

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİÜRETANLARIN MEKANİK VE FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ

ZEYNEP ÇETİN YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİÜRETANLARIN MEKANİK VE FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE
TAHMİNİ

ZEYNEP ÇETİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖGR. ÜYESİ ÖZGÜN YÜCEL

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**PREDICTION OF MECHANICAL AND
PHYSICAL PROPERTIES OF
POLYURETHANES WITH MACHINE
LEARNING**

ZEYNEP ÇETİN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASST. PROF. DR. ÖZGÜN YÜCEL

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10/07/2023 tarih ve 2023/38 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01/09/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Zeynep ÇETİN' in tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜN YÜCEL

ÜYE : Doç. Dr. Esra BİLGİN ŞİMŞEK

ÜYE : Doç. Dr. Sedat YALÇINKAYA

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında, endüstride yaygın kullanımı bulunan poliüretan sistemlerinin yapay zekânın bir alt dalı olan makine öğrenmesi yöntemi kullanılarak, elde edilen esnek köpüklerin mekanik özelliklerinin kontrollü (denetimli) öğrenme metodu ile geliştirilmesi ve iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

İlk aşamada laboratuvar ortamında hazırlanan reçeteler izosiyanatlar ile reaksiyonu oluşturularak poliüretan köpükler elde edilmiştir. Sonrasında elde edilen bu köpüklerin fiziksel ve mekanik özellikleri analiz edilip ölçümlenmiştir.

Ölçülen köpüklerin karakterizasyonu için: yoğunluk (ASTM D3574), sıkıştırma oranı (ASTM D3574 Test C/ ISO 3386), darbe dayanımı (ASTM D-5276/ Din EN ISO 8307), reaksiyon süresi, köpüğün maksimum yüksekliği (ASTM D 7487-18; EN 14315-1(Annex E)), uzama (ASTM D5034) vb. tespit çalışmaları yapılmıştır.

Daha sonra bu veriler yapay zekâ algoritmasına tanıtılarak istenen değerleri tahminlenerek ölçmesi ve oluşturacağı yaklaşım ile ilişkilendirmesi beklenmiştir. Karar ağacı (DT) ve Gaussian proses (GP) olarak tanımlı iki adet metot kullanılmıştır.

Alınan sonuçlar neticesinde karar ağacı yönteminin yaklaşımlarda daha doğru yaklaşımlar yaptığı, yoğunluk ölçümlerinde ise en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Her iki metotta da mukavemet değeri arttıkça, test sonuçlarının doğruluk payı da artmaktadır. Gaussian metodunda ise basamaksal yaklaşımda tahminlemeler daha başarılıdır.

Anahtar Kelimeler: Poliüretan, Köpük, Mekanik Özellikler, Makine Öğrenmesi.

SUMMARY

In this thesis, it is aimed to develop and improve the mechanical properties of the flexible foams obtained by using the machine learning method, which is a sub-branch of artificial intelligence, of polyurethane systems, which are widely used in the industry, with a controlled (supervised) learning method.

In the first stage, polyurethane foams were obtained by reacting the prescriptions prepared in the laboratory with isocyanates. Afterwards, the physical and mechanical properties of these foams were analyzed and measured.

For the characterization of the measured foams: density (ASTM D3574), compression ratio (ASTM D3574 Test C/ ISO 3386), impact strength (ASTM D-5276/ Din EN ISO 8307), reaction time, maximum foam height (ASTM D 7487-18; EN 14315-1(Annex E)), elongation (ASTM D5034) etc. detection studies have been carried out.

Afterwards, these data were introduced to the artificial intelligence algorithm, and it was expected to measure the desired values by estimating and associate them with the approach to be created. Two methods defined as decision tree (DT) and Gaussian process (GP) were used.

As a result of the results obtained, it has been observed that the decision tree method makes more accurate estimations in approaches and gives the best results in density measurements. As the strength value increases in both methods, the accuracy of the test results also increases. In the Gaussian method, predictions are more successful in the cascading approach.

Key Words: Polyurethane, Foam, Mechanical Properties, Machine Learning.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Dr. Özgün Yücel'e,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli çalışma arkadaşlarıma,

Ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
1.2. Literatür Araştırması	3
2. POLİÜRETAN	10
2.1. Poliüretan Tarihçesi	10
2.2. Poliüretan	13
2.3. Hücre Yapıları ve Reaksiyonları	17
2.4. Çeşitleri ve Uygulama Alanları	22
2.5. Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	25
2.6. Kullanılan Cihazlar ve Çalışma Standartları	26
3. YAPAY ZEKÂ	29
3.1. Makine Öğrenmesi	30
3.1.1. Makine Öğrenmesi Türleri	31
3.1.1.1. Kontrollü Öğrenme Modeli	31
3.1.1.2. Kontrollü Öğrenme Modeli Karar Ağacı Metodu	33
3.1.1.3. Kontrollü Öğrenme Modeli Gausssan Prosesi	34
3.1.1.4. Makine Öğrenmesi Test Yöntemleri	36
4. DENEYSEL ve MODELLEME ÇALIŞMALARI	39
4.1. Hammadde Hazırlanması	39
4.2. Reçetelerin Oluşturulması	39
4.3. Deney Analiz Metodu	40
4.4. Deney Proses Süreleri	41

