



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**TERMOPLASTİK ELASTOMERLERİN FARKLI ŞİŞİRİCİ AJANLARLA
HAFİFLETİLMESİ VE HAFİFLETME İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLER
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET HAKAN ÇINAR

DANIŞMAN: DOÇ. DR. ALPER KAŞGÖZ

**YALOVA
MAYIS 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

TERMOPLASTİK ELASTOMERLERİN FARKLI ŞİŞİRİCİ AJANLARLA
HAFİFLETİLMESİ VE HAFİFLETME İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET HAKAN ÇINAR
218115018

DANIŞMAN: DOÇ. DR. ALPER KAŞGÖZ

YALOVA
MAYIS 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Termoplastik Elastomerlerin Farklı Şişirici Ajanlarla Hafifletilmesi Ve Hafifletme İşleminin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Ahmet Hakan ÇINAR



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden, akademik gelişimimde her zaman yanımda olan ve doğru yönlendirmeleriyle destek veren sayın danışman hocam Doç. Dr. Alper Kaşgöz'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca değerli katkıları ve destekleriyle sürecime yardımcı olan Zuhal Yurtbaşı, Zeynep Keskin, Emine Kaşgöz ve Furkan Sarısoy'a teşekkür ederim. Ayrıca, her koşulda yanımda bulunarak bana verdikleri sevgi ve destekle bu süreci daha kolay hale getiren değerli aileme şükranlarımı sunarım.

MAYIS – 2025

Ahmet Hakan ÇINAR



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN.....	i
ÖNSÖZ.....	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2.GENEL BİLGİLER.....	3
2.1.Polimerler ve Sürdürülebilirlik.....	3
2.1.1.Çevresel gereklilik.....	4
2.1.2.Sosyal gereklilik.....	4
2.1.3.Ekonomik gereklilik.....	5
2.2.Polimerlerde Sürdürülebilirliğe Getirilen Çözümler.....	6
2.2.1.Geri dönüşüm	6
2.2.2.Biyo-bozunabilir polimerler	8
2.2.3.Yeniden kullanım ve kullanım azaltma.....	9
2.2.4.Polimer işlemede verimli enerji kullanımı	10
2.2.5.Hafifletme.....	11
2.3. Polimerlerin Hafifletilmesi.....	12
2.3.1.MuCell Enjeksiyon Kalıplama	14
2.3.2.Fiziksel Şişiricilerle Köpükleme	16
2.3.3. Kimyasal Şişirme Yöntemleri	18
2.4. Stiren – Bütadien – Stiren(SBS).....	20
2.5. Polimerlerin Hafifletilmesinde Kullanılan Yöntemler	21
2.5.1. Fiziksel Şişirme Yöntemleri.....	21
2.5.2.Kimyasal Şişiriciler ile Hafifletme.....	22
2.5.3.Üretim Esnasında Hafifletme Yöntemleri.....	23
2.6. Literatür Araştırması	23
3.MALZEMELER VE YÖNTEMLER.....	27
3.1. Karakterizasyon Yöntemleri	29
3.1.1.Çekme testi.....	29
3.1.2. Aşınma testi.....	30

3.1.3. Sertlik testi.....	30
3.1.4. Reoloji testleri	31
3.1.5. Optik Mikroskop Analizleri	32
4.ANALİZ BULGULARI.....	34
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Polimer Fazın Plastifiyan Optimizasyonu	34
4.1.1. Plastifiyan Etkisinin Reolojik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi	34
4.1.2. Plastifiyan Etkisinin Mekanik Özelliklere Etkisi	36
4.1.3. Plastifiyan Etkisinin Şişirilme Sırasında Morfolojik Özelliklere Etkisi	39
4.2. Katalizörlü Şişirici Ajan Sistemlerinde Katalizör Oranının Optimize Edilmesi.....	43
4.3 Farklı Şişirici Ajanların Etkilerinin İncelenmesi	46
4.3.1 Reoloji Testleri.....	47
4.3.2. Farklı Şişirici Ajanları ile Şişirilmiş Örneklerin Morfolojik Açından İncelenmesi.....	50
4.3.3. Çekme Testi.....	57
4.3.4 Aşınma Testi	63
4.3.5. Sertlik Testi	64
5.SONUÇLAR	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR

AZDC : Azodikarbonamid

Exp : Fiziksel şişirici

SBS : Stiren-bütadien-stiren

SOD : Sodyum bikarbonat

ZnO: Çinko Oksit



TABLO LİSTESİ

Tablo 4. 1. Aşınma ve sertlik testi sonuçları.	39
Tablo 4. 2. Hazırlanan şişirici ajanların detaylı bileşimleri.	47
Tablo 4. 3. Exp Serisi örneklerin aşınma test sonuçları.	64
Tablo 4. 4. Şişirici farklılığı ve oranının SBS polimerinin sertliğine etkisi.	65



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Plastik ürünlerin yaşam döngüsünü ve geri dönüşüm süreçleri [7]	8
Şekil 2. 2. Azot gazının enjeksiyon kalıplama sistemine entegre edilerek polimer eriyiğinde genleşme ve hücrel yapı oluşturma süreci.[14]	15
Şekil 2. 3. Genişleyen Küreler Mikro Kapsüllerinin Şişirme Mekanizması: Isı uygulamasıyla, mikro kapsül içindeki gazın genleşmesi sonucu kapsül hacminin 60 katına kadar artması ve polimer içinde hafifletici bir hücrel yapı oluşturma sürecini göstermektedir.[20].....	16
Şekil 3. 1. (a) Çift vidalı ekstrüderde wax katılması. (b) Tek vidalı ekstrüderde şişirici malzeme katılması. (c) Sıcak pres yöntemi ile levha oluşturulması.	27
Şekil 3. 2. Çekme Test Cihazı [29]	29
Şekil 3. 3. Aşınma Test Cihazı [30].	30
Şekil 3. 4. Shore A test cihazı [31].	30
Şekil 3. 5. Kapiler reometre.	31
Şekil 3. 6. Optik mikroskop	32
Şekil 4. 1. Kapiler reometre test sonucu.....	36
Şekil 4. 2. Plastifiyan kullanımının çekme testinden elde edilen mekanik özelliklere etkisi	38
Şekil 4. 3. SBS-15 ve 2 phr fiziksel şişirici eklenmiş SBS polimerinin optikmikroskop görüntüsü.	40
Şekil 4. 4. SBS-22.5 ve 2 phr fiziksel şişirici ajan içeren SBS polimerinin optik mikroskop görüntüsü.	41
Şekil 4. 5. SBS-30 ve 2 phr fiziksel şişirici ajan içeren SBS polimerinin optik mikroskop görüntüsü.	42
Şekil 4. 6. Reometredeki örnek yerleştiril şekli	44
Şekil 4. 7. AZDC/ZnO şişirici ajan sistemi için aktifleşme sıcaklığının belirlenmesi test sonuçları.	45
Şekil 4. 8. SOD/CA şişirici ajan sistemi için aktifleşme sıcaklığının belirlenmesi test sonucu.....	46
Şekil 4. 9. Farklı fiziksel şişirici oranlarına sahip SBS polimerinin kapiler reometre test sonucu.....	48
Şekil 4. 10. Sabit ZnO oranının farklı AZDC oranlarının kullanımındaki etkisi.....	49
Şekil 4. 11. CA oranının SBS polimerine etkisi.....	49
Şekil 4. 12. AZDC-2 kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü. ..	51
Şekil 4. 13. AZDC-3 ZnO-1.2 phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop.....	51
Şekil 4. 14. AZDC-5, ZnO-2phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop ..	52
Şekil 4. 15. Na ₂ CO ₃ -1, CA- 0.15 phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop.....	53

Şekil 4. 16. Na ₂ CO ₃ -2, CA- 0.3 phr 4x büyütmede ki mikroskop görüntüsü.	54
Şekil 4. 17. Na ₂ CO ₃ -3, CA- 0.45 phr 4x büyütmede ki mikroskop görüntüsü.	54
Şekil 4. 18. Exp-1'in 4x büyütme oranında ki mikroskop görüntüsü.	55
Şekil 4. 19. Exp-2'nin 4x büyütme oranında ki mikroskop görüntüsü.	56
Şekil 4. 20. Exp-3'ün 4x büyütme oranında ki mikroskop görüntüsü.	57
Şekil 4. 21. Exp miktarının artışı, SBS polimerinin çekme test sonuçları üzerindeki etkisi.	60
Şekil 4. 22. AZDC miktarının artışının SBS polimerinin çekme test sonuçları üzerindeki...	61
Şekil 4. 23. SOD miktarının artışının SBS polimerini çekme test sonuçları üzerindeki etkisi.	62



TERMOPLASTİK ELASTOMERLERİN FARKLI ŞİŞİRİCİ AJANLARLA HAFİFLETİLMESİ VE HAFİFLETME İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışma kapsamında başta ayakkabı ve otomotiv olmak üzere birçok alanda kullanılan SBS polimerinin fiziksel ve kimyasal şişirici ajanlarla şişirilerek hafifletilmesi ve bu süreçteki mekanik özelliklerdeki değişimleri incelenmiştir. Çalışmada SBS'in reolojik özelliklerinin optimizasyonu ve köpürtme işleminin gerçekleştirilmesi için farklı oranlarda (%15, %22.5, %30) wax, SBS yapıya katılmış ve optimum wax konsantrasyonu (%30) belirlenerek çalışmanın devamında sabit wax içeriğine sahip SBS polimeri polimer faz olarak kullanılmıştır. Şişirici ajan olarak ise bir adet fiziksel, 2 adet kimyasal olmak üzere 3 farklı şişirici ajan ile denemeler gerçekleştirilmiştir. Fiziksel şişirici olarak hidrokarbonların kapsüle edilmesiyle geliştirilmiş ve endüstride yaygın olarak Expancell adıyla bilinen genişleyen küreler kullanılırken, kimyasal şişirici olarak ise Azodikarbonamid (AZDC) ve sodyum bikarbonat kullanılmıştır. Kimyasal şişiricilerin kullanılmasında ayrıca katalizör olarak sırasıyla aktif çinko ve sitrik asit kullanımı da optimize edilmiştir. Örneklerin hazırlanmasında farklı oranlarda şişirici ajanlar ve kimyasal şişirici ajanlar için kullanılan katalizörler şişirici ajanların aktifleşme sıcaklığının altında tek vidalı ekstrüderde polimer yapıya katılarak öncelikle patlatılmaya hazır granüller elde edilmiştir. Daha sonra ise patlatma sıcaklığının üzerinde baskı kalıplama yapılarak levha formunda ürünler elde edilmiştir. Prete kullanılan kalıp boşlukları için gerekli ham madde miktarları hesaplanarak çalışma kapsamında 0.6 g/cm^3 yoğunluk değeri sağlanmaya çalışılmıştır. Elde edilen levhalardan uygun standartlara göre test numuneleri kesilerek çekme testleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiş ayrıca hücre yapıları optik mikroskopla incelenmiştir. Ayrıca örneklerin kapiler reometrede patlatma öncesi ekstrüder koşullarındaki viskozitesi belirlenirken kimyasal şişiriciler için kullanılan katalizörlerin patlatma sıcaklığı üzerine olan etkisi de rotasyonel reometre cihazı ile belirlenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda, fiziksel şişirici olarak kullanılan 3 phr Expancell içeren numunelerin elastik modül değerinin 6.95 MPa olduğu belirlenmiştir. %30 wax içeren SBS numunelerinde elastik modül 4 MPa olarak ölçülmüş, ancak her iki numunede de %500'ün üzerinde uzama yeteneği korunmuştur. Aşınma testlerinde, 3 phr Expancell ve %30 wax içeren numunelerin, 536.12 aşınma katsayısı ve 54 Shore A sertlik değeri ile en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: SBS, fiziksel şişirici, kimyasal şişirici, Azodikarbonamid, sodyum bikarbonat.

FOAMING OF THERMOPLASTIC ELASTOMERS WITH DIFFERENT BLOWING AGENTS AND INVESTIGATION OF THE EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES

ABSTRACT

In this study, the lightweighting of SBS polymer, which is widely used in various fields, particularly footwear and automotive, was investigated by foaming with physical and chemical blowing agents, along with the evaluation of changes in mechanical properties throughout the process. To optimize the rheological properties of SBS and ensure successful foaming, wax was incorporated into the SBS structure at different ratios (15%, 22.5%, 30%). The optimum wax concentration (30%) was determined, and the SBS polymer with a fixed wax content was used as the polymer phase in the subsequent stages of the study. For the blowing agents, experiments were conducted using one physical and two chemical blowing agents. Expanding microspheres, commonly known in the industry under the name Expancel, which consist of encapsulated hydrocarbons, were used as the physical blowing agent. Azodicarbonamide (AZDC) and sodium bicarbonate were used as chemical blowing agents. Additionally, catalysts—active zinc for AZDC and citric acid for sodium bicarbonate—were used to optimize the activation of chemical blowing agents. Granules ready for foaming were first prepared by incorporating different ratios of blowing agents and catalysts into the polymer structure using a single-screw extruder at temperatures below the activation point of the blowing agents. Subsequently, sheet-form products were obtained by compression molding at temperatures above the foaming threshold. The required raw material amounts for the mold cavities in the press were calculated to achieve a density of 0.6 g/cm^3 during the process. Test specimens were cut from the obtained sheets according to appropriate standards, and tensile and abrasion tests were performed. The cellular structures of the samples were examined using an optical microscope. Additionally, the viscosity of the samples under extrusion conditions prior to foaming was determined using a capillary rheometer, and the effect of catalysts used for chemical blowing agents on the foaming temperature was analyzed using a rotational rheometry. According to the results, the elastic modulus of the samples containing 3 phr Expancel as the physical blowing agent was determined to be 6.95 MPa. The elastic modulus of SBS samples containing 30% wax was measured as 4 MPa, but both samples retained an elongation capability of over 500%. In abrasion tests, the samples containing 3 phr Expancel and 30% wax demonstrated the best performance, with an abrasion coefficient of 536.12 and a Shore A hardness value of 54.

Keywords: SBS, physical blowing agent, chemical blowing agent, azodicarbonamide, sodium bicarbonate.

1. GİRİŞ

Termoplastik elastomerler (TPE'ler), hafiflik, esneklik ve mekanik dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde modern endüstride önemli bir yer tutan malzemelerdir. Bu çok yönlü polimerler, otomotivden ayakkabı tabanlarına, elektronik cihaz kasalarından inşaat malzemelerine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. TPE'ler arasında yer alan Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) kopolimeri, kopolimer yapısındaki sert polistiren (PS) blokları ile esnek bütadien (PB) blokları sayesinde hem dayanıklılık hem de elastikiyet sunar. Bu yapılar, SBS'i özellikle hafif ve esnek malzeme gereksinimi olan uygulamalarda tercih edilir hale getirmiştir. Ancak, endüstriyel uygulamalarda polimerlerin daha da hafifletilmesi, enerji verimliliği ve maliyet tasarrufu açısından kritik önem taşır. Bu ihtiyaç, polimerlerin şişirici ajanlarla hafifletilmesi yoluyla karşılanmaktadır. Şişirici ajanlar, polimer yapısında mikro veya makro boyutlarda hücreli yapılar oluşturarak malzemenin yoğunluğunu azaltırken, özellikle mekanik dayanıklılığın korunmasına yönelik çalışmalar önem arz etmektedir. Bu çalışma, SBS esaslı polimer yapıların fiziksel ve kimyasal şişirici ajanlarla hafifletilmesini ve bu süreç boyunca reolojik, mekanik ve mikroyapısal özelliklerindeki değişiklikleri incelemeyi amaçlamaktadır. Şişirici ajanlar olarak, endüstride geniş çapta kullanılan genişleyen kürecikler adı verilen kapsüllenmiş hidrokarbon bazlı genişleyen mikro kürecikler fiziksel şişirici olarak tercih edilmiştir. Kimyasal şişirici ajanlar olarak ise Azodikarbonamid (AZDC) ve sodyum bikarbonat kullanılmış, bu ajanların etkisini optimize etmek için sırasıyla aktif çinko ve sitrik asit katalizörleri kullanılmıştır. Araştırmada, şişirici ajan oranları ve şişirme sıcaklığı gibi parametreler özenle belirlenmiş ve çeşitli konsantrasyonlarda wax ilavesi ile SBS polimer matrisinin reolojik özellikleri optimize edilmiştir. Farklı oranlarda (%15, %22.5 ve %30) wax içeren numuneler üzerinde yürütülen deneyler sonucunda %30 wax konsantrasyonu ile optimum mekanik ve reolojik performans elde edilmiş ve bu sabit içeriğe sahip SBS numuneleri çalışmanın devamında temel polimer fazı olarak kullanılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, SBS esaslı termoplastik elastomerlerin hafifletilmesi amacıyla fiziksel ve kimyasal şişirici ajanların kullanımı araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, SBS polimer yapısının yoğunluğunu azaltırken mekanik dayanıklılık, elastikiyet ve reolojik özelliklerin korunmasını sağlamaktır. Bu doğrultuda, Expancell gibi kapsüllenmiş hidrokarbon bazlı fiziksel şişiriciler ve AZDC ile sodyum bikarbonat gibi kimyasal şişiriciler kullanılmıştır. Ayrıca, kimyasal şişiricilerin etkinliğini artırmak için aktif çinko ve sitrik asit katalizörleri optimize edilmiştir.

Bu kapsamda farklı şişirici ajan oranları ve proses parametreleri kullanılarak SBS matrisinde homojen hücresel yapılar oluşturulmuş ve üretilen hafifletilmiş numunelerin morfolojik, mekanik ve termal özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Üretilen kompozit levhalar üzerinde çekme dayanımı, uzama kabiliyeti, aşınma ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, fiziksel ve kimyasal şişiricilerin kombinasyonunun optimum performans elde etmede önemli bir faktör olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma, SBS polimerlerinin hafifletilmesi sürecinde farklı parametrelerin etkisini ortaya koyarak, hafif, dayanıklı ve çevre dostu ürünlerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2.GENEL BİLGİLER

2.1.Polimerler ve Sürdürülebilirlik

Polimerler, modern endüstrinin vazgeçilmez yapı taşları arasında yer almakta olup, hafiflik, kimyasal direnç, dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde otomotivden inşaata, ambalajdan tekstile kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Polimerlerin bu özellikleri, mühendislik uygulamalarında yüksek performans gerektiren alanlarda sıkça tercih edilmelerine olanak tanımaktadır. Ancak, plastik polimerlerin üretim ve tüketimindeki hızlı artış, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarda giderek artan sürdürülebilirlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Son yıllarda plastik tüketimindeki artış dramatik boyutlara ulaşmıştır. 2023 yılı itibarıyla dünya genelinde yıllık plastik üretimi yaklaşık 400 milyon ton seviyesine ulaşmış olup, bu miktar yalnızca artan nüfusu değil, aynı zamanda tek kullanımlık plastik ürünlere olan bağımlılığı da yansıtmaktadır [1]. Ancak, bu büyük üretim hacmine rağmen, üretilen plastiklerin yalnızca %9'u geri dönüştürülebilmiştir [2]. Geri dönüşüm oranlarının bu denli düşük olması, plastiklerin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi konusunda büyük bir eksikliği işaret etmektedir. Plastik atıkların önemli bir kısmı düzenli depolama alanlarına gömülmekte ya da doğaya terk edilmektedir. Plastiklerin çevresel etkileri, yalnızca çevre kirliliğini artırmakla kalmayıp, ekosistemler üzerinde geri döndürülemez zararlar bırakmaktadır.

Doğada çözünme sürelerinin yüzlerce yılı bulması, karasal ve denizel ekosistemlerde uzun vadeli kirliliğe yol açmaktadır. Özellikle mikroplastiklerin ekosistemlere yayılması, sadece çevresel sürdürülebilirliği tehlikeye atmakla kalmamakta, aynı zamanda besin zincirine dahil olarak insan sağlığı üzerinde de ciddi tehditler oluşturmaktadır. Özellikle deniz ortamında biriken plastikler, deniz canlılarının üreme ve büyüme oranlarını olumsuz etkilemekte, bu da ekosistemdeki dengenin bozulmasına neden olmaktadır [3]. Ayrıca, plastik üretimi sırasında fosil yakıtların kullanılması, karbon salınımını artırarak küresel ısınmayı tetiklemektedir. Plastik atıkların yakılması sırasında açığa çıkan sera gazları ise, iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri daha da şiddetlendirmektedir. Bu bağlamda, plastiklerin sürdürülebilir bir şekilde yönetimi, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik için de kritik bir öneme sahiptir. Plastik geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi, atıkların düzenli yönetimi ve çevre dostu alternatiflerin teşvik edilmesi, bu sorunun çözümüne yönelik stratejik adımlar olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, toplumsal farkındalık ve politikaların güçlendirilmesi, bu hedeflere ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu sorunların çevresel boyutları, yalnızca plastik kirliliğinin doğrudan

etkileriyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda küresel ekosistemlerin sürdürülebilirliğini tehdit eden daha geniş çaplı sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle, çevresel gereklilikler doğrultusunda plastiklerin yönetimi ve alternatif çözümler geliştirilmesi hayati bir öneme sahiptir.

2.1.1.Çevresel gereklilik

Plastik malzemeler, doğada uzun süre bozulmadan kalmaları nedeniyle çevresel sorunların temel kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Mikroplastiklerin ekosistemlere yayılması, hem karasal hem de denizel habitatlarda sürdürülebilirliği tehdit etmekte ve insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturmaktadır.

Araştırmalar, mikroplastiklerin deniz canlılarının büyüme ve üreme oranlarını olumsuz etkileyerek ekosistem dengesini bozduğunu ve biyolojik çeşitliliği tehdit ettiğini göstermektedir. Bu durum, plastik kirliliğinin yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutlarda da olumsuz sonuçlara yol açtığını açıkça ortaya koymaktadır [4]. Plastiklerin üretiminde kullanılan fosil yakıtlar, yüksek karbon salınımı ile küresel ısınmayı artırmaktadır. Ayrıca, plastik atıkların yakılması sırasında ortaya çıkan sera gazları, iklim değişikliği üzerindeki baskıyı daha da artırarak çevresel sorunların çözümünü karmaşıktırmaktadır. Plastiklerin okyanuslarda birikmesi ise deniz ortamındaki karbon döngüsünü olumsuz etkileyerek küresel ısınmayı dolaylı olarak daha da şiddetlendirmektedir. Bu, plastik atık yönetimi ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin acilen geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Plastik kirliliğinin çevresel etkilerinin yanı sıra, bu sorunun toplumsal yaşam üzerindeki yansımaları da giderek daha belirgin hale gelmekte ve sosyal gereklilikler doğrultusunda çözüm arayışlarını zorunlu kılmaktadır.

2.1.2.Sosyal gereklilik

Toplumların çevre bilincinin artması, sürdürülebilir ürünlere olan talebin hızla yükselmesine neden olmuştur. Bu bağlamda, biyotabanlı polimerler, çevre dostu alternatifler olarak öne çıkmakta ve sürdürülebilir plastik malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Polilaktik Asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan (örneğin, mısır nişastası ve şeker kamışı) elde edilmesi ve endüstriyel kompostlama koşullarında tamamen biyolojik olarak parçalanabilmesi sayesinde dikkat çekmektedir. PLA, gıda ambalajları, 3D yazıcı filamentleri ve tıbbi cihazlar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır [5]. Bunun yanı sıra, Polihidroksialkanoatlar (PHA), biyolojik olarak parçalanabilir diğer önemli biyotabanlı polimerlerden biridir. Mikroorganizmalar tarafından üretilen PHA, doğal çevrede biyolojik olarak hızla bozulabilmesi ve deniz ortamında dahi etkili bir şekilde çözünmesiyle PLA'yı

tamamlayıcı bir özellik göstermektedir. Bu iki biyoplastik, plastik kirliliğini azaltmak, karbon ayak izini düşürmek ve sürdürülebilir malzeme döngüsünü desteklemek için kritik bir öneme sahiptir. Hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların sürdürülebilir plastik politikaları, bu malzemelerin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır. Avrupa Birliği'nin "Plastik Stratejisi", biyobozunabilir plastiklerin üretimini artırmayı ve plastik kirliliğini azaltmayı hedeflemektedir. Bu tür düzenlemeler, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmekle kalmayıp, toplumların çevresel farkındalığını artırarak uzun vadeli çözümler sunmaktadır. Sosyal farkındalık ve çevre dostu alternatiflerin yaygınlaşması, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmamakta, aynı zamanda plastik endüstrisinin ekonomik boyutlarını da köklü bir dönüşüme zorlayarak sürdürülebilir ekonomik modellerin oluşturulmasını gerektirmektedir.

2.1.3. Ekonomik gereklilik

Plastik atıkların geri dönüşüm oranlarının düşük olması, çevresel etkilerin yanı sıra ekonomik kayıplara da yol açmaktadır. Geri dönüşüm sistemlerindeki eksiklikler, hammadde israfını artırmakta ve enerji tüketimini gereksiz şekilde yükseltmektedir. Ancak, yapılan araştırmalar geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesiyle enerji tüketiminin %60 oranında azaltılabileceğini göstermektedir. Örneğin, kimyasal geri dönüşüm, polimerlerin monomerlerine ayrıştırılarak yüksek kaliteli geri dönüşüm malzemelerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, karışık ve kirlenmiş plastik atıkların geri kazanılmasında önemli bir avantaj sunmakta ve geri dönüştürülen malzemelerin daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını mümkün kılmaktadır [6]. Bununla birlikte, geri dönüştürülen plastiklerin kullanımı, döngüsel ekonominin güçlendirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Bu süreç, sadece çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmamakta, aynı zamanda ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır.

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde plastik atıkların toplanması ve geri dönüştürülmesi üzerine yapılan yatırımlar, yerel ekonomilerin kalkınmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, geri dönüşüm sektörü yeni istihdam olanakları yaratmakta, böylece hem çevresel hem de sosyal faydalar sağlamaktadır. Çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik hedefleri, plastiklerin üretimi, kullanımı ve geri dönüşümüne yönelik bütüncül yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, polimerlerde sürdürülebilirlik ve bu alanda getirilen çözümler, bu çok yönlü sorunun çözümünde önemli bir rol oynamaktadır.

