



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YALITIM MALZEMESİ OLARAK ATIK POLİVİNİL
KLORÜR (PVC) ESASLI KOMPOZİT KÖPÜK ÜRETİMİ
VE ÖZELLİKLERİ**

YILDIZ BİRBİLEN

DOKTORA TEZİ
ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2024

**T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YALITIM MALZEMESİ OLARAK ATIK POLİVİNİL
KLORÜR (PVC) ESASLI KOMPOZİT KÖPÜK
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ**

YILDIZ BİRBİLEN

**DOKTORA TEZİ
Orman Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

KAHRAMANMARAŞ 2024

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

YILDIZ BİRBİLEN

Bu çalışma YÖK 100/2000 Doktora projesi, TÜBİTAK/BİDEB 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon birimi tarafından desteklenmiştir.

YÖK 100/2000 alanı: Sürdürülebilir yapı malzemeleri ve teknolojileri

TÜBİTAK/BİDEB Burs Başvuru No: 1649B031902267

BAP Proje No: 2020/1-14D

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

YALITIM MALZEMESİ OLARAK ATIK POLİVİNİL Klorür (PVC) ESASLI KOMPOZİT KÖPÜK ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

(DOKTORA TEZİ)

YILDIZ BİRBİLEN

ÖZET

Petrokimya esaslı bir polimer olan polivinil klorür (PVC)'ün çok geniş bir kullanım alanına sahip olması kullanım ömrünü tamamladıktan sonra atık olarak çevreye bırakılma oranının çok büyük olması demektir ve bu oran her geçen gün artmaktadır. Bu PVC atıkların depolama alanlarında bekletilmesi ya da yakılarak bertaraf edilmesi çevresel sorunlara yol açmaktadır. PVC atıklar için en uygun yöntem geri dönüşümdür ancak PVC atıkların çok küçük bir yüzdesi geri dönüştürülmektedir. PVC atıkların geri dönüştürülerek tekrar üretime kazandırılabilmesi için alanlardan bir tanesi termoplastik köpüklerdir. Termoplastik köpükler düşük yoğunluk ve maliyet, iyi ısı ve ses yalıtımı özellikleri, yüksek enerji absorblama vb. özelliklerinden dolayı ön plana çıkmakta ve otomobil parçaları, ambalaj malzemeleri, yalıtım malzemeleri, yüzdürme ekipmanları olarak birçok alanda tercih edilmektedir. Ayrıca termoplastik köpüklerin daha çevre dostu bir malzeme olması açısından yenilenebilir malzemeler olan ve atık olarak fazla miktarlarda bulunan lignoselülozik malzemelerle birlikte odun plastik kompozit köpükler de üretilebilmektedir. Bu konular kapsamında çalışmada alternatif bir ısı yalıtım malzemesi olarak atıkların geri dönüştürülmesine katkı sağlayan, daha çevre dostu, maliyeti düşük, yanmaya karşı dirençli atık PVC esaslı polimer kompozit köpüklerin üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada matris elemanı olarak kapı ve pencere profil endüstriyel atıkları (atık PVC), lignoselülozik dolgu malzemesi olarak ise kavak kereste atıkları ve çam ağaç kabukları kullanılmış, atık PVC esaslı kompozit köpüklerin üretimi pres kalıplama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. PVC'nin işlenmesi için plastikleştirici olarak dioktil ftalat (DOP), ısı stabilizatörü olarak Ca/Zn stabilizatör, ekzotermik köpük ajanı olarak azodikarbonamit ve endotermik köpük ajanı olarak sodyum bikarbonat ve sitrik asit karışımı kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde optimum köpük yapısını oluşturmak için atık PVC; farklı plastikleştirici oranları, farklı kimyasal köpük ajanları ve miktarları kullanılarak köpüklendirilmiştir. Üretilen PVC köpüklerin fiziksel (yoğunluk, su alma ve kalınlık artımı), mekanik (çekme, eğilme, darbe özellikleri), termal (termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)), morfolojik (hücre yapısı görüntüleri) ve ısı iletkenlik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üretilen atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri 0,581-1,109 g/cm³ arasında değişiklik göstermektedir. Atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri kontrol örneğine göre yani köpüklendirilmemiş PVC'ye göre azalmış ve köpük ajanı miktarının artmasıyla azalmaya devam etmiştir. Isı iletkenlik katsayısı değerlerine göre üç grup haricinde üretilen bütün köpükler yalıtım malzemesi sınıfına girmektedir. Genel olarak ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler daha fazla hücre sayısı, daha küçük hücre boyutu, daha yüksek hücre yoğunluğu ve boşluk oranı göstermiştir. DOP miktarı arttıkça hücre boyutu artmış ve boşluk oranı azalmıştır. Sonuç olarak üretilen atık PVC köpüklerde optimum köpüklendirmenin 0,25 phr ekzotermik köpük ajanı içeriğinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise belirlenen optimum köpük içeriği oranları kullanılarak PVC kompozit köpükler üretilmiştir. Özellikleri belirlenen PVC kompozit köpüklerde dolgu maddesi türü, miktarı ve boyutunun etkisi incelenmiştir. PVC kompozit köpüklerin özelliklerinin kıyaslanması amacıyla aynı içeriğe sahip PVC kompozitler üretilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üretilen atık PVC kompozitlerin yoğunluk değerleri $1,253-1,414 \text{ g/cm}^3$ arasında değişiklik gösterirken atık PVC kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri $0,853-1,152 \text{ g/cm}^3$ arasında değişiklik göstermiştir. Bütün kompozitlerin çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, kopmada uzama, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci değerleri kompozit köpüklerin direnç değerlerinden daha yüksektir. Kompozit köpüklerin çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü değerleri dolgu malzemesi içermeyen kontrol örneğine göre daha yüksektir. Genel olarak dolgu malzemesi miktarının artması ile değerler artış göstermiştir. Isı iletkenlik katsayısı değerlerine göre üretilen atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerde bütün gruplar yalıtım malzemesi olarak sınıflandırılabilir. Atık PVC kompozitlerin tamamının ısıl geçirgenlik direnci atık PVC kompozit köpüklerinkinden daha düşüktür. Kompozit köpüklerin hücre yapısı dolgu malzemesi içermeyen köpüklere göre değerlendirildiğinde hücre sayısında azalma meydana geldiği ve genel olarak daha büyük hücreler oluşarak hücre yapısının düzensizleştiği gözlemlenmiştir. Dolgu malzemesi miktarının artması ile 15 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar hücre sayısı azalmış, hücre boyutu artmış, hücre yapısı düzensizleşmiş ve daha fazla hücre birleşmesi meydana gelmiştir. 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde ise hücre oluşumu azalmıştır. Her iki dolgu malzemesinde de dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe daha küçük hücre oluşumu meydana gelmiş ve hücre sayısı artmıştır. Dolgu malzemesi boyutu fark etmeksizin 15 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler daha iyi hücre yapısı sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, atık PVC, geri dönüşüm, odun plastik kompozit köpük, kavak kereste atığı, ağaç kabuğu, ısı iletim katsayısı, mekanik özellikler.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Orman Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ocak/2024

Danışman: Doç. Dr. KADİR KARAKUŞ

İkinci Danışman: Prof. Dr. FATİH MENGELOĞLU

Sayfa sayısı: 192

**AS AN INSULATION MATERIAL, MANUFACTURE OF WASTE POLYVINYL
CHLORIDE (PVC) COMPOSITE FOAMS AND THEIR PROPERTIES
(PhD. THESIS)**

YILDIZ BİRBİLEN

ABSTRACT

PVC, which is a petrochemical-based polymer, has very wide usage areas, which it's very a high generate amount of waste post-consumption and this amount is increasing day by day. Storage in landfills or disposal by burning of these PVC wastes leads to environmental problems. The most suitable method for PVC waste is recycling, but a very small percentage of PVC waste is recycled. Thermoplastic foams are one of the areas which can be reused by recycling of PVC wastes. Thermoplastic foams are widely used as automotive seating, packaging materials, insulation materials, and buoyance materials due to their low density and cost, good thermal and acoustic insulation properties, high energy absorption performance, etc. In addition, in order to manufacture thermoplastic foams more eco-friendly, wood-plastic composite foams can be produced together with lignocellulosic materials, which are renewable materials and are found in large quantities as waste. Within the scope of these issues, in this study to the manufacture of PVC-based wood plastic composite foams as an alternative thermal insulation materials that contribute to the recycling of waste, more environmentally friendly, low cost, and fire resistant were aimed. For this purpose, PVC composite foam materials were produced by using waste PVC obtained from door and window profile wastes as matrix elements, poplar timber wastes, and tree barks as lignocellulosic materials. PVC composite foams were carried out using the compression molding method. Dioctyl phthalate (DOP) was used as a plasticizer, Ca/Zn stabilizer as a heat stabilizer, azodicarbonamide as an exothermic foaming agent, and a mixture of sodium bicarbonate and citric acid as an endothermic foaming agent in PVC composite foams production.

In the first chapter of the study, waste PVC was foamed to create the optimum foam structure using different plasticizer amounts, different foaming agents, and different chemical foaming agent amounts. The produced PVC foams physical (density, water absorption, and thickness swelling), mechanical (tensile, flexural, impact properties), thermal (thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC)), morphological (cell structure images) and thermal conductivity properties were determined. According to the results obtained, the density values of the waste PVC foams were in the range of 0.581-1.109 g/cm³. In waste PVC foams, density values were decreased compared to the control sample, that is, unfoamed PVC, and continued to decrease with the increase of foaming agent amount. According to thermal conductivity coefficient values, except for three groups all waste PVC foams produced can be classified as insulation materials. In general, waste PVC foams produced with exothermic foaming agent were showed higher number of cells, smaller cell size, higher cell density, and void fraction compared to foams produced with endothermic foaming agent. With the rising of DOP amount, cell coalescences and cell collapses were occurred the cell size was increased and the void fraction were decreased. As a result, in the waste PVC foams

produced, optimum foaming was determined that was achieved with the content of 0.25 phr exothermic foaming agent.

In the second chapter of the study, PVC composite foams were produced using the optimum foam content amounts determined in the first chapter. The effects of filler type, filler amount, and filler size on the properties of PVC composite foams were investigated. With waste PVC composite foams have been same content waste PVC composites were produced and their results were compared. While the density values of the waste PVC composites were in the range of 1.253-1.414 g/cm³, the density values of the waste PVC composite foams in the range of 0.853-1.152 g/cm³. The tensile strength, tensile modulus, elongation of break, flexural strength, flexural modulus, and impact strength values of all composites are higher than the values of composite foams. Tensile strength, tensile modulus, flexural strength, and modulus values of composite foams are higher than control samples. Generally, the values were increased with the increase of filler material amount. All of the waste PVC composites and composite foams can be classified as insulation materials according to thermal conductivity coefficient values. The thermal resistance values of all of the composites are lower than that of composite foams. When the cell structures of composite foams compared to unfilled composite foams were evaluated it was observed that the number of cells were reduced and generally larger cells were occurred and the cell structure became irregular. With the rising of fillers amount, up to 15 phr filler amount, the number of cells were reduced, the average cell size and cell coalescence were increased, and a very nonuniform cell size distribution were occurred. The cell nucleation and cell growth were reduced in the 20 phr filler content. In both filler materials, as the filler size smaller, the lower cell size were occurred and the number of cells were increased. Regardless of the filler size, in the produced composite foams with the poplar timber waste up to 15 phr filler amount were observed to better cell structure.

Keywords: Sustainability, PVC waste, recycle, wood plastic composite foam, poplar timber waste, tree bark, thermal conductivity coefficient, mechanical properties.

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Forest Industry Engineering, January/2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. KADİR KARAKUŞ

Co-supervisor: Prof. Dr. FATİH MENGELOĞLU

Page number: 192

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde emek veren, destek olan ve yön gösteren değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Kadir KARAKUŞ ve Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde bulunan ve desteğini esirgemeyen saygı değer Prof. Dr. Mehmet TÜMER ve Prof. Dr. İbrahim BEKTAŞ hocalarıma, tez jürimde bulunan ve katkıda bulunan jüri üyelerim Prof. Dr. Deniz AYDEMİR, Prof. Dr. Ayfer DÖNMEZ ÇAVDAR ve Doç. Dr. Alperen KAYMAKÇI hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı YÖK 100/2000 programı ile destekleyen Yükseköğretim Kurulu (YÖK) ve TÜBİTAK/BİDEB 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım için olanaklarını kullanmama müsaade eden Prof. Dr. Ahmet TUTUŞ, Doç. Dr. Ertuğrul ALTUNTAŞ ve Prof. Dr. M. Hakkı ALMA'ya teşekkür ederim.

Çalışmamda ilgi ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Hilal YILDIRIM, Mustafa Kadir YALMAN ve Ziya KARATAŞ'a çok teşekkür ederim.

Beni bu günlere yetiştiren ve öğrenimim süresince her zaman yanımda olan maddi manevi her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen emek veren sevgili aileme teşekkür ve minnettarlığımı sunarım.

YILDIZ BİRBİLEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Sürdürülebilirlik	3
1.1.1. Sürdürülebilir yapı malzemeleri	4
1.2. Isı Yalıtımı.....	6
1.2.1. Yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri.....	7
1.2.1.1. Taş yünü.....	7
1.2.1.2. Cam yünü	8
1.2.1.3. Genleştirilmiş polistren köpük (EPS)	8
1.2.1.4. Ekstrude polistren köpük (XPS)	8
1.2.1.5. Poliüretan köpük	9
1.3. Termoplastik Esaslı Köpük Malzemeler	9
1.3.1. Köpük mekanizması	10
1.3.2. Köpük üretim yöntemleri.....	12
1.3.2.1. Ekstrüzyon yöntemi	12
1.3.2.2. Mikro hücre yöntemi	13
1.3.2.3. Enjeksiyon yöntemi	14
1.4. Polivinil Klorür (PVC).....	15
1.4.1. PVC üretim ve tüketim miktarı	16
1.4.2. PVC atıkların geri dönüştürülmesi	17
1.4.3. PVC’de kullanılan katkı malzemeleri.....	19
1.4.3.1. Plastikleştiriciler	19
1.4.3.2. Isı stabilizatörleri	20
1.4.3.3. Köpük ajanları.....	21

1.5. Lignoselülozik Malzemeler	26
1.5.1. Kavak.....	26
1.5.2. Ağaç kabuğu	27
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	29
3. MATERYAL VE METOT	47
3.1. Materyal	47
3.1.1. Termoplastik polimer	47
3.1.2. Lignoselülozik dolgu malzemeleri	47
3.1.3. Katkı maddeleri	48
3.2. Metot	49
3.2.1. Hammaddelerin TGA ve DSC analizleri.....	49
3.2.2. Lignoselülozik dolgu malzemelerinin hazırlanması.....	49
3.2.4. Atık PVC kompozit köpüklerin üretilmesi.....	49
3.2.5. Atık PVC kompozit köpüklerin özelliklerinin belirlenmesi.....	54
3.2.5.1. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi.....	54
3.2.5.2. Mekanik özelliklerin belirlenmesi	56
3.2.5.3. Isı iletkenlik analizi.....	58
3.2.5.4. Hücre yapısı analizi	58
3.2.5.6. İstatistik analizi	59
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
4.1. Kompozit Köpük Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Termogravimetrik Analizi (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi	60
4.1.1. Atık PVC'nin TGA ve DSC analizleri	60
4.1.2. Köpük ajanlarının TGA ve DSC analizleri.....	61
4.1.3. Lignoselülozik dolgu malzemelerinin TGA analizleri	63
4.2. Atık PVC Köpüklerin Özellikleri.....	65
4.2.1. Atık PVC köpüklerin fiziksel özellikleri	65
4.2.2. Atık PVC köpüklerin mekanik özellikleri	69
4.2.3. Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik özellikleri.....	96
4.2.4. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı	99
4.3. Atık PVC Kompozit ve Kompozit Köpüklerin Özellikleri.....	110
4.3.1. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin fiziksel özellikleri	110
4.3.2. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin mekanik özellikleri	118
4.3.3. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı iletkenlik özellikleri.....	142

4.3.4. Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı	146
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	149
KAYNAKLAR.....	156
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. PVC kapı ve pencere profil atıkları.....	47
Şekil 3.2. Lignoselülozik dolgu malzemeleri	48
Şekil 3.3. Atık PVC kompozit köpük üretiminde kullanılan katkı maddeleri.....	49
Şekil 3.4. Atık PVC kompozit köpüklerin karışım aşamaları	51
Şekil 3.5. Atık PVC kompozit köpüklerin üretim aşamaları.....	52
Şekil 3.6. Üretilen atık PVC esaslı kompozit ve kompozit köpük malzemeler.....	54
Şekil 3.7. Yoğunluk belirleme cihazı	55
Şekil 3.8. Su alma ve kalınlık artımı değerinin belirlenmesi.....	56
Şekil 3.9. Universal test makinesi	57
Şekil 3.10. Darbe direncinin belirlenmesi	57
Şekil 3.11. Isı iletkenlik test cihazı.....	58
Şekil 4.1. Atık PVC'nin TGA ve DTG grafiği.....	60
Şekil 4.2. Atık PVC'nin DSC grafiği	61
Şekil 4.3. Endotermik köpük ajanının TGA ve DTG grafiği	61
Şekil 4.4. Endotermik köpük ajanının DSC grafiği.....	62
Şekil 4.5. Ekzotermik köpük ajanının TGA grafiği.....	62
Şekil 4.6. Ekzotermik köpük ajanının DSC grafiği	63
Şekil 4.7. Kavak testere atığının TGA grafiği	64
Şekil 4.8. Ağaç kabuğunun TGA grafiği.....	65
Şekil 4.9. Atık PVC köpüklerin yoğunluk grafikleri.....	69
Şekil 4.10. Atık PVC köpüklerin çekme direnci grafikleri	72
Şekil 4.11. Atık PVC köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri.....	74
Şekil 4.12. Atık PVC köpüklerin çekmede elastikiyet modülü grafikleri.....	76
Şekil 4.13. Atık PVC köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü grafikleri.....	78
Şekil 4.14. Atık PVC köpüklerin kopmada uzama grafikleri.....	80
Şekil 4.15. Atık PVC köpüklerin spesifik kopmada uzama grafikleri	82

Şekil 4.16. Atık PVC köpüklerin eğilme direnci grafikleri	85
Şekil 4.17. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci grafikleri	87
Şekil 4.18. Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü grafikleri	89
Şekil 4.19. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri	91
Şekil 4.20. Atık PVC köpüklerin darbe direnci grafiği	94
Şekil 4.21. Atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci grafiği.....	96
Şekil 4.22. Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı grafiği	98
Şekil 4.23. Atık PVC köpüklerin ısı geçirgenlik direnci grafiği	99
Şekil 4.24. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı analizi.....	101
Şekil 4.25. Atık PVC köpüklerin hücre sayısı grafikleri.....	102
Şekil 4.26. Atık PVC köpüklerin hücre boyutu grafikleri.....	103
Şekil 4.27. Atık PVC köpüklerin hücre yoğunluğu grafikleri.....	104
Şekil 4.28. Atık PVC köpüklerin boşluk oranı grafikleri.....	106
Şekil 4.29. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı görüntüleri	109
Şekil 4.30. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk grafikleri.....	113
Şekil 4.31. Atık PVC kompozitlerin su alma grafikleri	114
Şekil 4.32. Atık PVC kompozitlerin su alma grafikleri	115
Şekil 4.33. Atık PVC kompozit köpüklerin su alma grafikleri	116
Şekil 4.34. Atık PVC kompozitlerin kalınlık artımı grafikleri.....	117
Şekil 4.35. Atık PVC kompozit köpüklerin kalınlık artımı grafikleri.....	118
Şekil 4.36. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme direnci grafikleri	121
Şekil 4.37. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri	123
Şekil 4.38. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü grafikleri	125
Şekil 4.39. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü grafikleri	127
Şekil 4.40. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kopmada uzama grafikleri.....	129

Şekil 4.41. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik kopmada uzama grafikleri	131
Şekil 4.42. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilme direnci grafikleri.....	134
Şekil 4.43. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilme direnci grafikleri	135
Şekil 4.44. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü grafikleri	137
Şekil 4.45. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri	138
Şekil 4.46. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci grafiği	141
Şekil 4.47. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik darbe direnci grafikleri	142
Şekil 4.48. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı grafiği ..	144
Şekil 4.49. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı geçirgenlik direnci grafiği .	146
Şekil 4.50. Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı analizi.....	146
Şekil 4.51. Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı görüntüleri	148

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Atık PVC köpük üretim planı.....	50
Çizelge 3.2. Atık PVC kompozit köpüklerin üretim planı	52
Çizelge 3.3. Atık PVC kompozit üretim planı	53
Çizelge 4.1. Atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri	66
Çizelge 4.2. Atık PVC köpüklerin yoğunluk değerlerinin istatistik sonuçları	67
Çizelge 4.3. Atık PVC köpüklerin çekme değerleri	70
Çizelge 4.4. Atık PVC köpüklerin çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları.....	71
Çizelge 4.5. Atık PVC köpüklerin spesifik çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları	73
Çizelge 4.6. Atık PVC köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları.....	75
Çizelge 4.7. Atık PVC köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları	77
Çizelge 4.8. Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları	79
Çizelge 4.9. Atık PVC köpüklerin spesifik kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları.....	81
Çizelge 4.10. Atık PVC köpüklerin eğilme değerleri.....	83
Çizelge 4.11. Atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları	84
Çizelge 4.12. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları.....	86
Çizelge 4.13. Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları.....	88
Çizelge 4.14. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları	90
Çizelge 4.15. Atık PVC köpüklerin darbe direnci değerleri.....	92
Çizelge 4.16. Atık PVC köpüklerin darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları	93
Çizelge 4.17. Atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları	95
Çizelge 4.18. Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik değerleri.....	97
Çizelge 4.19. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı değerleri	100

Çizelge 4.20. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri	111
Çizelge 4.21. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk değerlerinin istatistik sonuçları	112
Çizelge 4.22. Atık PVC kompozitlerin çekme değerleri	119
Çizelge 4.23. Atık PVC kompozit köpüklerin çekme değerleri	119
Çizelge 4.24. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları	120
Çizelge 4.25. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları	122
Çizelge 4.26. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları	124
Çizelge 4.27. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları	126
Çizelge 4.28. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları	128
Çizelge 4.29. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları	130
Çizelge 4.30. Atık PVC kompozitlerin eğilme değerleri	131
Çizelge 4.31. Atık PVC kompozit köpüklerin eğilme değerleri	132
Çizelge 4.32. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları	133
Çizelge 4.33. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları	134
Çizelge 4.34. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları	136
Çizelge 4.35. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları	138
Çizelge 4.36. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci değerleri.....	139
Çizelge 4.37. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları	140
Çizelge 4.38. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları	141
Çizelge 4.39. Atık PVC kompozitlerin ısı iletkenlik değerleri.....	143

Çizelge 4.40. Atık PVC kompozit köpüklerin ısı iletkenlik değeri.....	144
---	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DOP	“Dioktil ftalat”
K	“Kelvin”
kJ	“Kilojoule”
λ	“Isı iletkenlik katsayısı”
mesh	“Elek boyutu”
MPa	“Mega paskal”
phr	“Per hundred resin (gram cinsinden 100 gram polimere eklenen malzeme miktarı)”
PVC	“Polivinil klorür”
W	“Watt”

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun artması, doğal kaynakların tükenmeye başlaması, çevre kirliliğinin artarak iklim değişikliğine sebep olması vb. etkenlerden dolayı sürdürülebilirlik kavramı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Sürdürülebilirlik; ekonomik, toplumsal veya ekolojik devamlılık arz eden herhangi bir sistemin aralıksız olarak devam etmesi anlamına gelmektedir. Günümüz kaynaklarını tüketmeden en yüksek verimle kullanmayı ve gelecek nesillere de aynı şekilde aktarmayı hedeflemektedir (World Commission on Environment and Development, 1987; Güney Karadişoğulları, 2013; Egercioğlu ve İregöl, 2017). Sürdürülebilirlik çerçevesinde incelenmesi gereken en önemli sektörlerden bir tanesi yapı sektörüdür. Yapı sektörü çevre kirliliğine sebep olmakta, doğal kaynakları hızla tüketmekte ve ekolojik dengeye büyük zararlar vermektedir. Bu nedenle yaşam ihtiyacı olan binaların yapım, kullanım ve yıkım aşamalarında çevreye verilen zararın minimuma indirildiği, doğal kaynakların, suyun ve enerjinin verimli kullanıldığı, ekolojik dengenin korunduğu, insan sağlığı ve konforunun gözetildiği, atık yönetiminin sağlandığı ve tüm bunların sistematik olarak ilerleyeceği faaliyetlerle yapı sektörü devam ettirilmelidir (Yılmaz ve ark., 2016). Bu açıdan bina tasarımında sürdürülebilir yapı malzemelerinin kullanımı önem taşımaktadır. Sürdürülebilir yapı malzemeleri; doğal kaynaklardan elde edilen, sağlığa zararlı olmayan, uzun ömürlü, yerel, işlenmesi, kullanımı, bakım ve onarımı süreçlerinde minimum su ve enerji harcayan, yaşam döngüleri boyunca çevre, su ve hava kirliliğine sebep olmayan, minimum atık oluşturan, yenilenebilir, geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir olan malzemelerdir (Kim ve Rigdon, 1998).

Bir yapının sürdürülebilirliğini sağlayan en önemli kriter enerji verimliliğidir. Yapı sektörü üretim, kullanım ve kullanım sonrası aşamalarında enerji tüketimi konusunda yüksek bir paya sahiptir. Bu nedenden dolayı enerji verimliliğinin sağlanması konusunda binalar büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının raporuna göre enerji tüketiminin yaklaşık % 25'inin binalar tarafından tüketildiği belirtilmektedir. Tüketilen toplam enerjinin yaklaşık % 50-60'ı bina kullanım aşamasında ısınma amaçlı kullanılmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Binalarda enerji tüketiminin azaltılmasında en önemli etken ısı yalıtımıdır. Isı yalıtımı, farklı sıcaklıklara sahip iki ortam arasındaki ısı geçişini engellemek veya azaltmak anlamına gelmektedir. Herhangi bir bedensel faaliyette bulunmayan insan için kabul edilebilir oda sıcaklığı kış mevsimi için 20-21 °C, yaz mevsimi için ise 21-22 °C'dir.

Binalarda ısı kayıpları zemin, çatı, duvar ve pencerelerden meydana gelmektedir. En fazla ısı kaybının yaşandığı alanları binanın büyük bir yüzdesini kapsayan duvarlar oluşturmaktadır. Binanın uygun yalıtım malzemesi kullanılarak doğru bir şekilde kaplanması ısınin korunması ve ısı kayıplarının minimize edilmesi ile % 50-70 oranlarında enerji tasarrufu sağlayabilmektedir (Kılınç ve ark., 2013; Uygunoğlu ve ark., 2015).

Dünya çapında en fazla kullanılan üç termoplastik polimerden biri polivinil klorür (PVC)'dür. PVC; yapı, ambalaj ve otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Braun, 2002; Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011; Carraher, 2013; Janajreh ve ark., 2015; Singh ve ark., 2017). Tüketilen PVC'nin neredeyse yarısı kapı ve pencere profillerinin üretiminde kullanılmaktadır. Pencere çerçeveleri uzun ömürlü bir ürün olmasına rağmen kullanım ömrü sonunda büyük bir atık oluşmasına sebep olmaktadır. PVC pencere profil atıkları endüstriyel atık ve tüketim sonrası atık olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Endüstriyel atık üretim sırasında ortaya çıkan parça ve ıskartaları içerirken tüketim sonrası atık ise kullanım ömrünü tamamlayan atıkları içermektedir (Stichnothe ve Azapagic, 2013).

Atık yönetiminde atık yönetim piramidi esas alınarak üst basamaktan alt basamaklara doğru değerlendirilmektedir. İlk basamak atığın oluşmasının önlenmesidir. Eğer bu sağlanamıyorsa atık miktarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Atık minimizasyonundan sonra oluşan atıkların yeniden kullanımı, yeniden kullanılamayan atıkların ise geri dönüşümü sağlanmalı, bu aşamalardan sonra kalan atığın diğer bir deyişle bu yöntemleri uygulayamadığımız atığın enerji geri kazanımı amacıyla yakılarak bertaraf edilmesi yapılacak en son işlemdir. Yapısı gereği depolama alanlarında bekletildiğinde ya da yakıldığında önemli ölçüde tehlike arz eden PVC için en uygun atık yöntemi geri dönüşümdür. Ancak ne yazık ki çok küçük bir oran PVC atık geri dönüştürülmektedir (Karasu, 2013).

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik çerçevesince PVC atık miktarının minimuma indirilmesi, PVC atıkların geri dönüştürülerek yeniden kullanıma kazandırılması, çevreye olan zararlı etkinin azaltılması, doğal kaynakların korunması, ekonomik katma değer sağlanması, binalarda ısınma amaçlı kullanılan enerjinin verimli kullanılması vb. etkenler doğrultusunda alternatif bir ısı yalıtım malzemesi olarak atık PVC ve atık lignoselülozik malzemeler kullanılarak daha çevre dostu, maliyeti düşük, yanmaya karşı dirençli PVC esaslı odun plastik kompozit köpüklerin üretilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç kapsamında;

Hipotez 1. Üretilecek ısı yalıtım malzemesinde matris elemanı olarak PVC kapı ve pencere çerçeve profili endüstriyel atığı kullanılarak köpük malzemeler üretilecektir.

Hipotez 2. Atık PVC köpüklerin özellikleri üzerine kimyasal köpük ajanı türü ve miktarının etkisi belirlenecektir.

Hipotez 3. Atık PVC kompozit köpüklerin üretiminde lignoselülozik dolgu malzemesi olarak kavak kereste atıkları ve ağaç kabukları kullanılarak atıkların değerlendirilmesi sağlanacaktır.

Hipotez 4. Atık PVC kompozit köpüklerde dolgu malzemesi türü, miktarı ve boyutunun köpük malzemenin özellikleri üzerine etkisi belirlenecektir.

Hipotez 5. Atık PVC kompozit köpüklerin fiziksel (yoğunluk, su alma ve kalınlık artımı), mekanik (çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, kopmada uzama, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci), termal (termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), morfolojik (hücre yapısı görüntüleri ve analizi) ve ısı iletkenlik özellikleri belirlenecektir.

Hipotez 6. Atık PVC kompozit köpüklerle aynı içeriğe sahip atık PVC kompozitler üretilerek sonuçlar karşılaştırılacaktır.

1.1. Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik kavramının dünyaya yayılışı ve yaygınlaşmasının ilk resmi raporu sayılan Birleşmiş Milletler Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından yayınlanmış olan Brundtland Raporuna göre sürdürülebilirlik, “Gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeden, bugünün mevcut gereksinimlerini karşılamayı sağlama yeteneği” olarak tanımlanmaktadır (World Commission on Environment and Development, 1987). Başka bir deyişle sürdürülebilirlik; ekonomik, toplumsal veya ekolojik herhangi bir devamlılık arz eden sistemin aralıksız olarak devam etmesini öngören bir kavramdır. Sürdürülebilirlik kavramı kullanılan kaynakları bozmadan ve tüketmeden en yüksek verimle kullanmayı amaçlamaktadır. Daha açık bir ifadeyle sürdürülebilirlik; insan yaşam kalitesini sosyal eşitlik, ekonomik ve ekolojik olarak denge sağlayacak şekilde karşılamak, çevre kirliliğini minimum seviyede tutarak sağlıklı ve yaşanabilir bir çevre oluşturmak, minimum atık üretmek, doğal kaynakları tüketmemek, enerjiyi verimli bir

şekilde kullanmak ve bu döngünün aralıksız devam etmesini sağlamak demektir (Güney Karadişoğulları, 2013; Egercioğlu ve İregöl, 2017).

1980’li yılların başlarından başlayıp günümüzde hala devam eden küresel ısınma, iklim değişikliği, ozon tabakasının zarar görmesi, asit yağmurları, çevre kirliliği, CO₂ salınımı gibi olayların insan hayatında tehlike oluşturan konular olduğu bilinen bir gerçektir (Ulusoy ve ark., 2016). Çevre kirliliğinin en büyük kaynakları ısınma ve ulaşım amaçlı kullanılan yakıtların çevreye bıraktığı sera gazlarıdır. İnsanlar tarafından bir taraftan çevre kirletilirken diğer taraftan da doğal kaynakların bilinçsizce tüketilmesi bu kaynakların sürdürülebilirliği açısından endişe oluşturmıştır. Bu nedenle tüm dünyada sürdürülebilirlik kapsamında çevrenin ve doğal kaynakların uzun vadeli korunması amaçlanmıştır (Pamuk ve Kuruoğlu, 2016; Ulusoy ve ark., 2016). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC)’nde imzalanan iklim değişikliği ve küresel ısınma ile mücadeleye yönelik uluslararası bir protokol olan Kyoto Protokolü çerçevesinde fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonunun azaltılması konusunda gerekli önlemlerin alınmasının gerekliliği vurgulanmıştır (Ünal, 2013).

Çevre kirliliğine sebep olması, doğal kaynakların hızla tüketilmesi ve ekolojik dengeyi bozması gibi nedenlerden dolayı sürdürülebilirlik kapsamında ele alınması gereken en önemli alanlardan bir tanesi yapı sektörüdür (Dikmen ve Savcı, 2015; Ulukavak Harputlugil ve Kılınç, 2016; Yılmaz ve ark., 2016).

1.1.1. Sürdürülebilir yapı malzemeleri

Yapı sektöründe sürdürülebilirlik, yaşam ihtiyacı olan binaların yapım, kullanım ve yıkım süreçlerinde çevreye verilen zararın minimuma indirildiği, doğal kaynakların, suyun ve enerjinin verimli kullanıldığı, ekolojik dengenin korunduğu, insan sağlığı ve konforunun gözetildiği, atık yönetiminin sağlandığı ve tüm bunların sistematik olarak ilerleyeceği faaliyetler bütünüdür (Yılmaz ve ark., 2016). Sonuç olarak sürdürülebilir bir yaşam için enerji verimliliği yüksek, çevreye daha az zarar veren, karbon salınımı daha düşük, doğal ve yenilenebilir kaynaklardan oluşan yeşil binalar geliştirilmiştir (İMSAD, 2012). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan 2012-2023 Enerji Verimliliği Strateji Belgesi'nde binaların enerji tüketimlerinin ve karbon salınımlarının azaltılması sağlanarak çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan yeşil binaların yaygınlaştırılması hedeflenmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2012). Yeşil

binalarda kullanıcı gereksinimleri sağlanırken yapının bölgesel koşullar göz önüne alınarak tasarlanması, bina inşasında yerel ve doğal malzemelerin kullanılması, binanın yapımında ve kullanımında yenilenebilir enerjinin kullanılması ve enerji verimliliğinin ön planda tutulması, binanın uzun ömürlü olması ve çevreye verilen olumsuz etkiyi minimuma indirmeyi sağlaması amaçlanmaktadır (Güney Karadişoğulları, 2013).

Dünyada yeşil binaların çevresel performanslarının değerlendirilmesinde çeşitli sertifika sistemleri bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanları BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method-İngiltere 1990), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design-ABD 1998), IISBE (International Initiative for Sustainable Built Environmentçok uluslu 1998), GREENSTAR- Avustralya 2003), CASBEE (Comprehensive Assessment for Building Environmental Efficiency-Japonya 2004) ve DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen-Almanya 2009)'dir. Ülkemizde daha önce kurumsallaşmış bir sertifika sistemi bulunmayıp genellikle LEED ve BREEAM sertifikaları kullanılmaktayken (Dikmen ve Savcı, 2015). 2022 yılında yasal bir düzenleme ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Binalar için Yeşil Sertifika YeS-TR sistemi hayata geçirilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022-resmi gazete).

Bir binanın yaşam döngüsü bina öncesi evre yani üretim aşaması, bina evresi kullanım aşaması ve bina sonrası evre yıkım aşaması olmak üzere üç adımda gerçekleşmektedir. Yapı malzemelerinin her aşamada sürdürülebilirlik çerçevesinde incelenmesi gerekmektedir. Enerji tüketiminin azaltılması, doğal ve yerel malzemelerin kullanılması, atık miktarının azaltılması, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, çevre kirliliğinin azaltılması, suyun korunması ve su arıtımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerin kullanılması, toksik olmayan ya da daha az zararlı olan malzemelerin kullanılması genel olarak dikkat edilmesi gereken konulardır (Kim ve Rigdon, 1998).

Yapı sektörü üretim, kullanım ve kullanım sonrası aşamalarında enerji tüketimi konusunda yüksek bir paya sahiptir. Bu nedenden dolayı enerji verimliliğinin sağlanması konusunda binalar büyük önem taşımaktadır (Güney Karadişoğulları, 2013). Dünya çapında toplam enerji tüketiminin üçte birinden fazlasının ısınma, aydınlatma ve havalandırma gibi bina ihtiyaçları tarafından tüketildiği ifade edilirken yapı malzemeleri üretimi, yapının inşa edilmesi ve bina yıkımı gibi alanlarda harcanan enerjinin ise binalarda tüketilen enerjinin % 1-20'sine eşit olduğu vurgulanmaktadır. AB ülkelerinde

toplam enerji tüketiminin % 40'ından binaların sorumlu olduğu düşünülürken (İMSAD, 2012) ülkemizde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının raporuna göre enerji tüketiminin yaklaşık % 25'inin binalar tarafından tüketildiği belirtilmektedir. Tüketilen toplam enerjinin yaklaşık % 50-60'ı bina kullanım aşamasında ısınma amaçlı kullanılmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Çevreye salınan CO₂ emisyonlarının ise % 40'ından yapılar ve yapılarla ilgili faaliyetler (hammadde üretimi, binanın inşa edilmesi, binanın kullanım süreci ve binanın yıkım aşaması) sorumlu tutulmaktadır (Dikmen ve Savcı, 2015). Binalarda enerji tüketiminin azaltılmasında en önemli etken ısı yalıtımıdır. Isı, sıcak ortamdan soğuk ortama doğru yer değiştirme eğilimindedir. Binalarda iç ortam şartlarının yazın serin kışın ise sıcak tutulabilmesi için bina tasarımında zemin, cephe ve çatı alanının ısı ve su için yalıtılması, cam ve doğramaların yalıtım esasına göre tasarlanması, doğru malzeme seçimi, ısıtma ve soğutma için doğru sistemlerin seçilmesi gerekmektedir (İMSAD, 2012; Güney Karadişoğulları, 2013).

1.2. Isı Yalıtımı

Isı, farklı sıcaklıklara sahip iki ortam arasında daima sıcaktan soğuğa doğru hareket etme eğilimindedir. Binalarda ısı kayıpları zemin, çatı, duvar ve pencerelerden meydana gelmekte ve en fazla ısı kaybının yaşandığı alanları, binanın da büyük bir yüzdesini kapsayan duvarlar oluşturmaktadır. Bina duvarlarından kaynaklanan ısı kayıpları % 50 oranlarını bulabilmektedir. Bina kabuğunun doğru bir şekilde yalıtım malzemesi kullanılarak kaplanması ısının korunması ve ısı kayıplarının minimize edilmesi ile % 50-70 oranlarında enerji tasarrufu sağlayabilmektedir (Kılınç ve ark., 2013; Uygunoğlu ve ark., 2015).

Enerjinin verimli kullanılması doğrultusunda ülkemizde “Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği” 2000 yılında yürürlüğe girmiş ve binalarda yalıtım uygulanması zorunlu hale getirilmiştir. Binalarda ısı yalıtımı uygulaması ile ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılan enerji miktarının azalmasına bağlı olarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Özkan ve ark., 2009). Ülkemizde yalıtım uygulamasında TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardı kullanılmaktadır (TS 825, 2013). TS 825 standardı ülkemizi beş farklı derece bölgesine ayırarak her bölge için maksimum ısı geçirgenlik değeri (U) belirlemiştir. Binaların yalıtımının uygulanmasında bu değerlerin dikkate alınması gerekmektedir. Yapı elemanlarının binaların ısı konforunun sağlanmasındaki en önemli parametresi ısı

iletkenlik katsayısı (W/mK) değeridir. Isı iletkenlik sayısı (λ) bir malzemenin 1 m² yüzey alanından geçen ısı miktarını ifade etmektedir. ISO ve CEN standartlarına göre bir malzemenin yalıtım malzemesi olarak nitelendirebilmesi için ısı iletkenlik katsayısının 0,065 W/mK değerinden daha küçük ısı iletkenlik değerine sahip olması gerekmektedir. (TS 825, 2013; Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Ulukavak Harputlugil ve Kılınç, 2016).

Binaların ısı yalıtım uygulamasında yalıtım malzemesinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Yalıtım malzemesinin seçiminde binanın bulunduğu bölgenin iklim koşulları, yalıtım malzemesinin kalınlık ve ısı iletkenlik katsayısı değeri, yangına karşı direnci (tutuşması, alev yayması ve çıkardığı zehirli gazlar), uygulama kolaylığı, hafif olması (binaya ek yük yüklememesi), su geçirmezliği, neme karşı dirençli olması, böcek ve mikroorganizmalara karşı dayanıklı olması, şekil değiştirmemesi, basınç ve çekme kuvvetlerine karşı dirençli olması, su buharı difüzyon katsayısının (μ değeri) düşük olması, çatlamaya karşı dirençli olması, maliyeti düşük, uzun ömürlü ve dayanıklı olması gibi özellikler göz önünde bulundurulması gereken kriterlerdir (Özkan ve ark., 2009; Bektaş ve ark., 2017). Binalarda en yaygın kullanılan yalıtım malzemeleri taş yünü, cam yünü, EPS (genleştirilmiş polistren köpük), XPS (ekstrude polistren köpük) ve poliüretan köpüktür (Uygunoğlu ve ark., 2015).

1.2.1. Yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri

1.2.1.1. Taş yünü

Taş yünü; doloston, bazalt ve diyabaz gibi birçok kaya türünün yüksek sıcaklıklarda (1350-1400 °C) eritilmesi ile elyaf haline getirilerek üretilen inorganik bir yalıtım malzemesidir. Isı iletkenlik katsayısı 0,035-0,050 W/mK ve yoğunluğu 40-200 kg/m³ arasındadır. 0,8- 1,0 kJ/kgK özgül ısıya sahip bir malzemedir. Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) 1, kullanım sıcaklığı -50/+650 °C aralığındadır. Yangına karşı dayanıklı A1 sınıfı bir malzemedir. Ses absorpsiyon katsayısı 250 Hz’de 0,29, 500 Hz’de 0,52, 1000 Hz’de 0,83 ve 2000 Hz’de 0,91’dir. Maliyeti yüksek bir yalıtım malzemesidir. Kullanım yerine göre farklı boyut ve özelliklerde üretilmektedir. Sıcaklık, rutubet, böcek ve mikroorganizmalara karşı dirençlidir (Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Kaya, 2016; Schiavoni ve ark., 2016; Bektaş ve ark., 2017; Dikici ve Kocagül, 2019).

1.2.1.2. Cam yünü

Cam yünü, cam ve doğal kumun 1300-1450 °C sıcaklıklarda karıştırılıp eritilmesi ve liflendirilmesi ile üretilen bir malzemedir. Isı iletkenlik katsayısı 0,035- 0,050 W/mK ve yoğunluğu 15-200 kg/m³ arasında değişmektedir. 0,9- 1,0 kJ/kgK özgül ısıya sahiptir. Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) 1, kullanım sıcaklığı -50/+250 °C aralığındadır. Yangına karşı dayanıklı A1 sınıfı bir malzemedir. Ses absorpsiyon katsayısı 250 Hz'de 0,45, 500 Hz'de 0,65, 1000 Hz'de 0,75 ve 2000 Hz'de 0,80'dir. Maliyeti yüksek bir yalıtım malzemesidir (Uygunoğlu ve ark., 2015; Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Kaya, 2016; Schiavoni ve ark., 2016; Bektaş ve ark., 2017).

1.2.1.3. Genleştirilmiş polistren köpük (EPS)

EPS, polistiren granüllerinin pentan gazı ile şişirilerek birbirine yapıştırılması ile üretilen bir yalıtım malzemesidir. Isı iletkenlik katsayısı 0,035-0,040 W/mK aralığında ve yoğunluğu 15-30 kg/m³ arasında değişen kapalı hücreli bir malzemedir. 1,25 kJ/kgK özgül ısıya sahiptir. Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) 20-100, kullanım sıcaklığı -50/+75 °C aralığındadır. Polimer esaslı bir malzeme olmasından dolayı çok düşük sıcaklıklarda (80 °C) yapısı bozulmaya başlamaktadır. Yanmaya karşı direnci düşük E sınıfı (TS EN 13501-1) bir malzemedir. Ses absorpsiyon katsayısı 250 Hz'de 0,22, 500 Hz'de 0,42, 1000 Hz'de 0,78 ve 2000 Hz'de 0,65'dir. Maliyeti düşüktür. Yanma esnasında zehirli gazlar açığa çıkarmaktadır. Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve özelliklerde üretilmektedir. Asit ve bazlara karşı dirençli bir malzeme olmasına rağmen metan, eter, ester ve amin grubu gibi kimyasallara karşı hassastır (Bribian ve ark., 2011; Uygunoğlu ve ark., 2015; Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Kaya, 2016; Schiavoni ve ark., 2016; Bektaş ve ark., 2017; Dikici ve Kocagül, 2019).

1.2.1.4. Ekstrüde polistren köpük (XPS)

XPS, ekstrüzyon yöntemi ile polistiren polimerinin köpük ajanı kullanılarak köpüklendirilmesi ile üretilen bir yalıtım malzemesidir. Isı iletkenlik katsayısı değeri 0,030-0,040 W/mK'dir. Kapalı hücre yapısına sahip su geçirmeyen bir malzemedir. Yoğunluğu 32-40 kg/m³ arasında değişmektedir. 1,45-1,7 kJ/kgK özgül ısıya sahiptir. Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) 80-250, kullanım sıcaklığı -50/+75 °C aralığındadır. Yanmaya karşı direnci düşük olup E sınıfı (TS EN 13501-1) bir yalıtım malzemesidir. Ses absorpsiyon katsayısı 250 Hz'de 0,22, 500 Hz'de 0,42, 1000 Hz'de 0,78 ve 2000 Hz'de 0,65'dir. Maliyeti düşük bir malzemedir. Basma dayanımı çok yüksektir. Yanma sırasında

zehirli gaz çıkarmaktadır. Kullanım yerine göre farklı boyutlarda üretilmektedir ((Uygunoğlu ve ark., 2015; Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Kaya, 2016; Schiavoni ve ark., 2016; Bektaş ve ark., 2017; Dikici ve Kocagül, 2019).

Ülkemizde yaygın bir şekilde kullanılan EPS ve XPS binalarda dış cephelerde, toprakla temas eden yerlerde ve bodrum kat döşemelerinde uygulanmaktadır. Ancak 2002 yılının sonlarında yürürlüğe giren “Yangında Korunma Yönetmeliği” ne göre bu yalıtım malzemelerinin kullanımı sınırlandırılmıştır (Uygunoğlu ve ark., 2015; Bayraktar ve Bayraktar, 2016).

1.2.1.5. Poliüretan köpük

Poliüretan köpük, izosiyanat ile poliolun reaksiyona girmesiyle elde edilen bir malzemedir. Hücre üretimi köpük ajanı yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Isı iletkenlik katsayısı 0,025-0,040 W/mK ve yoğunluğu 15-45 kg/m³ arasında değişmektedir. 1,3-1,45kJ/kgK özgül ısıya sahip bir malzemedir. Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) 30-100, kullanım sıcaklığı -30/+90 °C aralığındadır. Yanma sınıfı E sınıfıdır. Ses absorpsiyon katsayısı 250 Hz’de 0,30, 500 Hz’de 0,68, 1000 Hz’de 0,89 ve 2000 Hz’de 0,79’dur. Düşük maliyetli bir yalıtım malzemesidir. Panel olarak ya da yerinde püskürtme yöntemi ile üretilmektedir. Esnek ve sert poliüretan köpük olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır (Bribian ve ark., 2011; Aydoğan ve Usta, 2015; Kaya, 2016; Estravis ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2017; Kairyte ve ark., 2018). Yapı, otomotiv, mobilya, spor ve denizcilik sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yurtseven ve ark., 2013; Estravis ve ark., 2016).

1.3. Termoplastik Esaslı Köpük Malzemeler

Termoplastik köpük malzemeler, termoplastik bir polimerin fiziksel ya da kimyasal köpük ajanı kullanılarak gazın polimer içerisinde genleştirilmesiyle elde edilen hücreli yapıya sahip malzemelerdir (Kozlowski ve ark., 2008). Köpük malzemelerde köpük yapısı üretildiği polimerin özelliklerine bağlıdır. Neredeyse tüm termoplastiklerden köpük üretilmektedir. Ancak düşük maliyet ve oldukça yüksek elastik eriyik özelliklerinden dolayı ticari olarak polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) köpükler kullanılmaktadır (Mills, 2007; Yetgin ve Ünal, 2008; Carraher, 2013; Heidari ve Fasihi, 2019). Termoplastik köpükler düşük yoğunluk, düşük maliyet, yüksek enerji absorblama kapasitesi, iyi yalıtım özellikleri, iyi ses absorpsiyon özellikleri, yüksek

hasar toleransı ve iyi spesifik mekanik özelliklere sahip malzemelerdir (Eaves, 2004; Saha ve ark., 2005; Kozłowski ve ark., 2008; Farsheh ve ark., 2011; May-Pat ve Aviles, 2014; Heidari ve Fasihi, 2019). Günlük yaşamda yaygın bir şekilde otomobil parçaları, ambalajlama ürünleri, ısı yalıtım malzemeleri, yüzdürme ekipmanları, spor malzemeleri, ses absorpsiyon malzemeleri, sandviç kompozitlerde çekirdek malzemeler olarak kullanılmaktadır (Saha ve ark., 2005; Alian ve Abu-Zahra, 2009; Lee ve Park, 2014; May-Pat ve Aviles, 2014; Heidari ve Fasihi, 2019).

Dış hava şartlarına ve yangına karşı dirençli olan PVC köpük malzemeler ise bina inşaatlarında, denizcilik uygulamalarında, rüzgar enerjisi yapılarında, sandviç kompozitlerde çekirdek malzeme olarak kullanılmaktadır (Vaikhanski ve Nutt, 2003; Eaves, 2004).

Termoplastik polimerlere çeşitli lignoselülozik malzemelerin ilave edilmesi ile odun plastik kompozit üretilmesi bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, maliyetin düşürülmesi ve daha çevre dostu bir malzeme elde edilmesi gibi avantajlardan dolayı tercih edilmektedir (Faruk ve ark., 2007; Kaya, 2016). Ancak bu malzemelerin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Odun plastik kompozitler saf plastiklere göre daha yüksek yoğunluk, daha yüksek kırılgenlik ve daha düşük darbe direncine sahiptirler (Faruk ve ark., 2007; Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Karakuş ve Mengeloğlu, 2015; Mengeloğlu ve Çavuş, 2019). Bu dezavantajların iyileştirilmesi amacıyla odun plastik kompozit köpükler geliştirilmiştir. Kompozit köpükler, odun plastik kompozitlere göre daha düşük yoğunlukları nedeniyle daha üstün maliyet-performans oranı, yüksek enerji absorblama, yüksek spesifik mekanik özellikler ve daha iyi vida tutma özellikleri göstermektedir (Faruk ve ark., 2007).

1.3.1. Köpük mekanizması

Termoplastik köpükler doğası gereği sert ve esnek, kalınlığına göre film ve levha, ağırlığına göre düşük ve yüksek yoğunluklu, hücre morfolojisine göre açık ve kapalı hücre ve hücre boyutuna göre köpük ve mikro hücre olarak farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Kullanım alanına göre tercih edilebilen köpük malzemelerde ısı yalıtımında etkili olan en önemli köpük özelliği hücre morfolojisidir. Termoplastik köpüklerde açık hücreli köpük yapısında tüm hücreler birbirine bağlı haldedir ve hücre duvarları bulunmaz. Hücreler arasından hava serbestçe geçebilir. Çok yüksek bir yüzey alanı/hacim oranına sahiptirler. Kapalı hücreli köpüklerde ise her bir hücre birbirinden bağımsızdır ve her taraftan hücre

duvarı ile çevrilidir. Kapalı hücreli köpükler açık hücreli köpüklerden daha yüksek mekanik özelliklere sahiptirler (Yetgin ve Ünal, 2008; Kim ve Pal, 2010; Gupta ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014; Gupta ve ark., 2019). Açık hücreli köpükler yüksek ses absorpsiyon özelliği gösterirken kapalı hücreli köpükler yüksek termal yalıtım ve darbe absorblama özellikleri sergilerler (Yetgin ve Ünal, 2008).

Termoplastik polimerlerin köpüklendirme işleminde üç ana olay önem taşımaktadır. Bunlar; hücre çekirdeklenmesi, hücre büyümesi ve hücre birleşmesidir. Köpük üretiminde ilk adım eriyik hale getirilen polimer malzemenin yüksek basınç altında bir köpük ajanı ile doyurulmasıdır. Doygun hale getirilen polimer-gaz karışımında termodinamik bir kararsızlık oluşturularak hücre çekirdeklenmesinin meydana gelmesi sağlanmakta daha sonra hücre büyümesi meydana gelmektedir. Büyüme işlemi mikro hücreler parçalanana ya da stabilize olana kadar devam etmektedir (Eaves, 2004; Shakarami ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014).

Köpük üretiminde hücre çekirdeklenmesi ilk olarak yüksek basınç altında eriyik polimer içerisinde köpük ajanının çözünmesi ve daha sonra ani bir basınç düşüşü oluşturularak köpük ajanının çözünürlüğünün azalması ile gerçekleştirilmektedir. Çözünürlükteki bu ani düşüşten dolayı tamamen doymuş hale gelen polimer-gaz karışımı, kabarcıklar oluşturarak daha düşük enerjili ve kararlı stabil bir durum aramaya eğilimlenir. Çekirdeklenme polimer-gaz çözeltisinin viskoelastik yapısı ve köpük ajanlarının çözünürlüğü tarafından belirlenmektedir. Yüksek viskoelastiklik ile daha iyi bir çekirdeklenme sağlanırken sıcaklık ve gaz miktarının artması ile polimer-gaz çözeltisinin viskoelastikliğinin azalması çekirdeklenmeyi önleyebilmektedir. Eriyik haldeki polimer içerisindeki mevcut gaz miktarı; çekirdeklenme oranı, daha önce çekirdeklenmiş hücrelerin büyümesi ve çevreye salınan gaz kaybına bağlıdır. Hücre büyümesi ve gaz kaybı aktifse polimer içerisinde çözünen gaz hızla kullanılarak miktarı azalacaktır. Bu da çekirdeklenme oranının önemli ölçüde azalmasına neden olacaktır. Ayrıca çekirdeklenme oranı; bölgesel gerilmeler, mikro boşluklar, heterojen çekirdeklenme bölgeleri, sıcaklık ve yüzey gerilimi gibi faktörlerden de etkilenmektedir. (Lee ve Park, 2014). Polimer köpüklerde çok sayıda küçük hücrelerin oluşturulabilmesi için çekirdeklenmenin homojen olması gerekmektedir. Homojen çekirdeklenme gaz çözünürlüğündeki ani düşüşten dolayı yani işlem sırasında hızlı bir basınç düşüşünün oluşturulması ile büyük bir termodinamik kararsızlık olduğunda meydana gelmektedir (Eaves, 2004). Önceden var olan mikro boşluklar yeterli basınç

düşüşü ve sıcaklık meydana geldiğinde gaz moleküllerini barındıran ve çekirdeklenme bölgeleri olarak işlev gören bir yüzey sağlamaktadır (Lee ve Park, 2014).

Köpük malzemelerin özellikleri doğrudan hücre yapısı ve morfolojisine bağlı olduğundan hücre büyüme aşaması önem taşımaktadır. İstenilen özelliklerin elde edilebilmesi için hücre büyümesi aşamasında (bir kalıp içerisinde hücre büyümesi sırasında ya da serbest bir köpük genişmesi sırasında) hücre boyutunun tahmin edilebilmesi ve kontrol edilebilmesi gerekmektedir (Lee ve Park, 2014). Hücre büyümesini etkileyen faktörler; çekirdeklenme bölgeleri, çekirdeklenme süresi, gaz difüzyonu ve hücre irileşmesidir (Mills, 2007). Köpüklendirme işleminin hücre büyümesi aşamasında hücresel yapı birleşme ve çökme eğilimi göstermektedir. Bu durum köpük malzemede istenmeyen bir durumdur. Polimer içerisindeki gaz kabarcığının genişlemesi esnasında hücre duvarı basınçla yok edilebilmektedir. Bu da hücrelerin birleşmesi ya da çökmesi ile sonuçlanmaktadır. Bu durumu etkileyen en önemli faktör polimerin eriyik dayanımıdır (melt strength). Bunun yanı sıra sıcaklık, basınç, gaz miktarı ve çözünürlüğü hücre birleşmesi ve hücre çökmesini etkileyen faktörlerdir (Kozlowski ve ark., 2008; Lee ve Park, 2014).

1.3.2. Köpük üretim yöntemleri

Termoplastik polimer köpük üretiminde ekstrüzyon yöntemi gibi sürekli üretim, mikro hücre ve enjeksiyon yöntemleri gibi kesintili yöntemler kullanılmaktadır (Yetgin ve Ünal, 2008; Lee ve Park, 2014).

1.3.2.1. Ekstrüzyon yöntemi

Ekstrüzyon yöntemi köpük üretiminde sık kullanılan ve sürekli bir üretim yöntemidir. Eritme, karıştırma, homojenleştirme ve şekillendirme aşamalarını içermektedir. Ekstrüzyon yönteminde ekstruder kovanı içerisinde eriyik haldeki polimere gaz ya da bir kimyasal köpük ajanının ısı etkisiyle bozunmasıyla ya da doğrudan fiziksel köpük ajanının ekstruder içerisine enjeksiyonu ile verilmektedir. Dönen vida polimer eriyiğinin köpük ajanı ile karışmasını sağlamak ve ekstruder içerisindeki yüksek erime basıncı ile gaz, polimer içerisinde çözünmektedir. Eriyik içinde yeterli miktarda köpük ajanı çözündüğünde, köpük ajanının plastikleşmesi eriyik viskozitesini düşürme eğilimi gösterir, bu da ısının uzaklaştırılmasına ve böylece ekstrüzyonun sonundaki kalıpta gaz genişlemesini sürdürmek için eriyik mukavemetinin artmasına neden olur. Optimum bir köpüklendirme için eriyik haldeki polimer kalıptan çıkana kadar hücre çekirdeklenmesinin

geciktirilmesi gerekir. Eriyik haldeki polimer kalıptan çıktığında basınçtaki ani düşüş ile polimerin gazla aşırı doymuş hale gelmesini sağlamak ve faz ayrımı meydana gelerek neredeyse anında çekirdeklenme meydana gelmektedir. Basınç düşüşü ve soğutma genel olarak aynı anda gerçekleştirilmektedir. Soğutma önemli bir aşamadır. Doğru soğutma derecesinde iyi hücre bütünlüğü sağlanabilmektedir. Polimerin soğuması ile viskozitesi artmakta ve hücre büyümesi yavaşlamaktadır. Hücre çökmelerini önlemek için malzemenin çok hızlı soğutulması gerekmektedir. Köpüğün yüzey kalitesi, dış deri kalınlığı ve yoğunluğu kalibrasyon ünitesi ve çıkış arasındaki mesafe ve soğutmanın yoğunluğundan etkilenmektedir. Soğutma sırasında kristalleşme meydana gelmektedir. Kristalizasyon başladığında daha sıkı bir moleküler yapı oluşması nedeniyle mikro boşluklar da oluşabilmektedir (Eaves, 2004; Lee ve Park, 2014).

Ekstrüzyon yöntemi; kolay kontrol edebilme, yüksek verimlilik, geniş ürün şekillendirme özellikleri, düşük erime ve kalıp sıcaklığı gibi faktörlerden dolayı mikro hücre yöntemine göre daha ekonomiktir (Yetgin ve Ünal, 2008).

PVC köpük üretiminde özellikle profil, levha ve boru üretimi için ana üretim yöntemi ekstrüzyon yöntemidir. Hücresel yapı genellikle kimyasal köpük ajanı kullanılarak elde edilmektedir (Eaves, 2004).

1.3.2.2. Mikro hücre yöntemi

Mikro hücre yöntemi ile termoplastik polimer köpük üretiminde polimer malzeme CO₂ veya N₂ gazına bağlı bir yüksek basınç odasına yerleştirilmekte ve belirli bir sıcaklık ve yüksek basınç altında gazın polimer içerisinde çözünmesi sağlanmaktadır. Polimer, gaz ile tamamen doymuş hale geldiğinde basıncın ani bir şekilde düşürülmesi ile termodinamik bir kararsızlık meydana getirilir ve çekirdeklenme sağlanır. Böylece polimer içerisinde mikro hücreler oluşturulmaktadır. Çekirdeklerin büyüme aşamasında köpük malzeme polimerin camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar soğutularak hücre büyümesi durdurulmaktadır. Mikro hücre yönteminde doyma basıncı, basınç düşüşü, sıcaklık ve zaman en önemli parametrelerdir. Bu parametreler, mikro hücrelerin boyut ve şeklini kontrol etmede esneklik sağlamaktadır. Mikro hücre yönteminin en büyük dezavantajı polimer malzemenin gaz ile tamamen doymuş hale gelmesinin çok uzun süreler alabilmesidir. Bu süre birkaç saat hatta birkaç gün bile olabilmektedir (Yetgin ve Ünal, 2008; Kim ve Pal, 2010).