4.5. Deneysel Ölçüm Verileri	41
4.6. Modelleme Çalışması	45
6. SONUÇLAR	46
6.1. Poliüretan Esnek Köpük Deneysel Ölçüm Sonuçları	46
6.2. Yoğunluk Değerinin Modellenmesi	49
6.3. Darbe Mukavemetinin Modellenmesi	50
6.4. Sıkıştırma (%) Değerinin Modellenmesi	52
6.4.Korelasyon Grafikleri	55
6. YORUMLAR	58
7. TARTIŞMA ve ÖNERİ	60
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	66
EKLER	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A Komponent	:	Poliol ve katkıların karışımı
AI	:	Yapay Zekâ
B (%)	:	Ball rebound (Darbe mukavemeti)
B Komponent	:	İzosiyanat türevi
C (%)	:	Sıkıştırma testi (%)
CLD (N)	:	Sıkıştırma Testi (Newton)
D(kg/m ³)	:	Yoğunluk (kilogram/metreküp)
DT	:	Karar Ağacı Metodu
DT için B (%)	:	Darbe mukavemeti için karar ağacı
DT için C (%)	:	Sıkıştırma için karar ağaç
DT için D (kg/m ³)	:	Yoğunluk için karar ağacı metodu
E (%)	:	Uzama (%)
EG	:	Etilen glikol
GP	:	Gaussan Proses Metodu
GP için B (%)	:	Darbe mukavemeti için Gaussan Prosesi
GP için C (%)	:	Sıkıştırma için Gaussan Prosesi
GP için D (kg/m ³)	:	Yoğunluk için Gaussan Prosesi
GTÜ	:	Gebze Teknik Üniversitesi
Kg	:	Ağırlık
Maks H (mm)	:	Maksimum yükseklik (milimetre)
MDI	:	Difenilmetan-4,4-diizosiyanat
N	:	Newton
NDI	:	Naftalen-1,5-diizosiyanat
PU/PUR	:	Poliüretan
RT(s)	:	Reaksiyon zamanı (saniye)
Sn	:	Saniye
TDI	:	Toluen diizosiyanat
Tg	:	Camsı geçiş sıcaklığı
Tm	:	Erime Sıcaklığı
TPU	:	Termoplastik poliüretan
TS (mPa)	:	Gerilme direnci (megapaskal)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Slabstock prosesi.	15
2.2: Slabstock proses ekipmanları.	16
2.3: Poliüretan slabstock esnek köpük.	17
2.4: Poliüretan reaksiyonu.	17
2.5: 2,6 TDI ve 2,4-TDI molekülleri.	18
2.6: MDI yapısal formülü.	18
2.7: Polieter poliol yapısal formülü.	18
2.8: Poliester poliol yapısal formülü.	18
2.9: Glikol ve izosiyanat reaksiyonu.	19
2.10: TDI ve EG reaksiyonu.	19
2.11: Gibson ve Ashby köpük hücrelerinin morfolojisi.	21
2.12: Hücre yapısı.	21
2.13: MDI türleri.	23
2.14: 2,4 TDI molekülü.	23
2.15: Poliollerin izosiyanat ile reaksiyonu.	23
2.16: Amin ve metal bazlı katalizörler.	24
2.17: Silikon türevi.	24
2.18: a)Foamat cihazı , b)Analitik terazi c)Foamat mikseri	28
2.19: a) Zwick Roell Proline , b) Bareiss cihazı	28
3.1: Yapay Zekânın alt kümeleri.	30
3.2: Makine öğrenmesi çalışma prensibi.	30
3.3: Makine öğrenmesi alt grupları.	32
3.4: Karar ağacı.	33
3.5: Gauss süreci grafiği.	35
3.6: Test metodu ve modelleme.	37
3.7: Bekleme verisi a)%80-%20,b)%75-%25,c)%60-%40.	38
5.1: Açık hücreli yapıların mikroskopik görüntüsü.	46
5.2: Köpük numuneleri.	47
5.3: Kesilmiş köpük numuneleri.	47
5.4: Dinlendirilen köpük numuneleri.	47
5.5: Yoğunluk için DT yaklaşımı grafiği.	49

5.6: Yoğunluk için GP yaklaşımı grafiği.	50
5.7: Darbe Mukavemeti için DT yaklaşımı grafiği.	51
5.8: Darbe Mukavemeti için GP yaklaşımı grafiği.	52
5.9: Sıkıştırma testi için DT yaklaşımı grafiği.	53
5.10: Sıkıştırma testi için GP yaklaşımı grafiği.	54
5.11: Histogram doğrulama grafiği.	56
5.12: Pearson doğrulama grafiği.	57

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Poliüretanın kronolojik gelişimi.	12
3.1: Gini ve entropi formülleri.	34
4.1: Poliüretan bileşenleri.	39
4.2: Poliüretan hammadde tedarikçileri ve reçetesi	40
4.3: Karışım oranı ve indeksi.	40
4.4: Deney verileri ortalamaları.	42
4.5: Deneysel veri tablosu.	43
5.1: Çalışmalarda kullanılan formüller.	48
5.2: Makine öğrenmesi tahminleme ölçüm sonuçları.	54
5.3: Deney verileri ortalamaları.	55

1. GİRİŞ

Poliüretanlar ilk kez Alman bilim insanı Otto Bayer tarafından 1937 yılında sentezlenmiş ve diizosiyanatın diol ile reaksiyonuyla elde edilmiştir. Terminolojide poliüretanlar (PUR), alkol (-OH) ve izosiyanat (-NCO) grupları arasındaki üretan bağları yoluyla katılma polimerizasyonunun son ürünüdür.

Poliüretan sistemlerin yüzey dokusu, esneklik, sertlik gibi özelliklerine göre birçok farklı çeşidi bulunmaktadır. Sektörel açıdan uygulama alanları bina ve yapı, ulaşım ve denizcilik, mobilya ve yatak, makina ve döküm, buzdolabı, ambalaj, tekstil, elektronik, ayakkabı vb. olarak birçok sektörde yaygın kullanım alanı bulunmaktadır.

Bu uygulamalar döküm kalıplama, sprej ve enjeksiyon, gibi kesikli proses ile elde edilebileceği gibi; sandviç panel, yatak üretimi vb. uygulamalardaki gibi sürekli bir proses sistemi de olabilir. Standard bir poliüretan köpüğün uygulama alanına bağlı olarak analiz süresinin 72 saate kadar uzadığı düşünüldüğünde, yapay zekâ yöntemleri bizlere özellikle seri üretim uygulamalarında kullanacağı algoritmalar ile mekanik özelliklerine ilişkin öngörülerde bulunmamızı sağlayabilir.

Yapay zekânın (AI), bir alt kümesidir olan makine öğrenmesi, bilgisayarları verilerden öğrenmeyi öğretmeye ve bunu yapmak için açıkça programlanmak yerine deneyimle geliştirmeye odaklanır. Makine öğrenmesinde algoritmalar büyük veri kümelerinde desenleri ve korelasyonları bulmak ve bu analize dayalı en iyi kararları ve tahminleri yapmak için eğitilir. Makine öğrenmesi uygulamaları kullanımla gelişir ve daha fazla veri erişimi olduğunda daha doğru hale gelir [1].