2.2.Polimerlerde Sürdürülebilirliğe Getirilen Çözümler

Polimerlerde sürdürülebilirliği sağlamak için geliştirilen çözümler, çevresel etkileri en aza indirmek ve kaynak verimliliğini artırmak gibi kritik hedeflere odaklanmaktadır. Plastiklerin doğada uzun süre bozulmadan kalması ve geri dönüşüm oranlarının düşüklüğü, bu çözümlerin önemini daha da artırmaktadır. Geri dönüşüm, biyo-bozunabilir polimerlerin geliştirilmesi, plastik kullanımını azaltma ve enerji verimliliği sağlama gibi yöntemler, sürdürülebilir bir polimer endüstrisinin temel taşlarını oluşturmaktadır [1]. Özellikle geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesi, plastik atıkların döngüsel ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, biyotabanlı ve biyo-bozunabilir polimerlerin kullanımı, plastik kirliliğini azaltmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Polilaktik Asit (PLA) ve Polihidroksialkanoatlar (PHA) gibi polimerler, hem çevre dostu hem de yenilenebilir kaynaklardan üretilebilmesi sayesinde dikkat çekmektedir [5]. Sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyen bir diğer önemli çözüm ise enerji verimli üretim yöntemleridir. Düşük sıcaklıkta işleme, 3D baskı teknolojileri ve hafifletme gibi yenilikçi yöntemler, karbon ayak izini azaltırken üretim süreçlerinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu yaklaşımlar, yalnızca çevresel fayda sunmakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik kazançları da artırmaktadır [6]. Polimerlerin sürdürülebilirliğini sağlamak, çevre dostu bir geleceğin inşasında hayati bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir bir polimer endüstrisi oluşturmanın en temel yaklaşımlarından biri olan geri dönüşüm, plastik atıkların yönetiminde ve döngüsel ekonominin desteklenmesinde kilit bir role sahiptir. Bu bağlamda, geri dönüşüm süreçlerinin mevcut durumu, karşılaşılan zorluklar ve geliştirilen yenilikçi yöntemler üzerinde durulması gerekmektedir.

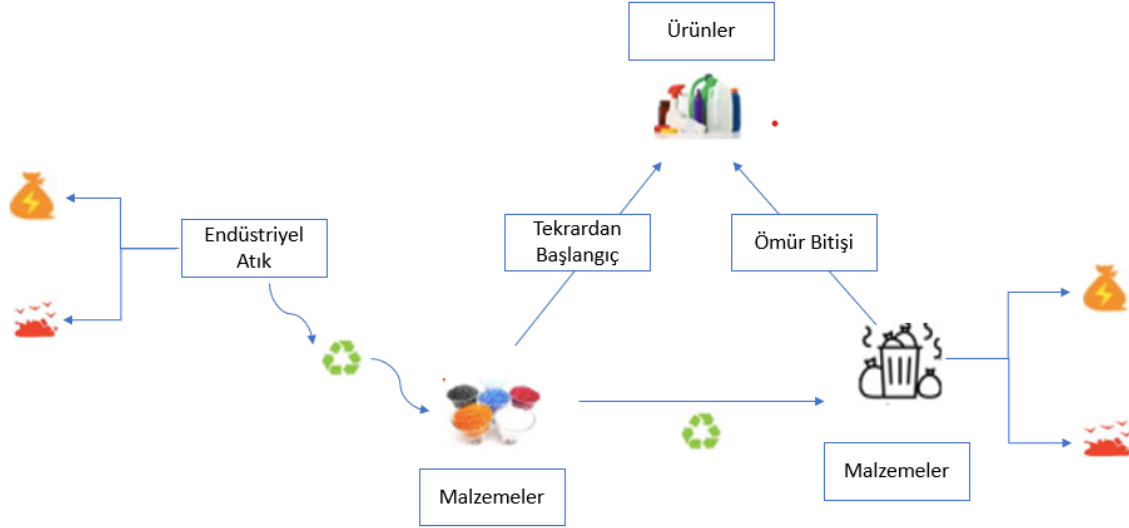
2.2.1.Geri dönüşüm

Plastik atıkların geri dönüşümü, polimerlerde sürdürülebilirliği sağlamak için kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Geri dönüşüm, plastik atıkların yeniden işlenerek yeni ürünlerde kullanılmasını mümkün kılarak çevresel etkileri en aza indirir ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunur. Bu sürecin genel akışı, Şekil 1.1.'de gösterilmektedir. Geri dönüşüm süreci, genellikle iki ana başlık altında incelenir: mekanik geri dönüşüm ve kimyasal geri dönüşüm.

Mekanik geri dönüşüm, plastik atıkların fiziksel işlemlerle yeniden kullanıma kazandırılması sürecidir. Bu yöntemde plastikler, öncelikle atık malzemelerin ayrıştırılması ve temizlenmesi işlemlerine tabi tutulur. Ardından, plastikler öğütülerek küçük granüller veya peletler haline getirilir. Elde edilen bu granüller, ekstrüzyon, kalıplama veya enjeksiyon gibi işlemlerle

yeniden ürün haline dönüştürülür. PET (polietilen tereftalat) ve HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) gibi termoplastikler, mekanik geri dönüşüm için en yaygın kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır [1]. Mekanik geri dönüşüm, enerji açısından oldukça avantajlı bir yöntemdir ve üretim sürecinde enerji tüketimini %50-60 oranında azaltabilir. Ancak, bu yöntemin bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Plastiklerin mekanik ve termal geçmişine bağlı olarak malzeme özelliklerinde bozulmalar meydana gelebilir. Örneğin, bir PET şişe, geri dönüşüm sonrasında tekstil ürünlerinde kullanılabilen liflere veya daha düşük kaliteli ambalaj malzemelerine dönüştürülebilir. Bu, mekanik geri dönüşümün kalite kaybına neden olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, düşük maliyetli ve çevresel açıdan etkili olması, mekanik geri dönüşümün yaygın bir yöntem olmasını sağlamaktadır.

Kimyasal geri dönüşüm, plastiklerin moleküler yapılarının çözülmesiyle monomerlerine veya temel yapı taşlarına ayrılmasını içerir. Bu yöntem, özellikle karmaşık ve kirlenmiş plastikler için etkili bir çözüm sunmaktadır. Kimyasal geri dönüşüm sürecinde polimer zincirleri parçalanarak yeniden yapılandırılacak monomerler elde edilir. Örneğin, polietilen veya polipropilen gibi polimerlerin depolimerizasyon yoluyla temel bileşenlerine ayrılması, neredeyse yeni malzemelerle eşdeğer kalitede ürünler elde edilmesini sağlar [6]. Kimyasal geri dönüşümün avantajı, yüksek kaliteli geri dönüşüm malzemelerinin elde edilmesidir. Ayrıca, mekanik geri dönüşümde karşılaşılan malzeme özelliklerindeki bozulma sorunu, kimyasal yöntemlerde minimum düzeydedir. Poliüretanların kimyasal geri dönüşümünde polioller ve izosiyanatlar geri kazanılarak endüstriyel üretim süreçlerinde yeniden kullanılabilir. Bununla birlikte, bu yöntemin enerji tüketimi ve maliyetleri, mekanik geri dönüşüme kıyasla daha yüksektir. Yine de kimyasal geri dönüşüm, plastik atıkların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Fiziksel ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri, mevcut plastik atıkların yönetiminde etkili çözümler sunarken, plastik kirliliğinin tamamen önlenmesi ve uzun vadeli çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2. 1. Plastik ürünlerin yaşam döngüsünü ve geri dönüşüm süreçleri [7]

Bunların yanı sıra, biyo-bozunabilir polimerlerin geliştirilmesi, geri dönüşüm yöntemlerini tamamlayan ve plastik kirliliğini kökten azaltmayı hedefleyen önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır.

2.2.2. Biyo-bozunabilir polimerler

Biyo-bozunabilir polimerler, doğada belirli koşullar altında mikroorganizmalar tarafından tamamen parçalanabilen malzemelerdir ve çevresel kirliliği azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Plastik kirliliği ve doğada biriken mikroplastiklerin yarattığı çevresel tehditlere karşı, biyo-bozunabilir polimerlerin kullanımı çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu polimerler, genellikle yenilenebilir kaynaklardan üretilmekte ve kompostlanabilir özellikleri sayesinde çevreye zarar vermeden geri dönüşümlerini tamamlamaktadır.

Polilaktik Asit (PLA)

PLA, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir biyokütle kaynaklarından üretilen bir biyo-bozunabilir polimerdir. Endüstriyel kompostlama koşullarında tamamen biyolojik olarak parçalanabilir ve gıda ambalajları, tek kullanımlık tabaklar, 3D yazıcı filamentleri ve tıbbi malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Çevre dostu yapısı ve geniş uygulama alanı, PLA'yı en çok tercih edilen biyoplastiklerden biri haline getirmiştir (Development of biodegradable tableware from novel combination of paddy straw and pine needles: A potential alternative against plastic cutlery). Örneğin, bu çalışmada, PLA'nın pirinç sapı ve çam iğneleri gibi doğal liflerle birleştirilerek tek kullanımlık tabak üretiminde kullanımı incelenmiştir [5].

Çalışmada, biyobozunur dolgu maddelerinin PLA ile harmanlanarak mekanik ve termal özellikleri iyileştirilmiş kompozit malzemeler oluşturulmuştur. Elde edilen bu PLA bazlı kompozitler, termoformlama yöntemiyle şekillendirilmiş ve tek kullanımlık tabak üretimi için başarıyla uygulanmıştır.

Polihidroksialkanoatlar (PHA), Polihidroksialkanoatlar (PHA), mikroorganizmalar tarafından üretilen ve tamamen biyo-bozunabilir özellik gösteren polimerlerdir. Deniz ortamı gibi zorlu koşullarda bile parçalanabilme yetenekleri, onları çevre dostu uygulamalar için ideal kılar. Özellikle sağlık sektöründe, dikiş iplikleri ve biyomedikal cihazlar gibi yüksek hassasiyet gerektiren ürünlerde kullanımları yaygındır. Ayrıca, gıda ambalajları ve tarımsal filmler gibi günlük kullanıma yönelik uygulamalarda da tercih edilmektedirler. Örneğin, "Marine Biodegradation of Tailor-Made Polyhydroxyalkanoates (PHA)" başlıklı çalışmada, farklı PHA türlerinin deniz ortamındaki biyo-bozunabilirlikleri incelenmiştir. Bu araştırma, PHA'nın kimyasal yapısının ve çevresel faktörlerin, deniz ortamında bozunma hızını nasıl etkilediğini ortaya koymuştur [8].

2.2.3. Yeniden kullanım ve kullanım azaltma

Plastik atıkların çevresel etkilerini azaltmak için yeniden kullanım ve azaltma stratejileri, sürdürülebilirlik hedeflerinin kritik bir parçasıdır. Yeniden kullanım, mevcut plastik ürünlerin ömrünü uzatarak atık oluşumunu azaltmayı amaçlar. Örneğin, yeniden doldurulabilir plastik bidon sistemleri, depozitolu ambalaj düzenlemeleri sayesinde atık miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Azaltma stratejileri ise plastik kullanımını en aza indirerek üretimden kaynaklanan çevresel etkileri azaltmayı hedefler. Örneğin, IKEA, plastik ambalaj kullanımını azaltmak amacıyla düz paketleme sistemine geçiş yapmıştır ve bu sayede taşımacılık sırasında enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmıştır. Benzer şekilde, ince duvarlı enjeksiyon kalıplama teknolojisi, plastik ürünlerin ağırlığını azaltarak kaynak kullanımını optimize etmektedir. Bu stratejiler, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmaz, aynı zamanda ekonomik faydalar da sunar. Yeniden kullanım ve azaltma yöntemleri, işletmelerin üretim maliyetlerini düşürmesine ve enerji tüketimini azaltmasına olanak tanır. Bu tür uygulamalar, döngüsel ekonomiyi destekleyen ve kaynakların daha bilinçli bir şekilde kullanılmasını sağlayan sürdürülebilir bir plastik yönetim sisteminin temel unsurlarıdır. Yeniden kullanım ve azaltma stratejileri, plastik yönetimde önemli bir rol oynarken, sürdürülebilir bir döngüsel ekonomi için enerji verimliliği de vazgeçilmez bir unsurdur. Bu bağlamda, polimer işleme süreçlerinde

enerji tasarrufu sağlayan yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir.

2.2.4. Polimer işlemede verimli enerji kullanımı

Plastiklerin üretiminde enerji verimliliğini artırmak, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik avantajlar açısından büyük bir öneme sahiptir. Enerji tüketimi, polimerlerin üretimi ve işlenmesi sırasında ortaya çıkan en büyük maliyet kalemlerinden biridir ve bu süreçlerin optimizasyonu, enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karbon salınımını da önemli ölçüde azaltır. Bu bağlamda, 3D yazıcı teknolojileri ve yenilikçi proses optimizasyonu gibi yöntemler, enerji verimliliği açısından en etkili stratejiler arasında yer almaktadır.

Düşük Sıcaklıkta İşleme

Polimerlerin düşük sıcaklıkta işlenmesi, enerji tasarrufu sağlarken malzeme yapısının korunmasına da yardımcı olur. Termal bozulma riskini azaltan bu yaklaşım, işleme sırasında kimyasal stabiliteyi koruyarak malzeme ömrünü uzatabilir. Aynı zamanda, düşük sıcaklıklarda polimerlerin viskozite kontrolü daha hassas yapılabilir, bu da üretim verimliliğini artırabilir.

Düşük işleme sıcaklıkları, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termoform gibi farklı işleme yöntemlerinde uygulanabilir. Bazı polimerler, özellikle termoplastikler, düşük sıcaklıkta işlendiğinde daha iyi mekanik ve optik özellikler gösterebilir. Bununla birlikte, her polimerin optimum işleme sıcaklığı farklılık gösterdiğinden, malzeme seçimi ve parametre ayarları dikkatlice yapılmalıdır. Düşük sıcaklıkta işleme konusunda PP (polipropilen) ve SBS (stiren-butadien-stiren) polimerleri örnek gösterilebilir. PP, düşük sıcaklıkta işlendiğinde akış davranışını stabilize ederek ince cidarlı parçaların üretiminde avantaj sağlar. SBS ise elastikiyet ve darbe dayanımı gibi özellikleri nedeniyle düşük sıcaklık işlemlerine uygunluk gösterebilir. Genel olarak, düşük sıcaklıkta polimerlerin işlenmesi, hem enerji verimliliği hem de malzeme dayanımı açısından avantajlar sunar. Optimum sıcaklıklar belirlenerek ve uygun işleme parametreleri kullanılarak, polimerlerin mekanik ve kimyasal stabilitesi korunabilir.

3D Baskı Teknolojileri:

Katmanlı imalat olarak da bilinen 3D yazıcı teknolojileri, enerji verimliliği sağlamak açısından devrim niteliğinde bir üretim yöntemidir. Bu teknoloji, karmaşık geometrilere sahip ürünlerin malzeme israfı olmadan üretilmesini mümkün kılar. Özellikle PLA gibi biyoplastiklerin 3D baskı filamentlerinde kullanılması, çevre dostu üretim süreçlerini destekler. 3D yazıcıların sağladığı bir diğer avantaj, prototip üretimi sırasında geleneksel yöntemlere kıyasla daha az

enerji tüketmesidir. Bu yöntem, otomotiv, havacılık ve tıp gibi sektörlerde hafif ama dayanıklı ürünlerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [9].

Yenilenebilir Enerji Kullanımı:

Polimer üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji tüketimini azaltmanın yanı sıra karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürmektedir. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanan enerji, polimerlerin işlenmesi sırasında kullanılan fosil yakıtların yerini alarak çevresel etkileri azaltır. Özellikle Avrupa Birliği'nin enerji verimliliği politikaları, bu tür yenilikçi yöntemlerin endüstriyel uygulamalarda kullanılmasını teşvik etmektedir.

Polimer işlemede enerji verimliliğini artırmaya yönelik bu yenilikçi yöntemler, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda önemli kazanımlar sağlamaktadır. Ancak, enerji tasarrufunun yanı sıra, malzemelerin hafifletilmesi de hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

2.2.5.Hafifletme

Hafifletme, polimerlerin yoğunluğunu azaltarak hem mekanik hem de fiziksel özelliklerini optimize etmeyi amaçlayan önemli bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu süreç, enerji tasarrufu sağlamak, üretim maliyetlerini düşürmek ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamak açısından pek çok avantaj sunar. Hafifletme, genellikle fiziksel ve kimyasal şişiricilerle köpükleme teknikleri veya nano ve mikro dolgu malzemelerinin kullanımıyla gerçekleştirilir. Polimerlerin hafifletilmesi, malzemenin performansından ödün vermeden çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli faydalar sağlar.

Ekstrüzyon köpükleme, hafifletme yöntemleri arasında en sık kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntem, polimerlerin eritilmesi sırasında gazın enjekte edilmesiyle hücreli bir yapı oluşturmayı hedefler. Polimer matrisinde gazın genişlemesiyle, malzeme yoğunluğu önemli ölçüde azaltılır ve hafif ancak dayanıklı yapılar elde edilir. Özellikle polistiren ve polietilen köpüklerin üretiminde kullanılan bu teknik, homojen bir hücre yapısı oluşturması nedeniyle tercih edilmektedir [10]. Buna benzer bir yöntem olan Mucell enjeksiyon teknolojisi ise polimer eriyiğine CO₂ veya N₂ gazının düşük basınç altında kontrollü bir şekilde enjekte edilmesiyle gerçekleştirilir. Gazın genişlemesiyle oluşan hücreli yapı, polimerin hafiflemesini sağlarken mekanik dayanıklılığında herhangi bir kayıp yaşanmaz. Bu teknoloji, otomotiv sektöründe parça üretiminde sıklıkla kullanılarak enerji tasarrufu ve malzeme tasarrufu sağlar [11]. Hafifletme sürecinde kullanılan şişiriciler arasında fiziksel ve kimyasal şişiriciler ön plana

çıkar. Fiziksel şişiriciler, CO₂ veya N₂ gibi inert gazların polimer matrisine eklenmesiyle köpük oluşturur. Çevre dostu bir yöntem olan fiziksel şişirme, kimyasal kalıntı bırakmaz ve ambalaj malzemeleri ile yalıtım panellerinde sıklıkla uygulanır. Kimyasal şişiriciler ise AZDC gibi reaktif maddelerin ısıtıldığında azot gazı salınımı yaparak köpük oluşturduğu bir süreci ifade eder. Kimyasal şişirme, hücresel yapıların büyüklüğü ve dağılımı üzerinde yüksek kontrol sağlaması nedeniyle özellikle otomotiv iç aksamaları ve ambalaj sektöründe tercih edilir. Mucell enjeksiyon yöntemiyle gaz şişiriciler, fiziksel şişiricilerle benzer şekilde çalışır ancak gazın kontrollü enjeksiyonu sayesinde daha homojen bir hücre yapısı elde edilir.

Nano dolgular (nanofillers), hafifletme sürecinde malzeme özelliklerini optimize etmek için önemli bir araçtır. Bu küçük ölçekli parçacıklar, polimer matrisine eklendiğinde malzemenin mekanik dayanıklılığını artırırken yoğunluğunu düşürür. Nano dolgular, hücresel yapıların daha düzenli bir şekilde oluşmasını sağlar ve polimerlerin performansını iyileştirir. Özellikle karbon nanotüpler ve grafen oksit gibi nanomalzemeler, hafif ama güçlü polimer köpüklerin üretiminde tercih edilmektedir. Bu tür katkılar, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde kullanılan yüksek dayanımlı ve hafif parçalarda sıklıkla uygulanır. Hafifletmenin otomotiv sektöründen inşaat sektörüne kadar geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır. Otomotivde kullanılan hafif köpük yapılar, araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırırken, inşaatta kullanılan polimer köpükler ısı ve ses yalıtımı sağlar. Ambalaj sektöründe darbe dayanımı yüksek, hafif ve taşınması kolay malzemeler yaygın şekilde kullanılırken, elektronik cihazlarda hafif köpük yapılar ısı yalıtımı ve cihaz performansını artırır. Hafifletme yöntemlerinin çeşitliliği, endüstrinin farklı alanlarında ihtiyaç duyulan özellikleri sağlayarak hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunmaktadır.

2.3. Polimerlerin Hafifletilmesi

Polimerlerin hafifletilmesi, modern mühendislik uygulamalarında çevresel, ekonomik ve performans odaklı hedeflere ulaşmak için stratejik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, polimerlerin yoğunluğunu azaltarak enerji verimliliği, maliyet tasarrufu ve sürdürülebilirlik sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Hafifletilmiş polimer malzemeler, daha az hammadde tüketimi gerektirirken, mekanik dayanıklılık ve işlevsellik gibi kritik özelliklerini korur [12, 13].

Hafifletme, genellikle köpükleme teknikleri, nano ve mikro dolgu malzemelerinin kullanımı ve yapısal tasarım yaklaşımlarıyla gerçekleştirilir. Köpükleme teknikleri, polimerlerin hücresel yapılar oluşturmasını sağlayarak yoğunluğu azaltırken, mekanik dayanıklılıkta büyük kayıplar

yaşamadan hafif malzemeler üretmeyi mümkün kılar [12]. Nano ve mikro dolgular ise malzeme içinde ağırlığı düşürürken darbe dayanımını ve esneklik gibi özellikleri artırır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifletilmiş polimerler, yakıt tüketimini azaltarak karbon salınımını düşürmekte önemli bir rol oynamaktadır.

Hafifletilmiş polimerler, otomotivden inşaata, ambalajdan elektronik sektörüne kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu malzemeler, enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra lojistik maliyetlerini azaltarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir. Özellikle hafifletme süreçlerinin enerji verimli üretim yöntemleriyle birleştirilmesi, çevre dostu ve ekonomik bir plastik yönetimi için önemli bir sinerji yaratmaktadır. Hafifletme, polimerlerin gelecekteki uygulamalarında hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunarak kritik bir rol oynamaya devam edecektir.

Hafifletme teknikleri, polimerlerin yoğunluğunu azaltarak çevresel ve ekonomik faydalar sağlarken, bu süreçlerin endüstriyel üretimde uygulanabilirliğini artırmak için yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, mucell enjeksiyon kalıplama teknolojisi, hafifletilmiş polimerlerin üretiminde öne çıkan etkili bir yöntem olarak dikkat çekmektedir.

Polimerlerin hafifletilmesi, modern endüstride enerji tasarrufu, maliyet düşürme ve çevresel sürdürülebilirliği artırmak için iki temel yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki üretim sırasında hafifletme yöntemi, diğeri ise şişirici malzeme kullanımınıdır. Üretim sırasında hafifletme, genellikle MuCell enjeksiyon kalıplama gibi teknolojilerde kullanılan CO₂ ve N₂ gibi gazların polimer matrisine enjekte edilmesi yoluyla uygulanmaktadır. Şişirici malzeme kullanımı ise ikiye ayrılır: fiziksel şişiriciler (örneğin, genişleyen kürecikler- Expancell) ve kimyasal şişiriciler (örneğin Azodikarbonamid, sodyum bikarbonat). Her iki yaklaşım, polimerlerin yoğunluğunu azaltırken mekanik özelliklerini büyük ölçüde koruyarak hafif ama dayanıklı malzemeler elde edilmesini sağlamaktadır [14, 15].

Hafifletilmiş polimerlerin özellikleri, hücresel yapıların boyutuna ve morfolojisine bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. Literatürde, hücre boyutlarının polimerin kullanım amacına göre optimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [16]. Hücre boyutları genel olarak şu şekilde sınıflandırılır:

100-500 µm Arasındaki Hücreler: Ticari köpükler olarak adlandırılan bu yapı, genellikle ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla inşaat sektöründe kullanılır. Polistiren ve poliüretan köpükler

bu sınıfa örnek olarak verilebilir. Daha geniş hücre yapıları, malzemenin termal yalıtım performansını artırırken mekanik dayanıklılığı nispeten düşürebilir [17].

20-100 µm Arasındaki Hücreler: Poliolenin köpüklerde görülen bu hücre boyutları, ambalaj sektöründe darbe sönümleyici ve ürün koruyucu malzemeler olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu boyuttaki hücreler, genellikle LDPE bazlı köpüklerde rastlanır ve mekanik dayanıklılık ile darbe sönümlenme performansı arasında iyi bir denge sağlar [18].

5-20 µm Arasındaki Hücreler: Mikro-gözenekli köpükler olarak adlandırılan bu yapılar, köpük olmayan polimerlere yakın mekanik özellikler sunar. Otomotiv sektörü başta olmak üzere ayakkabı tabanları gibi yüksek mukavemet gerektiren hafifletilmiş polimerlerde kullanılır. Bu yapıların darbe dayanımı ve elastik modül özellikleri iyileştirilmiştir [19].

0,1-5 µm Arasındaki Hücreler: Ultra mikro-gözenekli köpükler, mekanik özelliklerin maksimum seviyede korunmasını sağlayarak yüzey özellikleri kritik öneme sahip olan uygulamalarda tercih edilir. Bu tip köpükler, otomotiv iç kaplamaları ve yüksek performans gerektiren ayakkabı tabanlarında kullanılmaktadır [16].

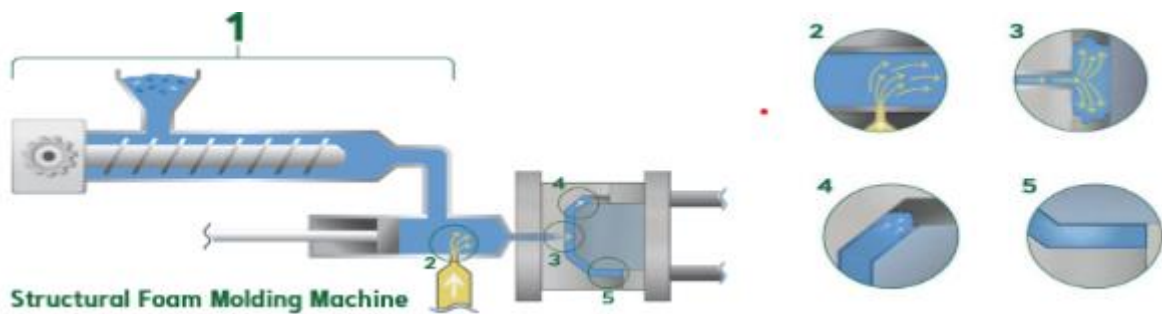
Genişleyebilir mikro kürecikler, polimer sistemlerinde hafif ve dayanıklı yapılar elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Termoplastik bir kabuk ile kaplı olan bu kürecikler, belirli sıcaklıklarda içerdikleri gazın genişmesiyle hacimlerini önemli ölçüde artırarak polimer matrisinde homojen bir hücresel yapı oluşturur. Bu yöntem, malzeme yoğunluğunu düşürmenin yanı sıra mekanik özelliklerin korunmasına veya iyileştirilmesine katkı sağlar. Hafif malzemelere duyulan ihtiyacın arttığı otomotiv, ambalaj ve inşaat gibi sektörlerde kullanımı yaygın olup, darbe dayanımı ve enerji emilimi gibi kritik özellikler üzerinde olumlu etkiler sunar. Ayrıca, mikro küreciklerin boyutu ve dağılımının kontrol edilmesi, oluşan hücresel yapının homojenliğini ve nihai ürünün performansını belirleyen temel etkenlerden biridir. Polimer matrisine uygun oranlarda eklenen bu genişleyebilir kürecikler, işlenebilirliği iyileştirerek farklı üretim teknikleriyle uyumlu hale getirilebilir [17, 20].

2.3.1. MuCell Enjeksiyon Kalıplama

MuCell enjeksiyon kalıplama yöntemi mikro hücresel köpük yapıların oluşturulması yoluyla polimerlerin yoğunluğunu azaltmayı ve hafif ama dayanıklı malzemeler üretmeyi amaçlar. Süper kritik durumdaki gazların (genellikle azot veya karbondioksit) polimer matrisine enjekte edilmesiyle çalışan bu teknoloji, yalnızca malzeme tasarrufu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda üretim sürecinin çevresel ve ekonomik verimliliğini artırır [11].