1.3.2.3. Enjeksiyon yöntemi

Enjeksiyon yöntemi ile köpük üretimi gazın çözünmesi, çekirdeklenme, hücre büyümesi ve ürüne son şeklinin verilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Enjeksiyonla köpük üretme yönteminde gaz eriyik hale gelen polimer içerisine enjekte edilerek verilmektedir. Camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılan polimer malzeme kalıp hacmi tam doldurulmayacak şekilde kalıba enjekte edilmekte ve kalıpta basıncın aniden düşmesi ile çekirdeklenme meydana gelmektedir. Hücre büyümesi ile kalıp tam olarak doldurulmuş olmaktadır. Bu aşamadan sonra köpük malzeme soğutularak kalıptan çıkarılmaktadır. Polimer erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, geri besleme basıncı, kalıp doluluk oranı, gaz konsantrasyonu ve kalıp soğuma süresi enjeksiyon yöntemi ile köpük üretiminde hücre morfolojisini etkileyen faktörlerdir (Yetgin ve Ünal, 2008).

Karmaşık şekilli köpük malzemelerin üretiminde enjeksiyon yöntemi ekstrüzyon yöntemine göre avantaj sağlamaktadır. Bunun yanı sıra enjeksiyonla köpük üretimi; soğuma süresinin azalması, hafiflik ve daha iyi boyutsal stabilite elde edilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır (Yetgin ve Ünal, 2008).

Köpük malzemenin performansını etkileyen en önemli faktörler hücre boyutu, hücre boyutu dağılımı, hücre geometrisi, hücre tipi, hücre yoğunluğu, yüzey kalitesi ve deri kalınlığıdır. Köpük malzemede hücre oluşumunu ve morfolojisini; polimer türü, polimerin molekül ağırlığı, polimerin eriyik özellikleri, köpük ajanı türü ve miktarı, dolgu ya da takviye malzemelerinin miktarı, üretim yöntemi, çekirdeklenme oranı ve köpüklendirme sonrası kürleşme belirlemektedir (Eaves, 2004; Lee ve Park, 2014; Abdul Azam ve ark., 2020). Üretim yöntemi, işlem koşulları ve formülasyon ile bu özellikler kontrol edilebilmektedir. Özellikle işlem koşulları hücre morfolojisi ve yoğunluğun belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Lee ve Park, 2014; Abdul Azam ve ark., 2020). Hücre boyutu ve dağılımı köpük ajanının türü ve miktarına bağlıdır. Köpük malzemelerde genellikle birçok kullanım alanında tek tip, kapalı hücre, homojen bir hücre dağılımı ve ince hücre yapısı istenmektedir. Hücre boyutunu etkileyen diğer bir faktör de polimer viskozitesidir. Viskozite çok yüksekse hücre tam olarak büyüemediğinden düşük yoğunluklu köpüklerin üretilmesi mümkün olmamaktadır. Viskozite çok düşükse ya da erime mukavemeti çok düşükse hücreler parçalanmakta ya da çökmektedir. PVC köpüklerde erime mukavemeti, molekül ağırlığı ve akrilik işlem yardımcıların ilavesi ile köpüklendirme işlemi kontrol edilmektedir (Eaves, 2004).

Tüm PVC uygulamalarında olduğu gibi PVC köpük üretiminde de köpük ajanına ilaveten termal stabilizatörler, işlem yardımcıları, yağlayıcılar, pigmentler ve dolgu maddeleri PVC formülasyonunda eklenmesi gereken çeşitli katkı maddeleri bulunmaktadır. PVC'nin türü ve formülasyonun içeriği üretim sırasında malzemenin termal stabilitesini-kararlılığını, jelleşme davranışını, toz akış karakteristiklerini, erime viskozitesini ve erime mukavemetini kontrol etmektedir. PVC köpük üretiminde de formülasyonun içeriği üretilen köpüğün yoğunluğu, yüzey kalitesi ve tüm özellikleri etkilemektedir (Eaves, 2004).

1.4. Polivinil Klorür (PVC)

Polivinil klorür (PVC), yapısal formülü $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ olan ve vinil klorürün radikal polimerizasyonu sonucu elde edilen termoplastik bir polimerdir. PVC amorf bir yapıya sahip olmasına rağmen yaklaşık % 5-10 oranında bir kristal bir yapı içermektedir (Patrick, 2004; Carraher, 2013). Bu amorf yapıdan dolayı keskin bir erime noktası göstermeyen PVC, camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yumuşayarak viskoz bir eriyik haline gelmektedir. PVC'nin camsı geçiş sıcaklığı 80°C , erime sıcaklığı ise $120\text{-}240^\circ\text{C}$ arasındadır. PVC termal olarak hassas bir polimerdir. Bu nedenle polimerin bozunması oldukça hızlıdır. Sıcaklığın etkisi ile (140°C 'yi aşan sıcaklıklar) polimer zinciri ve klor atomları arasındaki moleküler bağın kaybindan kaynaklanan bozunma başlamakta ve hidroklorik asit (HCl) açığa çıkmaktadır. Bozunmanın geciktirilmesi amacıyla PVC'nin işlenmesi sırasında ısı dengeleyici (ısı stabilizatörü) kullanılmaktadır (Burgess, 1981; Patrick, 2004; Carraher, 2013; Janajreh ve ark., 2015). PVC farklı moleküler ağırlık ve k değerlerine sahiptir. PVC'de k-değeri moleküler ağırlığı gösteren viskozite numarasıdır. k-değerinin yüksek olması PVC'nin moleküler ağırlığı ve viskozitesinin yüksek olması demektir. PVC'nin düşük k değerine sahip olması düşük erime mukavemeti vermesi anlamına gelirken yüksek bir k değeri ise viskoz bir eriyik anlamına gelmektedir. Ticari olarak bulunan PVC'lerin k değerleri 57- 80 arasında değişmektedir. Bağlı yoğunluğu $1,1\text{-}1,45\text{ g/cm}^3$ aralığındadır (Eaves, 2004; Patrick, 2004; PETKİM, 2022).

PVC en çok üretim ve kullanım hacmine sahip üç termoplastik polimerden biridir. Düşük maliyet, kolay işlenebilirlik, yanmaya karşı direnç, iyi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı birçok alanda tercih edilmektedir. Perdahlama, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, termoform ve üflemleri kalıplama gibi çeşitli yöntemlerle işlenebilen PVC, çeşitli katkı maddeleri ile esnek ve sert ürünlere dönüştürülebilmektedir (Burgess,

1981; Braun, 2002; Patrick, 2004; Carraher, 2013; Janajreh ve ark., 2015). Üretim sırasında çeşitli katkı malzemeleri gerektiren PVC'nin işlenmesinde genel olarak plastikleştiriciler, ısı stabilizatörleri (ısı dengeleyici), yağlayıcılar, işlem yardımcıları, dolgu maddeleri, alev geciktiriciler, pigmentler, köpük ajanları, biyositler, viskozite düzenleyiciler, antistatik ajanlar, antioksidanlar, UV absorber (UV emici) malzemeler ve bağlayıcı malzemeler kullanılmaktadır (Patrick, 2004; Carraher, 2013).

PVC kısa ve uzun ömürlü olmak üzere çok çeşitli kullanım alanlarına sahip bir polimerdir. Pencere çerçeveleri, zemin ve çatı kaplamaları, yer döşemesi, boru ve bağlantı parçaları, otomotiv parçaları, mantolama ve kablo üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmasının yanı sıra ambalaj malzemeleri, temizlik malzemeleri, şişeler, ayakkabı tabanı, duş perdesi, oyuncak, yağmurluk ve medikal ürünler gibi ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır (Braun, 2002; Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011; Carraher, 2013; Janajreh ve ark., 2015; Singh ve ark., 2017).

1.4.1. PVC üretim ve tüketim miktarı

Ülkemizde 2022 yılında plastik üretimi 1 milyon 14 bin ton olarak gerçekleşmiştir (PAGEV, 2022). Bu rakamın 2023 yılının ilk 3 ayında yaklaşık 254 bin ton olduğu tahmin edilmektedir. Toplam üretilen plastik miktarının % 31'lik kısmını AYPE-LDPE, %23'ünü PET, %15'ini PVC, %12'sini PP, % 10'unu PS ve % 9'unu YYPE-HDPE oluşturmaktadır. Plastik hammadde ihtiyacımızın % 15'i yerli üretimle karşılanmaktadır (PAGEV, 2023). Türkiye plastik sektörü 2022 yılı (Ocak-Eylül) verilerine göre 1,881.8 bin ton plastik ihracatı, 535,8 bin ton plastik ithalatı gerçekleştirilmiştir. 2021 yılı verileri ile karşılaştırıldığında plastik ihracatı %1,9 artış göstermiştir (PLASFED, 2022). 2022 yılının en yüksek ithalat miktarı % 58'lik bir payla polietilen ve polipropilende gerçekleşmiştir (PAGEV, 2022). 2022 yılı PVC ithalat miktarı ise 767,704 tondur. Bu miktarın 437,591 tonluk kısmı yani yaklaşık %57'sinin pencere profil üretiminde kullanıldığı tahmin edilmektedir. Ülkemizde pencere profil üretimi için PVC ham maddesinin bir kısmı yerli üreticilerden karşılanırken büyük bir kısmı ithal edilmektedir (PÜKAD, 2022).

Ülkemizde 2022 yılında 434,540 ton PVC profil üretilmiştir. Üretilen miktarın 195,138 tonu profil olarak ihraç edilirken 239,402 tonu ile pencere üretilmiş ve bunun 202,875 tonu iç piyasada, 36,527 tonu ise ihracatta hazır pencere olarak kullanılmıştır. 6,318 ton pencere profili, 774 ton ise hazır pencere ithal edilmiştir. Sonuç olarak

ülkemizde eski ve yeni konutlarda ve konut dışı binalarda 2022 yılında 209,968 ton PVC profil kullanılmıştır (PÜKAD, 2022).

1.4.2. PVC atıkların geri dönüştürülmesi

Petrokimya esaslı bir polimer olan PVC'nin çok geniş bir kullanım alanına sahip olması kullanım ömrünü tamamladıktan sonra atık olarak çevreye bırakılma oranının çok büyük olması demektir ve bu oran her geçen gün artmaktadır (Kayılı ve Çelebi, 2020). PVC'nin en büyük kullanım alanları ambalaj, otomotiv ve yapı sektörüdür. Tüketilen PVC'nin neredeyse yarısı pencere çerçevelerinin üretiminde kullanılmaktadır. Pencere çerçeveleri uzun ömürlü bir ürün olmasına rağmen kullanım ömrü sonunda büyük bir atık oluşmasına sebep olmaktadır. PVC atıklar endüstri sonrası atık ve tüketim sonrası atık olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Endüstriyel atık üretim sırasında ortaya çıkan parça ve ıskartaları içerirken tüketim sonrası atık ise kullanım ömrünü tamamlayan atıkları içermektedir (Stichnothe ve Azapagic, 2013).

Avrupa'da 2022 yılında atık PVC geri dönüşüm miktarı 813,266 tona ulaşmıştır. Bu miktar AB-27, Norveç, İsviçre ve İngiltere'de üretilen toplam PVC atıkların % 27'sine denk gelmektedir. Atık PVC pencere profili geri dönüşüm miktarı ise tüketici öncesi 238,381 ton, tüketici sonrası 169,770 tondur (VinylPlus, 2023). Türkiye'de ise geri dönüşüm oranları çok düşüktür.

Atık yönetiminde “azalt - yeniden kullan - geri dönüştür - yok et” anlayışı önem taşımaktadır. Bu anlayış, PVC tüketiminin yani atık üretiminin sınırlandırılması (reduce), oluşan atıkların yeniden kullanılması (reuse), atıkların geri dönüştürülmesi (recycle) ya da atıkların bertaraf edilmesi aşamalarını içermektedir. Atık yönetiminde mümkün olduğu sürece atık oluşumunun azaltılması kuralı ilk uygulanması gereken ve en önemli kuraldır. Atıklar minimuma indirildikten sonra ikinci aşama devreye girmektedir. Bu aşama atıkların herhangi bir işlevsel kaybı bulunmuyorsa temizlenerek tekrar kullanılması demektir. Geri dönüşüm aşaması tekrar kullanılamayan atıkların yeniden üretim aşamasından geçirilerek aynı ya da başka ürünlere dönüştürülmesini kapsamaktadır. Son aşama atıkların enerji üretimi amacıyla yakılarak bertaraf edilmesidir (Kayılı ve Çelebi, 2020).

PVC'nin çevre koşullarında oksidatif bozunması ve üretiminde kullanılan plastikleştirici, ısı stabilizatörleri gibi katkı maddelerinin hava ve suya zehirli maddeler salabilmesi gibi nedenlerden dolayı PVC atıkların depolanması uygun bir yöntem değildir.

Ayrıca depolama alanı sıkıntısı ve artan maliyet nedeniyle düzenli depolama birçok ülkede kabul edilmemektedir. Enerji elde etmek amacıyla PVC atıkların yakılarak bertaraf edilmesi sırasında ise ısının etkisiyle hidroklorik asit (HCl), dioksin ve furan gibi zehirli gazlar açığa çıkmaktadır. Bu nedenle çevre ve sağlık açısından değerlendirildiğinde PVC atıkların geri dönüşümü daha kabul edilebilir bir yöntemdir (Braun, 2002; Patrick, 2004; Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011; Janajreh ve ark., 2015; Kayılı ve Çelebi, 2020; Zhang ve ark., 2021).

PVC geri dönüşümü mekanik ve kimyasal olmak üzere iki farklı yöntemden oluşmaktadır. Mekanik geri dönüşüm ya da malzeme geri dönüşümü PVC atığının bileşimi biliniyorsa ya da atık menşesine göre ayrılabiliriyorsa tercih edilmektedir. Mekanik geri dönüşüm PVC atığının ayrılması, öğütülmesi ve ısı ile yeniden şekillendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. PVC atıkların mekanik geri dönüşümünde en önemli kriter atığının homojen olmasıdır. Atığının homojen olmaması işlem sürecinde zorluklara ve daha düşük fiziksel ve mekanik özelliklere sebep olmaktadır (Braun, 2002; Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011).

Kimyasal geri dönüşüm ya da hammadde geri dönüşümü PVC atıklarının ısı, kimyasal ve katalizörler yardımıyla kısa zincirli kimyasallara dönüştürülmesi işlemidir. Kimyasal geri dönüşümde parçalama, hidrojenasyon, piroliz ve gazlaştırma yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Geri dönüşümden elde edilen ürünler saflaştırılarak aynı ya da başka bir polimerin üretilmesi amacıyla yeniden kullanılabilir. PVC kimyasal geri dönüşüm ürünleri hidroklorik asit (HCl), hidrokarbonlar ve vinil klorürdür (Braun, 2002; Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011; Janajreh ve ark., 2015). Kimyasal geri dönüşüm atıklarının ayrılarak sınıflandırılması konusunda mekanik geri dönüşüm kadar hassas değildir. Ancak kimyasal geri dönüşümde ürünü üretmek için kullanılan enerji işlem sırasında yok edildiğinden dolayı enerji açısından mekanik geri dönüşümden daha az tavsiye edilmektedir (Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011).

PVC atıklar için en uygun yöntemin geri dönüşüm olmasına rağmen çok küçük bir oran PVC atık geri dönüştürülmektedir. Ancak gelişmiş ülkelerde hacim olarak en fazla geri dönüşümü sağlanan polimer PVC'dir (Sadat-Shojai ve Bakhshandeh, 2011). Araştırmalara göre tahmini plastik atıkların % 79'u depolama alanlarına, çöpe ya da çevreye atılmaktadır. Geri dönüşüme gönderilen atık oranı yaklaşık % 9 iken yakma tesislerine gönderilen oran % 12'dir (Kayılı ve Çelebi, 2020).

1.4.3. PVC’de kullanılan katkı malzemeleri

1.4.3.1. Plastikleştiriciler

Plastikleştiriciler, polimerlere esneklik ve işlenebilirlik kazandırmak amacıyla ilave edilen katkı malzemeleridir. Aynı zamanda polimer molekülleri arasında yağlayıcı olarak da işlev görmektedirler. Plastikleştirici tüketiminin yaklaşık olarak % 90’dan fazlasını PVC sektörü oluşturmaktadır (Patrick, 2004; Ledniowska ve ark., 2022).

PVC’nin plastikleştirilmesi iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşama jelleşme aşaması yani sıcaklığın artması ile PVC partiküllerinin plastikleştiriciyi absorplayarak zayıf bir jel oluşturmaktır. İkinci aşama ise sıcaklığın artmaya devam etmesi ile (genellikle 150 °C’nin çok üzerindeki sıcaklıklar) PVC partikülleri ve plastikleştiricinin homojen bir malzeme oluşturmak üzere birlikte eridiği füzyon aşamasıdır. Daha sonra sıvı eriyik halini alan karışımın soğutulması ile kristalleşme ve zayıf bağlar (van der Waals ve hidrojen bağları) oluşarak sertleşme meydana gelmektedir (Wypych, 2012). PVC formülasyonuna plastikleştiricinin ilave edilmesi elde edilen bileşimin mukavemet, donma direnci, kırılma, sertlik, erime akış hızı, darbe direnci, işlenebilirlik, termal ve elektro fiziksel özellikler gibi reolojik ve fizikomekanik karakteristiklerinde iyileşmeye yol açan değişikliklere sebep olmaktadır (Vikhareva ve ark., 2022). PVC formülasyonunda gerekli olan plastikleştirici oranı malzemenin kullanım alanına göre değişmektedir. Bu oran genellikle ağırlıkça % 40-120 arasında değişmektedir. Plastikleştiriciler PVC zincirine kimyasal olarak bağlanamadıklarından dolayı kullanım esnasında göç etme eğilimi göstermektedirler. Bu da çevre açısından endişe taşımaktadır (Chen ve ark., 2022).

En yaygın kullanılan plastikleştiriciler ftalatlar ve adipatlardır. Bunların yanı sıra alkil sülfonatlar, azelatlar, benzoatlar, sitratlar, fosfatlar, amidler ve aminler de plastikleştirici olarak kullanılmaktadır. Ayrıca insan sağlığı ve çevreye verilen zararlı etkilerden dolayı çeşitli biyoplastikleştiriciler geliştirilmektedir (Patrick, 2004; Wypych, 2012; Chen ve ark., 2022).

Ftalatlar

Ftalatlar, PVC’nin plastikleştirilmesinde kullanılan en yaygın plastikleştiricilerdir. Kullanılan tüm plastikleştiricilerin yaklaşık % 80’lik bir kısmını oluşturmaktadırlar. Ancak PVC bünyesinden kolayca göç eden ftalatlar, çevre ve insan sağlığı için zararlı etkilere sahip plastikleştiricilerdir. Astım, bronşit ve kanser gibi hastalıklara sebep olabilen bu plastikleştiricilerin kullanımı çocuk oyuncakları, gıda ambalajları ve tıbbi cihazlar gibi

uygulamalarda yasaklanmıştır (Ledniowska ve ark., 2022). Kullanımındaki kısıtlamalardan dolayı 2017 yılında ftalatların kullanım oranı % 65 oranlarına kadar düşmüştür. Günümüzde ise bu oranın % 60 seviyelerine kadar düşmesi beklenmektedir (Ma ve ark., 2022) PVC için en yaygın kullanılan ftalat grubu dioktil ftalat (DOP) ve onu takip eden özellikle kan torbaları ve tıbbi tüplerin üretiminde kullanılan di (2-etilheksil) ftalat (DEHP)'tır (Wypych, 2012; Chen ve ark., 2022; Morgan ve Mukhopadhyay, 2022; Burns ve ark., 2023).

Dioktil ftalat (DOP), plastikleştirici üretim ve tüketiminde ilk sırada yer almaktadır. Düşük maliyetle optimum plastikleştirme özelliğine sahip bir plastikleştiricidir. Polimerlerden göç etmesi ve yüksek toksisitesi nedeniyle kullanımı sınırlandırılmıştır. Bu nedenle ftalatlara alternatif adipatlar, sitratlar ve sebakatlar gibi plastikleştiriciler geliştirilmiştir. Bunların arasında en yaygın kullanılan plastikleştiriciler adipatlardır (Vikhareva ve ark., 2022; Burns ve ark., 2023).

1.4.3.2. Isı stabilizatörleri

PVC termal olarak hassas bir polimer olmasından dolayı işlem sırasında sıcaklığın etkisi ile bozunmaya uğramaktadır. Bu sebeple PVC'nin işlenmesi sırasında formülasyona bir ısı stabilizatörünün ilave edilmesi gerekmektedir. PVC için ısı stabilizatörü olarak genellikle kurşun tuzları, organotin bileşikler ve karışık metal tuzları kullanılmaktadır. Kurşun tuzları ve organotin bileşiklerinin kullanımı yüksek toksisiteye sahip olmalarından dolayı sınırlandırılmıştır (Eaves, 2004; Patrick, 2004; Putrawan ve ark., 2022; Wang ve ark., 2022; Luo ve ark., 2023).

Karışık Metal Bileşikler

Karışık metal stabilizatörler, organofosfitler ve ko-stabilizatörlerin kombinasyonu ile metal sabunları ya da tuzlarının bir karışımıdır (Patrick, 2004). Zararlı etkiye sahip olmamaları ve düşük maliyetlerinden dolayı ısı stabilizatörü olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Baryum/Kadmium (Ba/Cd), baryum/çinko (Ba/Zn), kalsiyum/çinko (Ca/Zn) ve potasyum/çinko (K/Zn) karışık metal bileşiklerindendir. En yaygın kullanılan metal karışımları Ca/Zn stabilizatörlerdir (Putrawan ve ark., 2022).

Ca/Zn stabilizatörler, organik ko-stabilizatörlerle birlikte kalsiyum ve çinko sabunlarının karmaşık bir karışımıdır. Kurşun stabilizatörlere ikame olarak üretilen Ca/Zn stabilizatörler toksik etkiye sahip olmayan maliyet etkin stabilizatörlerdir. Ancak daha dar bir çalışma sıcaklığı sağlamaktadırlar. Boru, bağlantı parçaları, tel ve kablo üretiminde

kullanılmak üzere çeşitli Ca/Zn stabilizatörleri ticari olarak bulunmaktadır. Katı haldedir (Eaves, 2004; Patrick, 2004; Li ve ark., 2017). Günümüzde ticari olarak en çok kullanılan ısı stabilizatörleridir (Luo ve ark., 2023).

1.4.3.3. Köpük ajanları

Köpük ajanı, polimer köpük üretiminde polimer malzeme içerisinde hücresel bir yapı oluşturmak için kullanılan kimyasallardır. Köpük ajanları; basınç serbest bırakıldığında genleşen gazları, gaz haline dönüştüğünde hücre geliştiren sıvıları ve gaz oluşturmak için ısı etkisi ile bozunan katı kimyasalları içermektedir. Köpük ajanları köpük malzemenin hem üretiminde hem de performansında önemli rol oynayan malzemelerdir. Köpük malzemenin yoğunluk, hücre yapısı ve morfolojisi gibi özelliklerini etkilemektedir (Eaves, 2004).

Uygun bir köpük ajanı seçimi için birçok kriter bulunmaktadır. En önemli kriter köpük ajanı bozunma sıcaklığının polimerin üretim sıcaklığına uygun olmasıdır. İdeal bir köpük ajanı çok hızlı bozunmamalı, yüksek çözünürlük ve yüksek gaz verimine sahip olmalı ve ekonomik olmalıdır. Polimer içerisinde dağılması kolay olmalı ve uzun dönemli iyi bir depolama kararlılığına sahip olmalıdır. İnce, düzgün bir hücre yapısı ve çökmeye yatkın olmayan bir köpük üretme yeteneğine sahip olmalıdır. Bozunma ürünü polimer ve kullanılan katkı maddeleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmamalıdır. Yanıcı olmamalı, toksik olmamalı ve çevre dostu olmalıdır (Eaves, 2004).

Fiziksel köpük ajanları

Fiziksel köpük ajanları, fiziksel bir halde değişikliğe uğrayarak yani bir sıvının ısı ile gaz haline gelmesi ya da sıkıştırılmış bir gazın atmosfer basıncına düşürülmesi ile polimerin genleşmesi ve buna bağlı olarak polimer içerisinde hücre oluşmasını sağlayan kimyasallardır. Fiziksel köpük ajanları iyi çözünürlük, düşük kaynama noktası ve yüksek buhar basıncına sahip olmalıdır. Köpük malzeme içerisindeki oluşan hücrelerin çökmesini önlemek için oda sıcaklığında sahip olduğu buhar basıncı yeterli düzeyde olmalıdır (Kim ve Pal, 2010; Lee ve Park, 2014). Fiziksel köpük ajanları hem termoplastik polimerler hem de termoset polimerlerin köpüklendirilmesinde tüm yoğunluk değerlerinde kullanılmaktadır. Düşük köpük yoğunluğu (50 kg/m^3 'ten az) istenilen alanlarda kullanılan neredeyse tek köpük ajanı türüdür. Maliyeti düşüktür ancak kullanımı için özel ekipman gerektirebilmektedir (Eaves, 2004). Fiziksel köpük ajanı kullanılmadan önce çevreye verilen zararlı gazlar ve bunların ozon tabakası, küresel ısınma, hava kirliliği, insan sağlığı

üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulmalıdır (Eaves, 2004; Lee ve Park, 2014).

Yaygın olarak kullanılan fiziksel köpük ajanları halojenlenmiş hidrokarbonlar, hidrokarbonlar ve karbondioksit (CO₂) ve nitrojen (N₂) gibi inert gazlardır (Eaves, 2004 ; Petchwattana ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014; Xu ve ark., 2017).

Kimyasal köpük ajanları

Kimyasal köpük ajanları, polimer köpük üretim koşulları altında termal bozunma ile ya da kimyasal reaksiyon yoluyla gazlar açığa çıkaran toz ya da granül formunda bulunan malzemelerdir. Bozunma sıcaklık aralığı, açığa çıkan gazlar ve bu gazların verimi kimyasal köpük ajanı seçiminin en önemli kriterleridir. Kimyasal köpük ajanları genellikle N₂ ve CO₂ üretirler. Orta ve yüksek yoğunluklu polimer köpük ve kauçukların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Kimyasal köpük ajanı kullanılarak üretilen köpüklerin yoğunluk değerleri 400-800 kg/m³ aralığındadır. Fiziksel köpük ajanlarına göre maliyeti yüksek olan bu ajanlar, yoğunluğu 400 kg/m³'ün altındaki yoğunluklarda köpük üretmek için nadiren tercih edilirler. Kimyasal köpük ajanı kullanımının tercih edilmesinin en önemli sebebi köpük üretim hattında çok az değişiklik gerektirmesidir. Polimer köpük üretiminde kimyasal köpük ajanları ya plastiklerle karıştırılarak ya da doğrudan besleme ünitesine beslenerek kullanılmaktadırlar. Kimyasal köpük ajanı ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, perdahlama, kaplama gibi hemen hemen bütün termoplastik üretim yöntemlerinde kullanılabilir. Kimyasal köpük ajanlarının avantajları daha geniş çalışma penceresi sunması, kendi kendine çekirdeklenebilmesi ve daha küçük hücre boyutu sağlamasıdır. Dezavantajları ise reaksiyona girmiş köpük ajanlarından gelen katı kalıntılar ya da reaksiyona girmemiş köpük ajanından kaynaklanan kirliliklerdir (Eaves, 2004; Kim ve Pal, 2010; Petchwattana ve ark., 2013).

Kimyasal köpük ajanı seçiminde en önemli kriter köpük ajanının bozunma sıcaklığı yani gazın açığa çıkma sıcaklığı ile üretim sıcaklığının yakın olmasıdır. Kimyasal köpük ajanı bozunma sıcaklığı üretim sıcaklığının çok üzerinde ise köpük ajanı tam olarak bozunmadığından gaz verimi düşük olmakta bu da hücre oluşumunun yetersiz olması ile sonuçlanmaktadır. Eğer altında ise kötü hücre yapısı ve yüzey deri kalitesi oluşturmaktadır. Ayrıca kimyasal köpük ajanının gaz verimi yüksek olmalı, polimer malzeme ile uyumlu olmalı, alev geciktirici, stabilizatör vb. katkı maddeleri ile bozunma ürünleri etkileşime

girmemeli, üretim ekipmanlarında korozyona sebep olmamalı ve toksik olmamalıdır (Eaves, 2004).

Kimyasal köpük ajanlarının neredeyse yarısı PVC için kullanılmakta ve PVC'yi poliefinler ve kauçuk takip etmektedir. Ayrıca odun plastik kompozitlerin köpüklendirilmesinde de değerlendirilmektedir (Eaves, 2004). Bozunma sırasında su açığa çıkaran bazı kimyasal köpük ajanları; polikarbonat (PC), termoplastik polyesterler, poliamid ve asetaller gibi neme duyarlı polimerler için uygun değildir. Bu polimerler suyun varlığında bozunabilir ya da belirgin özellik kaybına uğrayabilirler. Aynı durum amonyak, diğer alkalın ve asidik gazlar üreten kimyasal köpük ajanları için de geçerlidir. Kimyasal köpük ajanları ekzotermik ve endotermik olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır (Eaves, 2004). Ekzotermik köpük ajanları ana bozunma ürünü olarak genellikle nitrojen gazı açığa çıkarırken endotermik kimyasal köpük ajanları karbondioksit açığa çıkarmaktadırlar (Lee ve Park, 2014).

Ekzotermik kimyasal köpük ajanı

Ekzotermik kimyasal köpük ajanları bozunma sırasında ısı üreten kimyasallardır. Bu üretilen ısı polimer erime sıcaklığında herhangi önemli bir değişime sebep olmamaktadır. Dar bir sıcaklık aralığında hızlı bir bozunma gerçekleşmektedir. Bozulma başladığında tam bozunma gerçekleşene kadar durdurmak zordur. Ana bozunma ürünleri N_2 'dir (Eaves, 2004). Ekzotermik köpük ajanları arasında en yaygın kullanılan azodikarbonamittir. Bunun yanında diğer ekzotermik köpük ajanları; p,p'-oksibis-(benzensulfonil hidrazid) (OBSH), p-toluensulfonilhidrazid, p-toluensulfonilsemikarbazid, dinitrosopentametilentetramin ve 5-feniltetrazoldur (Petchwattana ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014).

Azodikarbonamit (ADC)

Azodikarbonamit en yaygın kullanılan ekzotermik kimyasal köpük ajanıdır. $H_2N-CO-N=N-CO-NH_2$ kimyasal yapısına sahip olan azodikarbonamitin bozunma sıcaklığı 205-215 °C arasındadır. Ana bozunma ürünü N_2 'dir ve gaz veriminin yaklaşık % 65'ini oluşturur. Diğer bozunma ürünleri % 25 verimle karbon monoksit (CO), % 5 karbondioksit (CO_2) ve % 5 amonyak (NH_3) içermektedir. Gaz verimi yaklaşık 220 cm^3/g 'dır (Eaves, 2004; Petchwattana ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014; Chuaponpat ve Areerat, 2018). Bozunma sıcaklığı polimer köpüğün üretim koşullarına göre çeşitli aktivatörler eklenerek 150 °C'ye kadar düşürülebilmektedir. Yaygın kullanılan aktivatörler arasında çinko oksit,

Çinko stearat, çoğu kalay ya da kalay içeren stabilizatörler, üre, alkol amin ve stearik asit gibi bazı organik asitlerdir. 300-700 kg/m³ yoğunluk ve 3-30µm aralığında parçacık çapına sahip ince toz formunda bir malzemedir. Bozunma sırasında beyaz kalıntı oluşturan sarı ya da sarı-turuncu bir malzemedir. Azodikarbonamitin katı bozunma ürünleri bire, siyamelid, siyanürik asit ve razoldur. Bu rnler ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinde kalıp kirlenmesine neden olabilmektedir (Eaves, 2004; Lee ve Park, 2014).

Azodikarbonamit, ince ve homojen bir hücre yapısı oluşturması, yüksek gaz genleşme oranı sağlaması gibi özelliklerinden dolayı oldukça verimli bir ekzotermik köpük ajanıdır. Dezavantajları ise yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında hücre çökmelerine sebep olması ve sarımsı köpükler oluşturabilmesidir. Ayrıca tahriş edici olarak sınıflandırılmakta ve alerjik solunum reaksiyonlarına sebep olabilmektedir (Eaves, 2004).

Neredeyse bütün polimerler ile kullanılabilen azodikarbonamit köpürme işlemi sırasında moleküler ağırlık bozulmasına uğrayan polikarbonat (PC) ve amonyağa karşı duyarlı olan termoplastik polyester gibi polimerlerde kullanılmaktadır. Azodikarbonamit; sert PVC boru, profil ve levha, vinil kaplama, kulak tıkaçları, sızdırmaz bant, HDPE tel yalıtımı ve çapraz bağlı poliefin köpüklerin üretimi gibi birçok alanda kimyasal köpük ajanı olarak kullanılmaktadır. Azodikarbonamit, plastisol PVC köpük üretiminde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Eaves, 2004).

Diğer azo bileşikleri N₂ gazı açığa çıkaran azobisobtironitril ve N₂, CO ve CO₂ açığa çıkaran diizopropil azodikarboksilatır (Eaves, 2004).

Endotermik kimyasal köpük ajanı

Endotermik kimyasal köpük ajanı köpük üretiminde bozunma sırasında ortamdaki ısıyı absorplayan malzemelerdir. Geniş bir bozunma sıcaklığı ve zaman aralığına sahiptirler. Endotermik köpük ajanlarının çoğu ana bozunma ürünü olarak CO₂ gazı üretmektedir. CO₂ gazı polimer içerisinde hızlı difüzyon oranına sahiptir. Genellikle beyaz renge sahip olan endotermik kimyasal köpük ajanları beyaz kalıntı oluşturmaktadırlar. Bileşenleri esas olarak gıda katkı maddeleri olduğundan toksisite açısından genellikle güvenli olarak kabul edilmektedirler. Daha yavaş bozunma hızı ve soğutma etkisinden dolayı kalın bir kabuk oluşumuna yardımcı olmasından dolayı sert PVC köpük profillerin ekstrüzyon yöntemi ile üretilmesinde tercih edilen bir kimyasal köpük ajanı türüdür. Genellikle gıda paketleme ürünlerinin üretiminde kullanılmaktadır (Eaves, 2004). Endotermik kimyasal köpük ajanları bikarbonatlar, polikarboksilik asit türevleri ve

tetrazollerden oluşmaktadır. En yaygın kullanım formülasyonu sodyum bikarbonat ve sitrik asit karışımıdır (Petchwattana ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014).

Bikarbonatlar

Endotermik olarak bozunan bikarbonatlar CO₂ gazı ve bazı durumlarda da su açığa çıkarırlar. En yaygın kullanılan türleri sodyum bikarbonat ve çinko karbonattır. Ayrıca karbonat tuzları ve diğer bikarbonat türleri de yıllardır kullanılmaktadır (Eaves, 2004).

Kimyasal formülü NaHCO₃ olan sodyum bikarbonat kabartma tozu olarak da bilinen bir köpük ajanıdır. Beyaz toz halindedir. Bozunma ürünleri karbondioksit (CO₂), su (H₂O) ve sodyum karbonat (Na₂CO₃)'tır. Gaz verimi 125 cm³'tür. 170-212 °C aralığında geniş bir bozunma sıcaklığına sahiptir (Eaves, 2004; Lee ve Park, 2014; Satin ve ark., 2016; Chuaponpat ve Areerat, 2018). Azodikarbonamit ile karşılaştırıldığında bozunma hızı daha yavaş, bozunma sıcaklık aralığı daha geniş, gaz verimi ise daha azdır. Kaba ve düzensiz bir hücre yapısı oluşturmaktadır (Eaves, 2004). Sodyum bikarbonatın avantajları azodikarbonamitten daha kolay işlenmesi, daha beyaz bir köpük üretmesi ve hücre çökmesine daha az eğilimli olmasıdır. Sodyum bikarbonatın higroskopik yapısından dolayı değişken gaz verimi ve kötü dağılım gibi sorunları mevcuttur. Bu sorunlar sodyum bikarbonatın yağ veya parafin ile kaplanması ile büyük ölçüde önlenmiştir (Eaves, 2004).

Sodyum bikarbonat yaygın olarak sitrik asit ile karıştırılarak kullanılmaktadır. 160 ve 210 °C arasında bozunan bu formülasyonun gaz verimi 120 cm³/g ve ana bozunma ürünü CO₂'dir (Petchwattana ve ark., 2013; Lee ve Park, 2014).

Polikarboksilik asit türevleri

Sitrik asit, polikarboksilik asit esterleri ya da tuzları gibi polikarboksilik asit türevleri genellikle bikarbonatlar ile beraber kullanılmaktadır. Sodyum sitrat ve sodyum sitratın trimetil esteri bunlara örnektir. Bu tür kombinasyonlar köpük ajanının bozunma sıcaklığı ile polimer üretim sıcaklığının birbiri ile uyumlu olmasının ayarlanmasına izin vermektedir (Eaves, 2004).

Endo/Ekzo karışımları

Talep edilen köpüğün istenilen özellikleri karşılaması için endotermik ve ekzotermik köpük ajanları karıştırılarak kullanılmaktadır. Uygun fiyat/performans nedeniyle azodikarbonamit bu karışımların ekzotermik köpük ajanı olarak temel bileşenidir. Çoğu durumda seçilen bir endotermik köpük ajanı genleştirme yeteneği,

stabilize etkisi, daha hızlı gazdan arındırma karakteristiği gibi özelliklerini artırmayı sağlamak için azodikarbonamit ile fiziksel olarak karıştırılarak kullanılırlar. Bunlara örnek olarak sert PVC ve PVC/odun kompozitlerin ekstrüzyon yöntemi ile üretilmesinde sodyum bikarbonat ve azodikarbonamit karışımı, çapraz bağlı PE ve plastisol PVC köpüklerin üretiminde ise çinko karbonat ve azodikarbonamit karışımı kullanılmaktadır (Eaves, 2004).

1.5. Lignoselülozik Malzemeler

Lignoselülozik malzemeler esas olarak selüloz, hemiselüloz, lignin ve ekstraktif maddelerden oluşan doğal malzemelerdir (Xie ve ark., 2010; Khalil ve ark., 2013). Fazla miktarlarda, kolay bulunabilen ve genellikle atık halde olan lignoselülozik malzemeler odun plastik kompozit üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Polimerlere lignoselülozik malzemelerin ilave edilmesinin en önemli avantajı biyolojik olarak parçalanabilirlik ve yenilenebilirliktir. Bunların yanı sıra düşük maliyet, daha az çevre kirliliği, iyi işlenebilirlik gibi çeşitli avantajlar da sağlamaktadır (Xie ve ark., 2010; Petchwattana ve ark., 2013; Kabir ve ark., 2014; Mishra ve Verma, 2016). Ancak rutubet alımı, sınırlı maksimum işlem sıcaklığı, zayıf yanma direnci gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır (Khalil ve ark., 2013). Odun, ağaç kabuğu, buğday sapı, pamuk sapı, fındık kabuğu, pirinç kavuzu, mısır koçanı, şeker kamışı, bambu, keten, jüt, kenevir, sisal en çok kullanılan lignoselülozik malzemelerdir (Xie ve ark., 2010; Khalil ve ark., 2013).

1.5.1. Kavak

Kavak ağacı hızlı büyümesi, melezleme ve üretim kolaylığı, birçok farklı tür ve kolonlarının bulunması, farklı iklim ve toprak koşullarına kolay adapte olabilmesi gibi özelliklerinden dolayı birçok endüstriyel alanda tercih edilen bir türdür. Kavak odunu hafif, yumuşak, işlenmesi kolay, boyanması ve emprenye edilmesi kolay bir odun türüdür (Öztan ve Şahin, 2003; Ateşoğlu ve ark., 2022). Kereste, kağıt, kontrplak ve kaplama endüstrisinde, kibrit yapımında, mobilya üretiminde ve müzik aletlerinin yapımında kavak odunu yaygın bir şekilde kullanılmakta ve bu endüstri kollarının hepsinde büyük miktarlarda atık kavak odunu meydana gelmektedir (Öztan ve Şahin, 2003).

Türkiye 2020 yılında Dünyada 27. sırada yer alarak 22,6 milyon hektar orman alanına sahipken bu miktar 2022 yılında 23.245.000 hektara ulaşmış ve toplam ağaç serveti yaklaşık 1,73 milyar m³'ü bulmuştur. 2022 yılında ülkemizde 25.480.940 m³ endüstriyel odun ve 6.128.791 ster yakacak odun üretimi gerçekleştirilmiştir. Ülkemiz orman alanının

% 25'ini hızlı yetişen türler oluşturmakta ve yıllık üretim miktarının yaklaşık 9,3 milyon m³ olduğu tahmin edilmektedir. Hızlı yetişen türlerin endüstriyel plantasyonlarında yıllık üretilen odun hammaddesi miktarı yaklaşık 3,6 milyon m³'tür. Bu miktarın %94'ünü 3.385.154 m³/yıl ile kavak plantasyonları oluşturmaktadır (Ateşoğlu ve ark., 2022; OGM, 2023).

Dünyada ise endüstriyel kavak plantasyonları özellikle yuvarlak ağaç ve kontrplak üretimi için dikilmiş binlerce hektar ile düzenli ağaçlandırmanın ana kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Günümüzde kavak ağacı yaklaşık 31,4 milyon hektarlık bir alanda yetiştirilmektedir. Bu alanın en büyük kısmı Kanada ve Çin'de bulunmaktadır. Ardından Fransa ve İtalya gelmektedir (Ateşoğlu ve ark., 2022).

1.5.2. Ağaç kabuğu

Ağaç kabuğu, ağacı ömrü boyunca hava koşulları ve haşerelerden korumak ve ağacın su kaybını önlemek gibi birçok işleve sahip olan ağacın gövdesini saran iç (canlı) ve dış (ölü) katmandan oluşan heterojen bir malzemedir (Kurt ve Mengeloğlu, 2006; Pasztory ve ark., 2016). Ağaç kabuğu; düşük yoğunluk, düşük maliyet, düşük termal iletkenlik, mikroorganizmalara karşı direnç ve yüksek ısı depolama kapasitesi gibi birçok avantaja sahip doğal bir malzemedir (Kain ve ark., 2016).

Ağaç kabuğu kimyasal olarak selüloz, hemiselüloz, lignin ve özellikle pektin ve tanen gibi ekstraktif maddelerden oluşmaktadır. Kabuğun kimyasal içeriği ağacın yaşı, türü ve ekolojik faktörler gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Pasztory ve ark., 2016; Vangeel ve ark., 2021). Odunla kıyaslandığında; odun % 62-74 oranında polisakkarit içerirken kabuk % 30-48 oranında polisakkarit içermektedir. Odunda hemiselülozu oluşturan ana monosakkarit ksiloz, kabukta ise ksiloz, arabinoz ve galaktozdur. Lignin içeriği odunda % 18-30 iken kabukta % 40-55 oranında değişmektedir. Ekstraktif maddeler odunda % 2-9 arasında kabukta ise %2-25 arasındadır. Kül içeriği ise odunda %0,6-1,1 arasında değişirken kabukta % 3,8-4,7 arasında değişmektedir (Dönmez ve Dönmez, 2013; Pasztory ve ark., 2016).

Ağaç kabuğu kereste ve kağıt hamuru endüstrisinde tamamen istenmemekte yonga levha ve lif levha üretiminde ise kullanımına % 10-15 oranlarına kadar izin verilmektedir. Bir ağaçta bulunan kabuk oranının çeşitli çalışmalarda ortalama % 8-22 arasında değiştiği belirtilmektedir (Kurt ve Mengeloğlu, 2006; Dönmez ve Dönmez, 2013; Çetin ve ark., 2014; Pasztory ve ark., 2016; Vangeel ve ark., 2021). Endüstride atık olarak üretilen büyük

miktarlardaki bu malzeme genellikle yakılarak değerlendirilmektedir. Bahecilikte mallamada ve kompozitlerde kullanılan ağaç kabuğu, oduna göre ısıyı daha az iletme özelliğine sahip olmasından dolayı yalıtım levhalarında da kullanılmaktadır (Kurt ve Mengeloğlu, 2006; Dönmez ve Dönmez, 2013; etin ve ark., 2014; Pasztory ve ark., 2016).



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde PVC ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu bölüm atık PVC'lerin geri dönüştürülmesi, PVC köpük ve PVC kompozit köpük üzerine olan çalışmalar olmak üzere üç bölümde ele alınmıştır.

PVC atıkların geri dönüştürülmesi ile ilgili çalışmalar;

Ramle ve arkadaşları (2013) çalışmalarında atık PVC'yi N-bütül-3-aminopropiltrimetoksisilan ile muamele ederek pirinç kavuzu ile karıştırmış ve pres kalıplama yöntemi kullanarak geri dönüşüm kompozit malzemeler üretmişlerdir. Kompozit üretiminde % 35-45-55 olmak üzere üç farklı pirinç kavuzu oranı kullanılırken silan oranı % 2 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen kompozitlerin çekme ve eğilme direnci değerleri belirlenmiş ve SEM görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar silan muamelesinin çekme direnci değerlerini iyileştirdiğini göstermiştir. Çekme ve eğilme direnci değerleri pirinç kavuzu miktarının artması ile düşmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde, silan muamelesinin atık PVC ile pirinç kavuzu arasındaki bağlanmayı iyileştirdiği tespit edilmiştir (Ramle ve ark., 2013).

Janajreh ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada kablo endüstrisinde meydana gelen atık PVC'leri geri dönüştürerek çok aşamalı kalıplama ve yaşlandırmanın termal ve mekanik özellikler üzerine etkisini belirlemişlerdir. Atık PVC'nin kalıplanması ekstruder ve enjeksiyon kalıplama metodu kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. TGA analizi atık PVC'nin % 40 oranından fazla uçucu bileşikler içerdiğini geri kalanının sabit karbon ve külden oluştuğunu nem miktarının ise önemsiz olduğunu göstermiştir. Her numune için bu bileşimlerin yakın olduğu görülmüştür. Bu, PVC'nin yeniden kalıplanmasının termal kararlılığı etkilemediğini ve bileşimi üzerinde bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Çekme testi sonuçları kalıplanmış numunelerin kablo fabrikasındaki numunelerle karşılaştırıldığında daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Bunun ekstruder ve kalıplama koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Statik özellikler yeniden kalıplama ile artış gösterirken viskoelastik özellikler yeniden kalıplama aşamaları ile düşmüştür (Janajreh ve ark., 2015).

Binici ve Aksogan (2016) odun yongası, zeytin çekirdeği atığı, atık PVC, alçı taşı ve epoksiyi farklı oranlarda homojen bir karışım haline gelinceye kadar 5 dk karıştırmışlar ve bu karışımı çimento içerisine ekleyerek preste kalıplamışlardır. Kalıplanan malzeme 1 gün kalıpta bekletilmiş, iki gün kurlaşması beklenmiş ve daha sonra etüvde 110 °C

sıcaklıkta kurutulmuştur. Üretilen bu malzemelerin birim ağırlık, su alma oranı, ultrasonik iletim hızı, termal iletkenlik katsayısı değeri, basma ve eğilme direnci özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen tüm örneklerin yalıtım malzemesi olarak kullanılması için uygun ısı iletkenlik katsayısı değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca zeytin çekirdeği atığı oranı arttıkça termal iletkenlik katsayısı değeri düşüş göstermiştir. Zeytin çekirdeği atığı, atık PVC ve odun yongası içeren örneklerin diğer örneklerle göre daha düşük birim ağırlık, daha yüksek su alma oranı ve daha düşük ultrasonik iletim hızına sahip olduğu görülmüştür. Tüm örneklerin eğilme ve basma direnci değerlerinin standart değerlerin üzerinde olduğu belirlenmiştir (Binici ve Aksogan, 2016).

Gohatre ve arkadaşları (2020) PVC kablo atıkları ve uçucu kül kullanarak kompozit malzemeler üretmişler ve özelliklerini araştırmışlardır. Kompozit malzemelerde %1-3-5 oranında 3-aminopropiltetoksilan ile muamele edilmiş uçucu kül oranı % 30 olarak sabit tutulmuştur. Plastikleştirici olarak % 1 oranında ESBO kullanılan kompozitlere % 1 oranında ısı stabilizatörü ilave edilmiş ve bu plastikleştirici ve stabilizatör oranı kontrol örneği dışında tüm kompozitlerde sabit tutulmuştur. Kompozit malzemelerin üretiminde karışım 180 °C sıcaklıkta 60 rpm karıştırma hızında 8 dk süreyle hazırlanmış ve pres kalıplama yöntemi ile kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk, tork, darbe ve çekme direnci, FTIR, EDX, yüzey sertlik, TGA, DSC, dikey yanma, SEM ve su alma özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre silan muamelesi çekme direnci ve young's modülünü iyileştirmiştir. En iyi sonucu % 3 silan oranı vermiştir. Uçucu kül ilavesi çekme direnci, kopmada uzama ve darbe direnci değerini artırmıştır. Çekme modülü ise % 3 silan muamelesi ile artış göstermiştir. Eğilme direnci ve modülü değerlerinin silan oranının artması ile düşüş gösterdiği görülmüştür. SEM görüntüleri silan muamelesi ile kompozit malzemelerde iyi dağılım ve bağlanma sağlandığını göstermiştir. Termal ve su alma özelliklerinin silan oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Su alma oranı silan oranı arttıkça düşüş göstermiştir (Gohatre ve ark., 2020).

Gohatre ve arkadaşları (2021) çalışmalarında atık PVC, elektronik atıklardan elde edilen atık akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve nitril kauçuk (NBR) kullanarak kompozit malzemeler üretmiş ve özelliklerini araştırmışlardır. Kompozit üretiminde % 30-50-70 oranlarında karıştırılarak kullanılan PVC ve ABS atıkları içerisine % 5-10-15 oranlarında nitril kauçuk eklenerek 180 °C sıcaklık ve 60 rpm karıştırma hızında karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar çift vidalı mikro-birleştirme makinasında kalıplanmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik, reolojik, termal, morfolojik ve su

absorpsiyon özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre atık PVC/ABS karışımlarında PVC oranı arttıkça çekme direnci, kopmada uzama değeri ve çekme modülü düşüş gösterirken darbe direnci artmıştır. Çekme direnci ve modülü değerleri % 10 nitril kauçuk içeriğine kadar artış göstermiş daha sonra % 15 nitril kauçuk içeriğinde düşmüştür. En yüksek kopmada uzama oranı % 15 nitril kauçuk içeren kompozitlerde görülmüştür. % 15 nitril kauçuk içeren atık PVC/ABS (70/30) kompozitlerin darbe direnci değerlerinde önemli bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Sertlik değerleri nitril kauçuk miktarı arttıkça düşmüştür. Kompozitlerde nitril kauçuk oranının artması ile su alma oranı da artış göstermiştir. SEM görüntüleri kompozit üretiminde karışımların homojen bir şekilde oluşturulduğunu göstermiştir (Gohatre ve ark., 2021).

Sürmelioglu, (2023) çalışmasında tüketim ömrünü tamamlamış PVC kablo atığı, PVC esnek film atığı, PVC suni deri atığı ve PVC spiral hortum atıklarını kullanarak kompozit malzemeler üretmiş, özelliklerini incelemiş ve saf PVC ile karşılaştırmıştır. Kompozit malzemelerin üretiminde kalsit, DOPT, boya, stearik asit ve nem alıcılar gibi katkı maddeleri kullanılmıştır. Kıyaslama amacı ile aynı oran ve şartlarda saf PVC kompozit de üretilmiştir. Ekstrüzyon yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk, çekme direnci, sertlik, TGA, DSC ve SEM özellikleri araştırılmıştır. Atık PVC kompozitler, saf PVC kompozitlere göre oldukça düşük çekme direnci değerleri sergilemişlerdir. Atık PVC hortum ve atık PVC film kompozitlerin ortalama yoğunluk değerleri saf PVC kompozitlere yakın değerler göstermiştir. Atık PVC hortum, atık PVC kablo ve atık PVC film kompozitlerin sertlik değerleri birbirine yakın değerler gösterirken atık PVC suni deri kompozitlerin sertlik değerlerinin diğer kompozitlere göre çok düşük olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde bütün kompozitlerde homojen karışım elde edildiği gözlemlenmiştir (Sürmelioglu, 2023).

PVC köpük ile ilgili çalışmalar;

Azimipour ve Marchand (2006) PVC köpüğün özellikleri üzerine kalsiyum karbonat (CaCO_3) partikül boyutunun etkisini araştırmışlardır. Ca/Zn stabilizatör ve tin stabilizatör kullanılarak iki farklı formülasyon belirlenmiş ve köpük ajanı olarak azodikarbonamit kullanılmıştır. Ekstrüzyon yöntemi kullanılarak üretilen köpüklerde 0,1-1,5 μm boyutlarında CaCO_3 ilave edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre CaCO_3 partikül boyutunun artması köpük yoğunluğunu etkilememiştir. En yüksek partikül boyutunda daha büyük ortalama hücre boyutu elde edilirken daha homojen bir dağılım elde edilmiştir. 1 μm 'den daha küçük CaCO_3 içeren köpüklerde hücre çökmeleri meydana

gelmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü değerleri, daha büyük partikül boyutlarında açık hücre sayısının azalması ve hücre yapısının iyileşmesi ile artış göstermiştir (Azimipour ve Marchand, 2006).

Jiang ve arkadaşları (2014) PVC ve tolüen diizosiyanat kullanarak çapraz bağlı polivinil klorür (c-PVC) köpükler üretmişlerdir. Kimyasal köpük ajanı olarak azodiizobütrilonitril ve azodikarbonamit kullanılan köpüklerin üretiminde farklı oranlarda epoksi ve ftalik anhidrit kullanılmıştır. Üretilen c-PVC köpüklerin hücre morfolojisi, çekme, basma ve makaslama özellikleri incelenmiştir. Ayrıca c-PVC köpüklerin hazırlanması sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonların incelenmesi amacıyla FTIR ve NMR analizleri gerçekleştirilmiştir. Bütün c-PVC köpüklerin yoğunluğu yaklaşık 65 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Üretilen tüm köpükler benzer, düzensiz bir hücre morfolojisi sergilemişlerdir. Epoksi ilavesi köpüklerin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Aynı yoğunluk ve benzer hücre morfolojisine sahip olmalarına rağmen epoksi içeren köpükler daha yüksek makaslama direnci değerleri göstermiştir. Epoksi ve ftalik anhidrit etkisi karşılaştırıldığında iki malzemede köpüklerin mekanik özelliklerini aynı derecede iyileştirmiştir (Jiang ve ark., 2014).

Jiang ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada çapraz bağlı PVC köpüklerde epoksi ilavesinin etkisini araştırmışlardır. PVC esaslı köpüklerin üretiminde çapraz bağ için toluen izosiyanat, kimyasal köpük ajanı olarak da azodiizobütrilonitril ve azodikarbonamit kullanılmıştır. Köpükler mikro hücre yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen köpüklere FTIR, SEM, DMA, çekme, basma ve makaslama testleri uygulanmıştır. PVC esaslı köpüklerde epoksi miktarının artması PVC bozunmasında açığa çıkan HCl miktarının azalmasına sebep olmuştur. Epoksi ilavesi köpüklerin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir (Jiang ve ark., 2014).

May-Pat ve Aviles (2014)'in çalışmasının amacı uzun dönem suya maruz bırakılan düşük yoğunluklu PVC köpüklerin hücre yapısı ve mekanik özellikleri üzerine oluşan etkileri incelemektir. Ticari olarak temin edilen 48 kg/m³ yoğunluğundaki PVC köpükler damıtılmış su ve deniz suyu kullanılarak bir yıl boyunca su alma analizine tabii tutulmuştur. Köpüklerin belirli aralıklarla hücre morfolojileri ve 6. ve 12. ayda mekanik testleri (çekme ve basma) tekrar edilmiştir. Damıtılmış su içerisine batırılan köpükler deniz suyuna batırılan köpüklerden daha yüksek su absorpsiyonu göstermişlerdir. Her iki koşulda da hücre genişlemesi meydana gelmiş bu da hücre duvarlarını yıkarak kalıcı zararlara sebep olmuştur. Mekanik özelliklerde çekme direnci düşmüş, suyun plastikleştirici

etkisinden dolayı elastikiyet modülünde az bir azalma meydana gelmiş, 12 ay sonunda kopmada uzama değeri artmıştır. Deniz suyuna batırılan örneklerde mekanik testlerde benzer sonuçlar gözlemlenmiştir (May-Pat ve Aviles, 2014).

Chuaponpat ve Areerat (2018) fiziksel köpük ajanı karbon dioksit kullanarak plastikleştirilmiş PVC köpük üretmişlerdir. Üretilen PVC köpüklerin yoğunluk ve hücre yapısı üzerine üretim koşullarının etkisi incelenmiştir. Mikro hücre yöntemi ile üretilen PVC köpüklerde üç farklı köpüklendirme sıcaklığı (40,60 ve 80 °C) ve üç farklı köpüklendirme basıncı (120, 150 ve 170 bar) kullanılmıştır. Suyu batırma süresi (30 dk) ise sabit tutulmuştur. Üretilen PVC köpükler 25 °C sıcaklıkta 12 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş ve özellikleri belirlenmiştir. PVC köpüklerde kapalı hücre, düzenli hücre yapısı ve ince hücre duvarı elde edilmiştir. PVC köpüklerin yoğunluk değerleri $0,4 \text{ g/cm}^3$ 'e düşmüştür (köpüklendirilmemiş PVC yoğunluğu: $1,241 \text{ g/cm}^3$). PVC köpüklerde köpüklendirme sıcaklığının artması ile yoğunluk değerleri düşüş göstermiş, köpüklendirme basıncının ise köpüklerin yoğunluk değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde köpüklendirme sıcaklığı ve basıncının köpüklerin hücre yapısı üzerinde önemli bir etkisi olduğu sıcaklık ve basıncın artması ile daha büyük boyutlu hücrelerin oluştuğu görülmüştür. Sıcaklığın artması ile hücre çapı artış gösterirken hücre yoğunluğu ise düşüş göstermiştir. Yaşlandırma işleminden sonra ise PVC köpüklerin yoğunluk ve büzülme yüzdeleri iki katına çıkmıştır (Chuaponpat ve Areerat, 2018).

Senol ve Shukla (2019) ticari olarak temin ettikleri yoğunlukları 35, 45, 60, 80 ve 100 kg/m^3 olmak üzere beş farklı yoğunluktaki kapalı hücreli PVC köpüklerin su altı şok tepkisini incelemişlerdir. Köpük malzemelerdeki hacimsel değişiklikleri ölçmek için bir su altı şok yükleme düzeneği geliştirmişlerdir. Farklı yoğunluklara sahip PVC köpüklerin su altı şok tepkisi 10^3 s^{-1} gerinim hızında incelenmiştir. Elde edilen bulgular, su altı şok yüklemesi ile malzeme tepkisi arasında bir gecikme olduğunu göstermiştir. PVC köpüklerin şok yüklemesinden sonra orijinal şekillerini % 80-90 oranında geri kazandığı ve enerji absorblama kapasitelerinin önemli bir kısmını koruduğu belirlenmiştir (Senol ve Shukla, 2019).

Zhang ve arkadaşları (2019) çapraz bağlı PVC köpükleri kürleşme sonrası 5-10 ve 15 gün 65 °C sıcaklıktaki suda bekletmişlerdir. Mikro hücre yöntemi ile üretilen PVC köpüklerde köpük ajanı olarak azodikarbonamit ve 2-azodiizobütrilonitril, çapraz bağ oluşturunca olarak ise poliizosiyanat kullanılmıştır. PVC köpüklerin özellikleri üzerine

kürleşme sonrası süresinin etkisi incelenmiştir. Kürleşme sonrası 5 gün suda bekletilen köpüklerde hücre çapı artış gösterirken yoğunluk ve kapalı hücre oranı düşüş göstermiştir. Çünkü izosiyanat karbondioksit açığa çıkarmak için su ile reaksiyona girmiş ve bu da köpüklerin genişlemesine neden olmuştur. 5 günden sonra hücre morfolojisi yaklaşık 110 kg/m³'lük yoğunluk ve yaklaşık % 85 kapalı hücre oranı ile stabil kalmıştır. Ancak suda kürleşme süresi 15 gün olduğunda bazı hücreler parçalanmış ve kapalı hücre oranı azalmıştır. Kürleşme sonrası süresi 5 gün olan köpükler kontrol örneğine göre daha iyi basınç direnci ve modülü değerleri sağlamıştır. Eğilme ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde 5 gün bekletilen köpükler sırasıyla %38,5 ve %32,4 'lük bir artış göstermişlerdir. Daha uzun kürleşme sonrası süresinde (10 gün) köpükler daha düşük mekanik özellikler sergilemişlerdir (Zhang ve ark., 2019).

