negatif korelasyon katsayıları elde edilmiştir. LH örneklerinde negatif olması bu hamur örneklerinde artış etkisinin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen bulgular doğrultusunda uygulanan deformasyon karşısında v_3/v_1 değerlerinde meydana gelen pozitif yöndeki artış hacim değişimi hakkında ön bilgi kazanmamızı sağlayacak önemli bilgiler sunabileceği düşünülmektedir. LH hamur örneklerinde meydana gelen değişimler kontrol hamuruna göre benzer olması LH örnekleri için belirleyici faktörün elastik bileşen (gluten yapısı) olduğu söylenebilir.

4.7.4 Ekmek Sertlik Değeri Analizi

Sertlik değeri analizi sonucu Tablo 4.18'de sunulmuştur. SE, LE ve OSE ekmek örneklerin sertlik değerleri kontrol ekmek (KE) örneğine göre istatistiksel olarak anlamlı ölçüde düşük çıkmıştır ($p<0,05$). LE ekmek örneklerinde konsantrasyon arttıkça sertlik derecesi artarken genel olarak SE ve OSE örneklerinde azalmıştır ($p<0,05$). Gelişen asitliğin sonucu gluten yapısının çözülmesine bağlı olarak CO₂ yapıda tutulamadığından ekmek örneklerinin daha sert bir form kazandığı düşünölmektedir. Tekstür, gıda ürünlerinde en önemli duyuşal özelliklerden biridir. Ekmek ürünlerinde bu özellikten sorumlu madde gliadin ve glutenin proteinlerinden oluşın kompleks bir yapı olan glutendir. Gliadin proteinleri, hamurun viskozitesinden sorumludur ve alkolde çözünür, oysa gluteninler mukavemet ve elastikiyete katkıda bulunur ve asitlerde çözünür [52]. Asidik ortamda proteoliz sınırlı olduğunda CO₂'in daha fazla tutulmasını sağlar ve nihai ürünün yumuşaklığını doğrudan etkiler [57]. Omedi vd. [157] yaptığı çalışmada kontrol ekmeğinin sertliğini (476 g) %10 katkılı ekşi hamur katkılı ekmek örneğine (335 g) göre daha yüksek bulmuştur. Aynı çalışmada ekşi hamur konsantrasyon %10'dan %30'a çıkarıldığında sertlik derecesi (574 g) artmıştır. Dastmalchi vd. [158] tarafından ekmek hamuruna ekşi hamur ilavesinin, asitlenme seviyesine bağlı olarak ekmek sıklılığını azalttığı bildirilmiştir. Sumoy vd. [159] tarafından yapılan çalışmada beyaz ve esmer Teff unundan yapılan ekmeğe % 20-30 oranında ekşi hamur katkısı yapıldığında kontrol ekmeğine göre (10,4 N) ekmek içi sertliğinde önemli derece azalma (9,2 N, 7,7 N; sırasıyla) olduğu tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada *Lb. brevis* S12 içeren ekşi hamur ilavesi yapılan ekmeğin sertlik değeri (4338 g) aynı konsantrasyon ile üretilen spontan ekşi hamur ekmek örneklerine (4060 g) göre daha yüksek, ticari maya ile üretilenlere (5149 g) göre daha düşük bulunmuştur [150]. Verilen bu literatür sonuçları tespit ettiğimiz bulguları destekler niteliktedir.

Tablo 4.18 Ekmek örneklerinin sertlik değerleri

Ekmek Örnekleri	Sertlik (g)
KE(Kontrol)	630,82±32,44a
LE10	403,24±4,93dA
LE20	431,98±59,42cdA
LE30	486,61±46,36cA
LE40	568,44±41,38bA
KE(Kontrol)	630,82±32,44a
SE10	445,073±32,29bA
SE20	397,720±54,95bcA
SE30	343,530±20,41cdB
SE40	334,588±33,67dB
KE(Kontrol)	630,82±32,44a
OSE10	469,860±99,35bA
OSE20	370,117±48,99cA
OSE30	242,360±7,64cB
OSE40	317,078±24,99cB

*Farklı büyük harfler, fermentasyon türüne bağlı olarak aynı konsantrasyonun önemli farklarını gösterir. Farklı küçük harfler, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak aynı fermentasyon türünün önemli farklarını gösterir (p<0,05)

Çalışmamızda LAOS parametrelerinden G'_L ve η'_L değerleri ile sertlik arasındaki korelasyon incelenmiştir (Tablo 4.19). Korelasyon analizinin değerlendirmesinde Pearson korelasyon katsayısı kullanılmıştır. %200 gerinim noktasına ait G'_L ve η'_L değerleri incelendiğinde SH ve OSH ekşi hamur katkılı hamur örnekleri için pozitif korelasyon, LH katkılı hamur örnekleri için negatif korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Korelasyon analizinde KH hamur örnekleri analize dahil edilmemiştir. Ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin her biri kendi içinde değerlendirilmiştir.

Tablo 4.19 Ekmek sertlik değerleri ile G'_L ve η'_L parametreleri arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (r)

	Zaman	SH10-40	OSH10-40	LH10-40
G'_L	0.saat	0,747	0,855	-0,793
	1.saat	0,976	0,998	-0,819
	2.saat	0,918	0,903	-0,774
	3.saat	0,836	0,892	-0,900
η'_L	0.saat	0,897	0,893	-0,696
	1.saat	0,814	0,804	-0,651
	2.saat	0,839	0,802	-0,819
	3.saat	0,934	0,623	-0,896

Un hamurundaki SAOS bölgesinde gerçekleştirilen dinamik reolojik testler, buğday çeşitlerinin pişirme potansiyelini öngörmeye başarısız olduğu ifade edilmektedir [150]. Ancak literatürde gıdaların göstermiş olduğu doğrusal olmayan reolojik davranışının tekstür özellikleri ile ilişkilendirmesiyle olumlu ilgili çalışmalar mevcuttur. Melito vd. [28] tarafından, peynir altı suyu proteini izolat/k-karragenan jel yapılarının LAOS özelliklerinin incelendiği çalışmada elde edilen parametrelerle tekstür özellikleri arasındaki korelasyon incelenmiştir. Farklı frekans değerlerinde G'_L/G'_M oranı ile sıkıştırılabilirlik arasında negatif ilişki saptanmıştır. Özyiğit [29] farklı oranlarda diyet lifi ilave ederek elde ettiği kek hamurlarında G'_L/G'_M ve η'_L/η'_M oranları ile sertlik değeri arasındaki korelasyonu incelenmiştir. G'_L/G'_M ile sertlik değerleri arasındaki korelasyon katsayısı -0,923 olarak bulunurken, η'_L/η'_M ile sertlik değeri arasındaki korelasyon katsayısı -0,985 bulunmuştur. Yazar [30] yaptığı çalışmada glutensiz hamur örnekleri için G'_L , S , η'_L , v_3/v_1 , e_3/e_1 , T değerleri ile ekmek hacmi arasındaki ilişki değerlendirilmiş G'_L ve η'_L değerleri için daha yüksek korelasyon değeri elde etmiştir. Elde ettiğimiz bulgular verilmiş literatür bilgilerine katkı sunacak nitelikte sonuçlar vermiştir.

Yapılan çalışmalarda ekşi hamur ve ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin doğrusal olmayan bölgede viskoelastik özelliklerinin değerlendirildiği bir bulguya rastlanılmamıştır. Bu zamana kadar yapılan birçok çalışmada ekşi hamur fermentasyonunun, hamur özellikleri ve ekmek kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Ekşi hamur, buğday ekmeklerinde ekmek lezzetini, hacmini, iç yapısını ve raf ömrünü iyileştirmek ve mineraller için doğal bir anti-besin bileşiği olarak unda bulunan fitik asit içeriğini azaltmak için kullanılır. Ekşi hamur, hamur asitleşmesine yol açan laktik asit bakterilerinin baskın olduğu un ve su karışımıdır. Bu mikroorganizmalar genellikle hamur elastikiyetinin ve sertliğinin azalmasına yol açar. Ekşi hamur laktik asit bakterileri, proteolitik etkinliğiyle amino asitleri ve küçük peptidleri buğday proteinlerinden serbest bırakarak lezzet gelişimini artırır. Laktik asit bakterilerine ek olarak, tahıl unu ve mayalar asidik koşullar altında prolaminleri parçalayan ve bu nedenle hamurun reolojik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olan proteolitik enzimler içerir. Farinograf, ekstensograf gibi ampirik ölçümler buğday unu hamurlarının mekanik özelliklerinin, ürün işleme sırasında hamurun kullanım özelliklerinin ve bitmiş ürünlerin kalite özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Dinamik osilasyon, akış viskozimetre, sürünme-geri kazanım testi gibi temel (fundamental) reolojik testler ise viskozite (deformasyon kolaylığı) ve esneklik (geri kazanma kolaylığı) gibi malzemenin esas reolojik özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Literatürde hamur sistemlerinin küçük genlikli salınım ölçümleri sırasında nişasta fazının reolojik özelliklerinin baskın olduğu, büyük ölçüde buğday unu yapım performansını kontrol eden protein fazının etkisinin, nişasta fazının baskınlığı tarafından bastırıldığı ifade edilir. Buna göre, hamur sistemleriyle elde edilen küçük genlikli reolojik sonuçlar çoğu zaman pişirme sonuçlarıyla ilişkilendirilememektedir. Ekşi hamur üretiminde spontan fermentasyon ya da

starter kültürlerin kullanıldığı kontrollü olarak ifade edilen fermentasyon yöntemi tercih edilmektedir. Bu amaçla tez kapsamında tek kademeli spontan, iki kademeli spontan ve *Lb. brevis* E25 ilaveli üç ekşi hamur örneği üretilmiş, üretilen ekşi hamur örneklerinden dört farklı konsantrasyon (% 10, % 20, % 30 ve % 40) ilavesi yapılmış hamur örnekleri hazırlanmıştır. Elde edilen ekşi hamur ve ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin LAOS parametreleri (G'_M , G'_L , η'_M , η'_L , e_3/e_1 , v_3/v_1 , S ve T) ölçülerek değerlendirilmiştir. LAOS verileri ile “faz içi” ve “faz dışı” stres bileşenlerinin değerlendirilmesi sonucunda, fermentasyon yöntemine göre hamurun reolojik özelliklerinin farklı şekilde etkilendiği tespit edilmiştir. Doğrusal olmayan bölgede *Lb. brevis* E25 kullanılarak hazırlanan ekşi hamur katkılı örneklerde faz içi bileşenin belirgin şekilde etkilendiği görülmüştür. Spontan fermentasyon ile elde edilen örneklerde (SH, OSH) ise hem faz içi hem de faz dışı bileşenleri uygulanan deformasyondan etkilenmiştir. Doğrusal olmayan bölgede (% 200 gerinim noktası) Lissajous eğrilerinin değerlendirilmesi ekşi hamur ilaveli hamurun elastik ve viskoz bileşenlerinin viskoelastik gluten ağının ve nişasta yapısının hamurdaki etkisini ortaya çıkarmamıza olanak sunmuştur. Gerilme genliği arttıkça elastik bileşeni temsil eden Lissajous eğrileri daha büyük ve daha dairesel olmaya başlarken, viskoz bileşeni temsil edenler daralmaya başlamış, eliptik hale gelmiş ve hamur örneklerinin süspansiyon ağının parçalanmasından dolayı yapısal bozulma doğrulanmıştır. Çalışmamızda ekşi hamurun dahil edilmesi ile LAOS bölgesindeki negatif döngülere sahip iç elastik stres eğrilerinin saat yönünde döndürülmesiyle ortaya çıkan döngü içi gerinim yumuşama davranışı gözlenmiştir. Bu davranış, ekşi hamur miktarındaki artışla daha belirgin hale gelmiştir. Şekil değiştirme davranışının, protein ikincil yapısının modifikasyonları ile ilişkili olduğu göz önüne alındığında, ekşi hamur ilavesinin gluten ağını zayıflattığı öne sürülebilir. Lissajous eğrilerinin viskoz izdüşümü, elastik izdüşümünü doğrulamıştır. Diğer elastik (e_3/e_1 , G'_M , G'_L , S) ve viskoz özellikleri (v_3/v_1 , η'_M , η'_L , T) ifade eden LAOS parametreleri, doğrusal olmayan viskoelastik özelliklerin kuvvetli bir gerinim bağımlılığını ortaya çıkarmıştır. Bu parametreler, elastik Lissajous eğrileri ile tutarlı olan gerinim yumuşama davranışını ve doğrusal olmayan bölgede artan ekşi hamur miktarındaki viskoz

Lissajous eğrilerine uygun kayma incelmesi/kayma kalınlaşması davranışını doğrulamıştır. Kritik gerinim noktalarına kadar tüm ekşi hamur katkılı hamur örneklerinin e_3/e_1 değerleri pozitif (+) sonuçlar vermiştir. Gerinim artışına bağlı olarak gluten ağındaki kopmalar ve nişasta yapısının hidrolizi e_3/e_1 değerlerinin keskin bir şekilde azalmasıyla sonuçlanmasına neden olmuştur. Bu deformasyon ile tek kademeli spontan fermentasyona bağlı hamur örneklerinde, en yüksek negatif e_3/e_1 değerleri elde edilmiştir. Konsantrasyon artışı tüm elastik LAOS parametrelerinde azalmaya neden olmuştur. Ekşi hamur ilavesi ile gerinim katılaşması davranışının azaltılabileceği belirlenmiştir. Yorumlanan e_3/e_1 parametresi katılaşma oranı (S) değerleri, normalize edilmemiş Lissajous eğrileri, normalize edilmiş elastik stress eğrileri, G'_M ve G'_L değerleri ile desteklenmiştir. Yapılan bu çalışmada, starter kültür kullanılan tüm hamur örneklerinde (LH) v_3/v_1 değerleri negatif sonuçlar vermiş, spontan fermentasyon ile elde edilen örneklerde ise (SH, OSH) yüksek konsantrasyonlarda (% 30, % 40) pozitif v_3/v_1 değerlerine rastlanılmıştır. Fermentasyon sırasında gerçekleşen pH düşüş hızının yavaş gerçekleşmesinin v_3/v_1 değerlerini etkilediği çıkarımı yapılmıştır. “S” değerlerinin aksine bütün örneklerin kayma kalınlaşma oranı (T) kritik gerinim noktalarına kadar azalma bu noktadan artma davranışı sergilemiştir. Özellikle SH ve OSH örneklerinde “T” değerlerinde belirli bir gerinim noktasına kadar T grafiklerinde hızlı düşüş ve sonrasında yükseliş trendi görülmüştür. LH örneklerinin aksine bu örneklerde yüksek konsantrasyonlarda pozitif “T” değerleri ölçülmüştür. T-Gerinim grafiklerinde gözlemlenen belirgin farklılıklar sonucunda, hamurun işlenebilme kabiliyetinin farklı yöntemlerle elde edilen ekşi hamur uygulamalarından önemli ölçüde etkilendiği çıkarımına ulaşılmıştır. Yorumlanan kalınlaşma oranı (T) değerleri, normalize edilmemiş Lissajous eğrileri, normalize edilmiş viskoz stress eğrileri, η'_M , η'_L değerleri ile desteklenmiştir. Elde edilen bu bilgiler doğrultusunda ekşi hamurun, buğday hamurun doğrusal olmayan viskoelastik tepkisinde önemli etkileri olduğu ortaya çıkmıştır. Her bir ekşi hamur örneği grubu için G'_L ve η'_L değerleri ile tekstür analizi sonucunda analiz edilen sertlik (g) değerleri arasında Pearson korelasyon katsayıları incelenmiş, LH örneği için yüksek olarak değerlendirilebilecek negatif korelasyon değerleri bulunurken SH ve OSH örnekleri için yüksek pozitif

korelasyon değerleri verdiği saptanmıştır. Fizikokimyasal (pH ve TTA), mikrobiyolojik (LAB sayısı) ve ekstensograf özelliklerin de LAOS sonuçlarını desteklediği gösterilmiştir. Ayrıca üretilen ekmek örneklerine hacim, spesifik hacim ve renk analizleri yapılmıştır. Renk (L^* , a^* , b^*) ve hacim değerlerinde farklı hamur türlerinin aynı konsantrasyonda etkisi değerlendirildiğinde istatistiksel farklılıklara rastlanılmıştır ($p < 0,05$). OSH katkılı hamur örneklerinde daha yüksek hacim değerleri elde edilmiştir.

Hamurun viskoelastik özelliklerinin belirlenmesi yoğurma, fermentasyon, açma ve ekstrüzyon gibi prosesler süresince reolojik davranışının tanımlanması açısından önemlidir. Elde edilen tanımlamalar son ürün kalitesi ve tekstürü hakkında fikir sunmaktadır. Otomasyon sistemine dayalı fırın ürünleri endüstrisinde hamurun uğramış olduğu yüksek deformasyonun etkisinin tahmin edilebilir olması önem arz etmektedir. Hamurun yapısında meydana gelen değişikliklerin karakterize edilmesi ekşi hamur katkılı ekmeğin endüstriyel üretiminin işlenebilirliğini daha etkin devam ettirmek için gereklidir. Ekşi hamurun reolojik özelliklerinin fermentasyon koşulları ile değiştiği çalışmamızda net bir şekilde görülmüştür. Özellikle starter kültür kullanımı, metabolik aktivite ve pH değeri reolojik özellikleri etkilemektedir. Ekşi hamur konsantrasyonlarının yüksek değerlerde (% 20' den daha yüksek) kullanılmasının hamurun yüksek deformasyonlara maruz kaldığında elastik ve viskoz özelliklerini net bir etkilediği görülmüştür. Ekşi hamur ilavesi yapılan hamur örneklerinin uzun süreli karıştırma işlemi ile meydana gelen yüksek deformasyondan etkilenebileceği bu nedenle daha kısa süreli karıştırma işleminin yapılması gerektiği söylenebilir. LAOS verilerinden elde edilen bulgular ile hazırlanan ekmek hamurunun ekşi hamur tipine bağlı olarak (spontan veya starter kültür ilaveli) kontrol hamuruna yakın stabilite gösterebilmesi için fermentasyon süresini daha kısa ve ekşi hamur konsantrasyonun daha düşük tutulması gerektiği çıkarımı yapılabilir. LAOS testinin, büyük deformasyon koşulları altında küçük miktarlarla çok fazla bir sistem olan ekşi hamurun mekanik özelliklerini karakterize etmek için yararlanılabilecek pratik bir teknik olduğu gösterilmiştir. Bu bağlamda, ürün formülasyonunu ayarlamak ve ekşi hamur fırıncılık ürünleri için doğru işlem parametrelerini (karıştırma süresi, farklı

starter kültür, fermentasyon süresi ve sıcaklık) seçmek için çalışmamızda yer alan LAOS verileri kullanabilir. Sonuç olarak, LAOS testi son yıllarda gıda alanında önemli bir yere sahip olmaya başlamış reolojik ölçüm yöntemlerinden birisidir. Ancak literatür yetersizliğinden dolayı pratik uygulamalarında ve veri yorumlamalarında ciddi zorluklar yaşanmaktadır. Literatürü veri değerlendirme açısından zenginleştirmek için bu tekniği kullanarak çok daha fazla ham madde ve ilave edildiği ürün ile çalışılması önem arz etmektedir.