MuCell enjeksiyon kalıplama süreci, gazın süper kritik hale getirilmesiyle başlar. Süper kritik durumdaki gaz, hem sıvı hem de gaz özellikleri taşıyarak polimer eriyiği ile homojen bir şekilde karışabilir. Bu karışım, enjeksiyon sırasında kalıp boşluğuna aktarılır ve burada basıncın ani düşüşü ile gaz genişler. Genleşen gaz, polimer içinde mikro hücresel yapıların oluşmasını sağlar. Sürecin son aşamasında, polimer matris soğutularak hücresel yapı stabilize edilir ve hafif, dayanıklı bir ürün elde edilir [11]. Bu sürecin aşamaları, Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu teknolojinin en büyük avantajlarından biri, üretim sırasında malzeme yoğunluğunu %10 ila %30 oranında azaltabilmesidir. Bunun yanında, polimerin mekanik özelliklerinde minimum kayıplar yaşanır ve ürün dayanıklılığı korunur. Ayrıca, bu teknoloji düşük basınçlı gaz kullanımıyla enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır ve çevre dostu bir süreç sunar. Daha düşük basınçlar, üretim ekipmanının ömrünü uzatırken çevrim sürelerini de kısaltır. Bununla birlikte, mikro hücresel yapıların oluşturulması, ürünlerdeki iç gerilmeleri azaltarak uzun ömürlü malzemelerin üretilmesine olanak tanır. MuCell enjeksiyon kalıplama, otomotiv, elektronik ve ambalaj sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe kapı panelleri ve direksiyon simitleri gibi hafif ama dayanıklı parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Elektronik sektöründe ise dizüstü bilgisayar kasaları ve diğer elektronik cihazların hafifletilmiş dış kasalarının üretiminde kullanılmaktadır. Ambalaj sektöründe ise şişirme plastik ambalaj ürünlerinde malzeme tasarrufu ve hafiflik sağlamaktadır. Bu teknoloji, geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemlerine kıyasla daha düşük basınç ve enerji tüketimi gerektirir. Bu özellikler, üretim süreçlerinin maliyetlerini düşürürken çevresel etkilerin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır [12, 13].

MuCell enjeksiyon kalıplama teknolojisi, hafifletilmiş polimerlerin üretiminde sağladığı verimlilikle dikkat çekerken, hafifletme yöntemlerinden biri olan fiziksel şişiricilerle köpükleme süreçleri de yoğunluk azaltma ve enerji tasarrufu sağlama açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

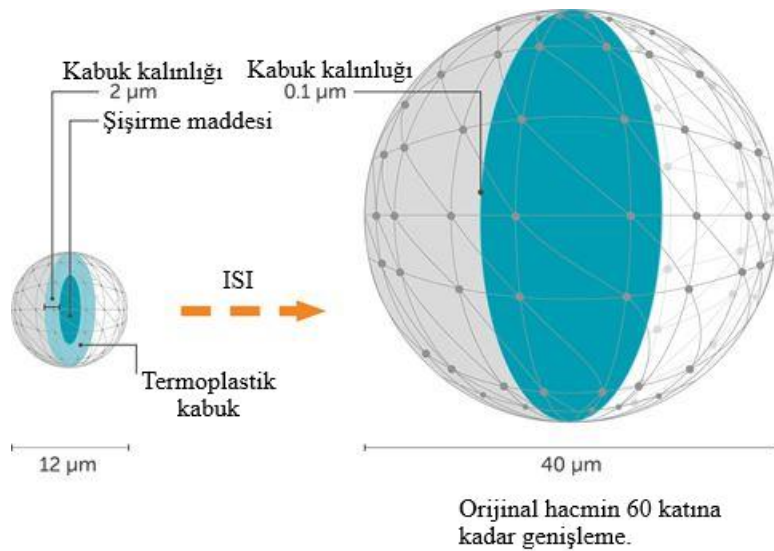


Şekil 2. 2. Azot gazının enjeksiyon kalıplama sistemine entegre edilerek polimer eriyiğinde genişleme ve hücresel yapı oluşturma süreci.[14]

2.3.2.Fiziksel Şişiricilerle Köpükleme

Fiziksel şişiricilerle köpükleme, polimer eriyiğine inert gazların (genellikle CO₂ veya N₂) enjekte edilmesiyle gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu teknik, polimer matrisi içinde gazın fiziksel genişmesi sonucu hücresel bir yapı oluşturarak polimer yoğunluğunu azaltmayı ve hafif malzemeler üretmeyi hedefler. Fiziksel şişiriciler, çevre dostu olmaları ve kimyasal kalıntı bırakmamaları nedeniyle sürdürülebilir üretim süreçlerinde tercih edilen bir yöntemdir [18]. Fiziksel şişirici yöntemlerinde gaz, polimer eriyiğine yüksek basınç altında enjekte edilir. Bu işlem sırasında gaz molekülleri polimer matrisi içinde çözünür ve homojen bir dağılım oluşturur. Daha sonra, basınç aniden düşürüldüğünde veya sıcaklık artırıldığında, gaz genişleyerek polimer içinde mikro kabarcıklar (hücresel yapılar) oluşturur. Bu süreç, polimerin yoğunluğunu azaltırken mekanik özelliklerini büyük ölçüde korur. Özellikle ambalaj, yalıtım ve otomotiv sektörlerinde kullanılan bu yöntem, hafif ancak dayanıklı ürünlerin üretilmesinde etkili bir çözümdür.

Fiziksel şişiricilerin bir diğer önemli uygulama yöntemi genişleyen küreler mikro kapsüllerinin kullanımınıdır. Genişleyen küreler, termoplastik bir kabuk içerisinde gaz veya sıvı içeren mikro kapsüllerden oluşur. Isı uygulandığında, mikro kapsüllerin içindeki gaz genişler ve kapsüller polimer içinde hücresel bir yapı oluşturur [12]. Bu mekanizma, düşük sıcaklıklarda etkinleşme yeteneği sayesinde enerji tasarrufu sağlar ve geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Bu sürecin nasıl işlediği, Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 3. Genişleyen Küreler Mikro Kapsüllerinin Şişirme Mekanizması: Isı uygulamasıyla, mikro kapsül içindeki gazın genişmesi sonucu kapsül hacminin 60 katına kadar artması ve polimer içinde hafifletici bir hücresel yapı oluşturma sürecini göstermektedir.[20]

Genişleyen küreler mikro kapsüllerinin kullanımı, homojen köpük yapıları oluşturarak malzeme yoğunluğunu %50'ye kadar azaltabilir. Bunun yanı sıra, yalıtım panelleri, ambalaj ürünleri ve otomotiv parçalarında yüksek performanslı ürünler elde edilmesini sağlar. Gaz tabanlı fiziksel şişiricilere kıyasla, mikro kapsüllerin homojen dağılımı daha kontrollü bir köpük yapısı sağlar. Bu özellik, malzeme performansını artırırken hammadde tasarrufu sağlar. Fiziksel şişiricilerle köpükleme yöntemlerinin en büyük avantajlarından biri, çevre dostu olmalarıdır. Kimyasal şişiriciler gibi yan ürün bırakmadıkları için çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunar. Ayrıca, enerji tüketimini azaltarak daha düşük üretim maliyetlerine olanak tanır. Günümüzde, özellikle otomotiv sektöründe iç kaplama panelleri ve oturma sistemleri gibi hafif ama dayanıklı ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir .

Yao ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, Expancell 009 DU 80 ve Expancell 950 DU 120 mikro gözenekleri kullanılarak yoğunluk gradyanlı polietilen köpükler üretilmiştir. Bu köpükler, yapı sektöründe yalıtım panelleri ve otomotiv sektöründe hafif yapı elemanları gibi uygulamalar için geliştirilmiştir. Çalışmada, kalıp sıcaklıklarının gradyan oluşturacak şekilde düzenlenmesi ile polimer matris içinde homojen olmayan bir hücresel yapı elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde köpüklerin farklı bölgelerinde değişen yoğunluk özellikleri sağlanmış ve yapısal dayanıklılık artırılmıştır. Ölçümler, Expancell 009 DU 80 içeren köpüklerin yoğunluğunun 0.505 g/cm^3 ile 0.712 g/cm^3 arasında, Expancell 950 DU 120 içeren köpüklerin ise 0.478 g/cm^3 ile 0.781 g/cm^3 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu veriler, yoğunluk gradyanının mekanik özellikler üzerindeki etkisini anlamak açısından önemlidir [18].

Yao ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada, genişleyen küre mikro gözeneklerinin lineer orta yoğunluklu polietilen (LMDPE) matrisi içinde kullanımı incelenmiştir. Bu çalışmada, köpükleme sırasında kullanılan mikro gözenek miktarının ve genleşme sıcaklıklarının köpük yoğunluğu ve morfolojik özellikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmada, genişleyen kürelerin homojen hücre yapısı ve darbe dayanımı yüksek hafif ürünler elde edilmesine olanak tanıdığı belirtilmiştir. Ölçümler, kullanılan mikro gözenek miktarına ve işlem sıcaklığına bağlı olarak LMDPE köpüklerinin yoğunluğunun 0.38 g/cm^3 ile 0.61 g/cm^3 arasında değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, köpüklerin mekanik özellikleri de yoğunluk profiline bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu sonuçlar, polimer köpüklerinde hücresel yapının ve yoğunluk gradyanının, mekanik dayanım ve enerji sönümlenme açısından önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır [21].

Fiziksel şişiricilerle köpükleme yöntemlerinin sunduğu çevresel ve teknik avantajlar, polimerlerin hafifletilmesinde önemli bir yere sahipken, kimyasal şişirme yöntemleri de hafif

ve dayanıklı ürünlerin üretiminde sıkça kullanılan bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, kimyasal şişiricilerin mekanizmaları ve uygulama alanlarına yönelik detayların incelenmesi, hafifletme teknolojilerine bütüncül bir bakış sunmaktadır.

2.3.3. Kimyasal Şişirme Yöntemleri

Kimyasal şişirme yöntemleri, polimer matrisine belirli kimyasal bileşenlerin eklenmesi ve bu bileşenlerin ısıya maruz kaldıklarında gaz salınımı yapmasıyla gerçekleştirilen bir köpüklenme tekniğidir. Bu yöntem, polimerlerin yoğunluğunu azaltırken mekanik özelliklerini büyük ölçüde korur ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Kimyasal şişiriciler, polimerin köpük yapılar oluşturmaya olanak tanır ve bu yapıların homojenliğini artırır. Kimyasal şişirme işleminin temel mekanizması, polimer matrisine eklenen kimyasal bileşenlerin ısıtıldığında karbondioksit (CO₂), azot (N₂) veya diğer gazları salarak polimer içinde mikro veya makro hücreli yapılar oluşturmaktır. Bu yöntem, malzeme özelliklerini optimize ederken hafif ve dayanıklı ürünler elde edilmesini sağlar.

Kimyasal şişirme yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan bileşenlerden biri, AZDC olarak bilinir. Bu kimyasal, termoplastik polimerlerle uyumlu bir yapıya sahip olup, ısıtıldığında azot gazı (N₂) salınımı yaparak geniş hücreli yapıların oluşmasını sağlar. AZDC, düşük yoğunluklu ve homojen köpük yapılar sağlarken, polimerin mekanik özelliklerini korumasıyla da dikkat çeker. Özellikle otomotiv sektöründe iç aksamlar, ambalaj malzemeleri ve yalıtım ürünlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [11]. Bir diğer önemli bileşen ise sodyum bikarbonat ve sitrik asit kombinasyonudur. Bu iki madde bir arada kullanıldığında, ısıya maruz kaldıklarında karbondioksit (CO₂) gazı salınımı gerçekleştirir. Bu reaksiyon, polimer içinde genişlemeye yol açarak hafif köpük yapılar oluşturur. Sodyum bikarbonatın kararlı yapısı, sitrik asitle birleştirildiğinde hızlı ve etkili bir gaz salınımı sağlar. Bu kombinasyon, çevre dostu bir seçenek olarak gıda ambalajları ve tek kullanımlık ürünlerde tercih edilmektedir [12]. Kimyasal şişirme yöntemlerinde kullanılan aktif çinko ise, reaksiyonları hızlandıran bir katalizör olarak görev yapar. Özellikle AZDC'nin gaz salma sürecinde etkin bir rol oynayarak düşük sıcaklıklarda dahi verimliliği artırır. Bu durum, enerji tasarrufu sağlayarak kimyasal şişiricilerin daha sürdürülebilir bir çözüm sunmasına olanak tanır. AZDC, ısıya maruz kaldığında azot (N₂), karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂) ve amonyak (NH₃) gibi gazlar salarak ayrışır. Bu gazlar, polimer matrisi içinde genişleyerek hücreli yapılar oluşturur ve malzemenin köpük haline gelmesini sağlar. Ayrışmanın genel reaksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:



Bunun yanı sıra, aktif çinko AZDC'nin karbonil grubuna bağlanarak kimyasal bağların elektron yoğunluğunu değiştirir ve ayrışmayı hızlandırır. Bu katalitik etki, reaksiyonun aktivasyon enerjisini düşürerek gaz salınımının daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlar. Böylece, polimer köpükleme süreci daha verimli hale gelir ve hücrel yapıların homojenliği artırılır.

Bir diğer kimyasal hafifletme yöntemi olan sodyum bikarbonat (NaHCO₃) ve sitrik asit (C₆H₈O₇) arasındaki reaksiyon, polimerlerin hafifletilmesi için yaygın olarak kullanılan bir mekanizmadır. Bu kimyasal etkileşim, polimer matrisinde karbondioksit (CO₂) gazının salınmasını sağlayarak hücrel yapılar oluşturur ve malzemenin yoğunluğunu önemli ölçüde azaltır. Reaksiyon, genellikle termal işlem koşullarında gerçekleşir ve sıcaklığın artmasıyla birlikte hızlanır. Özellikle enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyon süreçlerinde uygulanan ısı, reaksiyonun daha etkili bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır. Reaksiyonun genel denklemi şu şekilde ifade edilebilir:



Bu kimyasal süreçte, salınan CO₂ gazı polimer içinde genleşme yaratarak mikro veya makro boyutlu köpük yapılar oluşturur. Elde edilen bu yapılar, polimerin hafifliğini artırırken mekanik özelliklerini korumasını sağlar. Homojen gaz salınımı, polimer köpüğünün düzgün ve eşit bir şekilde oluşmasına katkıda bulunur. Bu mekanizma sayesinde, darbe dayanımı yüksek, hafif ve çevresel olarak sürdürülebilir ürünlerin üretilmesi mümkün hale gelir.

Literatürde geçen bazı çalışmalar, kimyasal şişiricilerle köpükleme yöntemlerinin etkinliğini ve uygulama alanlarını vurgulayan örnekler sunmaktadır. Aşağıda bu yöntemlerin farklı polimerlerde nasıl kullanıldığına dair çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmaların birinde köpük üretimi için ana malzeme olarak poli(laktik asit) (PLA) ve şişirici madde olarak AZDC kullanılmıştır. Kimyasal şişirici olarak kullanılan AZDC'nin gaz ayrışma sıcaklığı 170°C'dir. Azot (N₂), karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂) ve amonyak (NH₃) gazlarını açığa çıkarma özelliğine sahiptir. Numunelerde PLA oranı sabit tutulmuş ve AZDC, ağırlıkça %0, %1, %2 ve %4 oranlarında eklenmiştir. Malzemeler, nemden arındırılmak amacıyla 80°C'de 4 saat boyunca kurutulmuştur. Köpükleme işlemi, nefes alabilen kalıp enjeksiyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında nozzle sıcaklığı 200°C, kalıp sıcaklığı 40°C olarak ayarlanmış ve malzeme kalıba enjekte edilmiştir. Köpük yapının oluşması için, dolum işleminin ardından kalıp 0.4 mm açılarak AZDC'nin gaz salınımı yapması sağlanmıştır. Test sonuçlarına göre, AZDC oranının artmasıyla birlikte köpük yoğunluğunun önemli ölçüde azaldığı ve gözeneklilik oranının arttığı gözlemlenmiştir. Mekanik testlerde ise bükme

dayanımı ve çarpma dayanımının büyük ölçüde korunduğu, hücresel yapının homojenliği ile darbe dayanımının optimize edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, PLA ve AZDC'nin birlikte kullanımıyla üretilen köpüklerin hem hafif hem de dayanıklı yapılar oluşturduğunu göstermektedir [22].

Bir diğer L Gouisse ve arkadaşları tarafından düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) köpüklerinin üretimi için sodyum bikarbonat (SB) ve sitrik asit (CA) kombinasyonu kullanılarak kimyasal şişirme yöntemi uygulanmıştır. LDPE, temel polimer olarak tercih edilmiş ve hafifletme sürecinde %1 ila %2 oranında şişirici ajan eklenmiştir. Şişirici ajanlar olarak kullanılan SB ve CA, sinerjik bir etki göstererek gaz salınımını optimize etmiş ve polimer matrisinde hücresel yapıların oluşmasını sağlamıştır. Şişirici ajanların karışım oranları %60 sodyum bikarbonat ve %40 sitrik asit olarak optimize edilmiştir. Çalışmada, SB ve CA'nın termal ayrışma sıcaklıkları ile gaz salınım kapasiteleri incelenmiştir. SB'nin ayrışma sıcaklığı 115–190°C arasında değişirken, CA'nın 153°C'de eriyip 170–260°C arasında iki aşamalı ayrışma sergilediği belirlenmiştir. Karışımın 145–190°C sıcaklık profiline sahip tek vidalı ekstrüderde LDPE ile işlenmesiyle köpük yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal şişirme yöntemiyle üretilen köpüklerin analizinde, SB/CA oranı %60/40 olduğunda daha homojen hücresel yapılar elde edilmiştir. Bu karışım, LDPE'nin yoğunluğunu %50 oranında azaltmış ve genişleme oranını %77'ye kadar artırmıştır. Hücresel yapı artışıyla birlikte çekme dayanımı ve elastik modül değerlerinde hafif bir azalma görülmüş olsa da, 60/40 oranı hafifletme ile mekanik dayanıklılık arasında optimal bir denge sağlamıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, SB ve CA kombinasyonunun LDPE köpüklerinde hafifletme amacıyla etkili bir yöntem sunduğunu göstermiştir. Özellikle otomotiv, ambalaj ve inşaat gibi sektörlerde hafif, dayanıklı ve enerji tasarrufu sağlayan malzemelerin üretiminde bu yöntemin geniş bir uygulama potansiyeli sunduğu belirtilmiştir [23].

2.4. Stiren – Bütadien – Stiren(SBS)

Stiren-bütadien-stiren (SBS), termoplastik elastomerler (TPE) sınıfına ait lineer bir triblok kopolimerdir. Yapısal olarak, sert bir polistiren bloğu (PS), esnek bir bütadien bloğu (PB), ve tekrar bir polistiren bloğundan (PS) oluşur. Bu yapısal düzen, SBS'ye hem elastikiyet hem de mekanik dayanıklılık kazandırır. SBS, kimyasal dayanıklılığı, kolay işlenebilirliği ve geniş kullanım alanlarıyla polimer ve elastomer endüstrisinde önemli bir yer tutar.

SBS'nin Özellikleri

SBS'nin mekanik özellikleri, bloklar arasındaki moleküler bağlanma ve faz ayrışmasından kaynaklanır. Polistiren blokları sertliği ve dayanıklılığı sağlarken, bütadien blokları elastikiyet ve esneklik sunar. SBS, çözücülere, yakıtlara ve yağlara karşı dayanıklıdır. Ayrıca, düşük yoğunluklu yapısı sayesinde hafif ürünlerde kullanılabilir. SBS'nin üretiminde genellikle ardışık aniyonik polimerizasyon yöntemi kullanılır. İlk olarak, stiren monomerleri polimerize edilerek sert bir polistiren bloğu oluşturulur. Ardından bütadien polimerize edilerek elastik bir blok eklenir ve son olarak, ikinci bir stiren bloğu eklenerek yapı tamamlanır. Bu yapı, SBS'nin mekanik dayanıklılığını artıran üç boyutlu bir ağ oluşturur [24, 25]. SBS, esnekliği ve dayanıklılığı sayesinde birçok farklı sektörde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Ayakkabı endüstrisinde, yüksek elastik yapısı sayesinde tabanlar ve diğer elastik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır.

İnşaat ve ambalaj sektörlerinde de SBS, su geçirmez membranlar ve sızdırmazlık malzemeleri gibi dayanıklı ürünlerde kullanılmaktadır. Özellikle su yalıtımı gerektiren uygulamalarda SBS, uzun ömürlü ve güvenilir bir çözüm sunar. Ayrıca dayanıklı ambalaj ürünlerinde, SBS'nin kimyasal direnci ve esnekliği büyük avantajlar sağlar.

Medikal ve elektronik uygulamalarda ise SBS, yüksek esneklik ve dayanıklılık gerektiren bileşenlerin üretiminde önemli bir yer tutar. Bu özellikler, medikal cihazlardan elektronik koruyuculara kadar birçok alanda SBS'nin kullanımını mümkün kılar. SBS'nin üstün özellikleri, endüstriyel gereksinimleri karşılayan çok yönlü bir malzeme olmasını sağlar.

2.5. Polimerlerin Hafifletilmesinde Kullanılan Yöntemler

2.5.1. Fiziksel Şişirme Yöntemleri

Fiziksel şişirme, polimer matrisine gazların ya da genişleyen katkı malzemelerinin fiziksel olarak karıştırılması yoluyla malzemenin hafifletilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, dışarıdan bir gazın çözünmesi veya mikroküreciklerin ısı etkisiyle genişmesi prensibine dayanır. Polimerin gözenekli bir yapıya dönüştürülmesi, yoğunluğu azaltırken mekanik özellikleri koruma veya iyileştirme imkânı sunar.

Gaz enjeksiyonu, fiziksel şişirme yöntemlerinin en bilinen tekniklerinden biridir. Bu yöntemde karbondioksit (CO₂), azot (N₂) ve argon (Ar) gibi gazlar, polimer matrisine çözündürülür veya doğrudan enjekte edilir. Foam Injection Molding (FIM), gaz enjeksiyonuna dayalı gelişmiş bir şişirme yöntemidir ve düşük basınçlı gaz kullanımı ile öne çıkar. Bu süreçte gaz, polimer

eriyiğine fiziksel olarak karıştırılır ve çekme (core-back) tekniği kullanılarak genleşme oranları hassas bir şekilde kontrol edilir. FIM yöntemi, gaz tüketiminin azaltılması, homojen hücrel yapılar elde edilmesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlar sağlar.

Fiziksel şişirme yöntemlerinden bir diğeri, genişleyen mikrokürelerin kullanımınıdır. Expancell gibi mikrokürecikler, polimer matrisine eklendiğinde ısıya maruz kalarak genişir ve gözenekli bir yapı oluşturur. Bu mikrokürecikler, genellikle bir hidrokarbon gazı içeren kapsüllerden oluşur ve belirli bir sıcaklıkta genişler. Bu yöntem, polimerin mekanik özelliklerini koruyarak hafifletme sağlarken yüzey kalitesinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca düşük yoğunluklu ve stabil yapılar üretmek için etkili bir alternatif sunar.

Son olarak, süper kritik gazların kullanımını fiziksel şişirme yöntemlerinde dikkat çeken bir diğeri tekniktir. Süper kritik faza geçmiş gazlar, sıvı ve gaz özelliklerini birleştirerek polimer içinde yüksek çözünürlük sağlar. Örneğin, süper kritik karbondioksit (CO_2), polimerin gözenekli bir yapıya dönüşmesini sağlamak için yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, genellikle MuCell teknolojisiyle birleştirilir ve enjeksiyon kalıplama süreçlerinde kullanılır. Süper kritik gazların kullanımını, hücrel yapıların homojenliği ve kontrol edilebilirliği açısından yüksek performans sağlar.

2.5.2. Kimyasal Şişiriciler ile Hafifletme

Kimyasal şişiricilerle hafifletme, polimer işleme sırasında termal olarak bozulan katkı maddelerinin gaz salınımı yapmasına dayanır. Sodyum bikarbonat, düşük maliyetli ve çevre dostu bir şişirici olarak yaygın şekilde kullanılır. Bu madde, 80-100°C sıcaklık aralığında bozunmaya başlar ve karbondioksit (CO_2) ile su buharı salarak polimer matrisinde gözenekli bir yapı oluşturur. Ancak sodyum bikarbonatın gaz salınımını daha verimli hale getirmek ve işlem sıcaklıklarını düşürmek için genellikle sitrik asit gibi bir katalizörle birlikte kullanılması tercih edilir.

Sitrik asit, sodyum bikarbonatın bozunma reaksiyonunu hızlandırır ve daha düşük sıcaklıklarda CO_2 salınımı sağlar. Örneğin, sodyum bikarbonat ve sitrik asit kombinasyonu, 70°C gibi düşük sıcaklıklarda gaz salınımını başlatabilir. Bu, enerji tüketimini azaltmanın yanı sıra polimer işleme sırasında daha homojen bir hücrel yapı oluşmasını sağlar.

Benzer şekilde, azodikarbonamid (ADCA) de yaygın olarak kullanılan bir kimyasal şişiricidir ve 170-220°C sıcaklık aralığında bozularak azot gazı (N_2) açığa çıkarır. ADCA'nın gaz salınımını optimize etmek için genellikle çinko oksit gibi bir katalizör kullanılır. Çinko oksit, bozunma sıcaklığını düşürerek işlem sırasında daha kontrollü bir gaz salınımı sağlar.

2.5.3. Üretim Esnasında Hafifletme Yöntemleri

MuCell enjeksiyon kalıplama, süper kritik bir gazın (genellikle CO₂ veya N₂) polimer eriyiğine enjekte edilmesiyle hafif malzemeler elde edilmesini sağlar. Bu teknoloji, polimerin gözenekli yapısını hassas bir şekilde kontrol ederken, enerji verimliliği ve süreç optimizasyonu açısından avantajlar sunar. Ayrıca, bu yöntemle üretilen ürünler, geleneksel enjeksiyon kalıplamaya kıyasla daha kısa üretim süresi ve daha az malzeme çekmesi gibi ek faydalar sağlar.

Foam Injection Molding (FIM) ise düşük basınçlı gazların polimer matrisine çözündürülerek hafif malzemeler üretilmesini sağlayan gelişmiş bir fiziksel şişirme yöntemidir. FIM'de kullanılan çekme (core-back) teknolojisi, hücresel yapının homojenliğini artırır ve genleşme oranlarının kontrolünü mümkün kılar. FIM, MuCell yöntemine kıyasla daha ekonomik bir süreç sunar ve geniş bir uygulama yelpazesi için uygundur.