Makine öğrenmesinin yukarıda belirtilen tanımından da anlaşılacağı üzere, uygulamanın algoritmasına veri yüklenerek girdi ve çıktı yöntemi ile kontrollü denetim türünü kullanarak poliüretan köpüklerinin mekanik özellikleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Böylelikle özellikle seri üretimlerde hata payını azaltmak ya da önceden hataları öngörmek hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasının poliüretan sistemlerini kullanan üreticiler için faydası olması ve uzun süren analiz çalışmalarının bir öngörüsü olarak kullanılabilmesi, yapay zekânın poliüretan kimyası sektörüne katkısını sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Poliüretan sistemler uzaydan sağlık sektörüne, otomotivden mobilya sektörüne, yalıtım/ses izolasyonundan yapı sektörüne, ayakkabıdan tekstil ürünlerine ve gıdadan soğutma sektörüne kadar birçok alanda günlük hayatımızda karşımıza çıkmaktadır. Amaçları yalıtım ile ısı ve enerji tasarrufu sağlamak, konfor ve ergonomik çalışma ortamları sağlamak, gıda ve sağlık sektörlerinde soğuk zinciri koruyarak uzun ömürlü saklanabilir ve dayanaklı gıda stoklaması yapmak, hafiflik, araçlarda yakıt tasarrufu sağlamak şeklinde tanımlanabilir. Biz bu çalışmada uzay ve sağlık sektörlerini de içine alan ve en geniş kullanım alanına sahip esnek köpük uygulamalarını referans almayı uygun gördük. Bu alanda yapılan çalışmalar ürün bazında diğer poliüretan türlerine kıyasla daha azdır. Çünkü esnek köpük sert köpükler kadar kararlı mekanik ve fiziksel özellikler gösteremezler.

Bu çalışmada yapay zekâ yöntemleri kullanılarak endüstriyel uygulamalarda sürekli sistem üretimi yapılan esnek köpüklerin mekanik ve fiziksel özelliklerini makine öğrenmesi kontrollü/denetimli sistem metodu ile kullanarak Gaussan Proses (GP) ve Karar Ağacı (DT) algoritmalarında modelleştirmek ve sonuçların %80-%20 oranına uygun olarak analiz etmek amaçlanmaktadır. Makineye %80 veri girilip %20 sini bağımsız şekilde tahmin etmesi beklenmektedir. Sonuçların tutarlı olması önemlidir.

Analiz edilmesi planlanan özellikler endüstriyel uygulamalarda sıklıkla ölçümlenen veriler olup sırasıyla reaksiyon profili/kinetiği; maksimum yükseklik, yoğunluk, % sıkıştırma, uzama ve basma mukavemeti olacaktır.

Bu çalışmada da mekanik özelliklerin analiz edilmesi ve ölçümlemesi, istenilen tahminleme yöntemin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Çıktılar, endüstriyel uygulamaların proses şartlarını iyileştirmeye yöneliktir.

Bu çalışma, esnek köpüklerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespit edilmesine yönelik bir çalışmadır. Literatürde esnek köpükler için makine öğrenmesi alanında çok çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma ile amaç seri üretim yapan endüstriyel uygulamalarda üretimde zaman verimliliğini artırmaktır.

1.2. Literatür Araştırması

Literatürdeki araştırmalar gösteriyor ki PUR sistemler için yapay zekânın alt kümesi olarak tarif edilen makine öğrenmesi metodu, bu uygulamaların tahminlenmesi için kullanılabilir.

Literatürün devamında verilen ilk üç paragrafın çalışmaları genellikle sert poliüretan köpük uygulamalarına yönelik çalışmalardır. Yüksek yoğunluk ve dolgu sistemler için deneyleri yapılmıştır. Sert köpükler yüksek mukavemetli ve kararlı sistemlerdir. Uygulanan metotlar makine öğrenmesi konusunda tahminleme yapmaya olanak sağlamaktadır. İkinci araştırma ise Termoplastik poliüretanlar (TPU) için yapılan bir çalışmadır. Bu polimer yapısal açıdan bir poliüretan türevi olsa bile üretim prosesi poliüretan (PU) uygulamalarından farklıdır. Diğer çalışmalar makine öğrenmesinin uygulandığı ve pozitif tahminleme sonuçlarının alınabildiğinin kanıtı niteliğindeki poliüretan köpük içermeyen örnek çalışmalar olup, geride kalan çalışmalar esnek köpüklerin mekanik ve fiziksel özellik sonuçlarının nihai ürün üzerindeki etkisini, kullanıcılar için önemini ve prosesini tanımlamaktadır.

Schubert M., ve arkadaşları, poliüretan prepolimer bileşiminin ve çeşitli ön işlemlerin bir fonksiyonu olarak bağlı kayın ağacının çekme kesme mukavemetinin tahmini için makine öğreniminin kullanımını araştırılmıştır [2]. Üç farklı makine öğrenimi tekniğini (yapay sinir ağı, rastgele orman ve destek vektör makineleri) ve genelleme yeteneği, katmanlı bir on kat çapraz doğrulama yaklaşımıyla değerlendirildi. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, tüm makine öğrenme modellerinin iyi tahmin doğruluğu sunduğunu ve yapay sinir ağının (YSA) $R^2=0.95$, $RMSE =1.03$ ile en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Aditya M. Ve arkadaşları, makine öğrenmesi metodu ile poliüretanın basma mukavemeti tahminlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada yüksek yoğunluğa sahip sert köpüklerin karar ağacı yönteminde makine öğrenmesi sonuçları $R^2 < 0,95$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, makine öğrenmesi yöntemiyle tahminlenen değer gerçekte ölçülen en yüksek değer ile eşleşmektedir [3].

Antony P.J ve arkadaşları, termoplastik ve termoset poliüretanlar için kopma gerilimi, kopma gerilimi ve Tan d'yi tahmin etmeye yönelik genel bir hiyerarşik makine öğrenimi (HML) modeli sunulmaktadır. [4]. Algoritma farklı diizosiyanatlara, iki işlevli veya üç işlevli poliollere ve NCO: OH indeksine sahip 18 polimerden oluşan

bir kitaplık üzerinde eğitildi. HML, etki alanı bilgisinin ve vekil verilerin, girdi değişkenleri (kompozisyon) ve çıktı yanıtları (mekanik özellikler) arasında köprü kuran bir orta katmana güçlü bir şekilde yerleştirilmesi yoluyla veri gereksinimlerini azaltır. Bu çalışmada, orta katman, genel polimer bileşimi hakkında bilgi, Monte Carlo polimerizasyon simülasyonlarından türetilen zincir mimarisi tahminleri, ampirik olarak türetilmiş moleküler potansiyellerden zincirler arası etkileşimler hakkında bilgi ve kızılötesi (IR) spektroskopi absorbanslarındaki kaymalar hakkında bilgi içeriyordu. HML tahminlerinin, kompozisyon ve özellikleri doğrudan ilişkilendiren rastgele bir orman modelinden elde edilenlerden daha doğru olduğu gösterilmiştir; bu da alan bilgisinin gömülmesinin, küçük veri kümelerine dayalı karmaşık malzeme sistemlerinin özelliklerini tahmin etmede önemli avantajlar sağladığını öne sürmektedir.