Detaylı Normalize Edilmiş Lissajous Eğrileri

Normalize edilmiş Lissajous eğrilerinin listesi aşağıda verilmiştir:

A.1 KH örneklerinin zamana bağlı elastik Lissajous eğrileri

A.2 KH örneklerinin zamana bağlı viskoz Lissajous eğrileri

A.3 0. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.4 1. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.5 2. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.6 3. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.7 0. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.8 1. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.9 2. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.10 3. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.11 0. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.12 1. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.13 2. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.14 3. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.15 0. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.16 1. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.17 2. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.18 3. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.19 0. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.20 1. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.21 2. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

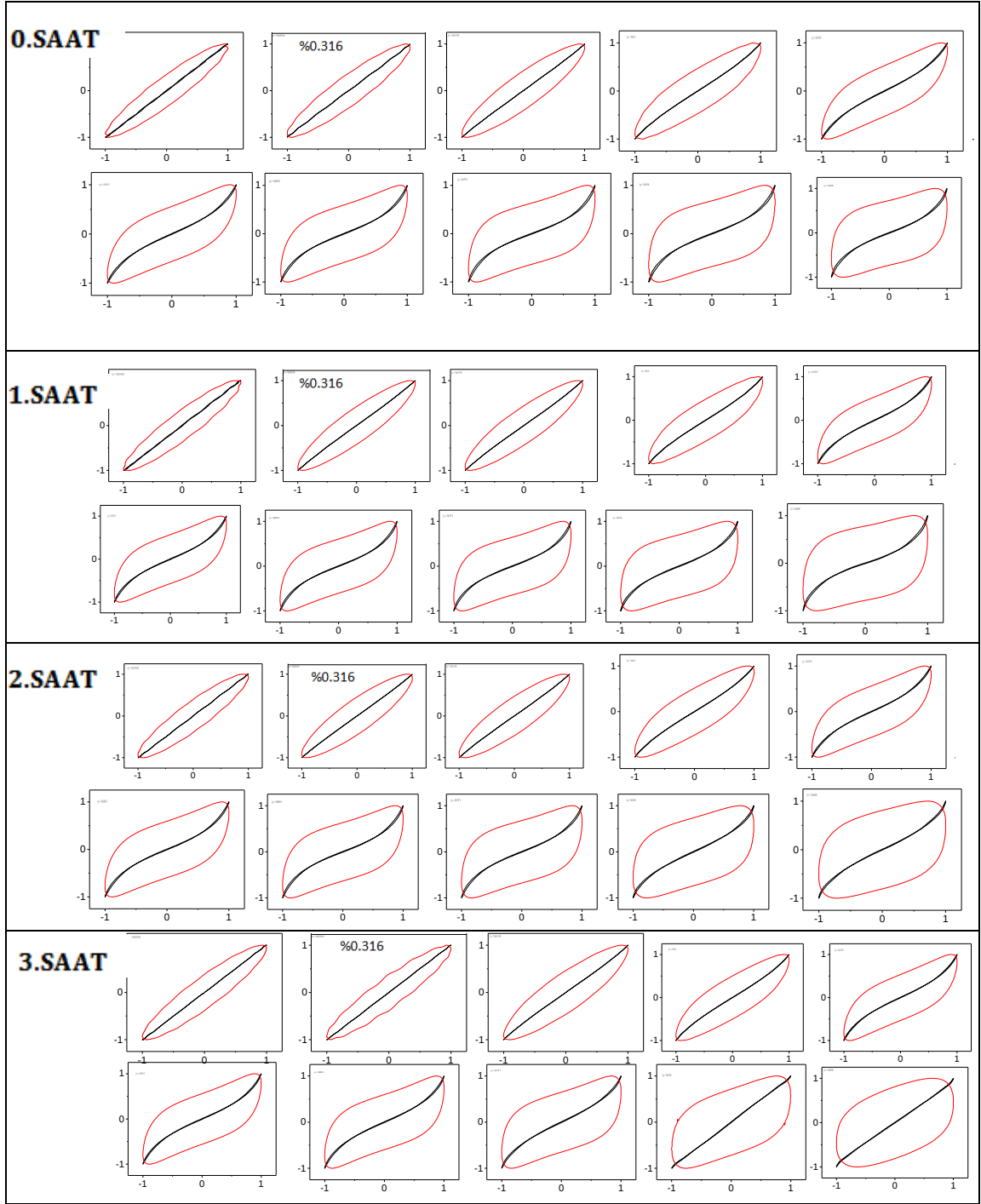
A.22 3. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri

A.23 0. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

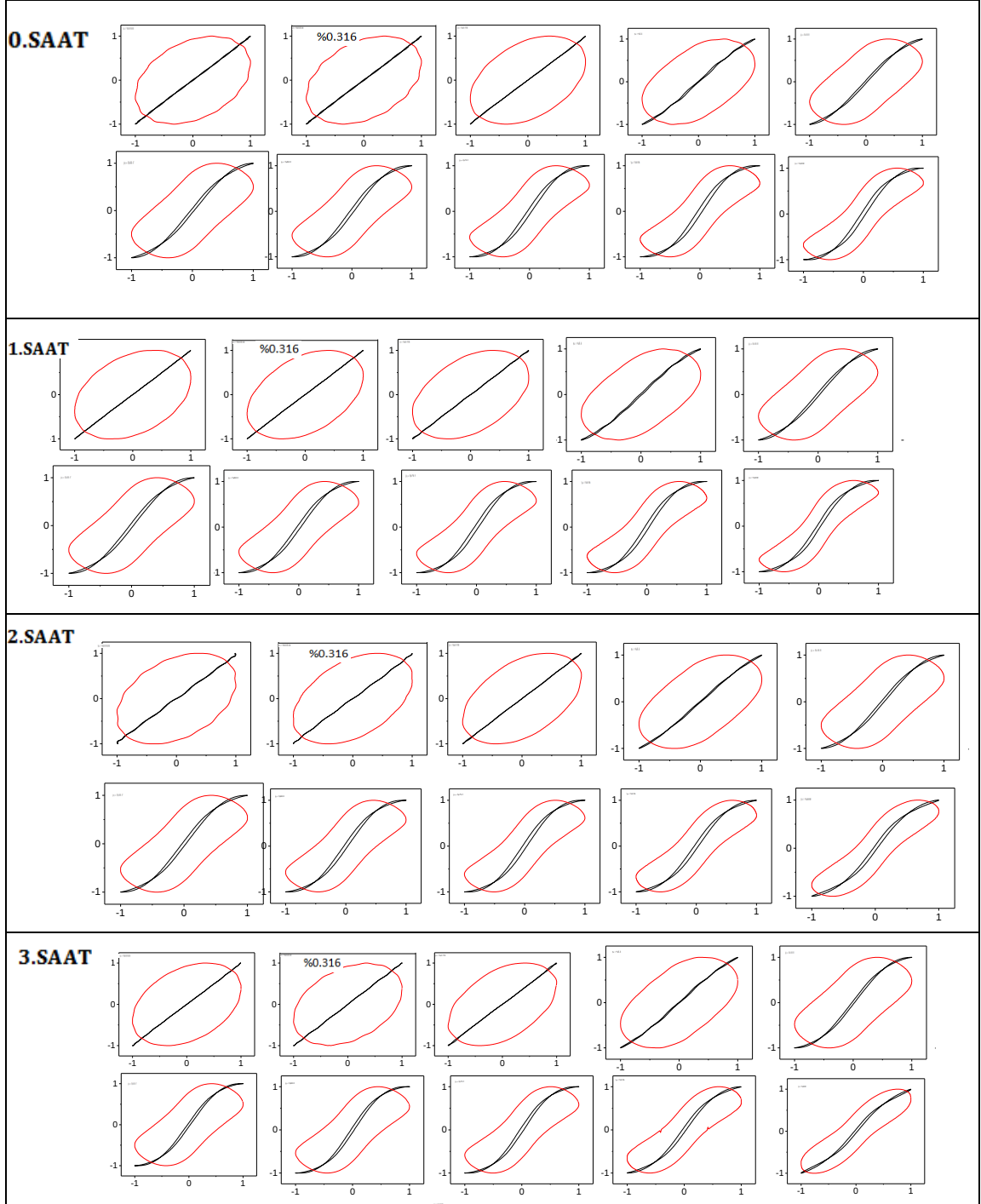
A.24 1. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

A.25 2. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri

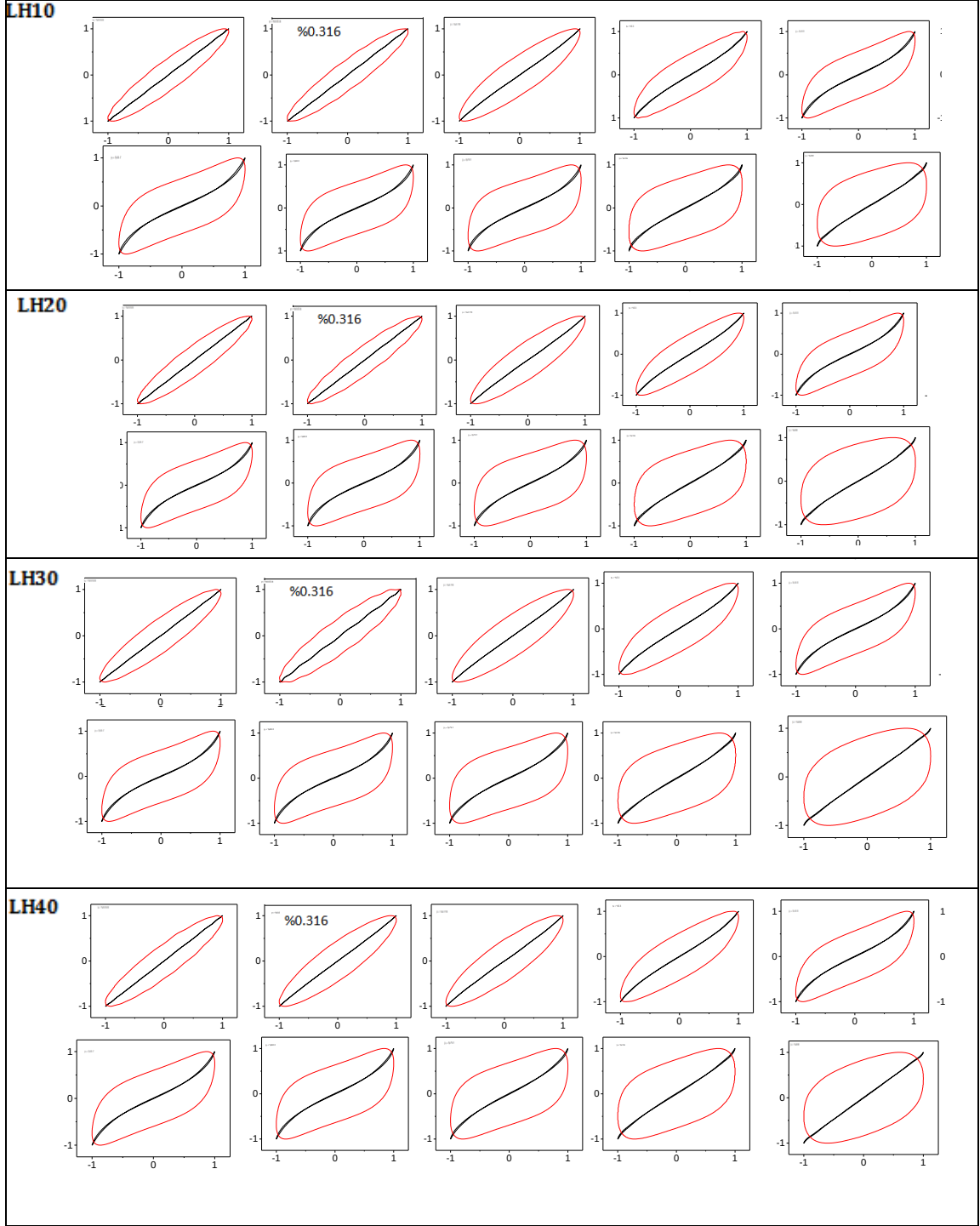
A.26 3. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri



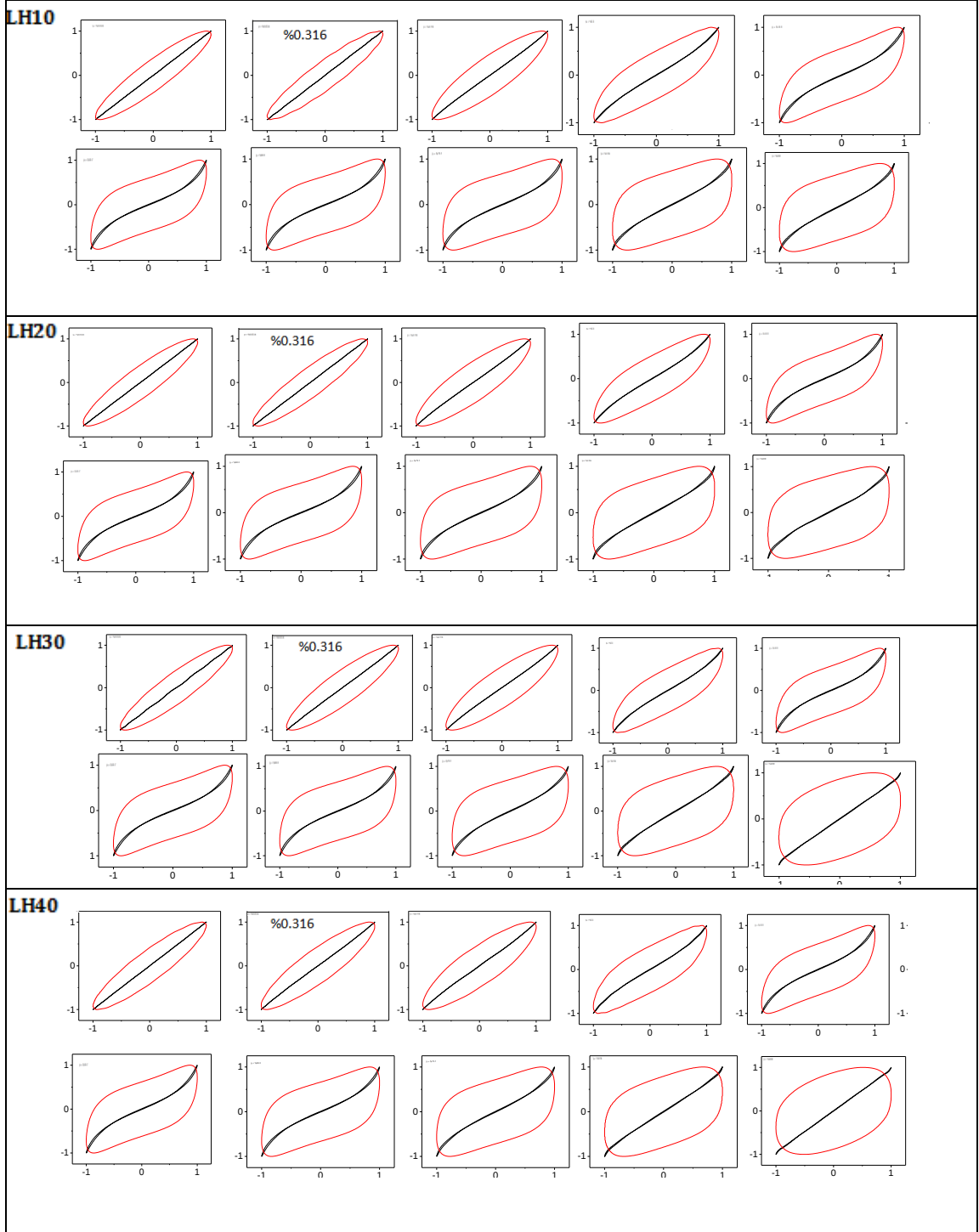
Şekil A.1 KH örneklerinin zamana bağlı örneklerinin elastik Lissajous eğrilerinin değerlendirilmesi (x eksenini normalize gerilim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerilim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126 , % 200 gerilim noktalarına aittir)



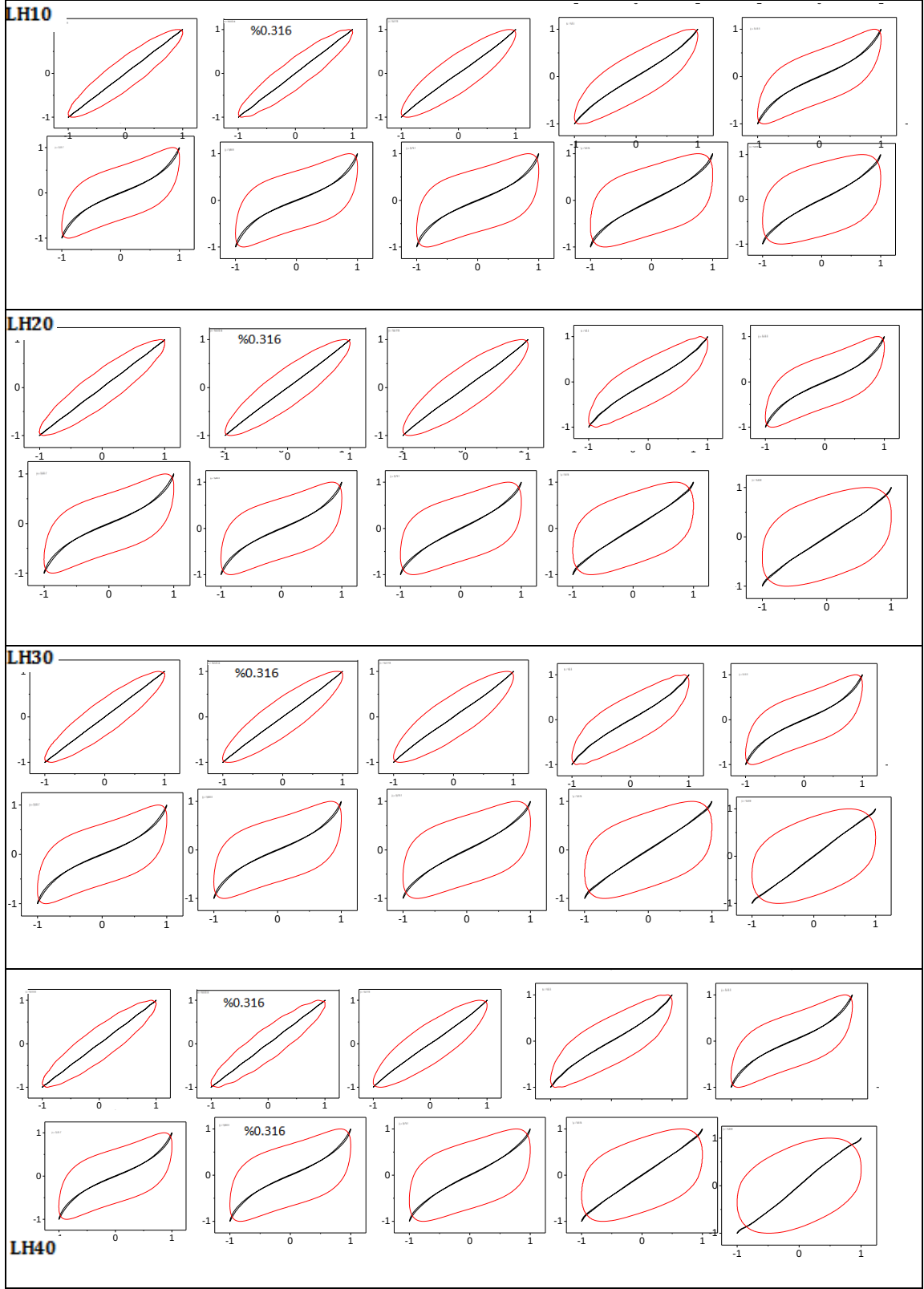
Şekli A.2 KH örneklerinin zamana bağlı viskoz Lissajous eğrileri (x eksen normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksen normalize toplam gerilimi ; iç eğriler ile gösterilen y2 eksen ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126 , % 200 gerinim noktalarına aittir)