Nerkar ve arkadaşları (2023) çalışmalarında sert PVC köpüklerin özellikleri üzerine yeni ultra yüksek molekül ağırlıklı akrilik işlem yardımcılarının (polimetil metakrilat) etkisini araştırmışlardır. PVC ve katkı maddeleri sıcaklık altında homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Karışıma tin stabilizatör 50 °C'de, yağlayıcılar 65 °C'de akrilik işlem yardımcıları 75 °C'de, kalsiyum karbonat 90 °C sıcaklıkta ilave edilmiş ve karışım 170 °C'ye kadar ısıtılmış, daha sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Kimyasal köpük ajanı olarak ekzotermik ve endotermik köpük ajanı kombinasyonu kullanılan PVC köpüklerin üretimi çift vidalı ekstruder makinesinde gerçekleştirilmiş ve köpüklerin yoğunluk ve genişleme özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre akrilik işlem yardımcıları eriyik dayanımını (melt strength) iyileştirmiştir. Kullanılan akrilik işlem yardımcılarının moleküler ağırlığı arttıkça etkinliği artmıştır. Kimyasal köpük ajanı kullanılarak ekstrüzyon yöntemi ile % 1000'den daha fazla genişleme sağlanmıştır. Daha yüksek molekül ağırlıklı işlem yardımcıları PVC bileşenlerinin füzyon karakteristiklerini korumuş yoğunluğu ise düşürmüştür (Nerkar ve ark., 2023).

PVC kompozit köpük ile ilgili çalışmalar;

Mengeloğlu ve Matuana (2001) çalışmalarında PVC esaslı kompozit köpükler üretmişlerdir. Kompozit köpüklerde iki farklı kimyasal köpük ajanı ve farklı oranlar kullanmışlardır. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen kompozit köpüklerin köpük yapısını incelemişlerdir. Köpüklerde yoğunluk azalması kimyasal köpük ajanı miktarından etkilenmiş ancak köpük ajanı tipinden etkilenmemiştir. Ekzotermik köpük ajanı, endotermik köpük ajanı ile karşılaştırıldığında daha küçük ortalama hücre boyutu sergilemişlerdir. Kompozit köpüklerde ise yoğunluk azalması kimyasal köpük ajanı

miktarından etkilenmemiştir. Ancak ortalama hücre boyutu kimyasal köpük ajanı tipinden etkilenmiş ve saf PVC köpüklerdekine benzer sonuçlar görülmüştür (Mengeloğlu ve Matuana, 2001).

Matuana ve Mengeloğlu (2001) sert PVC ve PVC kompozitlerin köpüklendirilmesinde darbe modifiye edicilerin etkisini araştırmışlardır. Köpüklerin üretiminde farklı oranlarda tam akrilik (çapraz bağ için) ve klorlanmış polietilen darbe modifiye edici malzeme kullanmışlardır. Mikro hücre yöntemi ile üretilen köpüklerde gaz difüzyonu, yoğunluk ve boşluk oranı özelliklerini incelemişlerdir. Köpüklerde hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi gazın çözülebilirliğine ve difüzyonuna bağlıdır. PVC esaslı köpüklerde ölçülen gaz çözünürlüğünün odun lifi kullanımı ile azaldığı tespit edilmiştir. Çünkü gaz absorbesi sadece amorf bölgede yani polimer matriste meydana gelmektedir. Çapraz bağlı modifier CO₂ çözünürlüğünü artırmıştır (Matuana ve Mengeloğlu, 2001).

Matuana ve Mengeloğlu (2002) sert PVC kompozitlerin köpüklendirilmesinde rutubet miktarı ve ekstruder çıkış sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Kompozit köpüklerde farklı rutubet oranları ve farklı kimyasal köpük ajanı oranları kullanılmış ve köpük yapısı incelenmiştir. Ekstrüzyon yöntemi ile köpüklendirilen köpüklerde 165/170/180 °C ekstruder sıcaklığı kullanılmıştır. Kimyasal köpük ajanı yerine rutubetin köpüklenme üzerine etkisi olumlu sonuçlar vermiştir. Ancak hücre büyümesi için tam akrilik ilavesinin gerektiği gözlemlenmiştir. Üretimde kullanılan ekstruder sıcaklığı arttıkça köpüklerin yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. Daha yüksek ekstruder sıcaklıklarında tam akrilik ilavesi ile matris viskozitesi çok düştüğünden köpüklenme sırasında aşırı gaz kaybından dolayı uygun olmayan hücre büyümesi meydana geldiği görülmüştür (Matuana ve Mengeloğlu, 2002).

Mengeloğlu ve Matuana (2003) çalışmalarında ekstrüzyon yöntemi ile üretilen sert PVC/odun unu kompozit köpüklerin çekme ve darbe özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen köpükleri daha önceki çalışmalarındaki mikro hücre yöntemi ile üretilen köpüklerle karşılaştırmışlardır. Ekzotermik ve endotermik kimyasal köpük ajanı kullanılan köpüklerde, egzotermik köpük ajanı endotermik köpük ajanına göre daha küçük hücre boyutunda köpükler elde edilmesini sağlamıştır. Kompozit örneklerin yoğunluklarının saf PVC köpüklerin yoğunluklarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Endotermik ve egzotermik kimyasal köpük ajanı kullanılan köpükler benzer mekanik özellikler sergilemişlerdir. Kimyasal köpük ajanı tipi fark etmeksizin odun unu ilavesi köpüklerin çekme direncini düşmesine neden olmuştur. Hem saf PVC köpük hem de PVC kompozit

köpüklerin çekme modülleri düşmüştür. Köpüklerin darbe direnci değerleri düşüş göstermiştir. Ancak bu düşüşün istatistiksel olarak önemli olmadığı belirlenmiştir. Mikro hücre yönteminin, ekstrüzyon yöntemine göre daha iyi hücre yapısı sergilediği gözlemlenmiştir (Mengeloğlu ve Matuana, 2003).

Demir ve arkadaşları (2008) çalışmalarında esnek PVC köpüğün fiziksel, mekanik ve morfolojik özellikleri üzerine çeşitli organik ve inorganik dolgu maddeleri ve farklı ısı stabilizörlerinin etkisini araştırmışlardır. Kompozit köpüklerde dolgu maddesi olarak selüloz, lif kabağı, zeolit ve kalsiyum karbonat (CaCO_3), ısı stabilizatörü olarak da Ca/Zn stearat ve organotin kullanılmıştır. Esnek PVC kompozit köpükler, azodikarbonamit kimyasal köpük ajanı kullanılarak etüvde üretilmiştir. Köpükler yoğunluk ve boşluk yapısı açısından incelendiğinde ısı stabilizatörü olarak Ca/Zn stearat daha iyi sonuçlar vermiştir. Organik dolgu maddesi içeren PVC köpükler inorganik dolgu maddesi içeren PVC köpüklerden daha düşük gözenek büyüklüğüne sahiptir. Kompozit köpüklerde dolgu maddesi miktarı arttıkça hücre boyutu, şekli ve yapısı düzensizleşmiştir (Demir ve ark., 2008).

Kozlowski ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada PP, HDPE ve PVC matrisli odun plastik kompozit köpük üretmiş ve bu kompozitlerin erime akış indeksi, erime viskozitesi, erime mukavemeti ve hücre yapısını (SEM) incelemişlerdir. Tüm kompozitler % 30 odun unu içermektedir. Uyumlaştırıcı olarak PP kompozitler için maleik anhidrit graftlanmış polipropilen (PP-g-MA), HDPE esaslı kompozitler için maleik anhidrit graftlanmış polietilen (HDPE-g-MA) % 3-5 oranında kullanılmıştır. PVC ise %40 oranında etilhekzil ftalat ile plastikleştirilmiştir. Köpüklendirme işlemi tek vidalı ekstruderde iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen erime akış indeksi sonuçlarına göre PP ve PVC esaslı kompozitlerin oldukça akışkan bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir. Tüm kompozitlerde erime viskozitesi sıcaklığın artması ile düşmüştür. En düşük viskozite değerleri PP, PVC ve PP ve PVC esaslı kompozitlerde belirlenmiştir. Erime mukavemeti PP ve PVC kompozitlerde sıcaklığın artması ile düşüş göstermiştir. En yüksek erime mukavemeti 180 °C'de PP/odun unu kompozitlerde ölçülmüştür (Kozlowski ve ark., 2008).

Abu-Zahra ve Alian (2010) dört farklı dolgu maddesi ilave edilen PVC köpüklerin yoğunluğu ve hücre morfolojisini incelemişlerdir. Kimyasal köpük ajanı olarak azodikarbonamit kullanılan köpükler tek vidalı ekstruder kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kompozit köpüklerin yoğunluk, SEM, TEM ve XRD analizleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre % 8'den daha düşük oranlarda nanokil ilavesi dört farklı nanokilde de

köpük yoğunluğunu düşürmüştür. En önemli etki doğal kalsiyum montmorillonit kil kullanıldığında meydana gelmiştir. XRD ve TEM analizleri nanokillerin plakalar halinde dağıldığını göstermiştir (Abu-Zahra ve Alian, 2010).

Farsheh ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada odun plastik kompozit köpükleri çok duvarlı karbon nanotüp (CNT) ile takviye ederek kompozit köpüklerin özellikleri üzerine çok duvarlı karbon nanotüp ve kimyasal köpük ajanı miktarının etkisini incelemiştir. PVC ve kavak odunu (70 mesh boyutunda ve 40 phr oranında) kullanılarak üretilen kompozit köpükler farklı oranlarda (0,1,2 phr) CNT ile takviye edilmiştir. Üretiminde pres kalıplama yöntemi kullanılan PVC kompozit köpüklerin köpükendirme işleminde ekzotermik kimyasal köpük ajanı olan azodikarbonamit (0,3,6 phr) kullanılmıştır. PVC kompozit köpüklerin test sonuçları incelendiğinde, kimyasal köpük ajanı miktarının artması ile hücre boyutu artmıştır. Kimyasal köpük ajanı miktarının artması ile 0 ve 1 phr CNT içeriğinde hücre yoğunluğu artış gösterirken 2 phr CNT içeriğinde hücre yoğunluğu düşmüştür. Köpük ajanı miktarı sabit tutulduğunda ise kompozit köpüklere ilave edilen CNT miktarının artması hücre boyutunu düşürürken hücre yoğunluğunu artırmıştır. PVC kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri kimyasal köpük ajanı miktarının artması ile azalmıştır. Kompozit köpüklerin su alma ve kalınlık artımı değerleri köpükendirilmemiş kompozitlerle karşılaştırıldığında artarken kimyasal köpük ajanı miktarının artmasıyla da artış göstermiştir. CNT içeren PVC kompozit köpüklerin su alma ve kalınlık artımı değerleri azalmıştır. Köpük ajanı miktarının artması ile çekme direnci değerleri azalmıştır. PVC kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerleri ise köpük ajanı miktarının artması ile azalırken CNT miktarının artması ile artış göstermiştir (Farsheh ve ark., 2011).

Petchwattana ve Covavisaruch (2011) PVC/pirinç kavuzu kompozit köpüklerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine kimyasal köpük ajanının etkisini araştırmışlardır. Üretilen kompozitlerin hücre morfolojisi incelenmiştir. Endotermik köpük ajanı olarak kullanılan sodyum bikarbonat, sitrik asit ile ekzotermik köpük ajanı olarak kullanılan azodikarbonamit ise çinko oksit ile muamele edilmiştir. Çift vidalı ekstruder kullanılarak üretilen kompozit köpüklerde köpük ajanı miktarının artması ile daha küçük ortalama hücre boyutu elde edilmiştir. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri % 2 kimyasal köpük ajanı miktarına kadar düşüş göstermiş kimyasal köpük ajanı miktarı % 3'e ulaştığında ise artmıştır. Modifiye edilmiş azodikarbonamit, modifiye edilmiş sodyum

bikarbonat ve köpük ajanı kombinasyonuna göre daha iyi özellikler sağlamıştır (Petchwattana ve Covavisaruch, 2011).

Petchwattana ve Covavisaruch (2011) çalışmalarında PVC ve % 20 oranında pirinç kavuzu kullanılarak üretilen kompozit köpüklerde farklı oran ve partikül boyutundaki kimyasal köpük ajanının köpüklendirme işlemine etkisini incelemişlerdir. Kimyasal köpük ajanı olarak çinko oksit ile modifiye edilmiş 5, 8, 11 ve 22 µm boyutlarında azodikarbonamit kullanılmıştır. Kompozit köpüklerin üretimleri çift vidalı ekstruder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit köpüklerin yoğunluk, hücre boyutu ve yoğunluk hesaplamaları, eğilme ve darbe özellikleri, TGA ve DSC analizleri ve SEM görüntüleri incelenmiştir. % 2 ve 3 azodikarbonamit içeriğinde daha küçük hücre boyutu elde edilmiştir. En küçük hücre boyutu ise 5 µm boyutundaki köpük ajanında elde edilmiştir. Azodikarbonamit boyutu arttıkça hücre boyutu da artmıştır. En fazla yoğunluk azalımı 22 µm köpük ajanı boyutunda meydana gelmiştir. Maksimum darbe direnci değeri 5 µm boyutundaki köpük ajanı kullanılan örneklerde elde edilmiştir. Kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülleri % 2 köpük ajanı içeriğine kadar köpük ajanı oranı arttıkça azalmıştır (Petchwattana ve Covavisaruch, 2011).

Chand ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada pres kalıplama yöntemi kullanarak pirinç kavuzu dolgulu PVC kompozit köpükler üretmişlerdir. Dolgu maddesi olarak kullanılan pirinç kavuzu unları maleik anhidrit ile modifiye edilmiştir. Kompozit köpüklerin özellikleri üzerine dolgu maddesi miktarı ve yüzey modifikasyonunun etkisi araştırılmıştır. PVC kompozit köpüklerin yoğunluk, çekme direnci, kopmada uzama, darbe direnci, basma direnci, sertlik ve aşınma direnci değerleri belirlenmiş ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiştir. PVC köpüklerde köpük ajanı varlığı PVC yoğunluğunu düşürmüştür ancak pirinç kavuzu miktarının artması ile yoğunluk değerleri artış göstermiştir. Çekme ve darbe direnci değerleri üzerine pirinç kavuzu miktarının herhangi bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Basma direnci modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş pirinç kavuzu miktarının artması ile artmıştır. En yüksek spesifik aşınma oranı pirinç kavuzu içermeyen PVC köpüklerde, en düşük aşınma oranı ise maksimum maleik anhidrit ile modifiye edilmiş pirinç kavuzu içeren PVC kompozit köpüklerde belirlenmiştir (Chand ve ark., 2012).

Ghasemi ve arkadaşları (2012) çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanarak PVC esaslı nano kompozit köpükler üretmişler ve bu köpüklerin özellikleri üzerine farklı oranlarda ilave edilen kimyasal köpük ajanı ve nano partiküllerin etkisini incelemişlerdir.

PVC, odun unu, modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüp ve azodikarbonamit kullanılarak üretilen köpüklerde mikro hücre yöntemi kullanılmıştır. FTIR analizi yapılan MWCNT'lerde iki ana pik meydana geldiği ve modifikasyonun başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Nano kompozit köpüklerde kimyasal köpük ajanı konsantrasyonu arttıkça hücre yoğunluğu artış göstermiştir. MWCNT oranının artması ile hücre yoğunluğu artmış, hücre boyutu azalmıştır. Modifiye edilmiş MWCNT ile üretilen nano kompozit köpükler, modifiye edilmemiş MWCNT ile üretilenlere göre daha yüksek hücre yoğunluğu ve daha küçük hücre boyutu sergilemişlerdir. Kimyasal modifikasyon nanotüplerin PVC matris içerisinde dağılımını kolaylaştırmış ve topaklanmayı önlemiştir. Köpüklerin mekanik özellikleri köpüklendirme işlemi ile azalmıştır. Modifiye edilmiş MWCNT ile üretilen köpüklerin çekme ve eğilme dirençlerinin daha iyi olduğu belirlenmiştir. Köpüklerin kimyasal köpük ajanı içeriği arttıkça elastikiyet modülleri düşüş göstermiştir. MWCNT ilavesi ile elastikiyet modülü artmıştır (Ghasemi ve ark., 2012).

Petchwattana ve arkadaşları (2013) çalışmalarında PVC ve pirinç kavuzundan tek vidalı ekstruder makinası kullanarak ekstrüzyon yöntemi ile kompozit köpükler üretmiş ve özelliklerini belirlemişlerdir. Bütün kompozitlerde pirinç kavuzu oranı 20 phr olarak sabit tutulurken kimyasal köpük ajanı olarak kullanılan ve çinko oksit ile modifiye edilen azodikarbonamit ağırlıkça % 0,5-1-1,5-2 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen kompozit köpüklerin su alma değerleri, eğilme ve darbe testleri, hücre yoğunluğu hesaplamaları ve SEM görüntüleri incelenmiştir. Bulunan sonuçlara göre köpük ajanı miktarı arttıkça kompozit köpüklerin su alma değerleri artış göstermiştir. Tüm kompozit köpüklerin su alma değerleri köpüklendirilmemiş kompozitlerin su alma değerlerinden çok daha yüksektir. PVC kompozit köpüklerin hücre yoğunluğu köpük ajanı miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. Köpüklerin eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci değerleri köpük ajanı miktarının artmasıyla düşüş göstermiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, PVC kompozit köpüklerde köpük ajanı miktarı arttıkça hücre yapısı iyileşmiştir. Maksimum hücre sayısı ve daha fazla hücre popülasyon yoğunluğu ise % 2 köpük ajanı içeren kompozit köpüklerde gözlemlenmiştir (Petchwattana ve ark., 2013).

Shakarami ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada bütadiyen kauçuk kullanarak PVC esaslı kompozitlerde fiziksel köpük ajanı-karbondioksit (CO₂) ile polimer kompozit köpükler elde etmişlerdir. Üretilen köpüklerin bazı mekanik özellikleri ve hücre morfolojileri incelenmiştir. Sonuçlar köpüklenme sıcaklığı ve süresinin artması ile daha düşük hücre yoğunluğu elde edilebileceğini göstermiştir. Bu durum, köpüklenme

sıcaklığının artması ile CO₂ çözünürlüğünün düşmesinden kaynaklanmaktadır. En yüksek genişleme oranı % 5 kauçuk içeren PVC köpüklerde 110 °C köpüklenme sıcaklığı ve 15 saniye köpüklenme süresinde elde edilmiştir. Köpüklenme sıcaklığı ve süresinin artması çekme direnci, elastikiyet modülü ve kopmada uzama gibi mekanik özelliklerinin düşmesine sebep olmuştur (Shakarami ve ark., 2013).

Suriyachai ve arkadaşları (2013) PVC ve akrilonitril kauçuk kullanarak vulkanizasyon yöntemi ile PVC esaslı kompozit köpükler üretmişler ve köpüklerin özellikleri üzerine kimyasal köpük ajanı azodikarbonamit oranının (20-60) etkisini araştırmışlardır. PVC, akrilonitril kauçuk ve katkı maddeleri 40-170 °C sıcaklıkları arasında homojen bir karışım haline getirilerek tek vidalı ekstruder ile kompozitler üretilmiştir. Sıcak hava (HA) ve infrared (IR) olmak üzere iki farklı vulkanizasyon metodu ile üretilen kompozit köpüklerin yoğunluk, termal iletkenlik değerleri ve hücre yapısı incelenmiştir. HA metodunda filmler ilk önce hava sirkülasyonlu bir etüvde 136 °C sıcaklıkta 12 dk ön ısıtmaya tabi tutulmuş daha sonra 158 °C'de 12 dk vulkanizasyon metodu uygulanmıştır. IR metodunda ise 158 °C sıcaklıkta 12 dk IR fırınında ön ısıtma gerçekleştirilmiştir. PVC esaslı kompozit köpüklerde azodikarbonamit miktarının artması köpük yoğunluğunu düşürmüştür. 50 phr azodikarbonamit içeriğine kadar azodikarbonamit oranı arttıkça termal iletkenlik düşüş göstermiştir. Köpük yapısını kontrol etmede önemli rol oynayan HA ve IR metodunun köpük yoğunluğu ve porozite üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Ortalama hücre yoğunluğu ve hücre duvar kalınlığının IR yöntemi ile üretilen köpüklerde HA ile üretilen köpüklerinkine göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle IR yöntemi ile üretilen köpüklerin termal iletkenlik değerleri daha düşüktür. IR metodu ile üretilen köpüklerin su alma oranlarının HA metodu ile üretilen köpüklerin su alma oranlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Suriyachai ve ark., 2013).

Kabir ve arkadaşları (2014) 5×5 inç boyutlarında kestikleri PVC köpük yaprakları ile 5 inç uzunluğunda kestikleri 1 mm kalınlığındaki bambu liflerini mat haline getirerek pres kalıplama metodu ile kompozit köpük malzemeler üretmiş ve özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit köpüklerde bambu lif oranı ağırlıkça % 5, 8, 12, 14 olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda kompozit köpüklerin kütle yoğunluğu lif oranının artması ile düşüş göstermiştir. Bütün kompozitlerde lif miktarının artması su alma değerlerini artırmıştır. PVC kompozit köpüklerde bambu lifi miktarının artması çekme ve eğilme direncini artırmıştır. Young's modülü değerleri % 8 lif içeriğine kadar artış

göstermiş daha sonra düşmüştür. Kompozit köpüklerin TGA eğrisi incelendiğinde degradasyon, ilk aşama deklorinasyon (291,5 °C) ve ikinci aşama depolimerizasyon (447,3 °C) olmak üzere iki büyük aşamada gerçekleşmiştir (Kabir ve ark., 2014).

Khoshnoud ve arkadaşları (2014) iki sınıf uçucu kül ile üretilen PVC kompozit köpüklerin özelliklerini karşılaştırmışlardır. Sıcaklık altında karıştırılan uçucu kül (FA)/PVC kompozit köpüklerde çeşitli katkı malzemeleri ve ekzotermik ve endotermik köpük ajanı kombinasyonu kullanılmıştır. Karışıma stabilizatörler ve işlem yardımcıları 52 °C'de, parafin, kalsiyum stearat ve azodikarbonamit ve sodyum hidrojen karbonat kombinasyonu 66 °C sıcaklıkta ilave edilmiştir. 58 °C sıcaklıkta karışıma ilave edilen uçucu kül C ve F sınıfı olarak 6 ve 40 phr oranlarında kullanılmıştır. Tek vidalı ekstruder makinası ile üretilen kompozit köpüklerin yoğunluk, çekme, eğilme ve darbe özellikleri, TGA, DSC, DMA, XRD ve SEM-EDX analizleri incelenmiştir. FA-C ve FA-F içeren kompozit köpüklerin özellikleri karşılaştırıldığında FA-C ile üretilen köpüklerin daha iyi çekme ve eğilme direnci gösterdiği belirlenmiştir. 6 phr uçucu kül içeren kompozit köpüklerde FA-C ile üretilen örnekler çekme direncinde % 24 oranında iyileşme göstermiştir. Eğilme direncinde ise 6 phr uçucu kül içeriğinde FA-C ile üretilen kompozitlerde % 95 artış, FA-F ile üretilen kompozit köpüklerde % 5,74 düşüş belirlenmiştir. Her iki uçucu kül sınıfında da uçucu kül miktarı arttıkça darbe direnci değerleri azalmıştır. Termal özelliklerde önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. DMA analizinde FA-C ile üretilen kompozit köpüklerin viskoelastiklik özellikleri artış göstermiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde iyi ara yüzey bağlanmasının olduğu ancak yüksek uçucu kül içeriğinde toplanmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir (Khoshnoud ve ark., 2014).

Han ve arkadaşları (2015) birlikte ekstrüzyon yöntemi kullanarak PVC esaslı çok katmanlı kompozit köpükler üretmişlerdir. BaSO₄ dolgulu kompozit katmanı ve köpük katmanından oluşan kompozit köpükler 2-4-8 ve 16 katmandan üretilmiştir. Yoğunluk ve ses geçirmezlik özellikleri incelenen çok katmanlı kompozit köpüklerin elde edilen sonuçları incelendiğinde, köpüklendirme işlemi olmayan film/film çok katmanlı kompozitlerle karşılaştırıldığında köpük/film çok katmanlı kompozit köpüklerin daha düşük yoğunluk ve daha yüksek ses iletim kaybı değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ses iletim kaybı değerleri 2-8 katman arasında katman sayısı arttıkça artarken 16 katmanlı kompozit köpüklerde düşüş göstermiştir (Han ve ark., 2015).

Khoshnoud ve Abu-Zahra (2015) yaptıkları çalışmada sert PVC kompozit köpüklerin mekanik, termal ve morfolojik özellikleri üzerine hafif agrega uçucu külün etkisini araştırmışlardır. Sıcak karışım ve tek vidalı ekstruder kullanılarak üretilen PVC kompozit köpüklerde stabilizatör, yağlayıcı ve işlem yardımcıları kullanılmıştır. Köpük ajanı olarak azodikarbonamit ve sodyum hidrojen karbonatın kombinasyonu tercih edilmiştir. Hafif agrega uçucu kül, 0-6-12-18 phr oranlarında PVC esaslı kompozit köpüklerin içerisine ilave edilerek üretilen kompozit köpüklerin yoğunluk, çekme, eğilme ve darbe direnci testleri, TGA, DSC, DMA, XRD ve SEM-EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre kompozit köpüklerde uçucu kül miktarının artması ile yoğunluk değerleri artmıştır. Çekme direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü uçucu kül miktarının artması ile iyileşmiş, darbe direnci ise düşüş göstermiştir. Kompozit köpüklerde camsı geçiş sıcaklığı uçucu kül miktarından etkilenmemiş, bozunma başlangıç sıcaklığı değişmemiş ancak final bozunma sıcaklığının önemli bir şekilde iyileşmiştir. Uçucu kül ilavesi ile kompozit köpüklerin viskoelastiklik özellikleri artmıştır. SEM görüntüleri iyi bir dağılım ve PVC ve uçucu kül arasında iyi ara yüzey bağlanmasının olduğunu göstermiştir (Khoshnoud ve Abu-Zahra, 2015).

Mishra ve Verma (2016) çalışmalarında vinil trietoksisilan (1 phr) kimyasalı kullanarak muamele ettikleri akasya odun unları ile PVC esaslı kompozit köpükler üretmişlerdir. Azodikarbonamit ile köpüklendirilen kompozit köpüklerin üretiminde çift vidalı ekstruder kullanılmıştır. % 0- 40 oranında odun unu ilave edilen PVC kompozit köpüklerin termal özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda kompozit köpüklerin termal stabilitesi odun unu oranı arttıkça artış göstermiştir. Silan ile muamele edilen kompozit köpüklerin termal stabilitesinin silan ile muamele edilmeyen kompozit köpüklerinkine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Silan ile muamele edilen ve edilmeyen tüm kompozit köpüklerde süre, entropi değişimi ve entalpi değişimi ile izotermal stabilite odun unu miktarının artması ile artmıştır. Entalpi değişimi değerleri en yüksek % 10 (452 kJ) ve 30 (534 kJ) silan ile muamele edilmiş odun unu içeren kompozit köpüklerde kaydedilmiştir. Silan ile muamele edilmiş kompozit köpüklerin silan ile muamele edilmemiş kompozit köpüklere göre daha iyi termal stabiliteye sahip olduğu belirlenmiştir (Mishra ve Verma, 2016).

Michalowski ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada yeni köpüklenme metodu olarak mikrodalga yöntemini araştırmışlardır. Bu yöntemle PVC esaslı karbon siyahı dolgulu kompozit köpükler üretilmiştir. Elde edilen kompozit köpüklerin hücre yapıları,

fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine işlem koşullarının etkisi araştırılmıştır. PVC için karbon siyahı ilavesi mikro dalga ısıması altında ısıtılabilme yeteneğini önemli bir şekilde arttırmış ve buna ilaveten hücre yapısının iyileşmesini ve yoğunluğun düşmesini sağlamıştır. Uygulanan bu köpüklendirme yöntemi ile homojen yapıda hücre yapısı elde edilmiştir (Michalowski ve ark., 2017).

Xu ve arkadaşları (2017) PVC/mika kompozit köpükler üreterek farklı mika içeriği ve köpüklendirme süresinin kompozit köpüklerin özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Pres kalıplama yöntemi ile üretilen kompozit köpüklerde % 0, 1, 5, 10, 20 ve 30 oranlarında mika kullanılırken köpüklendirme süresi 4, 7, 10 ve 13 dakika olarak belirlenmiştir. Mikro hücre yöntemi ile üretilen kompozit köpüklerin hücre yapısı, ses absorpsiyon özellikleri ve basınç özellikleri test edilmiştir. PVC/mika kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri mika miktarı arttıkça artış gösterirken köpüklendirme süresi arttıkça düşmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde, mika miktarının artması ile hücre boyutu sabit kalırken hücre yoğunluğu düşüş göstermiştir. % 10 mika içeriğine kadar homojen bir köpük yapısı gözlemlenirken % 20 ve % 30 mika içeriğinde hücre yapısı ciddi bir şekilde hasar görmüştür. Köpüklendirme süresi arttıkça 10 dakika köpüklendirme süresine kadar hücre boyutu ve hücre duvar kalınlığı düşmüş, hücre yoğunluğu ise artmıştır. 13 dakika köpüklendirme süresine çıkıldığında ise hücre boyutu artmış, hücre yoğunluğu ise düşüş göstermiştir. Köpüklendirme süresinin artması ile köpüklerde genişleme oranı artış göstermiş bu da hücre duvar kalınlığının azalmasına sebep olmuştur. Mika miktarının artması ile ses iletim kaybı değerleri artış göstererek maksimum değere % 10 mika içeriğinde ulaşılmıştır. % 10'dan fazla mika içeriğinde hücre yapısının bozulmasından dolayı ses iletim kaybı değerleri düşmüştür. Köpüklendirme süresinin artması ile ses iletim kaybı değerleri artış göstererek 10 dakika köpüklendirme süresinde maksimum değere ulaşılmıştır (28,3 dB). Mika miktarının artması ile basınç direnci artış göstermiştir. En düşük yoğunluk, en iyi hücre yapısı ve maksimum ses iletim kaybı değerleri % 10 mika içeren 10 dakika köpüklendirme süresi şartlarında üretilen PVC/mika kompozit köpüklerin olduğu belirlenmiştir (Xu ve ark., 2017).

Khoshnoud ve arkadaşları (2018) PVC ve uçucu kül kullanarak PVC esaslı kompozit köpüklerin özelliklerini araştırmışlardır. Kimyasal köpük ajanı olarak azodikarbonamit ve sodyum hidrojen bikarbonat kullanılan kompozit köpüklerde 0-10-20 phr oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Sıcaklık altında mikserde karıştırılan PVC'ye 52 °C'de ısı stabilizatörü ve uçucu kül, 58 °C'de işlem yardımcıları, 66 °C sıcaklıkta ise

yağlayıcı ve köpük ajanları ilave edilmiştir. Karışım çift vidalı ekstruderden geçirilmiş ve öğütülerek tekrar üretim planına (0-20-40 phr) dahil edilmiştir. Üretilen PVC esaslı kompozit köpüklerin yoğunluk, çekme ve darbe direnci, DMA ve SEM özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kompozit köpüklerde uçucu kül miktarı oranı arttıkça erime viskozitesi düşmüş ve buna bağlı olarak işlenebilirlik iyileşmiştir. Uçucu külün sert yapısından dolayı darbe direnci düşüş göstermiştir. Öğütülüp tekrar ilave edilen karışım miktarı arttıkça maksimum ve minimum tork ve çekme direnci değerleri artmıştır. Hem uçucu kül miktarı hem de öğütülüp tekrar ilave edilen karışım miktarı artması köpük yoğunluğu ve sertliği artırmıştır. DMA analizi ile bu sonuçlar doğrulanmıştır. SEM görüntüleri homojen köpük yapısının 40 phr öğütülüp tekrar ilave edilen karışım içeriğinde elde edildiğini göstermiştir (Khoshnoud ve ark., 2018).

Roman (2018) çalışmasında PVC polimerine 20 phr oranında mısır koçanı unu ilave ederek azodikarbonamit kimyasal köpük ajanı yardımı ile PVC kompozit köpükler üretmiştir. Kompozit köpüklerin üretiminde malzemeler ilk önce 110 °C sıcaklıkta yüksek devirli mikserde karıştırılmış daha sonra bu karışım çift vidalı ekstruder makinasından geçirilmiş ve PVC kompozit köpükler elde edilmiştir. Üretilen PVC kompozit köpüklerin çekme özellikleri, sertlik, termal iletkenlik değeri, SEM, DMA ve DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçları incelendiğinde PVC kompozit köpüklerin üretiminde karışımın homojen olmadığı tespit edilmiştir. Kompozit köpüklerin çekme direnci ve sertlik değerleri artış gösterirken termal iletkenlik değerleri değişmemiştir. Köpüklerin morfolojik özellikleri incelendiğinde hücrelerin şekil ve boyutunun köpük malzemenin yoğunluğuna ve dolgu maddesinin boyutuna bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Roman, 2018).

Zhang ve arkadaşları (2018) çalışmalarında PVC kompozit köpüklerde çapraz bağ için poliizosiyanat ve metil tetrahidroftalik anhidrit, kimyasal köpük ajanı olarak da azodiizobütrilonitril ve azodikarbonamit kullanmışlardır. Kompozit köpüklerde atıklardan elde edilen inorganik dolgu maddesi olarak kalsiyum sülfat lifleri organik dolgu maddesi olarak da farklı oranlarda termoplastik propenoik asit boya cürufu kullanmışlardır. Kompozitlerde köpüklendirme işlemi mikro hücre yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit köpüklerde FTIR, X-Ray, TGA, DSC, SEM ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre kompozit köpüklerde organik dolgu maddesi ilavesi yoğunluğu artırmış, küçük ve homojen hücreler

elde edilmiştir. bunun yanı sıra organik dolgu maddesi kompozit köpüklerin termal stabilitesini ve spesifik basma mukavemetini de artırmıştır (Zhang ve ark., 2018).

Faraji ve Aydisheh (2019) yaptıkları çalışmada PVC/çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNTs)/Polianilin (PANI) kompozit filmleri azodikarbonamit kimyasal köpük ajanı kullanarak köpüklenmişlerdir. Üretilen kompozit film köpüklerin hücre yapısı ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Esnek kompozit film köpükler, daha hızlı iyon difüzyonuna sebep olan ve geniş bir spesifik yüzey alanına sahip 3D gözenekli ağ nano yapısı ortaya çıkarmıştır. PVC/MWCNTs/PANI film köpükler, yüksek bir özgül kapasitans ve 2000 döngüden sonra % 89'luk bir kapasite tutma göstermiş, bu da PVC/MWCNTs/PANI filmlerinkinden daha yüksektir. Ayrıca, PVA/H₂SO₄ jel elektroliti ile ayrılmış iki gözenekli PVC/MWCNTs/PANI filmi kullanılarak simetrik bir kapasitör cihazı imal edilmiş ve elektrokimyasal performansı detaylı olarak incelenmiştir. Yeni nesil enerji depolama cihazlarında kullanılmak amacıyla yüksek esnekliğe ve elektrokimyasal performansa sahip ince ve hafif filmler hazırlamak için uygun maliyetli PVC/MWCNTs/PANI film köpükler elde edilmiştir (Faraji ve Aydisheh, 2019).

Wang ve arkadaşları (2019) çalışmalarında alev geciktirici olarak grafen oksit kullanılarak üretilen PVC kompozit köpüklerin yanma direncinin iyileştirilmesi ve mekanik özelliklerin korunmasını amaçlamışlardır. Nano grafen oksit/ α -zirkonyum fosfat (GOZP) bir aşamalı in-situ tekniği ile sentezlenmiş ve XRD, SEM, TEM ve FTIR analizleri ile doğrulanmıştır. Kompozit köpüklerin üretilmesinde köpük ajanı olarak azodiizobütrilonitril ve azodikarbonamit kullanılmıştır. Kompozit köpükler pres kalıplama metodu ile yarı köpüklü örnekler haline getirildikten sonra kaynatma ya da buharlama işlemine tabi tutularak üretilmiştir. Elde edilen örneklerle yoğunluk, basma ve eğilme testi, TGA, LOI, dikey ve yatay yanma testi, konik kalorimetre testi uygulanmıştır. En iyi sonuçlar %3 phr GOZP içeren PVC köpüklerde elde edilmiştir. %3 phr GOZP içeren PVC köpüklerde saf PVC köpüklere göre basma ve eğilme dirençleri artış göstermiştir. Isı salınım oranı, toplam ısı salınımı ve toplam duman üretimi %3 GOZP içeren PVC köpüklerde saf köpüklere göre azalmıştır. %3 GOZP içeren PVC köpüklerin termal sabitliğinin saf köpüklere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Wang ve ark., 2019).

Lu ve arkadaşları (2022) nitril bütadien kauçuk/PVC kompozit köpüklerin basma özellikleri ve enerji absorblama karakteristikleri üzerine köpük ajanı oranının etkisini araştırmışlardır. Çalışmada PVC; nitril bütadien kauçuk (NBR), di oktil tereftalat (DOTP), stearik asit ve kalsiyum karbonat gibi katkı malzemeleri ile vulkanizasyon metodu

kullanılarak hazırlanmış ve 160 °C’de 15 dk sıcak preste kalıplanmıştır. Üretilen NBR/PVC kompozit köpüklerin köpüklendirme işleminde kimyasal köpük ajanı olarak 0-15-20-25-30 phr oranlarında azodikarbonamit kullanılmıştır. Kompozit köpüklerin yoğunluk, hücre yapısı, köpük yoğunluğu, basma özellikleri, enerji absorblama kapasitesi ve sertlik değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde NBR/PVC kompozit köpüklerde azodikarbonamit miktarı arttıkça yoğunluk değerleri düşmüş ancak hücre boyutu aynı kalmıştır. Ayrıca sertlik ve basma direnci değerleri de azalmıştır. Yüksek azodikarbonamit içeriğinde kompozit köpükler daha yüksek enerji absorblama özellikleri sergilemişlerdir. NBR/PVC kompozit köpüklerin hücre dağılımı azodikarbonamit miktarı arttıkça iyileşmiştir (Lu ve ark., 2022).

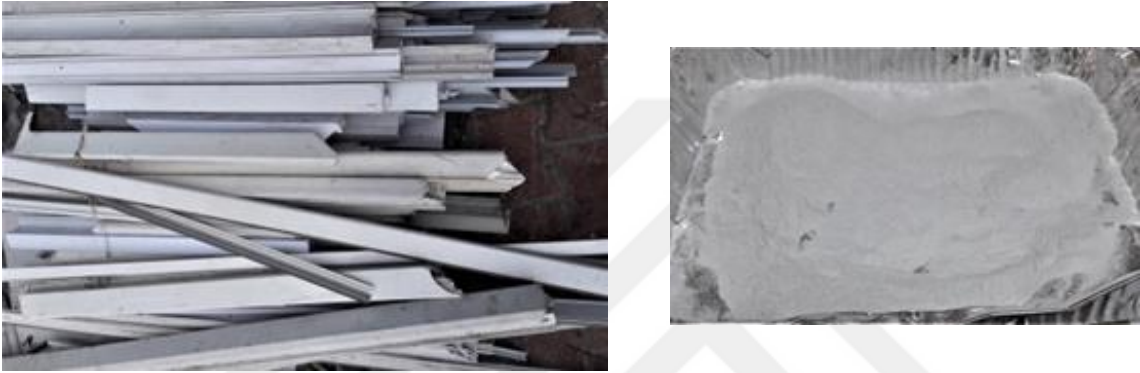
Lai ve arkadaşları (2023) çalışmalarında akrilonitril bütadien kauçuk (NBR)/PVC kompozit köpük yalıtım malzemesi atıklarını geri dönüştürerek NBR ile karıştırmış ve farklı sıcaklıklarda vulkanize metodu ile malzemeler üretmişlerdir. Atık NBR/PVC kompozit köpüklerin değerlendirilme oranının araştırılması amacıyla yapılan çalışmada kompozit malzemeler içerisine atık NBR/PVC kompozit köpükler % 5-10-20-30-40 oranlarında ilave edilmiştir. Sıcak pres yardımı ile üretilen kompozitlerin içerisine çinko oksit, stearik asit, karbon siyahı, di oktil ftalat (DOP), anti-yaşlanma ajan gibi katkı maddeleri eklenmiştir. Üretilen kompozitlerin çekme direnci, FTIR, NMR, TGA, DMA ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde geri dönüştürülmüş kompozitlerin daha iyi mekanik özellikler sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kompozit malzemelerin içerisine ilave edilebilecek optimum atık NBR/PVC kompozit köpük oranı % 20, uygulanabilecek en yüksek oran ise % 40’dır (Lai ve ark., 2023).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Termoplastik polimer

Termoplastik kompozit köpüklerin üretiminde matris elemanı olarak kullanılan kapı ve pencere profili endüstriyel atığı polivinil klorür (PVC) (k-65) Akmar Plastik Ltd. Şti. (Kahramanmaraş)’den öğütülmüş halde temin edilmiştir. Şekil 3.1’de PVC kapı ve pencere profil atıkları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. PVC kapı ve pencere profil atıkları

3.1.2. Lignoselülozik dolgu malzemeleri

Kompozit köpüklerin üretiminde lignoselülozik dolgu malzemesi olarak kavak odunu ve çam ağaç kabuğu kullanılmıştır. Kavak odunları Kahramanmaraş ilinde bulunan Akyol kereste atölyesinin testere atığı olarak, çam ağaç kabukları ise Kahramanmaraş odun ambarından temin edilmiştir (Şekil 3.2).



Kavak testere atığı



Çam ağac kabukları

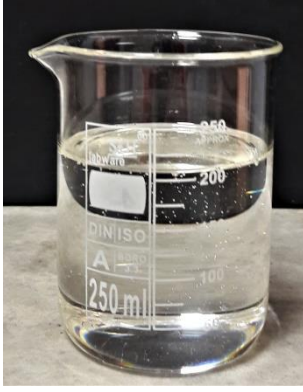
Şekil 3.2. Lignoselülozik dolgu malzemeleri

3.1.3. Katkı maddeleri

Atık PVC köpüklerin üretiminde kullanılan katkı maddeleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir. PVC'nin işlenmesinde plastikleştirici olarak kullanılan dioktil ftalat (DOP) (Berrak, sıvı formda, özgül ağırlığı 0,980-0,984 kg/lt, molekül ağırlığı 390,56 g/mol, kaynama noktası 203 °C, donma noktası -45 °C) Monokem Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. (Gaziantep)'den satın alma yoluyla temin edilmiştir.

Isı stabilizatörü olarak Baerlocher Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. (Manisa) firmasından temin edilen MC 92433 PLK ticari kodlu Ca/Zn stabilizatör kullanılmıştır.

Kimyasal köpük ajanları Tramaco şirketinden temin edilmiştir. Ekzotermik kimyasal köpük ajanı Tracel DB 170 Fein ticari kodlu azodikarbonamit (sarı toz formunda, yaklaşık 170 °C bozunma sıcaklığına sahip), endotermik kimyasal köpük ajanı ise Tracel Nc 155 ticari kodlu karbonat ve sitrik asit türevleri karışımıdır (beyaz toz formunda, 135-220 °C bozunma sıcaklık aralığına sahip).



DOP



Ca/Zn stabilizatör



Karbonat ve sitrik
asit karışımı



Azodikarbonamit

Şekil 3.3. Atık PVC kompozit köpük üretiminde kullanılan katkı maddeleri

3.2. Metot

3.2.1. Hammaddelerin TGA ve DSC analizleri

Kompozit köpük üretiminden önce üretim şartlarının belirlenmesi amacı ile kullanılan malzemelerin TGA ve DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. TGA analizi SEIKO SII TG/DTA 6300 marka cihaz kullanılarak 20-600 °C sıcaklıkları arasında 10 °C/dk sıcaklık artışı ve 20 mL/dk azot akış hızı şartlarında, DSC analizleri ise PerkinElmer DSC 8000 marka cihaz ile 20-400 °C sıcaklıkları arasında 10 °C/dk sıcaklık artışı ve 20 mL/dk azot akış hızı ile ısıtma-soğutma-tekrar ısıtma aşamalarından oluşmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Lignoselülozik dolgu malzemelerinin hazırlanması

Ağaç kabukları öğütme makinesi kullanılarak un haline getirilirken, un halinde temin edilen kavak testere atıkları ise boyut küçültme amaçlı öğütme makinesinden geçirilmiştir. Öğütülen lignoselülozik malzemeler sarsak elek kullanılarak boyutsal olarak sınıflandırılmıştır. 20-40-60-80-100 ve 200 mesh boyutlarına ayrılan lignoselülozik dolgu malzemelerinden kompozit köpük üretiminde 40 mesh (0,42 mm)'in üzerinde kalan ve 100 mesh (0,149 mm)'in altında kalan malzemeler olmak üzere iki boyut kullanılmıştır.

3.2.4. Atık PVC kompozit köpüklerin üretilmesi

Atık PVC kompozit köpüklerin üretiminde rutubetin uzaklaştırılması amacıyla atık PVC 80 °C, lignoselülozik dolgu malzemeleri ise 103±2 °C sıcaklıkta 24 saat kurutulmuştur. Atık PVC köpük üretiminde etüvden alınan atık PVC'ler soğumadan

Çizelge 3.1’de verilen üretim planındaki karışım oranlarına göre DOP, Ca/Zn ısı stabilizatörü ve köpük ajanları ile 1400W motor gücü ve 5 litre kapasiteye sahip bir karıştırıcıda 5 dk boyunca karıştırılarak homojen bir karışım haline getirilmiştir (Şekil 3.4). Elde edilen karışım metal plaka ve çerçeve içerisine serilerek levha taslağı hazırlanmıştır. Hazırlanan levha taslağı 200 °C sıcaklık, 100 bar basınç ve 20 dk presleme süresi koşullarında pres kalıplama yöntemi ile kalıplanmıştır. Köpüklendirme işleminde 10 dk sıcaklık ve basınç altında PVC’nin erimesi, kimyasal köpük ajanının bozunarak gaz açığa çıkarması ve PVC içerisinde çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra hücre çekirdeklenmesi için basınç farkı oluşturulmuştur. Basınç farkı oluşturulduktan sonra 10 dk hücre büyümesi için bekletilen levha daha sonra 20 dk soğutulmuştur. Her bir grup için 3 adet levha üretilmiştir.

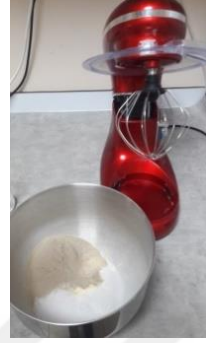
Çizelge 3.1. Atık PVC köpük üretim planı

Örnek kodu	Atık PVC (phr)	DOP mikt. (phr)	Köpük ajanı tipi	Köpük ajanı mikt.(phr)	Ca/Zn stab. mikt.(phr)
D20	100	20	-	0	1
D20EN0,125	100	20	Endotermik	0,125	1
D20EN0,25	100	20	Endotermik	0,25	1
D20EN0,5	100	20	Endotermik	0,5	1
D20EN0,75	100	20	Endotermik	0,75	1
D20EK0,125	100	20	Ekzotermik	0,125	1
D20EK0,25	100	20	Ekzotermik	0,25	1
D20EK0,5	100	20	Ekzotermik	0,5	1
D20EK0,75	100	20	Ekzotermik	0,75	1
D30	100	30	-	0	1
D30EN0,125	100	30	Endotermik	0,125	1
D30EN0,25	100	30	Endotermik	0,25	1
D30EN0,5	100	30	Endotermik	0,5	1
D30EN0,75	100	30	Endotermik	0,75	1
D30EK0,125	100	30	Ekzotermik	0,125	1
D30EK0,25	100	30	Ekzotermik	0,25	1
D30EK0,5	100	30	Ekzotermik	0,5	1
D30EK0,75	100	30	Ekzotermik	0,75	1
D40	100	40	-	0	1
D40EN0,125	100	40	Endotermik	0,125	1
D40EN0,25	100	40	Endotermik	0,25	1
D40EN0,5	100	40	Endotermik	0,5	1
D40EN0,75	100	40	Endotermik	0,75	1
D40EK0,125	100	40	Ekzotermik	0,125	1
D40EK0,25	100	40	Ekzotermik	0,25	1
D40EK0,5	100	40	Ekzotermik	0,5	1
D40EK0,75	100	40	Ekzotermik	0,75	1

Atık PVC köpüklerin üretiminde 0 ve 10 phr DOP kullanımı denenmiş ancak atık PVC'lerin yüksek kalsit içeriğinden dolayı köpüklendirme sağlanamamıştır. Daha sonra 15 phr DOP içeriği denenmiş bu içerikte de başarılı olarak köpüklendirme gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple üretim dizaynı köpüklendirmenin sağlanabildiği minimum DOP içeriği (20 phr) ile hazırlanmıştır.



Hammaddelerin karışım miktarına göre tartılarak hazırlanması



Malzemelerin karıştırılması



Karışıma DOP ilave edilmesi



Karışım

Şekil 3.4. Atık PVC kompozit köpüklerin karışım aşamaları

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin üretim aşamaları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Levha taslağı oluşturulması



Pres kalıplama



Basınç farkı oluşturulması



Atık PVC köpük

şekil 3.5. Atık PVC kompozit köpüklerin üretim aşamaları

Atık PVC kompozit köpüklerin üretiminde ise aynı üretim aşamalarında karışım içerisinde Çizelge 3.2’de verilen oranlar kullanılarak lignoselülozik dolgu malzemeleri ilave edilmiş ve üretim gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Atık PVC kompozit köpüklerin üretim planı

Örnek kodu	Optimum köpük içeriğı	Dolgu malz. türü	Dolgu malz. boyutu (mesh)	Dolgu malz. mikt. (phr)
KÖ-K40-5	D30EK0,25*	Kavak	40	5
KÖ-K40-10	D30EK0,25	Kavak	40	10
KÖ-K40-15	D30EK0,25	Kavak	40	15
KÖ-K40-20	D30EK0,25	Kavak	40	20
KÖ-K<100-5	D30EK0,25	Kavak	<100	5
KÖ-K<100-10	D30EK0,25	Kavak	<100	10
KÖ-K<100-15	D30EK0,25	Kavak	<100	15
KÖ-K<100-20	D30EK0,25	Kavak	<100	20
KÖ-AK40-5	D30EK0,25	Ağaç K.	40	5
KÖ-AK40-10	D30EK0,25	Ağaç K.	40	10
KÖ-AK40-15	D30EK0,25	Ağaç K.	40	15
KÖ-AK40-20	D30EK0,25	Ağaç K.	40	20
KÖ-AK<100-5	D30EK0,25	Ağaç K.	<100	5
KÖ-AK<100-10	D30EK0,25	Ağaç K.	<100	10
KÖ-AK<100-15	D30EK0,25	Ağaç K.	<100	15
KÖ-AK<100-20	D30EK0,25	Ağaç K.	<100	20

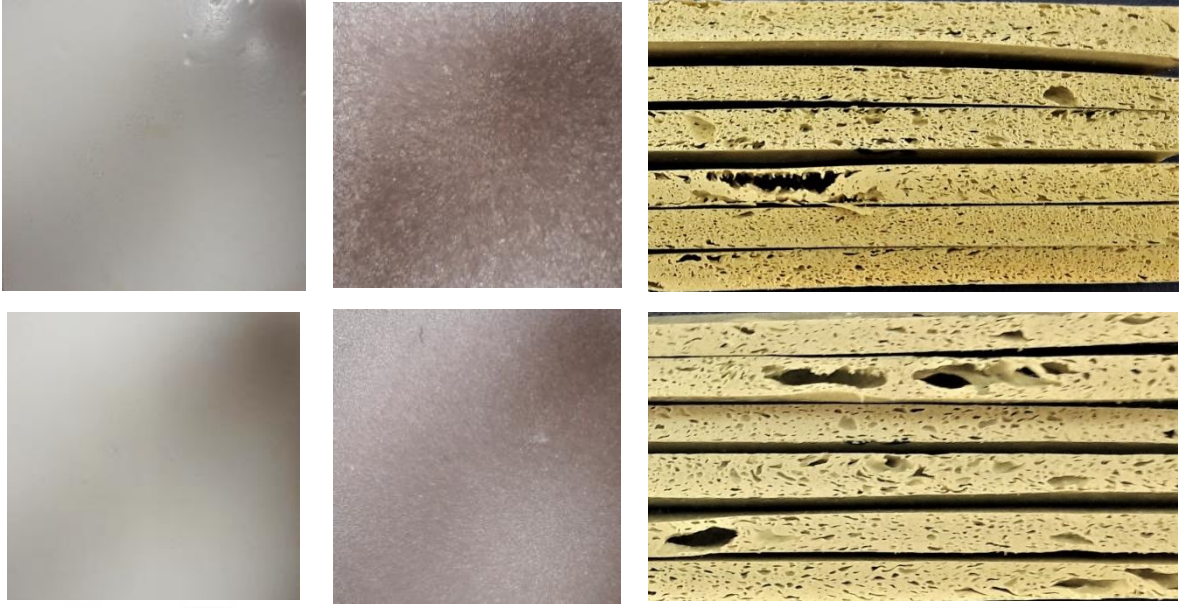
*: Optimum atık PVC köpük içeriğinin örnek kodu

Atık PVC kompozit köpüklerin özelliklerinin kıyaslanması amacı ile aynı içerik oranına sahip atık PVC kompozitler üretilmiştir (Çizelge 3.3). Atık PVC kompozitlerin üretim şartları köpüklerle aynı olmak üzere 200 °C sıcaklık, 100 bar basınç ve 20 dk presleme süresi (10 dk ön ısıtma ve 10 dk basınç altında ısıtma) ile pres kalıplama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3. Atık PVC kompozit üretim planı

Örnek kodu	PVC (phr)	DOP (phr)	Ca/Zn stab. (phr)	Dolgu malz. türü	Dolgu malz. boyutu (mesh)	Dolgu malz. mikt. (phr)
K-K40-5	100	30	1	Kavak	40	5
K-K40-10	100	30	1	Kavak	40	10
K-K40-15	100	30	1	Kavak	40	15
K-K40-20	100	30	1	Kavak	40	20
K-K<100-5	100	30	1	Kavak	<100	5
K-K<100-10	100	30	1	Kavak	<100	10
K-K<100-15	100	30	1	Kavak	<100	15
K-K<100-20	100	30	1	Kavak	<100	20
K-AK40-5	100	30	1	Ağaç K.	40	5
K-AK40-10	100	30	1	Ağaç K.	40	10
K-AK40-15	100	30	1	Ağaç K.	40	15
K-AK40-20	100	30	1	Ağaç K.	40	20
K-AK<100-5	100	30	1	Ağaç K.	<100	5
K-AK<100-10	100	30	1	Ağaç K.	<100	10
K-AK<100-15	100	30	1	Ağaç K.	<100	15
K-AK<100-20	100	30	1	Ağaç K.	<100	20

Üretilen atık PVC kompozit köpükler (Şekil 3.6), test örneklerinin tüm levhayı temsil etmesi dikkate alınan ve ASTM standartlarına uygun olan bir kesim planı hazırlanarak daire testere yardımı ile test örnekleri boyutlarında kesilmiştir. Testler yapılmadan önce test örnekleri ASTM D618 standardına uygun bir şekilde iklimlendirme kabiniinde koşullandırılmıştır.



Şekil 3.6. Üretilen atık PVC esaslı kompozit ve kompozit köpük malzemeler

3.2.5. Atık PVC kompozit köpüklerin özelliklerinin belirlenmesi

3.2.5.1. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Yoğunluk

Üretilen atık PVC kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri Şekil 3.7’de gösterilen Precisa marka yoğunluk belirleme cihazı kullanılarak ASTM D792 standardına uygun bir şekilde belirlenmiştir. İlk önce havadaki ağırlığı alınan 13×25 mm boyutlarına sahip örneklerin daha sonra oda sıcaklığındaki saf su içerisinde asılı haldeyken ağırlıkları alınmış ve yoğunluk değerleri (3.1) belirlenmiştir. Her bir grup için 10 adet örneğin yoğunluk değeri belirlenmiştir.

$$d = d_s \times \frac{m_h}{m_s}$$

Burada; (3.1)

d: Yoğunluk (g/cm³)

d_s: Suyun yoğunluğu (g/cm³)

m_h: Test örneğinin havadaki ağırlığı (g)

m_s: Test örneğinin suda asılı haldeki ağırlığı (g)



Şekil 3.7. Yoğunluk belirleme cihazı

Su alma ve kalınlık artımı

Atık PVC kompozit köpüklerin su alma ve kalınlık artımı değerleri ASTM D570 standardına göre 25×75 mm boyutuna sahip ve her bir grup için 3 adet örnek olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 3.8). Kuru halde mikrometre ve 0,01 g duyarlılıktaki hassas terazi ile kalınlık ve ağırlıkları alınan test örnekleri oda sıcaklığındaki saf su içerisine birbirine değmeyecek şekilde batırılmıştır. Suya batırılan örneklerin 2, 24, 48 ve 72 saat sonra kalınlık ve ağırlıkları alınmıştır. Daha sonra bir hafta, iki hafta ve en son ayda bir aralıklarla ölçümler alınmaya devam edilmiştir. Kompozit köpüklerin su alma (3.2) ve kalınlık artımı (3.3) değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$S.A. = \frac{A_s - A_i}{A_i} \times 100$$

Burada; (3.2)

S.A: Su alma miktarı (%)

A_i : Test örneğinin ilk ağırlığı (suya batırılmadan önce) (mm)

A_s : Test örneğinin son ağırlığı (suya batırıldıktan sonra) (mm)

$$K.A. = \frac{K_s - K_i}{K_i} \times 100$$

Burada; (3.3)

K.A: Kalınlık artımı miktarı (%)

K_i : Test örneğinin ilk kalınlığı (suya batırılmadan önce) (mm)

K_s : Test örneğinin son kalınlığı (suya batırıldıktan sonra) (mm)

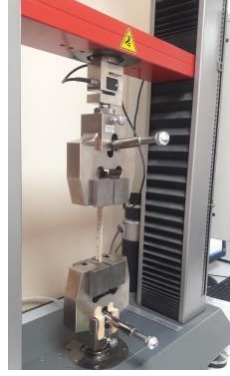


Şekil 3.8. Su alma ve kalınlık artımı değerinin belirlenmesi

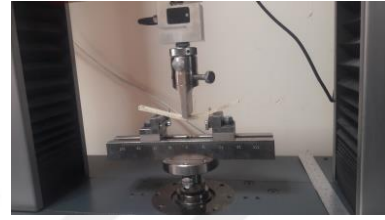
3.2.5.2. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Atık PVC kompozit köpüklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme özellikleri ASTM D638, eğilme özellikleri ASTM D790 ve darbe özellikleri ASTM D256 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çekme ve eğilme direnci testleri 13x165 mm boyutlarında her bir grup için 10'ar adet örnek olacak şekilde Şekil 3.9'da verilen Zwick/Roell Z010 Universal test makinesinde belirlenmiştir. Çekme direnci testi 5mm/dk test hızında, eğilme direnci testi ise 2mm/dk test hızı ve iki mesnet arası açıklık 80 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme direnci testinde çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü ve kopmada uzama değerleri, eğilme direncinde ise eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri incelenmiştir.



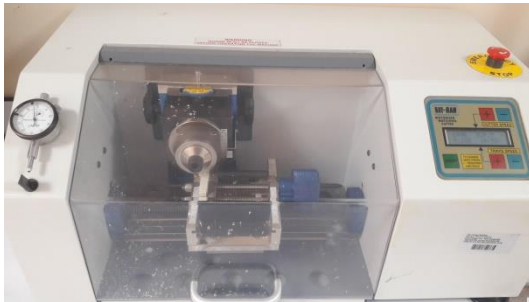
Çekme testi



Eğilme testi

Şekil 3.9. Universal test makinesi

Darbe direnci testinde her bir grup için 10 adet 13×64 mm boyutlarındaki örneklerin ilk önce Polytest RayRan çentik açma makinesinde çentikleri açılmıştır. Çentikli örneklerin darbe direnci testleri Zwick/Roell HIT 5.5P makinesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10).