2.6. Literatür Araştırması

Sedef Çakır ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, polipropilenin (PP) hafifletilmesi amacıyla kimyasal şişirici olarak ITP (ısı etkisiyle CO₂ ve su buharı gibi gazlar açığa çıkaran, polimer matrisinde kontrollü gözenekli yapı oluşturan kimyasal şişirici ajan) da kullanılmıştır. Çalışmada, PP'ye ağırlıkça %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3 oranlarında ITP eklenerek enjeksiyon kalıplama yöntemiyle işlem yapılmıştır. Süreçte 210°C eritme, 230°C enjeksiyon ve 220°C kalıp sıcaklıkları uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, polipropilenin yoğunluğunu azaltırken mekanik dayanıklılığını koruyarak homojen hücresel yapıların oluşturulmasını sağlamaktır. Test sonuçlarına göre, %1 oranında ITP kullanımıyla yoğunluk %10'a kadar azaltılmış, ancak %2 ve üzeri kullanımda hücre homojenliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ITP oranı arttıkça sertlik değerleri düşmüş ve darbe dayanımı %2 oranından sonra azalmaya başlamıştır. Bu sonuçlar, PP'nin hafifletilmesi için kullanılan ITP şişirici ajanının, yoğunluk azaltımı ve mekanik özelliklerin korunması açısından etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ancak, optimum performans için şişirici ajan oranının dikkatle ayarlanması gerektiği vurgulanmıştır [26].

Xiu-Lei Jiang vd. tarafından izotaktik polipropilenin (iPP) hafifletilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şişirici ajan olarak süper kritik karbon dioksit (scCO₂) kullanılmıştır. Kullanılan iPP, 169°C erime sıcaklığı, %47 kristallik oranı ve 16 g/10 dk eriyik akış indeksi gibi özelliklere sahiptir. Çalışmanın temel amacı, polipropilenin yoğunluğunu azaltırken mekanik özelliklerini korumak ve homojen hücresel yapılar oluşturmaktır. Hafifletme işlemi, basınç düşürme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, polimer 156°C işlem sıcaklığı ve

10.4-16.1 MPa basınç aralığında scCO₂ ile doyurulmuş ve basınç hızla düşürüldüğünde polimer matrisinde mikro hücrel yapılar oluşmuştur. Bulgular, amorf bölgelerde hücrel yapıların daha yoğunlaştığını, kristalin alanlarda ise sınırlı kaldığını göstermiştir. Sonuç olarak, scCO₂'nin PP hafifletme süreçlerinde etkili bir şişirici ajan olduğu belirlenmiştir. Hücrel yapının homojenliği ve mekanik özelliklerin korunması, uygulanan basınç ve sıcaklık parametrelerinin optimize edilmesiyle mümkün olmuştur. Çalışma, çevre dostu yapısı ve enerji verimliliği sayesinde polipropilen hafifletme uygulamalarında sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır [27].

Franciela Arenhart Soares ve Sônia Marlí Bohrz Nachtigall taraflarından yapılan çalışmaya göre Bu çalışmada, polipropilen (PP) ve ahşap unu içeren bir kompozitin hafifletilmesi amacıyla kimyasal ve fiziksel şişirici ajanlar kullanılmıştır. Kullanılan PP, dayanıklılık, kimyasal direnç ve işlenebilirlik özellikleri ile dikkat çekerken, maleik anhidrit ile modifiye edilmiş PP (PP-MA) ve %10 oranında ahşap unu, kompozitin çevresel sürdürülebilirliğini artırmıştır. Hafifletme sürecinde, kimyasal şişiriciler olarak AZDC ve sodyum bikarbonat-sitrik asit (Hydrocerol), fiziksel şişirici olarak ise Expancell mikro kapsülleri kullanılmıştır. Şişiricilerin polimer matrisinde hücrel yapılar oluşturması için sıcak presleme yöntemi uygulanmış, işlem sıcaklıkları 170-190°C arasında optimize edilmiştir. Sonuçlar, Hydrocerol'ün kompozitin yoğunluğunu %24 oranında azaltırken daha homojen hücrel yapılar oluşturduğunu göstermiştir. AZDC ve sodyum bikarbonat gibi şişiriciler, düzensiz hücrel yapılar oluşturmuş, ancak Expancell, yoğunluk azaltımı ile mekanik özellikler arasında dengeli bir çözüm sunmuştur. Bu çalışma, PP'nin hafifletme süreçlerinde şişirici ajan seçiminin, malzemenin yoğunluk azaltımı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır. Hydrocerol ve Expancell, hafif ve dayanıklı kompozit üretimi için ideal seçenekler olarak öne çıkmaktadır [28].

Cristina Saiz-Arroyo vd. yapmış oldukları çalışmada, polipropilenin (PP) hafifletilmesi için kimyasal ve fiziksel şişiricilerin kullanımını incelemektedir. Kullanılan polimer, %44.4 kristallik oranına ve 150.4°C erime sıcaklığına sahip bir random PP kopolimeridir. Şişirici ajanlar olarak AZDC ve süper kritik karbon dioksit (CO₂) kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, yoğunluğu azaltırken mekanik dayanıklılığı koruyan homojen hücrel yapıların elde edilmesidir. PP ve AZDC karışımı, çift vida ekstrüderde karıştırılmış ve sıcak presleme ile şekillendirilmiştir. Fiziksel şişirici CO₂ ise basınç düşürme yöntemiyle uygulanmıştır. Bu süreçte polimer, süper kritik CO₂ ile doyurulmuş ve hızlı basınç düşüşü ile kapalı hücrel yapılar oluşturulmuştur. Sonuçlar, CO₂'nin kapalı hücre yapıları sayesinde daha iyi elastikiyet

ve enerji emilim kapasitesi sağladığını, AZDC'nin ise düşük yoğunluklarda homojen hücre yapıları sunduğunu göstermiştir. Bu çalışma, PP hafifletme süreçlerinde kullanılan şişirici ajanların, hücresel yapı kontrolü ve mekanik performans açısından optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [17].

Wang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada polipropilen (PP) mikro gözenekli köpüklerin hazırlanması için yeni bir köpük enjeksiyon kalıplama (FIM) teknolojisi geliştirilmiştir. Farklı fiziksel şişirici gazların (N_2 , He, CO_2 ve Ar) kullanımı ile PP'nin hücresel yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, yeni RIC-FIM teknolojisi düşük basınçlı gazlarla çalışmaktadır ve süper kritik pompalar gerektirmez. Çekme işlemi ile farklı genişleme oranları (2-5 kat) elde edilmiştir. CO_2 ve Ar gazlarının, daha yüksek hücre yoğunluğu ve daha küçük hücre boyutları sağladığı tespit edilmiştir. Buna karşılık, N_2 ve He kullanımı daha büyük ve düzensiz hücre yapılarına yol açmıştır. Ayrıca, CO_2 ile şişirilen köpüklerin sıkışma mukavemeti ve elastik modülü en yüksek düzeydeyken, N_2 en düşük mekanik performansı göstermiştir. Termal analizler, CO_2 ve Ar gazlarının PP'nin kristalitesini artırarak (%51.6'ya kadar) köpüğün mekanik dayanımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur [15].

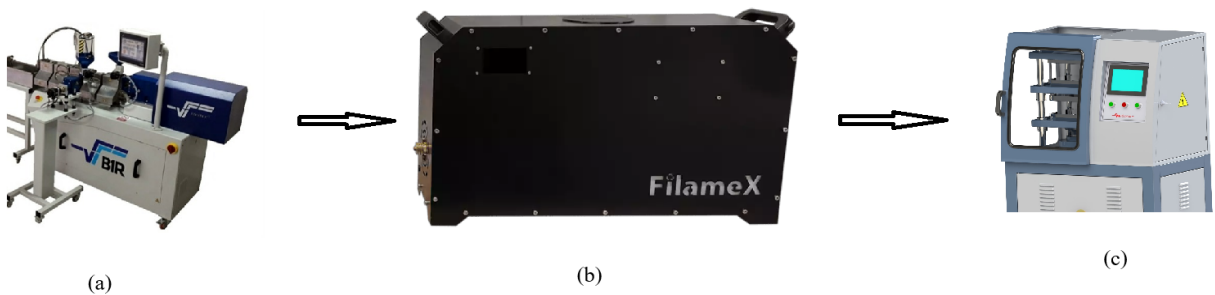


3.MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Ticari kodu Globalprene 1487 olan, ağırlıkça %28.5 yağ içeriğine ve %55 stiren oranına sahip stiren-bütadien blok kopolimer (SBS), Shore A 92 sertliğine sahiptir ve LCY Chemical Corp. (Tayvan) firmasından temin edilmiştir. Ticari kodu Merlot 205 olan, Petroyağ (Türkiye) firmasından temin edilen parafinik bazlı mineral yağ, SBS polimerinin plastifikasyonunda kullanılmıştır. Ürün 835-875 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Ticari kodu Expancell 920 DU 120 ve 118–128°C başlangıç sıcaklığına sahip fiziksel şişirici ajan olarak kullanılmıştır. Kimyasal şişirici olarak ise kullanılan ilk ajanımız AZDC dir. Katalizör olarak çinko oksit (ZnO) kullanılmıştır. Son olarak kullanılan şişirici ajan ise NaHCO₃'dır. Katalizörü olarak ise C₆H₈O₇ kullanılmıştır. Örneklerin hazırlanması 3 temel kademede gerçekleştirilmiştir;

Birinci aşamada SBS içerisine farklı miktarlarda proses kolaylaştırıcı wax eklenerek reolojik özellikler modifiye edilmeye çalışılmıştır. Bu kademede yapıya katılan wax bir yandan süreci kolaylaştırırken bir yandan da şişirici katmak için gerekli düşük sıcaklıkta proses edilebilme koşulunu sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu amaçla ağırlıkça %15,%22.5 ve %30 oranlarında wax SBS faza (KÖKBİR marka, RTX-T18 model 18 lik vidaya sahip) çift vidalı ekstrüderde 60-120-145-160-170 sıcaklık profili uygulanarak katılmıştır. Bu kademe elde edilen granüllerin reolojik değerlendirilmesi sonucu optimum wax oranı belirlenmiş sonraki kademelerde ise wax oranı sabitlenerek polimer faz formülasyonu belirlenmiştir.

İkinci kademede ise tek vidalı ekstrüderde (Filamex marka, FX-20 model) kullanılacak şişirici ajanların patlama sıcaklıklarının altında (AZDC için 120°C, Expancell için 105°C ve sodyum bir karbonat için 110°C alınmıştır) ki sıcaklıklarda şişirici ajan tozları ilk kademede optimize edilen polimer faz içerisine katılmıştır. Ekstrüzyon sonrası elde edilen filamentler granülatörden geçirilerek ürünler granül formuna getirilmiştir.



Şekil 3. 1. (a) Çift vidalı ekstrüderde wax katılması. (b) Tek vidalı ekstrüderde şişirici malzeme katılması. (c) Sıcak pres yöntemi ile levha oluşturulması.

Üretimin son aşamasında, yoğunlukları 0.6 g/cm^3 olacak şekilde tasarlanan kompozit örnekler, belirli hacimdeki özel kalıplara doldurulmuştur. 0.6 g/cm^3 yoğunluk seçilmesinin nedeni, ayakkabı sektöründe hedef yoğunluk değerinin 0.6 g/cm^3 olmasıdır. Bu sektörde, hafiflik ve darbe emicilik gibi özelliklerin dengeli bir şekilde sağlanabilmesi için genellikle SBS esaslı polimerler tercih edilmekte ve bu yoğunluk aralığı kullanılmaktadır.

Kompozit örnekler, Gülnar marka, sıcak ve soğuk pres özellikli, 120 bar maksimum basınç kapasitesine sahip bir sıcak pres makinesinde işlenmiştir. Kullanılan levha kalıbının boyutları 7 mm boy x 7 mm en x 5 mm kalınlık şeklindedir. Üretim sürecinde her levhaya sabit miktarda gramaj eklenmiş ve 160°C sıcaklıkta, makinenin sağlayabildiği maksimum basınç değeri kullanılarak sıcak pres uygulanmıştır. Her numune, yaklaşık 30 saniye sıcak pres ve ardından 30 saniye soğuk pres aşamalarında maksimum basınç altında bekletilmiştir. Bu süreç sırasında, önce polimer matrisin erimesi, ardından şişirici ajanların sıcaklık etkisiyle aktive olarak patlaması sağlanmıştır.

Presleme işlemi sonrasında elde edilen malzemelerin yoğunluk analizleri yapılmış ve bu analizler doğrultusunda optimum katkı oranları belirlenmiştir. Böylece, tüm örneklerde hedeflenen 0.6 g/cm^3 yoğunluk sağlanarak, malzemenin uygulama alanına uygun mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması amaçlanmıştır.

3.1. Karakterizasyon Yöntemleri

3.1.1.Çekme testi

Çekme testleri; AHP marka çift kolonlu çekme test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Testler ASTM D 638 standardında bulunan Tip 1 numunesine göre yapılmıştır. Test hızı olarak 50 mm/dk uygulanmıştır.



Şekil 3. 2. Çekme Test Cihazı [29].

3.1.2. Aşınma testi

Amede marka, AT-R7010-A model test cihazı, ASTM D4060 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 3. Aşınma Test Cihazı [30].

3.1.3. Sertlik testi

Bu çalışmada, polimer numunelerin sertlik değerleri ASTM D2240 test standardına uygun olarak belirlenmiştir. Testler, Barnwell marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçümler Shore A ölçeğine göre yapılmıştır.



Şekil 3. 4. Shore A test cihazı [31].

3.1.4. Reoloji testleri

Örneklerin reolojik analizleri KÖKBİR marka Meltlab model kapiler reometre ile gerçekleştirilmiştir. Testler 110 °C’de tek kapilerli olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 5. Kapiler reometre.

3.1.5. Optik Mikroskop Analizleri

Çalışma kapsamında SOIF-BK5000 model optik mikroskop kullanılmış; elde edilen görüntüler, Zeiss marka dijital görüntü kaydedici aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Görüntüler üzerinde ölçeklendirme boyut ölçümleri, sistemin kendi yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 6. Optik mikroskop



4. ANALİZ BULGULARI

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Polimer Fazın Plastifiyan Optimizasyonu

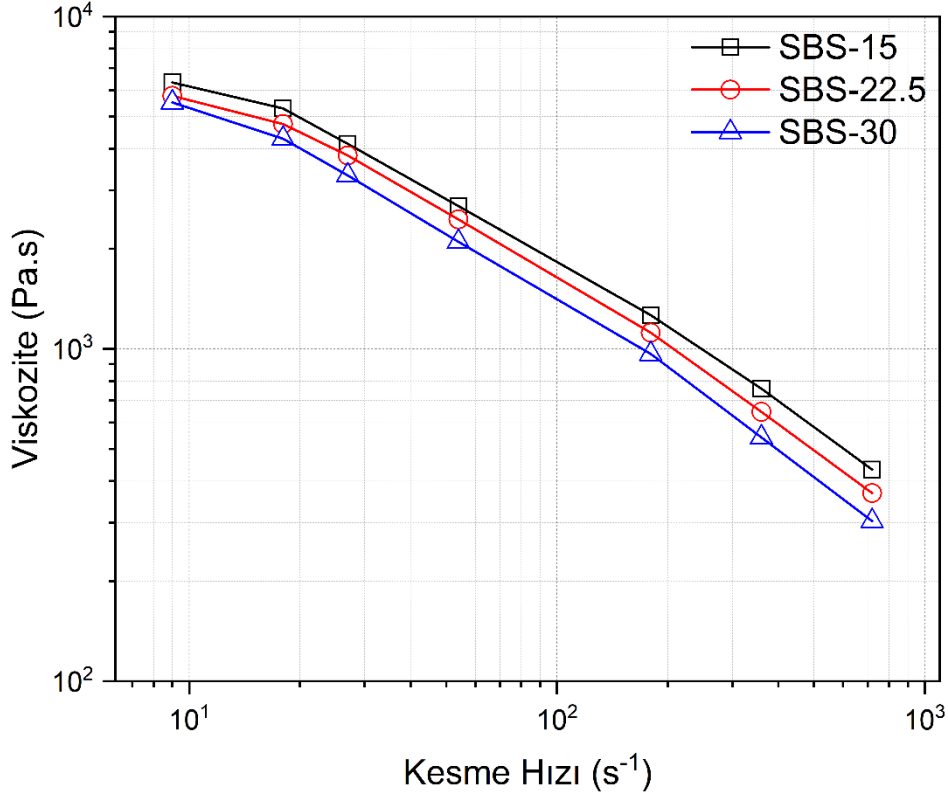
4.1.1. Plastifiyan Etkisinin Reolojik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Polimer matrislerde gerçekleştirilen şişirme işlemlerinde, şişirici ajanlar genellikle kendi patlama sıcaklıklarının altında sisteme dahil edilmektedir. Bu sıcaklıklar, kullanılan şişirici ajanın türüne bağlı olarak 110–115 °C'ye kadar düşebilmektedir. Ancak bu düşük sıcaklıklarda, polimer fazın eriyik viskozitesi önemli ölçüde artmakta ve bu durum eriyik prosesin sağlıklı bir şekilde yürütülmesini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda, yüksek viskozite, şişirici ajanlardan açığa çıkan gazın matris içinde yeterince genişmesini engellemekte ve bu durum por oluşumunu da ciddi şekilde kısıtlamaktadır. Öte yandan, eriyik viskozitenin düşürülmesi, por oluşumunu daha düzenli ve kontrollü hâle getirmekte; ancak viskozitenin aşırı düşmesi durumunda, yüksek sıcaklıklarda işlem yapmak zorlaşmakta ve oluşan porların stabilizasyonu güçleşmektedir. Bu nedenle, proses edilebilirlik ile por stabilitesinin dengelenebilmesi amacıyla, tez süresince kullanılacak olan SBS esaslı polimer fazın eriyik viskozitesi önceden optimize edilmiştir. Bu amaçla, sıvı formda wax farklı oranlarda (%15, %22.5 ve %30) SBS faza ilave edilerek elde edilen numunelerin ekstrüzyon sırasındaki işlenebilirlik davranışı ve kapiler reometre ile belirlenen viskozite değişimleri detaylı şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada, SBS matrisine %15, %22,5 ve %30 oranlarında plastifiyan ilave edilerek hazırlanan numuneler sırasıyla SBS-15, SBS-22.5 ve SBS-30 olarak adlandırılmıştır.

Şişirici ajan olarak kullanılan genişleyen küreler tipi ajanların (Expancell) ürün teknik bilgi formlarında, polimer faza patlatılmadan katılmaları gerektiği ve bu işlemin en fazla 110–115 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmesinin önerildiği belirtilmektedir. Bu nedenle, farklı wax içeriğine sahip üç numune, bu sıcaklık koşullarında tek vidalı bir ekstrüderde filament üretim denemelerine tabi tutulmuş ve proses sırasında cihazların çalışma durumu ile ürün stabilitesi gözlemlenmiştir. Yapılan denemelerde, %15 wax içeriğine sahip numunede cihazın yüksek viskozite nedeniyle sürekli zorlandığı ve üretimin kesintiye uğradığı görülmüştür. %22,5 wax içeriğinde ise üretim sürekliliği sağlanabilmiş olsa da, ekstrüderin çalışma torku üretim için sınır değerlere yaklaşmış ve sağlıklı bir işlem süreci yürütülememiştir. Buna karşın, %30 wax içeriğine sahip numunede cihazın stabil şekilde çalıştığı, üretimin kesintisiz sürdürülebildiği ve yüzey kalitesi açısından kabul edilebilir özellikte filament elde edildiği gözlemlenmiştir.

Örneklerin reolojik özelliklerinin kapsamlı şekilde değerlendirilmesi amacıyla üç farklı analiz yöntemi kullanılmıştır. Ekstrüderde elde edilen üretim tecrübelerine ilaveten, bu deneyimlerin kantitatif olarak ortaya konması ve süreç parametrelerinin sayısal verilerle desteklenmesi amacıyla, laboratuvar ölçekli reolojik testler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, şişirici ajanların düşük sıcaklıkta polimer faza katıldığı işlem koşullarını temsil etmesi amacıyla 110 °C’de kapiler reometre testleri gerçekleştirilmiş ve bu testler ile düşük sıcaklıklarda polimerin viskozite davranışı belirlenmiştir. Bu analiz, şişirme ajanının patlatılmadan polimer matrisine dahil edilmesi sürecinde proses edilebilirliğin optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, yine 110 °C sıcaklıkta, melt-mixer cihazında tork ölçümleri yapılmış ve bu sayede ekstrüderde karşılaşılması muhtemel tork değerlerinin kantitatif olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Böylece, düşük sıcaklıktaki viskozite kaynaklı mekanik zorlanmaların cihaz üzerindeki etkileri öngörülebilir hâle getirilmiştir. Son olarak, polimer fazın şişirilme sırasındaki reolojik davranışını daha iyi anlayabilmek amacıyla, 160 °C’de rotasyonel reometre ile frekans tarama testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test ile, şişirme sürecinde polimerin viskoelastik özelliklerinin nasıl değiştiği değerlendirilmiş ve köpük yapısının oluşumu sırasında matrisin davranışı hakkında detaylı bilgi edinilmiştir.

Şekil 4.1’de, SBS-15, SBS-22.5 ve SBS-30 numunelerinin 110 °C’de ölçülen viskozite-kesme hızı ilişkisi verilmiştir. Şekilde tüm numunelerin kesme incelme (shear thinning) davranışı olarak bilinen ve viskozitenin kesme hızı arttıkça azalması olarak açıklanan davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir. Plastifiyan içeriğindeki artışa bağlı olarak, incelendiğinde SBS-15 numunesinin tüm kesme hızları boyunca en yüksek viskozite değerlerini sergilediği görülürken bu durum, düşük plastifiyan oranına bağlı olarak zincir hareketliliğinin sınırlı kalmasıyla ilişkilendirilmiştir. En yüksek kesme hızı olan 720 s⁻¹’de SBS-15’in viskozitesi yaklaşık 433 Pa·s olarak ölçülürken . SBS-22.5 numunesinde viskozitesi 367,9 Pa·s SBS-30 numunesi ise 303,0 Pa·s olarak belirlenmiştir. Viskozitedeki bu düşüş, plastifiyan katkısının zincirler arası etkileşimleri zayıflatması ve segmental hareketliliği artırmasıyla ilişkilendirilmiştir.

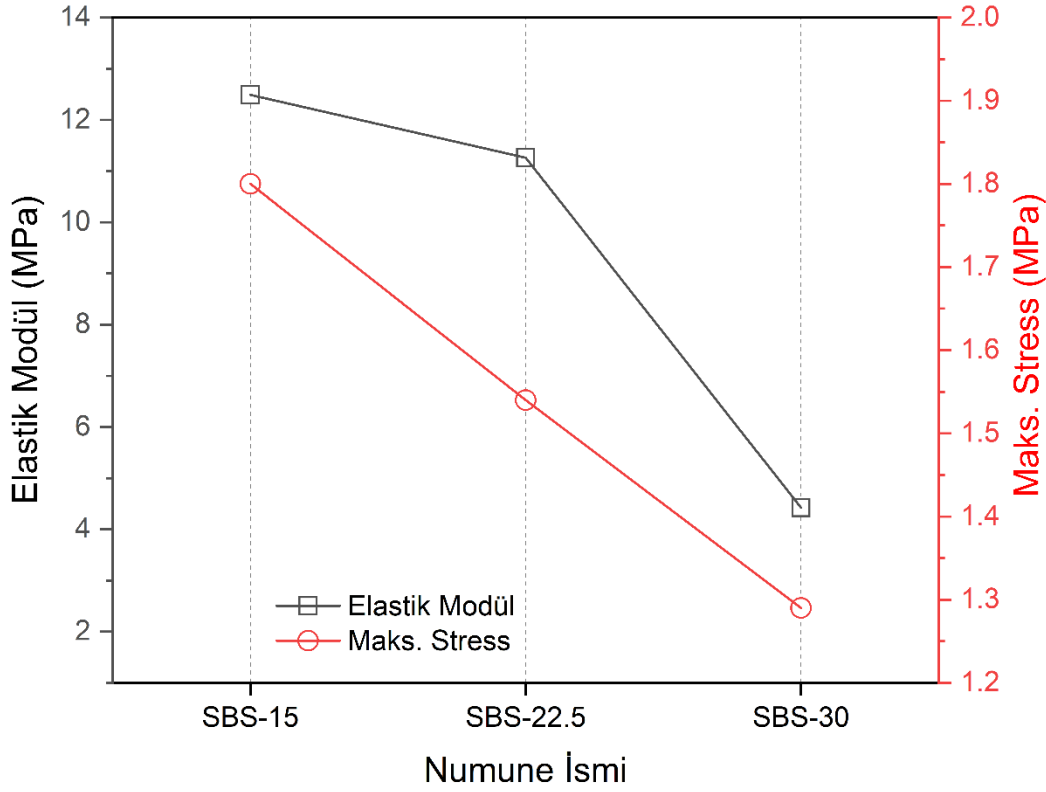


Şekil 4. 1. Kapiler reometre test sonucu.

4.1.2. Plastifiyan Etkisinin Mekanik Özelliklere Etkisi

SBS esaslı malzemelerin birçok mühendislik uygulamasında kullanılması, bu yapıların yalnızca proses edilebilirliğinin değil, aynı zamanda mekanik ve aşınma performanslarının da dikkatle değerlendirilmesini gerektirmektedir. Özellikle plastifiyan ilavesiyle sağlanan viskozite düzenlemesinin, nihai ürünün yapısal bütünlüğü ve kullanım ömrü üzerindeki etkileri önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, farklı oranlarda plastifiyan içeren numunelere çekme testi uygulanmış ve elde edilen elastik modül, maksimum gerilme ve kopma uzaması değerleri üzerinden plastifiyan içeriğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Buna ek olarak, SBS bazlı sistemlerin kullanıldığı pek çok uygulamada yalnızca proses edilebilirlik değil, uzun süreli mekanik performans da büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, farklı plastifiyan oranlarına sahip numuneler üzerinde aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve plastifiyan içeriğine bağlı olarak malzemenin aşınma dayanımındaki değişimler değerlendirilmiştir.

Ayrıca, yapısal bütünlüğü ve servis ömrünü etkileyen diğer temel fiziksel parametreler olan sertlik (Shore A) ve yoğunluk değerleri de ölçülerek, plastifiyan ilavesinin bu özellikler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Böylece, yalnızca işlem kolaylığı açısından değil, aynı zamanda yapısal performans bakımından da plastifiyan optimizasyonunun etkileri bütüncül bir şekilde ortaya konmuştur. Şekil 4.2.'de farklı plastifiyan oranlarına sahip SBS numunelerinin elastik modül ve maksimum gerilme değerleri birlikte verilmiştir. Plastifiyan içeriğinin artmasıyla her iki mekanik parametrede de belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Özellikle %15 plastifiyan içeriğine sahip SBS-15 numunesi, yaklaşık 12,5 MPa'lık elastik modül ve 1,75 MPa maksimum gerilme değeriyle en yüksek mekanik performansa sahip numune olmuştur. %22,5 plastifiyan içeriğine sahip SBS-22.5 numunesinde hem elastik modül hem de maksimum gerilme değerlerinde düşüş gözlemlenmiş; bu durum, polimer zincirleri arasındaki etkileşimlerin zayıflaması ile açıklanabilir. Plastifiyan oranının %30'a yükseltildiği SBS-30 numunesinde ise elastik modül yaklaşık 4 MPa seviyesine kadar gerilemiş, maksimum gerilme değeri ise 1,3 MPa seviyelerine düşmüştür. Bu sonuçlar, yüksek plastifiyan içeriğinin malzemenin rijitliğini ve taşıyabileceği maksimum gerilme değerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu durum, plastifiyan moleküllerinin polimer zincirleri arasındaki mesafeyi artırarak hareketliliği artırması ve böylece yapısal bütünlüğü zayıflatmasıyla ilişkilendirilebilir.[33]. Kopma uzaması değeri, tüm numunelerin test cihazının ölçüm sınırının (%500 uzama) üzerinde deformasyon sergilemesi nedeniyle nicel olarak raporlanamamıştır. Bununla birlikte, bu durum numunelerin tamamının yüksek elastikiyet özelliklerini koruduğunu göstermiştir.