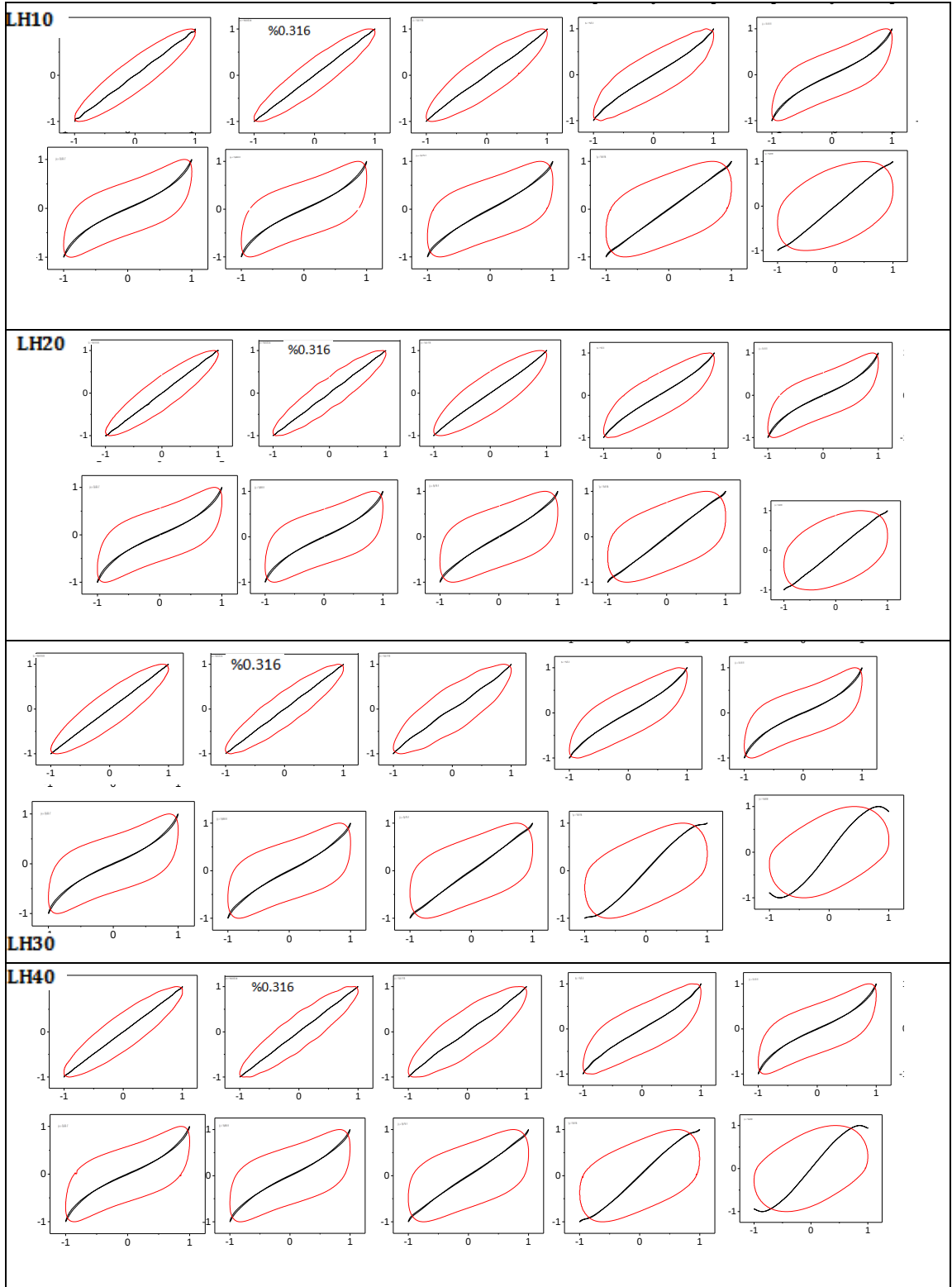
Şekli A.3 0. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerilim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerilim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerilim noktalarına aittir)



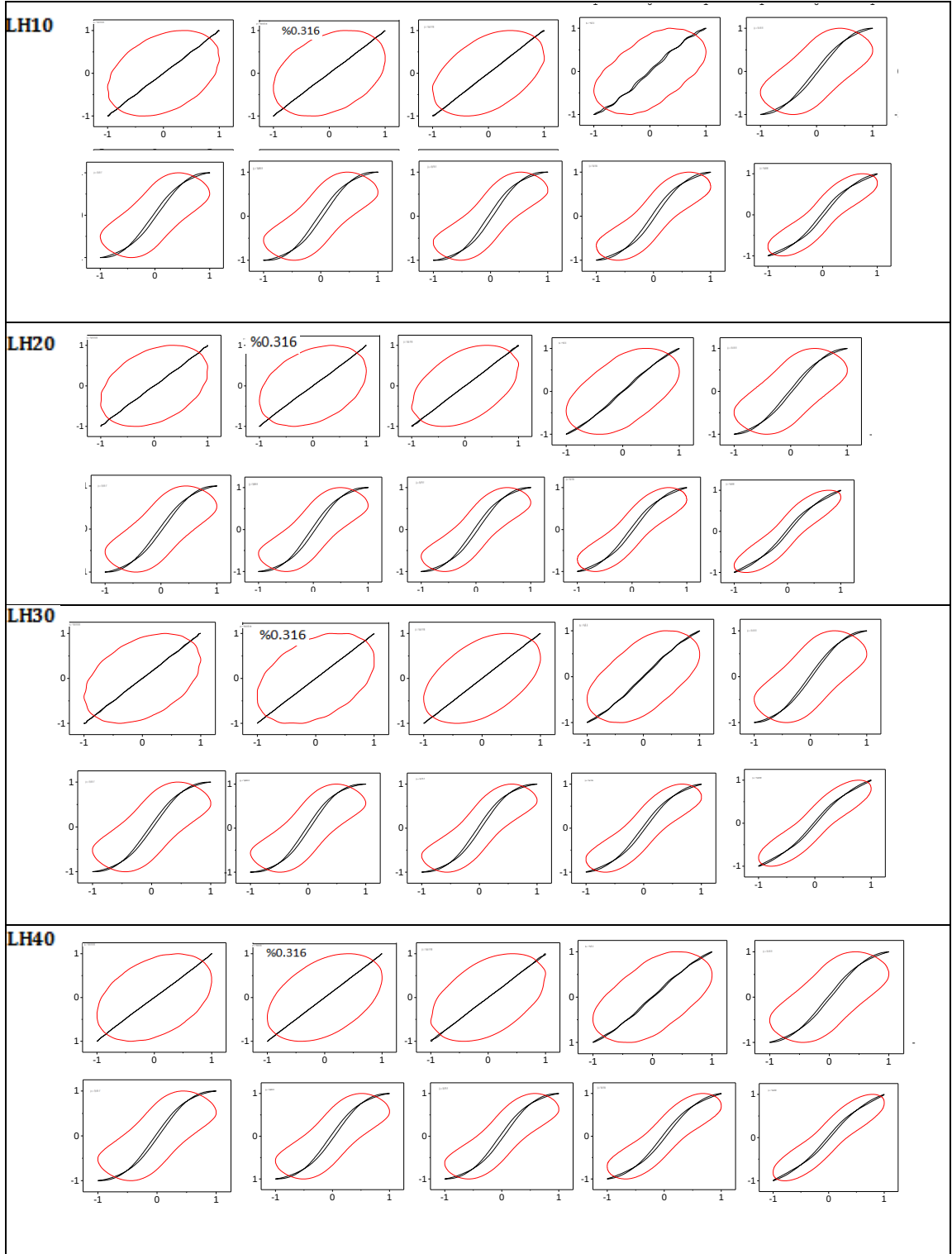
Şekli A.4 1. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri(x eksenini normalize gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126 , % 200 gerinim noktalarına aittir)



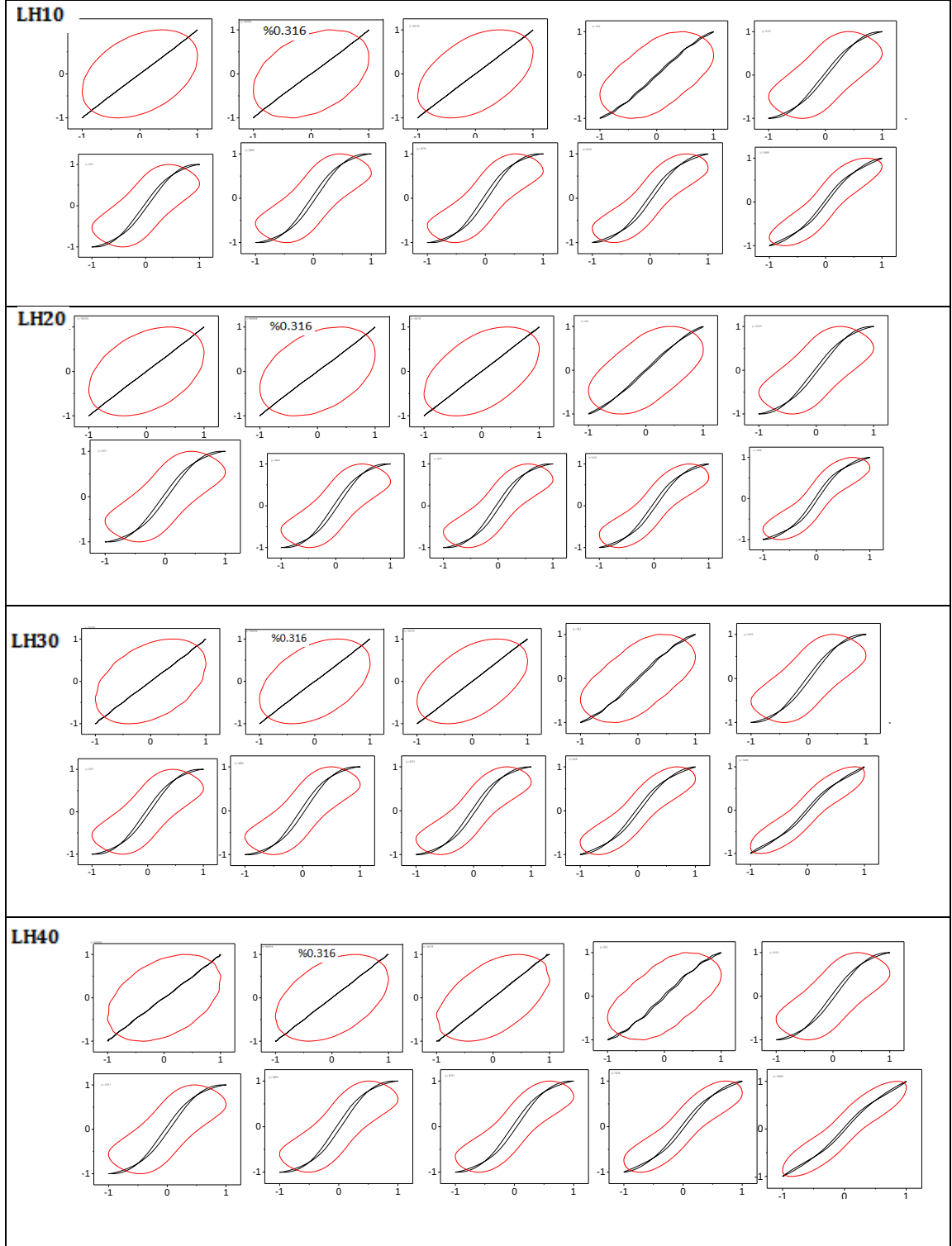
Şekli A.5 2. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerinimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerinimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



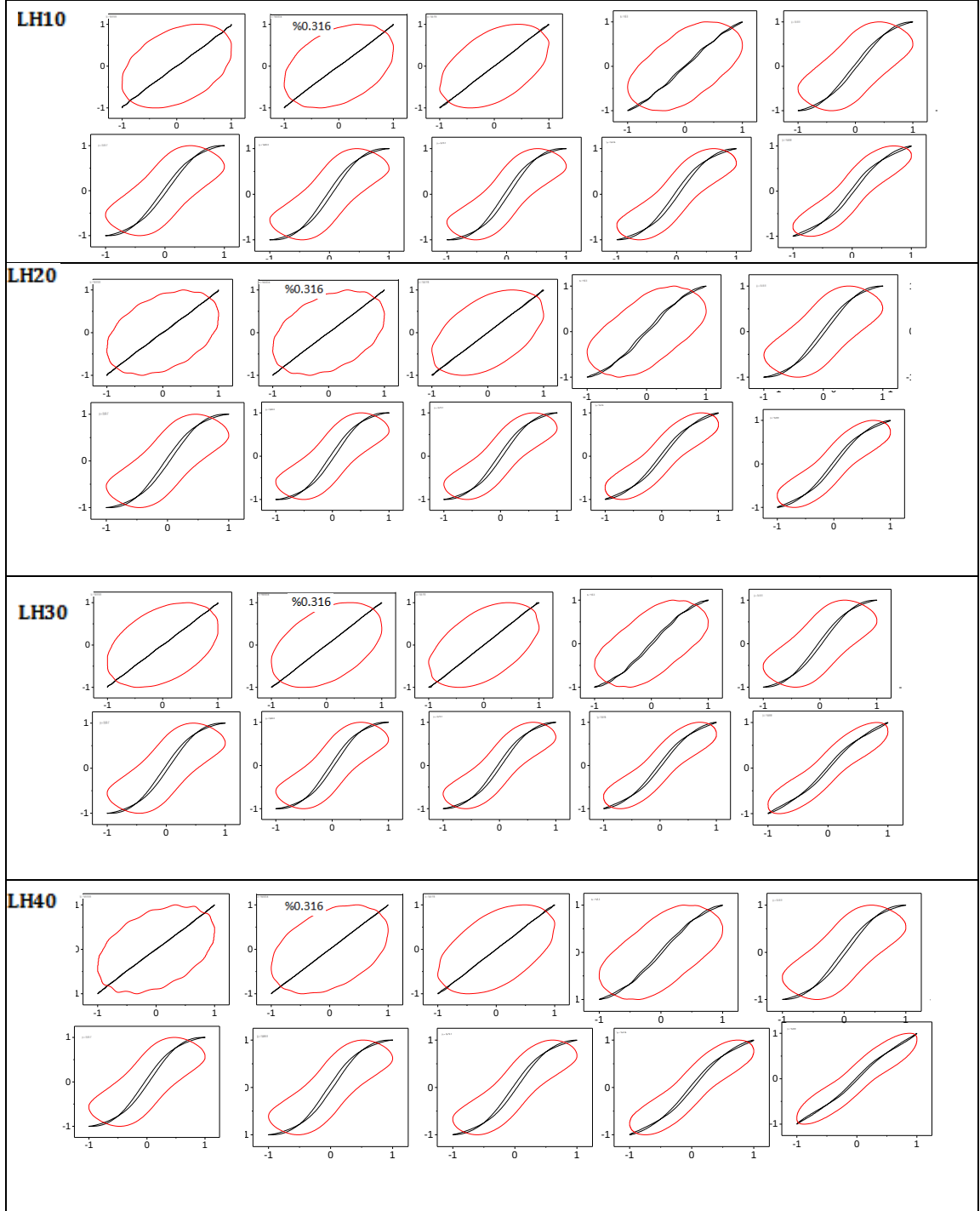
Şekil A.6 3. Saatte LH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerilim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerilim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerilim noktalarına aittir)



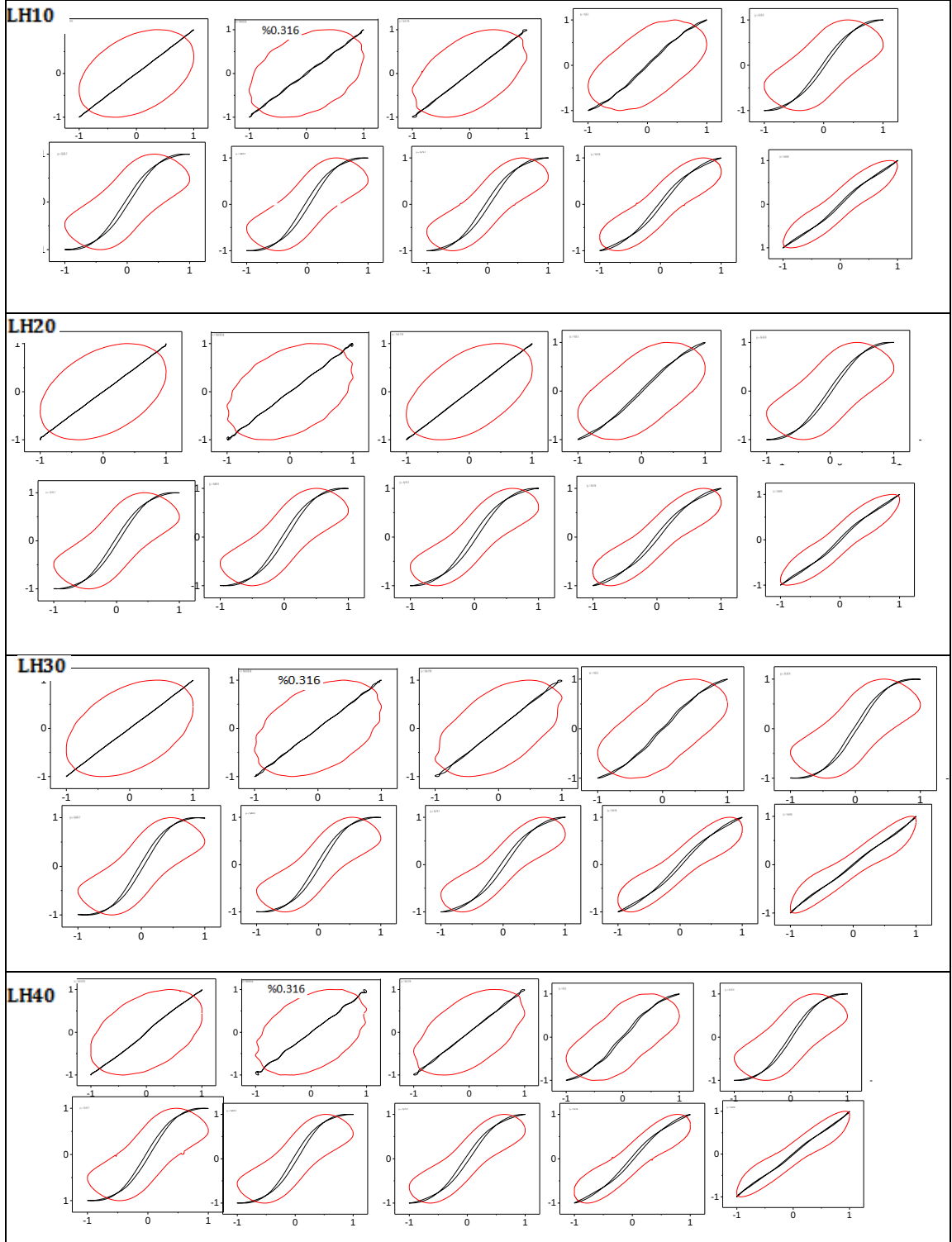
Şekil A.7 0. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