Çentik açma



Darbe direnci testi

Şekil 3.10. Darbe direncinin belirlenmesi

3.2.5.3. Isı iletkenlik analizi

Atık PVC kompozit köpüklerin ısı iletkenlik özellikleri 230×230 mm boyutunda levhalar kullanılarak 20-40 °C sıcaklıkları arasında Şekil 3.11’de verilen LaserComp marka ısı iletkenlik cihazı ile belirlenmiştir. Örneklerin ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesinde ASTM C518 standardı kullanılmıştır. Isı iletkenlik katsayısı (λ) değeri belirlenen örneklerin ısıl geçirgenlik direnci değerleri denklem aşağıda verilen denklem (3.4) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Burada;

(3.4)

R: Isıl geçirgenlik direnci (m^2K/W)

d: Kalınlık (m)

λ : Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)



Şekil 3.11. Isı iletkenlik test cihazı

3.2.5.4. Hücre yapısı analizi

Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapılarının incelenmesi amacıyla Canon Macro EF 100mm 1:2,8L IS USM marka fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Fotoğraf makinesi ile alınan görüntüler Picsart programı kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Köpüklerin hücre yapısı analizi İmage Pro® v11 programı ile gerçekleştirilmiş ve denklem 3.5 ve 3.6’da verilen denklemler yardımı ile hücre yoğunluğu ve boşluk oranı hesaplanmıştır.

$$\rho = \left(\frac{n}{A} \times M\right)^{3/2}$$

Burada; (3.5)

ρ : Hücre yoğunluğu (Hücre/cm²)

n: Hücre sayısı

A: Görüntü alanı (cm²)

M: Büyütme katsayısı

$$V_F = \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho}\right) \times 100$$

Burada; (3.6)

V_F : Boşluk oranı (%)

ρ_F : Köpüklendirilmiş örneğin yoğunluğu (g/cm³)

ρ : Köpüklendirilmemiş örneğin yoğunluğu (g/cm³)

3.2.5.6. İstatistik analizi

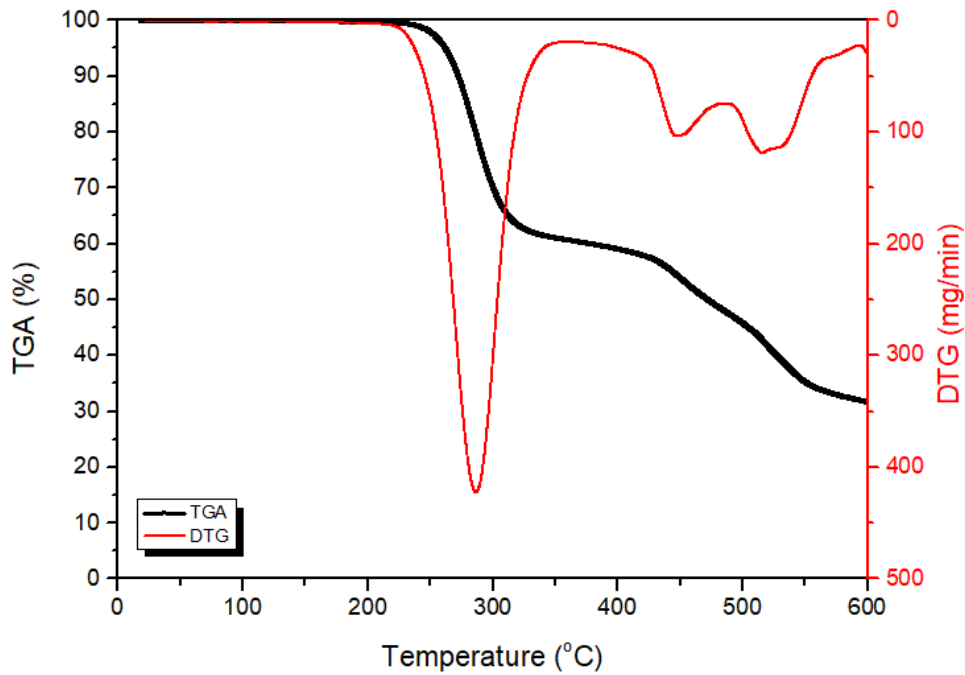
Elde edilen test sonuçları Design Expert®Version 7.0.3. istatistik programı ile analiz edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kompozit Köpük Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Termogravimetrik Analizi (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi

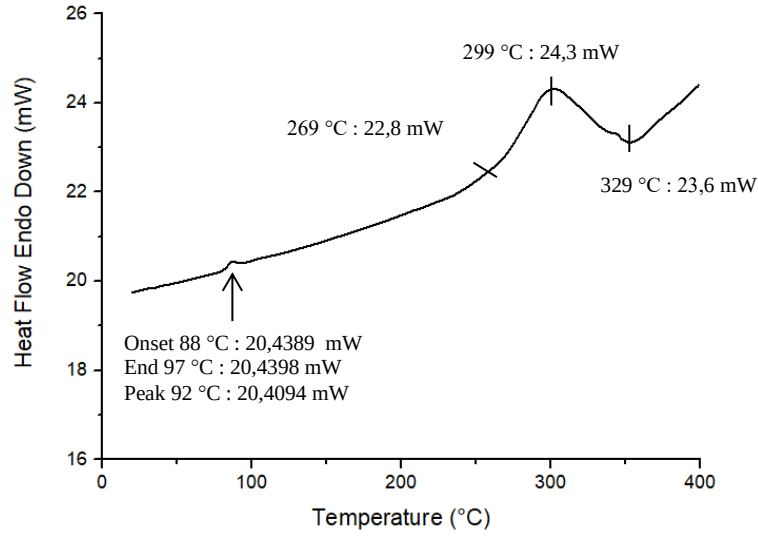
4.1.1. Atık PVC'nin TGA ve DSC analizleri

Çalışma kapsamında polimer matris olarak kullanılan atık PVC'nin TGA ve DTG grafikleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. TGA ve DTG grafikleri incelendiğinde, atık PVC'nin 225 °C sıcaklıkta bozunmaya başladığı ve en fazla bozunmanın 286 °C'de gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkıldığında ise kalan madde miktarının yaklaşık % 40 oranında olduğu görülmüştür. Bu atık PVC içerisindeki kalan inorganik malzeme özellikle kalsit oranını göstermektedir.



Şekil 4.1. Atık PVC'nin TGA ve DTG grafiği

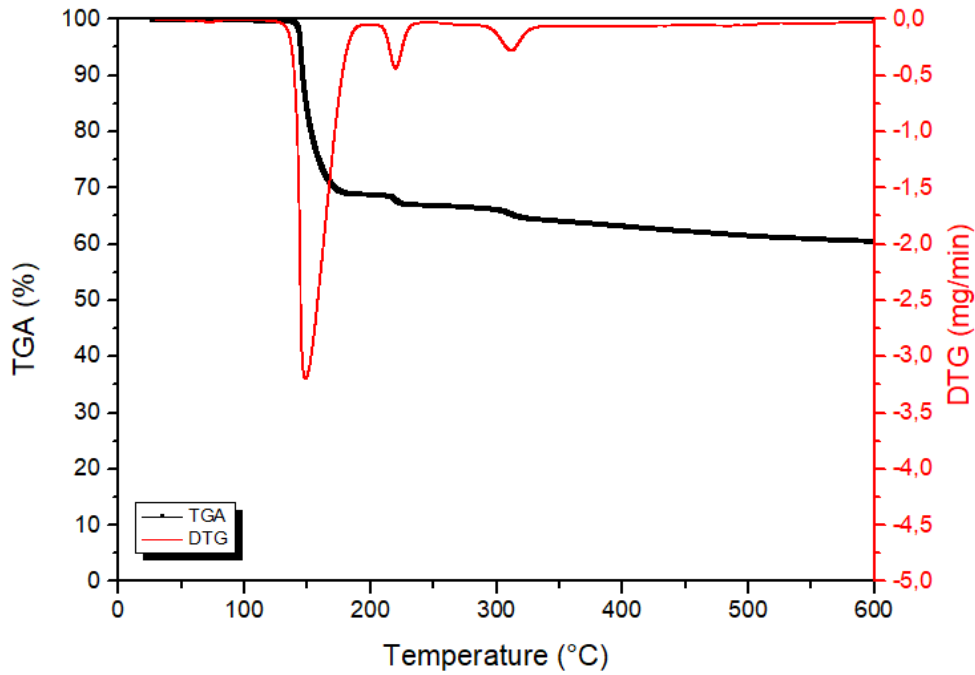
Atık PVC'nin DSC grafiği incelendiğinde yaklaşık 100 °C sıcaklıkta oluşan küçük pik malzeme içerisinde rutubet olduğunu göstermekte, 270-330 °C arasında meydana gelen pik ise atık PVC'nin faz değiştirme sıcaklık aralığını temsil etmektedir. PVC amorf bir polimerdir. Bu sebeple belirli bir erime noktasına sahip değildir. Viskoz bir hale geçtiği erime bölgesi bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Atık PVC'nin DSC grafiği

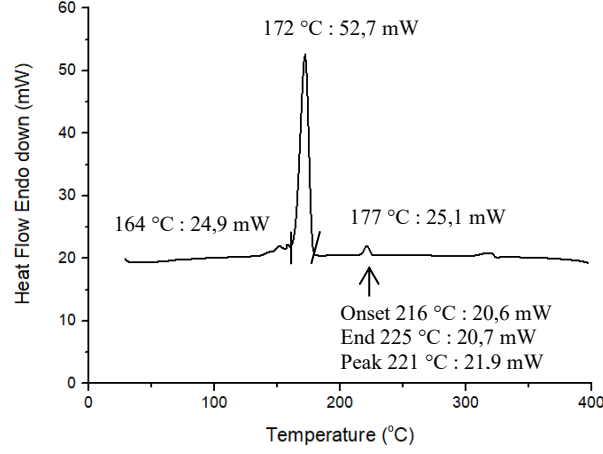
4.1.2. Köpük ajanlarının TGA ve DSC analizleri

Çalışmada atık PVC köpük ve kompozit köpük üretiminde endotermik köpük ajanı olarak karbonat ve sitrik asit türevleri karışımı, ekzotermik köpük ajanı olarak ise azodikarbonamit kullanılmıştır. Endotermik köpük ajanına ait TGA ve DTG grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Endotermik köpük ajanı sıcaklığın artmasıyla üç farklı sıcaklıkta pik vermiş, en büyük pik yani en fazla bozunma yaklaşık olarak 150 °C'de gerçekleşmiştir. Bozunma miktarının yaklaşık % 65 olduğu belirlenmiştir.



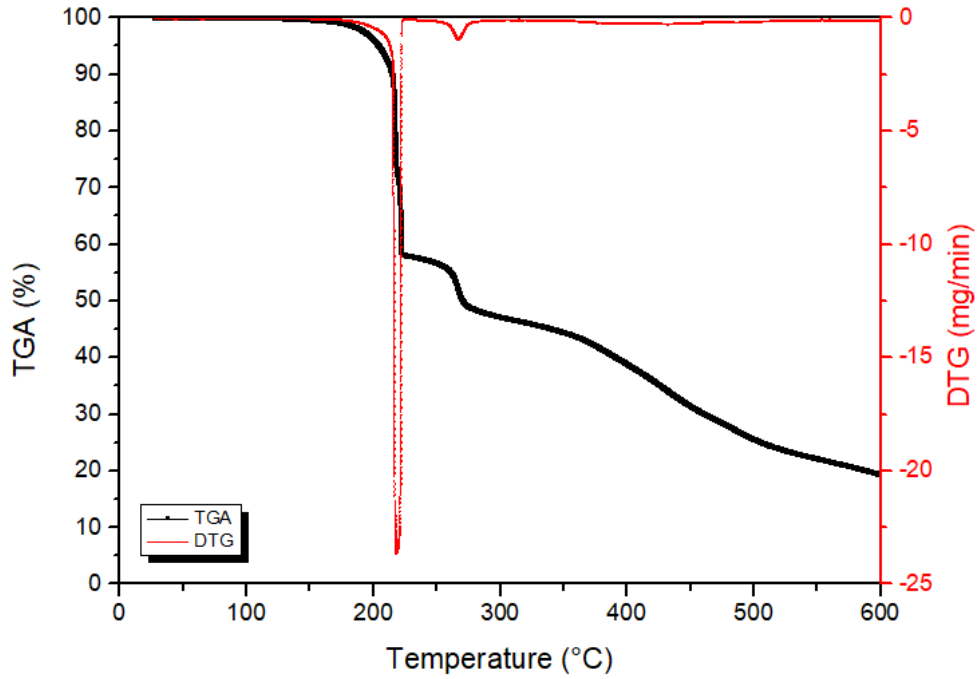
Şekil 4.3. Endotermik köpük ajanının TGA ve DTG grafiği

Endotermik kimyasal köpük ajanının DSC grafiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde endotermik köpük ajanı 164-177 °C sıcaklıkları arasında geniş bir erime sıcaklığı bölgesine sahip olup 172 °C sıcaklıkta derin bir pik vermiştir.



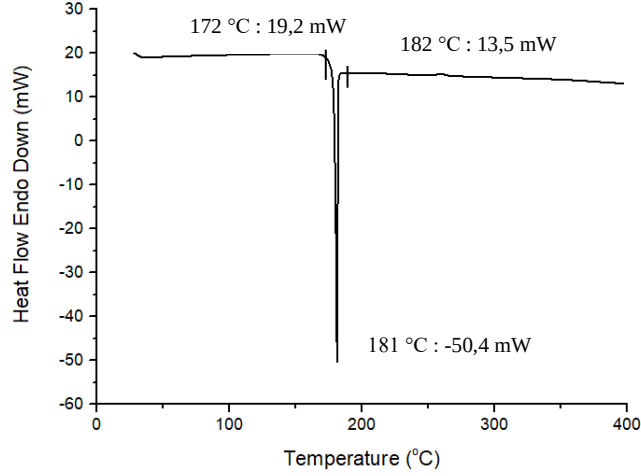
Şekil 4.4. Endotermik köpük ajanının DSC grafiği

Ekzotermik köpük ajanının TGA ve DTG grafikleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. DTG eğrisi iki farklı noktada pik vererek en fazla bozunmanın meydana geldiği piki 217 °C sıcaklıkta vermiştir. Bozunma miktarının yaklaşık olarak % 95 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5. Ekzotermik köpük ajanının TGA grafiği

Ekzotermik köpük ajanının DSC grafiği Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Ekzotermik köpük ajanı endotermik köpük ajanına göre daha dar bir erime sıcaklığı (Faz değişimi sıcaklığı) sergileyerek 179-181 °C sıcaklıkları arasında erime gösterirken 181 °C sıcaklıkta pik vermiştir.



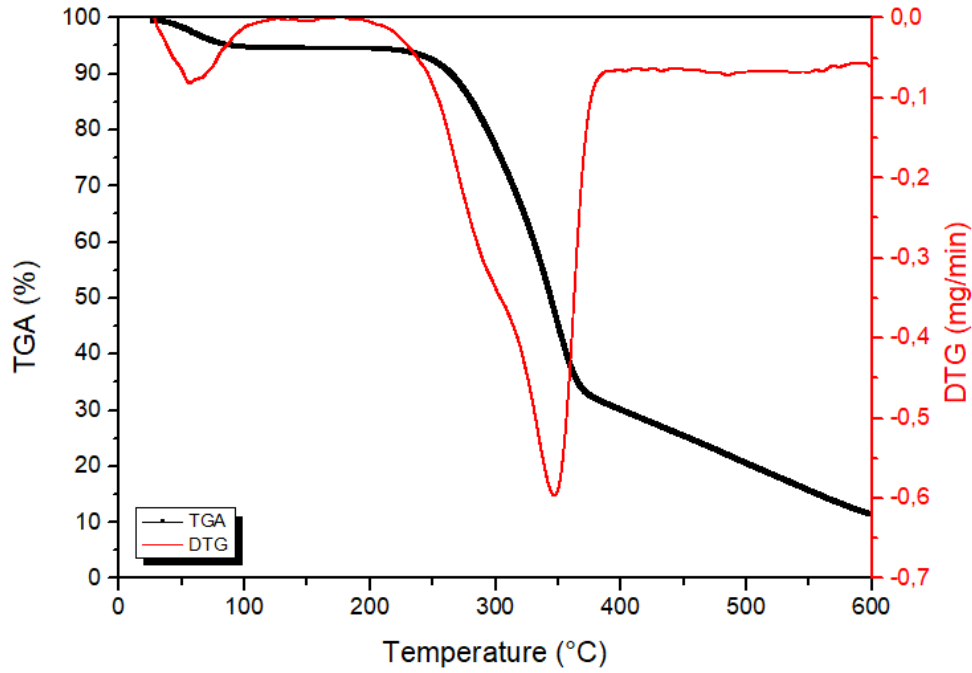
Şekil 4.6. Ekzotermik köpük ajanının DSC grafiği

4.1.3. Lignoselülozik dolgu malzemelerinin TGA analizleri

Çalışma kapsamında lignoselülozik dolgu malzemesi olarak kavak testere atıkları ve ağaç kabukları kullanılmıştır. Kullanılan lignoselülozik dolgu malzemelerinden kavak testere atığının TGA ve DTG grafikleri Şekil 4.7, ağaç kabuğunun TGA ve DTG grafikleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

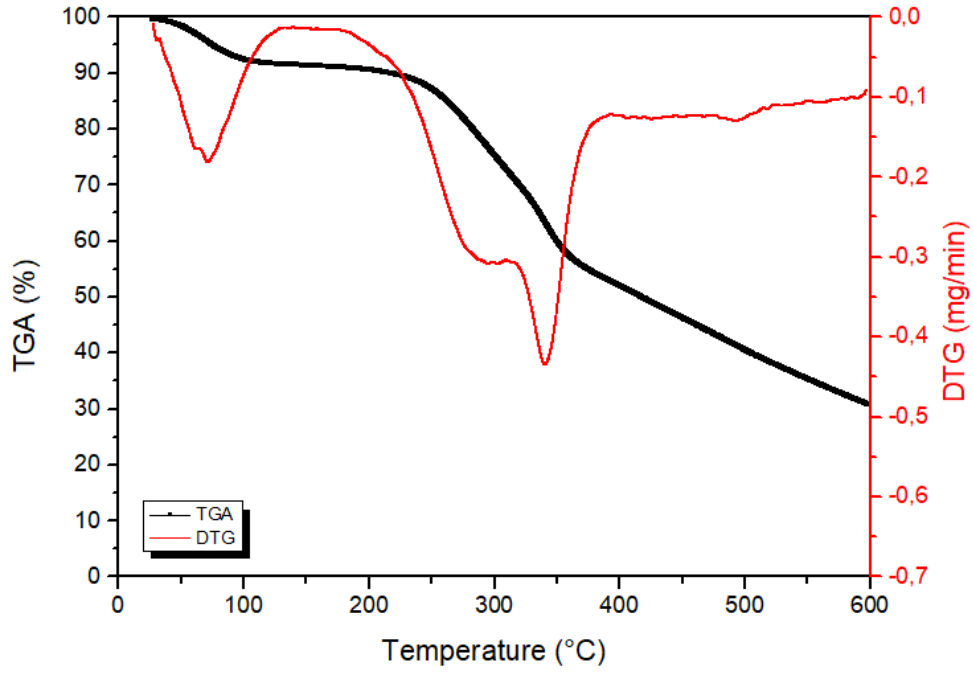
Kavak testere atıklarının TGA grafikleri incelendiğinde yaklaşık 100 °C sıcaklığında meydana gelen pik, malzeme içerisinde bulunan rutubetin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. 200 °C’nin biraz üzerinde bozunmanın başladığı ve en fazla bozunmanın yaklaşık olarak 350 °C’de gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 600 °C sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara çıkıldığında inorganik malzeme miktarını temsil eden bozunmadan kalan malzeme miktarının % 11 olduğu belirlenmiştir. Odun malzeme selüloz, hemiselüloz ve lignin olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra küçük oranlarda ekstraktif maddeler de içermektedir. Literatürde belirtildiği gibi odunda ilk bozunmaya başlayan bileşen hemiselüloz olup yaklaşık 180 °C’de bozunmaya başlamakta ve 180-350 °C sıcaklıkları arasında bozunma göstermektedir. Selülozun 250-350 °C sıcaklıkları arasında bozunma gösterdiği, ligninin ise 200 °C sıcaklıkta bozunmaya başladığı ve 700 °C

kadar bozunmaya devam ettiği bilinmektedir (Xu ve ark., 2006; Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Gašparović ve ark., 2010; Dönmez Çavdar ve ark., 2011).



Şekil 4.7. Kavak testere atığının TGA grafiği

Ağaç kabuğunun TGA ve DTG grafikleri incelendiğinde 100 °C civarında oluşan pik, malzeme içerisinde bulunan rutubetin uzaklaşmasından meydana gelmektedir. Ağaç kabuklarında bozunma 200 °C'nin biraz altında başlamış ve en fazla bozunma yaklaşık olarak 350 °C'e yakın bir sıcaklıkta gerçekleşmiştir. 600 °C sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda kalan malzeme miktarının % 30 olduğu belirlenmiştir. Ağaç kabuğu; selüloz, hemiselüloz, lignin ve ekstraktif malzemelerden (özellikle pektin ve tanen gibi) oluşmaktadır. Odunla kıyaslandığında daha düşük selüloz ve hemiselüloz (odunda % 62-74, ağaç kabuğunda % 30-48) ve daha yüksek lignin (odunda %18-30, ağaç kabuğunda % 40-55) içeriğine sahiptir. Ekstraktif madde miktarı ise oduna göre ağaç kabuğunda daha fazladır (odunda % 2-9, ağaç kabuğunda % 2-25) (Dönmez ve Dönmez, 2013; Pasztory ve ark., 2016; Vangeel ve ark., 2021).



Şekil 4.8. Ağaç kabuğunun TGA grafiği

TGA ve DSC analizlerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda atık PVC kompozit köpüklerin üretim şartları belirlenmiştir.

4.2. Atık PVC Köpüklerin Özellikleri

4.2.1. Atık PVC köpüklerin fiziksel özellikleri

Üretilen atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Atık PVC esaslı köpük malzemelerin yoğunluk değerleri $0,58-1,11 \text{ g/cm}^3$ arasında değişiklik göstermektedir. En düşük yoğunluk değeri $0,58 \text{ g/cm}^3$ değeri ile D20EK0,5 kodlu köpük grubunda, en yüksek yoğunluk ise $1,11 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değeri ile D30EN0,125 kodlu köpük grubunda belirlenmiştir. Ticari PVC köpüğün (dekota) yoğunluk değerleri ise $0,50-0,70 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir (URL-1).

Çizelge 4.1. Atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri

Örnek Kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk düşüşü (%)
D20	1,350 (0,04)*	-
D20EN0,125	1,078 (0,07)	20
D20EN0,25	1,042 (0,05)	23
D20EN0,5	0,913 (0,08)	32
D20EN0,75	0,803 (0,08)	41
D20EK0,125	0,874 (0,10)	35
D20EK0,25	0,769 (0,07)	43
D20EK0,5	0,581 (0,05)	57
D20EK0,75	0,626 (0,07)	54
D30	1,112 (0,05)	-
D30EN0,125	1,109 (0,04)	0
D30EN0,25	0,948 (0,16)	15
D30EN0,5	0,926 (0,09)	17
D30EN0,75	0,820 (0,04)	26
D30EK0,125	0,894 (0,09)	20
D30EK0,25	0,766 (0,04)	31
D30EK0,5	0,646 (0,03)	42
D30EK0,75	0,702 (0,08)	37
D40	1,149 (0,04)	-
D40EN0,125	1,096 (0,06)	5
D40EN0,25	0,916 (0,06)	20
D40EN0,5	0,826 (0,05)	28
D40EN0,75	0,906 (0,04)	21
D40EK0,125	0,880 (0,03)	23
D40EK0,25	0,744 (0,03)	35
D40EK0,5	0,709 (0,04)	38
D40EK0,75	0,773 (0,04)	33

*: Standart sapma değerleri

Üretilen atık PVC köpüklerin yoğunluk değerlerinde istatistik analiz gerçekleştirilmiş ve köpüklerin sonuçları üzerine DOP miktarı, kimyasal köpük ajanı tipi ve kimyasal köpük ajanı miktarının etkisi araştırılmıştır. İstatistik sonuçları köpüklerin yoğunluk değerleri üzerinde DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir (Çizelge 4.2).

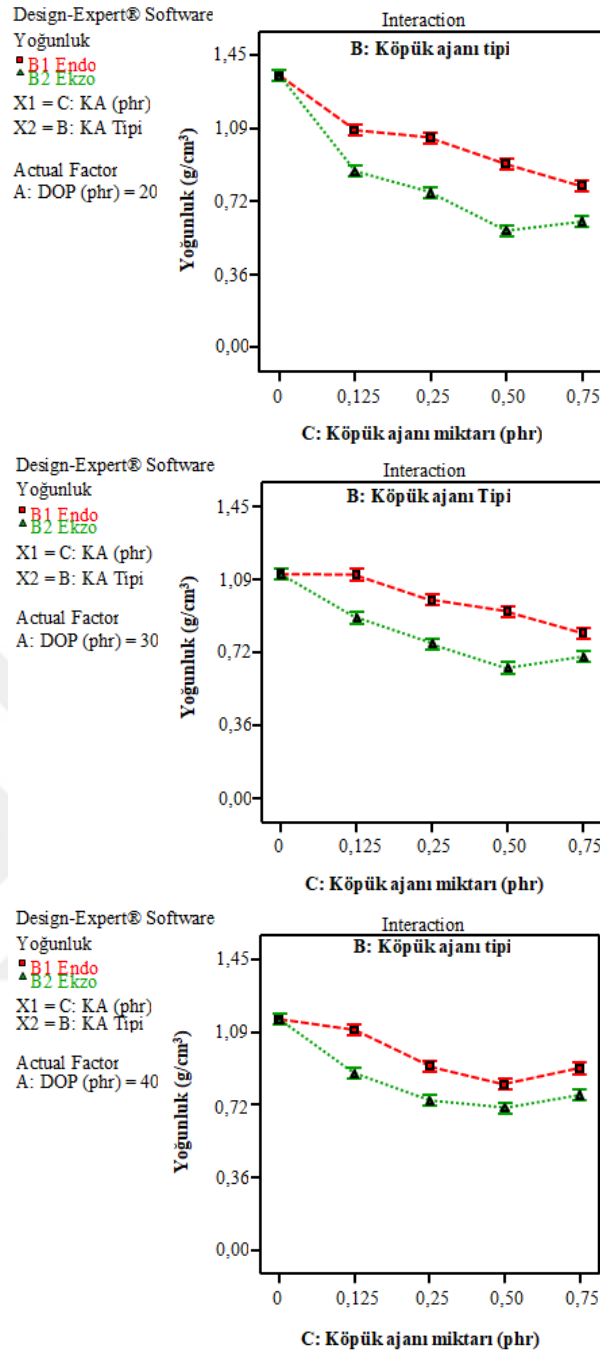
Çizelge 4.2. Atık PVC köpüklerin yoğunluk değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	11.64	29	0.40	105.08	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	0.054	2	0.027	7.03	0.0011
B-KA Tipi	1.99	1	1.99	522.21	< 0.0001
C-KA (phr)	8.00	4	2.00	523.57	< 0.0001
AB	0.060	2	0.030	7.90	0.0005
AC	0.84	8	0.10	27.42	< 0.0001
BC	0.59	4	0.15	38.33	< 0.0001
ABC	0.10	8	0.013	3.31	0.0013
Hata	1.03	269	3.820E-003		
Toplam	12.67	298			

KA : Köpük ajanı

Atık PVC köpüklerin yoğunluk grafikleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Grafiklerde x eksenini kimyasal köpük ajanı miktarını gösterirken y eksenini yoğunluk değerlerini göstermektedir. Yeşil renk ve üçgen işaret ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükleri temsil ederken, kırmızı renk ve kare işaret endotermik köpük ajanı ile üretilen köpükleri temsil etmektedir. Grafikler incelendiğinde; atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri kontrol örneğine göre yani köpüklendirilmemiş PVC'ye göre azalmış ve köpük ajanı miktarının artmasıyla azalmaya devam etmiştir. 0,75 phr kimyasal köpük ajanı içeriğinde ise köpüklerin yoğunluk değerlerinde genel olarak artış belirlenmiştir. Köpüklendirme işlemi esnasında yoğunluk düşüşü, çekirdeklenme sayısı ve hücre büyümesine bağlıdır. Ne kadar çok hücre çekirdeklenmesi ve hücre büyümesi meydana gelirse o kadar çok yoğunluk düşüşü elde edilmektedir (Aydemir, 2012). Genel olarak daha küçük hücre boyutu ve daha yüksek hücre duvar kalınlığı gösteren polimer köpükler daha yüksek yoğunluğa sahiptir (Luong ve ark., 2013). Köpük malzemelerde köpük ajanı miktarının artması ile yoğunluk düşmektedir. Ancak yüksek köpük ajanı oranlarında ise yoğunluk tekrar artış göstermektedir. Bu durum eriyik haldeki polimerin gaz tutma kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca fazla gaz miktarı hücrelerin birleşmesine neden olmaktadır. Hücre birleşmesi ile artan hücre boyutunun etkisi ile hücre duvarı yeterli direnci sağlayamadığından çökme eğilimi göstermektedir (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004; Mengeloğlu ve ark., 2009). Ekzotermik köpük ajanı kullanılarak üretilen atık PVC köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere kıyasla daha düşük yoğunluk değerleri sergilemişlerdir. Ekzotermik köpük ajanının daha küçük ve homojen hücre yapısı elde edilmesini sağlamasından dolayı ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklerin yoğunlukları endotermik köpük ajanı ile üretilenlere göre daha düşüktür. Benzer yoğunluk azalımı sağlamak için ekzotermik köpük ajanı miktarına göre daha yüksek miktarlarda

endotermik köpük ajanı kullanılması gerekmektedir. Hücre çekirdeklenmesi ve hücre büyümesi kimyasal köpük ajanının termal bozunması ile üretilen gazın eriyik polimer matris içerisinde çözülebilirliği ve yayılabilirliğine bağlıdır. Ekzotermik köpük ajanı termal bozunma sırasında nitrojen gazı, endotermik köpük ajanı ise karbondioksit gazı açığa çıkarmaktadır. Nitrojen gazı, karbondioksit gazına göre daha düşük çözünürlük ve daha yüksek yayılma eğilimine sahiptir (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004; Mengeloğlu ve ark., 2009; Petchwattana ve Covavisaruch, 2011). Atık PVC köpüklerde DOP miktarının artması genel olarak yoğunluk değerlerini artırmıştır. En fazla yoğunluk düşüşü % 57'lik bir oranla 20 phr DOP içeren köpüklerde sağlanmıştır. DOP miktarının artması eriyik haldeki polimer matrisin erime viskozitesini düşürmektedir. Bu sebepten dolayı gazın polimer içerisinde difüzyonu artmakta ve hücre büyümesi kolaylaşmaktadır. Buna bağlı olarak yoğunluk azalmaktadır (Mengeloğlu ve Matuana, 2001). Ancak hücre büyümesi aşamasında polimer matris yeterli direnci sağlayamadığından hücre çökmeleri ve hücre birleşmeleri meydana gelebilmektedir. Üretilen atık PVC köpüklerin hücre yapısı görüntülerinde özellikle 40 phr DOP içeren köpüklerde hücre çökmeleri ve hücre birleşmelerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Atık PVC köpüklerin yoğunluk grafikleri

4.2.2. Atık PVC köpüklerin mekanik özellikleri

Üretilen atık PVC köpüklerin çekme testi sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Atık PVC köpüklerin çekme direnci değerleri 1,22-3,41 MPa arasında değişiklik göstermektedir. En düşük çekme direnci D40EK0,5 kodlu köpüklerde, en yüksek çekme direnci D20EN0,25 kodlu köpüklerde belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Atık PVC köpüklerin çekme değerleri

Örnek Kodu	Çekme direnci (MPa)	Çekmede elastikiyet modülü (MPa)	Kopmada uzama (%)
D20	7,12 (0,68)*	118,40 (12,15)	47,22 (10,43)
D20EN0,125	3,22 (0,82)	55,11 (10,41)	15,89 (5,57)
D20EN0,25	3,41 (0,50)	52,85 (8,32)	13,55 (2,93)
D20EN0,5	3,09 (0,38)	60,79 (5,13)	17,41 (3,33)
D20EN0,75	2,57 (0,42)	43,65 (4,03)	20,90 (5,96)
D20EK0,125	2,28 (0,79)	37,19 (9,48)	18,18 (5,66)
D20EK0,25	1,87 (0,35)	26,29 (2,58)	22,91 (6,36)
D20EK0,5	1,81 (0,50)	20,91 (5,46)	29,38 (5,62)
D20EK0,75	1,93 (0,33)	25,09 (3,31)	35,02 (6,88)
D30	5,00 (0,39)	17,55 (1,94)	135,41 (27,76)
D30EN0,125	2,33 (0,54)	13,77 (1,28)	37,73 (13,63)
D30EN0,25	1,97 (0,37)	8,37 (0,81)	45,13 (11,66)
D30EN0,5	1,87 (0,25)	6,66 (0,48)	51,30 (13,50)
D30EN0,75	1,61 (0,34)	6,38 (0,85)	44,34 (11,51)
D30EK0,125	2,14 (0,23)	9,39 (1,35)	54,86 (3,19)
D30EK0,25	1,54 (0,32)	6,22 (1,82)	53,23 (12,51)
D30EK0,5	1,27 (0,31)	3,80 (0,93)	61,74 (15,21)
D30EK0,75	1,56 (0,20)	4,86 (0,90)	58,38 (16,49)
D40	4,32 (0,38)	7,24 (0,60)	215,10 (16,21)
D40EN0,125	2,05 (0,38)	7,20 (1,11)	56,53 (14,48)
D40EN0,25	1,66 (0,34)	4,14 (0,56)	76,46 (18,72)
D40EN0,5	1,52 (0,29)	3,97 (0,38)	61,49 (12,92)
D40EN0,75	1,55 (0,28)	3,85 (0,31)	66,09 (15,57)
D40EK0,125	1,65 (0,18)	4,85 (0,31)	68,24 (14,26)
D40EK0,25	1,31 (0,20)	3,33 (0,38)	71,00 (14,47)
D40EK0,5	1,22 (0,19)	2,25 (0,40)	87,27 (10,66)
D40EK0,75	1,38 (0,18)	2,57 (0,34)	88,13 (15,42)

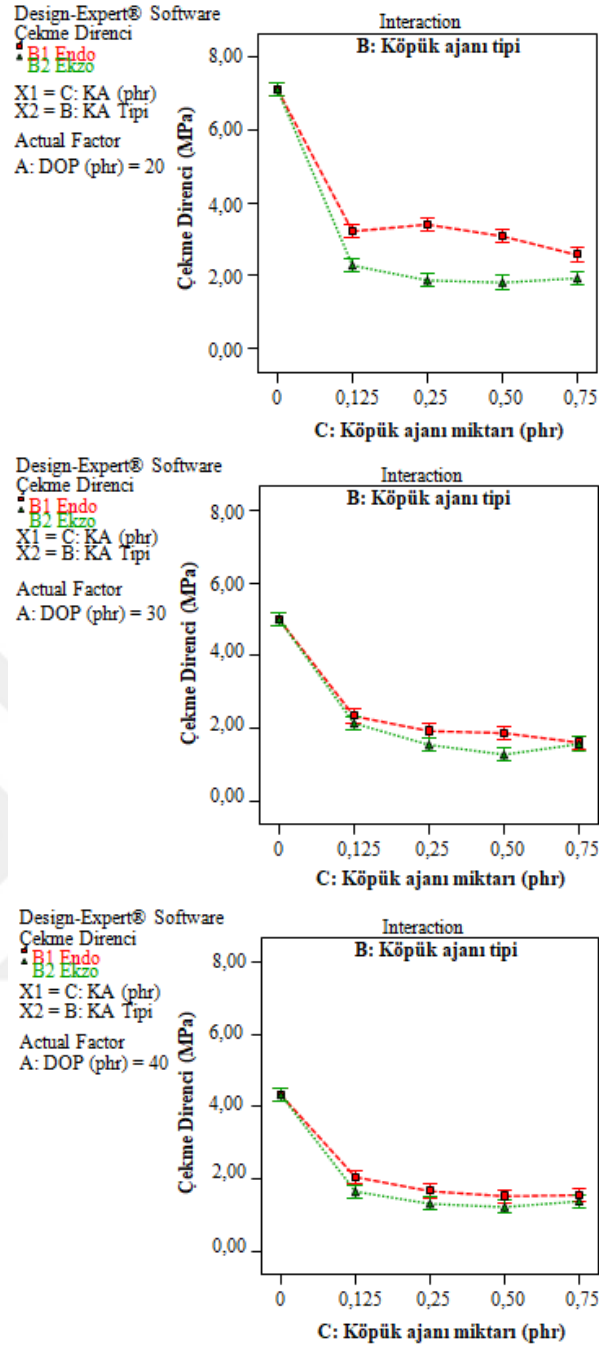
*: Standart sapma değerleri

Atık PVC köpüklerin yapılan istatistik analiz sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atık PVC köpüklerin çekme direnci değerleri üzerine DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. Atık PVC köpüklerin çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	768.03	29	26.48	148.29	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	98.22	2	49.11	274.98	< 0.0001
B-KA Tipi	15.45	1	15.45	86.49	< 0.0001
C-KA (phr)	608.49	4	152.12	851.77	< 0.0001
AB	6.69	2	3.34	18.72	< 0.0001
AC	30.30	8	3.79	21.21	< 0.0001
BC	6.01	4	1.50	8.41	< 0.0001
ABC	2.83	8	0.35	1.98	0.0493
Hata	48.04	269	0.18		
Toplam	816.08	298			

Atık PVC köpüklerin çekme direnci grafikleri Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Köpüklerin çekme direnci değerleri genel olarak köpükendirilmemiş PVC’ye göre düşüş göstermiş ve köpük ajanı miktarının artması ile bu düşüş eğilimi devam etmiştir. Köpük malzemelerde köpük ajanı miktarının artması ile direnç değerlerinde meydana gelen düşüş ya malzemenin yoğunluğuna ya da hücre yapısındaki düzensizliklere bağlıdır. Köpük ajanı miktarının artması hücre çekirdeklenmelerinin artması ve hücre birleşmelerinin meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu da hücre yapısında düzensiz hücre boyutlarına ve dağılımlara sebep olmaktadır (Farsheh ve ark., 2011; Luong ve ark., 2013; Abdul Azam ve ark., 2020). Ekzotermik köpük ajanı ile üretilen atık PVC köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre daha düşük çekme direnci değerleri sergilemiştir. Atık PVC köpüklerin çekme direnci değerleri DOP miktarının artması ile düşüş göstermiştir.



Şekil 4.10. Atık PVC köpüklerin çekme direnci grafikleri

Köpük malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen faktörler; köpük yoğunluğu ve hücre morfolojisidir (Eaves, 2004). Köpük malzemelerin yoğunluklarının polimer malzemeye göre daha düşük olmasından dolayı direnç değerlerindeki bu düşme eğilimi beklenmektedir. Direnç değerlerinin daha iyi incelenebilmesi amacıyla atık PVC köpüklerin çekme direnci değerleri yoğunluklarına oranlanarak spesifik çekme direnci değerleri hesaplanmıştır. İstatistik analiz sonuçlarına göre köpüklerin spesifik çekme

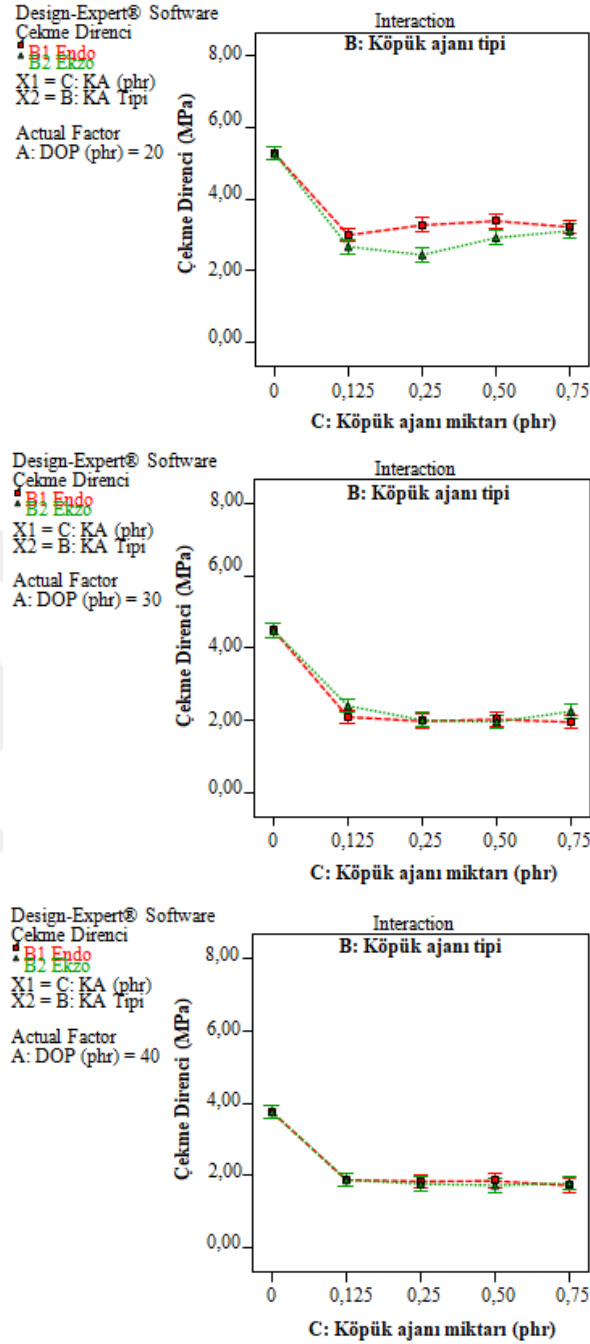
direnci üzerinde DOP miktarı ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu, köpük ajanı tipinin herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Atık PVC köpüklerin spesifik çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	f değeri	p değeri
Model	329.75	29	11.37	58.86	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	83.80	2	41.90	216.91	< 0.0001
B-KA Tipi	0.51	1	0.51	2.63	0.1058
C-KA (phr)	234.38	4	58.60	303.34	< 0.0001
AB	2.67	2	1.34	6.91	0.0012
AC	4.11	8	0.51	2.66	0.0081
BC	1.53	4	0.38	1.98	0.0976
ABC	1.32	8	0.16	0.85	0.5581
Hata	51.38	266	0.19		
Toplam	381.13	295			

Atık PVC köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde üretilen bütün köpüklerin spesifik çekme direnci değerleri köpüklendirilmemiş PVC’nin spesifik çekme direnci değerine kıyasla düşüktür. Köpük malzemelerin köpüklendirilmemiş örneklerine göre direnç düşüşü kötü hücre morfolojisinden kaynaklanmaktadır. Düzensiz hücre ve hücre boyutu dağılımı ve daha büyük hücrelerin oluşması direnç değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca köpüklerde meydana gelen daha büyük boyutlu hücreler çatlak ve kusur olarak algılanabilmekte ve bu durum erken kırılmalara yol açabilmektedir. Bu sebeple de direnç değerlerinde azalmalar meydana gelmektedir. Bu durum üretim yönteminden de kaynaklanabilmektedir (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004). Hücre yapısı görüntülerine göre pres kalıplama ile köpük üretimi mikro hücre yöntemine göre daha düzensiz hücre boyutu dağılımı sergilemiştir. 20 phr DOP içeren köpüklerde endotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler köpük ajanı miktarı arttıkça çekme direnci ile aynı düşme eğilimi göstermiş, ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler ise 0,25 phr köpük ajanı içeriğine kadar düşüş gösterirken daha sonra köpük ajanı miktarının artması ile artış göstermiştir. Bu artışın daha homojen bir hücre yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. 30 ve 40 phr DOP içeren atık PVC köpüklerin spesifik çekme direncinde köpük ajanı miktarının artması ile spesifik çekme direnci sabit devam etmiştir. 20 phr DOP içeren köpüklerde ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilenlere göre daha düşük spesifik çekme direnci sergilerken, 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde ekzotermik ve endotermik köpük ajanı arasında bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Atık PVC köpüklerde DOP

miktarının artması ile spesifik çekme direnci azalmıştır Köpük malzemelerde boşluk oranı arttıkça çekme direnci değerlerinin düşüş gösterdiği bilinmektedir (Matuana ve ark., 1998).



Şekil 4.11. Atık PVC köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri

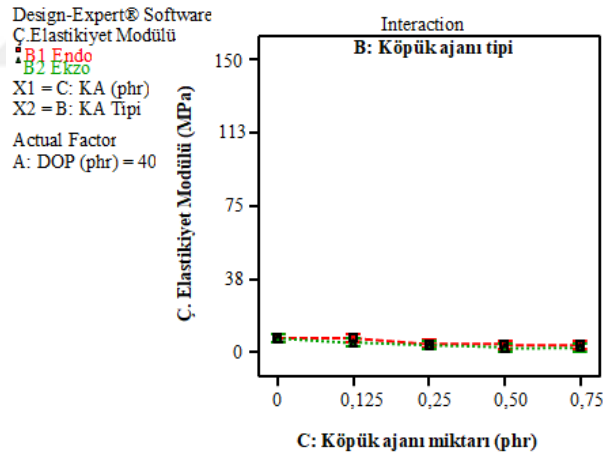
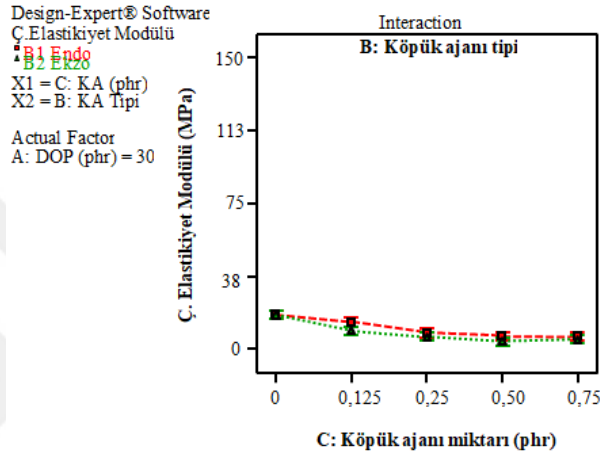
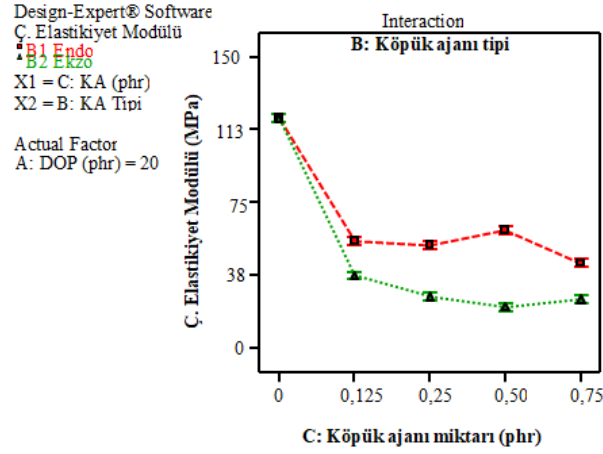
Atık PVC köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerleri 2,25-60,79 MPa arasındadır. En düşük çekmede elastikiyet modülü gösteren grup D40EK0,5 kodlu grupken en yüksek çekmede elastikiyet modülü gösteren grup D20EN0,5 kodlu gruptur.

Atık PVC köpüklerin istatistik analiz sonuçlarına göre çekmede elastikiyet modülü değerlerinin DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarından etkilendiği belirlenmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Atık PVC köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	2.764E+005	29	9530.37	422.95	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	1.598E+005	2	79902.12	3545.99	< 0.0001
B-KA Tipi	4795.51	1	4795.51	212.82	< 0.0001
C-KA (phr)	46185.56	4	11546.39	512.42	< 0.0001
AB	5945.26	2	2972.63	131.92	< 0.0001
AC	55402.38	8	6925.30	307.34	< 0.0001
BC	1718.96	4	429.74	19.07	< 0.0001
ABC	2564.47	8	320.56	14.23	< 0.0001
Hata	6061.40	269	22.53		
Toplam	2.824E+005	298			

Atık PVC köpüklerin Şekil 4.12’da gösterilen çekmede elastikiyet modülü grafikleri incelendiğinde köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerleri köpüklendirilmemiş PVC’ye göre düşüş göstermiş ve köpük ajanı miktarının artması da köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerini düşürmüştür. Bu düşüş 20 phr DOP içeren köpüklerde daha fazla oranlarda meydana gelirken 30 ve 40 phr DOP içeren atık PVC köpüklerde daha az oranda meydana gelmiştir. Endotermik ve ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerleri karşılaştırıldığında ekzotermik köpük ajanı ile üretilen atık PVC köpükler daha düşük elastikiyet modülü göstermiştir. Endotermik ve ekzotermik köpük ajanı arasındaki fark 20 phr DOP içeren örneklerde daha fazla, 30 ve 40 phr DOP içeren örneklerde çok azdır. Atık PVC köpüklerde DOP miktarının artması ile çekmede elastikiyet modülü değerleri azalmıştır.



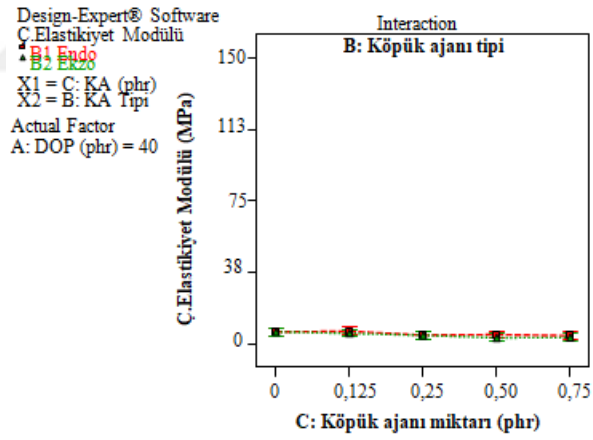
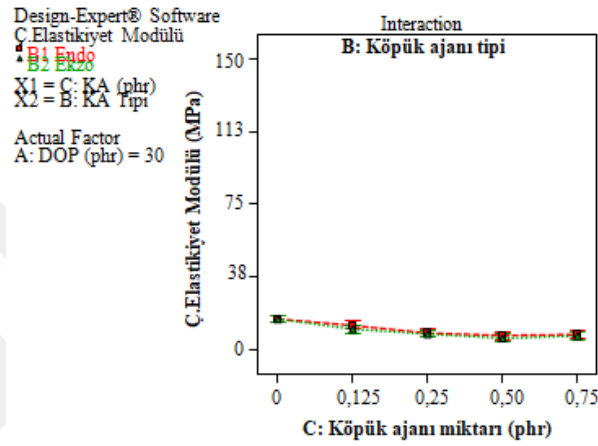
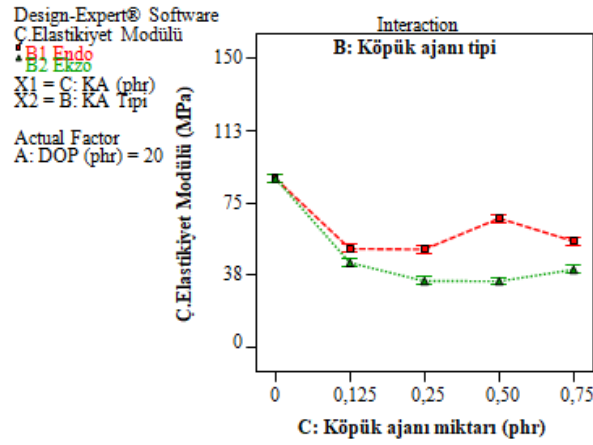
Şekil 4.12. Atık PVC köpüklerin çekmede elastikiyet modülü grafikleri

Atık PVC köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçlarına göre spesifik çekmede elastikiyet modülü üzerinde DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin bulunduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Atık PVC köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	f değeri	p değeri
Model	1.889E+005	29	6513.51	309.13	< 0.0001 significant
<i>A-DOP (phr)</i>	<i>1.522E+005</i>	<i>2</i>	<i>76089.49</i>	<i>3611.22</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>B-KA Tipi</i>	<i>1984.58</i>	<i>1</i>	<i>1984.58</i>	<i>94.19</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>C-KA (phr)</i>	<i>13393.40</i>	<i>4</i>	<i>3348.35</i>	<i>158.91</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>AB</i>	<i>2913.35</i>	<i>2</i>	<i>1456.68</i>	<i>69.13</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>AC</i>	<i>14781.55</i>	<i>8</i>	<i>1847.69</i>	<i>87.69</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>BC</i>	<i>1066.30</i>	<i>4</i>	<i>266.57</i>	<i>12.65</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>ABC</i>	<i>1817.32</i>	<i>8</i>	<i>227.16</i>	<i>10.78</i>	<i>< 0.0001</i>
Hata	5604.70	266	21.07		
Toplam	1.945E+005	295			

Atık PVC köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerleri DOP miktarının artması, köpük ajanı tipinin değişmesi ve köpük ajanı miktarının artması ile çekmede elastikiyet modülü ile aynı eğilimleri göstermiştir (Şekil 4.13). Köpük malzemelerin çekmede elastikiyet modülü değerlerindeki aynı düşüş eğiliminin olarak spesifik çekmede elastikiyet modülünde de gözlemlenmesi bu düşüşün yoğunluk azalımından bağımsız olarak hücre yapısından kaynaklandığı anlamına gelmektedir (Mengeloğlu, 2001).



Şekil 4.13. Atık PVC köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü grafikleri

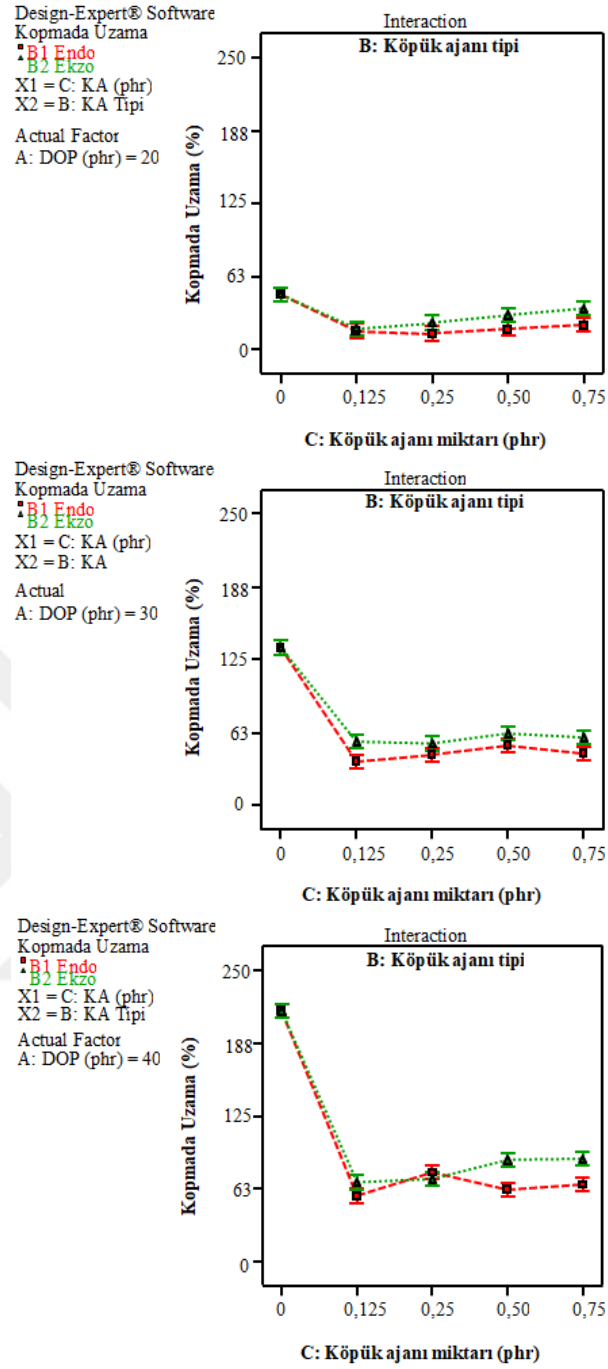
Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerleri % 13,55-88,13 arasında değişmektedir. D20EN0,25 kodlu köpükler en düşük kopmada uzama değeri verirken D40EK0,75 kodlu köpükler en yüksek kopmada uzama değeri vermiştir.

Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerlerinde yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	7.437E+005	29	25644.71	138.46	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	2.732E+005	2	1.366E+005	737.44	< 0.0001
B-KA Tipi	6806.39	1	6806.39	36.75	< 0.0001
C-KA (phr)	3.465E+005	4	86629.77	467.74	< 0.0001
AB	151.46	2	75.73	0.41	0.6648
AC	1.119E+005	8	13985.34	75.51	< 0.0001
BC	3170.83	4	792.71	4.28	0.0023
ABC	2081.40	8	260.17	1.40	0.1944
Hata	49821.35	269	185.21		
Toplam	7.935E+005	298			

Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerlerine ait grafikler Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerleri köpüklendirilmemiş kontrol örneğine göre azalmıştır. Bu azalma miktarı DOP miktarı arttıkça artmıştır. Köpük ajanı miktarının artması ile köpüklerin kopmada uzama değerleri artış göstermiştir. Ancak 30 phr DOP içeren köpüklerde 0,75 phr köpük ajanı ilavesinde tekrar düşüş meydana gelmiştir. Ekzotermik köpük ajanı kullanılarak üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilenlere göre bir miktar daha yüksek kopmada uzama değeri sergilemiştir. Atık PVC köpüklerin kopmada uzama değerlerinde DOP miktarının artması ile artış meydana gelmiştir.



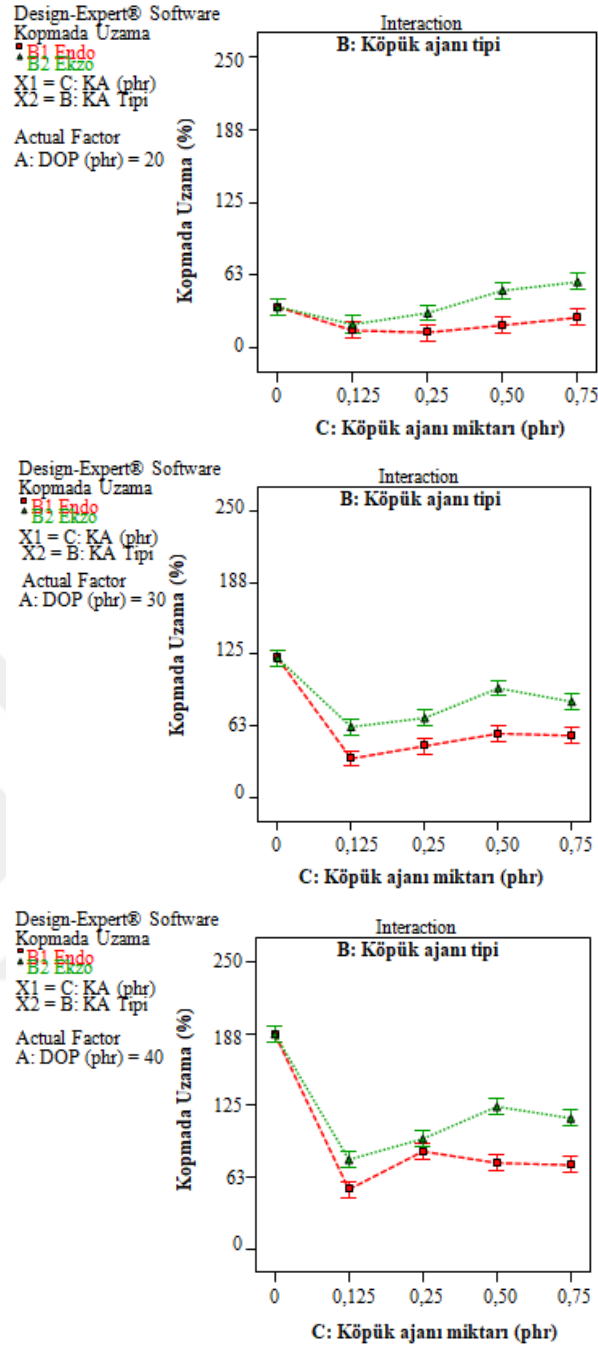
Şekil 4.14. Atık PVC köpüklerin kopmada uzama grafikleri

Atık PVC köpüklerin spesifik kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçlarına göre spesifik kopmada uzama değerleri üzerinde DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Atık PVC köpüklerin spesifik kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	f değeri	p değeri
Model	5.966E+005	29	20571.53	83.20	< 0.0001 significant
<i>A-DOP (phr)</i>	<i>2.963E+005</i>	<i>2</i>	<i>1.481E+005</i>	<i>599.15</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>B-KA Tipi</i>	<i>36298.44</i>	<i>1</i>	<i>36298.44</i>	<i>146.80</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>C-KA (phr)</i>	<i>1.733E+005</i>	<i>4</i>	<i>43318.36</i>	<i>175.19</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>AB</i>	<i>1065.06</i>	<i>2</i>	<i>532.53</i>	<i>2.15</i>	<i>0.1181</i>
<i>AC</i>	<i>74211.42</i>	<i>8</i>	<i>9276.43</i>	<i>37.52</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>BC</i>	<i>14260.46</i>	<i>4</i>	<i>3565.12</i>	<i>14.42</i>	<i>< 0.0001</i>
<i>ABC</i>	<i>2116.89</i>	<i>8</i>	<i>264.61</i>	<i>1.07</i>	<i>0.3843</i>
Hata	65771.16	266	247.26		
Toplam	6.623E+005	295			

Atık PVC köpüklerin spesifik kopmada uzama grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.15) kopmada uzama miktarındaki ile aynı köpüklendirilmemiş PVC'ye göre düşüş, köpük ajanı miktarının artması ile artış eğilimine sahipken artış oranının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre daha yüksek spesifik kopmada uzama değerleri göstermiştir. Spesifik kopmada uzama değerleri de kopmada uzama değerleri gibi DOP miktarının artması ile artmıştır.



Şekil 4.15. Atık PVC köpüklerin spesifik kopmada uzama grafikleri

Atık PVC köpüklerin eğilme testi sonuçları Çizelge 4.10’da verilmiştir. Atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerleri 0,41-4,67 MPa arasındadır. En düşük eğilme direnci değerini D40EK0,75 kodlu köpükler gösterirken, en yüksek eğilme direnci değerini D20EN0,125 kodlu köpükler göstermiştir.