Allibhai E., ve arkadaşları, kimyasal bileşimlerdeki değişikliklerle PUR köpük çekirdeklerini oluşturmaya yönelik fiziksel ve YSA yaklaşımını sunar [5]. Beş farklı yoğunlukta köpük sentezlendi ve test edildi. Çalışmalar, fiziksel özellikleri düz yönlü sıkıştırma mukavemeti ile karşılaştırmalı olarak bildirir. Fiziksel test verilerinin YSA sonuçları ile mutlak uyum içinde olduğu görülmektedir. Regresyon değerleri, 50:50 kimyasal bileşimlerle iyi bir uyum içindedir ve daha yüksek yoğunluklu köpüklerin kırılğan olduğu ve daha düşük yoğunluklu köpüklerin esnek ve elastik olduğu gözlemlenmiştir.

Josef A. Pugar ve arkadaşları, TPU'nun makine öğrenmesi metodu ile Tg (camsı geçiş sıcaklığı) ve Tm (Erime sıcaklığı) verileri ölçümlenmiştir [6]. Camsı geçiş sıcaklığı (Tg), malzemenin hem mekanik hem de akış özelliklerini güçlü bir şekilde etkileyen polimerlerin temel bir özelliğidir. Birçok önemli polimerde, yan zincirlerin konfigürasyonel entropisi onu belirleyen baskın bir faktördür. Bunun aksine, poliüretanlardaki termal geçişin, yumuşak segment ortamı içindeki dağılmış sert segmentlerden gelen sterik ve elektronik faktörlerin bir kombinasyonu tarafından belirlendiği düşünülmektedir. Burada, lineer poliüretanlarda Tg için bir makine öğrenimi modeli sunuyoruz ve bunu belirleyen temel fizikokimyasal parametreleri ortaya çıkarmayı amaçlıyoruz. Model, özellik uzayını oluşturan kuantum kimyası, kem informatik ve çözelti termodinamiğinden türetilen tanımlayıcılar kullanılarak endüstriyel olarak ilgili 43 poliol ve izosiyanat kombinasyonundan elde edilen literatür verileri üzerinde eğitildi. Rastgele orman ve düzenli regresyon daha sonra altı tanımlayıcıdan seyrek bir doğrusal model oluşturmak için karşılaştırıldı. Poliüretan

kimyasının ampirik anlayışıyla tutarlı olan bu çalışma, izosiyanat monomerlerinin özelliklerinin Tg'deki artışı güçlü bir şekilde belirlediğini göstermektedir. Modelden Tg'nin doğru tahminleri gösterilir ve özelliklerin önemi tartışılır. Sonuçlar, makine öğrenimi araçlarının karmaşık malzeme özelliklerinin hem fiziksel içgörülerini hem de doğru tahminlerini sağlayabileceğini gösteriyor.

Mutlu A.Y. ve arkadaşları, çalışmalarında ikili ve çok sınıflı makineler önerildi ve önerilen yaklaşımlar, ikili ve çok sınıflı sınıflandırıcıların sırasıyla %96 ve %89'un üzerinde tahmin doğruluğu değerlerine ulaştığı 10 kat çapraz doğrulama kullanılarak 5237 veri örneği ile geliştirilmiş ve test edilmiştir [7]. Hesaplanan hassasiyet, geri çağırma, F1 skoru, RMSE ve NRMSE değerleri, stokiyometrik ve stokiyometrik olmayan modellerin aksine, önerilen tekniklerin gazlaştırma ürünlerinin seviyelerini doğru bir şekilde otomatik olarak tahmin etmek için mükemmel adaylar olduğunu kanıtlamışlardır. Bu çalışmayla, sıcaklık dağılımı kullanımının, önerilen yapay zekâ tabanlı yaklaşımları kullanarak gazlaştırma ürünlerini tahmin etme kabiliyetine sahip olduğunu ve sıcaklık dağılımının, yakıtla kıyasla sentez gazı bileşimi üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Bu veri ile elektrikli ısıtıcılar ve yakıt/hava enjektörleri gibi doğru yöntemlerle sıcaklık dağılımı sürekli ölçülebilir ve kontrol edilebilir.

Elmaz F., ve arkadaşları, bu çalışmada, sabit karbon, uçucu madde ve kül içerikleri gibi yaklaşık analiz sonuçları kullanılarak yakıtları sınıflandırmak için makine öğrenimine dayalı bir yaklaşım kullanılmıştır [8]. Literatürden toplanan veri seti kömür, odun, tarımsal atık ve üretilmiş biyokütle olmak üzere dört sınıfa ayrıldı. Daha sonra tahmin modellerini geliştirmek için K-en yakın komşu, destek vektör makinesi ve rastgele orman makine öğrenimi sınıflandırıcıları kullanılmıştır. Ayrıca, bilinmeyen bir yakıtı dört kategoriden birine sınıflandırabilen tam ve son derece doğru bir sınıflandırıcı çerçevesi oluşturmak amacıyla her bir sınıflandırıcının avantajlarını uzman görüşünün entegrasyonu ile birleştirmek için hiyerarşik sınıflandırma yaklaşımı benimsenmiştir. K-katlı çapraz doğrulama, sınıflandırıcıların performanslarını tarafsız bir şekilde değerlendirmek için kullanılır. Hiyerarşik sınıflandırıcı ile eğitim ve test aşamalarında sırasıyla %96 ve %92 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir.

Kailaj X., ve arkadaşları, bu çalışmada viskoelastik polimerlerin tahminlenmesi için yeni bir ters modellemesi yöntemi tasarlamışlardır. Viskoelastik malzemeler hem viskoz akışkan hem de elastik katı özellikleri sergilerler. Viskoelastik malzemelerin

örnekleri arasında deri, hafızalı köpük şilte, ahşap, polimerler ve beton yer alır. Genel olarak tüm malzemeler bir dereceye kadar viskoelastik davranış sergiler. Bu nedenle viskoelastik özelliklerin doğru modelleri çok önemlidir. Viskoelastisite malzemenin davranışını hıza bağımlı hale getirir; yani malzemenin deformasyona veya kuvvete tepkisi zamanla değişebilir. Bu hıza bağlı davranış, viskozite modellemeyi esneklik gibi emsallerine kıyasla benzersiz ve zorlu hale getirir. Viskoelastisitenin ters modellemesi, bir malzemenin viskoelastik yapısal ilişkisini ortaya çıkarmak için gözlemlenen verilere dayanır. Hıza bağlı ve doğrusal olmayan yapısal ilişkilerin derin sinir ağları ile tahmin edildiği viskoelastisite malzemelerini modellemek için yeni bir yaklaşım öneriyoruz. Sınırlı yer değiştirme verilerinin viskoelastisite davranışını ölçmek için yeterli bilgi içerdiğini gösterdik. Ters hesaplamayı (gözlenen yer değiştirme verilerinden viskoelastisite özelliklerinin modellenmesi) PDE ile kısıtlı bir optimizasyon problemi olarak formüle ediyoruz ve gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi kullanarak fonksiyonel hatayı en aza indiriyoruz. Gradyanlar, otomatik farklılaşma ve örtülü fonksiyon farklılaşma kurallarının bir kombinasyonu ile hesaplanır. Yöntemimizin etkinliği, jeomekanik ve gözenekli ortam aktarımındaki çok sayıda kıyaslama problemi ile kanıtlanmıştır. [9].