Şekil 4. 2. Plastifiyan kullanımının çekme testinden elde edilen mekanik özelliklere etkisi

Farklı plastifiyan oranlarına sahip numunelerin aşınma direnci, sertlik (Shore A) ve yoğunluk değerleri Tablo 4.1’de sunulmuştur. Aşınma testlerinde, değerlendirme parametresi olarak aşınma direnci katsayısı kullanılmıştır. Bu katsayı, test süresi boyunca numuneden kaybolan hacmi temsil etmekte olup, malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği direncin nicel bir göstergesi olarak raporlanmıştır. Tablo 4.1’de yer alan yoğunluk verilerine bakıldığında, plastifiyan oranı arttıkça SBS numunelerinin yoğunluklarında hafif bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan plastifiyan katkısının polimer matrisine kıyasla daha düşük yoğunlukta olmasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak, yoğunluk değişimlerinin sınırlı düzeyde olması ve tüm numunelerde $0,91-0,94 \text{ g/cm}^3$ aralığında değerler elde edilmesi, bu parametredeki farklılıkların uygulama açısından dikkate değer bir etki yaratmadığını göstermiştir. Aşınma direnci verileri incelendiğinde, plastifiyan içeriğinin artmasıyla birlikte malzemenin aşınmaya karşı direncinin azaldığı açıkça ortaya konmuştur. SBS-15 numunesi en iyi performansı sergilerken, plastifiyan oranının %22,5’e çıkarıldığı SBS-22.5 numunesinde aşınma dayanımında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. SBS-30 numunesi ise en düşük aşınma direncini göstermiştir. Bu eğilim, plastifiyan ilavesiyle polimer zincirleri arasındaki etkileşimlerin zayıflaması ve matrisin aşınma yüklerine karşı daha az direnç göstermesiyle açıklanmıştır. Sertlik değerleri açısından değerlendirildiğinde, artan plastifiyan oranına paralel olarak Shore A sertliğinde kademeli bir

azalma meydana gelmiştir. SBS-15 numunesi en yüksek sertliği sergilemiştir. Buna karşılık, SBS-30 numunesi en düşük sertlik değerine sahip olmuştur. Bu sonuçlar, plastifiyan katkısının polimer yapının rijitliğini azalttığını ve elastik karakteri artırdığını göstermiştir. Sertlikteki bu azalma, aynı zamanda aşınma direncindeki düşüşle de paralellik göstermiştir.

Tablo 4. 1. Aşınma ve sertlik testi sonuçları.

Ölçülen Parametre	SBS-15	SBS-22.5	SBS-30
Yoğunluk (g/cm ³)	0,9358	0,9283	0,9153
Aşınma Direnci (mm ³)	172,218	207,816	217,816
Sertlik (Shore A)	80	70	65

4.1.3. Plastifiyan Etkisinin Şişirilme Sırasında Morfolojik Özelliklere Etkisi

Plastifiyan içeriğinin morfolojik yapı üzerindeki etkisinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla tüm şişirme işlemleri, aynı koşullar altında ve sabit oranda şişirici ajan kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, genişleyen küreler sınıfında yer alan ve ticari adı Expancell olan şişirici ajan tercih edilmiş; tüm numunelere sabit olarak 2 phr oranında ilave edilmiştir. Böylece, oluşan hücre yapılarına ait gözlemlerin yalnızca plastifiyan oranındaki değişimden kaynaklandığı varsayımıyla değerlendirme yapılması mümkün hâle getirilmiştir. Şişirme işlemi sonucunda oluşan hücre yapıları, optik mikroskop kullanılarak incelenmiş ve bu kapsamda hücre boyutları ile hücre yoğunluğu parametreleri değerlendirilmiştir.

Optik mikroskop görüntülerine göre, plastifiyan içeriği arttıkça hücre boyutlarında genel bir artış eğilimi gözlemlendiğinden bahsetmek mümkündür. SBS-15 ve SBS-22.5 numunelerinde hücre boyutları birbirine yakın değerler (ortalamada 65-70 mikron) gösterirken SBS-30 numunesinde ortalama hücre boyutu 122,2 µm'ye yükselmiş ve önceki numunelere kıyasla neredeyse iki katına varan bir artış göstermiştir. Görselde yer alan hücrelerde çapların belirgin şekilde büyümesinin yanı sıra hücre birleşmelerinin başladığı da ayrıca gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek plastifiyan içeriğine bağlı olarak matrisin viskozitesinin ciddi şekilde düşmesiyle açıklanabilir. Düşük viskozite, şişirici ajanların açığa çıkardığı gazın daha rahat genişlemesine olanak tanımıştır. Bu sonuçlar, %15 ve %22,5 plastifiyan içeriğine sahip numunelerde hücre morfolojisinin tam anlamıyla gelişmediğini, dolayısıyla bu numunelerin şişirme süreci için gerekli reolojik koşulları yeterli düzeyde sağlayamadığını göstermiştir. Buna

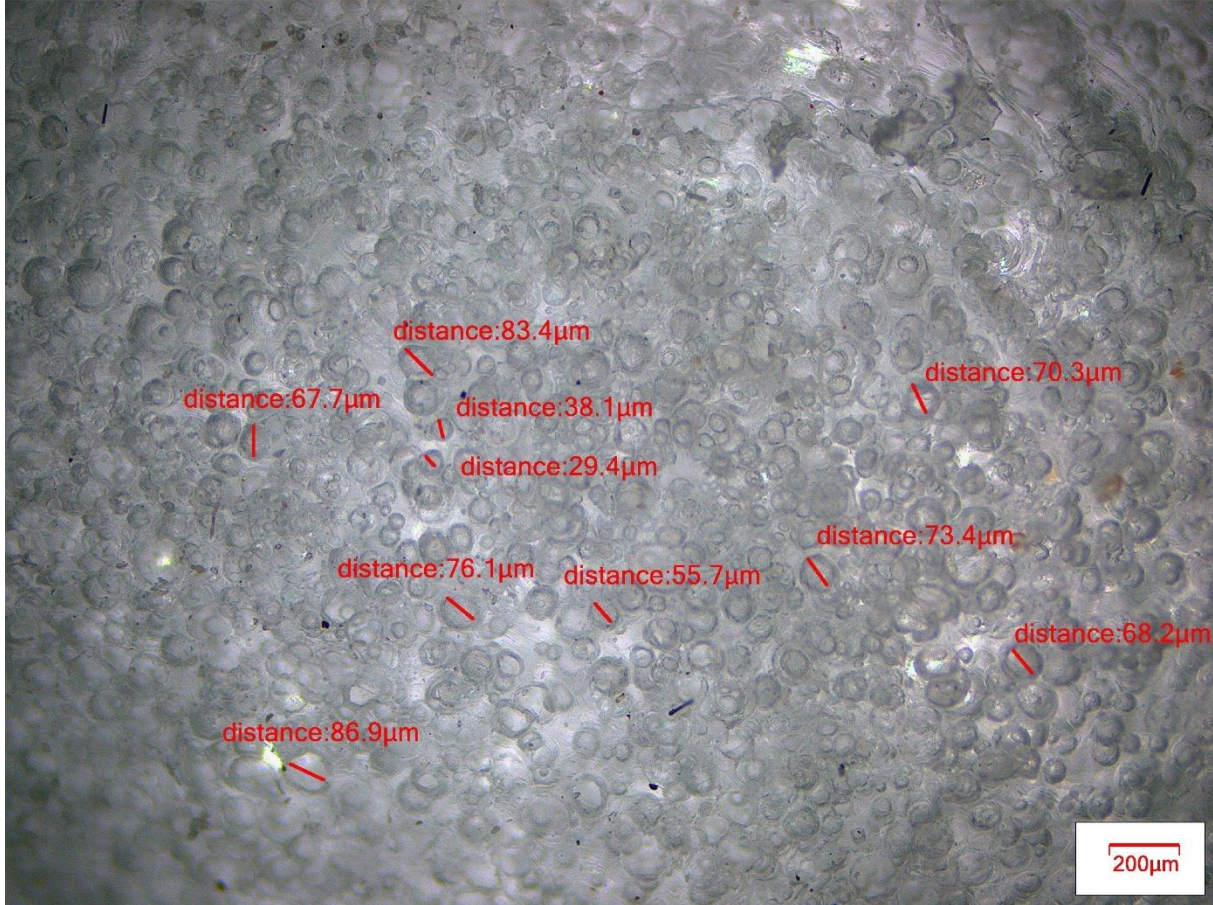
karşılık, %30 plastifiyan içeriğine sahip numunede daha büyük ve belirgin hücrelerin oluşması, bu reolojik eşiklerin aşıldığını ve şişirme açısından uygun bir matris yapısının sağlandığını ortaya koymuştur. Her ne kadar bu numune, önceki bölümlerde gösterildiği üzere mekanik özellikler açısından en düşük performansı sergilemiş olsa da morfolojik açıdan hedeflenen hücre yapısının elde edilebilmesi nedeniyle bu çalışma kapsamında tercih edilmiştir.



Şekil 4. 3. SBS-15 ve 2 phr fiziksel şişirici eklenmiş SBS polimerinin optikmikroskop görüntüsü.

Şekil 4.3'te, %15 wax ve 2 phr Expancell şişirici ajanı içeren SBS polimer numunesinin mikroyapısal özelliklerini göstermektedir. Görselde, hücresel yapının genel olarak homojen bir dağılım sergilediği ve gözenekler arasında mesafelerin farklılık gösterdiği görülmektedir. Gözenek çaplarının 50,3 µm, 60,8 µm ve 62,5 µm arasında değişiklik göstermesi, şişirici ajan ilavesinin polimer matrisi içerisinde kontrollü bir genişlemeye olanak tanıdığını işaret etmektedir. Yapıdaki gözenek boyutlarının mikrometre seviyesinde kalması, köpük yapısının mekanik dayanım ve hafiflik özellikleri açısından dengeli bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, gözenek boyutlarındaki farklılık, matrisin izotropik bir yapı sergilemediğini,

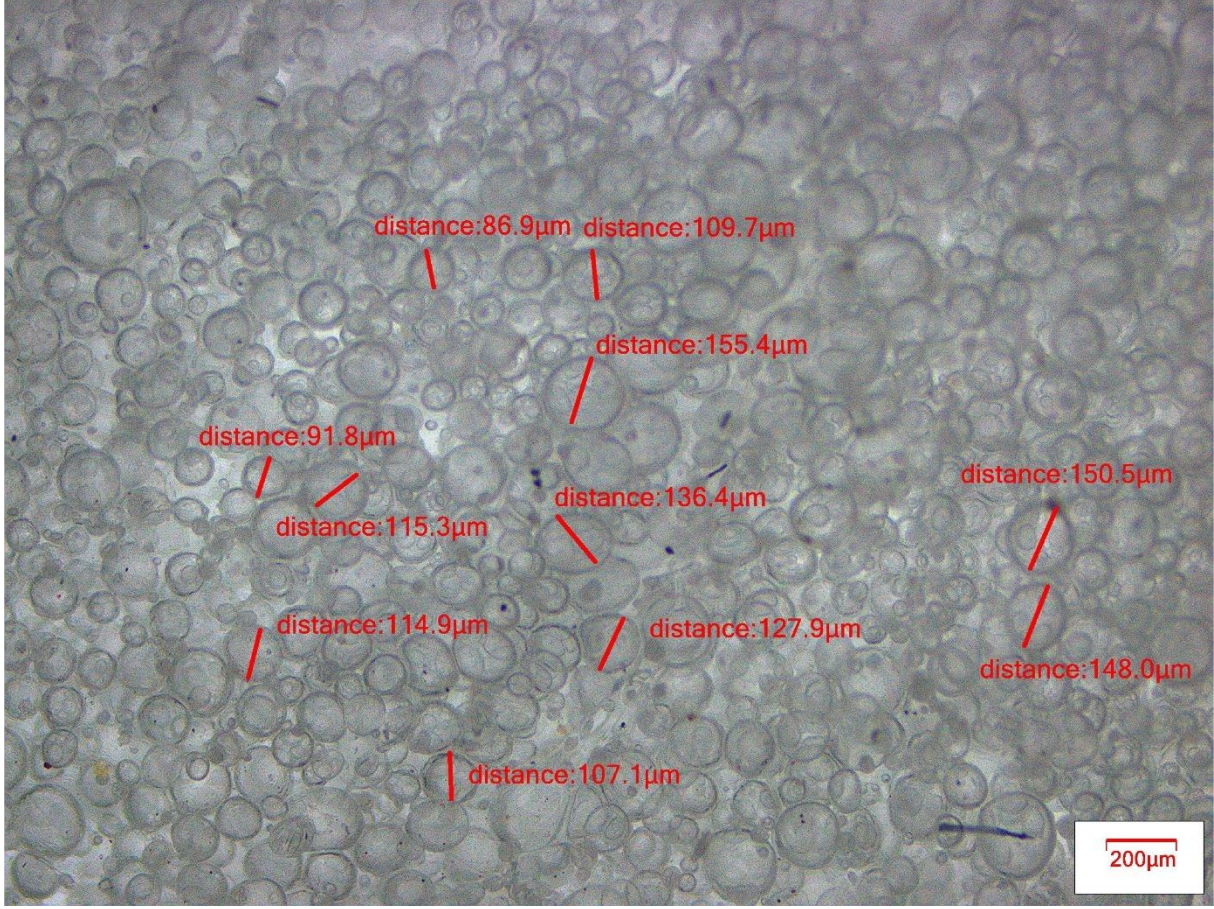
ancak işlenebilirlik açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu ortaya koymaktadır. Görseldeki 100 µm ölçek çubuğu, hüresel yapının boyutlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 4. 4. SBS-22.5 ve 2 phr fiziksel şişirici ajan içeren SBS polimerinin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 4.4'te görünen optik mikroskop görüntüsü, %22,5 wax ve 2 phr Expancell şişirici ajanı içeren SBS polimer numunesinin mikroyapısal yapısını göstermektedir. Görsel incelendiğinde, gözeneklerin genel olarak homojen bir dağılım sergilediği, ancak çap boyutlarının farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Gözenek çaplarının 52,8 µm, 60,8 µm, 64,9 µm, 66,1 µm, 70,3 µm ve 83,2 µm arasında değişiklik göstermesi, polimer matrisinde gaz kabarcıklarının genişleme oranlarının farklılaştığını ve yer yer birleşmeler meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Gözenek boyutlarının mikrometre seviyesinde kalması, hüresel yapının mekanik dayanım ile hafiflik arasında bir denge sunduğunu göstermektedir. Ancak, gözeneklerin çaplarındaki farklılık, köpük yapısının tamamen izotropik olmadığını, belirli bölgelerde genişlemenin daha fazla gerçekleştiğini işaret etmektedir. Şekil 4.4 olarak adlandırılan bu görüntü, %22,5 wax içeriği ve 2 phr Expancell şişirici ajan kullanılarak elde edilen numunenin hüresel yapısının

şişirme sürecindeki dinamiklere bağlı olarak farklı mikroyapısal özellikler sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4. 5. SBS-30 ve 2 phr fiziksel şişirici ajan içeren SBS polimerinin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 4.5, %30 wax ve 2 phr Expancell fiziksel şişirici ajanı içeren SBS polimer numunesinin mikroyapısal özelliklerini göstermektedir. Görüntüde gözeneklerin büyüklüklerinde ve dağılımlarında dikkat çekici farklılıklar gözlemlenmektedir. Gözenek çaplarının 39,1 µm ile 167,6 µm arasında değişmesi, köpük yapısının şişirme sürecinde genişleme oranlarının oldukça farklılaştığını ve bazı gözeneklerin birleşerek daha büyük yapılar oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle 122,6 µm, 127,7 µm ve 167,6 µm gibi büyük çaplı gözenekler, şişirme işlemi sırasında gaz kabarcıklarının birbirleriyle etkileşime girerek genişlediğini işaret etmektedir. Bunun yanı sıra, 66,2 µm ve 39,1 µm gibi daha küçük gözenekler, matris içerisinde gaz dağılımının tamamen homojen olmadığını göstermektedir. Bu durum, polimer matrisinin yüksek plastifiyan içeriği nedeniyle viskozitesinin azalması ve köpük yapısının stabilitesinin bir miktar düşmesine neden olabilir.

%15 ve %22,5 wax oranına sahip numunelerde, viskozitenin yüksekliği veya kontrolsüz genişleme nedeniyle homojen olmayan bir köpük yapısı elde edilmiştir. %15 wax oranında viskozitenin yüksek olması, şişirici ajanların matris içinde homojen dağılmasını engelleyerek daha küçük ve düzensiz gözenekler oluşmasına neden olmuştur. %22,5 wax oranında ise viskozitenin azalmasına rağmen gözeneklerin birleşerek büyük düzensiz yapılar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, %30 wax oranı, polimer matrisinin akışkanlık özelliklerini optimum seviyeye getirerek şişirici ajanların homojen dağılmasını sağlamış ve genişleme sırasında stabil bir köpük yapısının oluşmasına katkıda bulunmuştur. Bu nedenle, köpük yapısının işlenebilirlik, homojenlik ve hafiflik gibi istenen özellikleri sağlama açısından %30 wax oranı optimum içerik olarak seçilmiştir.

4.2. Katalizörlü Şişirici Ajan Sistemlerinde Katalizör Oranının Optimize Edilmesi

Bu bölümde, kimyasal şişirici ajan sistemlerinde şişirme verimliliğini etkileyen en kritik parametrelerden biri olan katalizör oranı incelenmiştir. Şişirici ajanların termal bozunma davranışlarının yalnız başına yeterli genişleme sağlayamaması nedeniyle, bu sistemlerde uygun katalizör türü ve miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, aktif çinko katalizörlüğünde bozunan AZDC ve sitrik asit katalizörlüğünde parçalanmış sodyumbikarbonat içeren iki farklı kimyasal sistem değerlendirilmiştir. Her iki sistemde de şişirici ajan oranı sabit tutulmuş, buna karşılık katalizör miktarı değiştirilmiş ve bu değişimin şişirme davranışı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu testlerle hem optimum katalizör oranı hem de bu orana karşılık gelen şişirme sıcaklık aralığı belirlenmiş ve sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere en verimli tepkime koşulları ortaya konmuştur.

Bu doğrultuda düşük sıcaklıkta şişirici ve katalizörleri eklenmiş polimer örnekler şişirici ajanların parçalanma sıcaklıklarının oldukça altında (yaklaşık 90–100 °C sıcaklık aralığında) sıcak presleme yöntemiyle 1.2 mm kalınlığında levhalar hâlinde şekillendirilmiştir. Daha sonra bu levhalardan 25 mm çapında disk numuneler elde edilmiş ve rotasyonel reometre cihazında test sürecine alınmıştır. Şekil 4.6’te gösterilen test düzeneğinde, numune diski alt plaka üzerine yerleştirildikten sonra, üst plaka numuneye yalnızca temas edecek şekilde yaklaştırılmıştır. Bu yaklaşım sırasında üst plakaya uygulanan kuvvet cihaz tarafından sürekli izlenmiş ve 0.2 N kuvvet değerine ulaşıldığında çene hareketi durdurulmuştur. Ardından, reometre cihazının çevresel fırın sistemi devreye alınarak, test ortamı 4 °C/dk sıcaklık artış hızıyla kontrollü şekilde ısıtılmaya başlanmıştır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte, şişirici ajanların katalizör etkisiyle aktive olması ve açığa çıkan gazın polimer matris içerisinde genişlemeye yol açması

beklenmiştir. Bu genleşme, üst plaka üzerinde ek bir kuvvet oluşmasına neden olduğundan, test süresince üst plakaya etki eden kuvvet sürekli olarak kaydedilmiştir. Böylece, şişirme mekanizmasının hangi sıcaklık aralığında başladığı, ne zaman maksimum genleşmeye ulaşıldığı ve katalizör oranının bu sürece etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir.

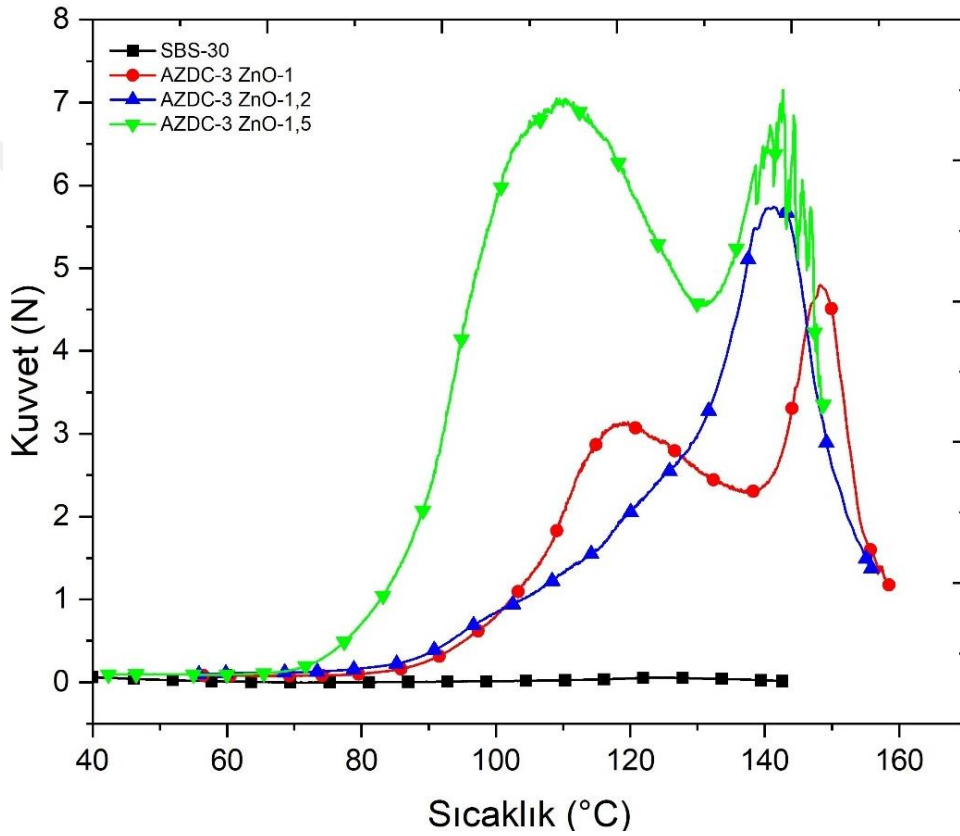


Şekil 4. 6. Reometredeki örnek yerleştiril şekli

Şekil 4.7’de, AZDC şişirici ajanı için farklı katalizör oranlarında gerçekleştirilen testlerin sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan numuneler, polimer faz, şişirici ajan tipi ve katalizör oranını yansıtacak şekilde SBS30-AZDC3-ZnOX şeklinde adlandırılmıştır. Burada “ZnO”, aktif çinko katalizörünü; “X” ise kullanılan katalizör miktarını (1, 1.2 ve 1.5 phr) temsil etmektedir. Tüm numunelerde AZDC miktarı sabit tutulmuştur (3 phr).

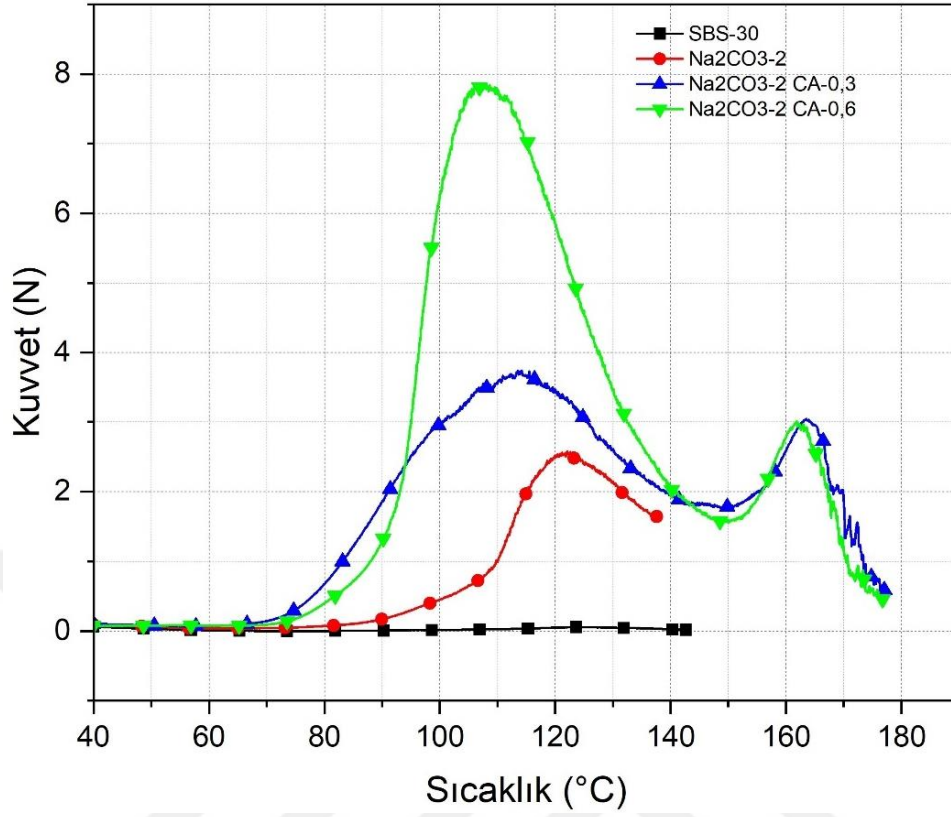
Grafikte yer alan genleşme eğrileri, yalnızca sıcaklık aralığını değil, aynı zamanda genleşmenin şiddetini de değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu bağlamda, pikin yüksekliği, şişirme sürecinde oluşan kuvvetin bir göstergesi olarak, sistemde gerçekleşen gaz çıkış miktarı ve genleşme şiddeti ile doğrudan ilişkilidir. Ancak bu değerlerin yüksekliği tek başına olumlu bir durum olarak değerlendirilmemelidir; zira kontrolsüz ve ani genleşmeler, hücre yapısının düzensiz oluşmasına ya da yapısal bütünlüğün bozulmasına neden olabilir. Bu çerçevede değerlendirildiğinde, AZDC/aktif çinko oranı 3 (ZnO1) olan numune yüksek sıcaklıkta bir pik oluşturmuş olsa da, genleşmenin daha geç başlaması ve daha yavaş ilerlemesi, reaksiyonun yeterince aktive olmadığını göstermektedir. Buna karşılık, AZDC/aktif çinko oranı 2 (ZnO1.5) olan numune, genleşmeye oldukça erken bir sıcaklıkta başlamış ve çok yüksek kuvvet değerlerine ulaşmıştır; ancak bu durumda çift pikli yapı ve keskin geçişler, sistemin termal

olarak kontrolsüz çalıştığına işaret etmektedir. Bu da üretim sürecinde stabilite sorunlarına neden olabilecek bir risktir. AZDC/aktif çinko oranı 2.5 (ZnO1.2) olan numune ise hem genişlemenin başladığı sıcaklık hem de üst plakada oluşan kuvvetin dengeli artış profili açısından en tutarlı sonucu vermiştir. Şişirme davranışı kontrollü bir şekilde ilerlemiş, kuvvetin sıcaklıkla birlikte düzenli artması sayesinde sistemin daha kararlı çalıştığı izlenimi edinilmiştir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, AZDC/aktif çinko oranının 2.5 olması, bu sistem için optimum reaktif dengeyi sağladığı ve proses açısından en uygun koşulları sunduğu sonucunu desteklemektedir.