Çizelge 4.10. Atık PVC köpüklerin eğilme değerleri

Örnek Kodu	Eğilme direnci (MPa)	Eğilmede elastikiyet mod. (MPa)
D20	5,69 (0,98)*	188,56 (39,32)
D20EN0,125	4,67 (0,59)	167,56 (26,89)
D20EN0,25	2,82 (0,45)	79,64 (16,21)
D20EN0,5	3,36 (0,89)	103,88 (28,20)
D20EN0,75	2,75 (0,44)	85,22 (20,06)
D20EK0,125	3,31 (0,71)	104,50 (23,32)
D20EK0,25	1,64 (0,34)	49,95 (10,13)
D20EK0,5	1,57 (0,42)	42,72 (11,87)
D20EK0,75	1,76 (0,25)	48,30 (9,66)
D30	1,83 (0,21)	35,69 (12,00)
D30EN0,125	1,37 (0,18)	43,36 (6,64)
D30EN0,25	0,93 (0,26)	24,07 (5,93)
D30EN0,5	0,74 (0,11)	14,87 (4,16)
D30EN0,75	0,73 (0,10)	15,73 (1,90)
D30EK0,125	0,97 (0,14)	27,15 (4,99)
D30EK0,25	0,94 (0,28)	19,92 (8,95)
D30EK0,5	0,56 (0,21)	9,78 (3,79)
D30EK0,75	0,85 (0,12)	20,13 (3,29)
D40	1,19 (0,18)	24,98 (5,89)
D40EN0,125	0,71 (0,14)	15,77 (3,16)
D40EN0,25	0,67 (0,20)	16,23 (8,03)
D40EN0,5	0,56 (0,07)	11,42 (1,68)
D40EN0,75	0,55 (0,10)	10,72 (1,75)
D40EK0,125	0,55 (0,14)	10,90 (3,58)
D40EK0,25	0,66 (0,27)	14,16 (9,81)
D40EK0,5	0,42 (0,12)	6,92 (2,34)
D40EK0,75	0,41 (0,05)	7,43 (1,61)

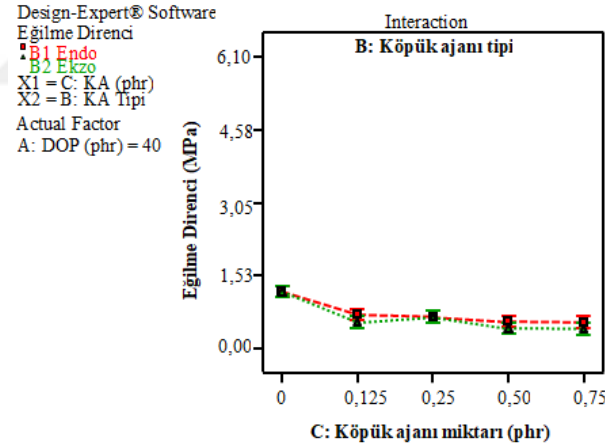
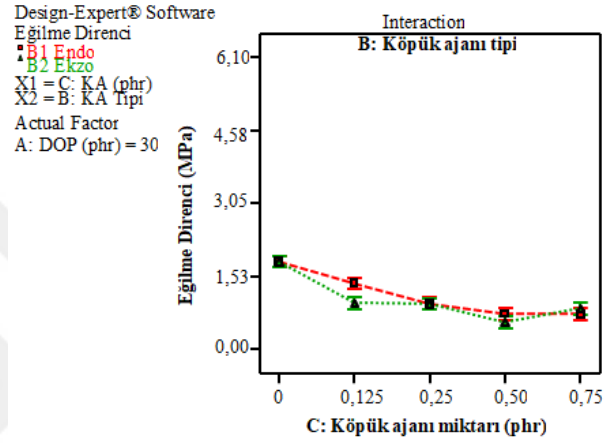
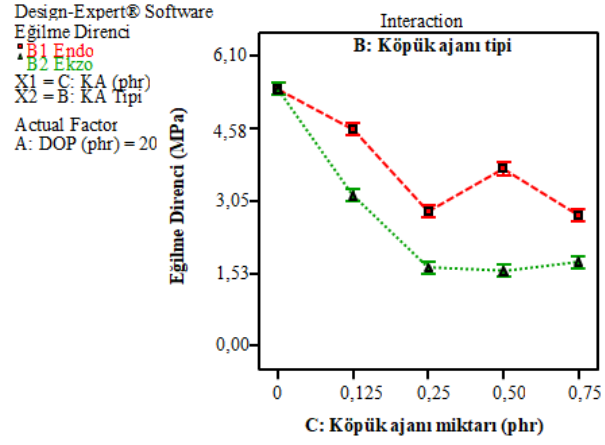
*: Standart sapma değerleri

Atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerleri ile yapılan istatistik analiz sonuçları Çizelge 4.11’de verilmiştir. İstatistik analiz sonuçlarına göre atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerleri üzerine DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.11. Atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	560.87	29	19.34	243.41	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	362.19	2	181.10	2279.19	< 0.0001
B-KA Tipi	13.35	1	13.35	168.07	< 0.0001
C-KA (phr)	106.82	4	26.70	336.09	< 0.0001
AB	17.57	2	8.78	110.55	< 0.0001
AC	55.50	8	6.94	87.31	< 0.0001
BC	5.23	4	1.31	16.47	< 0.0001
ABC	6.55	8	0.82	10.30	< 0.0001
Hata	20.90	263	0.079		
Toplam	581.76	292			

Atık PVC köpüklerin eğilme direnci grafikleri Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerleri köpüklendirilmemiş PVC’nin eğilme direncine göre azalmış ve köpük ajanı miktarının artması ile düşüş eğilimi göstermiştir. Bu düşüş 20 phr DOP içeren köpüklerde oransal olarak daha fazlayken 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde daha azdır. 20 phr DOP-0,25 phr endotermik köpük ajanı içeren köpükler fazla miktarda düşüş göstermiştir. 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde 0,25 ekzotermik köpük ajanı içeren köpükler bir miktar artış göstermiştir. Ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere kıyasla 20 phr DOP içeriğinde daha düşük eğilme direnci değerleri sergilerken 30 ve 40 phr DOP içeriğinde değerler neredeyse birbirine yakındır. Atık PVC köpüklerin eğilme direnci değerleri DOP miktarı arttıkça azalmıştır.



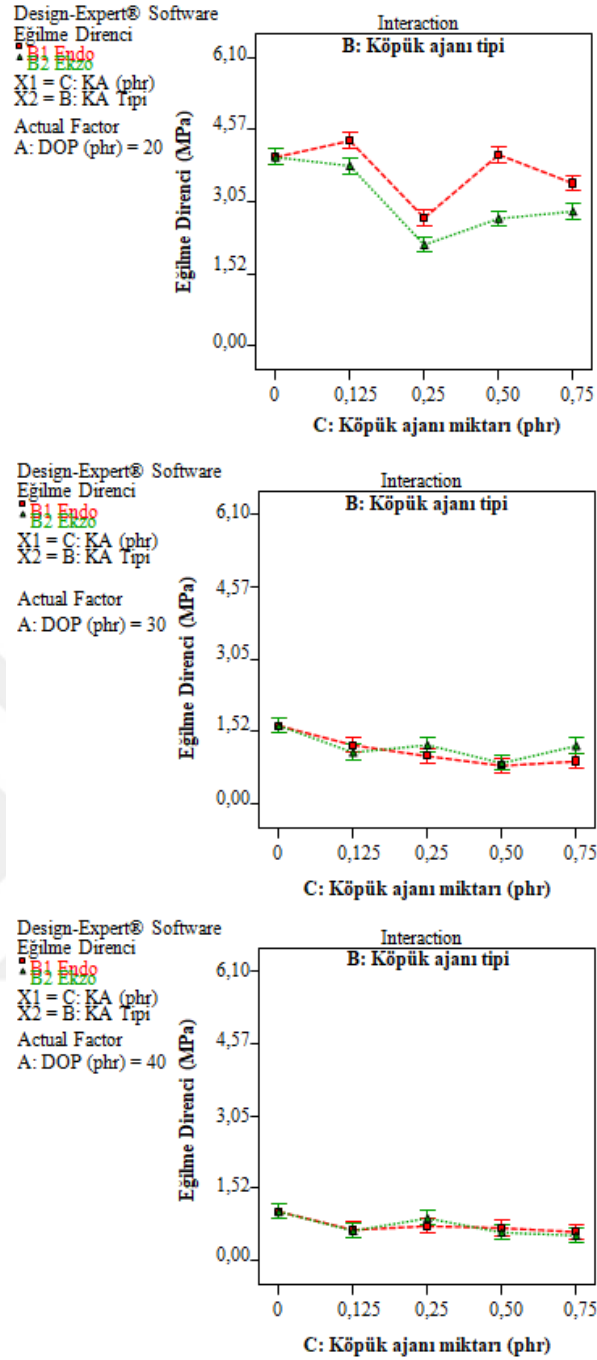
Şekil 4.16. Atık PVC köpüklerin eğilme direnci grafikleri

Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci değerlerini DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir şekilde etkilediği belirlenmiştir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	f değeri	p değeri
Model	445.43	29	15.36	116.80	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	388.30	2	194.15	1476.39	< 0.0001
B-KA Tipi	1.89	1	1.89	14.38	0.0002
C-KA (phr)	23.72	4	5.93	45.09	< 0.0001
AB	6.78	2	3.39	25.77	< 0.0001
AC	22.27	8	2.78	21.17	< 0.0001
BC	1.64	4	0.41	3.12	0.0157
ABC	3.26	8	0.41	3.10	0.0023
Hata	34.85	265	0.13		
Toplam	480.27	294			

Atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci grafikleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. 20 phr DOP içeren 0,125 phr endotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler haricinde bütün köpükler köpüklendirilmemiş PVC’nin spesifik eğilme direncine göre daha düşük spesifik eğilme direnci değerlerine sahiptir. D20EN0,125 kodlu grupta köpüklendirmenin tam olarak sağlanamadığı köpüklendirme için gereken gazın yeterli olmadığı düşünülmektedir. 20 phr DOP içeren atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci değerleri endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklerde köpük ajanı miktarının artması ile kontrol örneğine göre artmış 0,25 phr köpük ajanı miktarında ani bir düşüş göstermiştir. Köpük ajanı miktarının artmaya devam etmesi ile spesifik eğilme direnci iyileşirken 0,75 phr köpük ajanı içeriğinde tekrar düşüş göstermiştir. 20 phr DOP içeren ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklerde ise 0,25 phr köpük ajanı içeriğine kadar düşüş, daha sonra köpük ajanı miktarının artması ile artış gözlemlenmiştir. Her iki köpük ajanında da 0,25 phr köpük ajanı içeriğinde meydana gelen bu ani düşüşün hücre yapısından kaynaklanmakta olabileceği düşünülmektedir. 30 ve 40 phr DOP içeren köpükler eğilme direnci ile aynı eğilimi göstermiştir. 20 phr DOP içeren köpüklerde endotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre daha iyi spesifik eğilme direnci gösterirken 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde endotermik ve ekzotermik köpük ajanı arasında önemli bir fark meydana gelmemiştir. Köpüklerin spesifik eğilme direnci değerleri DOP miktarının artması ile düşmüştür.



Şekil 4.17. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilme direnci grafikleri

Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri 6,92-167,56 MPa arasında değişiklik göstermektedir. En düşük eğilmede elastikiyet modülü D40EK0,5 grubuna aitken, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü değeri D20EN0,125 kodlu köpüklerde belirlenmiştir.

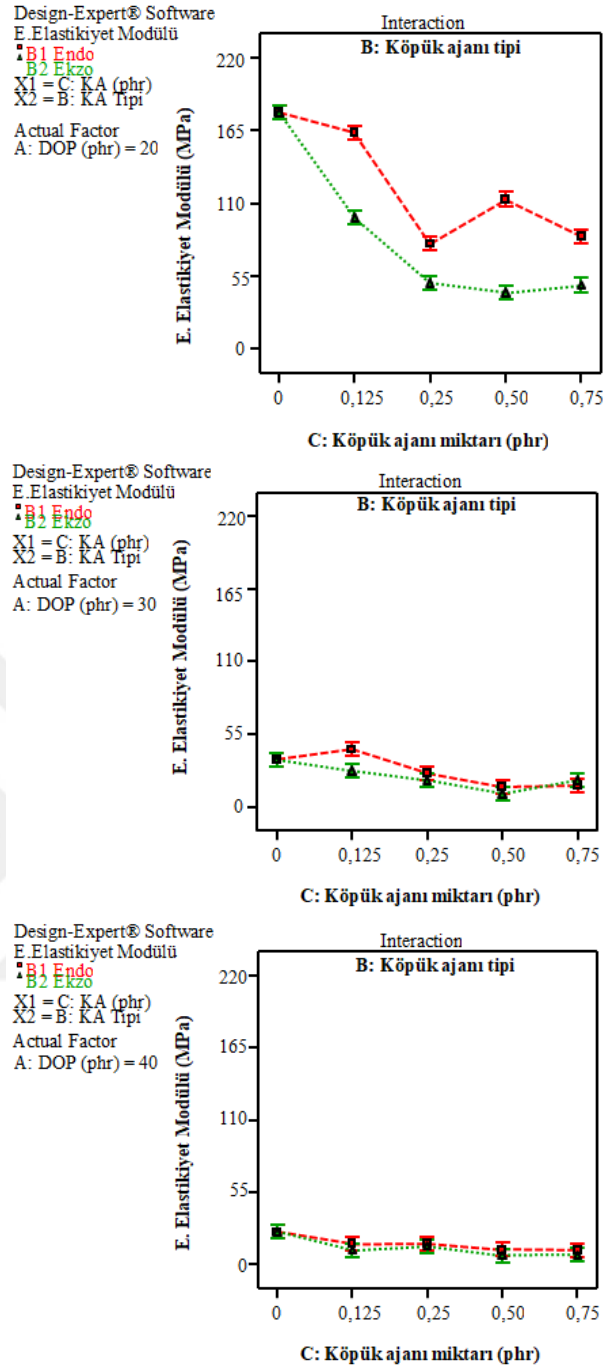
Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü istatistik sonuçları incelendiğinde köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri üzerine DOP miktarı,

köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13. Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	6.880E+005	29	23723.89	170.47	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	4.435E+005	2	2.218E+005	1593.50	< 0.0001
B-KA Tipi	17016.11	1	17016.11	122.27	< 0.0001
C-KA (phr)	1.020E+005	4	25492.22	183.18	< 0.0001
AB	20994.10	2	10497.05	75.43	< 0.0001
AC	95705.98	8	11963.25	85.97	< 0.0001
BC	7246.80	4	1811.70	13.02	< 0.0001
ABC	8415.12	8	1051.89	7.56	< 0.0001
Hata	36600.16	263	139.16		
Toplam	7.246E+005	292			

Atık PVC köpüklerin Şekil 4.18’de gösterilen eğilmede elastikiyet modülü grafiklerinde genel olarak bütün köpükler eğilme direnci ile aynı eğilimi göstermiştir. 30 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren köpükler (D30EN0,125) haricinde bütün köpüklerde eğilmede elastikiyet modülü değerleri köpüklendirilmemiş PVC’ye göre azalmış ve köpük ajanı miktarının artması ile düşüş göstermiştir. Köpük ajanı tipi karşılaştırıldığında ekzotermik köpük ajanı ile üretilen atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri endotermik köpük ajanı ile üretilenlerinkine göre daha düşüktür. 20 phr DOP içeren köpüklerde ekzotermik ve endotermik köpük ajanı arasındaki fark oransal olarak daha fazlayken 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde çok daha azdır. Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde DOP miktarının artması ile düşüş meydana geldiği görülmüştür.



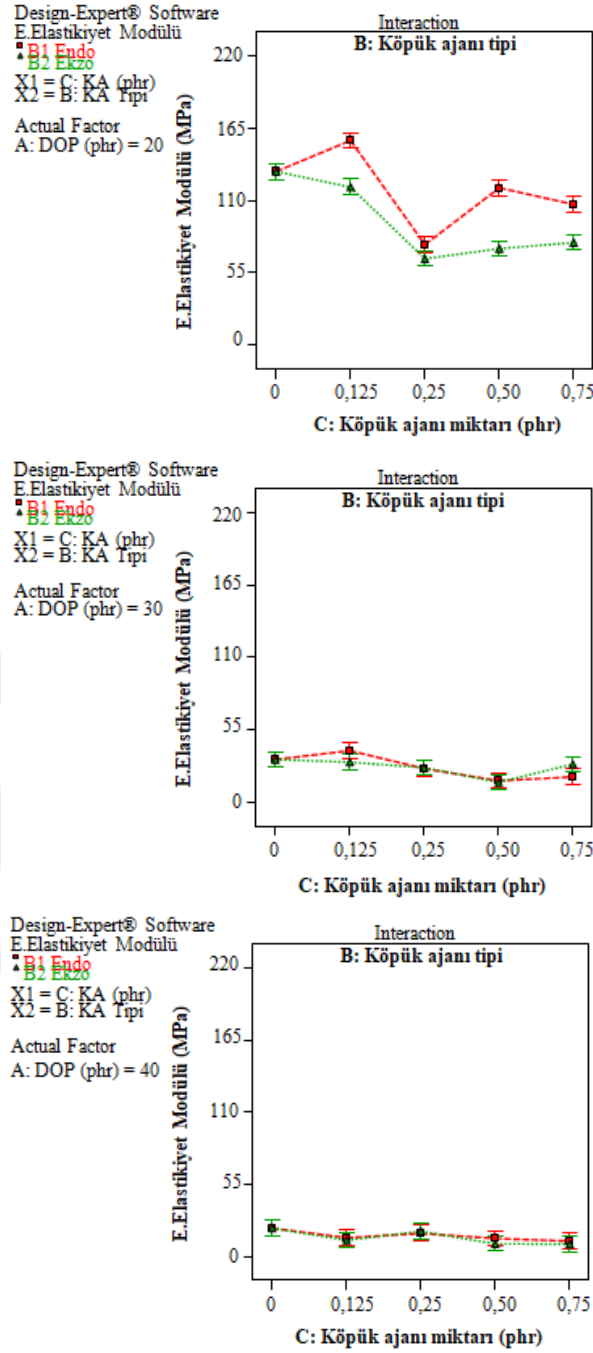
Şekil 4.18. Atık PVC köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü grafikleri

Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin yapılan istatistik sonuçlarına göre DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarından önemli bir şekilde etkilenmiş olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.14).

Çizelge 4.14. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	f değeri	p değeri
Model	5.529E+005	29	19063.84	108.89	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	4.632E+005	2	2.316E+005	1322.91	< 0.0001
B-KA Tipi	4886.07	1	4886.07	27.91	< 0.0001
C-KA (phr)	32564.09	4	8141.02	46.50	< 0.0001
AB	8922.99	2	4461.49	25.48	< 0.0001
AC	36810.52	8	4601.31	26.28	< 0.0001
BC	3024.74	4	756.19	4.32	0.0021
ABC	4251.77	8	531.47	3.04	0.0028
Hata	46395.12	265	175.08		
Toplam	5.992E+005	294			

Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.19); spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri eğilmede elastikiyet modülü ile aynı eğilimleri göstermiştir. Bu durum, meydana gelen ve beklenmeyen artış ya da azalmaların hücre yapısından kaynaklandığı anlamına gelmektedir. 20 ve 30 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren köpükler (D20EN0,125 ve D30EN0,125) haricinde bütün köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerleri köpüklendirilmemiş PVC'ye göre düşmüştür. Ve köpük ajanı miktarının artması ile genel olarak düşüş göstermiştir. 20 phr DOP içeren köpüklerde ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre daha düşük spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerleri sergilerken 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde endotermik ve ekzotermik köpük ajanı arasında değerler birbirine yakındır. 20 phr DOP içeren köpüklerde 0,25 phr hem endotermik hem de ekzotermik köpük ajanı içeren köpüklerde meydana gelen beklenilenin dışındaki düşüşün hücre yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerleri DOP miktarı arttıkça düşüş göstermiştir.



Şekil 4.19. Atık PVC köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri

Üretilen atık PVC köpüklerin darbe direnci değerleri Çizelge 4.15’te verilmiştir. Köpüklerin darbe direnci değerleri $4,01-24,44 \text{ kJ/m}^2$ arasında değişmektedir. En düşük darbe direnci D20EK0,75 kodlu köpüklerde, en yüksek darbe direnci D30EN0,125 kodlu köpüklerde belirlenmiştir.

Çizelge 4.15. Atık PVC köpüklerin darbe direnci değerleri

Örnek Kodu	Darbe direnci (kJ/m ²)
D20	9,01 (2,08)*
D20EN0,125	14,25 (1,48)
D20EN0,25	8,36 (2,26)
D20EN0,5	5,96 (0,99)
D20EN0,75	4,94 (0,46)
D20EK0,125	11,02 (2,15)
D20EK0,25	5,63 (0,62)
D20EK0,5	5,49 (1,30)
D20EK0,75	4,01 (0,84)
D30	29,53 (1,89)
D30EN0,125	24,44 (6,44)
D30EN0,25	20,65 (5,47)
D30EN0,5	18,23 (3,50)
D30EN0,75	19,19 (3,23)
D30EK0,125	22,36 (3,49)
D30EK0,25	13,76 (0,85)
D30EK0,5	12,72 (1,64)
D30EK0,75	17,25 (2,28)
D40	33,41 (2,40)
D40EN0,125	12,11 (2,35)
D40EN0,25	21,44 (3,56)
D40EN0,5	14,48 (3,23)
D40EN0,75	15,47 (3,02)
D40EK0,125	13,03 (1,88)
D40EK0,25	13,65 (2,21)
D40EK0,5	10,48 (1,70)
D40EK0,75	13,52 (1,23)

*: Standart sapma değerleri

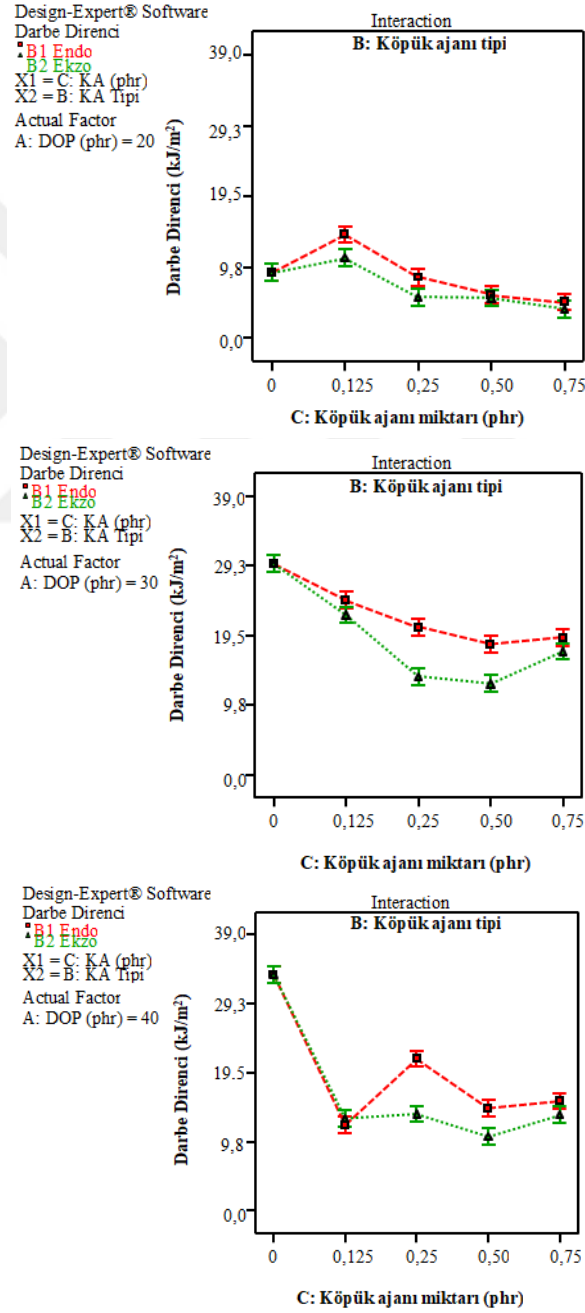
Atık PVC köpüklerin darbe direnci değerlerinde yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre köpüklerin darbe direnci değerleri üzerine DOP miktarı, köpük ajanı tipi ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16. Atık PVC köpüklerin darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	19990.23	29	689.32	99.09	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	9426.77	2	4713.38	677.54	< 0.0001
B-KA Tipi	446.65	1	446.65	64.21	< 0.0001
C-KA (phr)	6171.52	4	1542.88	221.79	< 0.0001
AB	41.60	2	20.80	2.99	0.0520
AC	3460.45	8	432.56	62.18	< 0.0001
BC	295.65	4	73.91	10.62	< 0.0001
ABC	147.59	8	18.45	2.65	0.0081
Hata	1878.29	270	6.96		
Toplam	21868.52	299			

Atık PVC köpüklerin darbe direnci grafikleri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde 20 phr DOP ve 0,125 phr endotermik ve ekzotermik köpük ajanı içeren köpükler (D20EN0,125 ve D20EK0,125) haricinde köpüklerin darbe direnci köpüklendirilmemiş PVC’nin darbe direncine göre daha düşüktür. Köpük malzemelerin darbe direnci değerlerinde köpüklendirme ile beklenen düşüş eğiliminden dolayı (Mengeloğlu, 2001), 0,125 phr kimyasal köpük ajanı içeren köpüklerde köpüklendirmenin tam olarak sağlanmadığı düşünülmektedir. 20 phr DOP içeren köpüklerin darbe direnci değerlerinde 0,125 phr köpük ajanı içeriğinde artış göstermiş daha sonra köpük ajanı miktarının artması ile düşmüştür. Bu önce artma ve daha sonra azalma miktarları ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklerde daha azdır. 0,5 ve 0,75 köpük ajanı içeriğinde her iki köpük ajanı tipi de birbirine yakın değerler göstermiştir. 30 phr DOP içeren köpüklerin darbe direnci değerleri genel olarak köpük ajanı miktarı arttıkça azalmış ancak 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeriğinde artış göstermiştir. Meydana gelen bu azalma eğiliminde azalma miktarı ekzotermik köpük ajanı kullanılan köpüklerde endotermik köpük ajanı kullanılanlarınkine kıyasla daha fazladır. 40 phr DOP içeren atık PVC köpüklerin darbe direnci değerleri ise 0,125 phr köpük ajanı ilavesi ile köpüklendirilmemiş PVC’ye göre fazla miktarda düşüş sergilerken köpük ajanı miktarının artması ile iyileşmiştir. Ancak 0,5 phr köpük ajanı içeriğinde tekrar bir düşüş meydana gelmiştir. Ekzotermik ve endotermik köpük ajanı kullanılan köpükler 0,125 phr köpük ajanı içeriğinde hemen hemen aynı darbe direnci değerleri gösterirken köpük ajanı miktarının artması ile ekzotermik köpük ajanı ile üretilen atık PVC köpükler daha düşük darbe direnci değerleri sergilemiştir. Darbe direnci değerlerinde DOP miktarının artması ile köpüklendirilmemiş kontrol örneklerinde artış, köpüklerde ise 30 phr DOP içeriğinde artış ve 40 phr DOP içeriğinde düşüş gözlemlenmiştir. Köpüklerde en yüksek darbe direnci

değerleri 30 phr DOP içeriğinde belirlenmiştir. Genel olarak darbe direnci üzerinde DOP miktarının olumlu bir etkisi bulunmaktadır. Köpüklendirilmemiş kontrol örneklerinde de görüldüğü gibi DOP miktarının artması darbe direncini iyileştirmiştir. Ancak köpük örneklerinde 30 phr DOP içeriğine kadar iyileşme gözlemlenirken 40 phr DOP içeriğinde darbe direnci değerleri düşüş göstermiştir. Bunun hücre yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. 40 phr DOP içeren köpüklerde hücre birleşmeleri ve hücre çökmelerinin meydana geldiği ve hücre yapısının düzensiz olduğu gözlemlenmiştir. Köpük malzemelerde iyi hücre yapısı darbe direncini iyileştirmektedir (Mengeloğlu, 2001).



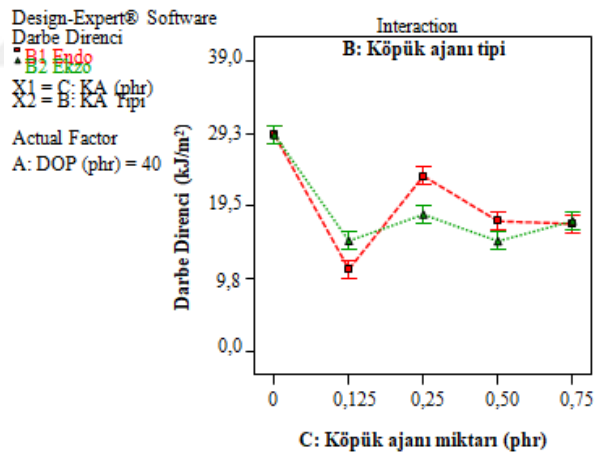
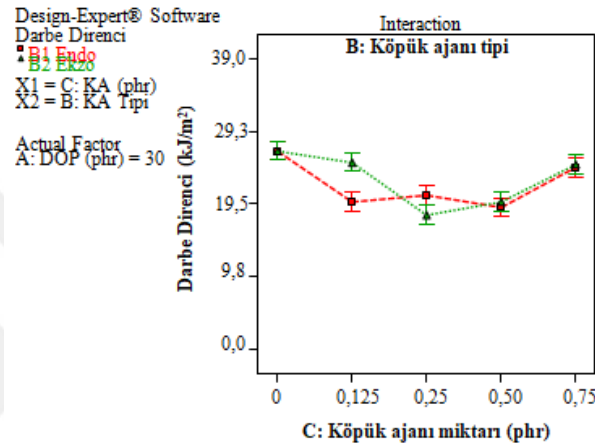
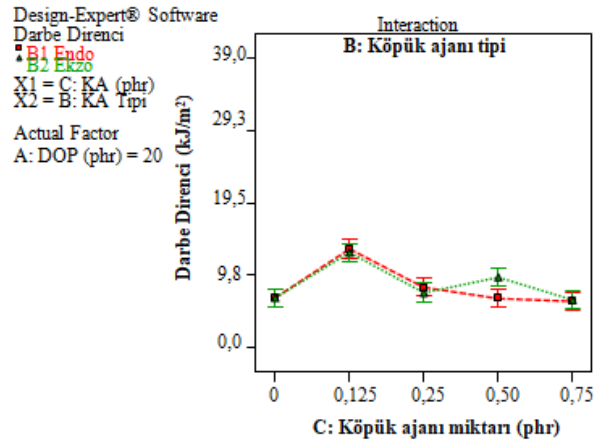
Şekil 4.20. Atık PVC köpüklerin darbe direnci grafiği

Üretilen atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri üzerine istatistik analiz sonuçlarına göre DOP miktarı ve köpük ajanı miktarının önemli bir etkisinin olduğu, köpük ajanı tipinin ise herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Çizelge 4.17).

Çizelge 4.17. Atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	f değeri	p değeri
Model	15846.15	29	546.42	71.21	< 0.0001 significant
A-DOP (phr)	10854.56	2	5427.28	707.26	< 0.0001
B-KA Tipi	0.70	1	0.70	0.091	0.7628
C-KA (phr)	1351.41	4	337.85	44.03	< 0.0001
AB	28.29	2	14.15	1.84	0.1603
AC	3101.73	8	387.72	50.53	< 0.0001
BC	234.22	4	58.55	7.63	< 0.0001
ABC	186.69	8	23.34	3.04	0.0027
Hata	2033.53	265	7.67		
Toplam	17879.67	294			

Atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci grafikleri incelendiğinde 20 phr DOP içeren köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri köpüklendirilmemiş PVC'nin spesifik darbe direnci değerine göre yakın ya da daha yüksek iken 30 ve 40 phr DOP içeren köpüklerde ise daha düşüktür. Genel olarak 20 ve 30 phr DOP içeren köpükler darbe direnci ile aynı eğilimi göstermiştir. 20 phr DOP içeren köpüklerde 0,125 phr köpük ajanı içeriğinde spesifik darbe direnci artmış daha sonra köpük ajanı miktarının artması ile düşmüştür. 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpükler bu eğilimin dışında bir artış göstermiştir. 30 phr DOP içeren atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri 0,25 phr köpük ajanı içeriğine kadar düşmüş, daha sonra artış gözlemlenmiştir. Ancak 0,25 phr endotermik köpük ajanı içeren köpüklerin darbe direnci değerleri eğilimin dışında aksine bir artış göstermiştir. 40 phr DOP içeren köpüklerde spesifik darbe direnci 0,125 phr köpük ajanı içeriğinde düşmüş, 0,25 phr köpük ajanı içeriğinde artış göstermiş daha sonra tekrar düşmüştür. Ekzotermik ve endotermik köpük ajanı arasındaki fark değerlendirildiğinde 20 phr DOP ile üretilen köpüklerde herhangi bir fark görülmezken 30 ve 40 phr DOP ile üretilen köpüklerde ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre genel olarak daha düşük spesifik darbe direnci değerleri göstermiştir. Atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri DOP miktarının artması ile 30 phr DOP içeriğine kadar artmış daha sonra 40 phr DOP içeriğinde düşüş göstermiştir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Atık PVC köpüklerin spesifik darbe direnci grafiği

4.2.3. Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik özellikleri

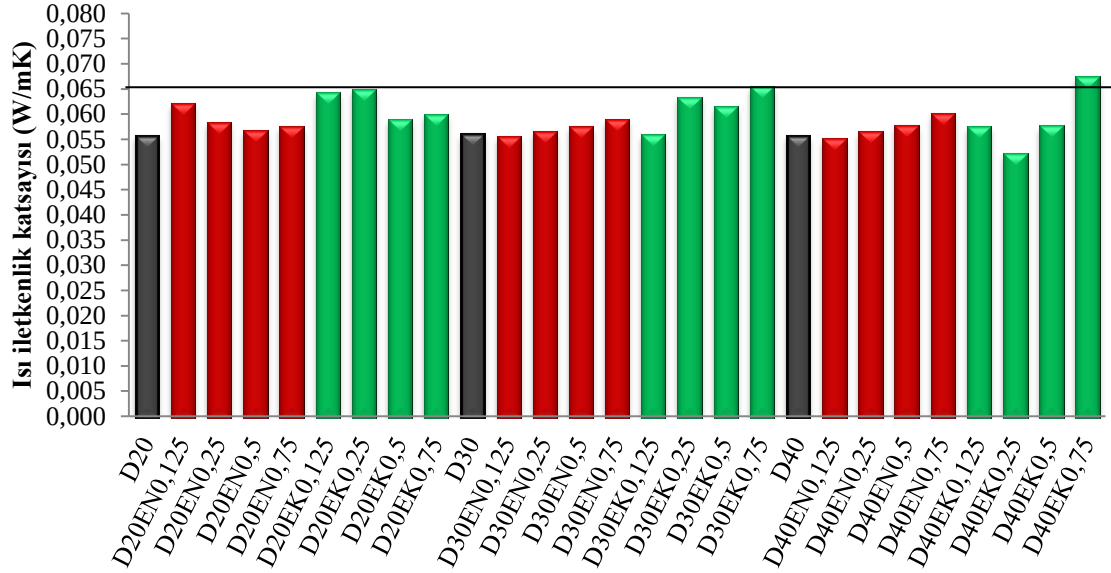
Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı ve ısıl geçirgenlik direnci değerleri Çizelge 4.18’de verilmiştir. Köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri 0,052-0,067 W/mK arasında değişmektedir.

Çizelge 4.18. Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik değerleri

Örnek Kodu	Kalınlık (mm)	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Isıl geçirgenlik direnci (m ² K/W)
D20	4,6	0,055	0,083
D20EN0,125	5,8	0,062	0,094
D20EN0,25	5,6	0,058	0,096
D20EN0,5	6,4	0,057	0,113
D20EN0,75	6,3	0,057	0,110
D20EK0,125	6,6	0,064	0,103
D20EK0,25	7,0	0,065	0,108
D20EK0,5	6,8	0,059	0,116
D20EK0,75	7,9	0,060	0,132
D30	4,6	0,056	0,082
D30EN0,125	6,2	0,055	0,112
D30EN0,25	6,3	0,056	0,112
D30EN0,5	6,3	0,057	0,110
D30EN0,75	6,4	0,059	0,109
D30EK0,125	6,8	0,056	0,122
D30EK0,25	6,8	0,063	0,108
D30EK0,5	6,7	0,061	0,109
D30EK0,75	7,4	0,065	0,113
D40	4,6	0,056	0,083
D40EN0,125	6,0	0,055	0,109
D40EN0,25	5,6	0,056	0,099
D40EN0,5	5,9	0,058	0,103
D40EN0,75	5,7	0,060	0,095
D40EK0,125	5,8	0,057	0,101
D40EK0,25	5,8	0,052	0,112
D40EK0,5	6,2	0,057	0,108
D40EK0,75	5,6	0,067	0,083

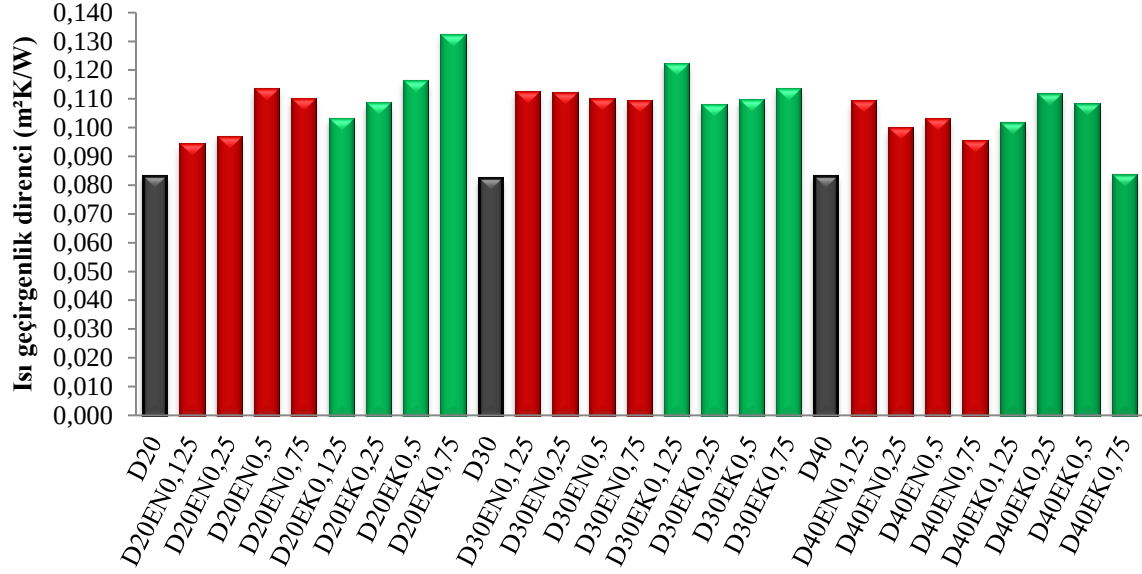
Standartlara göre bir malzemenin yalıtım malzemesi olarak nitelendirilebilmesi için ısı iletkenlik katsayısı değerinin 0,065 W/mK değerinden küçük olması gerekmektedir. Bu sebeple D20EK0,25, D30EK0,75 ve D40EK0,75 kodlu gruplar haricinde üretilen bütün köpükler yalıtım malzemesi sınıfına girmektedir. Köpük malzemelerde ısı iletkenlik katsayısı ne kadar düşüğe malzeme o kadar yalıtkan demektir (Aksoy, 2008; TS 825, 2013; Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Ulukavak Harputlugil ve Kılınç, 2016). Bu doğrultuda en düşük ısı iletim katsayısı değeri 0,052 ile D40EK0,25 kodlu atık PVC köpüklerde belirlenmiştir (Şekil 4.22). Köpük malzemelerde yüksek hücre sayısı ve boşluk hacmi yani düşük yoğunluk, ısı iletkenlik katsayısını düşürmektedir. Isı yalıtım

malzemelerinde genel olarak yoğunluk değerlerinin 0,02-0,1 g/cm³ arasında olması tercih edilmektedir (Özer, 2017). Ticari olarak temin edilebilen PVC köpüğün ısı iletkenlik katsayısı değeri 0,03-0,07 W/mK arasında değişmektedir (Akıncı, 2007; La Rosa ve ark., 2014; Roman, 2018).



Şekil 4.22. Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı grafiği

Üretilen atık PVC köpüklerin Şekil 4.23’de grafiği gösterilen ısıl geçirgenlik dirençleri incelendiğinde; yalıtım malzemesi sınıfına girmeyen gruplar dikkate alınmadan en düşük ısıl geçirgenlik direncine sahip olan grup D20EN0,125 (0,094 m²K/W), en yüksek ısıl geçirgenlik direncine sahip olan grup ise D20EK0,75 (0,132 m²K/W) kodlu gruptur. Atık PVC köpüklerin ısıl geçirgenlik direnci grafikleri incelendiğinde bütün köpükler köpüklendirilmemiş PVC’ye göre daha yüksek ısıl geçirgenlik direnci göstermiştir. Köpük ajanı miktarının artması ile 20 phr DOP içeren köpükler genel olarak artış göstermiş, 30 phr DOP içeren köpüklerin ısıl geçirgenlik direnci birbirine yakın, 40 phr DOP içeren köpüklerde ise köpük ajanı miktarının artması ile endotermik köpük ajanı ile üretilenlerde düşüş eğilimi ekzotermik köpük ajanı ile üretilenlerde ise bir miktar artış göstermiş, ancak 0,75 phr köpük ajanı içeriğinde düşüş gözlemlenmiştir. Genel olarak ekzotermik köpük ajanı kullanılarak üretilen atık PVC köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilenlerinkinden daha yüksek ısıl geçirgenlik direnci sergilemişlerdir. Bunun ekzotermik köpük ajanının daha küçük ve homojen hücre oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Atık PVC köpüklerin ısıl geçirgenlik dirençlerinde genel olarak 30 phr DOP içeren köpükler daha iyi sonuçlar sergilemiştir.



Şekil 4.23. Atık PVC köpüklerin ısıl geçirgenlik direnci grafiği

4.2.4. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı

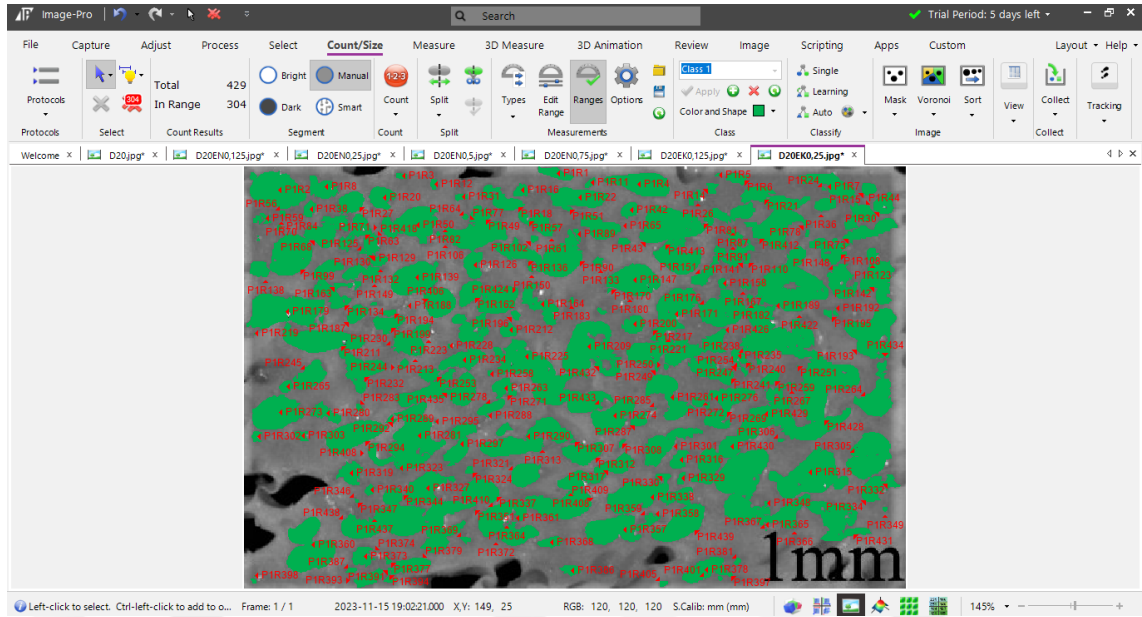
Atık PVC köpüklerin hücre yapısı değerleri Çizelge 4.19’da verilmiştir. Köpüklerin hücre sayısı 52-304 arasında değişmektedir. En fazla hücre sayısı D20EK0,25 kodlu grupta belirlenmiştir. Ortalama hücre boyutu değerleri ise 0,04-0,12 mm aralığındadır. En düşük ortalama hücre boyutu D20EK0,5, en yüksek ortalama hücre boyutu D40EK0,5 kodlu örnek grubuna aittir. Atık PVC köpüklerin hücre yoğunluğu 0,24-3,44 arasındadır. En düşük hücre yoğunluğuna sahip gruplar D40EN0,125 ve D40EN0,75 kodlu gruplar iken en yüksek hücre yoğunluğuna sahip grup D20EK0,25 kodlu gruptur. Atık PVC köpüklerin boşluk oranları % 0,3-57 arasında değişmektedir. Ve en düşük boşluk oranı D30EN0,125 kodlu grupta, en yüksek boşluk oranı D20EK0,5 kodlu grupta belirlenmiştir.

Çizelge 4.19. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı değerleri

Örnek kodu	Hücre sayısı	Hücre boyutu (mm)	Hücre yoğunluğu (Hücre/cm ²)	Boşluk oranı (%)
D20	89	0,044 (0,03)*	0,545	-
D20EN0,125	109	0,103 (0,08)	0,739	20,1
D20EN0,25	275	0,044 (0,05)	2,960	22,8
D20EN0,5	142	0,063 (0,10)	1,098	32,4
D20EN0,75	110	0,066 (0,10)	0,749	40,5
D20EK0,125	107	0,062 (0,11)	0,718	35,3
D20EK0,25	304	0,061 (0,07)	3,440	43,0
D20EK0,5	150	0,039 (0,07)	1,192	57,0
D20EK0,75	136	0,050 (0,07)	1,029	53,6
D30	121	0,070 (0,06)	0,864	-
D30EN0,125	173	0,041 (0,09)	1,477	0,3
D30EN0,25	138	0,062 (0,09)	1,052	14,7
D30EN0,5	64	0,076 (0,07)	0,332	16,7
D30EN0,75	78	0,101 (0,09)	0,447	26,3
D30EK0,125	107	0,072 (0,08)	0,718	19,6
D30EK0,25	279	0,051 (0,07)	3,025	31,1
D30EK0,5	157	0,066 (0,010)	1,277	41,9
D30EK0,75	150	0,102 (0,08)	1,192	36,9
D40	104	0,086 (0,04)	0,688	-
D40EN0,125	52	0,088 (0,11)	0,243	4,6
D40EN0,25	99	0,073 (0,11)	0,639	20,3
D40EN0,5	61	0,079 (0,11)	0,309	28,1
D40EN0,75	52	0,076 (0,13)	0,243	21,1
D40EK0,125	61	0,104 (0,11)	0,309	23,4
D40EK0,25	80	0,092 (0,10)	0,464	35,2
D40EK0,5	68	0,121 (0,12)	0,364	38,3
D40EK0,75	59	0,106 (0,10)	0,294	32,7

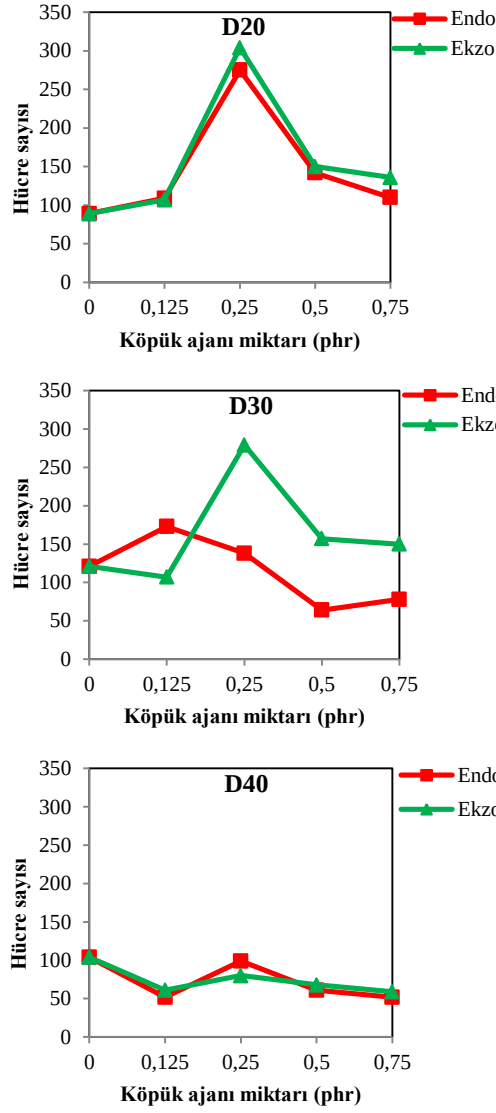
*: Standart sapma değerleri, Görüntü alanı: 133,4 cm²

Atık PVC köpüklerin hücre yapısı İmage Pro analiz programı kullanılarak incelenmiş, hücre sayısı ve hücre boyutu değerleri belirlenmiştir. Analiz görüntüsü Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı analizi

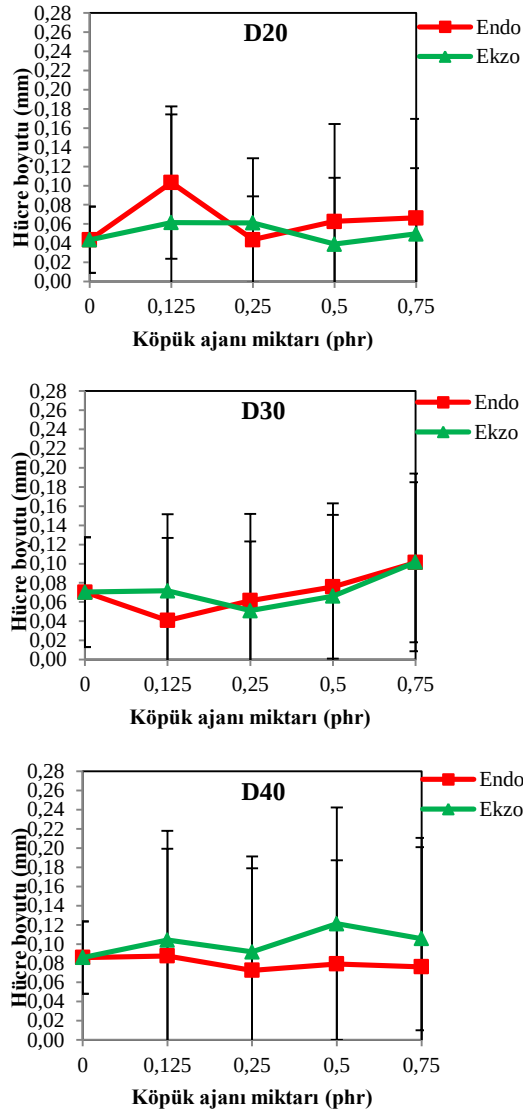
Üretilen atık PVC köpüklerin hücre sayısı grafikleri (Şekil 4.25) incelendiğinde, köpüklerin hücre sayısı 0,25 phr köpük ajanı içeriğinde en yüksek değerleri sergilerken köpük ajanı miktarının artması ile hücre sayısı azalmıştır. Bunun kimyasal köpük ajanı miktarının artması ile artan gaz miktarının fazlalığının hücre birleşmelerine neden olmasından dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004; Mengeloğlu ve ark., 2009). D30EN0,25 kodlu grupta beklenilen aksine daha düşük bir hücre sayısı gözlemlenmiştir. Endotermik ve ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler 20 ve 40 phr DOP içeriğinde birbirine yakın hücre sayısı gösterirken 30 phr DOP içeren köpüklerde genel olarak ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler daha fazla hücre sayısı göstermiştir. Ekzotermik köpük ajanının daha fazla sayıda hücre çekirdeklenmesi sağladığı bilinmektedir (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004; Mengeloğlu ve ark., 2009; Petchwattana ve Covavisaruch, 2011). DOP miktarının artması ile köpüklerin hücre sayısı genel olarak düşüş göstermiştir.



Şekil 4.25. Atık PVC köpüklerin hücre sayısı grafikleri

Atık PVC köpüklerin hücre boyutu grafikleri Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Köpük malzemelerde köpük ajanı miktarının artması ile hücre boyutu bir miktar değişiklikler gösterirken en fazla değişim 30 phr DOP içeren köpüklerde yüksek köpük ajanı içeriğinde (0,5-0,75 phr) meydana gelerek ortalama hücre boyutu artmıştır. Genel olarak ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilenlere göre daha küçük hücre boyutu sergilemiştir. Ekzotermik köpük ajanı termal bozunma sırasında nitrojen gazı açığa çıkarmakta ve bu nitrojen gazı eriyik polimer matris içerisinde iyi çözünebilme ve yayılabilme özelliklerine sahiptir (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004; Mengeloğlu ve ark., 2009; Petchwattana ve Covavisaruch, 2011). Ancak 40 phr DOP içeriğinde durum tersidir. Ekzotermik köpük ajanı daha büyük hücre boyutu göstermiştir. DOP miktarı arttıkça hücre boyutu artmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde de DOP miktarını

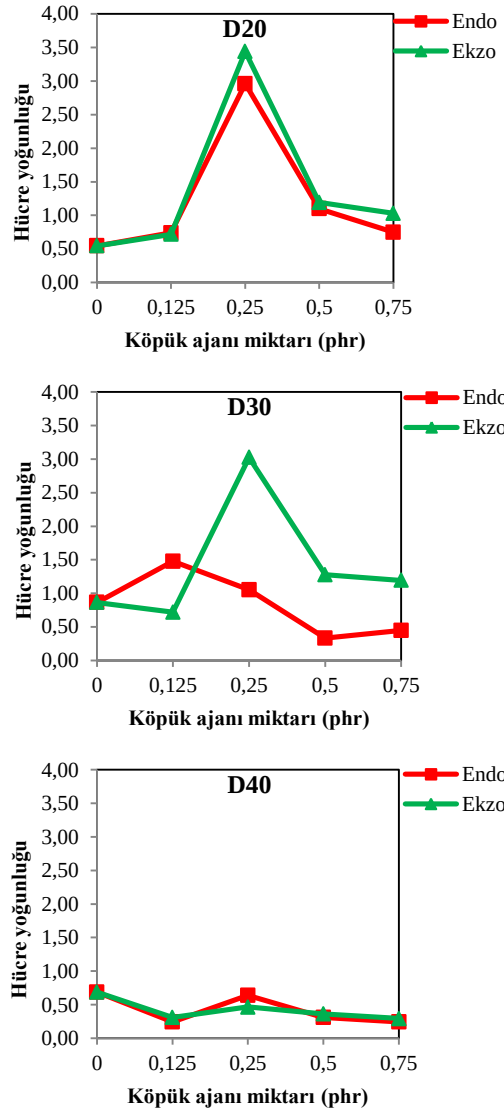
artması ile standart sapma değerleri artış göstermiştir. Bu hücre boyutu dağılımının düzensizliğini açığa çıkarmaktadır. Yani DOP miktarı arttıkça ortalama hücre boyutu dağılımı düzensizleşmiştir. Hücre boyutu ve dağılımı sadece çekirdeklenme sayısına değil aynı zamanda hücre büyümesine de bağlıdır. Hücre büyümesi sırasında polimer matrisin yeterli eriyik dayanımına (melt strength) sahip olmaması hücre birleşmeleri ve hücre çökmelerine neden olmakta ve düzensiz hücre boyutu dağılımı ile sonuçlanmaktadır (Lee, 2008).



Şekil 4.26. Atık PVC köpüklerin hücre boyutu grafikleri

Atık PVC köpüklerin hücre yoğunluğu grafikleri Şekil 4.27’da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde; atık PVC köpüklerde hücre yoğunluğunun hücre sayısı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek hücre yoğunluğu değerlerine sahip köpüklerin 0,25 phr köpük ajanı ile üretilen köpüklerin olduğu belirlenmiştir. Köpük malzemelerde

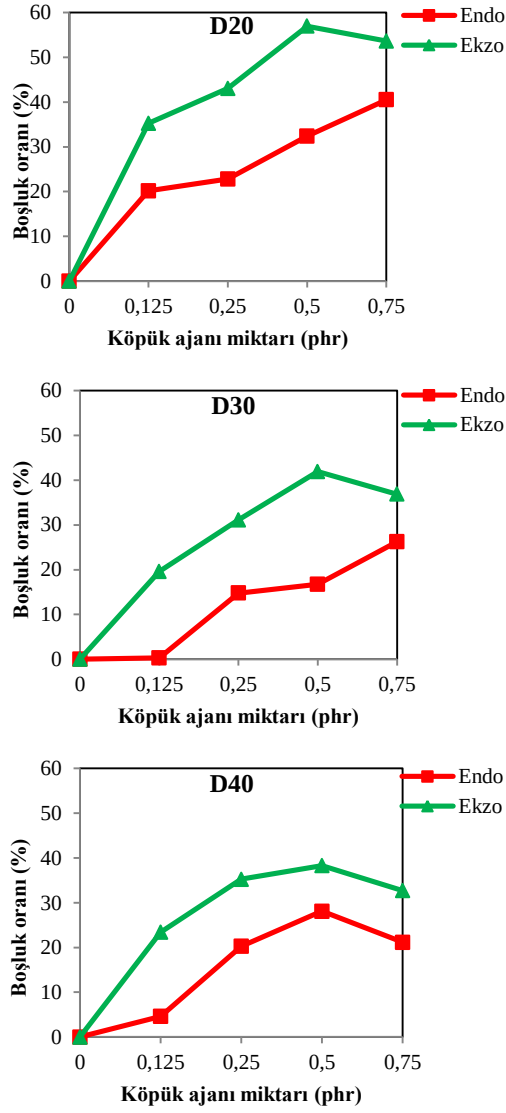
genişleme oranı ve hücre yoğunluğu köpük yapısını karakterize eden ana faktörlerdendir (Lee, 2008). Kimyasal köpük ajanının artması ile üretilen gaz miktarının artması ve buna bağlı olarak çekirdeklenen hücre sayısının artması ve hücre büyümesi ile hücre yoğunluğunun artması beklenen bir durumdur (Farsheh ve ark., 2011; Petchwattana ve Covavisaruch, 2011). Ancak aşırı köpük ajanı içeriğinde polimer malzemenin gaz tutma kapasitesinden dolayı hücre yoğunluğu azalmaktadır (Mengeloğlu, 2001).



Şekil 4.27. Atık PVC köpüklerin hücre yoğunluğu grafikleri

Üretilen atık PVC köpüklerin boşluk oranı grafikleri (Şekil 4.28) incelendiğinde, genel olarak köpük ajanı miktarının artması ile boşluk oranı artış göstermiştir. Ancak 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeriğinde boşluk oranı tekrar düşmektedir. Hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi gazın polimer malzeme içerisinde çözülmesi ve yayılmasına bağlıdır. Eriyik polimer içerisinde gazın çözülmesi ile hücrelerin çekirdeklenmesi ve

büyümesi boşluk oranını artıracak, köpük üretimi sırasında üretilen gazın dışarı kaçması ise boşluk oranını azaltacaktır (Matuana ve Mengeloğlu, 2001). TGA grafiklerinde de görüldüğü üzere (Şekil 4.3 ve Şekil 4.5), endotermik köpük ajanının gaz verimi ekzotermik köpük ajanının gaz verimine göre daha düşüktür. Buna bağlı olarak endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklerde daha yüksek miktarlarda köpük ajanına ihtiyaç duyulmaktadır (Eaves, 2004). Bu nedenle 0,75 phr endotermik köpük ajanı içeriğinde boşluk oranı ekzotermik köpük ajanı ile üretilenlerinkinin aksine artmaya devam etmektedir. Ancak 40 phr DOP içeren köpüklerde 0,75 phr endotermik köpük ajanı içeriğinde boşluk oranı düşüş göstermiştir. Yüksek DOP içeriğinin polimer matrisin viskozitesini aşırı düşürmesi, hücre büyümesi aşamasında eriyik polimerin yeterli direnç sağlayamaması sonucu soğutma esnasında hücre duvarının çökmesine sebep olmaktadır. Bu da boşluk oranının azaltılmaktadır. Ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere kıyasla daha fazla boşluk oranına sahip olduğu görülmektedir. DOP miktarı arttıkça boşluk oranı azalmıştır. DOP miktarın artması ile polimer matrisin erime viskozitesi düşüş göstermektedir. Erime viskozitesinin düşmesi, polimerin eriyik dayanımının düşmesi anlamına gelmekte ve bu da hücre büyümesi aşamasında hücre çökmelerinin meydana gelmesine ve dolayısıyla boşluk oranının azalmasına buna bağlı olarak da yoğunluk artışına neden olmaktadır (Eaves, 2004).