Zeydan M., proses iyileştirmeye odaklanan çalışmada, maliyetli esnek poliüretan köpük üretim proses koşullarının optimize edilmesi ve bu prosesteki değişkenliğin azaltılarak, döşeme stok yöntemine göre üretilen esnek poliüretan köpüğün sertliği üzerinde hangi faktörlerin etkili olduğunun bulunması amaçlanmaktadır. Çalışma sonunda köpük prosesinde önemli faktörlerin TDI indeksi ve poliol olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışma süreci yaklaşık 15 Newton iyileştirmektedir. [10]. Değişen küresel dünya ve buna bağlı olarak artan tüketici talep ve ihtiyaçları, firmaların sektörlerinde sürdürülebilir kalabilmeleri için sürekli gelişmeyi ilke edinmeleri gerektiğini göstermektedir.

Coste G. ve arkadaşları, bu çalışmada, izosiyanatsız poliüretan köpük sentezlemeyi amaçlamışlardır. Yeni bir 6 karbonlu siklik karbonat kullanılarak PHU köpüklerinin ilk sentezini gerçekleştirmiştir. Bu kimyasal bir şişirici maddenin varlığında, katalizörsüz ve ılımlı sıcaklık koşulları altında farklı diaminlerle reaksiyona sokuldu. Çeşitli köpük özelliklerine erişime izin veren üç farklı amin kullanıldı. Son olarak, oturma veya izolasyon şilteleri gibi uygulamalar için yeni adayları mümkün kılacak ilginç özelliklere sahip, gelecek vaat eden esnek köpükler elde edildi. Köpük özelliklerini ayarlamak için diaminlerin yapısı kullanıldı.

Köpüklerin şeklini, mekanik ve termal özelliklerini etkilediler [11].

Abdullah M. ve arkadaşları, şiltelerdeki viskoelastik davranışın ve yatağın zamana bağlı sıkıştırma % oranını hastaların bedeninde yarattığı sağlık problemleri ve yatalak hastaların bedenindeki yaralar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada hem sönümleme hem de yumuşatma etkilerini ölçerek üç yoğunluktaki poliüretan köpüğün viskoelastik davranışını değerlendirdi. Sıkıştırma testleri köpüğün basınç tahliye performansını gösterirken sürünme testleri viskoz davranışını ve stabilitesini gösterdi. Köpüğün dağılma katsayısı (DE), enerji dağılımını belirledi, bu da daha ağır gövde parçaları için daha sert köpüklerin olduğunu ve daha hafif parça için orta veya yumuşak köpüğün kullanılabileceğini düşündürdü. Yumuşama davranışını ve gerinime bağlı davranışları ortaya çıkaran döngüsel yumuşama ve gevşeme süreleri gözlemlendi. Köpük yoğunluğu viskoelastik özelliklerle ilişkilidir ve sönümleme etkisini etkiler. [12].

Yang C.,ve arkadaşları, viskoelastik polimerlerin uzun süreli mekanik özellikleri en önemli yönlerinden biridir ve bu araştırmada, poliüretan elastomerin sürünme özelliklerinin tahmini için sürünme süresi, sürünme sıcaklığı, sürünme gerilimi ve malzemenin sertliğinin etkisi dikkate alınarak bir makine öğrenmesi yaklaşımı önerilmiştir [13]. Yaklaşımlar, sırasıyla çok katmanlı algılayıcı ağı, rastgele orman ve destek vektör makine regresyonuna dayanmaktadır. Genetik algoritma ve hiper parametreleri ayarlamak için k-katlı çapraz doğrulama kullanıldı. Sonuçlar, üç modelin hepsinin eğitim seti için mükemmel uyum yeteneği sunduğunu gösterdi. Ayrıca, üç model, değişen çeşitli faktörlere odaklanarak test seti için farklı tahmin yeteneklerine sahipti. Tahmin edilen ve deneysel suşlar arasındaki korelasyon katsayısı değerleri, makul model seçilirken test setinde 0,913'ten (çoğunlukla 0,998'den büyük) büyüktü.

Shivakumar ve arkadaşları, yoğunluk, sert poliüretan köpüğün özelliklerini ve performansını etkileyen önemli bir parametredir. Bu çalışmada, tasarım uygulamaları için yoğunluğun sert/kırılabılır PU köpüğün mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesine yönelik sistematik bir mühendislik yaklaşımı sunulmaktadır. Elde edilen kübik köpük numuneleri üzerinde sıkıştırma testleri yapılarak, ilgili çeşitli mekanik parametrelerin yoğunluğa göre tekdüze bir şekilde arttığı gösterilmiştir. Bunun iki ana nedeni var; İlk olarak, yoğunluk arttıkça mukavemet artar, yoğunlaşma gerilimi azalır. Gözeneklerin boyutu 250 μm 'den 3210 μm 'ye azaldıkça köpük yoğunluğu artar. [14].

Mekanik özelliklerin önemini açıklayan diğer araştırmalar ise aşağıdaki gibi özetlenmiştir [15].

Lifshitz J.M.ve arkadaşları, yoğunluğu 40 kg/m³, 80 kg/m³, 120 kg/m³, 140 kg/m³ ve 200 kg/m³ olan beş sert poliüretan köpüğün basma testlerinden elde edilen deneysel sonuçlarını sunmuş ve mekanik performansı etkileyen en önemli parametrenin şu olduğunu belirtmiştir: PU köpüklerin sıkıştırılmasındaki özellikler yoğunluktur [16].

Öztürk U.E ve arkadaşları, çoklu tek eksenli sıkıştırma yüklemesi altında 30 kg/m³ ve 58 kg/m³ yoğunluktaki polimerik köpüklerin mekanik özelliklerini araştırdılar [17].

Rao P.N ve arkadaşları, statik ve darbeli yükleme koşulları altında 70 kg/m³ ve 100 kg/m³ nominal yoğunluğa sahip sert PU köpüğü karakterize etmiştir [18].