Şekil 4. 7. AZDC/ZnO şişirici ajan sistemi için aktifleşme sıcaklığının belirlenmesi test sonuçları.

Şekil 4.8’de, sodyumbikarbonat şişirici ajanı için farklı sitrik asit oranlarında gerçekleştirilen testlerin sonuçları sunulmuştur. Numuneler, kullanılan polimer faz, şişirici ajan tipi ve katalizör oranını içerecek şekilde şu şekilde adlandırılmıştır: SBS30-SOD2-CAX, burada “CA” sitrik asit katalizörünü, “X” ise kullanılan sitrik asit miktarını (0, 0.3 ve 0.6 phr) temsil etmektedir. Bu testte, sodyumbikarbonat miktarı sabit tutulmuş (2 phr) olup, çalışmanın amacı SOD/CA oranının optimizasyonudur. Bu sonuçlarda ise SO/CA için optimum oran olarak 2/0.6 belirlenmiştir.



Şekil 4. 8. SOD/CA şişirici ajan sistemi için aktifleşme sıcaklığının belirlenmesi test sonucu.

4.3 Farklı Şişirici Ajanların Etkilerinin İncelenmesi

Bu bölümde, kullanılan şişirici ajanların türü ve miktarına bağlı olarak polimer matris içerisinde oluşan yapıların ve performans özelliklerinin nasıl değiştiği sistematik biçimde incelenmiştir. Çalışmanın önceki aşamalarında, şişirme işlemleri için uygun reolojik koşulları sağlamak amacıyla SBS matrise eklenen plastifiyan (wax) içeriği optimize edilmiş, ardından katalizörlü sistemlerde şişirme verimliliğini doğrudan etkileyen şişirici ajan/katalizör oranları belirlenmiştir. Elde edilen bu optimum koşullar, şişirme işlemlerinin kontrollü bir şekilde yürütülebilmesini sağlamıştır. Bu kademedeki ise, önceki bölümlerde sabitlenen optimum katalizör oranları korunarak, farklı türlerdeki şişirici ajanların konsantrasyonlarının artırılması veya azaltılmasının şişirme davranışı, hücre morfolojisi ve mekanik performans üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her bir sistem için toplam şişirici ajan içeriği belirli aralıklarla değiştirilmiş ve elde edilen yapılar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Böylece hem kullanılan şişirici ajan tipinin hem de miktarının kompozit yapının özelliklerine olan katkısı bilimsel temelde ortaya konmuştur. Bu bölüm kapsamında hazırlanan şişirici ajan içeren örneklerin detaylı bileşimleri Tablo 4.2’de sunulmuş olup, her bir sistemde

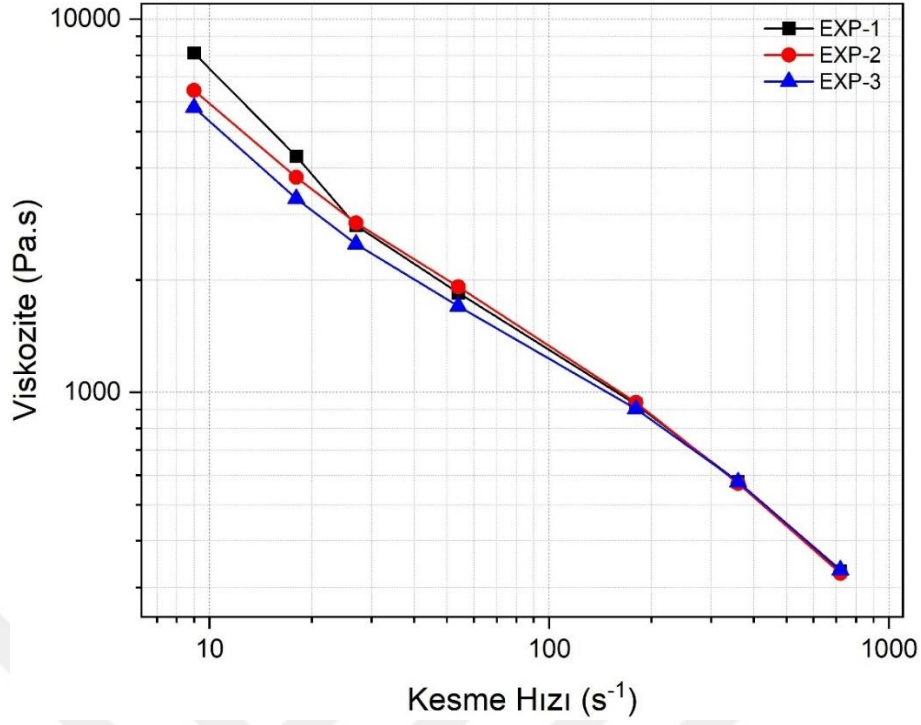
kullanılan şişirici ajan türü, miktarı ve varsa katalizör içeriği tablo üzerinde sistematik olarak verilmiştir.

Tablo 4. 2. Hazırlanan örneklerin detaylı içerikleri.

Örnek Kodu	Şişirici Tipi ve Oranı	Katalizör Tipi ve Oranı
AZDC-2	AZDC – 2 phr	ZnO – 0,8 phr
AZDC-3	AZDC – 3 phr	ZnO – 1,2 phr
AZDC-5	AZDC – 5 phr	ZnO – 2 phr
Na ₂ CO ₃ -1	SOD – 1 phr	CA – 0,15 phr
Na ₂ CO ₃ -2	SOD – 2 phr	CA – 0,3 phr
Na ₂ CO ₃ -3	SOD – 3 phr	CA – 0,45 phr
Exp-1	EXPANCEL – 1 phr	
Exp-2	EXPANCEL – 2 phr	
Exp-3	EXPANCEL – 3 phr	

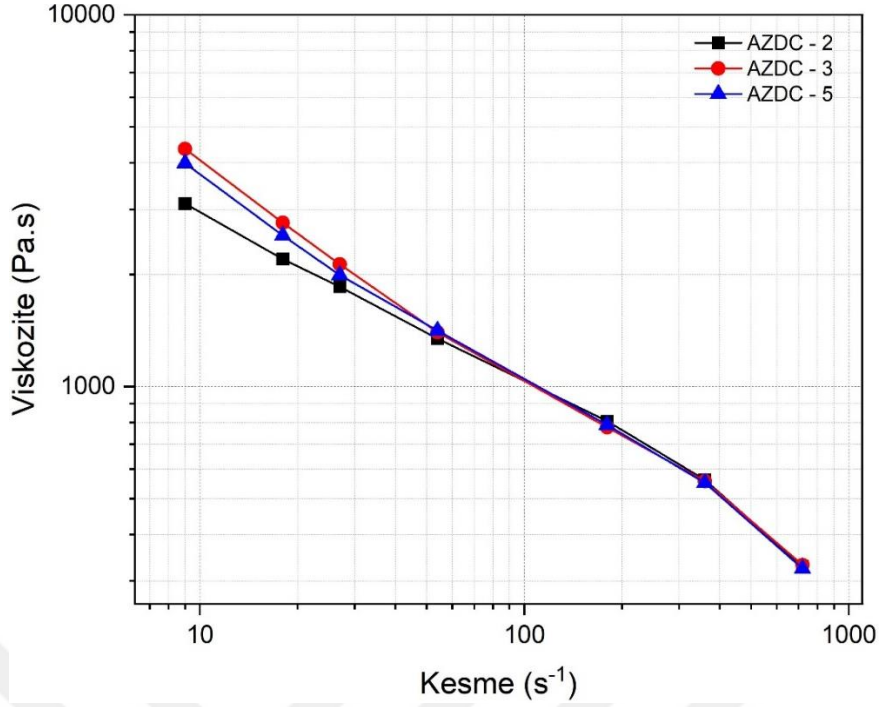
4.3.1 Reoloji Testleri

Bu çalışmada, şişirici ajanların polimer matrisine katılması sırasında karşılaşılan reolojik davranışları değerlendirmek amacıyla, kapiler reometre ile viskozite-kesme hızı analizleri 110 °C'de gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık, şişirici ajanların henüz aktifleşmeden polimer fazla karıştırıldığı ve şişirme tepkimesinin başlamadığı kritik işleme sıcaklığı olup, viskozitenin yüksek seviyelerde seyrettiği ve işlenebilirliğin sınırlandığı bir bölgedir. Bu nedenle bu analiz, özellikle şişirici ajanın etkili ve homojen şekilde matris içerisine dağılabilmesini sağlamak açısından kritik bir ön değerlendirme sunmaktadır. Expancell (fiziksel şişirici) sistemlerine ait viskozite değerleri incelendiğinde (Şekil 4.9), tüm numunelerin karakteristik kesme incelleme (shear thinning) davranışı sergilediği ve şişirici ajan miktarı arttıkça viskozitenin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Expancell taneciklerinin polimer zincirlerinin hareketliliğini artırarak, akış direncini azalttığını göstermektedir. Özellikle düşük kesme hızlarında viskozite farkları daha belirgin hâle gelmiş; 1 phr Expancell içeren numune, en yüksek viskozite değerini göstermiştir. Bu sonuçlar, şişirici ajanların henüz genişlememiş hâlde bile reolojik sistem üzerinde plastikleştirici benzeri bir etki gösterebildiğine işaret etmektedir.



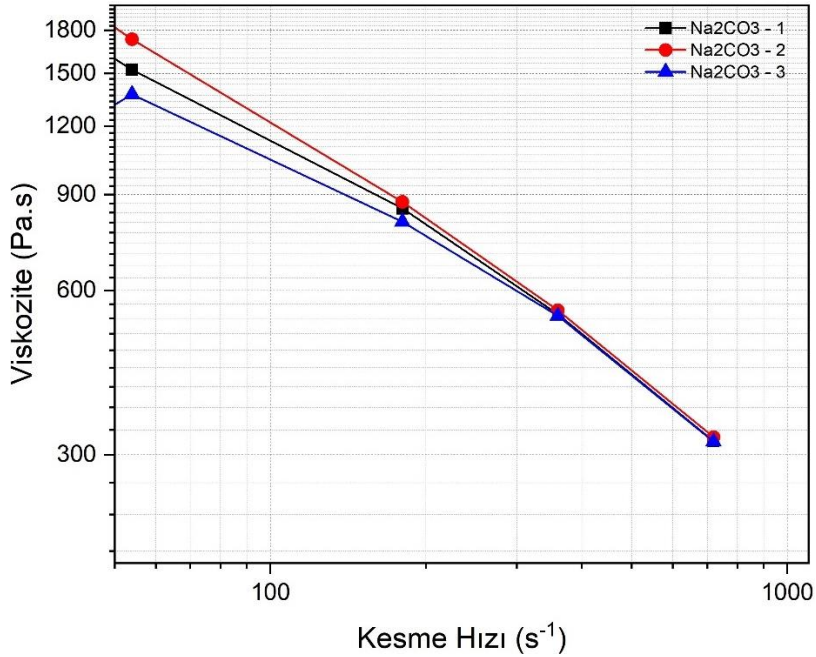
Şekil 4. 9. Farklı fiziksel şişirici oranlarına sahip SBS polimerinin kapiler reometre test sonucu.

AZDC (kimyasal şişirici) içeren sistemlerde (Şekil 4.10) ise viskozite değerleri genel olarak Expancell sistemlerine kıyasla daha düşük seyretmiştir. Bu durum, AZDC taneciklerinin daha küçük boyutlu olması ve matris içerisinde daha düzenli dağılmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca ZnO katalizörünün etkisiyle bazı sistemlerde şişirici-matris etkileşiminin artması, polimer zincirleri arasındaki sürtünmeyi düşürmüş olabilir. 3 phr AZDC içeren sistemde, düşük kesme hızlarında viskozite maksimuma ulaşsa da yüksek kesme hızlarında değerler birbirine yaklaşmıştır.



Şekil 4. 10. Sabit ZnO oranının farklı AZDC oranlarının kullanımındaki etkisi.

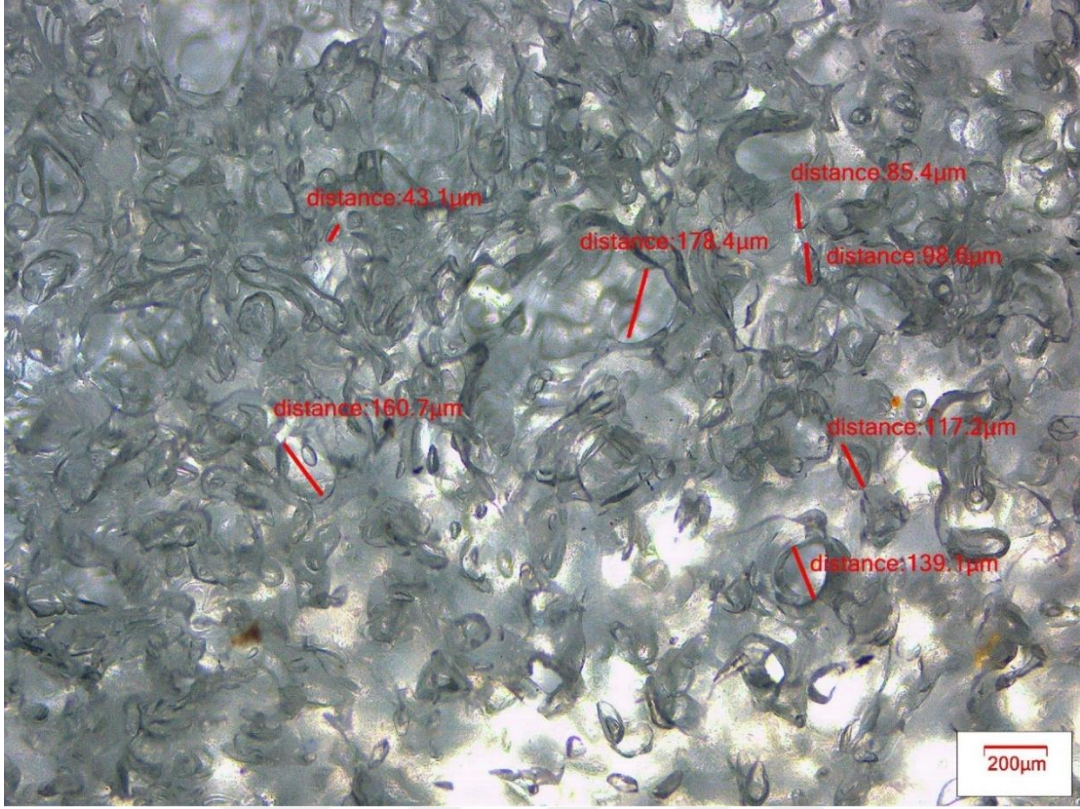
Na₂CO₃/sitrik asit sistemleri (Şekil 4.11) ise en düşük viskozite değerlerini sergilemiş ve bu değerler, şişirici ajan miktarı arttıkça belirgin şekilde azalmıştır. Özellikle Na₂CO₃-3 örneği, tüm kesme hızı aralıklarında en düşük viskoziteyi göstermiştir. Bu sonuç, sodyum bikarbonatın parçalanmadan önce matris içerisinde plastikleştirici benzeri bir etki gösterdiğini ve yüksek şişirici içeriğinde viskozitenin minimuma indiğini ortaya koymaktadır.



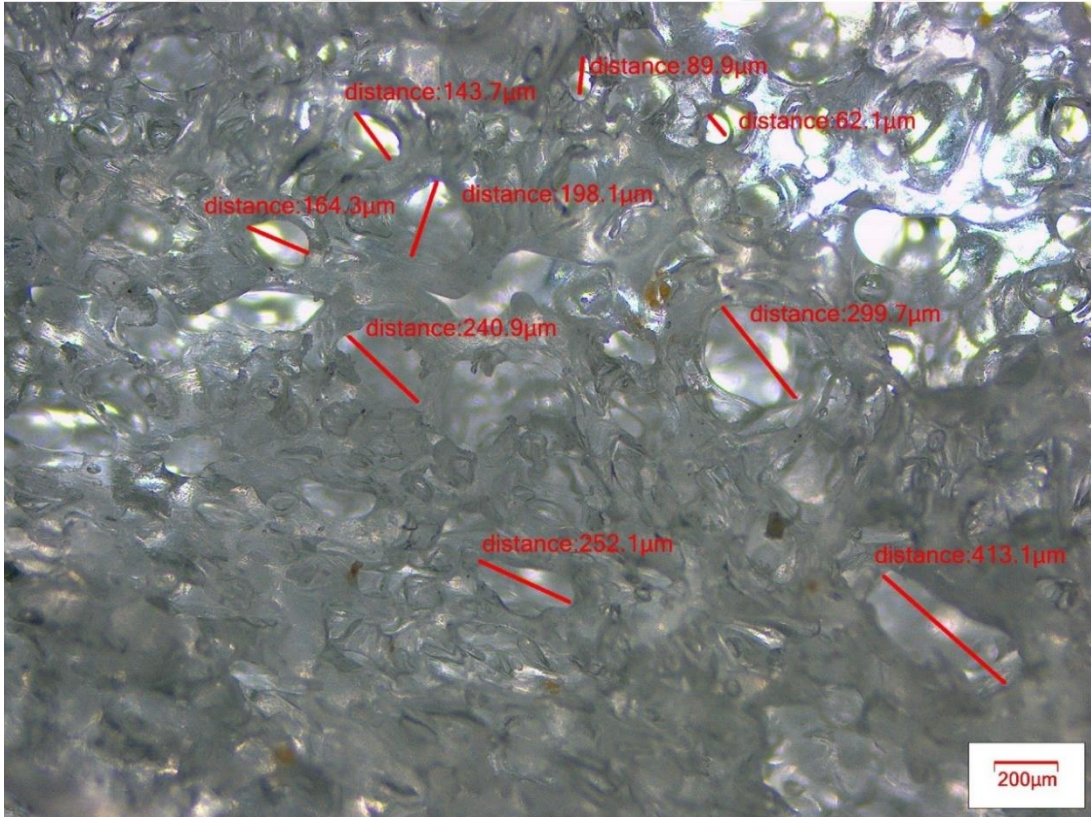
Şekil 4. 11. CA oranının SBS polimerine etkisi.

4.3.2. Farklı Şişirici Ajanları ile Şişirilmiş Örneklerin Morfolojik Açından İncelenmesi

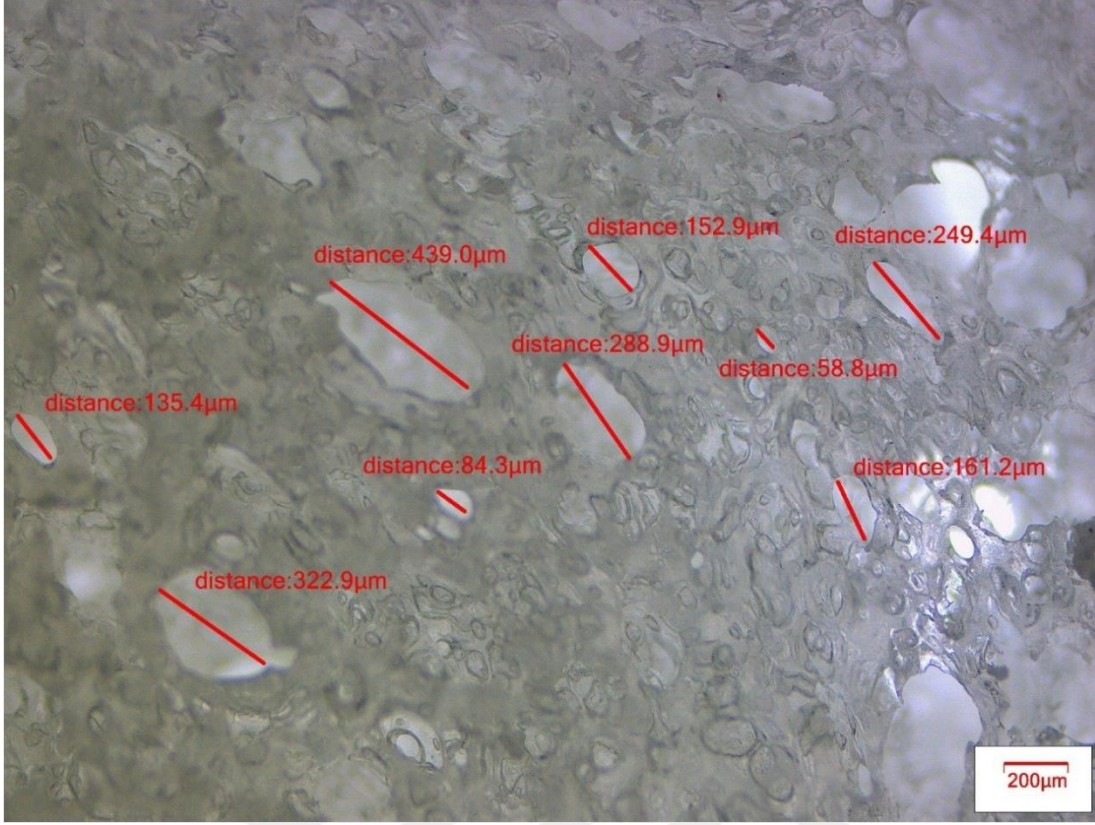
AZDC serisine ait numunelerde, şişirici ajan miktarının hücre morfolojisi üzerindeki etkileri optik mikroskop görüntüleri üzerinden değerlendirilmiştir. İlgili numunelere ait mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. AZDC-2 örneğine ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, hücre boyut dağılımının oldukça geniş bir aralıkta yer aldığı dikkat çekmektedir. Yapı içerisinde çok sayıda küçük çaplı gözenek bulunmasına rağmen, esas porların daha büyük boyutlarda olduğu görülmektedir. Özellikle ışık geçirgenliğinin sağlandığı ana gözenekler dikkate alındığında, ortalama hücre boyutlarının yaklaşık 100 µm civarında olduğu görülmektedir. Şişirici ajan konsantrasyonunun 3 phr'a çıkarılması durumunda (Şekil 4.13), hücre boyutlarının belirgin biçimde büyüdüğü ve bu boyutların genel olarak 150–250 µm aralığında dağıldığı gözlemlenmiştir. AZDC oranının 5 phr'a yükseltilmesiyle ise ortalama hücre boyutlarının 250–300 µm düzeylerine ulaştığı değerlendirilmektedir. Şişirme işleminin sabit hacimli kalıplarda ve sabit miktarda polimer kullanılarak gerçekleştirildiği göz önünde bulundurulduğunda, teorik olarak şişirici ajan miktarındaki artışla birlikte daha fazla çekirdeklenme noktasının oluşması ve buna bağlı olarak daha çok sayıda ancak daha küçük çaplı gözeneklerin elde edilmesi beklenmektedir. Ancak bu çalışmada gözlemlenen eğilim bu beklentiyle örtüşmemektedir. Bu durum, kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan gazın eriyik polimer faz içerisinde hareket etmesi ve zamanla bu gaz ceplerinin birleşerek daha büyük çaplı hücre yapıları oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, hücrelerin morfolojik bütünlüğünde gözlemlenen bozulmaların da gazların matris içinde yönsüz şekilde hareket etmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 12. AZDC-2 kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



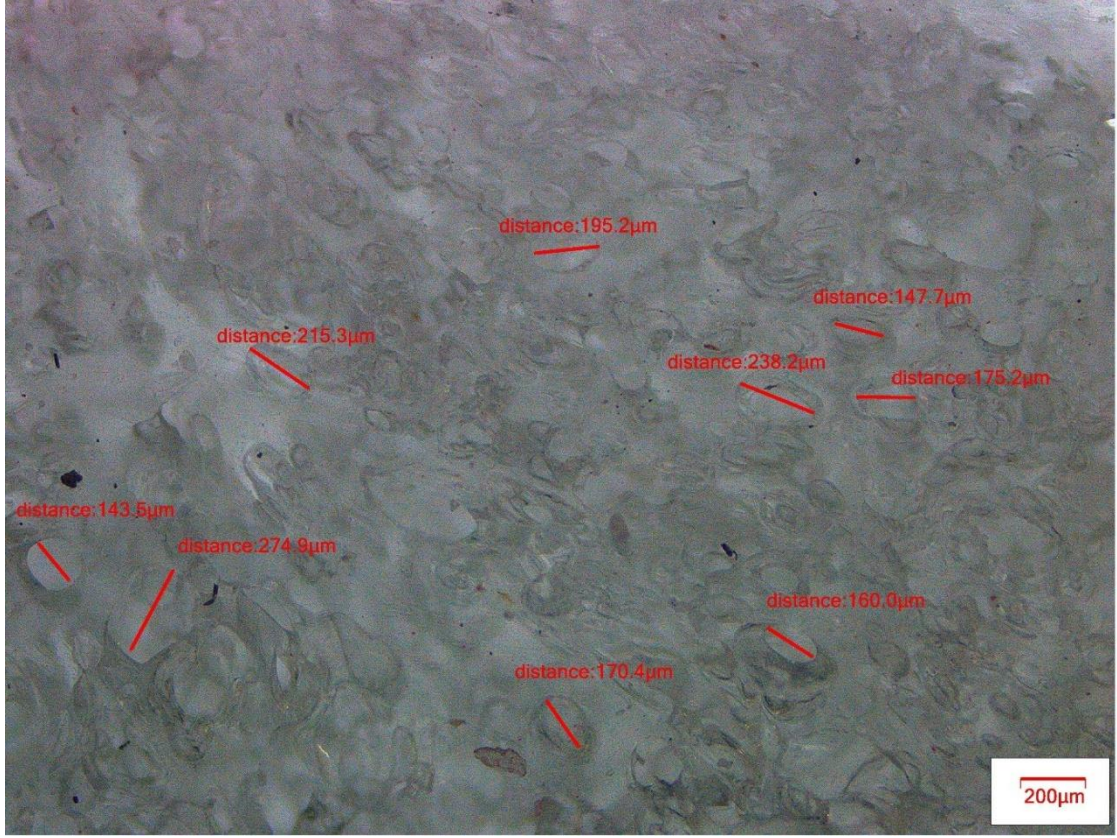
Şekil 4. 13. AZDC-3 ZnO-1.2 phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



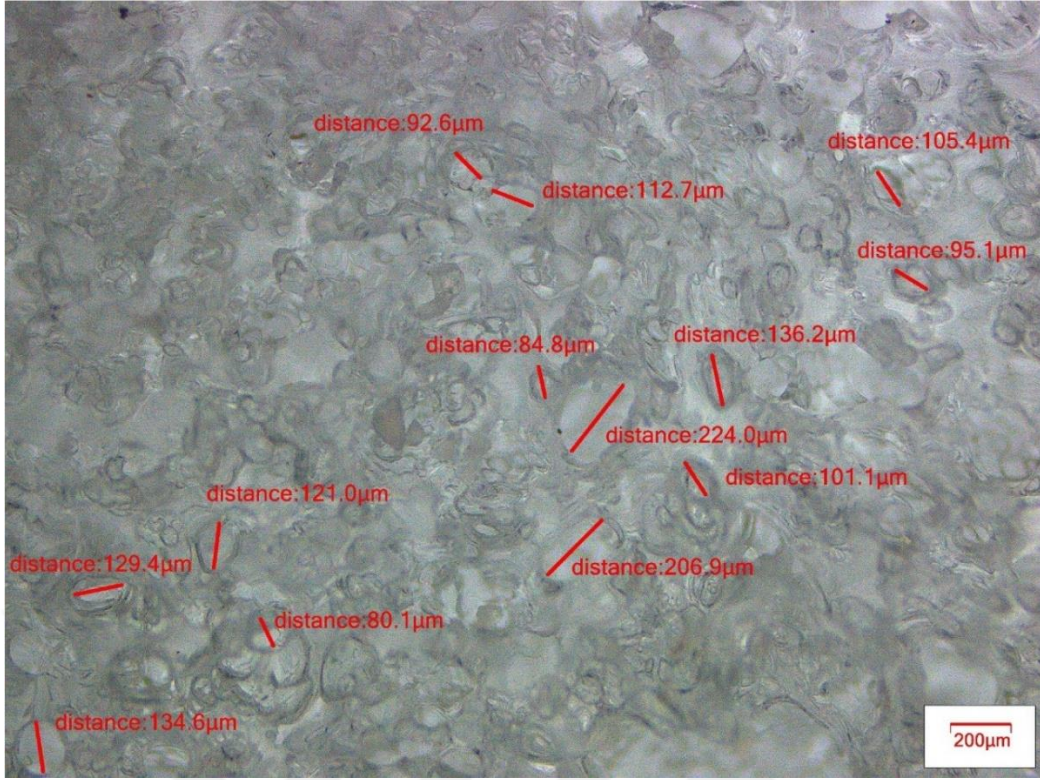
Şekil 4. 14. AZDC-5, ZnO-2phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.

Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sitrik asit içeren numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Na_2CO_3 oranı 1 phr olan numunede hücre çaplarının genellikle 180–200 μm aralığında seyrettiği görülmektedir. Konsantrasyonun 2 phr’a çıkarılmasıyla, ortalama hücre boyutları yaklaşık 150 μm seviyelerine gerilemiştir. İlginç bir şekilde, şişirici ajan miktarının 3 phr’a yükseltilmesi durumunda ise, hücre boyutlarının belirgin şekilde küçüldüğü ve yoğunlukla 50–100 μm aralığına düştüğü gözlemlenmiştir. Bu boyutsal değişim, Na_2CO_3 sisteminde oluşan gazın eriyik faz içerisinde birleşme eğilimi göstermediği ya da bu eğilimin AZDC sistemine kıyasla çok daha sınırlı kaldığı şeklinde yorumlanabilir. Şişirici ajan miktarındaki artışa rağmen daha büyük hücrelerin değil, daha küçük ve daha düzenli gözeneklerin oluşması, CO_2 gazının polimer matris içinde nispeten daha kısa mesafede difüze olduğunu ve oluşan gaz hacimlerinin birbirinden bağımsız şekilde genişlediğini göstermektedir. Bu da Na_2CO_3 sisteminin kontrollü bir şişirme davranışı sergilediğine işaret etmektedir. Ayrıca, hücre geometrileri açısından değerlendirildiğinde, Na_2CO_3 içeren numunelerde oluşan gözeneklerin genellikle küresel ve simetrik bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Bu yapı, CO_2 ’nin parçalanma sürecinde daha stabil bir gaz çıkışı sağlaması ve genişlemenin yönsüz, izotropik bir karakter göstermesiyle ilişkilendirilebilir.

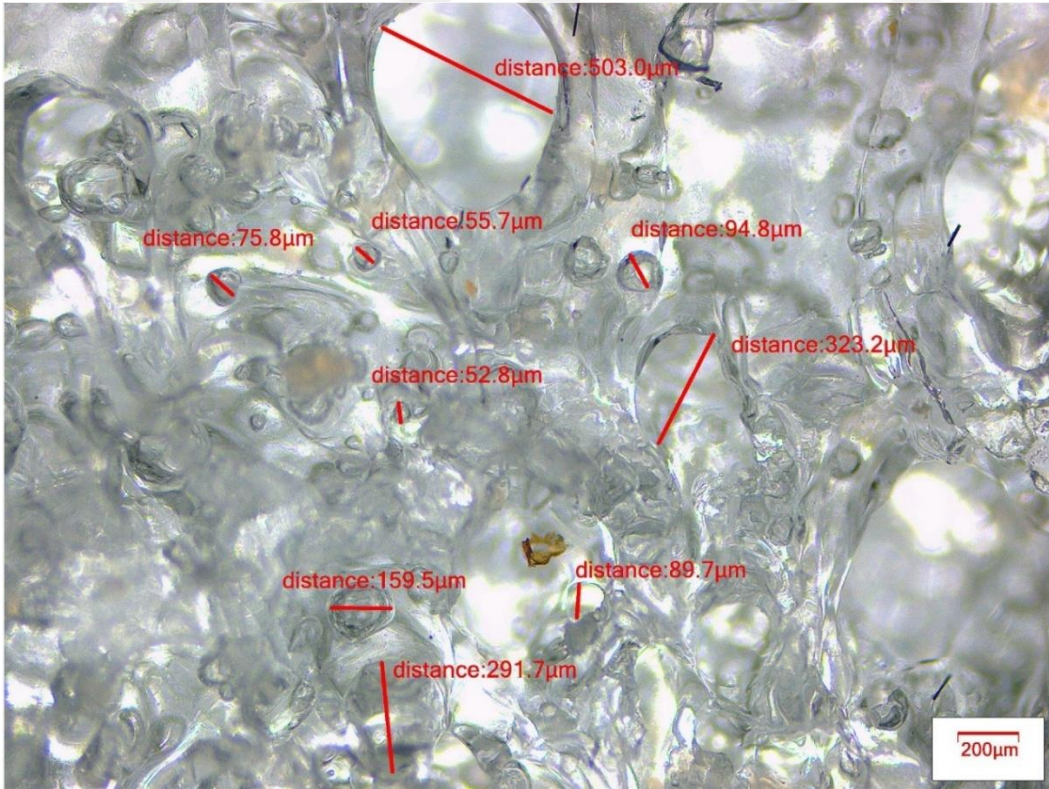
Hücre boyutlarındaki küçülme eğilimi ve geometrik düzenlilik birlikte değerlendirildiğinde, sodyum karbonat esaslı sistemlerin homojen ve yapısal olarak daha kararlı gözenek yapıları oluşturma potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.



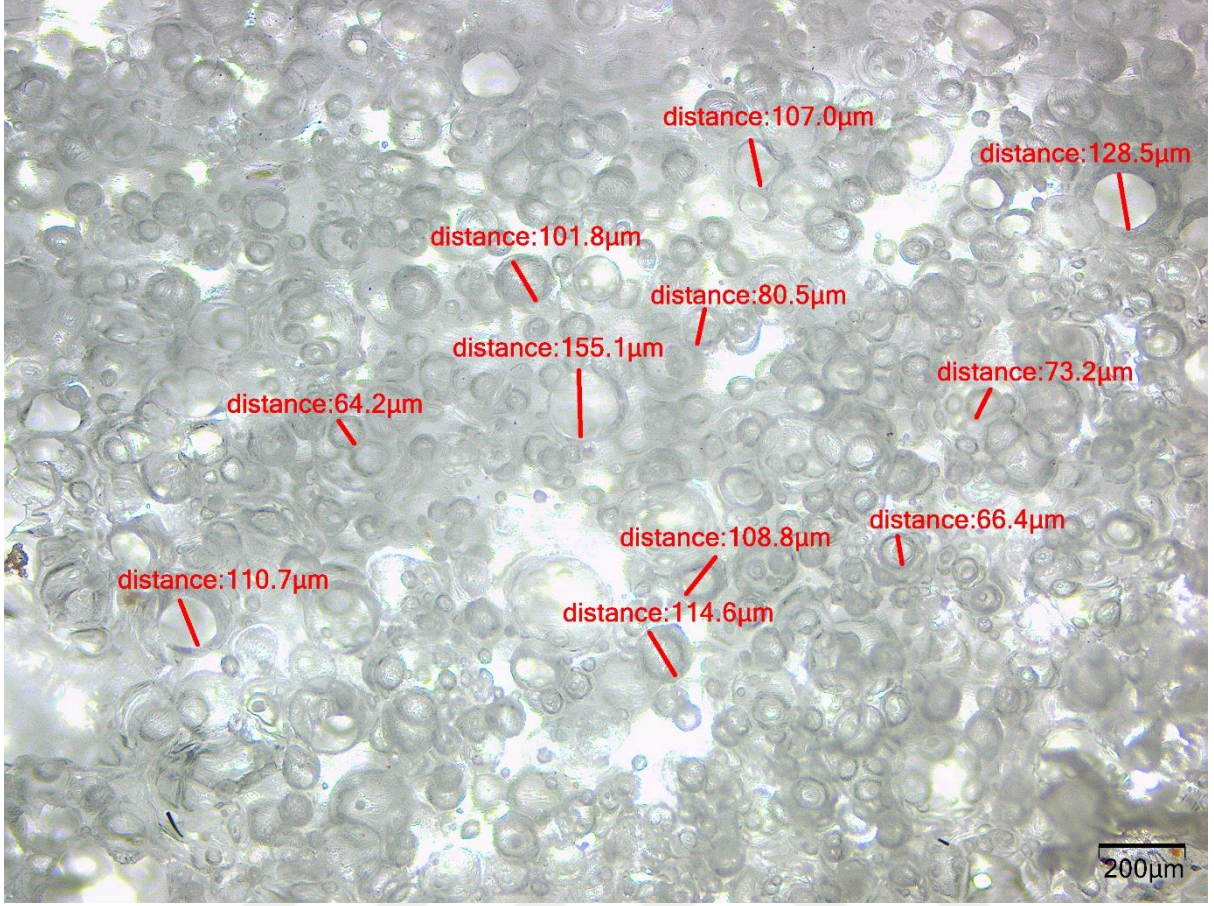
Şekil 4. 15. Na₂CO₃-1, CA- 0.15 phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



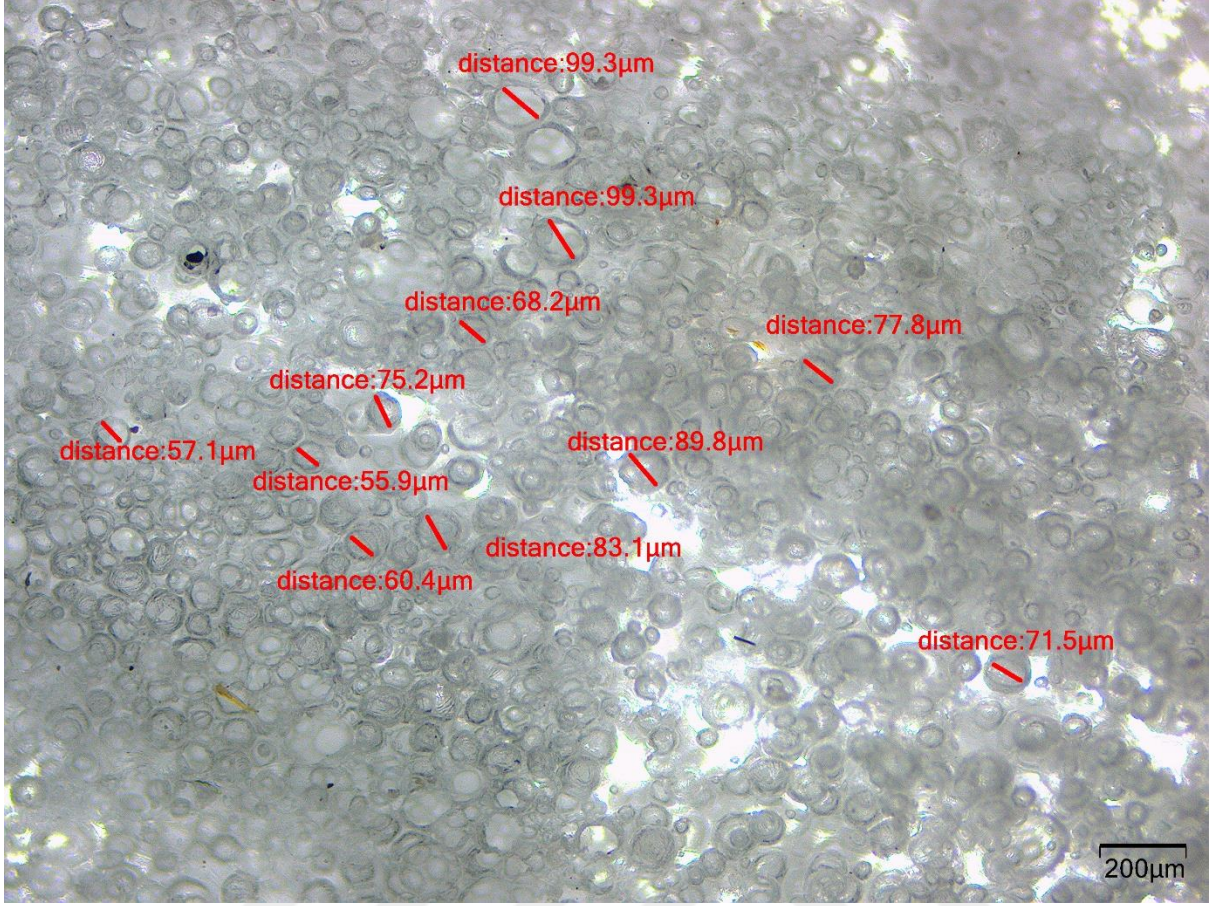
Şekil 4. 16. Na_2CO_3 -2, CA- 0.3 phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



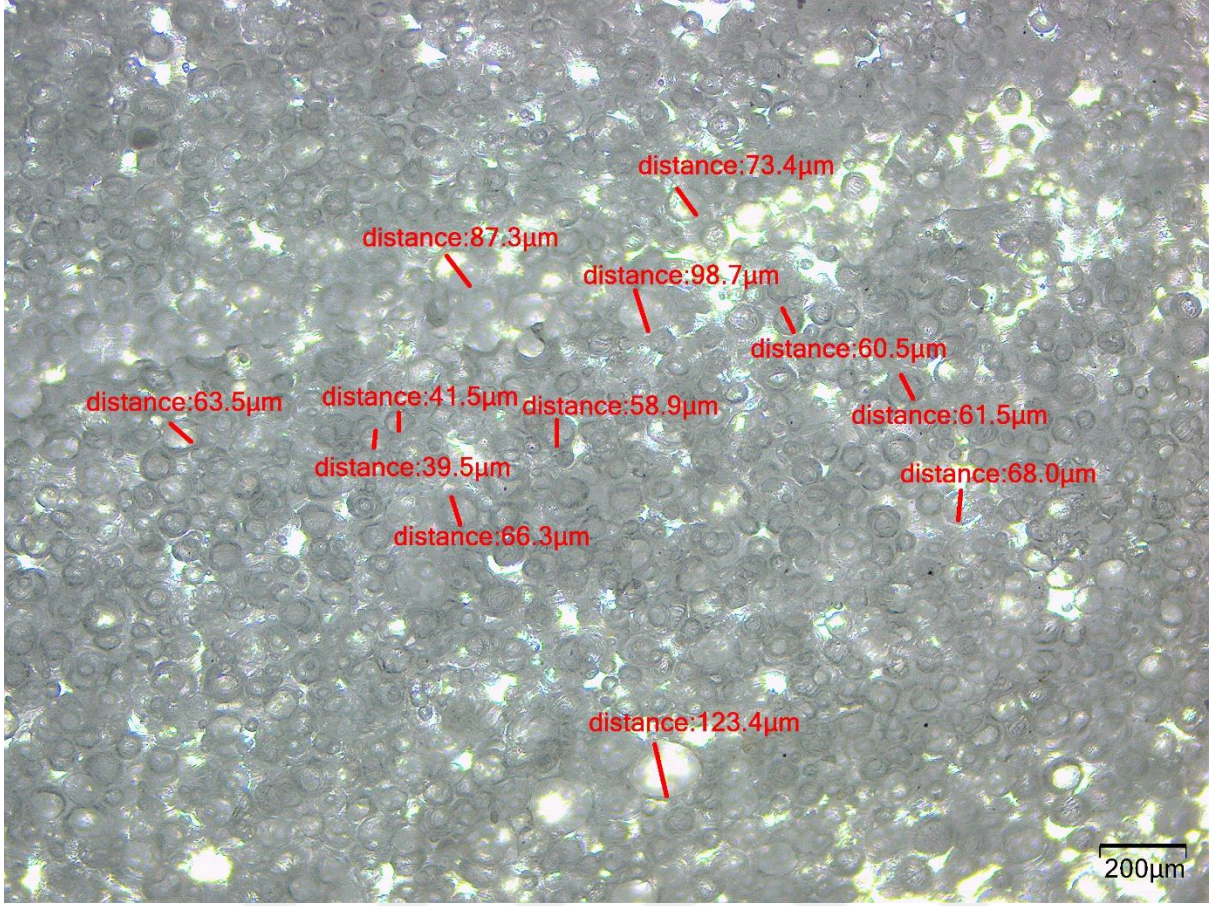
Şekil 4. 17. Na_2CO_3 -3, CA- 0.45 phr kullanılan kimyasal şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



Şekil 4. 18. Exp-1 kullanılan fiziksel şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



Şekil 4. 19. Exp-2'nin kullanılan fiziksel şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.



Şekil 4. 20. Exp-3'ün kullanılan fiziksel şişiricili sbs polimerinin mikroskop görüntüsü.

4.3.3. Çekme Testi

Bu başlık altında, farklı oranlarda şişirici ajan içeren (kimyasal şişiriciler için ayrıca optimize edilmiş katalizör oranı da sabit tutulan) numunelere ait çekme testi sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.21–4.23 arasında sunulmuştur. Çekme testlerinde en temel mekanik parametrelerden biri olan elastik modül, malzemenin elastik deformasyona karşı gösterdiği dirençle doğrudan ilişkilidir. Başka bir ifadeyle, elastik modül değeri ne kadar yüksekse, malzemenin yük altında şekil değiştirmeye karşı gösterdiği rijitlik o denli fazla olmaktadır. Bu bağlamda, yapılan testlerde elde edilen elastik modül değerleri Şekil 4.21a–4.23a'da detaylı olarak sunulmuştur.

Elastik modül değerleri incelendiğinde, en yüksek değerlerin Expancell esaslı fiziksel şişirici kullanılan EXP serisi örneklerde elde edildiği görülmektedir. Bu değerlerin, kimyasal şişirici ajanlarla hazırlanan diğer örneklere kıyasla yaklaşık on kat daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Morfolojik gözlemlerle birlikte değerlendirildiğinde, bu yüksek modül değerlerinin nedeni olarak Expancell taneciklerinin oluşturduğu kapalı ve küresel hücre yapıları

gösterilebilir. Hücrelerin büyük oranda homojen boyut dağılımına sahip olması ve bu yapıların tamamen kapalı hücre karakterinde olması, yük altında yapıya adeta bir destek fazı gibi davranarak rijitliği artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca şişirici ajan oranının artmasıyla birlikte, daha küçük çaplı hücrelerin oluşması ve bu hücrelerin yapıya daha düzgün bir şekilde dağılması sayesinde, stres dağılımının daha homojen hâle geldiği ve bunun da elastik modülde sınırlı da olsa bir artış sağladığı gözlemlenmiştir.

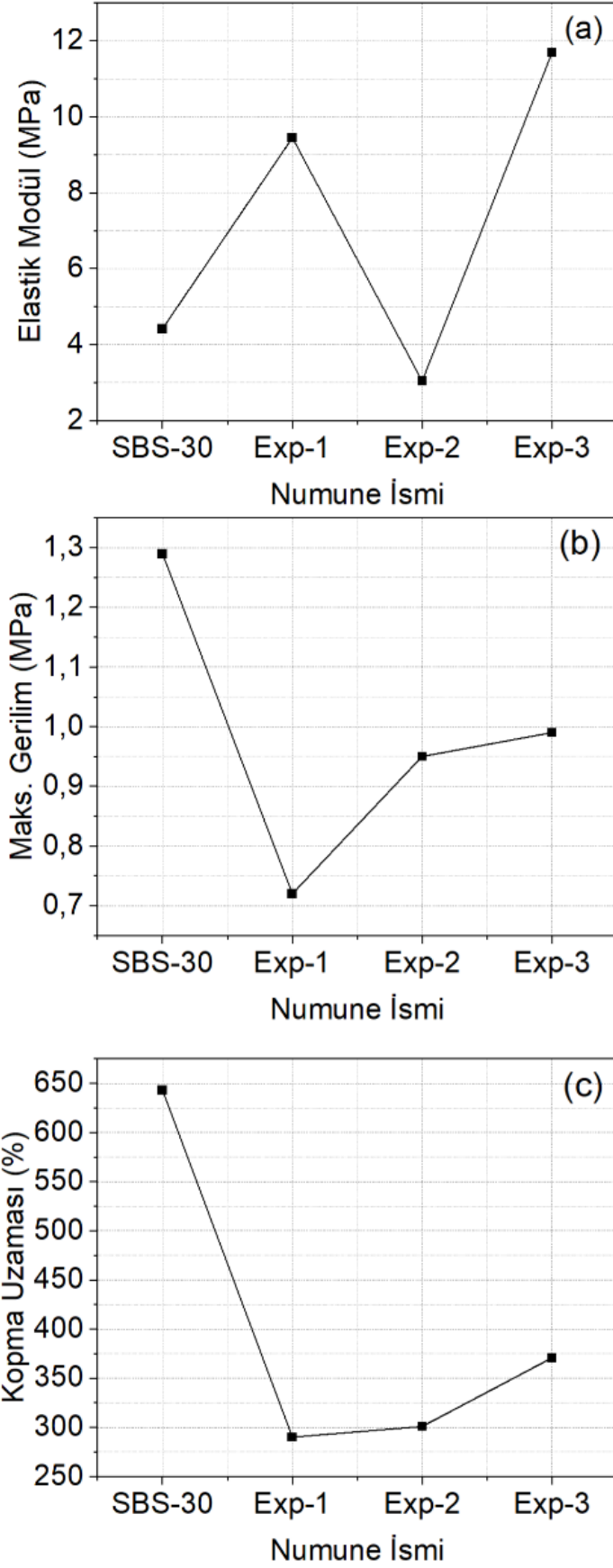
Kimyasal şişirici ajanların kullanıldığı örneklerde ise elastik modül değerlerinin belirgin biçimde daha düşük olduğu görülmektedir. Na₂CO₃/sitrik asit sistemi içeren numunelerde, özellikle düşük şişirici oranlarında AZDC/ZnO sistemine kıyasla daha yüksek elastik modül değerleri elde edilmiştir. AZDC-3 numunesi, bu grup içerisinde en yüksek elastik modül değerine sahip olsa da bu durumun sistemin optimum noktası mı yoksa morfolojik kararsızlığın bir sonucu mu olduğu net olarak belirlenmemektedir. Çünkü ilgili numunede hücre birleşimlerinin oldukça yaygın olduğu, dolayısıyla yapının mekanik bütünlüğünün zayıfladığı mikroskop görüntülerinden anlaşılmaktadır. Buna karşılık Na₂CO₃/sitrik asit sisteminde daha stabil bir hücre yapısı ve kontrollü morfolojik gelişim gözlemlenmiş; şişirici oranı arttıkça hücre boyutları artmış, ancak bu artışa paralel olarak elastik modül değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, büyük çaplı gözeneklerin malzeme içinde daha fazla boşluk oluşturması ve böylece elastik deformasyon karşısındaki direncin azalmasıyla ilişkilendirilebilir.