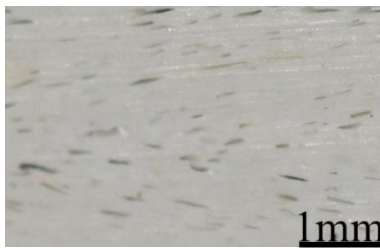


Şekil 4.28. Atık PVC köpüklerin boşluk oranı grafikleri

Atık PVC köpüklerin hücre yapısı görüntüleri Şekil 4.29’de gösterilmiştir. Köpüklendirilmemiş PVC’lerde de bir miktar hücre oluşmasının PVC’nin atık olması ve içerisinde % 40’dan fazla kalsit ve farklı inorganik malzemeler içermesinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Literatürde polimer matrisin safsızlığından dolayı polimer malzemede önceden bulunan boşlukların bulunabilmesi ve üretim sırasında bu malzemelerin çekirdeklendirici ajan görevi görebilmesi öne sürülmektedir (Lee ve Park, 2014).

Atık PVC köpüklerde hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi için gereken gaz miktarının 0,125 köpük ajanı içeriğinde yeterli olmadığı ve köpüklendirmenin polimer matrisin her yerinde tam olarak sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Köpük ajanı miktarının artması ile köpüklenme gerçekleşmiş ve 0,25 phr köpük ajanı içeriğinde hücre sayısının arttığı ve daha küçük homojen hücre oluştuğu görülmüştür. Köpük ajanı miktarının

artmaya devam etmesi daha büyük hücrelerin oluşması, hücre birleşmelerinin meydana gelmesi ve hücre yapısının düzensizleşmesine sebep olmuştur. Köpük malzemelerde köpük ajanı miktarının yüksek olması ve dolayısıyla eriyik polimer içerisinde gerekenden fazla gaz üretmesi hücrelerin boyutlarını artırmakta ve hücre birleşmelerine sebep olarak düzensiz bir hücre yapısı vermektedir (Farsheh ve ark., 2011; Aydemir, 2012). Üretilen atık PVC köpüklerin hücre yapısı görüntülerinde en iyi hücre yapısı 0,25 phr köpük ajanı içeren köpüklerde gözlemlenmiştir. Ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre daha küçük ve homojen bir hücre yapısı sergilemiştir. Ekzotermik köpük ajanı termal bozunma sırasında daha düşük çözünürlük ve daha yüksek yayılma özelliklerine sahip nitrojen gazı açığa çıkarmaktadır. Köpük üretiminde açığa çıkan gazın eriyik polimer içerisinde daha iyi çözünmesi ve yayılması daha düzenli bir hücre yapısı sağlamaktadır (Mengeloğlu, 2001; Eaves, 2004; Mengeloğlu ve ark., 2009; Petchwattana ve Covavisaruch, 2011). DOP miktarının artması ile daha büyük hücreler oluştuğu, hücre birleşmeleri ve hücre çökmelerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Köpük üretiminde çekirdeklenen hücrelerin büyümesi polimer matrisin erime viskozitesi tarafından kontrol edilmektedir (Mengeloğlu, 2001). DOP miktarının artması ile (özellikle 40 phr DOP içeren köpüklerde) polimer matrisin akışkanlığının artması ve eriyik dayanımının düşmesi fazla miktarda hücre birleşmesi ve hücre çökmesinin meydana gelmesiyle sonuçlanmaktadır. Atık PVC köpüklerin üretim esnasında basınç farkı oluşturulması aşamasında oluşan gazın dışarı çıkarken hücre duvarını parçaladığı ya da hücre duvarının çöktüğü ve hücrelerin gazın çıkış yönüne doğru (presin kenarlarına) yönelerek daha elips şeklinde hücrelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.



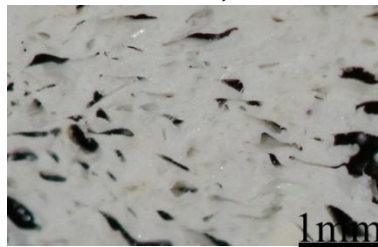
D20



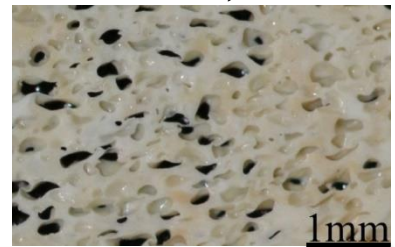
D20EN0,125



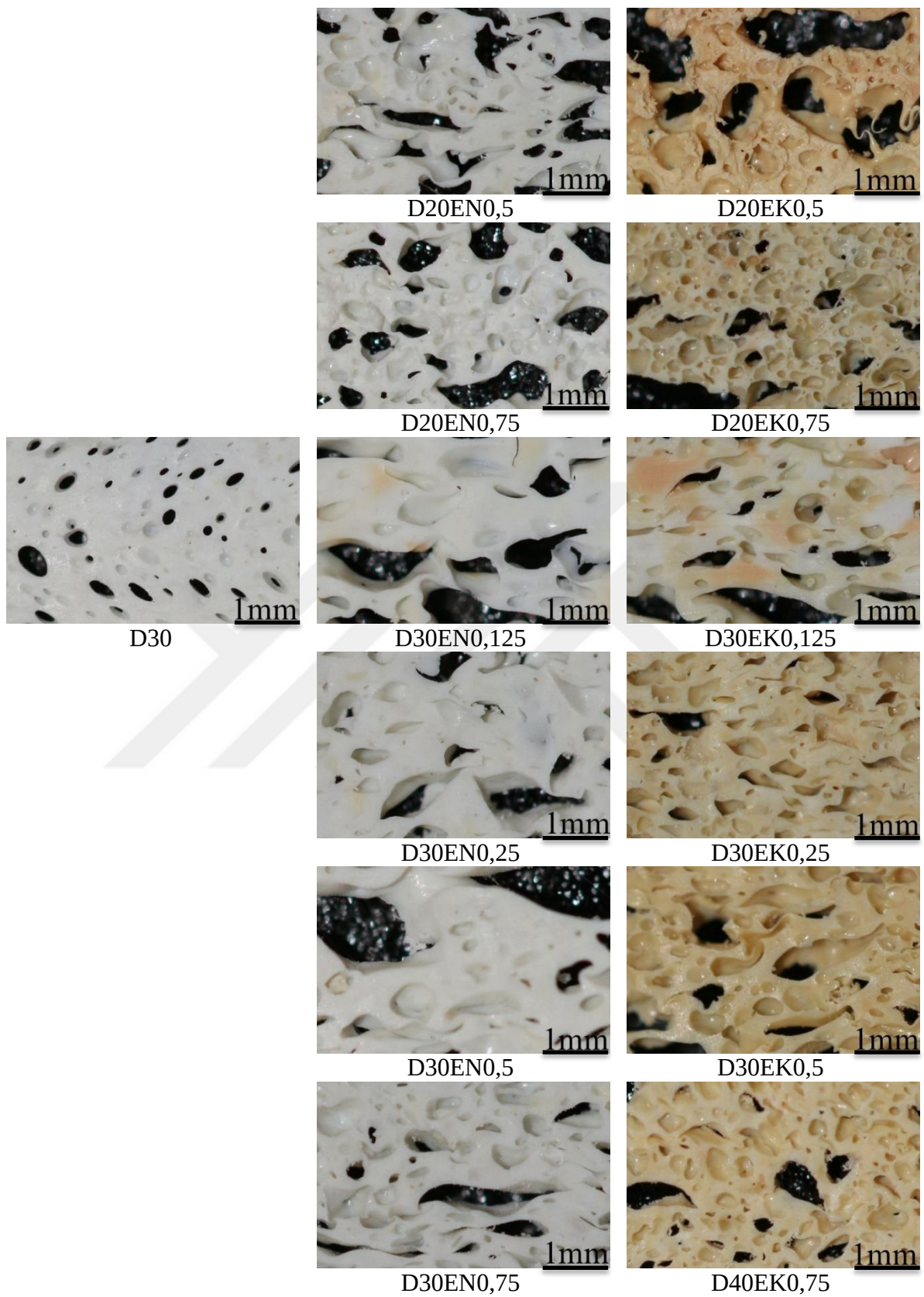
D20EK0,125

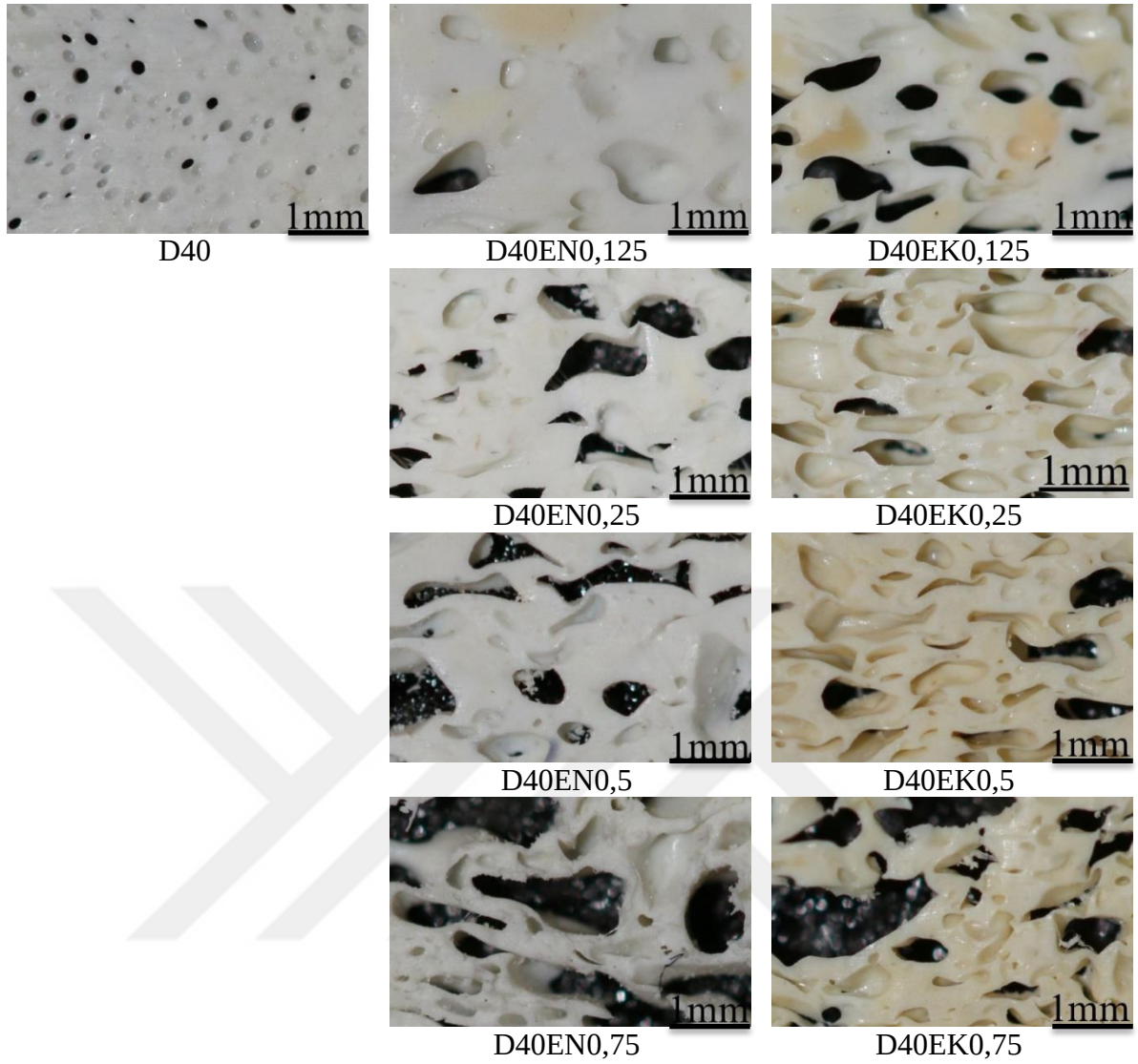


D20EN0,25



D20EK0,25





Şekil 4.29. Atık PVC köpüklerin hücre yapısı görüntüleri

Üretilen atık PVC köpüklerin belirlenen ve yukarıda verilen bütün özellikleri değerlendirildiğinde, en düşük yoğunluk D20EK0,5 kodlu gruba aittir. Çekme özellikleri incelendiğinde en iyi spesifik çekme direnci ve çekmede elastikiyet modülü değeri D20EN0,5, spesifik kopmada uzama değeri ise D40EK0,5 kodlu grupta belirlenmiştir. En iyi eğilme özellikleri gösteren grup ise D20EN0,125 kodlu gruptur. En yüksek spesifik darbe direnci değeri D30EK0,125 kodlu grupta gözlemlenmiştir. Isı iletim özellikleri değerlendirildiğinde en yüksek ısıl geçirgenlik direnci D20EK0,75 kodlu gruba aittir. Köpüklerin hücre yapısı değerleri incelendiğinde en yüksek hücre sayısı ve hücre yoğunluğu D20EK0,25 kodlu grupta, en yüksek boşluk oranı ve en düşük hücre çapı D20EK0,5 kodlu grupta belirlenmiştir. Görüntüler incelendiğinde en iyi hücre yapısı D20EK0,25 ve D30EK0,25 kodlu gruplarda gözlemlenmiştir. Elde edilen bu bilgiler doğrultusunda endotermik köpük ajanı içeren köpüklerin spesifik direnç değerlerinin

yüksek olmasının köpüklenmenin yetersiz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Isı iletkenlik özellikleri ve hücre yapısı özelliklerinde genel olarak en iyi sonuçları 20 DOP içeren ve ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler vermiştir. Köpük ajanı miktarı değerlendirildiğinde optimum köpük ajanı miktarının 0,25 phr olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak en iyi sonucu veren grup D20EK0,25 kodlu gruptur.

Kullanılan atık PVC'nin içerisinde %40'dan fazla inorganik malzeme içermesi polimer malzemenin erime viskozitesini artırarak hücrelerin oluşmasını engellemektedir. Yapılan deneme çalışmalarında 0, 10 ve 15 phr içeriğinde üretimler gerçekleştirilemediğinden DOP miktarı üretim planında minimum olarak 20 olarak dizayn edilmiştir. Buradan yola çıkarak kompozit köpük üretiminde lignoselülozik malzemelerinde eklenmesiyle 20 phr DOP miktarının da yetersiz kalmasından ve köpüklenmenin tam olarak sağlanamama olasılığından dolayı optimum köpük grubu D30EK0,25 kodlu grup olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde bu grup içeriği (100 phr PVC - 30 phr DOP - 0,25 phr ekzotermik kimyasal köpük ajanı - 1 phr Ca/Zn stabilizatör) kullanılarak kompozit köpük üretim planı hazırlanmış ve atık PVC kompozit köpükler bu üretim planı takip edilerek üretilmiştir.

4.3. Atık PVC Kompozit ve Kompozit Köpüklerin Özellikleri

4.3.1. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin fiziksel özellikleri

Bu bölümde bir önceki bölümden seçilen optimum atık PVC köpük içeriği ile atık PVC kompozit köpükler üretilmiş ve özellikleri belirlenmiştir. Sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla her bir kompozit köpük formülasyonu için aynı formülasyona sahip kompozitler üretilmiş ve kompozit ile kompozit köpüklerin özellikleri kıyaslanmıştır.

Atık PVC kompozitlerin yoğunluk değerleri 1,25-1,41 g/cm³ arasında değişiklik gösterirken atık PVC kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri 0,85-1,15 g/cm³ arasında değişiklik göstermektedir (Çizelge 4.20). Atık PVC kompozitlerde en düşük yoğunluğa sahip K-AK40-10 (10 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozitler) kodlu grupken en yüksek yoğunluğa sahip grup K-AK<100-15 (15 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozitler)'dir. Atık PVC kompozit köpüklerde ise en düşük yoğunluk değeri KÖ-K40-20 (20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubunda, en yüksek yoğunluk değeri ise KÖ-K<100-20 (20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit

köpükler) ve KÖ-AK<100-20 (20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler) grubunda belirlenmiştir.

Çizelge 4.20. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri

Örnek kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Örnek kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk düşüşü (%)
D30 (Kontrol)	1,112 (0,05)*	D30EK0,25(Kontrol)	0,766 (0,04)	31
K-K40-5	1,393 (0,00)	KÖ-K40-5	1,031 (0,04)	26
K-K40-10	1,388 (0,01)	KÖ-K40-10	0,993 (0,10)	28
K-K40-15	1,376 (0,01)	KÖ-K40-15	0,942 (0,13)	32
K-K40-20	1,367 (0,01)	KÖ-K40-20	0,853 (0,11)	38
K-K<100-5	1,410 (0,01)	KÖ-K<100-5	0,954 (0,10)	32
K-K<100-10	1,404 (0,01)	KÖ-K<100-10	1,044 (0,08)	26
K-K<100-15	1,409 (0,01)	KÖ-K<100-15	1,048 (0,11)	26
K-K<100-20	1,398 (0,02)	KÖ-K<100-20	1,152 (0,07)	18
K-AK40-5	1,379 (0,02)	KÖ-AK40-5	1,063 (0,10)	23
K-AK40-10	1,253 (0,03)	KÖ-AK40-10	1,001 (0,10)	20
K-AK40-15	1,335 (0,01)	KÖ-AK40-15	0,975 (0,09)	27
K-AK40-20	1,333 (0,01)	KÖ-AK40-20	0,887 (0,10)	33
K-AK<100-5	1,409 (0,01)	KÖ-AK<100-5	1,056 (0,09)	25
K-AK<100-10	1,405 (0,01)	KÖ-AK<100-10	1,105 (0,09)	21
K-AK<100-15	1,414 (0,01)	KÖ-AK<100-15	1,050 (0,18)	26
K-AK<100-20	1,411 (0,00)	KÖ-AK<100-20	1,152 (0,07)	18

*: Standart sapma değerleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin istatistik analiz sonuçlarına göre yoğunluk değerleri üzerine dolgu malzemesi türünün etkisinin olmadığı görülürken dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.21).

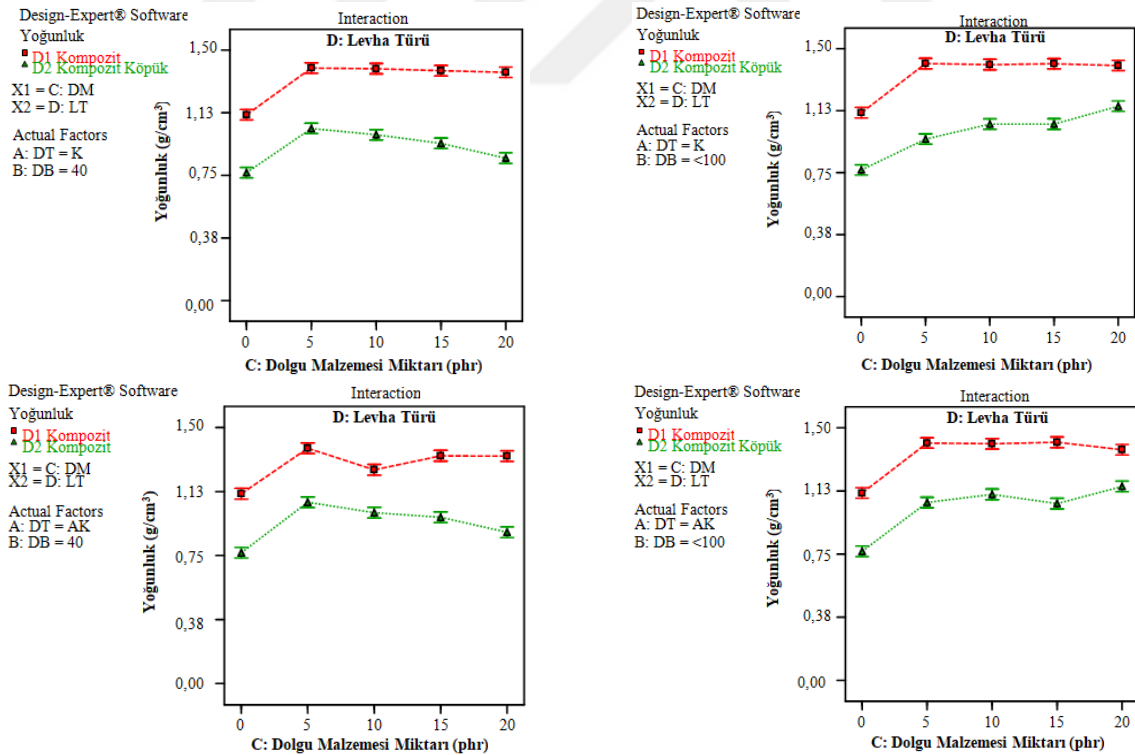
Çizelge 4.21. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	18.30	39	0.47	92.75	< 0.0001 significant
A-DT	2.120E-004	1	2.120E-004	0.042	0.8379
B-DB	0.36	1	0.36	71.65	< 0.0001
C-DM	4.31	4	1.08	212.86	< 0.0001
D-LT	12.66	1	12.66	2502.45	< 0.0001
AB	0.017	1	0.017	3.45	0.0642
AC	0.024	4	6.087E-003	1.20	0.3091
AD	0.069	1	0.069	13.56	0.0003
BC	0.37	4	0.093	18.30	< 0.0001
BD	0.043	1	0.043	8.59	0.0036
CD	0.036	4	9.110E-003	1.80	0.1282
ABC	0.038	4	9.389E-003	1.86	0.1177
ABD	4.733E-003	1	4.733E-003	0.94	0.3341
ACD	0.029	4	7.355E-003	1.45	0.2159
BCD	0.29	4	0.073	14.38	< 0.0001
ABCD	0.017	4	4.260E-003	0.84	0.4993
Hata	1.82	359	5.060E-003		
Toplam	20.12	398			

DT : Dolgu malzemesi türü, DB : Dolgu malzemesi boyutu, DM : Dolgu malzemesi miktarı, LT : Levha türü.

Şekil 4.30’da atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk grafikleri verilmiştir. Üretilen bütün kompozitlerin yoğunluk değerleri kompozit köpüklerin yoğunluk değerlerinden daha yüksektir. Kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri kontrol örneklerine göre dolgu malzemesi türü fark etmeksizin lignoselülozik dolgu malzemesinin eklenmesi ile artış göstermiştir. Lignoselülozik dolgu malzemelerinin polimer içerisine eklenmesi karışımın erime viskozitesini etkilemektedir (Kozlowski ve ark., 2008). Lignoselülozik malzemelerin ilave edilmesi ile viskozitesi artan karışımda daha yüksek eriyik dayanımı meydana gelerek gaz çözünürlüğü azalmakta ve hücrelerin büyümesi zorlaşmaktadır (Mengeloğlu ve Matuana, 2003). Ayrıca lignoselülozik dolgu malzemeleri polimer kompozitlerin köpüklendirilmesi sırasında heterojen çekirdeklenmeye yol açabilmektedir. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi polimer ve lignoselülozik malzeme arasındaki boşlukların bulunması ikincisi ise lignoselülozik malzemenin düşük yüzey alanına sahip olmasıdır (Faruk ve ark., 2007; Kim ve Pal, 2011; Kılıç, 2012). Kompozitlerde dolgu malzemesi miktarının artması ile yoğunluk değerleri genel olarak sabit devam ederken kompozit köpüklerde dolgu malzemesi arttıkça 40 mesh dolgu malzemesi içeren kompozit köpüklerde yoğunluk değerleri düşmüştür. Köpüklendirme prosesinde yoğunluk azaltımı, çekirdeklenme sayısı ve hücre büyümesi ile doğru orantılıdır. Ne kadar çok çekirdeklenme ve hücre büyümesi meydana gelirse yoğunluk

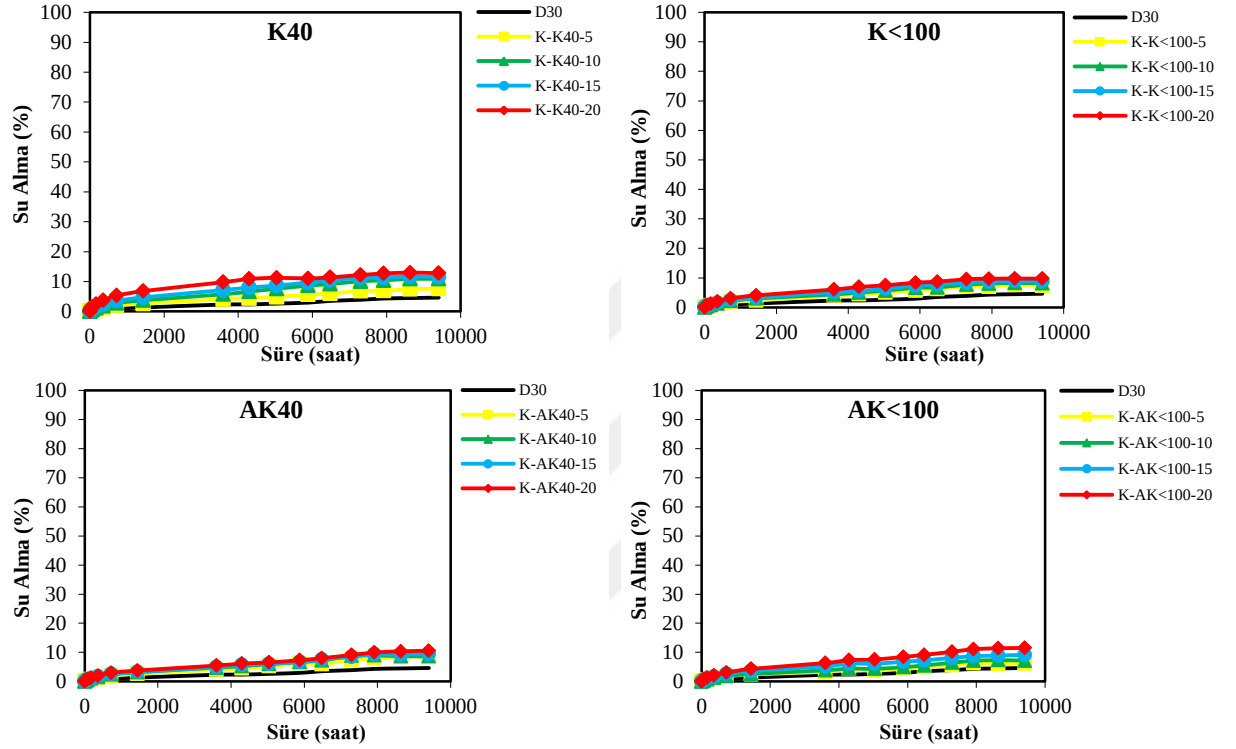
azaltımı da o kadar fazla meydana gelmektedir. Kompozitlerin köpüklendirilmesinde ise dolgu malzemelerinin de çekirdekendirici görev yapması hücre çekirdeklenmesini artırarak yoğunluk düşmesine yardımcı olmaktadır (Aydemir, 2012). <100 mesh dolgu malzemesi içeren kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri ise artış göstermiştir. Daha küçük dolgu malzemesi boyutunda polimer malzeme ve lignoselülozik malzeme boyutları birbirine daha yakın olduğundan daha homojen bir karışım elde edildiği düşünülmektedir. Kompozit köpüklerde dolgu malzemesi miktarının artması eriyik viskozitesinin artmasına neden olarak hücre büyümesi sırasında yüksek eriyik dayanımı sağlamaktadır. Eriyik dayanımının artması çekirdeklenen hücrelerin büyümesini engellemektedir (Mengeloğlu, 2001; Mengeloğlu ve ark., 2009; Karakuş, 2012). Ayrıca kompozit köpük üretimi sırasında kimyasal köpük ajanı tarafından üretilen gaz sadece polimer fazında çözünmektedir. Karışım içerisindeki lignoselülozik dolgu malzemeleri gazın çözünmesini kısıtlamaktadır (Faruk ve ark., 2007; Kim ve Pal, 2010). Genel olarak kompozit ve kompozit köpüklerde yoğunluk değerleri dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe artmıştır. Dolgu malzemesi boyutunun küçülmesi eriyik dayanımını artırmakta ve hücre büyümesini sınırlandırmaktadır (Abdul Azam ve ark., 2020).



Şekil 4.30. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin yoğunluk grafikleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin su alma grafikleri Şekil 4.31 ve Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Atık PVC kompozitlerin su alma oranları atık PVC kompozit

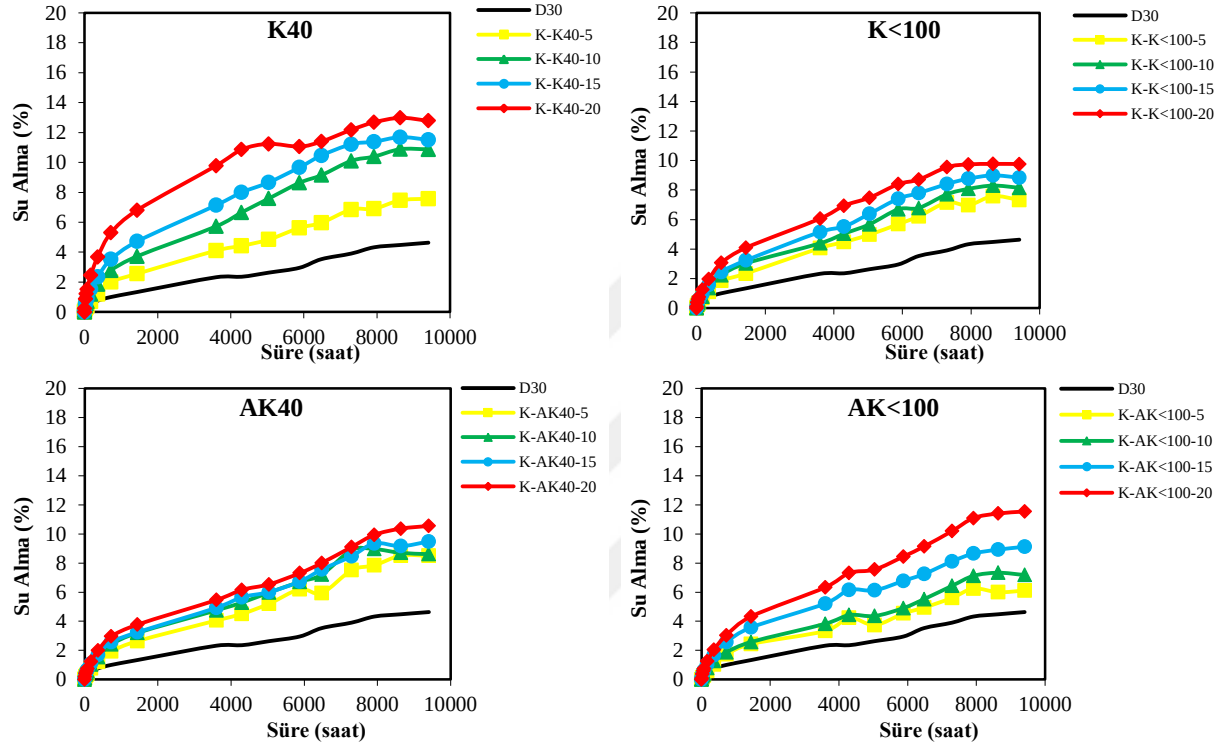
köpüklerin su alma oranları ile karşılaştırıldığında kompozitlerin su alma oranları çok daha düşüktür. Kompozitlerin su alma oranları yaklaşık olarak % 10'larda iken kompozit köpüklerin su alma oranları % 40 seviyelerindedir. Bunun hücresel yapıya sahip olan kompozit köpüklerin suyu bünyesine öncelikle bu hücreler içerisine kolaylıkla almasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Su moleküllerinin hücreler boyunca difüze olması fiziksel bir olaydır (May-Pat ve Aviles, 2014).



Şekil 4.31. Atık PVC kompozitlerin su alma grafikleri

Atık PVC kompozitlerin su alma grafiklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi açısından Şekil 4.32'de büyütülerek tekrar gösterilmiştir. Kompozitlerde en az su alma oranı K-AK<100-5 grubunda en fazla su alma oranı ise K-K40-20 grubunda görülmüştür. Atık PVC kompozitlerin su alma oranları değerlendirildiğinde bütün kompozitlerde su alma miktarı kontrol grubuna göre yani saf atık PVC'nin su alma miktarına göre daha yüksektir. Bu durum lignoselülozik malzemenin su alma özelliğinden kaynaklanmaktadır. Saf atık PVC'nin su alma oranı yaklaşık % 4'tür. Kompozitlerin su alma oranı ise % 10 hatta %12'lere kadar çıkmaktadır. Kompozitlerde lignoselülozik dolgu malzemesi miktarı arttıkça su alma oranı artış göstermiştir. Su alma oranı lignoselülozik dolgu malzemesinin boyutunun küçülmesi ile kavak atığı ile üretilen kompozitlerde genel olarak az bir miktar düşerken ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlerde önemli bir fark belirlenmemiştir. Kavak testere atığı ile üretilen kompozitler, genel olarak ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlere

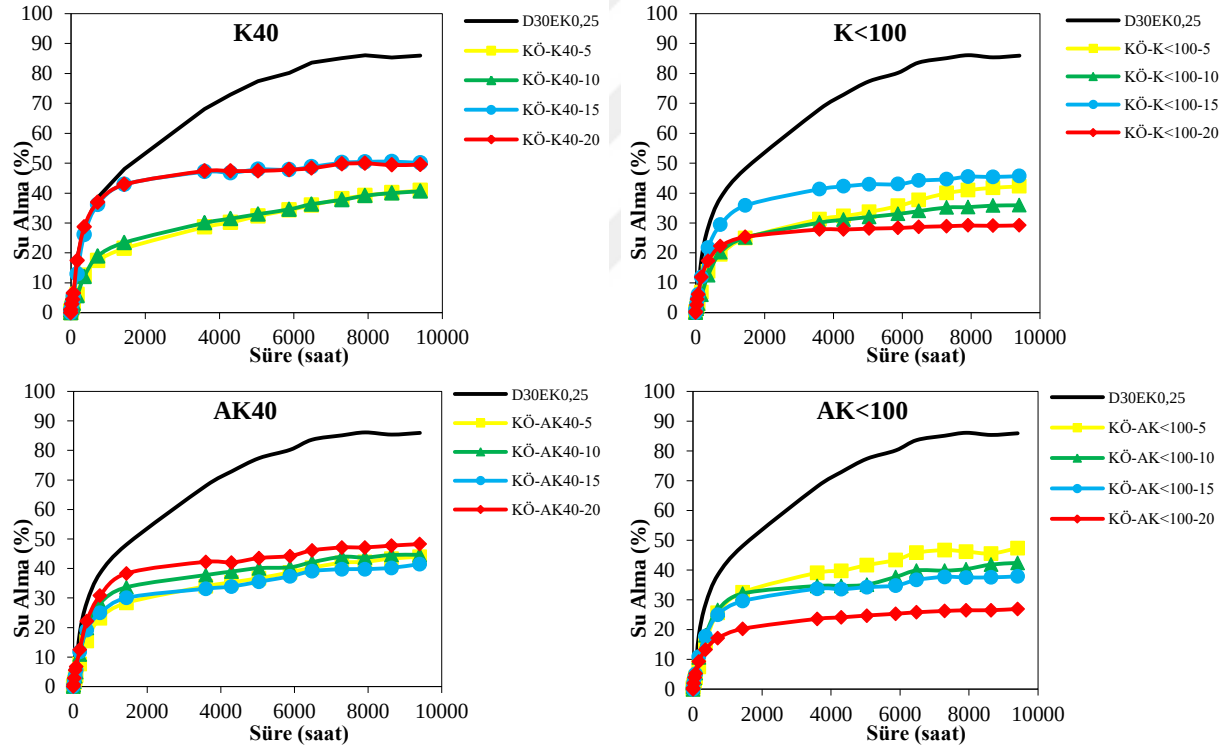
göre daha fazla su alma oranına sahiptir. Lignoselülozik malzemelerin hidrofilik özellikleri, içerisinde bulunan ve ana bileşenleri olan selüloz ve hemiselüloz gruplarının yapılarında bulunan OH^- gruplarından gelmektedir. Ağaç kabuğu odunla kıyaslandığında daha az (neredeyse yarısı kadar) selüloz içermektedir. Ayrıca su itici özelliği bulunan ekstraktif madde içeriği de oduna göre daha yüksektir (Dönmez ve Dönmez, 2013; Pasztory ve ark., 2016).



Şekil 4.32. Atık PVC kompozitlerin su alma grafikleri

Atık PVC kompozit köpüklerin su alma grafiği incelendiğinde (Şekil 4.33) bütün kompozit köpükler doygunluk noktasına ulaşınca kadar daldırma süresinin artması ile hızlı bir şekilde artmıştır. Doygunluk noktasına ulaşıldığında su alma oranı sabit devam etmiştir. Bu absorpsiyon davranışı difüzyonun iki aşaması olarak ayrılmaktadır. İlk aşama hızlı difüzyon ve yüksek su alma oranı, ikinci aşama daha yavaş ve daha az su alma oranı olarak meydana gelmektedir. Köpük malzemelerin su alma eğilimleri hücre yapısına bağlıdır (Petchwattana ve ark., 2013). Saf PVC köpükler kompozit köpüklere göre daha fazla hücre yoğunluğuna sahip olduğundan daha uzun sürede doygunluk noktasına ulaşmıştır. Kompozit köpüklerin su alma oranının atık PVC köpüğün su alma oranı ile karşılaştırıldığında daha az olduğu belirlenmiştir. Dolgu malzemesi içermeyen saf atık PVC köpüğün su alma oranı % 80'leri geçerken kompozit köpüklerin su alma oranları ortalama olarak % 40 civarındadır. Su alma oranı hücre boyutu ve hücre yoğunluğundan

doğrudan etkilenmektedir. Kompozit köpüklerde boşluk oranı arttıkça su alma oranı artmaktadır (Farsheh ve ark., 2011). Köpük üretiminde polimer içerisine dolgu malzemesi eklenmesi hücre yapısını etkilemiş, hücre oluşumunu engelleyerek hücre sayısının azalmasına ve düzensizleşmesine neden olmuştur. 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda su alma oranlarına birbirine yakın olmakla birlikte genel olarak dolgu malzemesi miktarının artması ile su alma oranı artış göstermiştir. <100 mesh dolgu malzemesi boyutunda lignoselülozik dolgu malzemesi miktarı arttıkça su alma oranı azalmıştır. Ancak 15 phr kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler kontrol örneğinden sonra en fazla su alma oranına sahip kompozit köpüklerdir. Dolgu malzemesi türü fark etmeksizin lignoselülozik dolgu malzemelerinde boyut küçüldükçe su alma oranı azalmıştır. Atık PVC kompozit köpüklerde genel olarak kavak testere atığı ve ağaç kabuğu ile üretilen kompozit köpükler birbirine yakın su alma oranları göstermişlerdir.

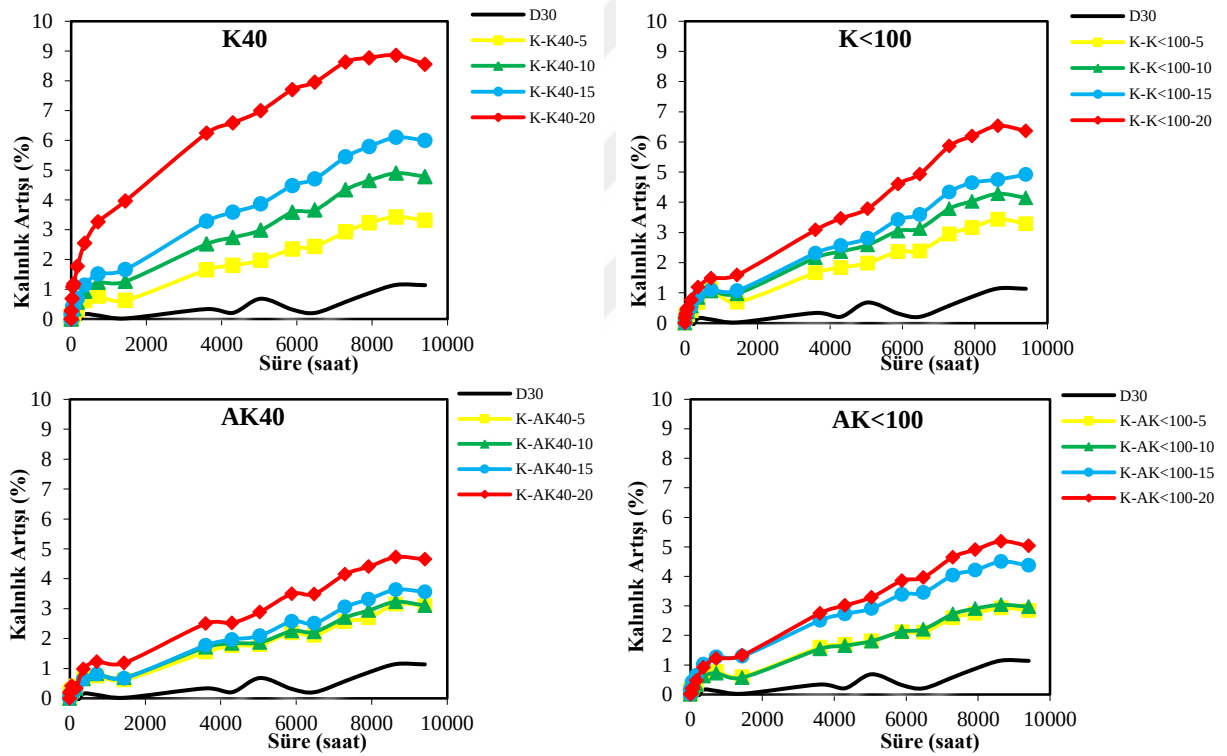


Şekil 4.33. Atık PVC kompozit köpüklerin su alma grafikleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kalınlık artımı grafikleri Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Atık PVC kompozitlerin kalınlık artımı oranı atık PVC kompozit köpüklerin kalınlık artımı ile yakın oranlar gösterirken 40 mesh kavak testere atığı ile üretilen yüksek lignoselülozik dolgu malzemesi içeren (15 ve 20 phr) kompozitlerde kalınlık artımı kompozit köpüklerinkinden daha yüksektir. Kompozitlerin su alma oranları kompozit köpüklerin su alma oranlarından çok daha düşükken kalınlık

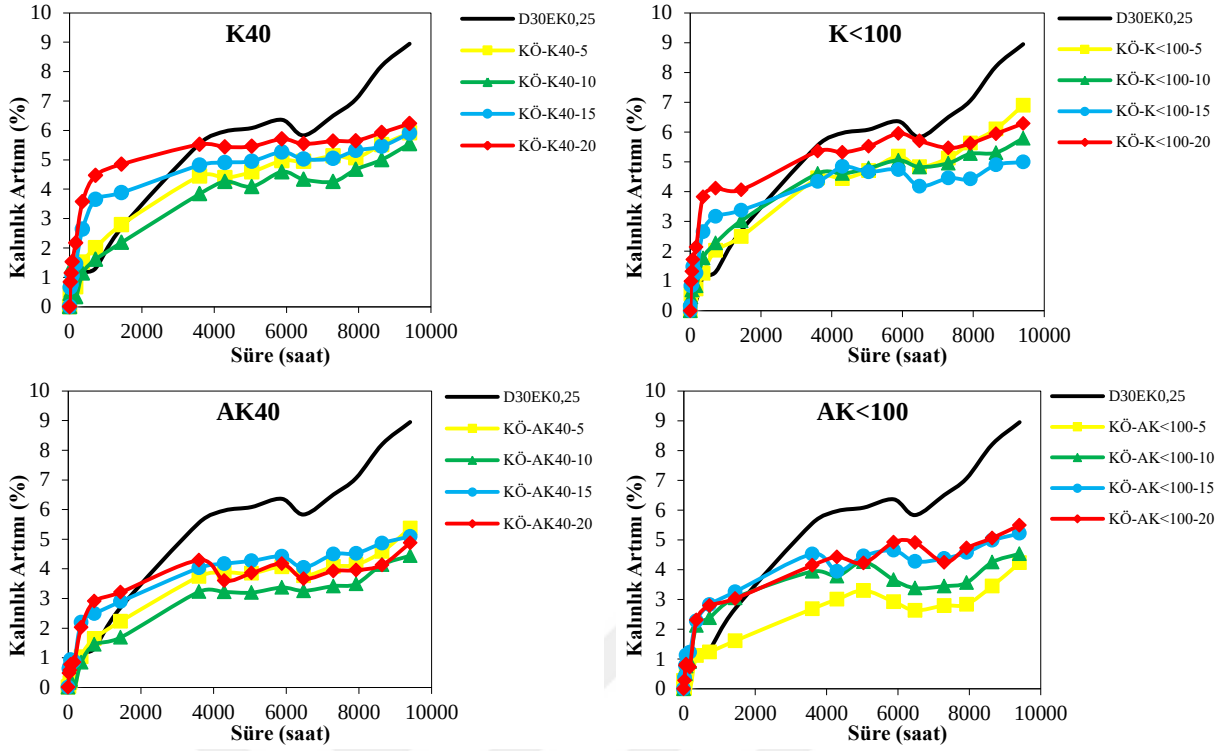
artımlarının birbirine yakın olması, kompozit köpüklerin suyu hücrelerin içine aldığını ve bu olayın fiziksel olduğunu göstermektedir.

Atık PVC kompozitlerin tamamının kalınlık artım oranlarının kontrol grubunun yani saf atık PVC'nin kalınlık artımına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.34). Bu, lignoselülozik malzemenin hidrofilik yapısından kaynaklanmaktadır. Kompozitlerde lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile kalınlık artımı artış göstermiştir. Kavak ile üretilen kompozitlerde lignoselülozik dolgu maddesi boyutu küçüldükçe kalınlık artımı azalmıştır. Ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlerde ise lignoselülozik dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe kalınlık artımı az bir miktar artmıştır. Kavak ile üretilen kompozitler ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlere göre daha yüksek kalınlık artımı sergilemişlerdir.



Şekil 4.34. Atık PVC kompozitlerin kalınlık artımı grafikleri

Atık PVC kompozit köpüklerin kalınlık artımı grafikleri Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Kompozit köpüklerin kalınlık artımı oranı genel olarak kontrol grubunun kalınlık artımına göre daha düşüktür. Lignoselülozik dolgu malzemelerinde boyut küçüldükçe kompozit köpüklerin kalınlık artımı yaklaşık % 1 oranında artmıştır. Kavak testere atığı ile üretilen kompozit köpükler ağaç kabuğu ile üretilen kompozit köpüklere göre daha fazla kalınlık artımı göstermiştir.



Şekil 4.35. Atık PVC kompozit köpüklerin kalınlık artımı grafikleri

4.3.2. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin mekanik özellikleri

Üretilen atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme testi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.23'te verilmiştir. Atık PVC kompozitlerin çekme direnci değerleri 4,30-6,18 MPa arasındadır. En düşük çekme direnci değerini K-K40-10 (10 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubu, en yüksek çekme direnci değerini K-AK<100-20 (20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozitler) grubu vermiştir.

Atık PVC kompozit köpüklerin çekme direnci değerleri ise 1,67-3,42 MPa arasında değişmektedir. En düşük çekme direnci 1,67 MPa ile KÖ-AK40-15 (15 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler), en yüksek çekme direnci 3,42 ile KÖ-K<100-20 (20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubundadır.

Çizelge 4.22. Atık PVC kompozitlerin çekme değerleri

Örnek kodu	Çekme direnci (MPa)	Çekmede elastikiyet modülü (MPa)	Kopmada uzama (%)
Kontrol	5,00 (0,39)*	17,55 (1,94)	135,41 (27,76)
K-K40-5	5,32 (0,17)	64,51 (3,66)	66,18 (9,40)
K-K40-10	4,30 (0,19)	91,23 (4,36)	23,75 (3,36)
K-K40-15	4,64 (0,15)	119,71 (5,37)	16,04 (2,26)
K-K40-20	5,49 (0,22)	177,51 (4,69)	8,37 (0,92)
K-K<100-5	5,03 (0,22)	46,47 (2,49)	57,84 (7,68)
K-K<100-10	4,66 (0,31)	59,47 (2,29)	39,30 (10,16)
K-K<100-15	5,27 (0,10)	90,88 (7,59)	23,36 (2,86)
K-K<100-20	5,43 (0,55)	105,11 (5,89)	16,38 (3,26)
K-AK40-5	5,34 (0,26)	55,50 (3,09)	60,03 (6,54)
K-AK40-10	4,50 (0,36)	62,93 (5,74)	38,45 (4,55)
K-AK40-15	4,64 (0,07)	85,42 (3,60)	31,59 (3,74)
K-AK40-20	4,83 (0,10)	111,13 (5,55)	23,55 (3,85)
K-AK<100-5	5,76 (0,28)	52,75 (5,11)	63,14 (11,54)
K-AK<100-10	5,63 (0,60)	69,61 (22,22)	42,98 (8,40)
K-AK<100-15	5,65 (0,32)	84,28 (2,43)	28,42 (5,82)
K-AK<100-20	6,18 (0,21)	100,21 (3,81)	21,29 (3,32)

*: Standart sapma değerleri

Çizelge 4.23. Atık PVC kompozit köpüklerin çekme değerleri

Örnek kodu	Çekme direnci (MPa)	Çekmede elastikiyet modülü (MPa)	Kopmada uzama (%)
Kontrol	1,54 (0,32)*	6,22 (1,82)	53,23 (12,51)
KÖ-K40-5	1,88 (0,35)	11,47 (1,77)	31,83 (6,50)
KÖ-K40-10	2,10 (0,31)	18,60 (4,22)	21,56 (3,38)
KÖ-K40-15	2,30 (0,39)	25,14 (4,45)	16,16 (3,28)
KÖ-K40-20	2,32 (0,32)	29,32 (4,60)	14,84 (2,83)
KÖ-K<100-5	1,77 (0,28)	11,33 (2,27)	26,72 (5,35)
KÖ-K<100-10	1,76 (0,49)	15,83 (4,52)	17,59 (2,77)
KÖ-K<100-15	3,07 (0,72)	34,26 (9,48)	17,14 (5,06)
KÖ-K<100-20	3,42 (0,61)	48,58 (5,97)	11,18 (2,55)
KÖ-AK40-5	1,88 (0,25)	13,05 (1,95)	29,35 (6,07)
KÖ-AK40-10	2,08 (0,20)	23,52 (4,92)	20,38 (5,08)
KÖ-AK40-15	1,67 (0,26)	21,41 (6,31)	15,56 (2,70)
KÖ-AK40-20	2,03 (0,18)	31,24 (3,41)	12,22 (1,92)
KÖ-AK<100-5	2,18 (0,31)	16,89 (2,60)	27,53 (4,30)
KÖ-AK<100-10	1,85 (0,44)	16,89 (4,73)	19,19 (2,35)
KÖ-AK<100-15	2,58 (0,45)	29,84 (4,76)	14,72 (1,89)
KÖ-AK<100-20	3,02 (0,56)	37,55 (7,66)	13,39 (2,83)

*: Standart sapma değerleri

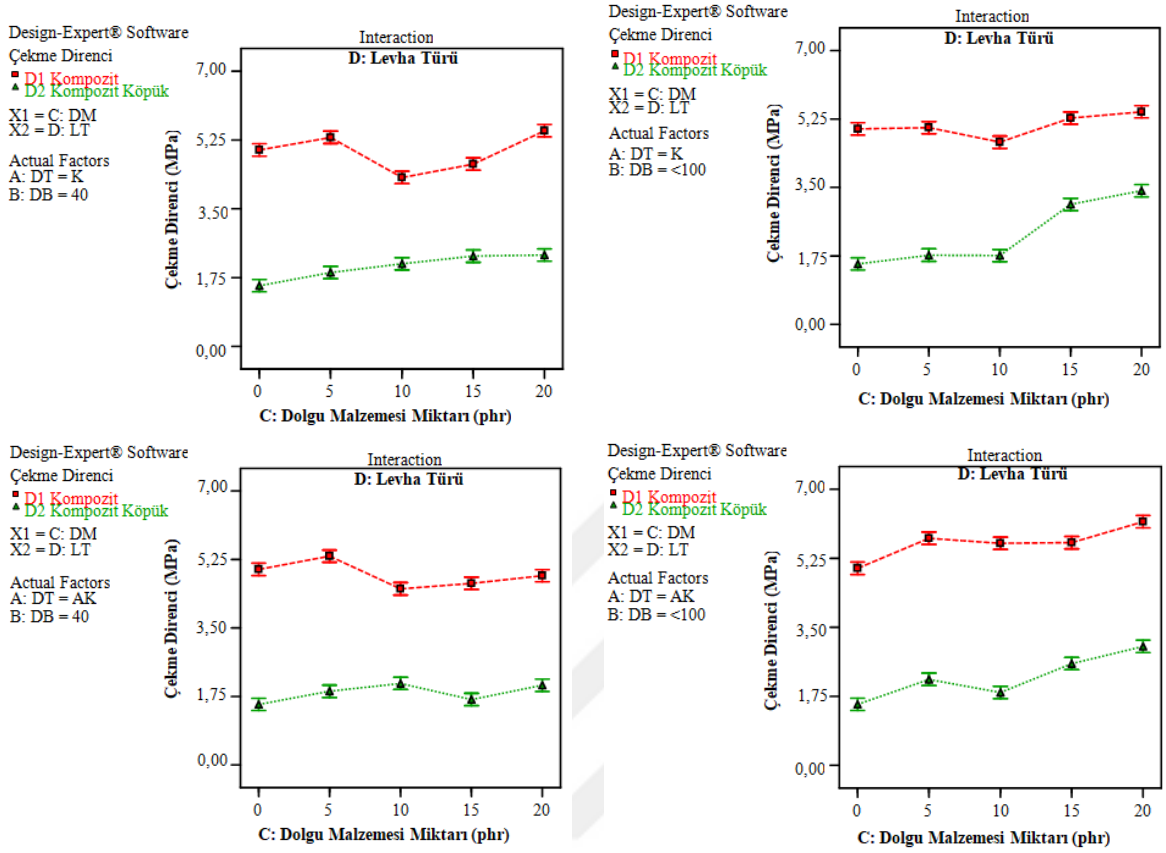
Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme direnci değerleri üzerine dolgu malzemesi türünün herhangi bir etkisinin olmadığı, dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.24).

Çizelge 4.24. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	1016.75	39	26.07	203.79	< 0.0001 significant
A-DT	0.28	1	0.28	2.22	0.1367
B-DB	15.72	1	15.72	122.86	< 0.0001
C-DM	33.85	4	8.46	66.14	< 0.0001
D-LT	917.39	1	917.39	7171.11	< 0.0001
AB	3.60	1	3.60	28.14	< 0.0001
AC	4.44	4	1.11	8.68	< 0.0001
AD	3.45	1	3.45	26.97	< 0.0001
BC	13.43	4	3.36	26.25	< 0.0001
BD	0.37	1	0.37	2.88	0.0908
CD	11.80	4	2.95	23.06	< 0.0001
ABC	1.33	4	0.33	2.59	0.0365
ABD	1.83	1	1.83	14.28	0.0002
ACD	1.77	4	0.44	3.45	0.0087
BCD	5.75	4	1.44	11.25	< 0.0001
ABCD	1.74	4	0.44	3.41	0.0094
Hata	46.05	360	0.13		
Toplam	1062.80	399			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme direnci grafikleri Şekil 4.36'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde bütün kompozitlerin çekme direnci değerleri kompozit köpüklerin çekme direnci değerlerinden daha yüksektir. Kompozitlerin çekme direnci 5 phr dolgu malzemesi içeriğinde kontrol örneğine göre bir miktar artmış, 10 phr dolgu malzemesi içeriğinde düşüş göstermiştir. Lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artmaya devam etmesi ile tekrar artış göstermiştir. Dolgu malzemesi türü ve boyutu fark etmeksizin bütün kompozitler bu eğilimi göstermiştir. Kompozit köpüklerin çekme direnci değerleri ise kontrol örneğine göre daha yüksektir. Genel olarak dolgu malzemesi miktarının artması ile çekme direnci artış göstermiştir. <100 mesh dolgu malzemesi içeren kompozitler, kompozit köpüklerle aynı eğilimi gösterirken 40 mesh içeren kompozit köpüklerde ağaç kabuğu ile üretilenlerde 15 phr dolgu malzemesi içeriğinde bir düşüş meydana gelmiştir. Dolgu malzemesi boyutu açısından değerlendirme yapıldığında kompozitlerde kavak atığı ile üretilenlerde boyut küçüldükçe daha düşük, ağaç kabuğu ile üretilenlerde daha yüksek sonuçlar gözlemlenmiştir. Kompozit köpüklerde ise bu durum dolgu malzemesi türü fark etmeksizin boyut küçüldükçe çekme direnci artmıştır. Yukarıda kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri kısmında da bahsedildiği gibi 40 mesh dolgu malzemesi ile üretilen kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri <100 mesh ile üretilenlerinkine göre daha düşüktür. Bu durum dolgu malzemesi boyutundaki farktan

kaynaklanıyor olabilir. Bunun belirlenmesi amacı ile spesifik çekme direnci değerleri incelenmiştir.



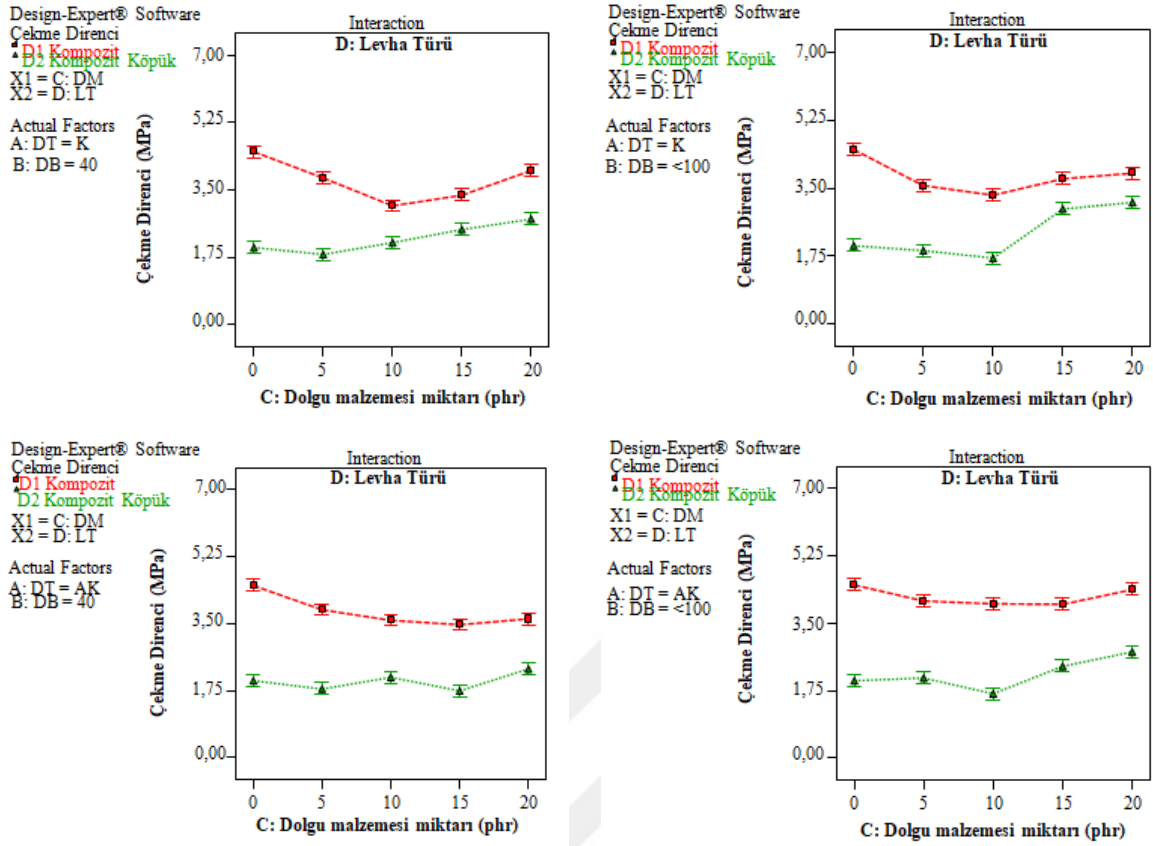
Şekil 4.36. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekme direnci grafikleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci istatistik analizi sonuçlarına göre kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci değerleri üzerine lignoselülozik dolgu malzemesi türünün etkisi olmadığı, dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.25. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	359.16	39	9.21	74.47	< 0.0001 significant
A-DT	0.028	1	0.028	0.23	0.6339
B-DB	2.94	1	2.94	23.80	< 0.0001
C-DM	22.79	4	5.70	46.08	< 0.0001
D-LT	288.61	1	288.61	2333.75	< 0.0001
AB	1.16	1	1.16	9.38	0.0024
AC	3.83	4	0.96	7.75	< 0.0001
AD	4.30	1	4.30	34.78	< 0.0001
BC	4.60	4	1.15	9.29	< 0.0001
BD	0.13	1	0.13	1.09	0.2973
CD	21.57	4	5.39	43.59	< 0.0001
ABC	0.74	4	0.18	1.49	0.2045
ABD	0.36	1	0.36	2.94	0.0875
ACD	2.15	4	0.54	4.35	0.0019
BCD	3.02	4	0.75	6.10	< 0.0001
ABCD	0.57	4	0.14	1.15	0.3342
Hata	43.90	355	0.12		
Toplam	403.06	394			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.37) üretilen bütün kompozitlerin spesifik çekme direnci kompozit köpüklerin spesifik çekme direncinden daha yüksektir. KÖ-AK<100-5 grubu haricinde kompozit ve kompozit köpüklerin tamamının spesifik çekme direnci değeri kontrol örneklerine göre daha düşüktür. Kompozitlerde dolgu malzemesi miktarının artması ile spesifik çekme direnci 10 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar düşmüş, daha sonra artmıştır. Kompozit köpüklerde ise 40 mesh dolgu malzemesi ile üretilenlerde 5 phr dolgu malzemesi içeriğinde düşüş göstermiş, daha sonra artmıştır. Ancak 15 phr ağaç kabuğu içeren kompozit köpüklerin çekme direnci değerlerinin düşük olmasından dolayı spesifik çekme direnci de bu eğilimin dışında bir düşüş göstermiştir. <100 mesh dolgu malzemesi ile üretilen kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri çekme direnci ile aynı eğilimi göstermiştir. Kompozit ya da kompozit köpük ve dolgu malzemesi türü fark etmeksizin dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe spesifik çekme direnci artış göstermiştir. Kompozit köpüklerde direnç değerleri hücre yapısına bağlı olmakla birlikte dolgu malzemesinin dağılımına da bağlıdır. Düzenli hücre boyutu ve dağılımı ve homojen dolgu malzemesi dağılımı direnç özelliklerini iyileştirmektedir. Daha küçük partikül boyutuna sahip dolgu malzemeleri ile hücre çekirdeklenme sayısını artırılabilmesi de mümkündür (Farsheh ve ark., 2011).