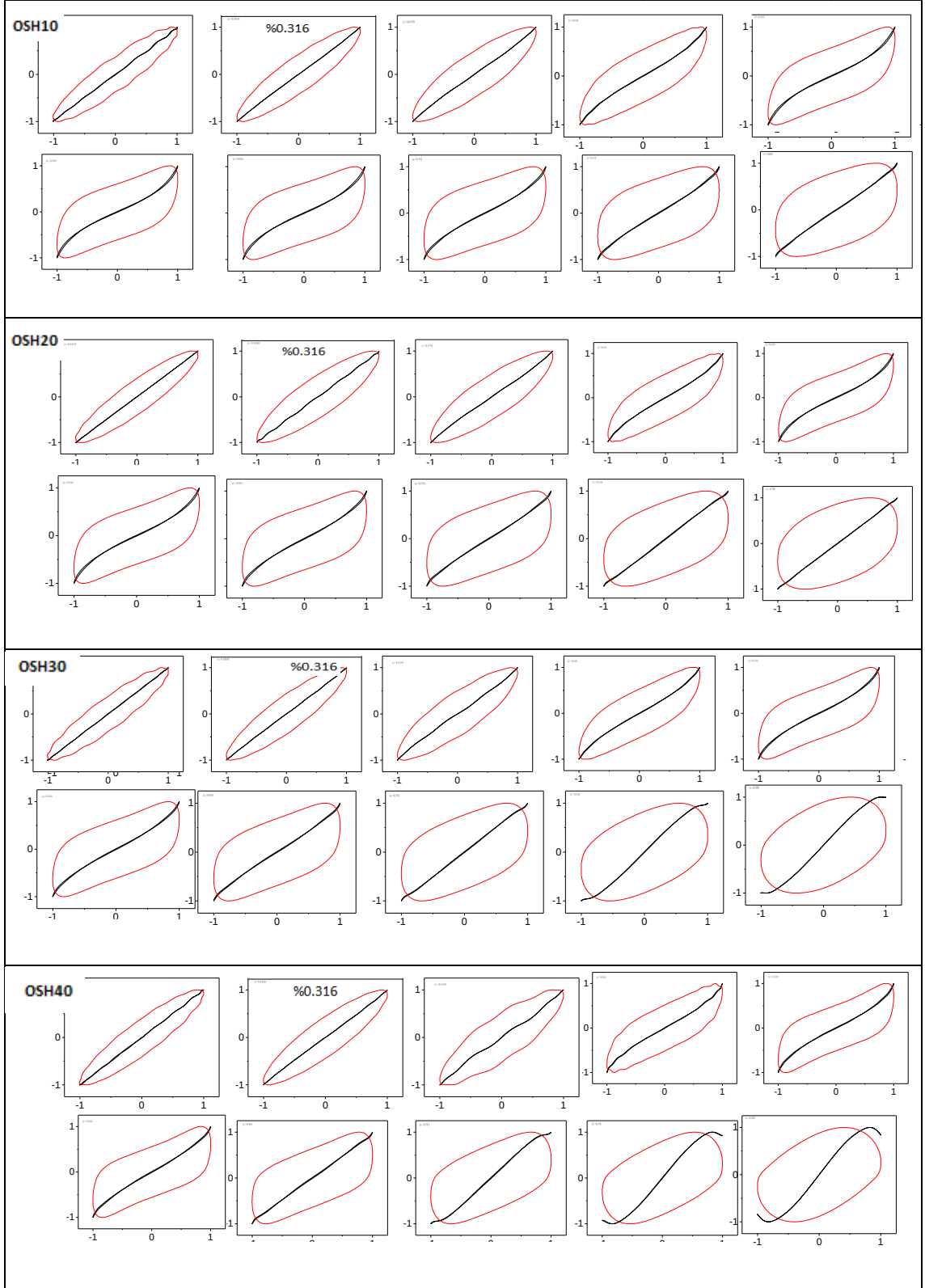
Şekil A.8 1. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



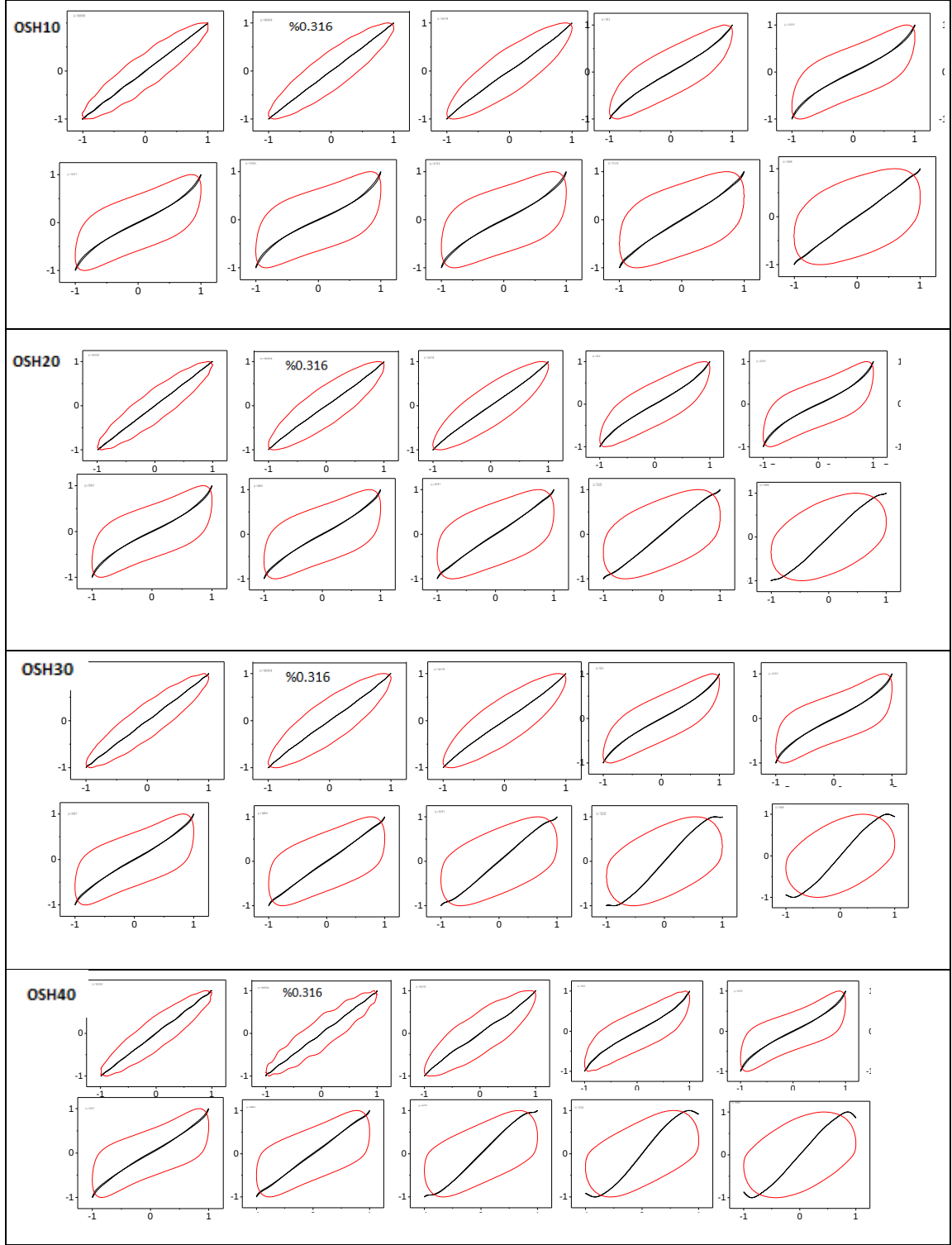
Şekil A.9 2. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, **üst sıra soldan sağa** sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; **alt sıra soldan sağa** sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126 , % 200 gerinim noktalarına aittir)



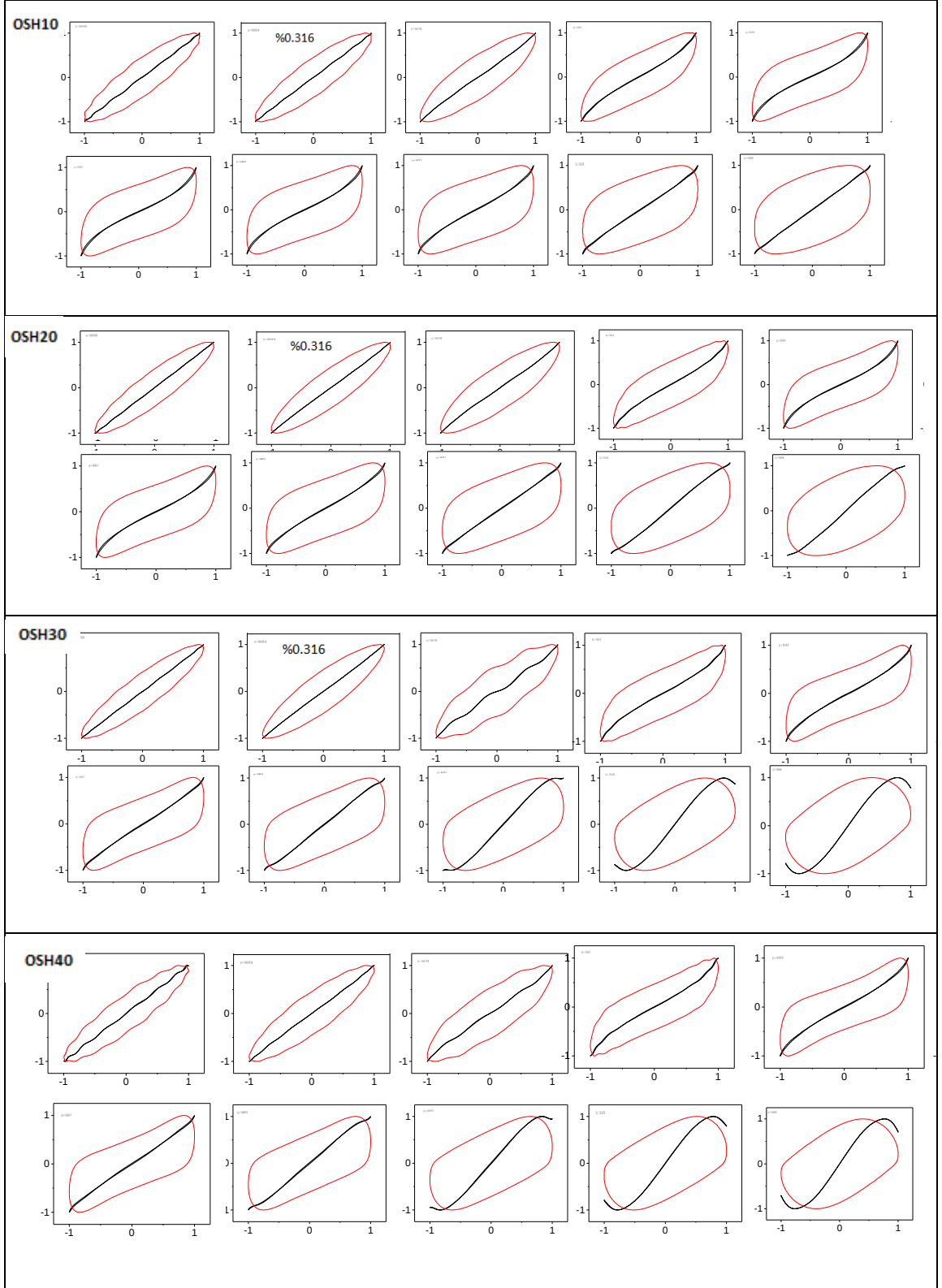
Şekil A.10 3. Saatte LH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



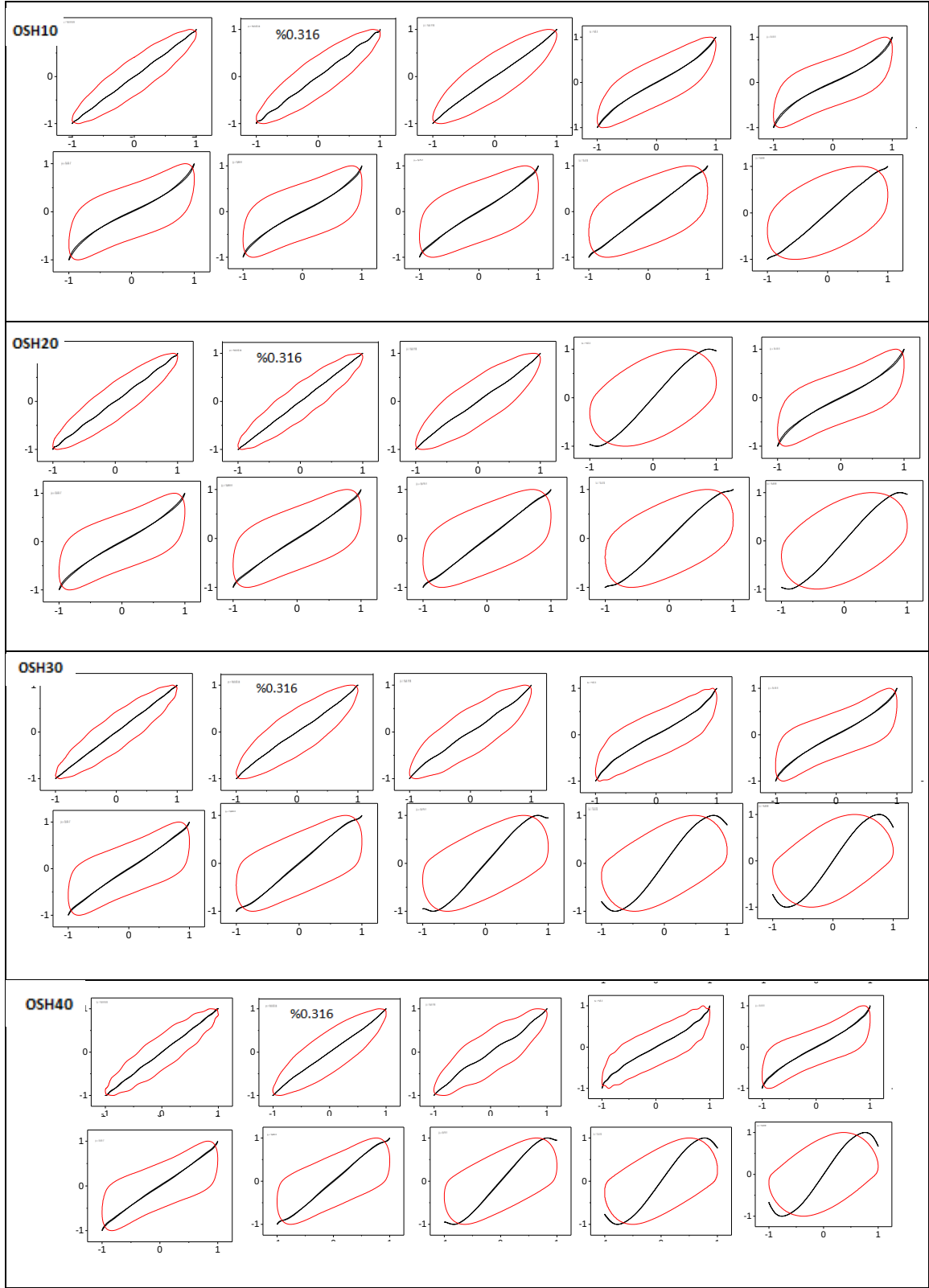
Şekil A.11 0. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir.



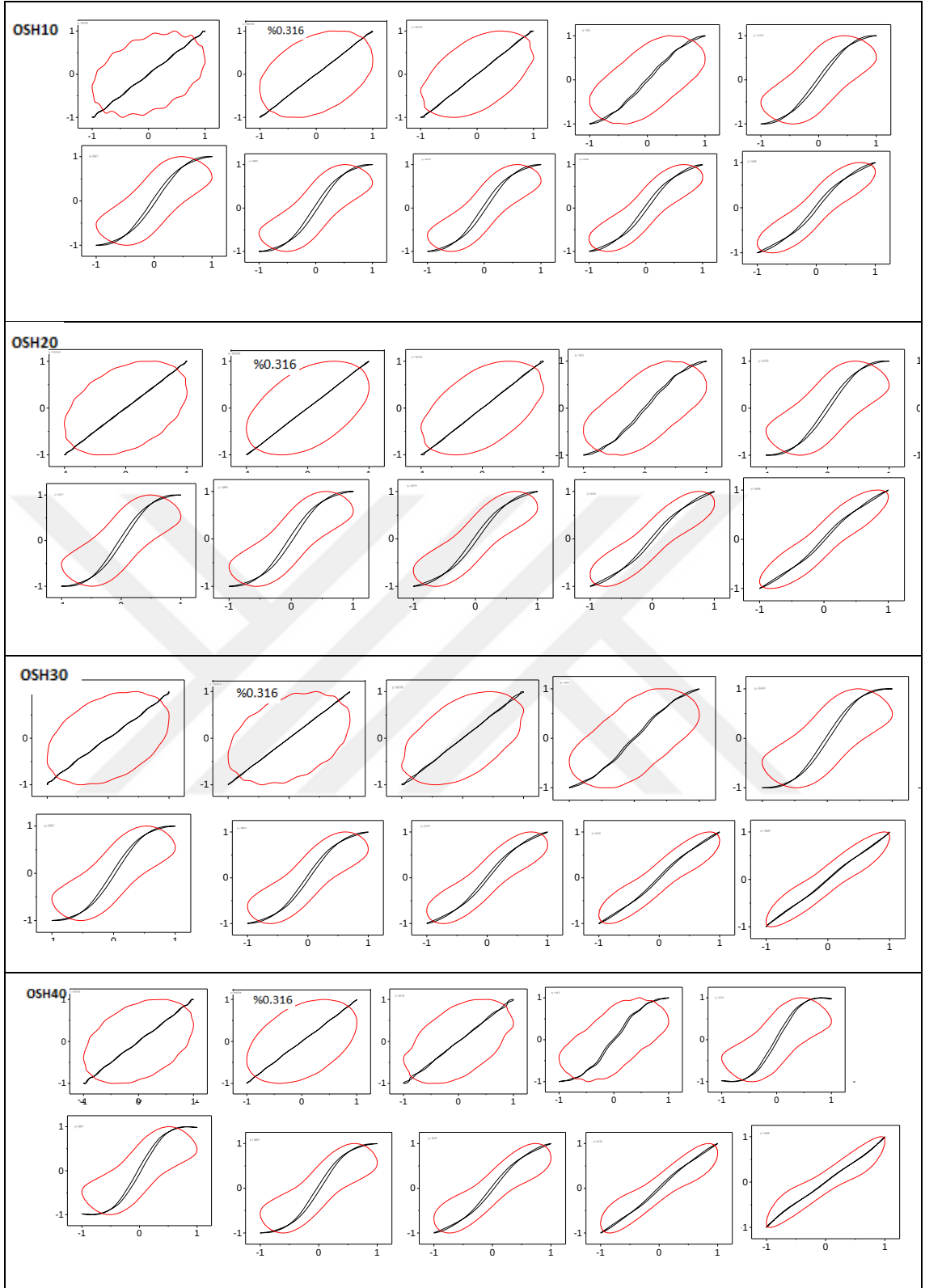
Şekil A.12 1. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksen normalizeler gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksen normalizeler toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksen ise normalizeler gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