Çekme testlerinde değerlendirilen bir diğer önemli parametre ise numunelerin test sırasında dayanabildiği maksimum gerilim değeridir. Bu parametreye ilişkin elde edilen veriler Şekil 4.21b–4.23b'de sunulmuştur. Elde edilen bulgular, elastik modül sonuçlarıyla benzer bir eğilim göstermektedir. Özellikle Expancell fiziksel şişiricisi ile hazırlanan numunelerde, maksimum gerilim değerlerinin diğer tüm sistemlerden belirgin biçimde yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Expancell içeriğinin artırılmasıyla birlikte, hücre boyutlarındaki küçülmeye paralel olarak bu değerlerde de anlamlı bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu artış, özellikle EXP-1 ve EXP-3 numuneleri arasında karşılaştırıldığında, yaklaşık %30–35 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. AZDC içeren sistemlerde ise bu parametre açısından kararlı bir davranış gözlemlenmemiştir. Elde edilen maksimum gerilim değerleri genel olarak 0.56–0.68 MPa aralığında değişmekte olup, şişirici oranı ile doğrudan ilişkilendirilebilecek belirgin bir trend sunmamaktadır. Bu düzensiz davranış, yapıda oluşan azot gazının yüksek hareketliliği ve birleşme eğilimi nedeniyle büyük ve şekilsiz hücrelerin meydana gelmesiyle ilişkilendirilebilir. Morfolojik açıdan değerlendirildiğinde, bu durumun yapı bütünlüğünü

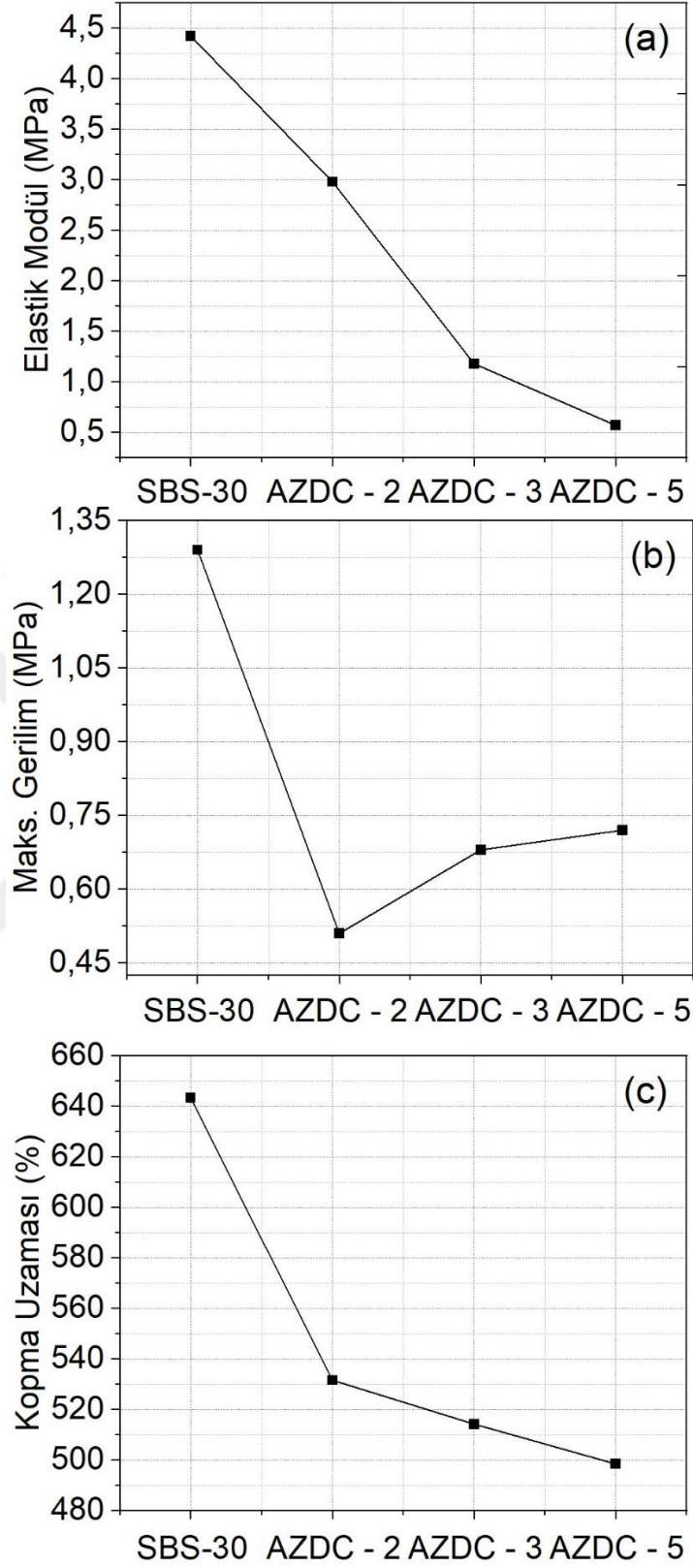
zayıflatarak mekanik performansı olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır. Sodyum karbonat/sitrik asit sisteminde ise elde edilen maksimum gerilim değerleri, AZDC ile benzer aralıklarda yer almakla birlikte, farklı bir eğilim göstermektedir. Bu sistemde, CO₂ gazının yapıya daha homojen dağılması, oluşan hücrelerin büyümesine rağmen yapısal bütünlüğün korunmasına olanak tanımıştır. Bu sayede, şişirici ajan konsantrasyonu arttıkça hücre boyutlarında artış görülmesine rağmen, maksimum gerilim değerlerinde azalma değil, sınırlı da olsa bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, CO₂'nin daha dengeli genişleme sağlaması nedeniyle yapının yük altındaki performansının AZDC sistemine kıyasla daha stabil kaldığını düşündürmektedir.

Mekanik performansın değerlendirilmesinde dikkate alınan bir diğer önemli parametre ise kopma uzamasıdır. Bu özellik, malzemenin elastik deformasyon sınırının ötesine geçerek ne ölçüde şekil değiştirebildiğini göstermesi açısından kritik öneme sahiptir. Elde edilen veriler, şişirici ajan türüne ve içeriğine bağlı olarak anlamlı farklılıklar göstermektedir. EXP serisi numunelerde, diğer sistemlere kıyasla daha düşük kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, bu değerlerin halen pek çok elastomer uygulaması için yeterli seviyede olduğu söylenebilir. En düşük uzama değeri, EXP-1 numunesinde yaklaşık %290 olarak ölçülürken, şişirici ajan oranının arttığı EXP-3 numunesinde bu değer %370 seviyesine kadar yükselmiştir.

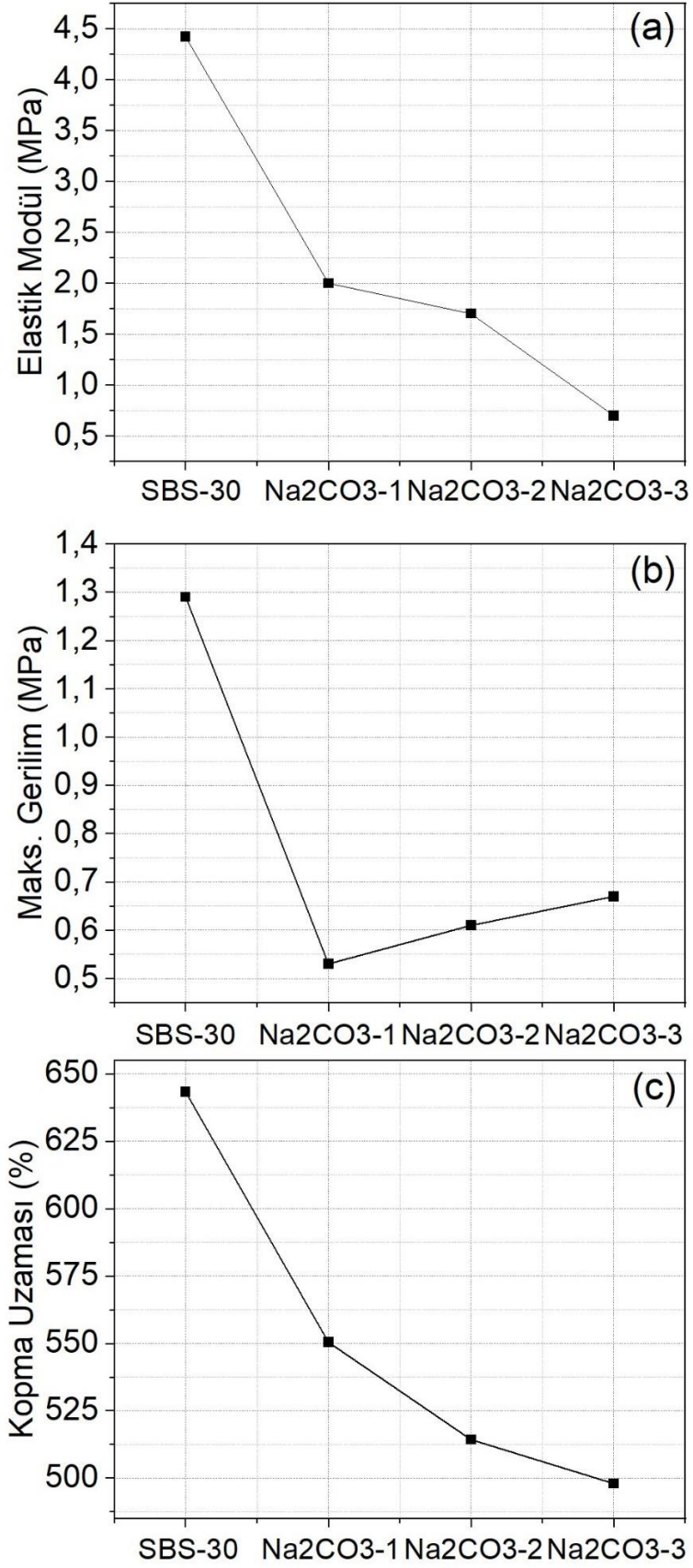
AZDC içeren numunelerde ise önceki parametrelerde gözlemlenen yapısal kararsızlık bu metrikte de kendini göstermektedir. Kopma uzaması değerleri yaklaşık %500 civarında değişmekte olup, bu değişkenliğin düzensiz hücre yapısından ve gaz birikimlerinin kontrolsüz morfolojik etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Na₂CO₃/sitrik asit sisteminde ise, şişirici ajan oranı arttıkça hücre boyutlarında gözle görülür bir artış meydana gelmesine rağmen, kopma uzamasında belirgin bir düşüş yaşanmamıştır. Tüm örneklerde bu değerlerin %450'nin üzerinde kaldığı görülmektedir. Bu durum, yapının genel homojenliğini ve elastomer faz sürekliliğini koruyabildiğini göstermektedir. Kopma uzamasına etki eden en temel faktörlerden biri, hücre yapısı dışında kalan sürekli elastomer fazın varlığı ve bütünlüğüdür. Yapının şişirici ajanla genişleyen bölümleri, genellikle yük taşıma kapasitesine doğrudan katkı sunmazken; bu bölgeler dışındaki polimer zincirleri, deformasyonun büyük kısmını üstlenmektedir. Bu nedenle, elastomer fazın matristeki dağılımı ve sürekliliği arttıkça, yapının daha yüksek uzama gösterebildiği söylenebilir.



Şekil 4. 21. Exp miktarının artışı, SBS polimerinin çekme test sonuçları üzerindeki etkisi.



Şekil 4. 22. AZDC miktarının artışının SBS polimerinin çekme test sonuçları üzerindeki etkisi.



Şekil 4. 23. SOD miktarının artışının SBS polimerini çekme test sonuçları üzerindeki etkisi.

4.3.4 Aşınma Testi

Aşınma testi, polimerik malzemelerin özellikle hareketli ya da sürekli temas altında çalışan uygulamalardaki yüzey dayanımını değerlendirmek açısından kritik bir karakterizasyon yöntemidir. Elastomerik yapılar, genel olarak esnekliği ve darbe sönümlenme özellikleriyle öne çıksa da uzun süreli kullanımlarda mekanik temas bölgelerinde oluşan hacimsel kayıplar, malzemenin performansını ve ömrünü ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, özellikle ayakkabı tabanları, titreşim sönümleyici parçalar, contalar ve otomotiv iç aksam parçaları gibi uygulamalarda, aşınma dayanımı önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada hazırlanan farklı şişirici ajan içeriğine sahip kompozit yapılar için aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, malzeme iç yapısı ile ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir.

Yapılan aşınma testleri sonucunda, kimyasal şişirici ajanlarla (AZDC ve Na_2CO_3) hazırlanan numunelerde aşınma dayanımı açısından ciddi problemlerle karşılaşmıştır. Bu numunelerde, test süreci boyunca aşınmanın olağanüstü yüksek seviyelerde gerçekleştiği, numunelerin kısa sürede tamamen aşınarak cihazdan dışarı fırladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ilgili numuneler için standartlara uygun veri elde edilememiş ve testler tamamlanamamıştır. Bu durumun temelinde, her iki sistemde de gözlemlenen düzensiz ve kontrolsüz hücre morfolojisi yer almaktadır. Hücrelerin farklı boyutlarda, yer yer birleşmiş ya da çok ince duvarlarla ayrılmış olması, yük altında yapı bütünlüğünün korunamamasına ve lokal çökme bölgelerinin hızla ilerlemesine neden olmuştur. Buna karşılık, Expancell esaslı fiziksel şişirici ile hazırlanan EXP serisi numunelerde, hücre yapısının düzenli, kapalı ve küresel olması sayesinde testler sorunsuz şekilde tamamlanabilmiş; ölçülebilir ve karşılaştırılabilir aşınma verileri elde edilmiştir. Bu seriye ait sonuçlar Tablo 4.3'te sunulmuştur. EXP serisine ait numunelerde elde edilen aşınma verileri, aşınan hacim (mm^3) cinsinden değerlendirilmiştir. Testler sonucunda, her bir numune için toplamda kaybedilen kütle miktarı belirlenmiş, bu değerler numunelerin yoğunluklarına bölünerek hacimsel kayıp hesaplanmıştır. Bu yöntem, şişirici ajan içeriğine bağlı olarak değişen yoğunluk farklarının aşınma davranışı üzerindeki etkisini daha doğru yansıtabilmek amacıyla tercih edilmiştir. Böylece sadece kütle değil, yapısal olarak da ne kadar malzeme kaybı yaşandığı net biçimde ortaya konmuştur.

Elde edilen veriler, genel olarak şişirici ajan ilavesinin aşınma direnci üzerinde olumsuz bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Özellikle şişirici ajan ilavesiyle birlikte, matrisin bütünlüğünün zayıflaması ve yük taşıyıcı elastomer fazın sürekliliğinin azalması, aşınan hacim değerlerinde ciddi artışlara neden olmuştur.

Şişirici içermeyen SBS-30wax referans numunesinde aşınan hacim 294 mm³ iken, 1 phr Expancell içeren EXP-1 numunesinde bu değer yaklaşık üç katına çıkarak 838 mm³ seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, geniş hücre çapına sahip, görece daha az sayıda por içeren yapının, aşınma altında hızlı şekilde deformasyon göstermesiyle açıklanabilir. Ancak dikkat çekici bir eğilim, şişirici ajan miktarı arttıkça aşınan hacim değerlerinde azalma yönündedir. EXP-2 numunesinde 803 mm³ olan aşınan hacim, EXP-3 numunesinde 522 mm³ seviyesine gerilemiştir. Bu bulgu, şişirici ajan oranının artmasıyla birlikte oluşan hücre boyutlarının küçülmesi ve porların daha homojen dağılması ile ilişkilendirilebilir. Hücre çaplarının küçülmesi, yüzey temasında meydana gelen gerilimin gözenekli yapı içerisinde daha dengeli dağılmasını sağlamakta ve bu durum aşınmaya karşı yapısal direncin artmasına katkı sunmaktadır. Yoğunluk değerlerinin büyük oranda sabit kalmasına rağmen, hücre boyutundaki bu değişim, gözenekli yapının mikro mekanik davranışını doğrudan etkileyerek aşınma direncinde iyileşmeye neden olmuştur.

Tablo 4. 3. Exp Serisi örneklerin aşınma test sonuçları.

Örnek İsmi	SBS-30wax	Exp-1	Exp-2	Exp-3
Aşınan Hacim	294	838	803	522

4.3.5. Sertlik Testi

Tablo 4.4'te, tüm sistemlere ait numunelerin hem şişirilmemiş hem de şişirilmiş hâldeki Shore A sertlik değerleri sunulmuştur. Elde edilen veriler, şişirici ajan tipinin ve şişirme davranışının yüzey sertliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Şişirilmemiş numuneler değerlendirildiğinde, tüm sistemlerde baz polimer olan SBS-30'a kıyasla hafif bir sertlik artışı gözlemlenmiştir. Bu durum, şişirici ajanların başlangıçta polimer matris içinde partikül şeklinde dağılmasıyla yapının daha yoğun ve daha az esnek hâle gelmesinden kaynaklanmaktadır. Şişirici ajanların gözenek oluşturmadan önce matris içerisinde katı tanecik gibi davranması, ölçüm anındaki yüzey deformasyonunu sınırlandırarak sertlik değerini artırmıştır. Şişirme işlemi sonrasında ise, tüm sistemlerde Shore A değerlerinde belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Bu azalma, şişirici ajanların oluşturduğu gözenekli yapıların, uygulanan yük karşısında yüzeyin deformasyona daha açık hâle gelmesine neden olmasıyla açıklanabilir. Gözenek oluşumu, özellikle hücre duvarlarının incilmesi ve elastomer fazın sürekliliğinin azalmasıyla birlikte, yüzey sertliğini düşürmektedir. Sertlikteki azalma eğilimi sistemler arasında farklılık göstermektedir. En büyük düşüş AZDC-5 numunesinde gerçekleşmiş, sertlik değeri 60'tan 30'a gerilemiştir. Bu durum, AZDC sistemlerinde

gözlemlenen büyük ve düzensiz hücre yapısının yapısal stabiliteyi zayıflatmasıyla ilişkilidir. Na_2CO_3 sistemlerinde de benzer bir düşüş gözlenmiş, ancak sertlik değerleri Na_2CO_3 -1 ve Na_2CO_3 -2 numunelerinde nispeten daha yüksek kalmıştır. En dikkat çekici sonuç ise Expancell serisi örneklerde elde edilmiştir. Bu sistemde, şişirme sonrası sertlikteki azalma oldukça sınırlı kalmış, örneğin EXP-3 numunesinde şişirilmiş hâlde 56'dan sadece 54'e düşmüştür. Bu bulgu, Expancell şişirici ajanlarının oluşturduğu kapalı, küresel ve düzenli hücre yapısının, yapı bütünlüğünü koruduğunu ve yüzey deformasyonuna karşı direnç sağladığını göstermektedir.

Tablo 4. 4. Şişirici farklılığı ve oranının SBS polimerinin sertliğine etkisi.

Örnek İsmi	Şişirilmemiş haldeki Shore	Şişirilmiş Haldeki Shore
	A	A
AZDC-2	56	36
AZDC-3	58	37
AZDC-5	60	30
Na_2CO_3 -1	55	46
Na_2CO_3 -2	59	40
Na_2CO_3 -3	57	34
Exp-1	50	47
Exp-2	52	45
Exp-3	56	54



5.SONUÇLAR

Bu çalışmada, stiren-bütadien-stiren (SBS) esaslı elastomer sistemlerde, gözenekli yapıların kontrollü olarak elde edilmesi amacıyla fiziksel ve kimyasal şişirici ajanların etkileri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Şişirme işleminin verimli ve kontrollü bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için öncelikle SBS matrisinin eriyik viskozitesi optimize edilmiş, ardından üç farklı şişirici ajan (azodikarbonamid – AZDC, sodyum bikarbonat/sitrik asit sistemi ve Expancell marka fiziksel şişirici) kullanılarak hazırlanan numuneler reolojik, mekanik, morfolojik ve aşınma özellikleri açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, SBS fazına farklı oranlarda plastifiyan (wax) ilave edilerek sistemin eriyik viskozitesi ve işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, %30 wax oranının optimum seviyeyi sağladığını göstermiştir. Bu oran, hem tek vidalı ekstrüderde stabil bir üretim sürecine olanak tanımış hem de kapiler ve rotasyonel reometre verilerine göre şişirme için gerekli reolojik koşulları en uygun şekilde sağlamıştır.

İkinci aşamada, optimize edilen SBS-30wax matrisi kullanılarak şişirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kimyasal şişiriciler için optimum katalizör oranları belirlenmiştir. Sonrasında, bu oranlar sabit tutularak şişirici ajan konsantrasyonlarının farklı test parametreleri üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Morfolojik analiz sonuçları, Expancell içeren sistemlerin en düzgün ve küresel hücre yapısını oluşturduğunu, hücre boyut dağılımının dar bir aralıkta seyrettiğini göstermiştir. Kimyasal şişiricilerle hazırlanan sistemlerde ise özellikle AZDC sisteminde hücrelerin birbirine birleştiği, düzensiz geometrilere sahip olduğu ve yapısal kararsızlıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Na₂CO₃ sisteminde ise daha dengeli bir hücre yapısı elde edilmiş olsa da Expancell'e kıyasla gözenek kontrolü sınırlı kalmıştır.

Mekanik test sonuçları incelendiğinde, Expancell serisi numunelerin elastik modül ve maksimum gerilim açısından kimyasal şişiricilere göre çok daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir. Özellikle kapalı ve simetrik hücre yapılarının, yük taşıma ve gerilim dağılımı üzerinde pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Kopma uzaması sonuçları ise tüm numunelerin elastomerik davranışını koruduğunu, ancak yüksek şişirici oranlarında uzamanın sınırlı ölçüde azaldığını ortaya koymuştur.

Aşınma testlerinde ise sadece Expancell içeren numuneler ölçülebilir düzeyde sonuç vermiş, kimyasal şişiricili sistemlerde düzensiz ve kontrolsüz hücre yapısı nedeniyle testler standartlara uygun şekilde tamamlanamamıştır. Expancell sistemlerinde şişirici oranı arttıkça, hücre boyutlarının küçülmesiyle birlikte aşınma dayanımında da artış gözlenmiştir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında elde edilen bulgular, SBS bazlı sistemlerde hafif yapılar oluştururken mekanik performanstan ödün vermemek adına şişirici ajan türü ve miktarının dikkatle seçilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Özellikle Expancell gibi fiziksel şişiricilerin, kontrollü hücre morfolojisi, yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci açısından en uygun çözümlerden biri olduğu değerlendirilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Goring, P.D. and R.D. Priestley, *Polymer recycling and upcycling: recent developments toward a circular economy*. 2023, ACS Publications. p. 2609-2611.
2. Vatan, C., *Plastik malzemenin geri dönüşümü: otomotiv endüstrisinden örnekler*. 2002, Fen Bilimleri Enstitüsü.
3. Schyns, Z.O. and M.P. Shaver, *Mechanical recycling of packaging plastics: A review*. *Macromolecular rapid communications*, 2021. **42**(3): p. 2000415.
4. Thushari, G.G.N. and J.D.M. Senevirathna, *Plastic pollution in the marine environment*. *Heliyon*, 2020. **6**(8).
5. Avérous, L., *Polylactic acid: synthesis, properties and applications*, in *Monomers, polymers and composites from renewable resources*. 2008, Elsevier. p. 433-450.
6. Rahimi, A. and J.M. García, *Chemical recycling of waste plastics for new materials production*. *Nature Reviews Chemistry*, 2017. **1**(6): p. 0046.
7. Ragaert, K., L. Delva, and K. Van Geem, *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. *Waste management*, 2017. **69**: p. 24-58.
8. Gupta, A., et al., *Development of biodegradable tableware from novel combination of paddy straw and pine needles: A potential alternative against plastic cutlery*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023. **11**(6): p. 111310.
9. Lamba, P., et al., *Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. **29**(57): p. 86156-86179.
10. Jackson, M.A., et al., *Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study*. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018. **5**: p. 459-466.
11. Tao, Y., et al., *A study of physico-mechanical properties of hollow glass bubble, jute fibre and rubber powder reinforced polypropylene compounds with and without MuCell® technology for lightweight applications*. *Polymers*, 2020. **12**(11): p. 2664.
12. Jin, F.-L., et al., *Recent trends of foaming in polymer processing: A review*. *Polymers*, 2019. **11**(6): p. 953.
13. Zhang, S., et al., *Unexpected foaming behavior of heterografted comb-like PS-g-(PS/PE) copolymers with high branching density at semi-solid state under CO₂ batching foam*. *Polymer*, 2018. **146**: p. 304-311.
14. *Structural Foam Molding*. 2024; Available from: <https://www.structuralfoammolding.net/process-and-technology/>.
15. Wang, L., et al., *Preparation of microcellular injection-molded foams using different types of low-pressure gases via a new foam injection molding technology*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019. **58**(38): p. 17824-17832.
16. Saiz-Arroyo, C., et al., *Structure–property relationships of medium-density polypropylene foams*. *Polymer international*, 2013. **62**(9): p. 1324-1333.
17. Saiz-Arroyo, C., et al., *Moulded polypropylene foams produced using chemical or physical blowing agents: structure–properties relationship*. *Journal of materials science*, 2012. **47**: p. 5680-5692.
18. Yao, J., M.R. Barzegari, and D. Rodrigue, *Density graded linear medium density polyethylene foams produced under a temperature gradient with Expancel microbeads*. *Cellular polymers*, 2011. **30**(4): p. 157-186.
19. Yang, J.-n., et al., *Fabrication and characterization of short glass fiber reinforced polypropylene hybrid composite foams*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015. **34**(22): p. 1871-1883.

20. Nouryon. 2024; Available from: <https://www.nouryon.com/markets/polymer-processing/lightweight-polymers/>.
21. Yao, J., M.R. Barzegari, and D. Rodrigue, *Polyethylene foams produced under a temperature gradient with Expancel and blends thereof*. Cellular polymers, 2010. **29**(5): p. 259-282.
22. Lendvai, L., et al., *Foam Injection Molding of Poly (Lactic Acid) with Azodicarbonamide-Based Chemical Blowing Agent*. Engineering Proceedings, 2024. **79**(1): p. 44.
23. Gouisssem, L. and A. Benmekideche, *Contribution to the expansion of low density polyethylene by the use of chemical blowing agents based on sodium bicarbonate and/or citric acid*. Polymer Science, Series A, 2021. **63**(5): p. 542-555.
24. Holden, G., *Holden Polymer Consulting, Incorporated, PMB 473, 1042 Willow Creek Road, A101 Prescott, AZ 86305-1670, USA*. Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials, 2011: p. 77.
25. Maji, P. and K. Naskar, *Styrenic Block copolymer-based thermoplastic elastomers in smart applications: Advances in synthesis, microstructure, and structure–property relationships—a review*. Journal of Applied Polymer Science, 2022. **139**(39): p. e52942.
26. Cakir, S., et al., *The effect of foaming agent on mechanical and physical properties of polypropylene*. Mater Sci: Adv Compos Mater, 2018. **2**: p. 1-7.
27. Jiang, X.-L., et al., *Effects of crystal structure on the foaming of isotactic polypropylene using supercritical carbon dioxide as a foaming agent*. The Journal of Supercritical Fluids, 2009. **48**(2): p. 167-175.
28. Soares, F.A. and S.M.B. Nachtigall, *Effect of chemical and physical foaming additives on the properties of PP/wood flour composites*. Polymer Testing, 2013. **32**(4): p. 640-646.
29. Makina, A.P. 2025; Available from: <https://ahp-makina.com/shop/universal-tensile-compression-tester-utm/>.
30. Equipment, H.I. 2025; Available from: <https://www.haidaequipment.com/rubber-plastic-test-equipment.html>.
31. Barnwell. 2025; Available from: <https://www.barnwell.co.uk/shore-a-hardness/>.
32. Vinogradov, G.V. and A.Y. Malkin, *Rheology of polymers: viscoelasticity and flow of polymers*. 1980: Springer.
33. Landel, R.F. and L.E. Nielsen, *Mechanical properties of polymers and composites*. 1993: CRC press.
34. James, H.M. and E. Guth, *Theory of the elastic properties of rubber*. The Journal of Chemical Physics, 1943. **11**(10): p. 455-481.
35. Bourgoigne, Q.C., V. Bouchart, and P. Chevrier, *On the physical interpretation of pseudo-plastic behaviour of polymers and prediction for various environmental conditions*. Comptes Rendus. Mécanique, 2021. **349**(3): p. 465-484.
36. Laun, H.M., *Capillary rheometry for polymer melts revisited*. Rheologica acta, 2004. **43**: p. 509-528.



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve ortaöğrenimini Karabük'te tamamladı. 2015 yılında Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2021 yılında mezun oldu. Lisans öğrenimi süresince kalite kontrol ve üretim alanlarında staj yaptı. 2022 yılında Yalova Üniversitesi Polimer Malzeme Mühendisliği alanında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans süresince, PLA/TPU karışımlarında nikel kaplı grafit, grafit ve nikel katkılarının uyumluluk, iletkenlik ve reolojik özellikler üzerindeki etkilerine yönelik araştırmalarda görev aldı. Ayrıca Polimer Geri Dönüşüm Günleri ve Plast Eurasia gibi mesleki ve sektörel etkinliklere katıldı.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

14. Uluslararası mühendislik, mimarlık ve tasarım kongresi.