Şekil 4.37. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekme direnci grafikleri

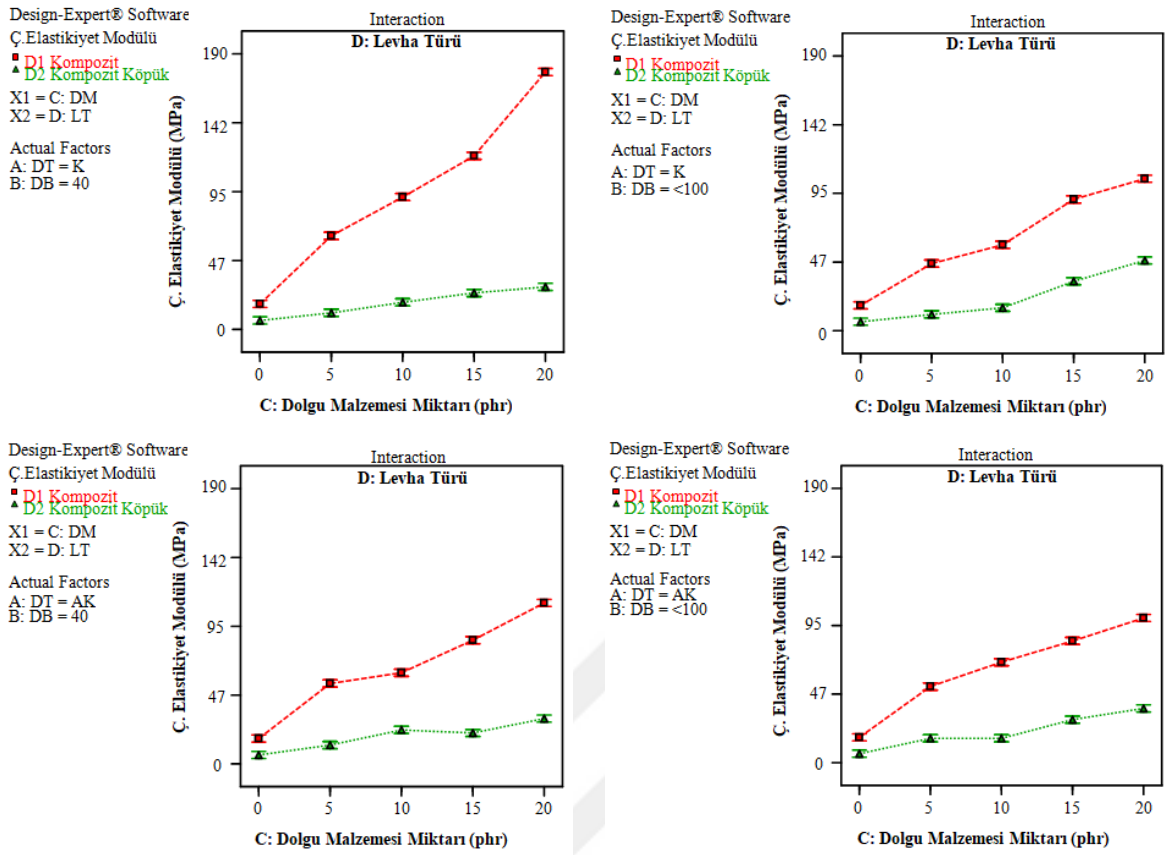
Atık PVC kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü değerleri 46,47-177,51 MPa arasında değişmektedir. En düşük çekmede elastikiyet modülü değeri K-K<100-5 (5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda belirlenirken en yüksek çekmede elastikiyet modülü değeri K-K40-20 (20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda belirlenmiştir. Atık PVC kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerleri ise 11,33-48,58 MPa arasında değişmektedir. En düşük değer KÖ-K<100-5 (5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler), en yüksek değer KÖ-K<100-20 (20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubundadır.

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü üzerinde istatistik analiz sonuçlarına göre dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.26).

Çizelge 4.26. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	6.090E+005	39	15615.90	501.91	< 0.0001 significant
A-DT	4705.69	1	4705.69	151.25	< 0.0001
B-DB	3706.01	1	3706.01	119.12	< 0.0001
C-DM	2.165E+005	4	54128.39	1739.75	< 0.0001
D-LT	2.689E+005	1	2.689E+005	8642.53	< 0.0001
AB	4184.41	1	4184.41	134.49	< 0.0001
AC	6588.94	4	1647.24	52.94	< 0.0001
AD	4155.87	1	4155.87	133.57	< 0.0001
BC	2507.86	4	626.97	20.15	< 0.0001
BD	9663.09	1	9663.09	310.58	< 0.0001
CD	64237.44	4	16059.36	516.17	< 0.0001
ABC	1628.10	4	407.03	13.08	< 0.0001
ABD	6118.52	1	6118.52	196.66	< 0.0001
ACD	2865.99	4	716.50	23.03	< 0.0001
BCD	9041.26	4	2260.31	72.65	< 0.0001
ABCD	4211.40	4	1052.85	33.84	< 0.0001
Hata	11200.56	360	31.11		
Toplam	6.202E+005	399			

Şekil 4.38’de grafiği gösterilen atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülünde, kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü değerleri kompozit köpüklerinkine göre daha yüksektir. Bütün kompozit ve kompozit köpüklerde elastikiyet modülü kontrol örneklerine göre artış göstermiştir. Lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile çekmede elastikiyet modülü değerleri üretilen örneklerin tamamında artış göstermiştir. Bu artış oransal olarak kompozitlerde kompozit köpüklere göre daha fazladır. Dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü değerleri azalırken, kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü artmıştır. Kompozitlerde kavak atığı ile üretilenler ağaç kabuğu ile üretilenlere göre daha yüksek çekmede elastikiyet modülü değerleri sergilerken, kompozit köpüklerde kavak atığı ile üretilenler 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda daha düşük, <100 mesh dolgu malzemesi boyutunda daha yüksek sonuçlar vermiştir.



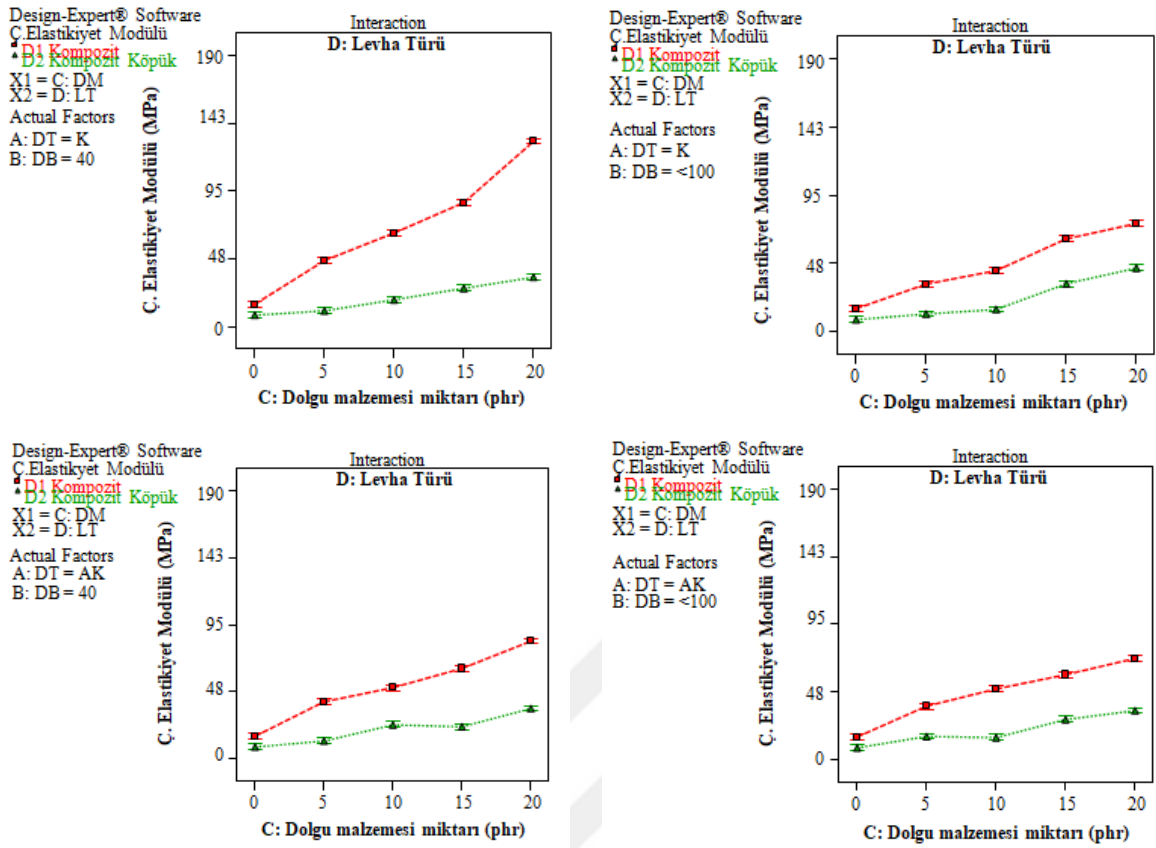
Şekil 4.38. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü grafikleri

Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerleri üzerine dolgu malzemesi türü, boyutu ve miktarının ve levha türünün önemli etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.27).

Çizelge 4.27. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	2.857E+005	39	7326.07	339.58	< 0.0001 significant
A-DT	2283.14	1	2283.14	105.83	< 0.0001
B-DB	3839.99	1	3839.99	177.99	< 0.0001
C-DM	1.256E+005	4	31388.97	1454.97	< 0.0001
D-LT	1.029E+005	1	1.029E+005	4771.71	< 0.0001
AB	1663.85	1	1663.85	77.12	< 0.0001
AC	3873.68	4	968.42	44.89	< 0.0001
AD	1637.70	1	1637.70	75.91	< 0.0001
BC	2764.92	4	691.23	32.04	< 0.0001
BD	5151.33	1	5151.33	238.78	< 0.0001
CD	22767.55	4	5691.89	263.83	< 0.0001
ABC	669.75	4	167.44	7.76	< 0.0001
ABD	2785.06	1	2785.06	129.10	< 0.0001
ACD	1286.86	4	321.72	14.91	< 0.0001
BCD	4218.72	4	1054.68	48.89	< 0.0001
ABCD	2073.11	4	518.28	24.02	< 0.0001
Hata	7658.65	355	21.57		
Toplam	2.934E+005	394			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü grafikleri incelendiğinde ise grafiklerin çekmede elastikiyet modülü ile aynı eğilimleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Atık PVC kompozitlerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerleri kompozit köpüklerinkine göre daha yüksektir. Ancak kompozit ve kompozit arasındaki fark oransal olarak azalmıştır (Şekil 4.39). Bu durum farkın bir kısmının yoğunluktan, bir kısmının ise hücre yapısından kaynaklandığını göstermektedir. Bütün kompozit ve kompozit köpüklerde spesifik elastikiyet modülü kontrol örneklerine göre artış göstermiş ve dolgu malzemesi miktarının artması ile çekmede elastikiyet modülü değerleri artmaya devam etmiştir. Dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe kompozitlerin spesifik çekmede elastikiyet modülü değerleri azalırken, kompozit köpüklerin elastikiyet modülü artış göstermiştir. Kavak atığı ile üretilen kompozitler, ağaç kabuğu ile üretilenlere göre daha yüksek spesifik çekmede elastikiyet modülü değerleri sergilemiştir. Kompozit köpüklerde ise kavak atığı ile üretilenler 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda daha düşük, <100 mesh dolgu malzemesi boyutunda daha yüksek sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.39. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik çekmede elastikiyet modülü grafikleri

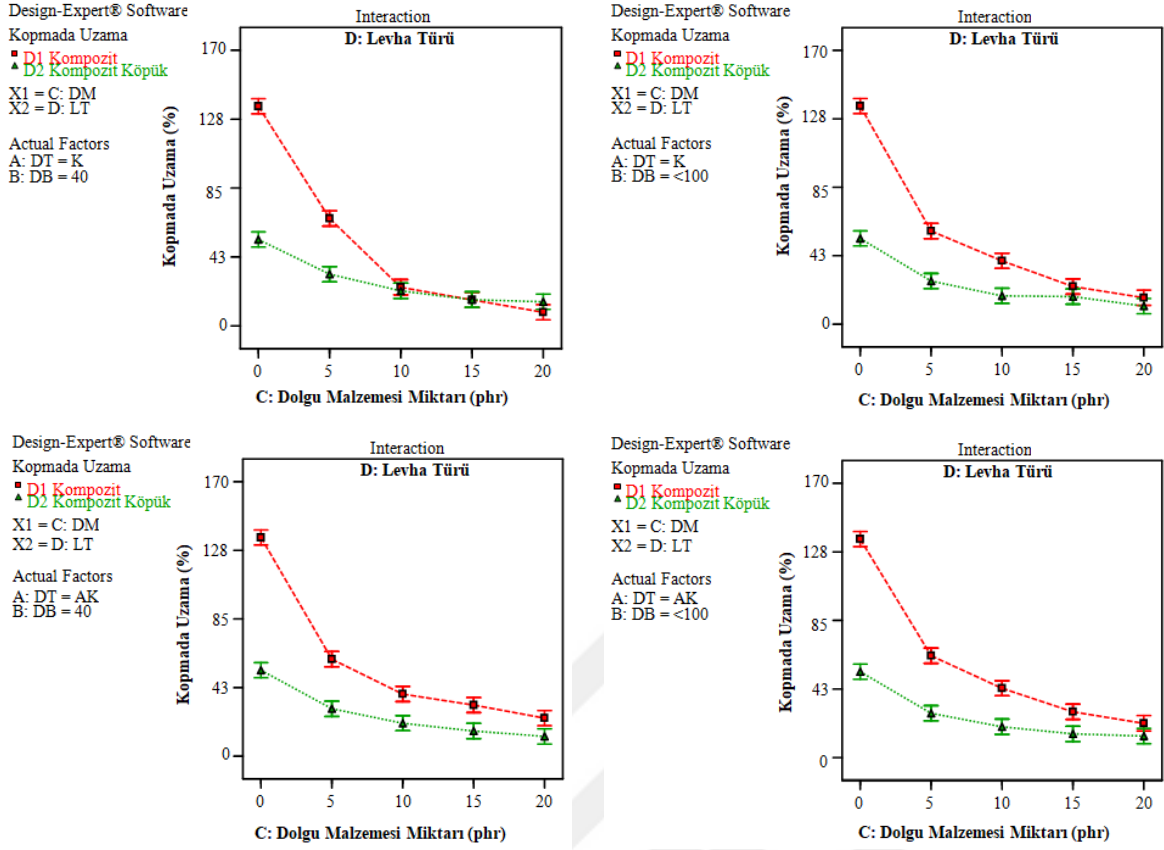
Atık PVC kompozitlerin kopmada uzama değerleri % 8,37-66,18 aralığındadır. En düşük kopmada uzama K-K40-20 (20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda en yüksek kopmada uzama K-K40-5 (5 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda belirlenmiştir. Atık PVC kompozit köpüklerin kopmada uzama değerleri % 11,18-31,83 arasında değişmektedir. En düşük kopmada uzama değeri KÖ-K<100-20 (20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubuna aitken en yüksek kopmada uzama değeri KÖ-K40-5 (5 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubuna aittir.

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kopmada uzama değerlerinde yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre kopmada uzama değerleri üzerine dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu belirlenirken dolgu malzemesi boyutunun etkisinin olmadığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.28).

Çizelge 4.28. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	5.000E+005	39	12819.46	111.82	< 0.0001 significant
A-DT	717.44	1	717.44	6.26	0.0128
B-DB	26.58	1	26.58	0.23	0.6304
C-DM	3.301E+005	4	82534.42	719.90	< 0.0001
D-LT	84109.86	1	84109.86	733.64	< 0.0001
AB	31.57	1	31.57	0.28	0.6001
AC	603.41	4	150.85	1.32	0.2636
AD	989.35	1	989.35	8.63	0.0035
BC	473.12	4	118.28	1.03	0.3907
BD	383.73	1	383.73	3.35	0.0682
CD	80076.21	4	20019.05	174.61	< 0.0001
ABC	551.13	4	137.78	1.20	0.3097
ABD	216.21	1	216.21	1.89	0.1705
ACD	637.66	4	159.42	1.39	0.2367
BCD	521.01	4	130.25	1.14	0.3392
ABCD	484.01	4	121.00	1.06	0.3785
Hata	41273.16	360	114.65		
Toplam	5.412E+005	399			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kopmada uzama grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.40) genel olarak kompozitlerin kopmada uzama değerleri kompozit köpüklerin kopmada uzama değerlerinden daha yüksektir. Kompozit ve kompozit köpüklerin tamamı kontrol örneklerine göre daha düşük kopmada uzama değeri göstermiştir. Lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile kompozit ve kompozit köpüklerde kopmada uzama düşmüştür.



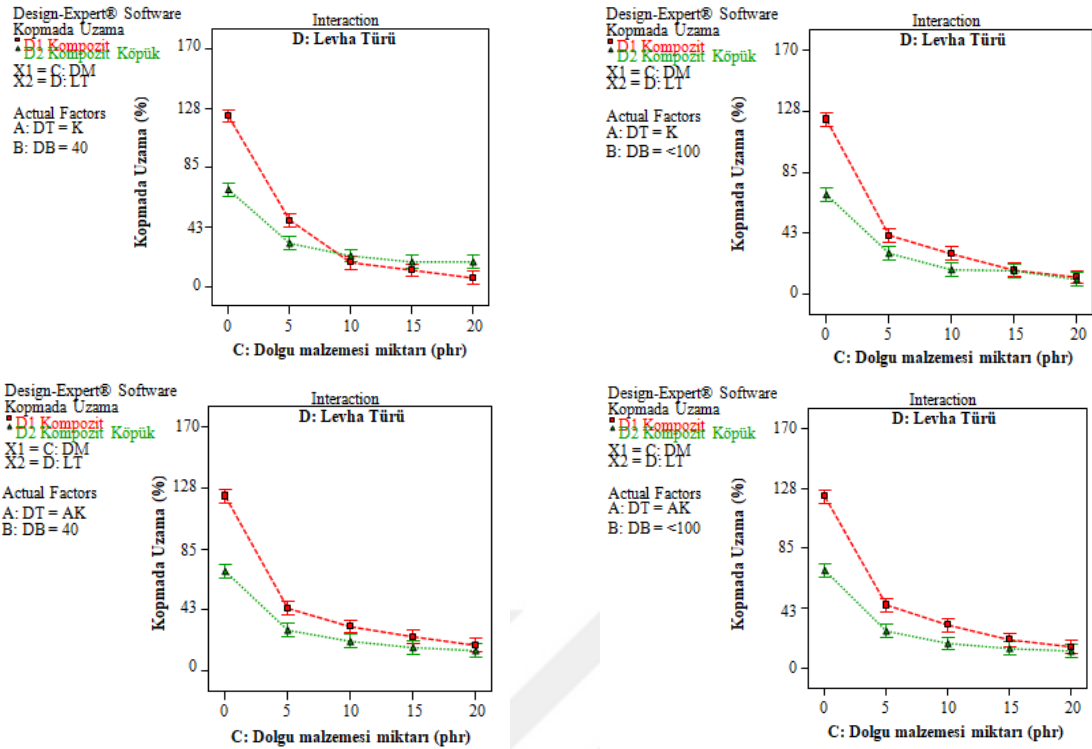
Şekil 4.40. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin kopmada uzama grafikleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik kopmada uzama yüzdeleri üzerine dolgu malzemesi türü ve boyutunun herhangi bir etkisinin olmadığı, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün ise spesifik kopmada uzama değerlerini önemli bir şekilde etkilediği yapılan istatistik analizi ile belirlenmiştir (Çizelge 4.29).

Çizelge 4.29. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik kopmada uzama değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	4.318E+005	39	11071.47	99.81	< 0.0001 significant
A-DT	309.89	1	309.89	2.79	0.0955
B-DB	56.89	1	56.89	0.51	0.4744
C-DM	3.688E+005	4	92202.02	831.23	< 0.0001
D-LT	23876.83	1	23876.83	215.26	< 0.0001
AB	42.51	1	42.51	0.38	0.5363
AC	408.27	4	102.07	0.92	0.4522
AD	839.11	1	839.11	7.56	0.0063
BC	123.25	4	30.81	0.28	0.8923
BD	306.61	1	306.61	2.76	0.0973
CD	37313.80	4	9328.45	84.10	< 0.0001
ABC	264.87	4	66.22	0.60	0.6651
ABD	175.93	1	175.93	1.59	0.2087
ACD	375.85	4	93.96	0.85	0.4961
BCD	348.92	4	87.23	0.79	0.5346
ABCD	401.05	4	100.26	0.90	0.4617
Hata	39377.26	355	110.92		
Toplam	4.712E+005	394			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik kopmada uzama değerleri kopmada uzama değerleri ile aynı eğilimleri sergilemişlerdir. Sadece kopmada uzama değerlerine göre spesifik kopmada uzamada kompozit ve kompozit köpük arasındaki fark azalarak 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde genel olarak birbirine yakın sonuçlar göstermişlerdir (Şekil 4.41).



Şekil 4.41. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik kopmada uzama grafikleri

Atık PVC kompozitlerin eğilme testi sonuçları Çizelge 4.30’da verilmiştir. Kompozitlerin eğilme direnci değerleri 2,79-9,85 MPa aralığındadır. En düşük eğilme direnci K-AK40-5 (5 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozitler) grubunda en yüksek eğilme direnci K-K40-20 (20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda görülmektedir.

Çizelge 4.30. Atık PVC kompozitlerin eğilme değerleri

Örnek kodu	Eğilme direnci (MPa)	Eğilmede elastikiyet modülü (MPa)
Kontrol	1,91 (0,36)*	35,69 (12,00)
K-K40-5	4,54 (0,31)	108,77 (8,27)
K-K40-10	5,40 (0,20)	144,21 (5,34)
K-K40-15	7,06 (0,23)	197,84 (11,14)
K-K40-20	9,85 (0,21)	321,32 (8,34)
K-K<100-5	3,26 (0,16)	76,47 (7,04)
K-K<100-10	3,91 (0,19)	91,75 (6,76)
K-K<100-15	4,68 (0,55)	111,88 (15,46)
K-K<100-20	5,74 (0,54)	144,89 (19,89)
K-AK40-5	2,79 (0,15)	69,75 (4,62)
K-AK40-10	3,60 (0,21)	89,30 (7,46)
K-AK40-15	4,70 (0,34)	114,44 (10,37)
K-AK40-20	5,79 (0,25)	145,31 (9,39)
K-AK<100-5	3,87 (1,35)	97,62 (42,60)
K-AK<100-10	4,86 (1,84)	131,13 (58,07)
K-AK<100-15	4,18 (0,16)	93,58 (4,80)
K-AK<100-20	4,79 (0,17)	112,27 (5,59)

*: Standart sapma değerleri

Atık PVC kompozit köpüklerin eğilme testi sonuçları ise Çizelge 4.31’de verilmiştir. Kompozit köpüklerin eğilme direnci değerleri 1,00-5,19 MPa arasında değişmektedir. En düşük eğilme direncine sahip grup KÖ-K<100-5 (5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) en yüksek eğilme direncine sahip olan grup KÖ-K<100-20 (20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler)’dir.

Çizelge 4.31. Atık PVC kompozit köpüklerin eğilme değerleri

Örnek kodu	Eğilme direnci (MPa)	Eğilmede elastikiyet modülü (MPa)
Kontrol	0,94 (0,28)*	19,92 (8,95)
KÖ-K40-5	1,26 (0,48)	31,78 (11,29)
KÖ-K40-10	2,60 (0,55)	68,67 (14,44)
KÖ-K40-15	2,01 (0,62)	47,92 (17,99)
KÖ-K40-20	4,16 (1,03)	116,88 (36,43)
KÖ-K<100-5	1,00 (0,19)	25,43 (4,22)
KÖ-K<100-10	1,85 (0,67)	49,58 (17,06)
KÖ-K<100-15	3,16 (1,14)	94,08 (41,51)
KÖ-K<100-20	5,19 (0,84)	164,95 (34,69)
KÖ-AK40-5	1,46 (0,49)	36,58 (14,26)
KÖ-AK40-10	2,65 (0,90)	67,53 (21,83)
KÖ-AK40-15	3,78 (0,94)	99,78 (25,43)
KÖ-AK40-20	4,16 (0,87)	120,52 (27,75)
KÖ-AK<100-5	1,70 (0,17)	49,26 (5,67)
KÖ-AK<100-10	3,25 (0,78)	94,89 (22,74)
KÖ-AK<100-15	3,22 (0,98)	99,97 (41,64)
KÖ-AK<100-20	3,90 (0,77)	117,97 (26,89)

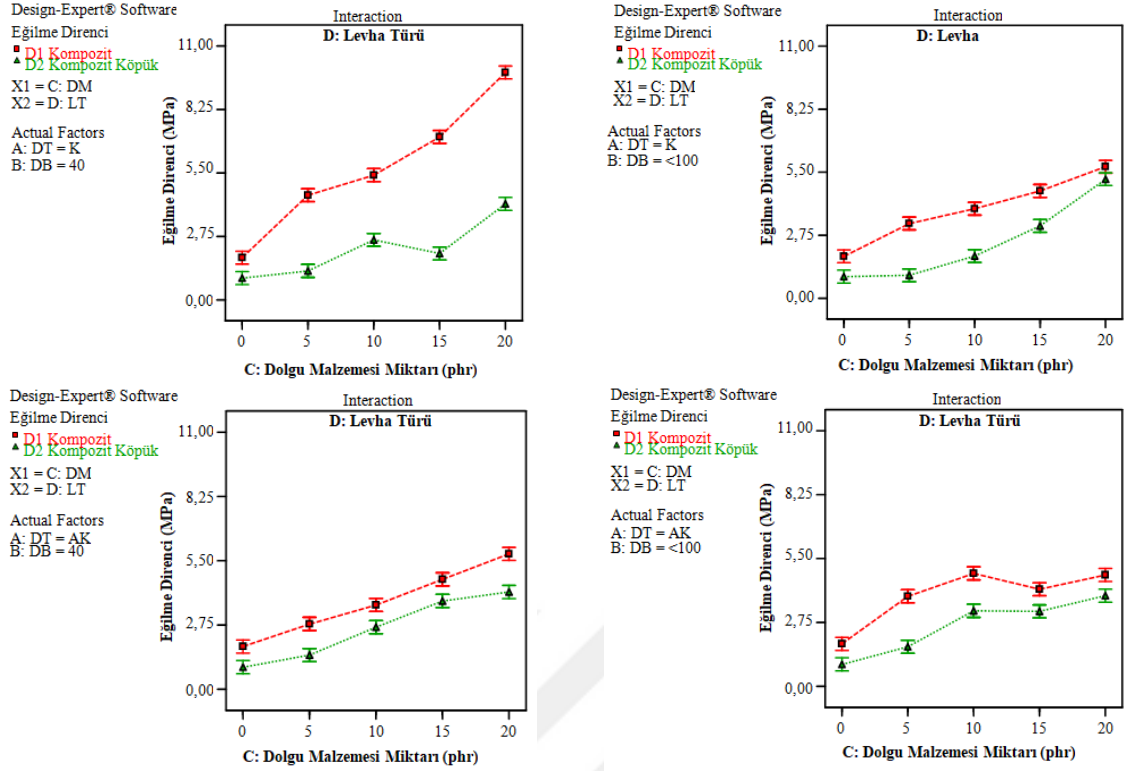
*: Standart sapma değerleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin istatistik analiz sonuçlarına göre eğilme direnci değerleri üzerine dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.32).

Çizelge 4.32. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	1418.41	39	36.37	89.68	< 0.0001 significant
A-DT	12.05	1	12.05	29.72	< 0.0001
B-DB	13.08	1	13.08	32.24	< 0.0001
C-DM	767.03	4	191.76	472.82	< 0.0001
D-LT	346.11	1	346.11	853.40	< 0.0001
AB	19.93	1	19.93	49.13	< 0.0001
AC	39.39	4	9.85	24.28	< 0.0001
AD	40.70	1	40.70	100.36	< 0.0001
BC	17.31	4	4.33	10.67	< 0.0001
BD	23.23	1	23.23	57.28	< 0.0001
CD	25.72	4	6.43	15.86	< 0.0001
ABC	15.47	4	3.87	9.54	< 0.0001
ABD	31.56	1	31.56	77.82	< 0.0001
ACD	15.98	4	4.00	9.85	< 0.0001
BCD	35.41	4	8.85	21.83	< 0.0001
ABCD	15.42	4	3.85	9.50	< 0.0001
Hata	146.00	360	0.41		
Toplam	1564.41	399			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilme direnci grafikleri Şekil 4.42’de gösterilmiştir. Kompozit ve kompozit köpükler genel olarak aynı eğilimleri sergilerken kompozitlerin eğilme direnci kompozit köpüklerin eğilme direncinden daha yüksektir. Kompozit ve kompozit köpükler kontrol örneklerine göre daha yüksek eğilme direnci göstermiştir. Lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile kompozit ve kompozit köpüklerin eğilme direnci değerleri genel olarak artmıştır. Dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe kompozitlerde eğilme direnci düşerken, kompozit köpüklerde kavak atığı ile üretilenlerde artmış, ağaç kabuğu ile üretilenlerde bir miktar azalmıştır. Kavak atığı ile üretilen kompozitler ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlere göre daha yüksek eğilme direnci değerleri sergilemiştir. Kompozit köpüklerde ise kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda daha düşük, <100 mesh dolgu malzemesi boyutunda daha yüksek sonuçlar vermiştir.



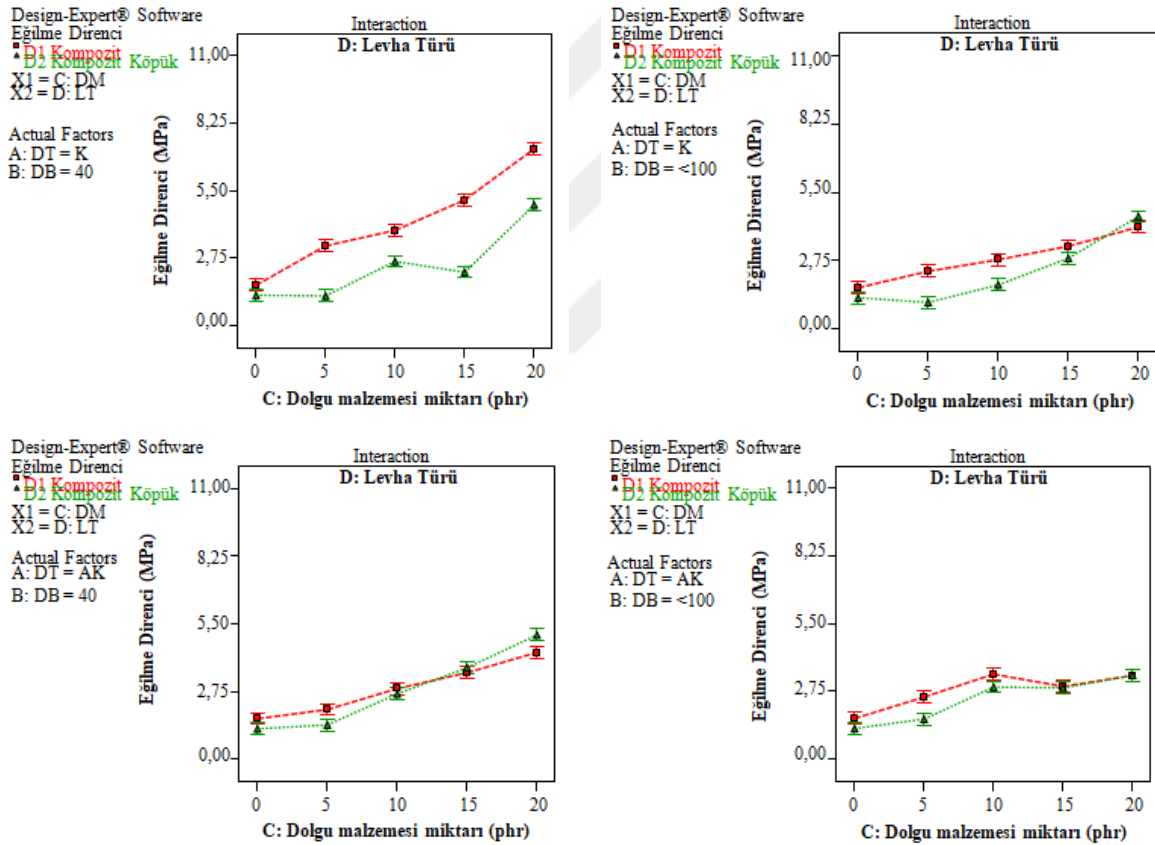
Şekil 4.42. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilme direnci grafikleri

İstatistik analiz sonuçları dolgu malzemesi türü, boyutu ve miktarı ve levha türü atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilme direnci değerlerini önemli bir şekilde etkilediğini göstermiştir (Çizelge 4.33).

Çizelge 4.33. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilme direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	705.79	39	18.10	61.62	< 0.0001 significant
A-DT	5.08	1	5.08	17.32	< 0.0001
B-DB	25.46	1	25.46	86.68	< 0.0001
C-DM	476.80	4	119.20	405.90	< 0.0001
D-LT	47.39	1	47.39	161.38	< 0.0001
AB	7.63	1	7.63	25.98	< 0.0001
AC	22.68	4	5.67	19.31	< 0.0001
AD	21.19	1	21.19	72.15	< 0.0001
BC	30.45	4	7.61	25.92	< 0.0001
BD	5.08	1	5.08	17.30	< 0.0001
CD	10.77	4	2.69	9.17	< 0.0001
ABC	7.87	4	1.97	6.70	< 0.0001
ABD	14.30	1	14.30	48.68	< 0.0001
ACD	8.53	4	2.13	7.26	< 0.0001
BCD	5.83	4	1.46	4.96	0.0007
ABCD	10.34	4	2.59	8.80	< 0.0001
Hata	103.66	353	0.29		
Toplam	809.46	392			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilme direnci grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.43), bütün grafiklerin eğilme direnci ile aynı eğilimleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Spesifik eğilme direncinde, eğilme direncine göre kompozit ve kompozit köpük arasındaki fark azalmıştır. Genel olarak köpüklendirilmiş kompozitlerin spesifik eğilme direnci değerleri kompozitlerin spesifik eğilme direncine göre daha düşük olmaktadır (Bledzki ve Faruk 2006; Aydemir, 2012). 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde bazı kompozit köpükler (KÖ-AK<100-20) kompozitlere yakın değerler sergilerken bazı kompozit köpükler (KÖ-K<100-20 ve KÖ-AK40-20) kompozitlerden daha iyi spesifik eğilme direnci değerleri göstermiştir. Bunun lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının fazla olması nedeniyle akışkanlığın azalması ve bu durumun köpük oluşumunu engellemesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.43. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilme direnci grafikleri

Atık PVC kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri 69,75-321,32 MPa arasındadır. En düşük eğilmede elastikiyet modülü değerlerini K-AK40-5 (5 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozitler) grubu gösterirken en yüksek eğilmede elastikiyet modülü değeri K-K40-20 (20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda belirlenmiştir.

Atık PVC kompozit köpüklerin ise eğilmede elastikiyet modülü değerleri 25,43-164,95 MPa arasında değişmektedir. En düşük eğilmede elastikiyet modülü KÖ-K<100-5 (5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubunda, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü değerleri KÖ-K<100-20 (20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubunda belirlenmiştir

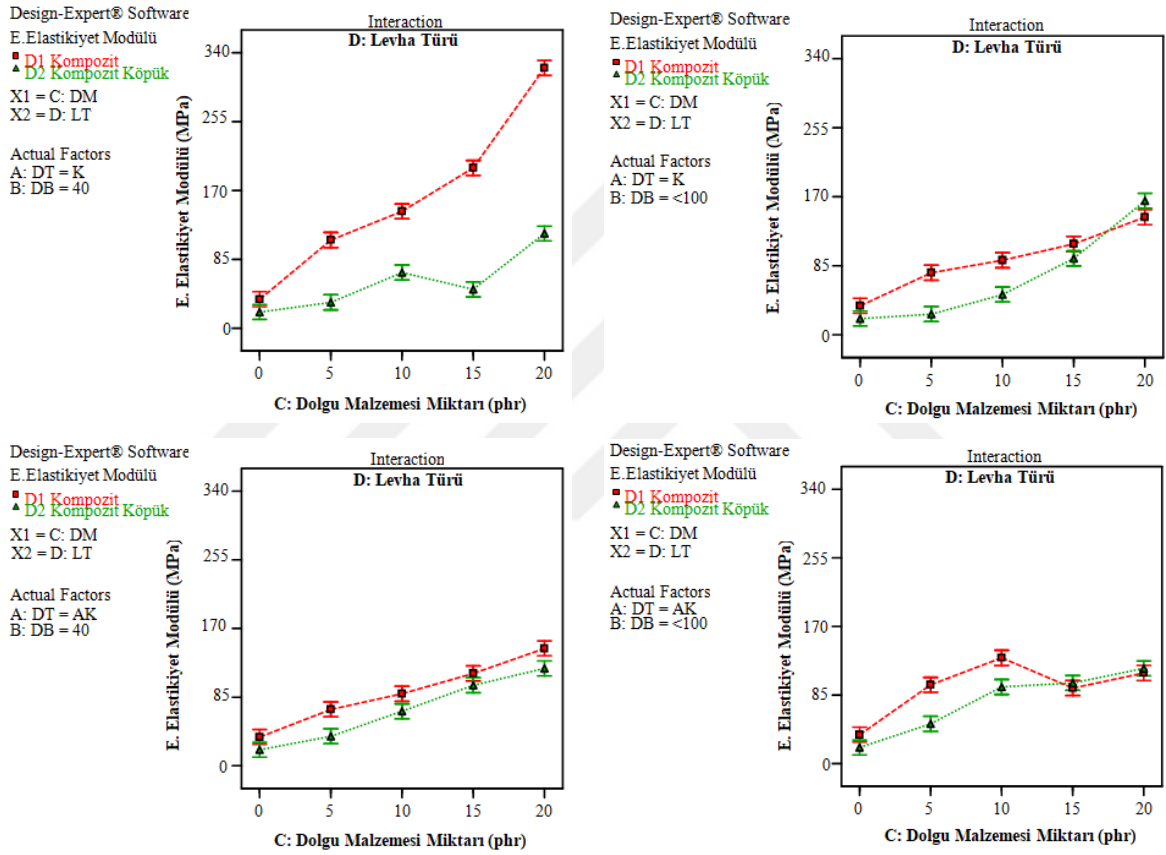
Eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin elastikiyet modülü üzerine dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.34).

Çizelge 4.34. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	1.346E+006	39	34501.89	77.72	< 0.0001 significant
A-DT	16451.27	1	16451.27	37.06	< 0.0001
B-DB	12644.89	1	12644.89	28.49	< 0.0001
C-DM	7.400E+005	4	1.850E+005	416.76	< 0.0001
D-LT	1.713E+005	1	1.713E+005	385.93	< 0.0001
AB	27531.60	1	27531.60	62.02	< 0.0001
AC	66488.78	4	16622.19	37.45	< 0.0001
AD	46426.24	1	46426.24	104.59	< 0.0001
BC	25540.27	4	6385.07	14.38	< 0.0001
BD	47918.30	1	47918.30	107.95	< 0.0001
CD	17615.73	4	4403.93	9.92	< 0.0001
ABC	16285.50	4	4071.37	9.17	< 0.0001
ABD	38822.20	1	38822.20	87.46	< 0.0001
ACD	26661.95	4	6665.49	15.02	< 0.0001
BCD	63262.61	4	15815.65	35.63	< 0.0001
ABCD	28624.89	4	7156.22	16.12	< 0.0001
Hata	1.598E+005	360	443.90		
Toplam	1.505E+006	399			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde genel olarak üretilen bütün kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinden daha yüksektir (Şekil 4.44). Ancak 15 ve 20 phr <100 mesh dolgu malzemesi içeren kompozit köpükler kompozitlerden daha iyi eğilmede elastikiyet modülü değerleri göstermiştir. Bunun bu kompozit köpüklerde köpüklendirmenin sağlanamadığı ve yeterli hücrenin oluşmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretilen kompozit ve kompozit köpüklerin tamamı kontrol örneklerine göre daha yüksek eğilmede elastikiyet modülü değerleri sergilemiştir.

Lignoselülozik dolgu malzemesinin artması ile hem kompozitlerde hem de kompozit köpüklerde eğilmede elastikiyet modülü değerleri artmıştır. Kompozitlerde dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe eğilmede elastikiyet modülü düşüş göstermiştir. Kompozit köpüklerde ise kavak atığı ile üretilenlerde dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe eğilmede elastikiyet modülü artarken, ağaç kabuğu ile üretilenlerde azalmıştır. Kompozitlerde genel olarak kavak atığı ile üretilenler daha yüksek eğilmede elastikiyet modülü değerleri göstermiştir. Kompozit köpüklerde kavak atığı ile üretilenler genel olarak daha düşük eğilmede elastikiyet modülü değerleri sergilemiştir.



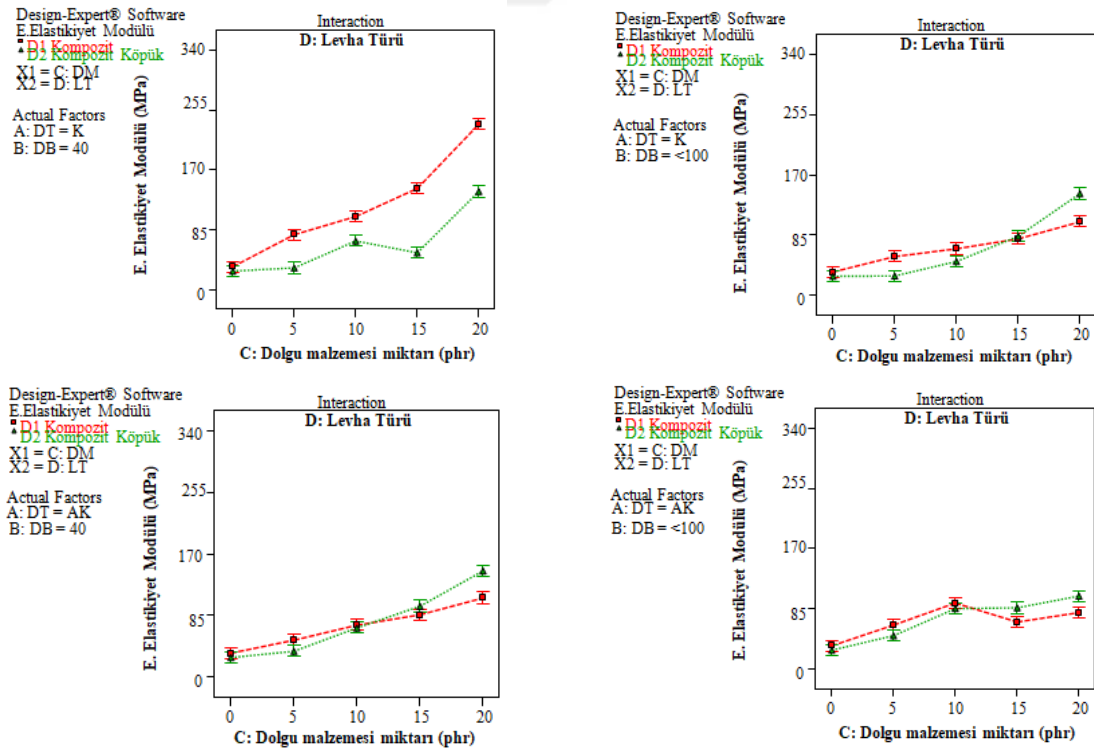
Şekil 4.44. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin eğilmede elastikiyet modülü grafikleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerleri üzerine dolgu malzemesi türü, boyutu ve miktarının ve levha türünün önemli bir etkisinin bulunduğu yapılan istatistik analiz sonuçları ile tespit edilmiştir (Çizelge 4.35).

Çizelge 4.35. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	7.389E+005	39	18945.34	62.10	< 0.0001 significant
A-DT	7735.97	1	7735.97	25.36	< 0.0001
B-DB	21312.71	1	21312.71	69.86	< 0.0001
C-DM	4.831E+005	4	1.208E+005	395.86	< 0.0001
D-LT	14356.67	1	14356.67	47.06	< 0.0001
AB	11718.05	1	11718.05	38.41	< 0.0001
AC	37571.46	4	9392.86	30.79	< 0.0001
AD	23939.34	1	23939.34	78.47	< 0.0001
BC	35302.45	4	8825.61	28.93	< 0.0001
BD	15604.86	1	15604.86	51.15	< 0.0001
CD	9289.90	4	2322.48	7.61	< 0.0001
ABC	8542.44	4	2135.61	7.00	< 0.0001
ABD	18126.83	1	18126.83	59.42	< 0.0001
ACD	12899.53	4	3224.88	10.57	< 0.0001
BCD	15329.64	4	3832.41	12.56	< 0.0001
ABCD	18694.53	4	4673.63	15.32	< 0.0001
Hata	1.077E+005	353	305.07		
Toplam	8.466E+005	392			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri eğilmede elastikiyet modülü grafikleri ile aynı eğilimleri sergilemiştir (Şekil 4.45).



Şekil 4.45. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik eğilmede elastikiyet modülü grafikleri

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci değerleri Çizelge 4.16’da verilmiştir. Atık PVC kompozitlerin darbe dirençleri 11,70-43,83 kJ/m² arasında değişmektedir. En düşük darbe direnci değeri K-K40-20 (20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozitler) grubunda, en yüksek darbe direnci değeri K-AK40-5 (5 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozitler) grubunda gözlemlenmiştir.

Atık PVC kompozit köpüklerin darbe direnci değerleri ise 8,77-16,14 kJ/m² arasındadır. En düşük darbe direnci değerini KÖ-AK<100-20 (20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler) grubu vermiştir. En yüksek darbe direnci değeri ise KÖ-AK40-5 (5 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler) grubuna aittir.

Çizelge 4.36. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci değerleri

Örnek kodu	Darbe direnci (kJ/m ²)	Örnek kodu	Darbe direnci (kJ/m ²)
Kontrol	29,53 (1,89)*	Kontrol	13,76 (0,85)
K-K40-5	37,65 (4,15)	KÖ-K40-5	16,11 (2,66)
K-K40-10	22,01 (3,18)	KÖ-K40-10	14,63 (2,03)
K-K40-15	17,51 (1,92)	KÖ-K40-15	12,84 (1,66)
K-K40-20	11,70 (0,72)	KÖ-K40-20	9,02 (0,81)
K-K<100-5	33,09 (3,59)	KÖ-K<100-5	15,10 (2,85)
K-K<100-10	26,79 (3,06)	KÖ-K<100-10	12,15 (2,45)
K-K<100-15	19,18 (1,97)	KÖ-K<100-15	11,82 (1,70)
K-K<100-20	15,45 (1,68)	KÖ-K<100-20	10,05 (1,85)
K-AK40-5	43,83 (6,61)	KÖ-AK40-5	16,14 (2,83)
K-AK40-10	33,12 (3,95)	KÖ-AK40-10	12,98 (3,74)
K-AK40-15	26,12 (3,91)	KÖ-AK40-15	10,53 (2,44)
K-AK40-20	19,41 (2,11)	KÖ-AK40-20	11,08 (1,31)
K-AK<100-5	35,89 (3,26)	KÖ-AK<100-5	12,61 (3,90)
K-AK<100-10	27,49 (3,81)	KÖ-AK<100-10	12,05 (3,45)
K-AK<100-15	15,99 (2,25)	KÖ-AK<100-15	10,38 (2,30)
K-AK<100-20	12,62 (1,43)	KÖ-AK<100-20	8,77 (1,58)

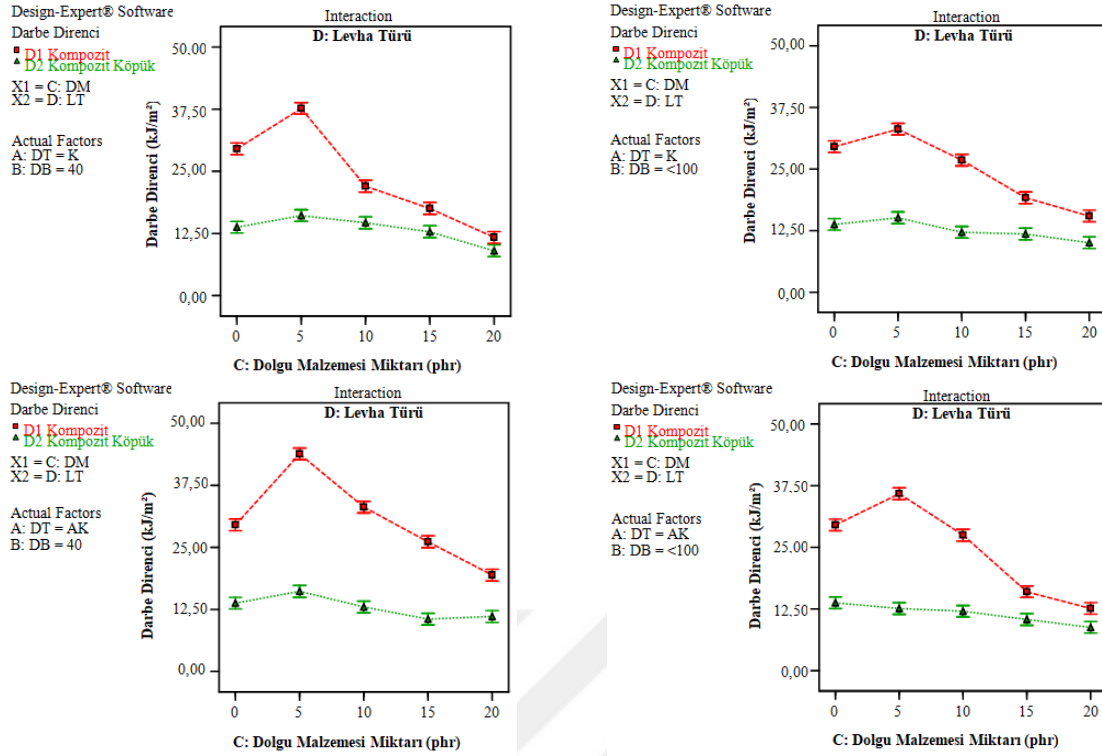
*: Standart sapma değerleri

Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci üzerine dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi boyutu, dolgu malzemesi miktarı ve levha türünün önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.37. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	33165.62	39	850.40	117.90	< 0.0001 significant
A-DT	142.85	1	142.85	19.81	< 0.0001
B-DB	310.84	1	310.84	43.10	< 0.0001
C-DM	9504.01	4	2376.00	329.42	< 0.0001
D-LT	17517.44	1	17517.44	2428.67	< 0.0001
AB	391.61	1	391.61	54.29	< 0.0001
AC	79.81	4	19.95	2.77	0.0274
AD	365.93	1	365.93	50.73	< 0.0001
BC	214.16	4	53.54	7.42	< 0.0001
BD	52.45	1	52.45	7.27	0.0073
CD	3742.25	4	935.56	129.71	< 0.0001
ABC	140.35	4	35.09	4.86	0.0008
ABD	267.35	1	267.35	37.07	< 0.0001
ACD	153.12	4	38.28	5.31	0.0004
BCD	105.50	4	26.38	3.66	0.0062
ABCD	177.95	4	44.49	6.17	< 0.0001
Hata	2596.60	360	7.21		
Toplam	35762.22	399			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci grafikleri Şekil 4.46’te gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, üretilen kompozitlerin tamamının darbe direnci değerleri kompozit köpüklerin darbe direncinden yüksektir. Köpüklendirilmiş kompozitlerin darbe direnci değerleri köpüklendirilmemiş kompozitlerin darbe direnci değerlerine göre genel olarak daha düşüktür (Mengeloğlu, 2001). Kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci değerleri genel olarak 5 phr dolgu malzemesi içeriğinde kontrol örneklerine göre artış göstermiş daha sonra dolgu malzemesi miktarının artması ile azalmıştır. Kompozitlerde dolgu malzemesi boyutunun küçülmesi ile 5 phr dolgu malzemesi içeriğinde daha düşük darbe direnci değerleri gözlemlenirken dolgu malzemesi miktarının artması ile genel olarak kavak atığı ile üretilen kompozitlerde daha iyi sonuçlar vermiş, ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlerde daha düşük darbe direnci değerleri sergilemiştir. Kompozit köpüklerde ise dolgu malzemesi türü fark etmeksizin dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe darbe direnci düşmüştür. Kompozitlerde kavak atığı ile üretilen kompozitler ağaç kabuğu ile üretilen kompozitlere göre genel olarak daha düşük darbe direnci gösterirken, kompozit köpüklerde kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler bir miktar daha iyi sonuçlar sergilemiştir.



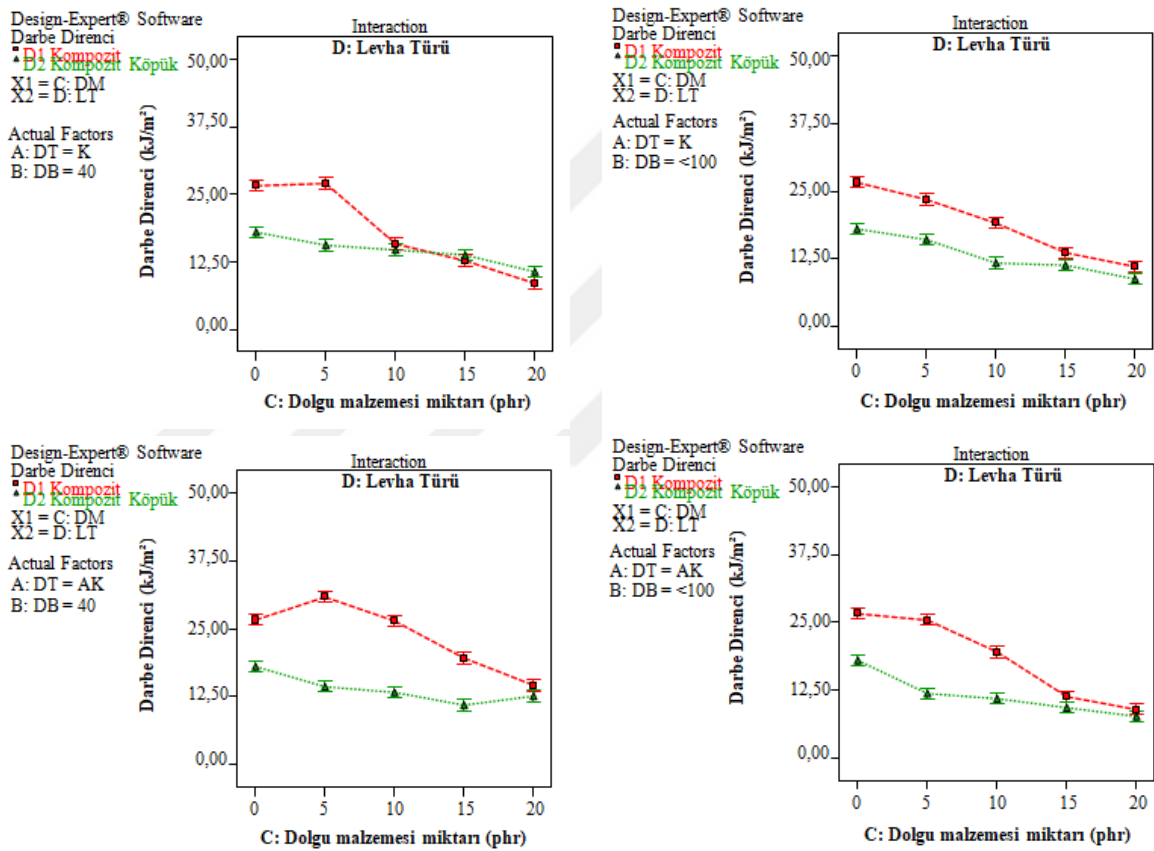
Şekil 4.46. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin darbe direnci grafiği

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri hesaplanmış ve istatistik analizleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.38). Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre dolgu malzemesi türü, boyutu ve miktarının ve levha türünün spesifik darbe direnci üzerine önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.38. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik darbe direnci değerlerinin istatistik sonuçları

Değişkenler	Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	f değeri	p değeri
Model	15663.32	39	401.62	72.59	< 0.0001 significant
A-DT	45.93	1	45.93	8.30	0.0042
B-DB	421.88	1	421.88	76.25	< 0.0001
C-DM	8127.41	4	2031.85	367.25	< 0.0001
D-LT	4081.96	1	4081.96	737.79	< 0.0001
AB	279.27	1	279.27	50.48	< 0.0001
AC	78.78	4	19.70	3.56	0.0073
AD	342.20	1	342.20	61.85	< 0.0001
BC	112.37	4	28.09	5.08	0.0005
BD	5.10	1	5.10	0.92	0.3377
CD	1626.22	4	406.55	73.48	< 0.0001
ABC	97.57	4	24.39	4.41	0.0017
ABD	156.45	1	156.45	28.28	< 0.0001
ACD	160.61	4	40.15	7.26	< 0.0001
BCD	89.38	4	22.34	4.04	0.0032
ABCD	148.88	4	37.22	6.73	< 0.0001
Hata	1975.17	357	5.53		
Toplam	17638.48	396			

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik darbe direnci grafikleri darbe direnci ile genel olarak aynı eğilimleri göstermiştir (Şekil 4.47). Ancak K-K40-5 ve K-K<100-5 kodlu kompozit grupları dışında bütün kompozit ve kompozit köpükler kontrol örneklerine göre daha düşük spesifik darbe direnci değerleri sergilemiştir. Köpük malzemelerde iyi hücre yapısı darbe direncini artırmaktadır. Literatürde köpük üretiminde ekstrüzyon ve mikro hücre üretim yöntemi karşılaştırılmış ve daha iyi hücre yapısı sunan mikro hücre yöntemi ile üretilen köpüklerin darbe direnci değerlerini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Mengeloğlu, 2001). Bu çalışmada kullanılan pres kalıplama yönteminin ise köpük üretiminde kötü ve düzensiz bir hücre yapısına yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 4.47. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin spesifik darbe direnci grafikleri

4.3.3. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı iletkenlik özellikleri

Atık PVC kompozitlerin ısı iletkenlik değerleri Çizelge 4.39’da verilmiştir. Kompozitlerin ısı iletkenlik katsayıları 0,044-0,048 W/mK, ısıl geçirgenlik direnci değerleri 0,081-0,083 m²K/W arasında değişiklik göstermektedir.