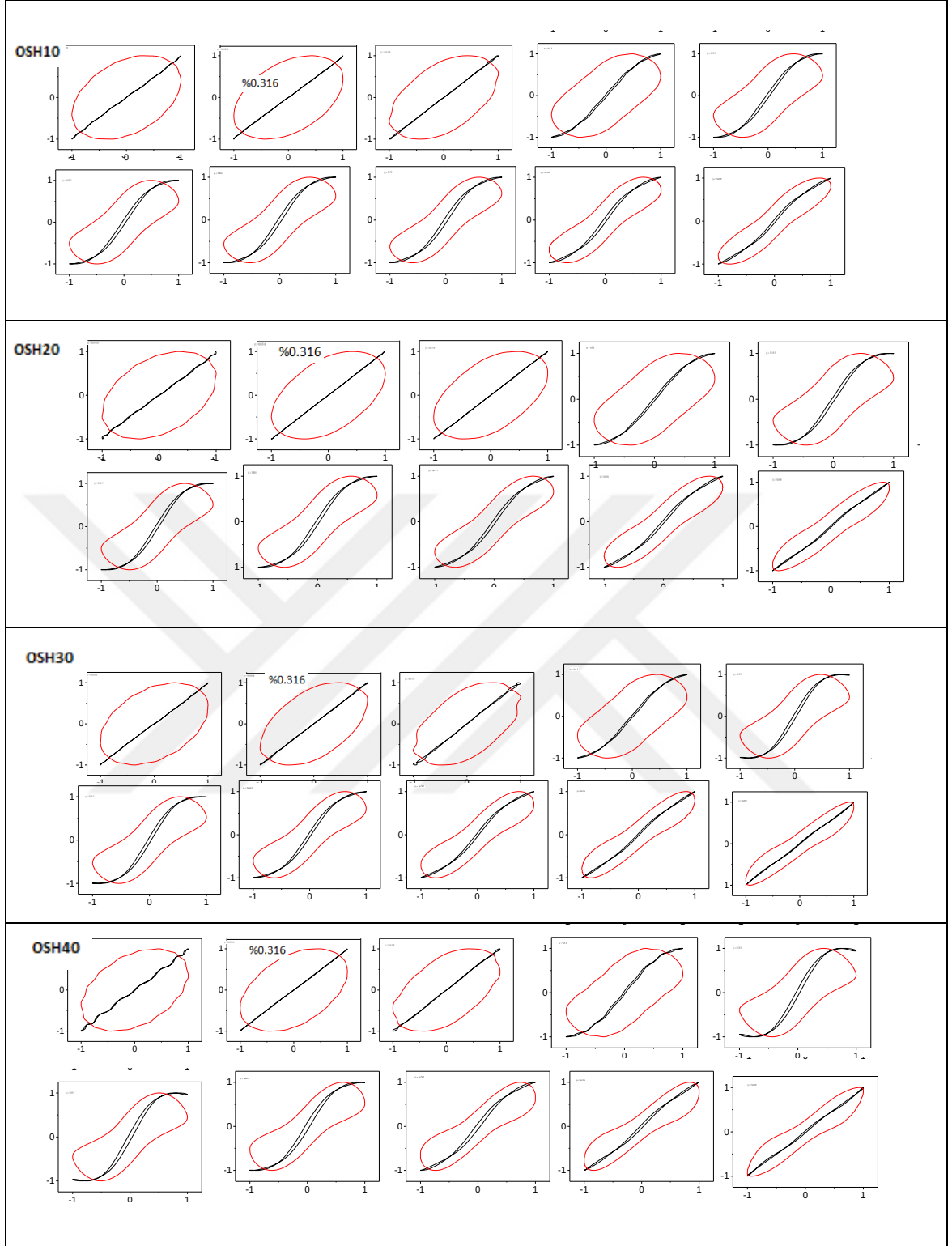
Şekil A.13 2. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim, dış halkalar ile gösterilen y_1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y_2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



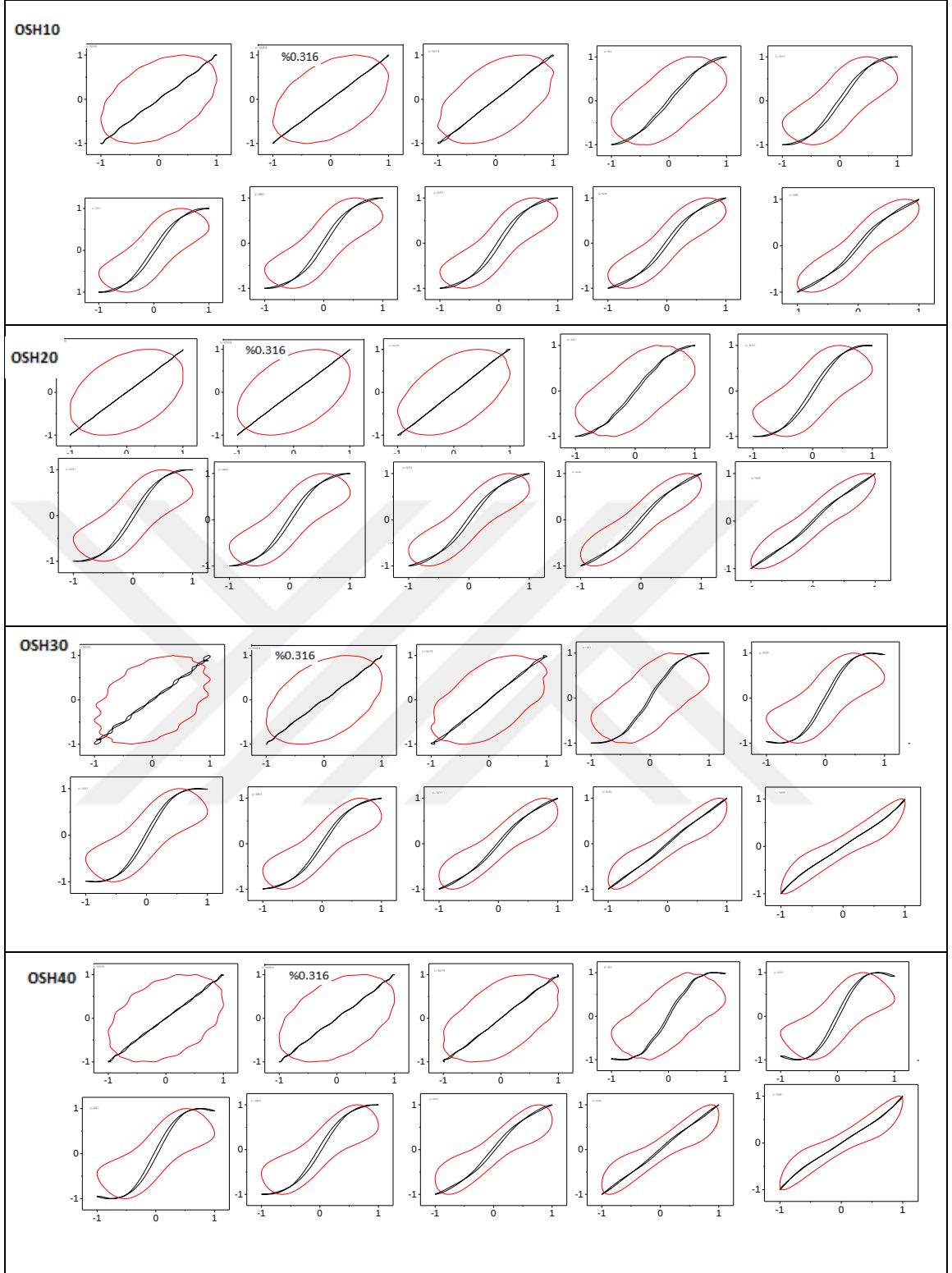
Şekil A.14 3. Saatte OSH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



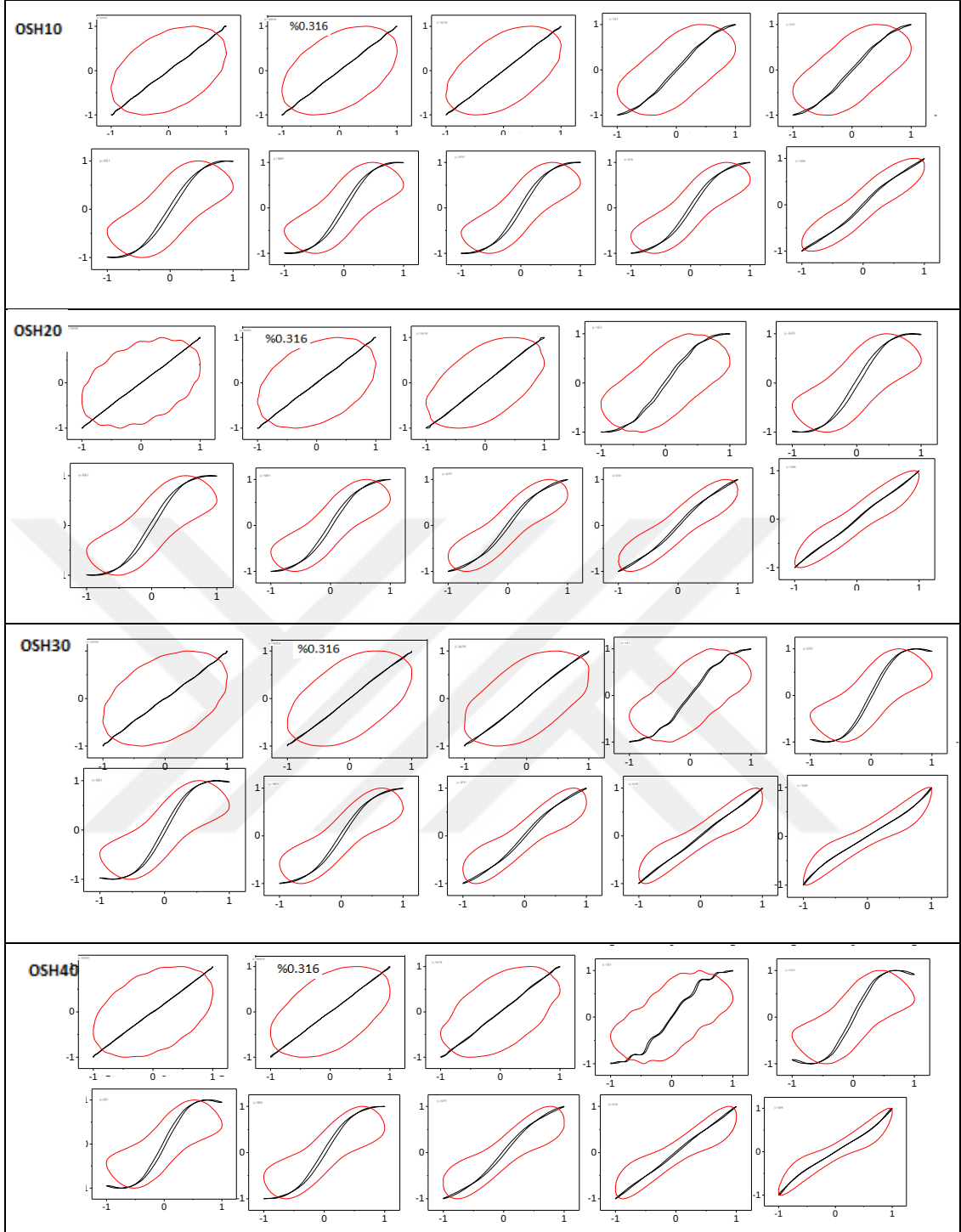
Şekil A.15 0. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerinimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerinimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



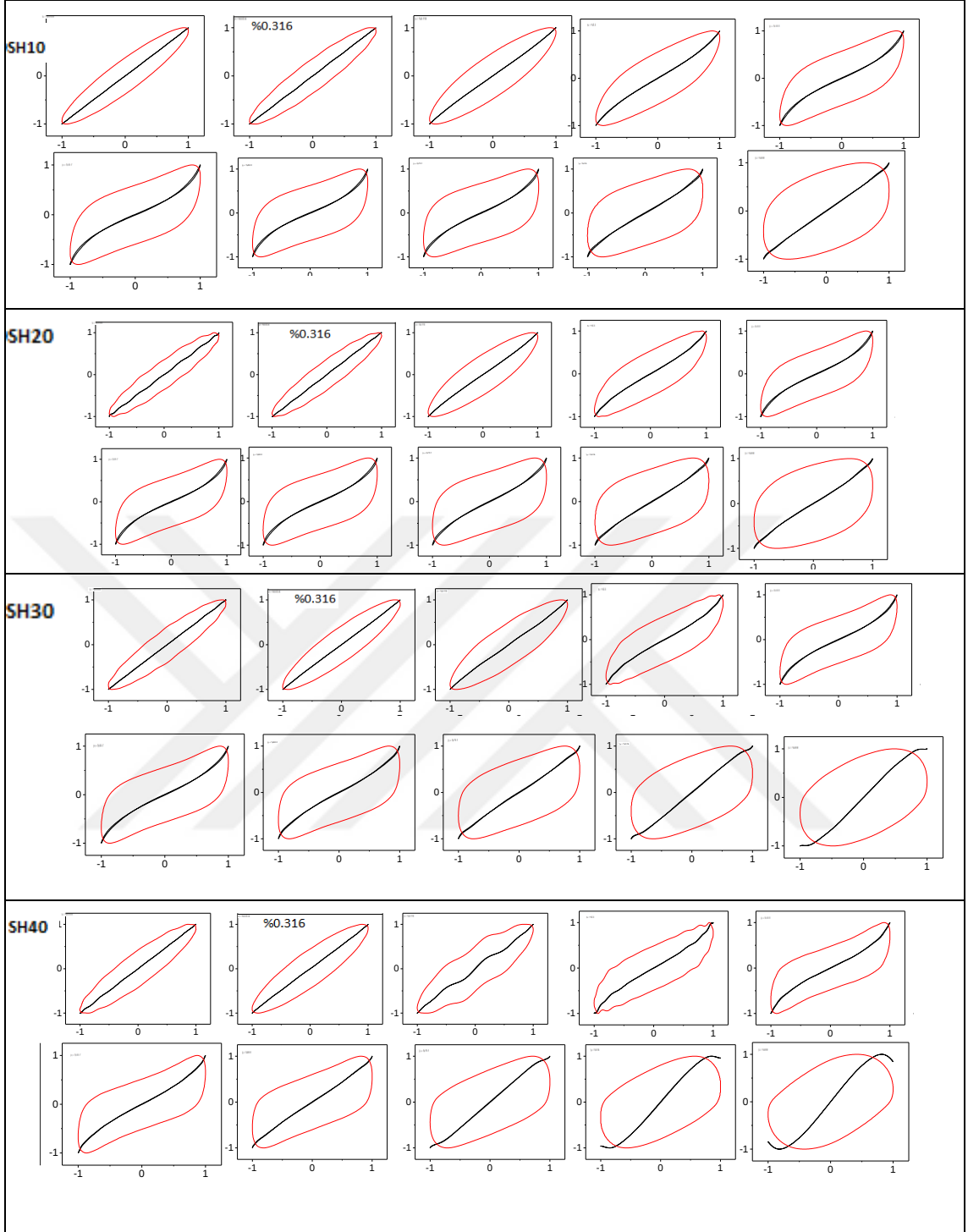
Şekil A.16 1. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



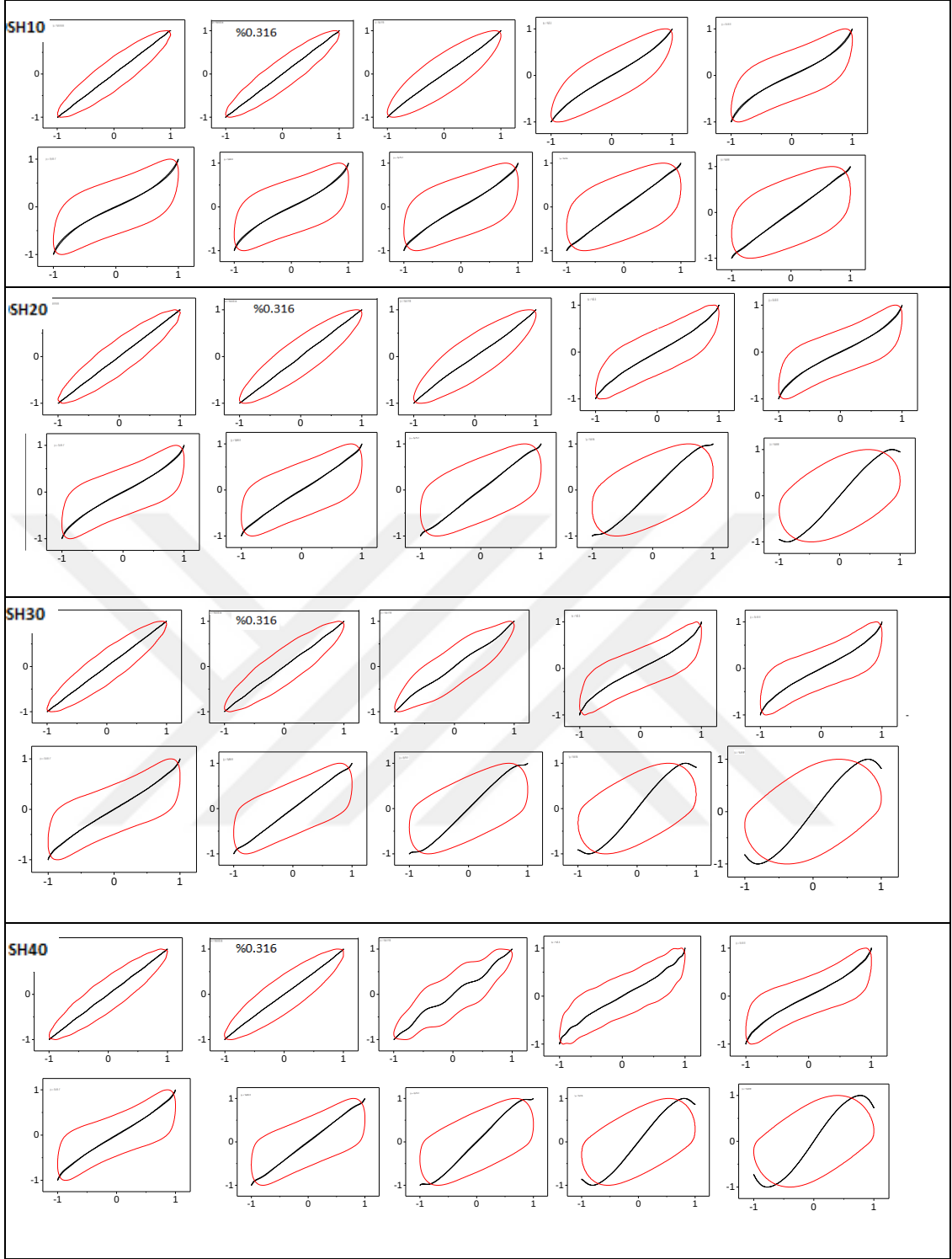
Şekil A.17 2. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksen normalizasyon hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksen normalizasyon toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksen ise normalizasyon geriliminin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerilim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerilim noktalarına aittir)



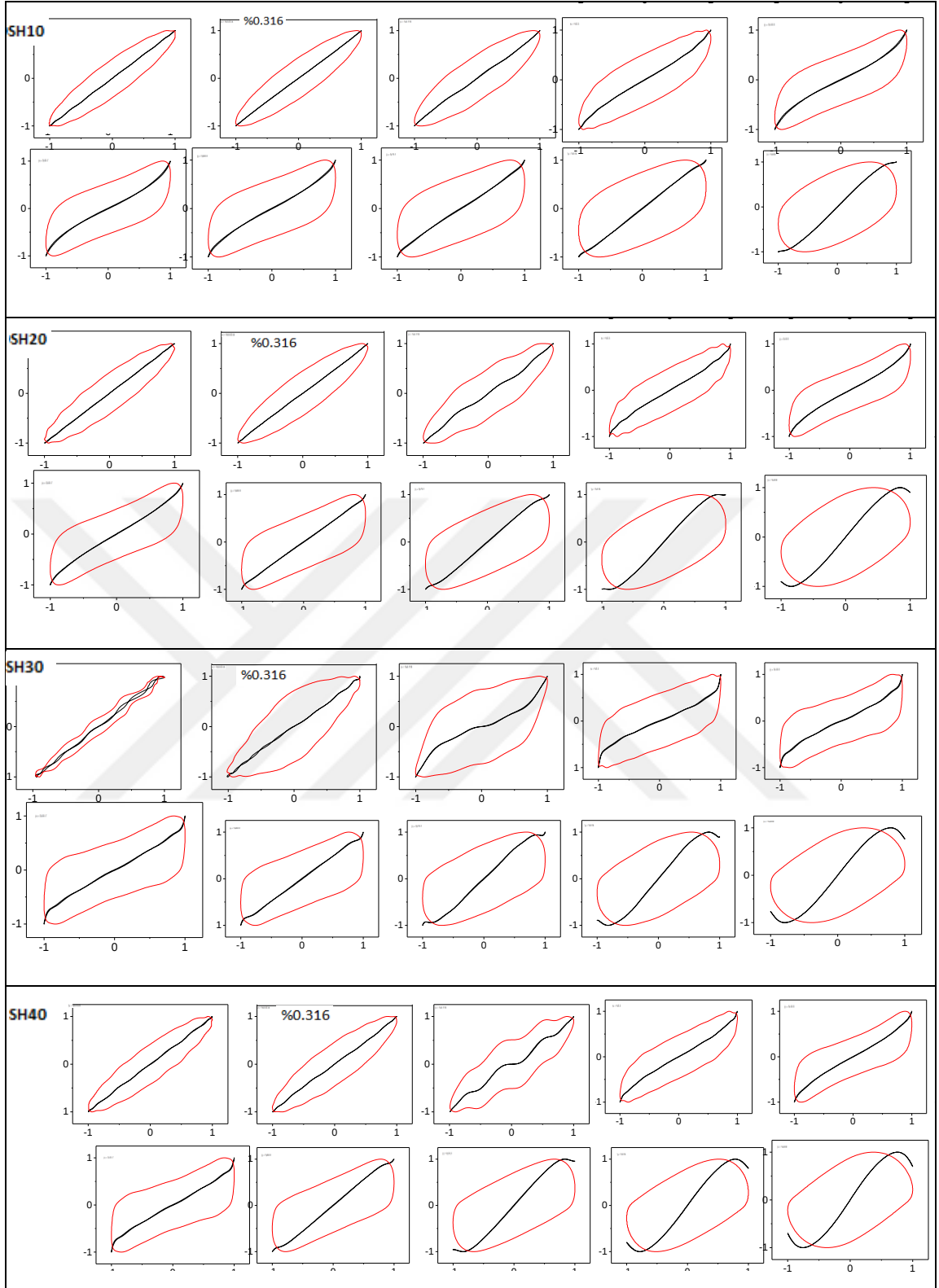
Şekil A.18 3. Saatte OSH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