Patel P.S ve arkadaşları, young modülünü, akma mukavemetini ve emilen enerjiyi belirlemek için farklı uzunluklarda (3,9 mm ve 7,7 mm) ve yoğunluklarda (90 kg/m³, 160 kg/m³ ve 320 kg/m³) PU köpük silindirler üzerinde yarı statik sıkıştırma testleri gerçekleştirdi [19].

Liu Q. Ve arkadaşları, düşük yoğunluklu köpüğün basınç davranışını karakterize etmek için bir model önerdiler [20].

Saint-Michel F. ve arkadaşları, yüksek yoğunluklu PU köpüklerin mekanik özelliklerini incelemiş ve sonuçları iki teorik model olan Gibson ve Ashby yaklaşımıyla karşılaştırmış ve ikinci modelin daha yüksek yoğunluk aralığı için daha uygun sonuçlar verdiğini göstermiştir [21].

Kim Y. Ve arkadaşları, hidrolik preste özel olarak tasarlanmış bir düzenek yardımıyla üç eksenli gerilim durumunda iki farklı yoğunluktaki polimerik köpükler için basınca bağlı akma kriterlerini belirlemek üzere deneysel bir yöntem geliştirmeye çalıştılar [22].

Saha M.C. ve arkadaşları, köpüğün gerilme davranışının yoğunluk, hücre oryantasyonu, çapraz bağlanma derecesi gibi çeşitli köpük özelliklerinin yanı sıra gerinim hızı ve darbe enerjisi gibi çeşitli yükleme parametrelerine nasıl bağlı olduğuna dair kısa bir tartışma sunmuşlardır. Yazarlar yoğunluğun ve çapraz bağlanmanın köpüğün gerilme mukavemeti, modülü ve kırılma dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır [23].

Hinckley W.M. ve arkadaşları, poliüretan köpüklerin çeşitli yoğunluklar ve gerinim hızları üzerindeki davranışını araştırdılar ve yoğunluğun fonksiyonu olarak

elastiklik modülü ve akma gerilimi için ampirik ilişkiler elde ettiler [24].

Çalışmalar gösteriyor ki Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi metodu ile poliüretanın fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine ilişkin tahminlemelerde bulunulabilir. Uzun süreli mekanik testlerin sonucu seri üretim ile yapılan üretim tesislerinde tahminleme ile bir yaklaşım ve kısa süreli öngörülerde bulunmamızı sağlayabilir. Poliüretanın geniş kullanım alanı dikkate alındığında, geliştirilecek yöntemler ile proses ve zaman verimliliğinin arttırması sağlanabilir.

2. POLİÜRETAN

2.1. Poliüretanın Tarihçesi

Poliüretan, 1937 yılında Otto Bayer ve ekibi tarafından bulunmuştur [25]. Poliüretanlar, genel anlamda üretan yapısı taşıyan polimerlerdir. Poliüretanların üretimde birçok üretim metodu olmasına rağmen genellikle diollerin diizosiyanat gruplarıyla birlikte yaptığı ekzotermik reaksiyonlar sonucunda elde edilirler. Bir başka ifadeyle, karbamatlar olarak bilinen ve diol ile diizosiyanatlar olarak adlandırılan iki bileşenin sentezinden elde edilen polimerlerdir [26].

Profesör Otto Bayer 1937 de naylon ile rekabet edebilecek polimer elyafları sentezliyordu. 1913'lü yıllardan itibaren Almanya'nın ortaya koyduğu PVC elyaflar kullanılmaktaydı. 1935'te DUPONT naylon elyafı sentezleyip aşılması zor bir patent ile koruduğunda 1938 yılında BAYER rekabet edebilmek için 1,8-oktan diizosiyanatı 1,4 bütandiol ile reaksiyona sokarak düşük viskoziteli bir eriyik oluşturmayı başardılar ve buradan lif çekebildiler. Bu ilk çabalar günümüzde poliüretan olarak bilinen karbamik asit esterleri ile sonuçlanmıştır. Bu poliüretan lifler eğrilebiliyor ve yüksek kalitede iplik ve monofilamentler üretilmesine olanak sağlıyordu. Poliüretanın erime noktası 185C idi ve yapay ipek, yapay kıl üretimine imkân sağlanıyordu. 1938 yılında ABD ilk poliüretan patentini almıştır. Zamanla poliüretan türleri geliştirilerek genişletilmiştir. Diğer sektörlerdeki gelişim süreçleri Tablo 1.1 de poliüretanın kronolojik gelişimi tablosunda verilmiştir [27].

Kaplama ve yapıştırma sektöründe kullanılan poliüretanlar içinse tarihsel gelişim şu şekildedir. Kaplama, yapıştırma ve mühürleme insanoğlunun binlerce yıldır kullandığı tekniklerdir. Uzun süre bu amaçlar için yalnızca doğal reçineler, yağlar ve katı yağlar kullanıldı. Pullu lak böceği tarafından salgılanan doğal bir reçine olan şellak, Hindistan'da yüzyıllardır yüzeyler için hava koşullarına dayanıklı bir kaplama olarak kullanılmıştır. İngilizce 'de lak kelimesi cilaları üretmek için gereken hayal edilemeyecek kadar çok sayıda böceği tanımlamaktadır. Daha sonra odun yakılarak lak reçinelerinin elde edilebileceği öğrenilmiştir. Hayvansal ürünler, özellikle kemikler ve deri, yüzyıllar boyunca yapıştırıcıların temelini oluşturmuştur. Matbaanın Johannes Gutenberg tarafından icadı, daha sonra ortaya çıkan ciltlik endüstrisinde yapıştırıcılara yönelik yeni ve hızla büyüyen bir ihtiyacın ortaya çıkmasına yol

açmıştır. Sentetik reçinelerin gelişimi 20. yüzyılın başlarında başlamış ve büyük ölçüde geliştirilmiş kalitede kaplama ve yapıştırıcıların üretimini mümkün kılmıştır. 1937 yılında Heinrich Rinke'nin 1,6 hekzametilen diizosiyanat (HDI) üretmesi ve Otto Bayer'in diizosiyanat prosesini geliştirmesi ile keşfedildi. Otto Bayer ve ekibi, alkid reçinelerinin teknik özelliklerinin diizosiyanatların modifikasyonu yoluyla geliştirilebileceği keşfedildi. İlk kaplama ürünler toluen diizosiyanat bazlıydı. Bu izosiyanatın aromatik yapısı dolayısıyla doğada sararma eğilimi bulunmaktadır, bu nedenle sadece iç mekanlar ve astarlarda kullanılabilmektedir [28].