Çizelge 4.39. Atık PVC kompozitlerin ısı iletkenlik değerleri

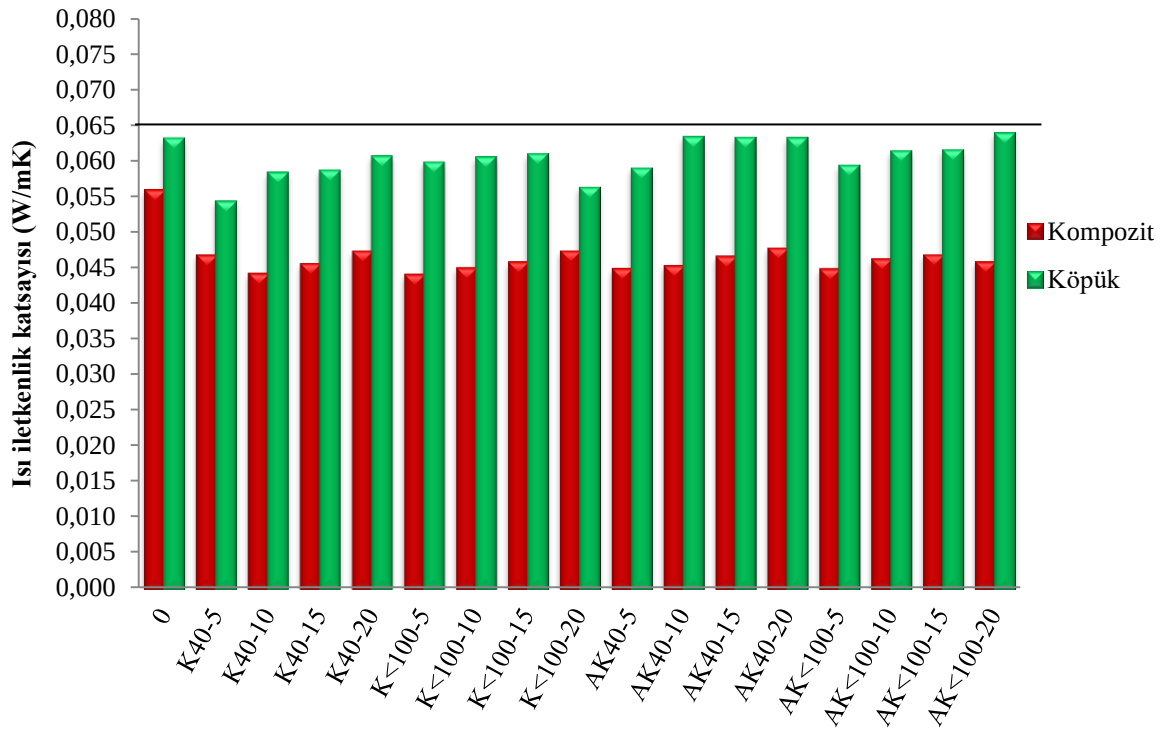
Örnek kodu	Kalınlık (mm)	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Isıl geçirgenlik direnci (m ² K/W)
Kontrol	4,6	0,056	0,082
K-K40-5	3,8	0,047	0,081
K-K40-10	3,6	0,044	0,082
K-K40-15	3,7	0,046	0,081
K-K40-20	3,9	0,047	0,082
K-K<100-5	3,6	0,044	0,082
K-K<100-10	3,7	0,045	0,082
K-K<100-15	3,8	0,046	0,083
K-K<100-20	3,9	0,047	0,082
K-AK40-5	3,7	0,045	0,083
K-AK40-10	3,7	0,045	0,082
K-AK40-15	3,8	0,047	0,082
K-AK40-20	3,9	0,048	0,082
K-AK<100-5	3,7	0,045	0,083
K-AK<100-10	3,8	0,046	0,082
K-AK<100-15	3,8	0,047	0,081
K-AK<100-20	3,8	0,046	0,083

Atık PVC kompozit köpüklerin ise ısı iletkenlik katsayısı değerleri 0,054-0,064 W/mK, ısıl geçirgenlik direnci değerleri 0,88-0,120 m²K/W arasında değişmektedir (Çizelge 4.40). Atık PVC kompozit köpüklerde en düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olan köpükler 0,054 W/mK ile KÖ-K40-5 (5 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler) grubu köpüklerdir. Isıl geçirgenlik direncinde ise en düşük ısıl geçirgenlik değerine sahip grup KÖ-AK<100-20 (20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler), en yüksek ısıl geçirgenlik direncine sahip grup KÖ-AK40-20 (20 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler)'dir.

Çizelge 4.40. Atık PVC kompozit köpüklerin ısı iletkenlik değerleri

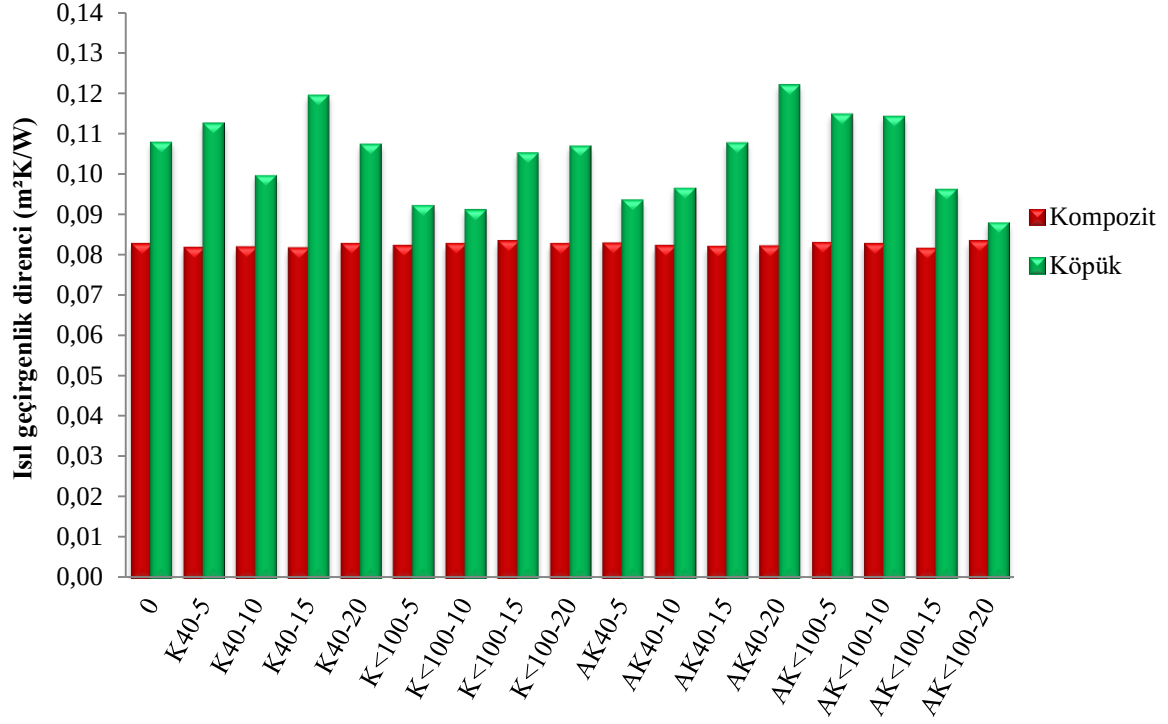
Örnek kodu	Kalınlık (mm)	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Isıl geçirgenlik direnci (m ² K/W)
Kontrol	6,8	0,063	0,108
KÖ-K40-5	6,1	0,054	0,112
KÖ-K40-10	5,8	0,058	0,099
KÖ-K40-15	7,0	0,059	0,119
KÖ-K40-20	6,5	0,061	0,107
KÖ-K<100-5	5,5	0,060	0,092
KÖ-K<100-10	5,5	0,061	0,091
KÖ-K<100-15	6,4	0,061	0,105
KÖ-K<100-20	6,0	0,056	0,107
KÖ-AK40-5	5,5	0,059	0,093
KÖ-AK40-10	6,1	0,063	0,096
KÖ-AK40-15	6,8	0,063	0,107
KÖ-AK40-20	7,7	0,063	0,122
KÖ-AK<100-5	6,8	0,059	0,115
KÖ-AK<100-10	7,0	0,061	0,114
KÖ-AK<100-15	5,9	0,062	0,096
KÖ-AK<100-20	5,6	0,064	0,088

Isı iletkenlik katsayısı değerleri değerlendirildiğinde, yalıtım standardına göre üretilen atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerde bütün gruplar yalıtım malzemesi olarak sınıflandırılabilir (Şekil 4.48).



Şekil 4.48. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı grafiği

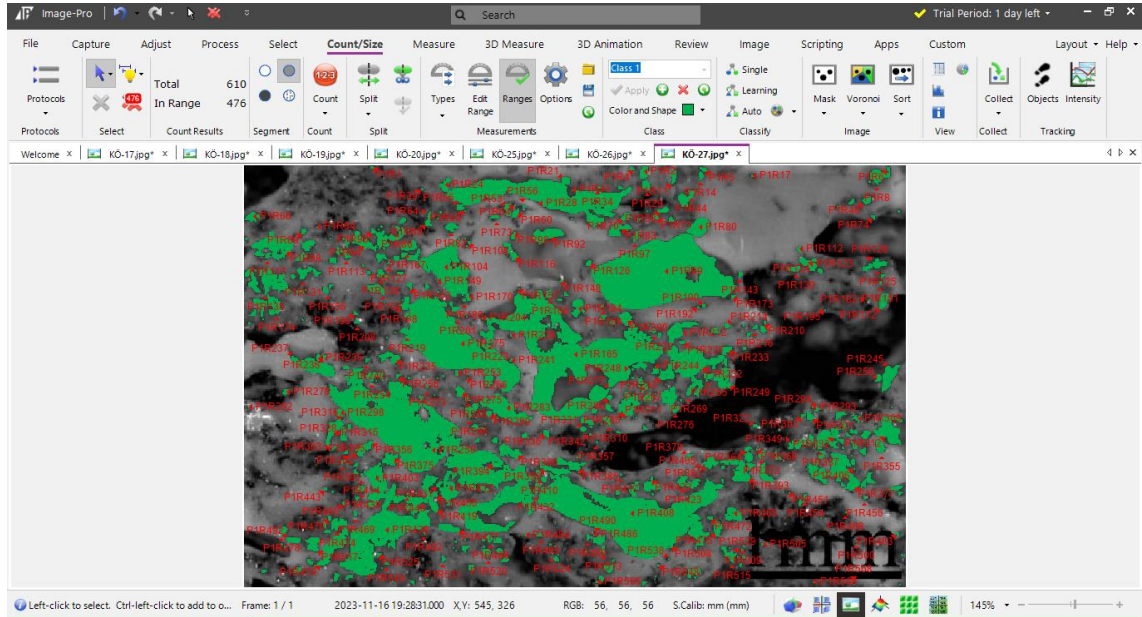
Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı geçirgenlik direnci grafiği Şekil 4.49'de gösterilmiştir. Atık PVC kompozit köpüklerin tamamının ısı geçirgenlik direnci atık PVC kompozitlerinkinden daha yüksektir. Üretilen atık PVC kompozit malzemelerde ısı geçirgenlik direnci üzerine lignoselülozik dolgu malzemesi türü, boyutu ve miktarının herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Atık PVC kompozit köpüklerin ısı geçirgenlik direnç değerleri KÖ-K40-5, KÖ-K40-15, KÖ-K<100-20, KÖ-AK40-5 ve KÖ-AK40-10 kodlu gruplar haricinde kontrol grubuna göre daha düşüktür. Kavak atığı ile üretilen kompozit köpüklerde 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda 5 ve 15 phr dolgu malzemesi içeriğinde ısı geçirgenlik direnci artarken 10 ve 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde düşmüştür. <100 dolgu malzemesi boyutunda ise 5 ve 10, 15 ve 20 dolgu malzemesi miktarları birbirine yakın değerler göstermiş ve dolgu malzemesi miktarı arttıkça direnç artmıştır. Ağaç kabuğu ile üretilen kompozit köpüklerde ısı geçirgenlik direnci 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile artış gösterirken <100 mesh dolgu malzemesi boyutunda 5 ve 10 phr lignoselülozik dolgu malzemesi içeriğinde sabit kalmış daha sonra dolgu malzemesi miktarı arttıkça düşüş göstermiştir. Atık PVC kompozit köpüklerde kavak atığı ile üretilen kompozit köpüklerde 20 phr lignoselülozik dolgu malzemesi içeriği haricinde dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe ısı geçirgenlik direnci azalmıştır. Ağaç kabuğu ile üretilen kompozit köpüklerde ise ısı geçirgenlik direnci 10 phr dolgu maddesi miktarına kadar dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe artarken, 15 ve 20 phr dolgu malzemesi miktarlarında azalmıştır. Kompozit köpüklerde 40 mesh dolgu boyutunda 20 phr dolgu malzemesi miktarı haricinde kavak atığı ile üretilen kompozit köpüklerin ısı geçirgenlik direnci ağaç kabuğu ile üretilenlerinkine göre daha yüksektir. Isı geçirgenlik direnci köpük malzemenin hücre yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler ağaç kabuğu ile üretilen kompozit köpüklere göre daha iyi hücre yapısı sergilemiştir. <100 mesh dolgu boyutunda ise kavak atığı ile üretilen kompozitlerin ısı geçirgenlik direnci 5 ve 10 phr dolgu malzemesi içeriğinde daha düşükken, 15 ve 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde daha yüksektir.



Şekil 4.49. Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin ısı geçirgenlik direnci grafiği

4.3.4. Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı

Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı analizi Şekil 4.50’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi analiz programı lignoselülozik dolgu malzemeleri ile hücreleri ayırt edememiştir. Bu sebeple kompozit köpüklerin analiz sonuçları doğruyu yansıtmadığından hücre yapısı değerleri değerlendirilememiştir.



Şekil 4.50. Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı analizi

Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı görüntüleri Şekil 4.51’de gösterilmiştir. Kompozit köpüklerin hücre yapısı kontrol grubuna göre değerlendirildiğinde hücre sayısında azalma meydana geldiği ve genel olarak daha büyük hücreler oluşarak hücre yapısının düzensizleştiği gözlemlenmiştir. Lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile 15 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar hücre sayısı azalmış, hücre boyutu artmış, hücre yapısı düzensizleşmiş ve daha fazla hücre birleşmesi meydana gelmiştir. 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde ise hücre oluşumu azalmıştır. Köpüklendirilmiş kompozit malzemelerde dolgu malzemeleri genel olarak hem hücre çekirdeklenmesine katkı sağlamakta hem de heterojen bir hücre yapısına sebep olmaktadır. Dolgu malzemelerinin hücre çekirdeklenmesine yardımcı olurken polimer matrisin viskozitesinin artmasına neden olarak eriyik dayanımını artırdığı ve bu nedenle hücre büyümesini engellediği bilinmektedir (Mengeloğlu ve Matuana, 2003; Demir ve ark., 2008; Lee, 2008; Aydemir, 2012). Yapılan bir çalışmada 200 °C sıcaklıkta (bizim üretimimizde kullanılan sıcaklık değeri ile aynı) PVC’nin erime akış indeksinin 38,20 g/10dk, PVC/odun unu karışımının erime akış indeksinin ise 11,04 g/10dk olduğu belirlenmiştir (Kozłowski ve ark., 2008). Kompozit köpükler dolgu malzemesi miktarının artması ile genellikle daha düşük genişleme oranı göstererek düzensiz ve heterojen bir hücre yapısı sergilemektedir (Demir ve ark., 2008; Mengeloğlu ve ark., 2009; Kılıç, 2012; Xu ve ark., 2017). Her iki lignoselülozik dolgu malzemesinde de dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe daha küçük hücre oluşumu meydana gelmiş ve hücre sayısı artmıştır. Dolgu malzemesi boyutu fark etmeksizin 15 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler daha iyi hücre yapısı sergilerken 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde ağaç kabuğu daha iyi hücre yapısı göstermiştir.



D30EK0,25



KÖ-K40-5



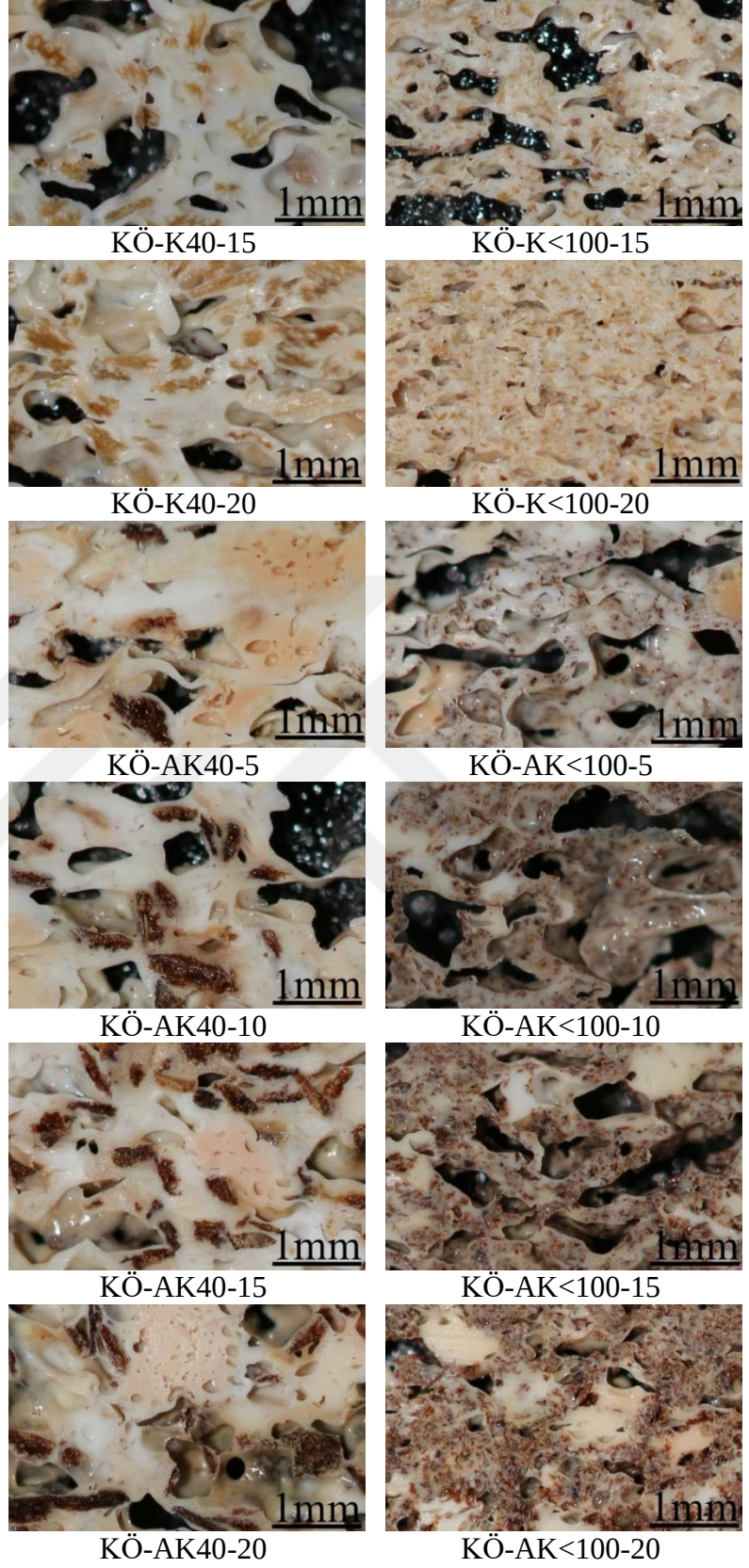
KÖ-K<100-5



KÖ-K40-10



KÖ-K<100-10



Şekil 4.51. Atık PVC kompozit köpüklerin hücre yapısı görüntüleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Atık PVC esaslı köpük malzemelerin sonuçları;

- ✓ Atık PVC köpüklerin yoğunluk değerleri $0,58-1,11 \text{ g/cm}^3$ arasında değişiklik göstermektedir. En düşük yoğunluk değeri $0,58 \text{ g/cm}^3$ değeri ile 20 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpük grubunda, en yüksek yoğunluk ise $1,11 \text{ g/cm}^3$ ile 30 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren köpük grubunda belirlenmiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde en düşük çekme direnci değeri (1,22 MPa) 40 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpüklerde, en yüksek çekme direnci ise (3,41 MPa) 20 phr DOP ve 0,25 phr endotermik köpük ajanı içeren köpüklerde görülmüştür.
- ✓ Atık PVC köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinde en düşük çekmede elastikiyet modülü gösteren grup 2,25 MPa ile 40 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren kodlu grupken en yüksek çekmede elastikiyet modülü gösteren grup 60,79 MPa ile 20 phr DOP ve 0,5 phr endotermik köpük ajanı içeren kodlu gruptur.
- ✓ Atık PVC köpüklerde 20 phr DOP ve 0,25 phr endotermik köpük ajanı içeren köpükler en düşük kopmada uzama değeri (% 13,55) verirken, 40 phr DOP ve 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpükler en yüksek kopmada uzama değeri (% 88,13) vermiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerin eğilme direncinde en düşük eğilme direnci değerini (0,41 MPa) 40 phr DOP ve 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpükler gösterirken, en yüksek eğilme direnci değerini (4,67 MPa) 20 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren köpükler göstermiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde en düşük değer 6,92 MPa ile 40 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren gruba aitken, en yüksek değer 167,56 MPa ile 20 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren köpüklerde belirlenmiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerin darbe direnci değerlerinde en düşük darbe direnci ($4,01 \text{ kJ/m}^2$) 20 phr DOP ve 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpüklerde, en

yüksek darbe direnci ($24,44 \text{ kJ/m}^2$) 30 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren köpüklerde belirlenmiştir.

- ✓ Atık PVC köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri $0,052-0,067 \text{ W/mK}$ arasında değişmektedir. 20 phr DOP ve 0,25 phr ekzotermik köpük ajanı içeren, 30 phr DOP ve 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeren ve 40 phr DOP ve 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeren gruplar haricinde üretilen bütün köpükler standartlara göre yalıtım malzemesi sınıfına girmektedir. En düşük ısı iletim katsayısı değeri $0,052 \text{ W/mK}$ ile 40 phr DOP ve 0,25 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpüklerde gözlemlenmiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde en düşük ısıl geçirgenlik direncine sahip olan grup 20 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren grup ($0,094 \text{ m}^2\text{K/W}$), en yüksek ısıl geçirgenlik direncine sahip olan grup ise 20 phr DOP ve 0,75 phr ekzotermik köpük ajanı içeren ($0,132 \text{ m}^2\text{K/W}$) gruptur.
- ✓ Atık PVC köpüklerin tamamının yoğunluk değerleri köpüklendirilmemiş atık PVC'ye göre düşmüş ve ısıl geçirgenlik direnci ise artış göstermiştir. Mekanik özellikler ise beklenildiği gibi düşüş göstermiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde köpük ajanı miktarının artması ile köpüklerin yoğunluk, çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci düşüş göstermiş, kopmada uzama değerleri ise artmıştır.
- ✓ Ekzotermik köpük ajanı kullanılarak üretilen atık PVC köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilenlere göre daha düşük yoğunluk, çekme, eğilme ve darbe direnci, çekmede ve eğilmede elastikiyet modülü sergilerken daha yüksek kopmada uzama ve ısıl geçirgenlik direnci göstermiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde DOP miktarının artması ile yoğunluk ve kopmada uzama artarken çekme ve eğilme direnci, çekmede ve eğilmede elastikiyet modülü azalmıştır. Darbe direnci değerleri ise 30 phr DOP içeriğine kadar artmış 40 phr DOP içeriğinde tekrar düşüş göstermiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerin hücre sayısı 52-304 arasında değişmektedir. En fazla hücre sayısı 20 phr DOP ve 0,25 phr ekzotermik köpük ajanı içeren grupta belirlenmiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde ortalama hücre boyutu değerleri $0,04-0,12 \text{ mm}$ aralığındadır. En düşük ortalama hücre boyutu 20 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı

içeren köpük grubuna, en yüksek ortalama hücre boyutu 40 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren köpük grubuna aittir.

- ✓ Atık PVC köpüklerin hücre yoğunluğu 0,24-3,44 hücre/cm² arasındadır. En düşük hücre yoğunluğuna sahip gruplar 40 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren ve 40 phr DOP ve 0,75 phr endotermik köpük ajanı içeren köpükler iken en yüksek hücre yoğunluğuna sahip köpükler 20 phr DOP ve 0,25 phr ekzotermik köpük ajanı içeren gruptur.
- ✓ Atık PVC köpüklerin boşluk oranları % 0,3-57 arasında değişmektedir. Ve en düşük boşluk oranı 30 phr DOP ve 0,125 phr endotermik köpük ajanı içeren grupta, en yüksek boşluk oranı 20 phr DOP ve 0,5 phr ekzotermik köpük ajanı içeren grupta belirlenmiştir.
- ✓ Atık PVC köpüklerde hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi için gereken gaz miktarının 0,125 köpük ajanı içeriğinde yeterli olmadığı ve köpüklenmenin polimer matrisin her yerinde tam olarak sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Köpük ajanı miktarının artması ile köpüklenme gerçekleşmiş ve 0,25 phr köpük ajanı içeriğinde hücre sayısının arttığı ve daha küçük homojen hücre oluştuğu görülmüştür. Köpük ajanı miktarının artmaya devam etmesi daha büyük hücrelerin oluşması, hücre birleşmelerinin meydana gelmesi ve hücre yapısının düzensizleşmesine sebep olmuştur. Üretilen atık PVC köpüklerin hücre yapısı görüntülerinde en iyi hücre yapısı 0,25 phr köpük ajanı içeren köpüklerde gözlemlenmiştir.
- ✓ Ekzotermik köpük ajanı ile üretilen köpükler endotermik köpük ajanı ile üretilen köpüklere göre daha küçük ve homojen bir hücre yapısı sergilemiştir.
- ✓ DOP miktarının artması ile daha büyük hücreler oluştuğu, hücre birleşmeleri ve hücre çökmelerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. DOP miktarının artmasına bağlı olarak polimer matrisin akışkanlığının artması ve eriyik dayanımının (melt strength) düşmesi (özellikle 40 phr DOP içeren köpüklerde) fazla miktarda hücre birleşmesi ve hücre çökmesinin meydana gelmesiyle sonuçlanmıştır. Atık PVC köpüklerin üretimi esnasında basınç farkı oluşturulması aşamasında eriyik polimer içerisinde çözünen gazın dışarı çıkarken hücre duvarını parçalayarak hücre birleşmelerinin meydana geldiği ya da hücre duvarlarının çöktüğü görülmüştür.

Bunun yanı sıra hücrelerin gazın çıkış yönüne doğru (yani presin kenarlarına doğru) yönelerek elips şeklinde hücrelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

- ✓ Atık PVC köpüklerin bütün sonuçları değerlendirildiğinde optimum köpük ajanı miktarının 0,25 phr, köpük ajanı türünün ekzotermik köpük ajanı ve DOP miktarının 30 phr olduğu belirlenmiştir.

Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerin sonuçları;

- ✓ Atık PVC kompozitlerin yoğunluk değerleri $1,25-1,41 \text{ g/cm}^3$ arasında değişiklik gösterirken atık PVC kompozit köpüklerin yoğunluk değerleri $0,85-1,15 \text{ g/cm}^3$ arasında değişiklik göstermiştir. Atık PVC kompozit köpüklerde ise en düşük yoğunluk değeri 20 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklerde, en yüksek yoğunluk değeri ise 20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpükler ve 20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpüklerde belirlenmiştir.
- ✓ Atık PVC kompozitlerin su alma oranları atık PVC kompozit köpüklerin su alma oranları ile karşılaştırıldığında kompozitlerin su alma oranları çok daha düşüktür. Kompozitlerin su alma oranları yaklaşık olarak % 10'larda iken kompozit köpüklerin su alma oranları % 40 seviyelerindedir.
- ✓ Kompozit köpüklerin su alma oranı, dolgu malzemesi içermeyen saf atık PVC köpüğün su alma oranından daha düşüktür. Saf atık PVC köpüğün su alma oranı % 80'leri geçerken atık PVC kompozit köpüklerin su alma oranları ortalama olarak % 40 civarındadır.
- ✓ Atık PVC kompozitlerin kalınlık artımı oranı atık PVC kompozit köpüklerin kalınlık artımı ile yakın oranlar gösterirken 40 mesh kavak testere atığı ile üretilen yüksek lignoselülozik dolgu malzemesi içeren (15 ve 20 phr) kompozitlerde kalınlık artımı kompozit köpüklerinkinden daha yüksektir.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerde en düşük çekme direnci $1,67 \text{ MPa}$ ile 15 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpük, en yüksek çekme direnci $3,42$ ile 20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpük grubundadır.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinde en düşük değer ($11,33 \text{ MPa}$) 5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit

köpüklerde, en yüksek değer (48,58 MPa) 20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklerdedir.

- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerin kopmada uzama değerlerinde; en düşük kopmada uzama değeri % 11,18 20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklere aitken en yüksek kopmada uzama değeri % 31,83 5 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklere aittir.
- ✓ Kompozit köpüklerde en düşük eğilme direncine sahip grup 1,00 MPa ile 5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklerde, en yüksek eğilme direncine sahip olan grup 5,19 MPa ile 20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklerde belirlenmiştir.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerde en düşük eğilmede elastikiyet modülü 25,43 MPa 5 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpük grubunda, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü değeri 164,95 MPa 20 phr <100 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpük grubunda görülmüştür.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerde en düşük darbe direnci değerini (8,77 kJ/m²) 20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler, en yüksek darbe direnci değerini ise (16,14 kJ/m²) 5 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpükler vermiştir.
- ✓ Isı yalıtım standardına göre üretilen atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerde bütün gruplar yalıtım malzemesi olarak sınıflandırılabilir.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerin tamamının ısıl geçirgenlik direnci değerleri atık PVC kompozitlerinkinden daha yüksektir.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerde en düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olan köpükler 0,054 W/mK ile 5 phr 40 mesh kavak testere atığı içeren kompozit köpüklerdir.
- ✓ Isıl geçirgenlik direncinde ise en düşük ısıl geçirgenlik değerine sahip grup 20 phr <100 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpük grubu, en yüksek ısıl geçirgenlik direncine sahip grup 20 phr 40 mesh ağaç kabuğu içeren kompozit köpük grubudur.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerin tamamının yoğunluk değerleri atık PVC kompozitlerin yoğunluk değerlerinden daha düşüktür.

- ✓ Atık PVC kompozit ve kompozit köpüklerde genel olarak üretilen bütün kompozitlerin çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, kopmada uzama, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci değerleri kompozit köpüklerin değerlerinden daha yüksektir. Bu farkın bir kısmının yoğunluktan, bir kısmı ise hücre yapısından kaynaklanmaktadır.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerin yoğunluk, çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü değerleri lignoselülozik dolgu malzemesi içermeyen atık PVC köpüğün değerlerine göre artış gösterirken su alma, kalınlık artımı, kopmada uzama, darbe direnci ve ısıl geçirgenlik direnci azalmıştır.
- ✓ Atık PVC kompozit köpüklerde dolgu malzemesi miktarının artması ile yoğunluk değerleri 40 mesh dolgu malzemesi boyutunda azalırken <100 mesh dolgu malzemesi boyutunda artmıştır. Çekme ve eğilme direnci, çekmede ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri artarken kopmada uzama ve darbe direnci değerleri ise düşüş göstermiştir.
- ✓ Lignoselülozik dolgu malzemesi türünün yoğunluk ve çekme direncinde istatistiksel olarak herhangi bir etkisi bulunmazken diğer özelliklerde kavak testere atığı ile üretilen kompozit köpükler ağaç kabuğu ile üretilen kompozit köpüklere göre genel olarak daha iyi sonuçlar vermiştir.
- ✓ Dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe atık PVC kompozit köpüklerin yoğunluk, kalınlık artımı, çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü artmıştır. Su alma, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci düşüş göstermiştir. Isıl geçirgenlik direnci ise genel olarak düşüş göstermiştir. Ancak 5 ve 10 phr ağaç kabuğu içeren kompozit köpüklerde artış göstermiştir.
- ✓ Kompozit köpüklerin hücre yapısı kontrol grubuna göre değerlendirildiğinde hücre sayısında azalma meydana geldiği ve genel olarak daha büyük hücreler oluşarak hücre yapısının düzensizleştiği gözlemlenmiştir.
- ✓ Lignoselülozik dolgu malzemesi miktarının artması ile 15 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar hücre sayısı azalmış, hücre boyutu artmış, hücre yapısı düzensizleşmiş ve daha fazla hücre birleşmesi meydana gelmiştir. 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde ise hücre oluşumu azalmıştır.

- ✓ Dolgu malzemesi boyutu fark etmeksizin 15 phr dolgu malzemesi içeriğine kadar kavak atığı ile üretilen kompozit köpükler daha iyi hücre yapısı sergilerken 20 phr dolgu malzemesi içeriğinde ağaç kabuğu daha iyi hücre yapısı göstermiştir.
- ✓ Her iki lignoselülozik dolgu malzemesinde de dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe daha küçük hücre oluşumu meydana gelmiş ve hücre sayısı artmıştır.

Öneriler;

- Atık PVC kompozit köpükler farklı kalınlıklarda üretilerek ısı iletim özellikleri karşılaştırılabilir.
- Atık PVC kompozit köpüklerin ses absorpsiyon, buhar geçirgenlik ve UV yaşlandırma özellikleri belirlenebilir.
- Atık PVC köpük ve kompozit köpüklerin üretiminde mikro hücre, ekstrüzyon ya da enjeksiyon kalıplama gibi başka üretim yöntemleri denenebilir ve hücre yapısı incelenebilir.
- Üretilen atık PVC kompozit köpükler ile sandviç paneller üretilebilir ve özellikleri değerlendirilebilir.
- Köpük malzemeler saf işlenmemiş PVC kullanılarak üretilip işlenmemiş ve atık PVC köpük özellikleri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdul Azam, F. A., Rajendran Royan, N. R., Yuhana, N. Y., Mohd Radzuan, N. A., Ahmad, S., Sulong, A. B. (2020). Fabrication of Porous Recycled HDPE Biocomposites Foam: Effect of Rice Husk Filler Contents and Surface Treatments on the Mechanical Properties. *Polymers*, 12(2), 475.
- Abu-Zahra, N. H., Alian, A. M. (2010). Density and cell morphology of rigid foam PVC-clay nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49(3), 237-243.
- Akıncı, H., (2007). *Günümüzde uygulanan ısı yalıtım malzemeleri, özellikleri, uygulama teknikleri ve fiyat analizleri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya. 218s.
- Aksoy, U. T. (2008). Sandviç ve Gaz Beton Duvar Uygulamalarının Ortalama Isı Geçirgenlik Katsayısı ve Isı Kaybı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 24(1), 277-290.
- Alian, A. M., Abu-Zahra, N. H. (2009). Mechanical properties of rigid foam PVC-clay nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(10), 1014-1019.
- ASTM-C518, (2017). Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, ASTM International.
- ASTM-D2240, (2015). Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness, ASTM International.
- ASTM-D256, (2010). Standard test for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics, ASTM International.
- ASTM-D570, (2010). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, ASTM International.
- ASTM-D618, (2013). Standard practice for conditioning plastics for testing, ASTM International.

- ASTM-D635, (2014). Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position, ASTM International.
- ASTM-D638, (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International.
- ASTM-D790, (2017). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International.
- ASTM-D792, (2013). Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement, ASTM International.
- Ateşoğlu, A., Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ., Özlüsoylu, Ş., Tonbul, H., YILMAZ, E. Ö., ÖZTÜRK, M. Y. (2022). Türkiye'de Hızlı Büyüyen Türlerle Ait Spektral Kütüphane Kurulması: Kavak Türleri Çalışması. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2), 324-338.
- Aydemir, D., (2012). *Selülozik nano/makro partiküllerle desteklenmiş stiren maleik anhidrit (sma) kompozitlerinin köpüklendirilmesi ve karakterizasyonu*. Doktora Tezi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bartın. 197s.
- Aydoğan, B., Usta, N. (2015). Nanokalsit ve Kabaran Alev Geciktirici İlaveli Rijit Poliüretan Köpüklerin Isıl İletkenlik, Isıl Bozunma ve Yanma Direncinin Deneysel İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 35(2), 63-74.
- Azimipour, B., Marchand, F. (2006). Effect of calcium carbonate particle size on PVC foam. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 12(2), 55-57.
- Bayraktar, D., Bayraktar, E. (2016). Mevcut Binalarda Isı Yalıtımı Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 59-66.
- Bektaş, V., Çerçevik, A. E., Kandemir, S. Y. (2017). Binalarda Isı Yalıtımının Önemi ve Isı Yalıtım Malzemesi Kalınlığının Yalıtıma Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 36-42.

- Binici, H., Aksogan, O. (2016). Eco-friendly insulation material production with waste olive seeds, ground PVC and wood chips. *Journal of Building Engineering*, 5, 260-266.
- Bledzki, A. K., Faruk, O. (2006). Injection moulded microcellular wood fibre–polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1358-1367.
- Braun, D. (2002). Recycling of PVC. *Progress in Polymer Science*, 27(10), 2171-2195.
- Bribián, I. Z., Capilla, A. V., Usón, A. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140.
- Brundtland, G.H. (1987). Report of the world commission on environment and development: our common future. 300s.
- Burgess, R. H., (1981). *Manufacture and processing of PVC*. Elsevier Applied Science Publishers. ISBN: 0-203-79880-5, UK, 220s.
- Burns, K., Potgieter, J. H., Potgieter-Vermaak, S., Ingram, I. D., Liauw, C. M., (2023). A comparative assessment of the use of suitable analytical techniques to evaluate plasticizer compatibility. *Journal of Applied Polymer Science*, 140:e54104, 1-11.
- Carraher Jr, C. E., (2013). *Introduction to polymer chemistry (Third edition)*. CRC press. ISBN: 13: 978-1-4665-5495-5 (eBook-Pdf), USA, 545s.
- Chand, N., Fahim, M., Sharma, P., Bapat, M. N. (2012). Influence of foaming agent on wear and mechanical properties of surface modified rice husk filled polyvinylchloride. *Wear*, 278, 83-86.
- Chen, Y., Zhou, S., Pan, S., Zhao, D., Wei, J., Zhao, M., Fan, H. (2022). Methods for determination of plasticizer migration from polyvinyl chloride synthetic materials: a mini review. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4(1), 8.

- Chuaponpat, N., Areerat, S. (2018). The effects of foaming conditions on plasticized polyvinyl chloride foam morphology by using supercritical carbon dioxide. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 23526-23533.
- Çetin, N. S., Özmen, N., Narlıoğlu, N. (2014). Effect of bark flour on the mechanical properties of HDPE composites. *Usak University Journal of Material Sciences*, 3(1), 23-32.
- Demir, H., Sipahioğlu, M., Balköse, D., Ülkü, S. (2008). Effect of additives on flexible PVC foam formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3), 144-153.
- Dikici, A., Kocagül, M. (2019). Isı Yalıtımında Kullanılan Eps, Xps Ve Taş Yünü İzolasyon Malzemelerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 129-136.
- Dikmen, Ç. B., Savcı, S., (2015). Sürdürülebilir yapı tasarımı kapsamında çevre dostu yeşil çatı uygulamalarının irdelenmesi. *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, 28-30 Mayıs, 2015, Ankara-Türkiye, s 214-220.
- Dönmez Çavdar, A., Kalaycioğlu, H., Mengeloğlu, F. (2011). Tea mill waste fibers filled thermoplastic composites: The effects of plastic type and fiber loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(10), 833-844.
- Dönmez, İ. E., Dönmez, Ş. (2013). Ağaç kabuğunun yapısı ve yararlanma imkanları. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 14, 156-162.
- Eaves, D., (2004). *Handbook of polymer foams*. iSmithers Rapra Publishing. ISBN: 1-85957-388-6, UK, 304s.
- Egercioğlu, Y., İregöl, A. (2017). İzmir’de Kentsel Dönüşüm Projelerinde Sürdürülebilir İnşaat Atık Yönetiminin Değerlendirilmesi. *Evaluation of Sustainable Construction Waste Management for Urban Regeneration Project in Izmir*, 27(2), 169-179.
- Estravís, S., Tirado-Mediavilla, J., Santiago-Calvo, M., Ruiz-Herrero, J. L., Villafaña, F., Rodríguez-Pérez, M. Á. (2016). Rigid polyurethane foams with infused

nanoclays: Relationship between cellular structure and thermal conductivity. *European Polymer Journal*, 80, 1-15.

- Faraji, M., Aydisheh, H. M. (2019). Facile and scalable preparation of highly porous polyvinyl chloride-multi walled carbon nanotubes-polyaniline composite film for solid-state flexible supercapacitor. *Composites Part B: Engineering*, 168, 432-441.
- Farsheh, A. T., Talaeipour, M., Hemmasi, A. H., Khademieslam, H., Ghasemi, I. (2011). Investigation on the mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC/multi-walled carbon nanotube. *BioResources*, 6(1), 841-852.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Matuana, L. M. (2007). Microcellular foamed wood-plastic composites by different processes: A review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(2), 113-127.
- Gašparovič, L., Koreňová, Z., Jelemenský, Ľ. (2010). Kinetic study of wood chips decomposition by TGA. *Chemical papers*, 64(2), 174-181.
- Ghasemi, I., Farsheh, A. T., Masoomi, Z. (2012). Effects of multi-walled carbon nanotube functionalization on the morphological and mechanical properties of nanocomposite foams based on poly (vinyl chloride)/(wood flour)/(multi-walled carbon nanotubes). *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 18(3), 161-167.
- Gohatre, O. K., Biswal, M., Mohanty, S., Nayak, S. K. (2020). Effect of silane treated fly ash on physico-mechanical, morphological, and thermal properties of recycled poly (vinyl chloride) composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(19), 50387.
- Gohatre, O. K., Biswal, M., Mohanty, S., Nayak, S. K. (2021). An effective sustainable approach towards recycling and value addition of waste poly (vinyl chloride) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) recovered from electronic waste (e-waste). *Journal of Polymer Research*, 28, 1-16.

- Gupta, N., Pinisetty, D., Shunmugasamy, V. C., (2013). *Reinforced polymer matrix syntactic foams: effect of nano and micro-scale reinforcement*. Springer Science & Business Media. ISBN: 978-3-319-01243-8 (e-Book), USA, 85s.
- Gupta, N., Zeltmann, S. E., Luong, D. D., Doddamani, M., (2019). *Testing of foams, Handbook of mechanics of material*. Springer Nature Singapore, ISBN: 978-981-10-6884-3 (e-Book), USA, 2431s.
- Güney Karadişoğulları, Ö., (2013). *Akıllı binalarda kullanılan sistemlerin sürdürülebilirlik bağlamında irdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 67s.
- Han, T., Wang, X., Xiong, Y., Li, J., Guo, S., Chen, G. (2015). Light-weight poly (vinyl chloride)-based soundproofing composites with foam/film alternating multilayered structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 27-34.
- Heidari, A., Fasihi, M. (2019). Cell structure-impact property relationship of polypropylene/thermoplastic elastomer blend foams. *eXPRESS Polymer Letters*, 13(5), 429-442.
- İMSAD, (2012). İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik: yeşil binalar ve nanoteknoloji stratejileri. İMSAD Rapor No: İMSAD-R/2012-11/374 (www.imsad.org), TÜSİAD Rapor No: TÜSİAD-T/2012-10/533 (www.tusiad.org). ISBN: 978-9944-405-88-1. 137s.
- Janajreh, I., Alshrah, M., Zamzam, S. (2015). Mechanical recycling of PVC plastic waste streams from cable industry: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 18, 13-20.
- Jiang, Z., Yao, K., Du, Z., Xue, J., Tang, T., Liu, W. (2014). Preparation and chemical reactions of rigid cross-linked poly (vinyl chloride) foams modified by epoxy compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(15).
- Jiang, Z., Yao, K., Du, Z., Xue, J., Tang, T., Liu, W. (2014). Rigid cross-linked PVC foams with high shear properties: the relationship between mechanical properties

and chemical structure of the matrix. *Composites Science and Technology*, 97, 74-80.

Kabir, H., Gafur, M. A., Ahmed, F., Begum, F., Qadir, M. R. (2014). Investigation of physical and mechanical properties of bamboo fiber and PVC foam sheet composites. *Universal Journal of Materials Science*, 2(6), 119-124.

Kain, G., Lienbacher, B., Barbu, M. C., Plank, B., Richter, K., Petutschnigg, A. (2016). Evaluation of relationships between particle orientation and thermal conductivity in bark insulation board by means of CT and discrete modeling. *Case studies in nondestructive testing and evaluation*, 6, 21-29.

Kairytė, A., Kirpluks, M., Ivdre, A., Cabulis, U., Vaitkus, S., Pundienė, I. (2018). Cleaner production of polyurethane foam: Replacement of conventional raw materials, assessment of fire resistance and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 183, 760-771.

Kanny, K., Mahfuz, H., Carlsson, L. A., Thomas, T., Jeelani, S. (2002). Dynamic mechanical analyses and flexural fatigue of PVC foams. *Composite Structures*, 58(2), 175-183.

Karakuş, K., (2012). *Niştasta esaslı biyolojik olarak bozunabilen odun polimer kompozitlerin üretimi ve mikro hücre yöntemiyle köpüklendirilmesi*. Doktora Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş. 172s.

Karakuş, K., Mengeloğlu, F. (2015). Termoplastik Niştasta Esaslı Polimer-Kompozit Köpük Üretimi. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 15(2), 252-260.

Karasu, A., (2013). *Çevresel atıklar, nedenleri, çevresel atıkların geri dönüştürülmesi ve yenilenebilir enerji olanaklarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bilecik. 219s.

Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.

- Kayılı, M., Çelebi, G. (2020). Plastik Atıkların ve Yapıda Kullanım Olanaklarının İncelenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(3), 148-157.
- Khalil, H. A., Tehrani, M. A., Davoudpour, Y., Bhat, A. H., Jawaid, M., Hassan, A. (2013). Natural fiber reinforced poly (vinyl chloride) composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(5), 330-356.
- Khoshnoud, P., Abu-Zahra, N. (2015). Effect of cenosphere fly ash on the thermal, mechanical, and morphological properties of rigid PVC foam composites. *Journal of Research Updates in Polymer Science*, 4(1), 1.
- Khoshnoud, P., Gunashekar, S., Jamel, M. M., Abu-Zahra, N. (2014). Comparative analysis of rigid PVC foam reinforced with class C and class F fly ash. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2(06), 554.
- Khoshnoud, P., Wolgamott, J. C., Abu-Zahra, N. (2018). Evaluating recyclability of fly ash reinforced polyvinyl chloride foams. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 24(2), 154-161.
- Kılıç, İ., (2012). *Doğal lif katkılı polistiren kompozitlerin üretilmesi ve mikro hücre yöntemiyle köpüklendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş. 96s.
- Kılınç, F., Buyruk, E., Fertelli, A., Karabulut, K. (2013). Farklı Yalıtım Uygulamalarının Isı Kaybına Olan Etkilerinin Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi. *Tesisat Mühendisliği*, 136, 53-64.
- Kim, J.J., Rigdon, B., (1998). *Sustainable Architecture Module: Qualities, Use, and Examples of Sustainable Building Materials*. Published by National Pollution Prevention Center for Higher Education. ISBN: 734-764-1412, USA, 44s.
- Kim, J. K., Pal, K. (2010). *Expanded Wood Polymer Composites, Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-14877-4 (e-Book), Berlin, s149-163.

- Kozłowski, M., Szczurek, S., Szczurek, T., Frackowiak, S. (2008). Influence of matrix polymer on melt strength and viscosity of wood flour reinforced composites. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 751-754.
- Kurt, R., Mengeloğlu, F., (2006). Potential utilization of bark residues in Turkey. *1st. International Non-wood Forest Products Symposium*, 1-4 November 2006, Trabzon-Türkiye. s. 1-8.
- Lai, S., Cheng, C., Liao, Y., Su, X., Tan, Q., Yang, S., Bai, S. (2023). The structure and properties of mechanochemically modified acrylonitrile butadiene rubber (NBR)/poly (vinyl chloride)(PVC) scraps and fresh NBR composites. *Waste Management*, 159, 93-101.
- La Rosa, A. D., Recca, A., Gagliano, A., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., Cicala, G. (2014). Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Construction and Building Materials*, 55, 406-414.
- Ledniowska, K., Nosal-Kovalenko, H., Janik, W., Krasuska, A., Stańczyk, D., Sabura, E., Bartoszewicz, M. Rybak, A. (2022). Effective, environmentally friendly PVC plasticizers based on succinic acid. *Polymers*, 14(7), 1295.
- Lee, S. T., & Park, C. B., (2014). *Foam extrusion: principles and practice* (Second Edition). CRC press. ISBN: 978-1-4398-9860-4 (e-Book-Pdf), USA, 596s.
- Lee, Y. H., (2009). *Foaming of wood flour/polyolefin/layered silicate composites*. Doktora tezi. University of Toronto Faculty of Forestry. Toronto. 198s.
- Li, M., Zhang, J., Xin, J., Huang, K., Li, S., Wang, M., Xia, J. (2017). Design of green zinc-based thermal stabilizers derived from tung oil fatty acid and study of thermal stabilization for PVC. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(14).
- Luo, W., Yang, Y., Han, Y., Weng, Y., Zhang, C. (2023). Synergistic Effect of Thermal Stabilization and Plasticization of Epoxidized Cardanol Esters on PVC. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-11.

- Luong, D. D., Pinisetty, D., Gupta, N. (2013). Compressive properties of closed-cell polyvinyl chloride foams at low and high strain rates: Experimental investigation and critical review of state of the art. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 403-416.
- Lu, T., Li, J., Han, X., Liu, R., Cai, C., Wang, H. (2022). Effect of blowing agent concentration of ultra-low density NBR/PVC composite foams on compressive behavior and energy-absorption characteristics. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 28(3), 640-648.
- Ma, Y., Song, F., Yu, J., Wang, N., Jia, P., Zhou, Y. (2022). Combining renewable eleostearic acid and eugenol to fabricate sustainable plasticizer and its effect of plasticizing on PVC. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-10.
- Matuana, L. M., Park, C. B., Balatinecz, J. J. (1998). Cell morphology and property relationships of microcellular foamed PVC/wood-fiber composites. *Polymer Engineering & Science*, 38(11), 1862-1872.
- Matuana, L. M., Mengeloğlu, F. (2001). Microcellular foaming of impact-modified rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 7(2), 67-75.
- Matuana, L. M., Mengeloğlu, F. (2002). Manufacture of rigid PVC/wood-flour composite foams using moisture contained in wood as foaming agent. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 8(4), 264-270.
- May-Pat, A., Avilés, F. (2014). Long term water uptake of a low density polyvinyl chloride foam and its effect on the foam microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, 57, 728-735.
- Mengeloğlu, F., (2001). *Rigid polyvinyl chloride/wood-flour composites and their foams*. Doktora Tezi. Michigan technological university Forest Science. USA. 129s.
- Mengeloğlu, F., Çavuş, V. (2019). Additives used in wood plastic composite manufacturing. Research and Reviews in Agriculture. *Forestry and Aquaculture Sciences*, 49-58.

- Mengeloğlu, F., Karakuş, K. (2008). Some properties of eucalyptus wood flour filled recycled high density polyethylene polymer-composites. *Turkish journal of agriculture and forestry*, 32(6), 537-546.
- Mengeloğlu, F., Karakus, K. (2008). Thermal degradation, mechanical properties and morphology of wheat straw flour filled recycled thermoplastic composites. *Sensors*, 8(1), 500-519.
- Mengeloğlu, F., Kurt, R., Çetin, N.S., (2009). Odun-plastik kompozit köpük üretimi: mikro-hücre yöntemi ve ekstrüzyon yöntemi. *Türkiye bilimsel ve teknolojik araştırma kurumu, tarım, ormancılık ve veterinerlik araştırma grubu*. TOVAG, Proje No: 106O548. 155s.
- Mengeloğlu, F., Matuana, L. M. (2001). Foaming of rigid PVC/wood-flour composites through a continuous extrusion process. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 7(3), 142-148.
- Mengeloğlu, F., Matuana, L. M. (2003). Mechanical properties of extrusion-foamed rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9(1), 26-31.
- Michałowski, S., Prociak, A., Zajchowski, S., Tomaszewska, J., Mirowski, J. (2017). Porous product with reduced apparent density keeps good mechanical properties. Extruded composites of poly (vinyl chloride) blown under microwave irradiation. *Polymer Testing*, 64, 229-234.
- Mills, N., (2007). *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*. Elsevier. ISBN: 0-7506-8069-5, UK, 531s.
- Mishra, S., Verma, J. (2016). Thermal decomposition kinetics of silane treated wood: PVC microcellular composites. *International Journal of Plastics Technology*, 20(1), 93-105.
- Morgan, A. B., Mukhopadhyay, P. (2022). A targeted review of bio-derived plasticizers with flame retardant functionality used in PVC. *Journal of Materials Science*, 57(14), 7155-7172.

- Nerkar, M., Cornetta, J., Swain, M. (2023). New ultra high molecular weight acrylic processing aids for rigid PVC foaming. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 29(2), 322-329.
- OGM, (2023). T.C. tarım ve orman bakanlığı orman genel müdürlüğü 2022 yılı idare faaliyet raporu. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, OGM, 94s.
- Özer, N., (2017). *Atıklardan Üretilen Isı Yalıtım Malzemelerinin Yaygın Kullanılan Isı Yalıtım Malzemeleri İle Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 130s.
- Özkan, D. B., Onan, C., Erdem, S. (2009). Effect of insulation material thickness on thermal insulation. *Sigma*, 27, 190-196.
- Öztan, Y. ve Şahin, Ş., (2003). Anadolu Peyzajının Geleneksel ve Simgesel Tasarım Elemanlarından Kavak Ağacı'nın Dünü, Bugünü, Yarını. *Türkiye Milli Kavak Komisyonu VII. Olağan Kurulu Tebliğler Kitabı*, 8 Nisan 2003, İzmit-Kavak ve Hızlı Gelişen Orman Ağaçları Araştırma Enstitüsü, İzmit-Türkiye, s89-95.
- PAGEV, (2022). Türkiye plastik sektör izleme raporu 2022. PAGEV, 34s.
- PAGEV, (2023). Türkiye plastik sektör izleme raporu 2023/3. PAGEV, 27s.
- Pamuk, R., Kuruoğlu, M. (2016). İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik Ve Bina İnşaatlarında Evrensel Uygulama Örnekleri. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 161-177.
- Pasztory, Z., Mohacsine, I. R., Gorbacheva, G., Börcsök, Z. (2016). The utilization of tree bark. *BioResources*, 11(3), 7859-7888.
- Patrick, S. (2004). PVC compounds and processing. *Rapra Review Reports*. 15(3), 178s.
- Petchwattana, N., Covavisaruch, S. (2011). Influences of modified chemical blowing agents on foaming of wood plastic composites prepared from poly (vinyl chloride) and rice hull. *Advanced Materials Research*, 306, 869-873.

- Petchwattana, N., Covavisaruch, S. (2011). Influences of particle sizes and contents of chemical blowing agents on foaming wood plastic composites prepared from poly (vinyl chloride) and rice hull. *Materials & Design*, 32(5), 2844-2850.
- Petchwattana, N., Covavisaruch, S., Pitidhamabhorn, D. (2013). Influences of water absorption on the properties of foamed poly (vinyl chloride)/rice hull composites. *Journal of Polymer Research*, 20, 1-7.
- PETKİM, (2022). Polivinil klorür (PVC) ürün teknik özellikleri. PETKİM, 8s.
- PLASFED, (2022). Kimya Sektörü. *Plastik Sanayicileri Federasyonu Dergisi*. (39), 134s.
- Putrawan, I. D. G. A., Indarto, A., Octavia, Y. (2022). Thermal stabilization of polyvinyl chloride by calcium and zinc carboxylates derived from byproduct of palm oil refining. *Heliyon*, 8(8), 1-11.
- PÜKAD, (2022). Pencere ve kapı sektörü derneği 2022 Yılı Türkiye Pencere ve Cam Pazarı Raporu. PÜKAD, 11s.
- Ramle, M. S., Romli, A. Z., Abidin, M. H. (2013). Tensile properties of aminosilane treated rice husk/recycled PVC composite. *Advanced Materials Research*, 812, 151-156.
- Roman, K. (2018). Measurements of PVC composite with Corn Cob flour additive. *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, 4(3), 6-10.
- Sadat-Shojai, M., Bakhshandeh, G. R. (2011). Recycling of PVC wastes. *Polymer degradation and stability*, 96(4), 404-415.
- Saha, M. C., Mahfuz, H., Chakravarty, U. K., Uddin, M., Kabir, M. E., Jeelani, S. (2005). Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams. *Materials Science and Engineering: A*, 406(1-2), 328-336.
- Satin, L., Likavčan, L., Košík, M., Rantuch, P., Bílik, J. (2016). Using Sodium Hydrogen Carbonate for Foaming Polymers. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 24(38), 35-41.

- Schiavoni, S., Bianchi, F., Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011.
- Senol, K., Shukla, A. (2019). Dynamic response of closed cell PVC foams subjected to underwater shock loading. *International Journal of Impact Engineering*, 130, 214-225.
- Shakarami, K., Doniavi, A., Azdast, T., Aghdam, K. M. (2013). Microcellular foaming of PVC/NBR thermoplastic elastomer. *Materials and manufacturing processes*, 28(8), 872-878.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422.
- Sombatsompop, N., Thongsang, S. (2001). Rheology, morphology, and mechanical and thermal properties of recycled PVC pipes. *Journal of applied polymer science*, 82(10), 2478-2486.
- Stichnothe, H., Azapagic, A. (2013). Life cycle assessment of recycling PVC window frames. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 40-47.
- Suriyachai, P., Thavarungkul, N., Sae-oui, P. (2013). Effects of azodicarbonamide and vulcanization methods on acrylonitrile–butadiene rubber/polyvinyl chloride foam properties. *Rubber Chemistry and Technology*, 86(1), 86-95.
- Sürmelioglu, S., (2023). *Geri dönüşümlü PVC'den elde edilmiş kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 99s.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2022). Binalar İle Yerleşmeler İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği. 279s.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2022). Türkiye ulusal enerji planı. 54s.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2023). Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023. Resmi gazete. 15s.

- TS-825, (2013). Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ulukavak Harputlugil, G. Kılınç, B., (2016). Enerji Verimli Bina Tasarım Stratejileri.T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Proje Referans No: EuropeAid/134786/IH/SER/TR, 40s.
- Ulusoy, H., Atılğan, A., Peker, H. (2016). Orman ürünleri endüstrisinin ekolojik açıdan irdelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 92-106.
- URL-1: <http://dekota.com.tr/ozellikleri.php> (Erişim tarihi: 21.12.2023).
- Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Çalış, M., Özgüven, S. (2015). EPS ve XPS Malzemeleriyle Yapılan Mantolamaların Yangın Sırasındaki Davranışlarının Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 18(1), 21-28.
- Ünal, H. K., (2013). *Enerji-çevre yönetimi ve sürdürülebilirlik üzerine bir araştırma: İzmir demir çelik örneği*. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. Karabük. 116s.
- Vaikhanski, L., Nutt, S. R. (2003). Fiber-reinforced composite foam from expandable PVC microspheres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(12), 1245-1253.
- Vangeel, T., Neiva, D. M., Quilho, T., Costa, R. A., Sousa, V., Sels, B. F., Pereira, H. (2021). Tree bark characterization envisioning an integrated use in a biorefinery. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- Vikhareva, I. N., Aminova, G. K., Mazitova, A. K. (2022). Development of a Highly Efficient Environmentally Friendly Plasticizer. *Polymers*, 14(9), 1888.
- VinylPlus, (2023). Progress report 2023, VinylPlus; 2023. https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2023/07/VinylPlus_ProgressReport_Digital_2023.pdf.
- Wang, Z., Huang, Z., Li, X., Zhou, J. A. (2019). A Nano Graphene Oxide/ α -Zirconium Phosphate Hybrid for Rigid Polyvinyl Chloride Foams with Simultaneously Improved Mechanical Strengths, Smoke Suppression, Flame Retardancy and

- Thermal Stability. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 180-188.
- Wang, M., Wu, T., Bu, Q., Song, X., Li, M., Yuan, S. (2022). Rare earth Ce based metal organic framework as efficient synergistic thermal stabilizer for PVC: Preparation and thermal stabilization behavior. *Thermochimica Acta*, 718, 179365.
- Wypych, G., (2012). *Handbook of plasticizers* (2nd Edition). ChemTec Publishing. ISBN: 978-1-895198-50-8, Toronto, 739s.
- Xie, Y., Hill, C. A., Xiao, Z., Militz, H., Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 806-819.
- Xu, F., Liu, C.F., Geng, Z.C., Sun, J.X., Sun, R.C., Hei, B.H., Lin, L., Wu, S.B., Je, J. (2006). Characterization of degraded organosolv hemicelluloses from wheat straw. *Polymer Degradation Stability*, 91, 1880-1886.
- Xu, L., Han, T., Li, J., Xiong, Y., Guo, S. (2017). The cell growth-induced orientation of mica in lightweight flexible poly (vinyl chloride) foams and its enhancement on sound insulation. *Composites Science and Technology*, 145, 78-88.
- Yetgin, S. H., Ünal, H. 2008. Polimer Esaslı Köpük Malzemeler. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (17), 117-128.
- Yılmaz, M., Yıldız, S., Gültekin, A. B. (2016). Yıkıcı yeniliklerin belirlenmesi: Sürdürülebilir inşaat sektöründe tehditler ve fırsatlar. *Balıkesir Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 25-36.
- Yurtseven, R., Tarakçılar, A., Topçu, M. (2013). Dolgu Maddesi Olarak Kullanılan Farklı Uçucu Küllerin Sert Poliüretan Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri İle Isıl Ve Yanma Davranışları Üzerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 841-853.
- Zhang, H., Fang, W. Z., Li, Y. M., Tao, W. Q. (2017). Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams. *Applied Thermal Engineering*, 115, 528-538.

- Zhang, Q., Ma, P., Yang, Y., Pan, X., Zhang, J., Xiang, L. (2018). Reinforcement of recycled paint slag hybrid-filled lightweight calcium sulphate whisker/PVC foam composites. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(1), 520-526.
- Zhang, Q., Yang, Y., Xiang, L. (2019). Post-curing effect on the chemical structure and its relationship with heat resistance and thermal-mechanical properties of crosslinked PVC foams. *Polymer Testing*, 73, 418-424.
- Zhang, J. P., Zhang, C. C., Zhang, F. S. (2021). A novel process for waste polyvinyl chloride recycling: Plant growth substrate development. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105475.