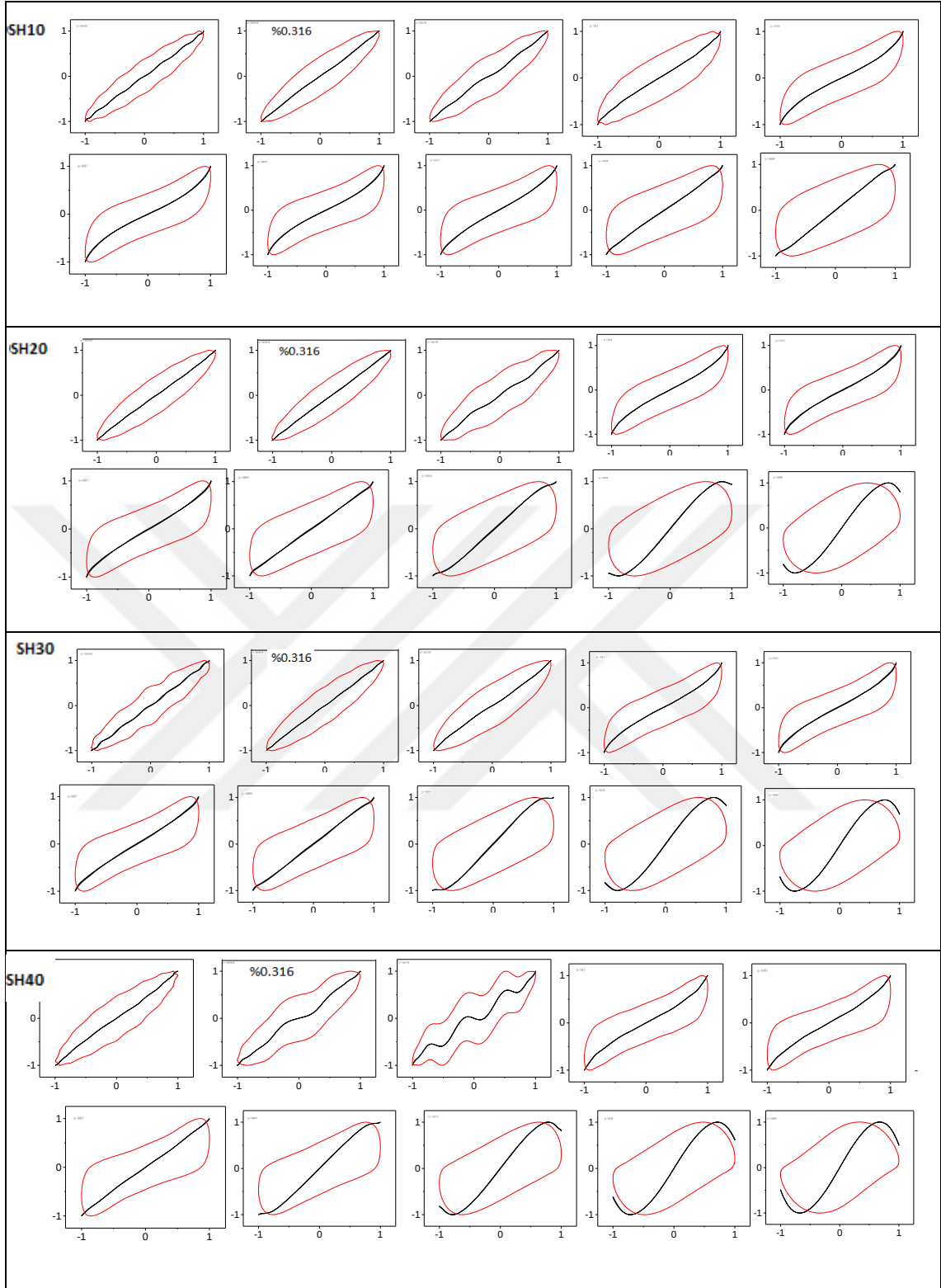
Şekil A.19 0. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



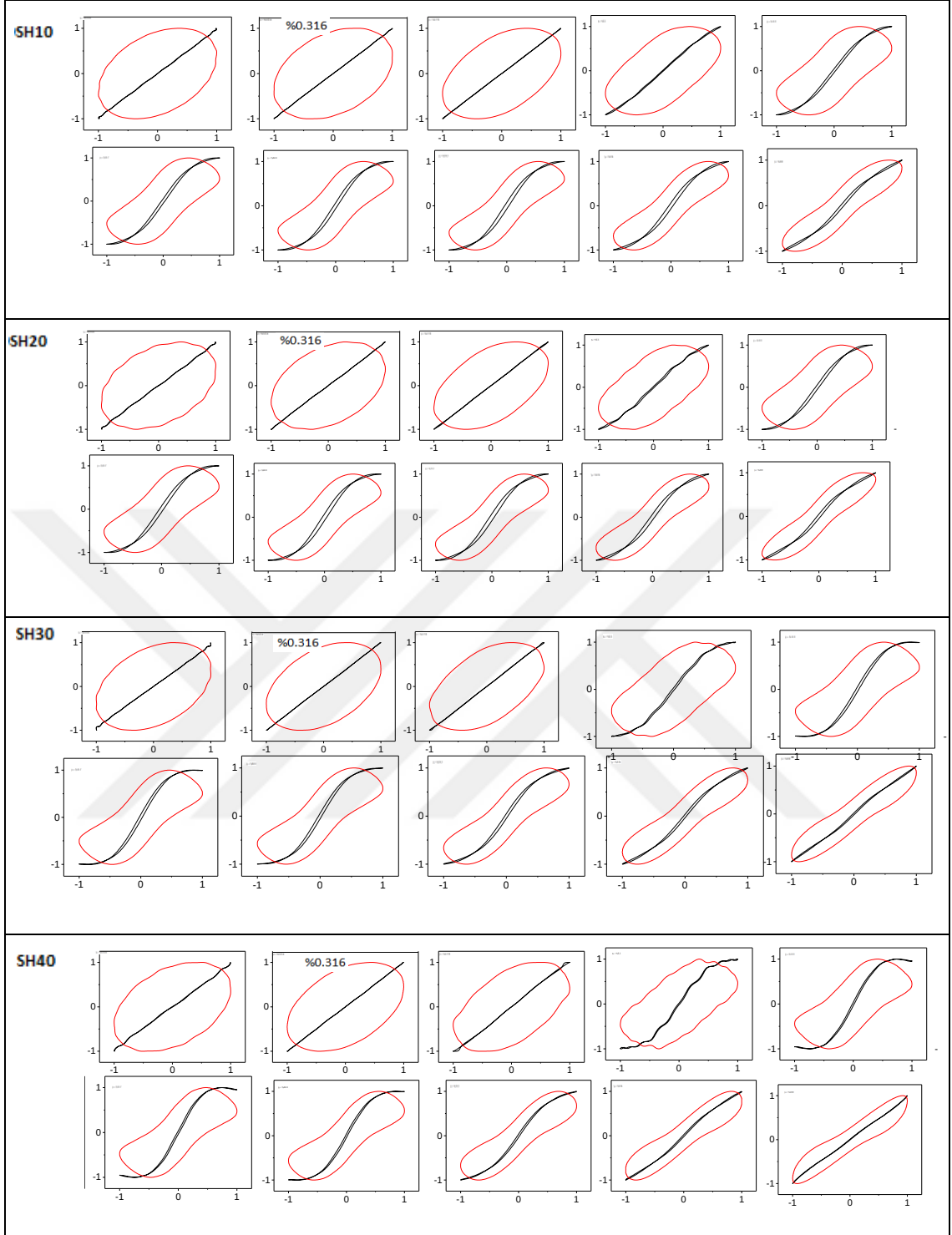
Şekil A.20 1. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksen normalizasyon gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksen normalizasyon toplam gerinimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksen ise normalizasyon gerinimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



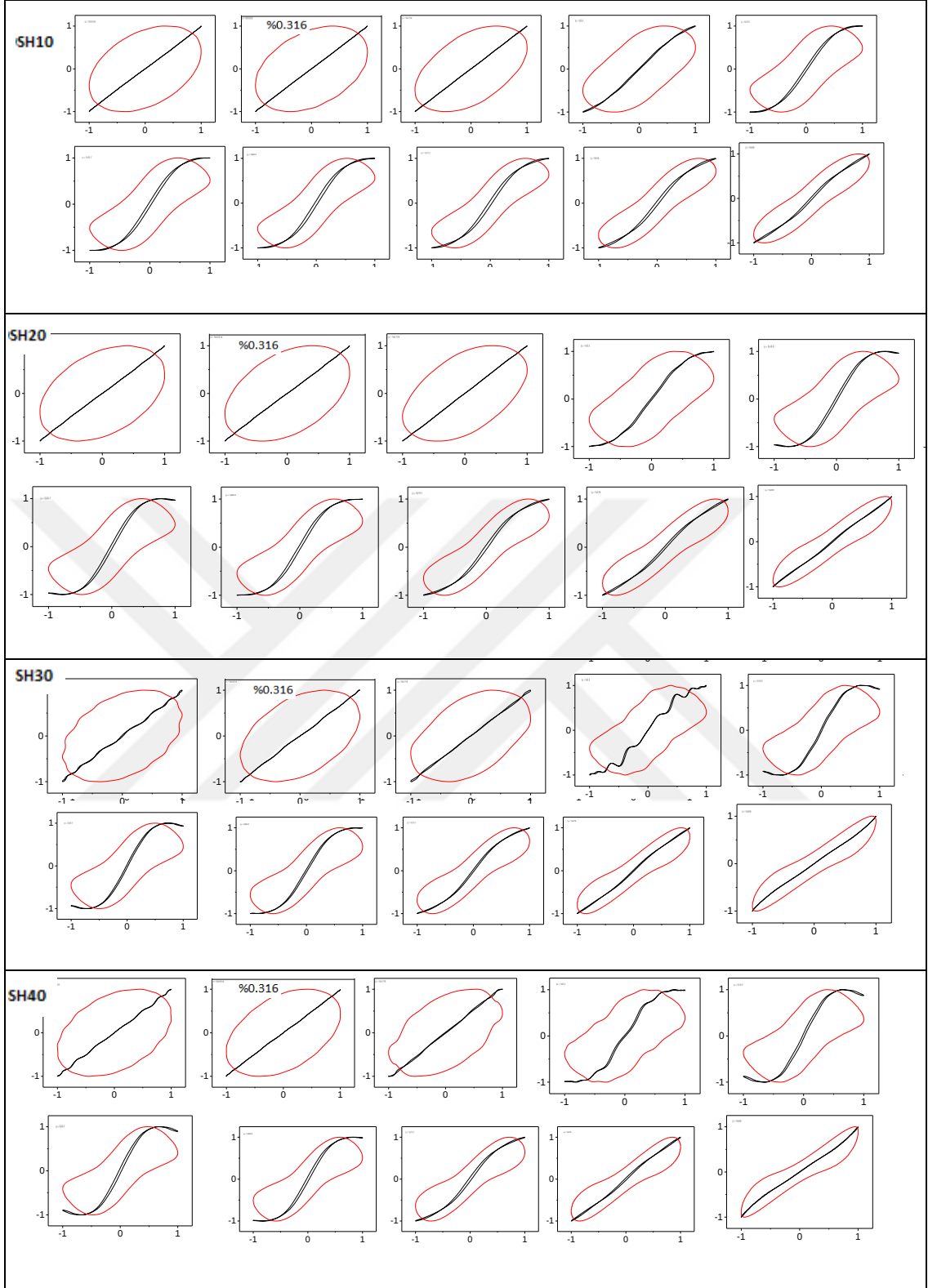
Şekil A.21 2. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerinim; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerinimin elastik bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



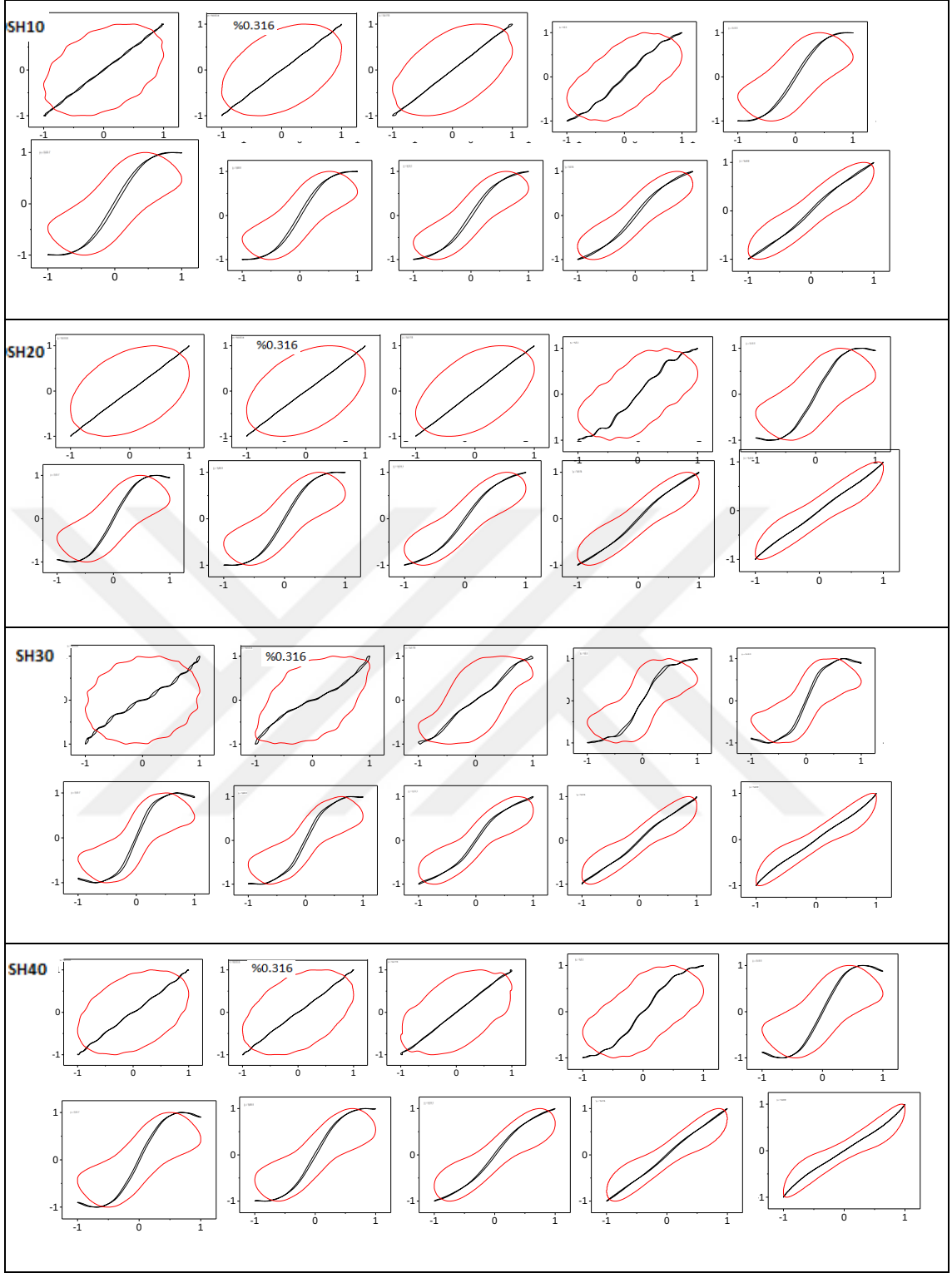
Şekil A.22 3. Saatte SH örneklerinin elastik Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim, kırmızı ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi ; siyah ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



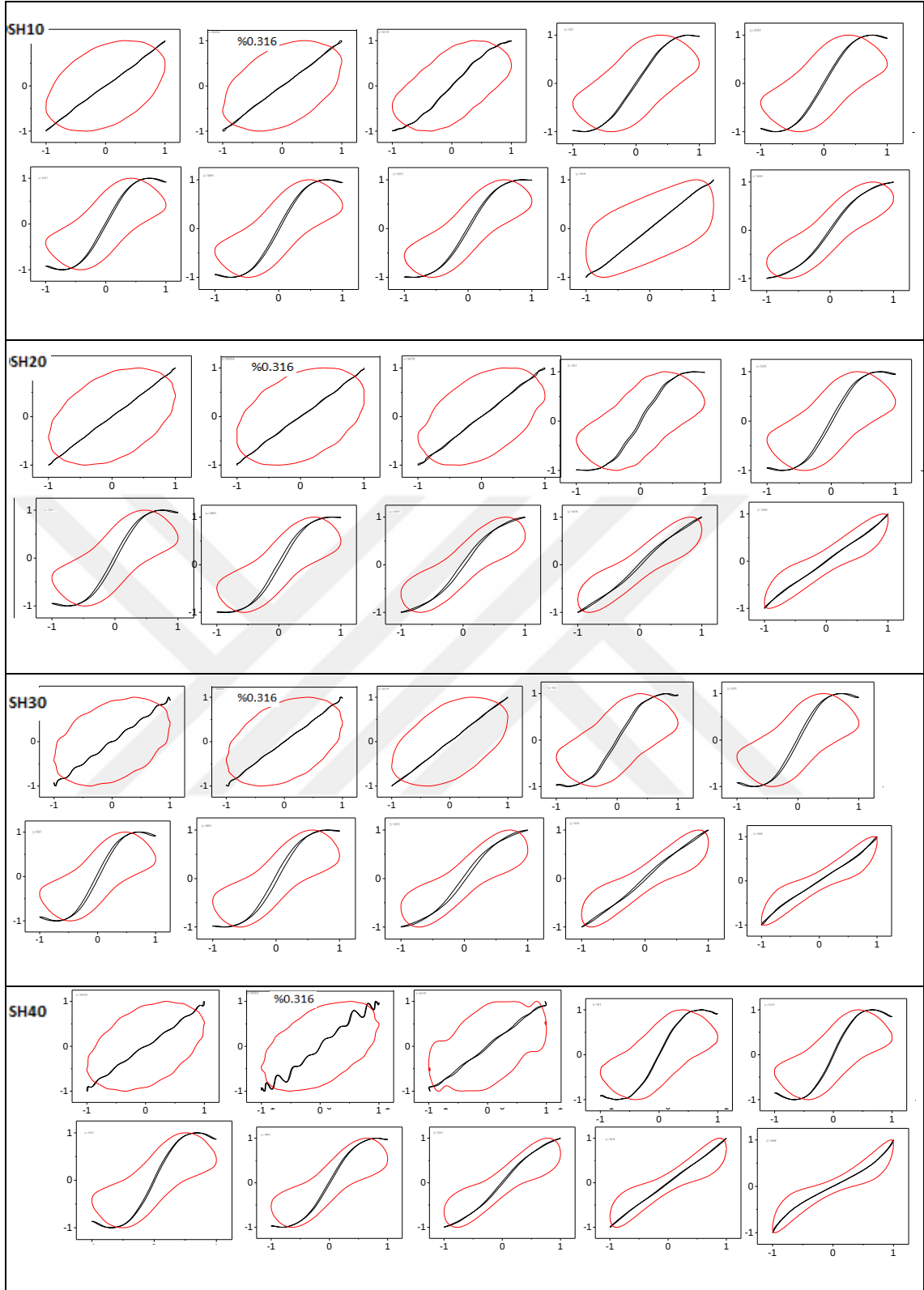
Şekil A.23 0. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