Esnek köpük uygulamalarındaki tarihsel gelişim şu şekildedir. 1956'da Dupont, polieter polioller adı verilen yeni bir polimer yarattı ve 1957'de bunu satmaya başladı. Bu kimyasal çok daha ucuzdu, dolayısıyla genel üretim maliyetini düşürüyordu. Bu kimyasalın işlenmesi çok daha kolaydı ve üstelik bu kimyasal suya daha dayanıklıydı. Yukarıdaki faktörlerin tümü bu kimyasalın tüm üreticiler arasında daha popüler olmasını sağlamıştır. 1960 yılı sonuna gelindiğinde 45.000 metrik tondan fazla esnek PU köpük üretildi, bu süre zarfında otomotiv endüstrisi bunu fark etti ve bu teknolojiyi daha iyi ses yalıtımı için güvenlik bileşenleri, kapı panelleri vb. yerlerde otomobillere dahil etmeye başladı.

Hafızalı köpüğü esas olarak poliüretandan oluşur ve bazı ek kimyasallar, diğer normal köpüklere göre viskoelastisitesini ve yoğunluğunu önemli ölçüde artırır. Bu nedenle viskoelastik köpük olarak da adlandırılır. Bellek köpüğü ilk olarak 1966 yılında NASA tarafından Ames Araştırma Merkezi ile yapılan sözleşme kapsamında uçak yastıklarının güvenliğini artırmak için geliştirildi. Daha sonra NASA'daki başlangıcından sonra kamu malı olarak yayınlandı. İlk başta, hafızalı köpüğün röntgen masası altlıkları vb. gibi tıbbi ekipmanlarda kullanımı sınırlıydı. 1980'lerin başında NASA, hizmete uygun olan her türlü üründe kullanılmak üzere daha geniş halk için hafızalı köpük piyasaya sürdü. Fagerdala World Foams adlı bir İsveç şirketi, o zamanlar zor ve güvenilmez olduğu düşünülen bu köpüğün üretilmesi konusunda inisiyatif alan birkaç şirketten biriydi. Sonunda, 1991 yılında "Tempur-Pedic İsveç Yatakları" adı altında ilk hafızalı sünger yataklarını piyasaya sürdüler. Hafızalı köpük şilte genellikle diğer köpük şiltelerden daha yoğundur, bu da onu hem daha destekleyici hem de daha ağır yapar. Hafızalı köpük şilteler genellikle geleneksel şiltelerden daha yüksek fiyatlara satılmaktadır ve hafızalı köpüğün sertlik (sertten yumuşağa) özelliği konforun belirlenmesinde kullanılır. İkinci ve üçüncü nesil hafızalı köpükler, uyuyan kişinin vücuduna göre kalıplanarak vücut ısısına ve ağırlığına tepki

veren açık hücreli bir yapıya sahiptir. Bunun, ağrıyı hafifletmek ve dinlendirici bir uyku sağlamak için baskı noktalarını hafifleterek yardımcı olabileceğini söylenmektedir. [29]

Tablo 1.1: Poliüretanın kronolojik gelişimi.

Yıl	Durum
1849	Alkolle izosiyanat reaksiyonu.
1937	İlk poliüretan patenti başvurusu.
1937	Prof. Otto Bayer'in temel PU formülünü elde etmesi.
1938	İlk ABD patenti.
1940	Sert köpüğün ilk kez uçak endüstrisinde kullanılması.
1941	Metal, cam ve kauçuk gibi malzemeler için bağlayıcı olması.
1942	Poliizosiyanat ve glikol reaksiyonu, diaminler ve poliesterler için patent.
1945	Poliester bazlı elastomer tanıtımı.
1948	Bira fiçilerinde yalıtım malzemesi olarak kullanılması.
1953	Sünger sanayide kullanılmaya başlanması ve hızlı tüketimi.
1954	Elastomerik elyaf üzerine çalışmalar.
1954	Elastomerik elyaf Bayer patenti.
1955	Termoplastik elastomer patenti.
1955	Tek kullanımlık köpük gelişimi.
1956	PTMEG piyasaya sürülmesi.
1959	İlk kez kloroform şişirici ajan kullanılması.
1960	Sandviç poliüretan devrinin başlaması.
1966	Ayakkabı endüstrisinde kullanılmaya başlaması.
1969	Otomotivde poliüretanın tercih edilen ürün olması.
1971	Tıbbi sınıf poliüretan kullanımı- silikon elastomer patenti.
1979	Binaların yalıtımında büyük ölçüde kullanılmaya başlaması.
1993	Alifatik kararlı biyopoliüretan elastomer patenti.

2.2. Poliüretan

Üretan kimyası, organik izosiyanatların aktif hidrojen içeren bileşiklerle reaksiyonlarını kullanır. Çok işlevli izosiyanatlar ve ara ürünler olduğunda mol başına en az iki aktif hidrojenden oluşan uygun ortamda reaksiyona sokulur, sert ve esnek köpükler, elastomerler, kaplamalar, yapıştırıcılar, sızdırmalardan oluşturan bir polimer elde edilir. İzosiyanat grubu üretan bağıını oluşturmak için bir poliolün hidroksil grubu ile reaksiyona girer, kararsız bir ara ürün olan karbamik asit oluşturmak için suyla reaksiyona girerler ve karbondioksit ve bir amin oluşturmak için kolayca ayrışır. Bu amin alkillenmemiş üre oluşturmak için ek izosiyanat ile reaksiyona girer. Ek olarak sıcaklık ve katalizörlerin varlığı ile ilgili izosiyanatların, alkollerin ve aminlerin yapısı gibi reaksiyon koşullarına bağlı olarak bir dizi çapraz bağlanma reaksiyonu meydana gelir. Buradaki reaksiyonlar; allofanat (üretan ve izosiyanat arasındaki reaksiyon), biuret (ikame edilmiş üre ve izosiyuanat arasındaki reaksiyon ve izosiyuanurat (izosiyanat gruplarının trimerizasyonu) bağlantılarını oluşturur. İzosiyanatlar ayrıca dimerler (uretidin diyonları), karbodiimid oluşturmak üzere polimerize edilebilirler [27].

Poliüretanlar, bir izosiyanatın ve poliol gibi hidroksil işlevselliğine sahip bir malzemenin yoğunlaşma reaksiyonu ile üretilir. Poliüretan, bir termoplastik ve termosetin yapısına sahip olabilir ve sert bir kati, yumuşak bir elastomer veya bir köpüğün fiziksel yapısına sahip olabilir. Poliüretanın kimyasal bileşimi, poliüretanı oluşturmak için reaksiyona giren spesifik poliol ve izosiyanatı taşıyan türlere bağlı olarak da büyük ölçüde değişebilir. Poliüretan için mümkün olan birçok farklı kimyasal yapı ve fiziksel form, onu çok yönlü, yaygın olarak kullanılan bir polimer yapar [27].