Şekil A.24 1. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerilim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerilim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerilim noktalarına aittir)



Şekil A.25 2. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenine normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenine normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenine ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)



Şekil A.26 3. Saatte SH örneklerinin viskoz Lissajous eğrileri (x eksenini normalize gerinim hızı, dış halkalar ile gösterilen y1 eksenini normalize toplam gerilimi; iç eğriler ile gösterilen y2 eksenini ise normalize gerilimin viskoz bileşenini göstermektedir, *üst sıra soldan sağa* sırasıyla, % 0.0126, % 0.316, % 0.795, % 5.2, % 19.9 gerinim noktalarını; *alt sıra soldan sağa* sırasıyla % 31.7, % 50.3, % 79.7, % 126, % 200 gerinim noktalarına aittir)

- [1] W. P. Hammes, M. J. Brandt, K. L. Francis, M. Rosenheim, F. H. Seitter and S. Vogelmann, "Microbial ecology of cereal fermentations," Trends in Food Science and Technology, vol. 16, pp. 4-11, 2005.
- [2] M. U. Joardder, C. Kumar, and M.A. Karim, "Food structure: Its formation and relationships with other properties," Crit Rev Food Sci Nutr., vol. 57, no. 6, pp.1190-1205, 2017.
- [3] S. Gunasekarana and M. M. Ak, "Dynamic oscillatory shear testing of food," Trends in Food Science & Technology, vol. 11, pp. 115-127, 2000.
- [4] J. A. Carmona, P. Ramírez, N. Calero, and J. Muñoz, "Large amplitude oscillatory shear of xanthan gum solutions," Effect of sodium chloride (NaCl) concentration, J. Food Eng, vol. 126, pp. 165–172, 2014.
- [5] K. Hyun, M. Wilhelm, C. O. Klein, K. S., Cho, J.G. Nam, K. H. Ahn, S. J. Lee, R. H. Ewoldt, and G. H. McKinley, "A review of nonlinear oscillatory shear tests: analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS)," Progress in Polymer Science, vol. 36, pp. 1697-1753, 2011.
- [6] J. Ahmed, P. Ptaszek, and S. Basu, "Advances in Food Rheology and Its Applications", Cambridge, UK, Woodhead Publishing, pp. 528, 2016.
- [7] H. S. Melito, C. R. Daubert, and E. A. Foegeding, "Validation of a large amplitude oscillatory shear protocol," Journal of Food Engineering, 113(1), 124-135, 2012.
- [8] L. Day and M. Golding, "Food Structure, Rheology, and Texture. Reference Module in Food Science," pp. 1-5, 2016.
- [9] G. T. Munizaga and G. V. Barbosa-Cánovas, "Rheology for the food industry", Journal of Food Engineering, vol. 67, pp. 147-156, 2005.
- [10] S. Precha-Atsawanan, D. Dudsadee Uttapap, and L. M. C. Sagis, "Linear and nonlinear rheological behavior of native and debranched waxy rice starch gels," Food Hydrocolloids, vol. 85, pp. 1-9, 2018.
- [11] M. Anvari and H. S. Joyner (Melito), "Effect of fish gelatin and gum arabic interactions on concentrated emulsion large amplitude oscillatory shear behavior and tribological properties," Food Hydrocolloids, vol. 79, pp. 518-525, 2018.
- [12] R. H. Ewoldt and N. A. Bharadwaj, "Low-dimensional intrinsic material functions for nonlinear viscoelasticity," Rheologica Acta, vol. 52, pp. 201-219, 2013.
- [13] R. H. Ewoldt, A. E. Hosoi, and G. H. McKinley, "New measures for characterizing nonlinear viscoelasticity in large amplitude oscillatory shear", Journal of Rheology, vol. 52, pp. 1427-1458, 2008.

- [14] Q. Liu, H. Bao, C. Xi, and H. Miao, "Rheological characterization of tuna myofibrillar protein in linear and nonlinear viscoelastic regions," *Journal of Food Engineering*, vol. 121, pp. 58-63, 2014.
- [15] K. Tong, G. Xiao, W. Cheng, J. Chen, and P. Sun, "Large amplitude oscillatory shear behavior and gelation procedure of high and low acyl gellan gum in aqueous solution", *Carbohydrate polymers*, vol. 199, pp. 397-405, 2018.
- [16] C. Bi, D. Li, L. J. Wang, Y. Wang, and B. Adhikari, "Characterization of non-linear rheological behavior of SPI-FG dispersions using LAOS tests and FT rheology," *Carbohydrate polymers*, vol. 92, pp. 1151-8, 2013.
- [17] C. Klein, H. W. Spiess, A. Calin, C. Balan, and M. Wilhelm, "Separation of the non-linear oscillatory shear response, into a superposition of linear, strain hardening, strain softening and wallslip response," *Macromolecules*, vol. 40, pp. 4250-4259, 2007.
- [18] H. S. Melito, C. R. Daubert, and E. A. Foegeding, "Relationships between nonlinear viscoelastic behavior and rheological, sensory and oral processing behavior of commercial cheese", *Journal of Texture Studies*, vol. 44, pp. 253-288, 2013.
- [19] O. C. Duvarci, G. Yazar, and J. L. Kokini, "The comparison of LAOS behavior of structured food materials (suspensions, emulsions and elastic networks)," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 60, pp. 2-11, 2017.
- [20] H. S. Joyner, and A. Meldrum, "Rheological study of different mashed potato preparations using large amplitude oscillatory shear and confocal microscopy," *Journal of Food Engineering*, vol. 169, 2016.
- [21] K. Van der Vaart, F. Depypere, V. D. Graef, P. Schall, A. Fall, D. Bonn, D., and K. Dewettinck, "Dark chocolate's compositional effects revealed by oscillatory rheology" *European Food Research and Technology*, vol. 236, no. 6, pp. 931-942, 2013.
- [22] T. S. K. Ng, G. H. McKinley, and R. H. Ewoldt, R. H, "Large amplitude oscillatory shear flow of gluten dough: a model power-law gel", *Journal of Rheology*, vol. 55, no. 3, 627-654, 2011.
- [23] A. Fuongfuchat, N. Seetapan, T. Makmoon, W. Pongjaruwat, P. Methacanon, and C. Gamonpilas, C. "Linear and non-linear viscoelastic behaviors of crosslinked tapioca starch/polysaccharide systems," *Journal of Food Engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 571-578, 2012.
- [24] J. A. Menjivar, "Fundamental aspects of dough rheology"., Chap. 1. In: Faridi, H., Faubion, J.M. (Eds.), *Dough Rheology and Baked Product Texture*. AVI Publishing, New York.
- [25] N. Phan-Thien, M. Newberry, and R. I. Tanner, "Non-linear oscillatory flow of a soft solid-like viscoelastic material," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 92, pp. 67-80, 2000.

- [26] G. Yazar, O. Duvarci, S. Tavman, and J. L. Kokini, "Non-linear Rheological Properties of Soft Wheat Flour Dough at Different Stages of Farinograph Mixing", *Appl. Rheol.*, vol. 26, pp. 1-11, 2016.
- [27] G. Yazar, O. Duvarci, S. Tavman, and J. L. Kokini, "Non-linear rheological behavior of gluten-free flour doughs and correlations of LAOS parameters with gluten-free bread properties," *Journal of Cereal Science*, vol. 74, pp. 28-36, 2017.
- [28] H. S. Melito, C. R. Daubert, and E. A. Foegeding, "Relating Large Amplitude Oscillatory Shear and Food Behavior: Correlation of Nonlinear Viscoelastic, Rheological, Sensory and Oral Processing Behavior of Whey Protein Isolate/K-Carrageenan Gels," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 521-534, 2013.
- [29] E. Ozyiğit, "Farklı bileşimlerdeki glutensiz kek hamurlarının LAOS yöntemiyle reolojik karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, 2016.
- [30] G. Yazar, "Glutensiz Yeni ürünlerin Geliştirilmesi için Hamur Reolojisinin Doğrusal Olmayan Yöntemlerle İncelenmesi", Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, 2016.
- [31] C. I. Clarke, T. J. Schober, and E. K. Arendt, "Effect of single strain and traditional mixed strain starter cultures on rheological properties of wheat dough and on bread quality," *Cereal Chemistry*, vol. 79, pp. 640-647, 2002.
- [32] C. I. Clarke, T. J. Schober, P. Dockery, K. O'Sullivan, and E. K. Arendt, "Wheat Sourdough Fermentation: Effects of Time and Acidification on Fundamental Rheological Properties," *Cereal Chemistry Journal*, vol. 81, no. 3, pp. 409-417, 2004.
- [33] D. K. Komlenić, Z. Ugarčić-Hardi, M. Jukić, M. Planinić, A. Bucić-Kojić, and I. Strelec, "Wheat dough rheology and bread quality effected by *Lactobacillus brevis* preferment, dry sourdough and lactic acid addition," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 45, pp. 1417-1425, 2010.
- [34] I. Banu and I. Aprodu, "Studies concerning the use of *Lactobacillus helveticus* and *Kluyveromyces marxianus* for rye sourdough fermentation," *European Food Research and Technology*, vol. 234, no. 5, 769–777, 2012.
- [35] T. Nantawan and S. Jitrakbumrung, "Effect of addition of sourdough on physicochemical characteristics of wheat and rice flour bread," *Kasetsart Journal - Natural Science*, vol. 48, pp. 964-969, 2014.
- [36] K. Wehrle and E. K. Arendt, "Rheological changes in wheat sourdough during controlled and spontaneous fermentation," *Cereal Chemistry*, vol. 75, pp. 882-886, 1998.
- [37] P. Catzeddu, *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*, Cambridge: Academic Press, 2011.
- [38] P. Sandvik, I. Kihlberg, A. K. Lindroos, I. Marklinder, and M. Nydahl, "Bread consumption patterns in a Swedish national dietary survey focusing

- particularly on whole-grain and rye bread,” *Food & Nutrition Research*, vol. 58, no.1, pp. 24024, 2014.
- [39] N. S. Terefe, “Emerging Trends and Opportunities in Food Fermentation. Reference Module in Food Science,” 2016.
 - [40] K. Poutanen, L. Flander, and K. Katina, “Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective,” *Food Microbiology*, vol. 26, no. 7, pp 693-699, 2009.
 - [41] H. N. Salim-ur-Rehman, H. Nawaz, S. Hussain, M.M. Ahmad, M.A. Murtaza, and M.S. Ahmad, “Effect of sourdough bacteria on the quality and shelf life of bread,” *Pak. J. Nutr.*, vol. 6, pp. 562-565, 2007.
 - [42] K. Katina, R. Heiniö, K. Autio, and K. Poutanen, “Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread,” *LWT-Food Science and Technology*, vol. 39, no. 10, 2006.
 - [43] M. Hayta and M. Hendek Ertop, “Optimization of sourdough bread incorporation into wheat bread by response surface methodology: bioactive and nutritional properties,” *Int J Food Sci Technol*, 2017.
 - [44] A. Sadeghi, “The Secrets of Sourdough; A Review of Miraculous Potentials of Sourdough in Bread Shelf Life,” *Biotechnology*, vol. 7, pp. 413-417, 2008.
 - [45] L. De Vuyst, S. Van Kerrebroeck, H. Harth, G. Huys, H. M. Daniel, and S. Weckx, “Microbial ecology of sourdough fermentations: Diverse or uniform?,” *Food Microbiology*, vol. 37, pp. 11-29, 2014.
 - [46] A. Casado, A. Alvaraez, L. Gonzalez, D. Fernandez, J. L. Marcos, and M. E. Tornadijo, “Effect of fermentation on microbiological, physicochemical and physical characteristics of sourdough and impact of its use on bread quality,” *Czech Journal of Food Science*, vol. 35, no. 6, pp. 496-506, 2017.
 - [47] M. Saeed, I. Yasmin, M. I. Khan, M. Pasha, M. R. Khan, A. Shabbir, and W. A. Khan, “Lactic acid bacteria in sourdough fermentation; a safe approach for food preservation,” *Pakistan Journal of Food Sciences*, vol. 24, no. 4, pp. 211-217, 2014.
 - [48] D. Gocmen, O. Gurbuz, A. Yildirim Kumrali, A. F. Dagdelen, and İ. Sahin, “The effects of wheat sourdough on glutenin patterns, dough rheology and bread properties,” *European Food Research and Technology*, no. 225, pp. 821-830, 2017.
 - [49] W. P. Hammes, P. Stolz, and M. G. Gänzle, “Metabolism of lactobacilli in traditional sourdoughs,” *Advances in Food Science*, vol. 18, pp. 176-84, 1996.
 - [50] K. Wehrle, H. Grau, and Arendt, “Effects of Lactic Acid, Acetic Acid, and Table Salt on Fundamental Rheological Properties of Wheat Dough,” *Cereal Chem.*, vol. 74, no. 6, pp. 739-744, 1997.
 - [51] P. Decock, and C. Cappelle, “Bread technology and sourdough technology,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 16, pp. 11-20, 2005.

- [52] F. B. Siepmann, V. Ripari, N. Waszczynskyj, and M. R. Spier, "Overview of Sourdough Technology: from Production to Marketing," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 11, no. 2, 242-270, 2017.
- [53] D. Gocmen, "Ekşi Hamur ve Laktik Starter Kullanımının Ekmekte Aroma Oluşumu Üzerine Etkileri," *Gıda*, vol. 26, no. 1., pp. 13-16, 2001.
- [54] R. S. Chavan, and S. R. Chavan, "Sourdough Technology-A Traditional Way for Wholesome Foods: A Review," *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 10, pp. 170-183, 2011.
- [55] R. C. Hoseney, "Principles of cereal science and technology," (2nd ed.). Inc St. Paul Minnesota. USA: American Association of Cereal Chemists, p. 280, 1994.
- [56] S. Paramithiotis, S. Gioulatos, E. Tsakalidou, and G. Kalantzopoulos, "Interactions between *Saccharomyces cerevisiae* and lactic acid bacteria in sourdough," *Process Biochemistry*, vol. 41, pp. 2429, 2006.
- [57] C. Thiele, M. G. Gänzle, and R. F. Vogel, "Contribution of sourdough lactobacilli, yeast and cereal enzymes to the generation amino acids in dough relevant for bread flavour," *Cereal Chemistry*, vol. 79, pp. 45-51, 2002.
- [58] J. E. Christensen, E. G. Dudley, J. A. Pederson, and J. L. Steele, "Peptidases and amino acid catabolism in lactic acid bacteria," *Antonie Van Leeuwenhoek*, vol. 76, pp. 217-246, 1999.
- [59] A. G. Tafti, S. H. Peighardoust, F. Behnam, F., A. Bahrami, R. Aghagholizadeh, M. Ghamari, and S. A. Rafat, "Effects of spray-dried sourdough on flour characteristics and rheological properties of dough," *Czech Journal of Food Sciences*, vol. 31, pp. 361-367, 2013.
- [60] C. L. Gerez, G. C. Rollan, and G. F. Valdez, "Gluten breakdown by lactobacilli and pediococci strains isolated from sourdough," *Letters in Applied Microbiology*, vol. 42, no. 5, pp. 459-464, 2006.
- [61] M. Gobbetti, A. Corsetti, and J. Rossi, "The sourdough microflora. Interactions between lactic acid bacteria and yeasts: metabolism of carbohydrates," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 41, pp. 456-460, 1994.
- [62] M. Gobbetti, M. Simonetti, J. Rossi, L. Cossignani, A. Corsetti, A., and P. Damani, "Free D- and L-Amino Acid Evolution During Sourdough Fermentation and Baking," *Journal of Food Science*, vol. 59, pp. 881-884, 2006.
- [63] M. Hendek Ertop. "Ekşi hamur formül optimizasyonun ekmeğin aromatik profili, biyoaktif nitelikleri ve raf ömrü üzerine etkileri" Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. 2014
- [64] C. Pétel, B. Onno, and C. Prost, "Sourdough volatile compounds and their contribution to bread: A review," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 59, pp. 105-123, 2017.

- [65] E. Torrieri, O. Pepe, V. Ventorino, P. Masi, and S. Cavella, "Effect of sourdough at different concentrations on quality and shelf life of bread," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 56, no. 2, 2014.
- [66] E. K. Arendt, L. A. M. Liam, and F. D. Bello, "Impact of sourdough on the texture of Bread," *Food Microbiology*, vol. 24, pp. 165-174, 2007.
- [67] H. Mirsaeedghazi, Z. Enam-Djomeh, and S. M. A. Mousavi, "Rheometric measurement of dough rheological characteristics and factors affecting it," *International Journal of Agriculture and Biology*, vol. 10, pp. 112-119, 2008.
- [68] M. R. Amjid, A. Shehzad, H. Shahzad, M. A. Shabbir, M. R. Khan, M. Shoaib, "A comprehensive review on wheat flour dough," *Pakistan Journal of Food Sciences*, vol. 23, no. 2, pp. 105-123, 2013.
- [69] M. Sluková, J. Levková, A. Michalcova, S. Horackova, and P. Skřivan, "Effect of the dough mixing process on the quality of wheat and buckwheat proteins," *Czech J. Food Sci.*, vol. 35, pp. 522-531, 2017.
- [70] H. Wieser, "Chemistry of gluten proteins," *Food Microbiology*, vol. 24, no. 2, pp. 115-119, 2007.
- [71] S. Ünal, ve H. Boyacioğlu, "Hamurun Reolojik Özellikleri," *Gıda Dergisi*, vol. 1: pp. 13-20, 1984.
- [72] P. R. Shewry and M. G. Halford, "Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilisation," *J Exp Bot.*, vol. 53, pp. 947-58, 2002.
- [73] J. Lefebvre, "An outline of the non-linear viscoelastic behaviour of wheat flour dough in shear," *Rheologica Acta*, vol. 45, no. 4, pp. 525-538, 2006.
- [74] T. Wu, C. Taylor, T. Nebl, K. Ng, L. E. Bennett, "Effects of flour composition and baking on in vitro digestibility of proteins in breads made from selected gluten-containing and gluten-free flours," *Food Chemistry*, vol. 233, pp. 514-524, 2017.
- [75] T. Georgopoulos, H. Larsson, H., and A. C. Eliasson, "A comparison of the rheological properties of wheat flour dough and its gluten prepared by ultracentrifugation," *Food Hydrocolloids*, vol. 18, no. 1, 143-151, 2004.
- [76] K. S. Aplevicz, J. Z. Mazo, K. Kramer dos Santos Neto, F. S. Nalevaikoand, and E. S. Sant'Anna, "Evaluation of sourdoughs for the production of bread using spontaneous fermentation technique," *Acta Scientiarum*, vol. 36, no. 4, pp. 713-719, 2013.
- [77] T. G. Mezger, *Applied Rheology*, Antoon Paar. 1st Edition, 8054 Graz, Austria, pp. 191, 2015.
- [78] J. E. Bae, M. Lee, K. S. Cho, K. H. Seo, and D. G. Kang, "Comparison of stress-controlled and strain-controlled rheometers for large amplitude oscillatory shear," *Rheologica Acta*, vol. 52, no. 10-12, pp. 841-857, 2013.

- [79] K. S. Cho, K. Hyun, K. H. Ahn, and S. J. Lee, "A geometrical interpretation of large amplitude oscillatory shear response," *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 3, pp. 747-758, 2005.
- [80] S. Khandavalli, and J. P. Rothstein, "Large amplitude oscillatory shear rheology of three different shear-thickening particle dispersions," *Rheologica Acta*, vol. 54, no. 7, pp. 601-618, 2015.
- [81] P. Ptaszek, "Large Amplitude Oscillatory Shear (LAOS) measurement and fourier-transform rheology: application to food, ed. *Advances in Food, Rheology and Its Applications*, Elsevier, pp. 87-123, 2017.
- [82] H. Dogan, ve J. Kokini, "Rheological Properties of Foods", Second Edition: pp. 1- 124, 2006.
- [83] X. Fan, H. Xu, Q. Zhang, D. Xiao, Y. Song, and Q. Zheng, "Insight into the weak strain overshoot of carbon black filled natural rubber," *Polymer*, vol. 167, pp. 109-117, 2019.
- [84] Y. Kim, W. Huang, H. Zhu, and P. Rayasduarte, "Spontaneous sourdough processing of Chinese Northern-style steamed breads and their volatile compounds," *Food Chemistry*, vol. 114, no. 2, pp. 685-692, 2009.
- [85] A. K. Townsend, and H. J. Wilson, "Small- and large-amplitude oscillatory rheometry with bead-spring dumbbells in Stokesian Dynamics to mimic viscoelasticity," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 261, pp. 136-152, 2018.
- [86] M. Wilhelm, "Fourier-Transform Rheology," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 287, no. 2, pp.83-105, 2002.
- [87] G. Yazar, O. C. Duvarci, S. Tavman, and J. L. Kokini, "Effect of mixing on LAOS properties of hard wheat flour dough," *Journal of Food Engineering*, vol. 190, pp. 195-204, 2016.
- [88] T. Gillece, R. McMullen, H. Fares, L. Senak, S. Ozkan, and L. Foltis, "Probing the textures of composite skin care formulations using large amplitude oscillatory shear," *Journal of cosmetic science*, vol. 67, pp. 121-159, 2016.
- [89] S. A. Rogers, "A sequence of physical processes determined and quantified in LAOS: An instantaneous local 2D/3D approach," *Journal of Rheology*, vol. 56, no. 5, pp. 1129-1151, 2012.
- [90] P. Ptaszek, "A geometrical interpretation of large amplitude oscillatory shear (LAOS) in application to fresh food foams," *Journal of Food Engineering*, vol. 146, pp. 53-61, 2015.
- [91] R. H. Ewoldt, A. E. Hosoi, and G. H. McKinley, "New measures for characterizing nonlinear viscoelasticity in large amplitude oscillatory shear," *Journal of Rheology*, vol. 52, no. 6, pp. 1427-1458, 2008.
- [92] E. Dertli, E. Mercan, M. Arıcı, M. T. Yılmaz, and O. Sagdıç, "Characterisation of lactic acid bacteria from Turkish sourdough and determination of their exopolysaccharide (EPS) production characteristics," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 71, pp. 116-124, 2016.

- [93] E. Dertli, E., I. J. Colquhoun, G. L. Côté, G. Le Gall, and A. Narbad, "Structural analysis of the β -D-glucan produced by the sourdough isolate *Lactobacillus brevis* E25," Food Chemistry, vol. 242, pp. 45-52, 2018.
- [94] B. S. Cemeroglu, Gıda Analizleri, 3. Baskı, Ankara, Bizim Grup Basımevi, 2013.
- [95] ICC (1992). ICC Standard No. 114/1. Method for using the Brabender Extensograph.
- [96] K. Wehrle, N. Crowe, I. Van Boeijen, and E. K. Arendt, "Screening methods for the proteolytic breakdown of gluten by lactic acid bacteria and enzyme preparations," European Food Research and Technology, vol. 209, no. 6, pp. 428-433, 1999.
- [97] Y. Liao, R. A. Miller, and R. C. Hosney, "Role of hydrogen peroxide produced by baker's yeast on dough rheology," Cereal Chem., vol. 75, pp. 612-6, 1998.
- [98] B. Meignen, B. Onno, P. Gelinas, M. Infantes, S. Guilos, and B. Cahagnier, "Optimisation of sourdough fermentation with *Lactobacillus brevis* and baker's yeast," Food Microbiology, vol. 18, pp. 239-245, 2001.
- [99] M. Anastasio, O. Pepe, T. Cirillo, S. Palomba, G. Blaiotta, G., & F. Villani, "Selection and use of phytate-degrading LAB to improve cereal-based products by mineral solubilization during dough fermentation," Journal of Food Science, vol. 75, pp. 28-35, 2010.
- [100] AACC (2010), Approved methods of analysis (11th ed.). St. Paul, MN, U.S.A: AACC International, 2010.
- [101] I. Mantzourani, S. Plessas, M. Odatzidou, A. Alexopoulos, A. Galanis, E. Bezirtzoglou, and B. Argyro, "Effect of a novel *Lactobacillus paracasei* starter on sourdough bread quality," Food Chemistry, vol. 271, pp. 259-265, 2019.
- [102] S. Y. Ding, and J. Yang, "The influence of emulsifiers on the rheological properties of wheat flour dough and quality of fried instant noodles," LWT-Food Science and Technology, vol. 53, pp. 61-69, 2013.
- [103] M. Arici, G. Ozulku, R. M. Yildirim, O. Sagdic, and M. Z. Durak, "Biodiversity and technological properties of yeasts from Turkish sourdough", Food Science and Biotechnology, vol. 27, no. 2, pp. 499-508.
- [104] A. Angioloni, S. Romani, G. G. Pinnavaia, and M. L. Rosa, "Characteristics of bread making doughs: influence of sourdough fermentation on the fundamental rheological properties," Eur Food Res Technol, vol. 222, no. 1, 54-57, 2006.
- [105] J. Bakker, P. Bridle, and C. F. Timberlake, "Tristimulus measurements (CIE-LAB 76) of port wine colour, Vitis, vol. 25, pp 67-78 ,1986.
- [106] AACC, "Approved Method of the AACC," 10th ed. American Association of Cereal Chemists St Paul, MN, 2000.

- [107] M. R. Yildirim and M. Arici, "Effect of the fermentation temperature on the degradation of phytic acid in whole-wheat sourdough bread," *LWT*, 2019.
- [108] S. Palomba, G. Blaiotta, V. Ventorino, A. Saccone, and O. Pepe, "Microbial characterization of sourdough for sweet baked products in the Campania region (southern Italy) by a polyphasic approach," *Annals of Microbiology*, vol. 61, no. 2, pp.307-314, 2010.
- [109] F. Minervini, M. De Angelis, R. Di Cagno, D. Pinto, S. Siragusa, C. G. Rizzello, and M. Gobbetti, "Robustness of *Lactobacillus plantarum* starters during daily propagation of wheat flour sourdough type I," *Food Microbiology*, vol. 27, no. 7, 2010.
- [110] M. G. Gänzle, "Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation," *Food Microbiology*, vol. 37, pp. 2-10, 2014.
- [111] A. S. Hansen, and P. Schieberle, "Generation of aroma compounds during sourdough fermentation: applied and fundamental aspects," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 16, no. 1-3, pp. 85-94, 2005.
- [112] H. Dizlek, "Gluten proteinlerinin hamur ve ekmek nitelikleri üzerine etkileri," *Dünya Gıda Dergisi*, vol. 8, pp. 80-86, 2012.
- [113] R. Di Cagno, M. De Angelis, S. Auricchio, L. Greco, C. Clarke, M. De Vincenzi, C. Giovannini, M. D'Archivio, F. Landolfo, G. Parrilli, F. Minervini, E. Arendt, and M. Gobbetti, "Sourdough bread made from wheat and nontoxic flours and started with selected lactobacilli is tolerated in celiac sprue patients," *Appl. Environ.Microbiol*, vol. 70, pp.1088-1096, 2004.
- [114] C. Collar, C. Benedito de Barber, and M. A. Martinez-Anaya, "Microbial sourdough influence acidification properties and bread making potential of wheat dough," *Journal of Food Science*, vol. 59, pp. 629-33, 1994.
- [115] A. Corsetti, M. Gobbetti, B. De Marco, F. Balestrieri, F. Paoletti, L. Russi, and J. Rossi, "Combined Effect of Sourdough Lactic Acid Bacteria and Additives on Bread Firmness and Staling," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 48, no. 7, 3044-3051, 2000.
- [116] F. Leenhardt, M. A. Levrat-Verny, E. Chanliaud, and C. Rémésy, "Moderate Decrease of pH by Sourdough Fermentation Is Sufficient To Reduce Phytate Content of Whole Wheat Flour through Endogenous Phytase Activity," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol., no. 1, pp.98–102, 2005.
- [117] G. Ozulku, and M. Arici, "Characterization of the rheological and technological properties of the frozen sourdough breas with chickpes flour addition," *Journal of Food Meauserement and Characterization*, vol. 11, pp. 1493-1500, 2017.
- [118] A. Ketabi, S. Soleimanian-Zad, M. Kadivar, and M. Sheikh-Zeinoddin, "Production of microbial exopolysaccharides in the sourdough and its effects on the rheological properties of dough. *Food Research International*," vol. 41, no.10, pp. 948-951, 2008.

- [119] K. Karaman, ve O. Sagdic, "Fitaz Aktif Bazı Laktik Asit Bakteri ve Maya İzolatlarının Tam Buğday Ekmeginde Hamur Reolojisi Üzerine Etkileri" *European Journal of Science and Technolog*, vol. 14, pp. 1-9, 2018.
- [120] A. Singh, S. Karmakar, B. S. Jacob, P. Bhattacharya, S. P. J. Kumar, and R. Banerjee, "Enzymatic polishing of cereal grains for improved nutrient retainment," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 6, pp. 3147-57, 2015.
- [121] J. Läger, and H. Stettin, "Differences between stress and strain control in the non linear behavior of complex fluids," *Rheological Acta*, vol. 49, pp. 909-930, 2010.
- [122] R. H. Ewoldt, P. Winter, J. Maxey, and G. H. McKinley, "Large amplitude oscillatory shear of pseudoplastic and elastoviscoplastic materials," *Rheologica Acta*, vol. 49, pp. 191-212, 2010.
- [123] R. H. Ewoldt, P. Winter, J. Maxey, and G. H. McKinley, "Rheological fingerprinting of complex fluids using large amplitude oscillatory shear (LAOS) flow," *The Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, vol. 15, pp. 3-8.
- [124] J. M. Faubion, and R. C. Hoseney, "The viscoelastic properties of wheat flour doughs," In: Faridi, H., Faubion, J.M. (Eds.), *Dough Rheology and Baked Product Texture*. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 29-67, 1990.
- [125] G. Rollan, M. De Angelis, M. Gobbetti, and G. F. de Valdez , "Proteolytic activity and reduction of gliadin-like fractions by sourdough lactobacilli," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 99, no. 6, pp. 1495-1502, 2005.
- [126] J. P. Guyot, M. Calderon, and J. Morlon-Guyot, "Effect of pH control on lactic acid fermentation of starch by *Lactobacillus manihotivorans* LMG 18010T," *J. Appl. Microbiol*, vol. 88, pp. 176-182, 2000.
- [127] F. Meuser, and T. H. Zense, "Investigation of the flow behaviour of sourdoughs in a continuously operating fermentation system," *Carbohydrate Polymers*, vol. 21, no. 2-3, pp. 179-181, 1993.
- [128] T. J. Schober, E. Angst, C. I. Clarke, and E. K. Arendt, "Use of response surface methodology to investigate the effects of processing conditions on sourdough wheat bread quality," *European Food Research and Technology*, vol. 217, no. 1, pp. 23-33, 2003.
- [129] N. Vermeulen, M. Pavlovic, M. A Ehrman, M. G. Gänzle, and R. F. Vogel, "Functional characterization of the proteolytic system of *Lactobacillus sanfranciscensis* DSM 20451T during growth in sourdough," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 71, no. 10, pp. 6260-6266, 2005.
- [130] M. G. Gänzle, J. Loonen, and M. Gobbetti. "Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved bread quality," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 19, pp. 513-52, 2008.
- [131] H. D. Belitz, and W. Grosch, *Food Chemistry*, 4th edn, Springer-Verlag, pp. 294-297, 2009.

- [132] S. Lee, G. E. Inglett, D. Palmquist and K. Warner, "Flavor and texture attributes of foods containing β -glucan-rich hydrocolloids from oats," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 350-357, 2009
- [133] M. M. Moore, F. D. Bello, and E. K. Arendt, "Sourdough fermented by *Lactobacillus plantarum* FST 1.7 improves the quality and shelf life of gluten-free bread," *European Food Research and Technology*, vol. 226, no. 6, pp. 1309-1316, 2007.
- [134] K. Takeda, Y. Matsumura, and M. Shimizu, "Emulsifying and surface properties of wheat gluten under acidic conditions," *Journal of Food Science*, vol. 66, pp. 393-399, 2001.
- [135] J. Min Kim, A. P. R. Eberle, A. Kate Gurnon, L. Porcar, and N. J. Wagner, "The microstructure and rheology of a model, thixotropic nanoparticle gel under steady shear and large amplitude oscillatory shear (LAOS)," *Journal of Rheology*, vol. 58, no. 5, pp. 1301-1328, 2014.
- [136] J. D. Park, K. H. Ahn, and S. Lee, "Structural change and dynamics of colloidal gels under oscillatory shear flow," *Soft Matter*, vol. 11, no. 48, pp. 9262-9272, 2015.
- [137] D. Weipert, "The Benefits of Basic Rheometry in Studying Dough Rheology," *Cereal Chemistry*, vol. 67, pp. 311-317, 1990.
- [138] M. Mejri, B. Roge, A. Bensouissi, F. Michels, and M. Mathlouthi, "Effects of some additives on wheat gluten solubility: a structural approach," *Food chemistry*, vol. 92, no. 1, 7-15, 2005.
- [139] N. A. Kurniawan, L. H. Wong, and R., Rajagopalan, "Early Stiffening and Softening of Collagen: Interplay of Deformation Mechanisms in Biopolymer Networks," *Biomacromolecules*, vol. 13, no. 3, 691-698, 2012.
- [140] W. Wang, W. Chen, H. Yang, and M. Cui, "Textural and rheological properties of potato starch as affected by amino acids," *International Journal of Food Properties*, vol. 20, no. 3, pp. 3123-3134, 2017.
- [141] G. Yazar, O. C. Duvarci, S. Tavman, and J. L. Kokini, "LAOS behavior of the two main gluten fractions: Gliadin and glutenin," *Journal of Cereal Science*, vol. 77, pp. 201-210, 2017.
- [142] F. Xu, H. Hu, Q. Liu, X. Dai, and H. Zhang, "Rheological and microstructural properties of wheat flour dough systems added with potato granules," *International Journal of Food Properties*, no. 1, pp. 1145-1157, 2017.
- [143] S. C. Alcázar-Alay, and M. A. A. Meireles, "Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources," *Food Science and Technology (Campinas)*, vol. 35, no. 2, pp. 215-236, 2015.
- [144] I. Grossmann, and P. Koehler, "Fractionation-reconstitution studies to determine the functional properties of rye flour constituents," *Journal of Cereal Science*, vol. 70, pp. 1-8, 2016.

- [145] S. H. Peighambardoust, A. J. van der Goot, R. J. Hamer, and R. M. Boom, "A New Method to Study Simple Shear Processing of Wheat Gluten-Starch Mixtures," *Cereal Chemistry Journal*, vol. 81, no. 6, 714-721, 2004.
- [146] M. L. Anson, "The effect of denaturation on the viscosity of protein systems," *The Journal of General Physiology*, vol. 15, no. 3, pp. 341-350, 1932.
- [147] B. Barber, C. Ortola, S. Barber, and F. Fernandez, "Storage of packaged white bread. III. Effects of sourdough and addition of acids on bread characteristics. *Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung*," vol. 194, pp. 442-449, 1992.
- [148] M. R. B. Mermet-Guyennet, J. Gianfelice de Castro, M. Habibi, N. Martzel, M. M. Denn, and D. Bonn, "LAOS: The strain softening/strain hardening paradox," *Journal of Rheology*, vol. 59, no. 1, pp. 21-32, 2015.
- [149] M. K. Demir, A. Elgün, and N. Bilgiçli, "Sıvı ferment yöntemi ile ekmek üretiminde kullanılan maya (*Saccharomyces Cerevisiae*) performansına katkı maddeleri ve ortam şartlarının etkisi," *Gıda*, vol. 31, no. 6, pp. 46-310, 2006.
- [150] I. Nachi, I. Fhoula, I. Smida, I. B. Taher, M. Chouaibi, J. Jaunbergse, V. Bartkevicse, and M. Hassounaa, "Assessment of lactic acid bacteria application for the reduction of acrylamide formation in bread," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 92, pp. 435-441, 2018.
- [151] M. A. Martinez Anaya, "Enzymes and Bread Flavour," *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, vol. 44, pp. 2470-2480, 1996.
- [152] C. I. Clarke, and E. K. Arendt, "A Review of the Application of Sourdough Technology to Wheat Breads," *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 49, pp. 137-161, 2005.
- [153] C. Thiele, S. Grassi, and M. Gänzle, M., "Gluten Hydrolysis and Depolymerization during Sourdough Fermentation," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 52, pp. 1307-1314, 2004.
- [154] A. V. Moroni, E. K. Arendt, and F. D. Bello, "Biodiversity of lactic acid bacteria and yeasts in spontaneously-fermented buckwheat and teff sourdoughs," *Food Microbiology*, vol. 28, no. 3, pp. 497-502, 2011.
- [155] K. Kaur, N. Singh, and H. Singh, "Studies on the effect of skim milk powder, sprouted wheat flour, and pH on rheological and baking properties of flour," *International Journal of Food Properties*, vol. 5, no. 1, pp. 13-24, 2002.
- [156] C. B. Meroth, W. P. Hammes, and C. Hertel, "Identification and population dynamics of yeasts in sourdough fermentation processes by PCR-denaturing gradient gel electrophoresis," *Applied Environmental Microbiology*, vol. 69, no. 12, pp. 7453-7461, 2003.
- [157] J. O. Omedi, and W. Huang, "Soy sourdough fermented by lactic acid bacteria starter (*L. plantarum*, and *L. sanfranciscensis*) concentration

effect on dough fermentation, textural and shelf life properties of wheat bread,” *MOJ Food Process Technol.* , vol. 3, no. 3, 327-334, 2016.

- [158] F. Dastmalchi, S. H. Razavi, M. Faraji, and M. Labbafi, “Effect of *Lactobacillus casei- casei* and *Lactobacillus reuteri* on acrylamide formation in flat bread and Bread roll,” *J Food Sci Technol*, vol. 53, no. 3, pp. 1531-9, 2016.
- [159] H. Shumoy, F. Van Bockstaele, D. Devecioglu, and K. Raes, “Effect of sourdough addition and storage time on in vitro starch digestibility and estimated glycemic index of tef bread,” *Food Chemistry*, vol. 264, pp. 34-40, 2008.



İletişim Bilgisi: cigdemyildirim@halic.edu.tr

Makaleler

1. C. Yildirim-Mavis, M. T. Yilmaz, E. Dertli, M. Arici, and D. Ozmen, “Non-linear rheological (LAOS) behavior of sourdough-based dough,” Food Hydrocolloids, no. 96, pp. 481-492, 2019.