Poliüretan köpükler kendi arasında sert, esnek, elastomerler, termoplastik poliüretan ve hücresiz yapılar olmak üzere alt gruplara ayrılırlar.

Sert poliüretan köpüklerin en önemli kullanım alanlarından biri de buzdolabı sistemleridir. Çoğu büyük üretici su anda hatlarında yalıtım olarak sert köpük kullanmaktadır. Florakarbonla üflenen köpüklerin üstün yalıtım özellikleri nedeniyle üreticiler daha ince izolasyonlu ve dolayısıyla daha büyük kapasiteye sahip buzdolapları üretirler. Süt kamyonları, dondurma kamyonları ve römorklar gibi her türlü frigorifik kamyon; sert poliüretan köpükle kaplanmıştır. İyi yalıtım özelliğine sahip olmasının yanı sıra, sert köpükler kamyon gövdelerinin yapısal mukavemetine dayanır; düşük nem alımına sahiptir ve 100°C sıcaklığa kadar dayanabilir. Potansiyel

olarak sert köpük için en büyük pazar inşaat sektöründedir. Bu alandaki kullanımları; perde-duvar konstrüksiyonu; sert paneller, sprey uygulamalarıdır [27].

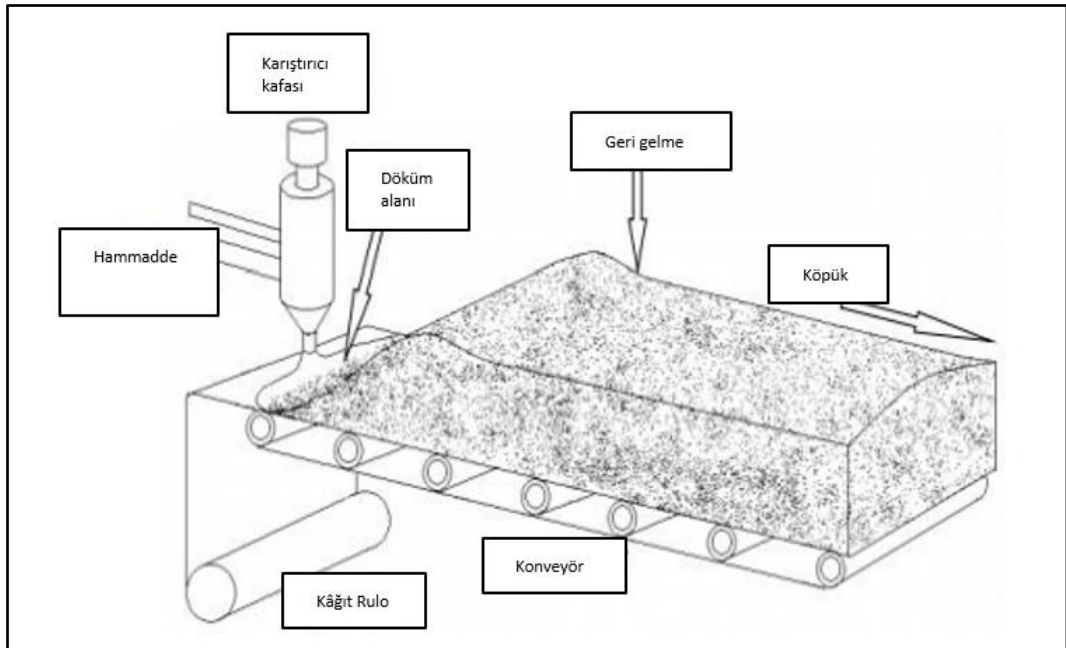
Elastomerler, sözlük anlamı olarak oda sıcaklığında tekrar tekrar gerilebilen ve serbest bırakıldığında hemen yaklaşık uzunluğuna geri dönecek olan bir malzeme olarak tanımlanırlar. Doğal kauçuk, fiziksel özelliklerinin (yani gerilme mukavemeti 4000psi, 5400-600 nihai uzama böylesine mükemmel bir kombinasyonu sergilediğinden, elastomerik kalite terimi en yüksek fiziksel performansa sahip sentetik malzemeleri karakterize etmek ve tanımlamak için kullanılır. Elastomerler heterojen bir poliüretan sınıfını temsil ederler. En tipik kullanım alanları katı ve mikro hücreli sınıf olarak; ayakkabı tabanı, otomotiv ve taşımacılık, endüstriyel ürünler, tıbbi cihazlar ve benzeri iken, döküm elastomerler; pompa ve boru kaplamaları, oluk gömlekleri şeklinde sınıflandırılabilir[27].

Kaplama ve yapıştırıcılar, solvent içermeyen poliüretan reaktif yapıştırıcılar, otomotiv üretimi, lamine film ve sandviç elemanlarının üretiminde kullanılmaktadır. Sulu dispersiyon yapıştırıcılar ise mobilya sektörü, ciltçilik ve ayakkabı tabanı üretiminde kullanılmaktadır. Poliüretan yapıştırıcılar tek ve çift komponentli olmakla birlikte solventli, solventsiz, su bazlı, radyasyon ile kürlenene yapıları ile günümüzde kullanılmaktadır [28].

Esnek poliüretan köpükler sert köpüklerin aksine esnetildiğinde malzemeler boyunca havanın serbestce hareket etmesini sağlayan açık hücreli malzemeler üretir. Hem polieter hem de poliester poliollere dayalı esnek köpükler günümüzde yaygın kullanılmaktadır ve yoğunlukları $0.93-2.8\text{kg/m}^3$ aralığındadır. Poliesterler hidrolize karşı daha az stabildir. Kopma, uzama ve gerilme mukavemetleri yüksektir. Yük taşıma özellikleri birincil olarak yoğunlukları tarafından kontrol edilir, ancak boyut, şekil, doku, üretim yöntemi, dolgu içeriği ve yardımcı kimyasallardaki değişimlerinde tüm değerleri etkiler.

Hem poliester hem polieter esnek köpük türleri, mükemmel ses yalıtım özelliği, düşük ısı iletkenliği, çoğu çözücü ve deterjana karşı iyi direnç gösterir. Esnek poliüretan köpükler ultraviole ışınlarına maruz kaldıklarında hızla renksizleşirler. Güçlü asit ve alkalilere karşı zayıf dirence sahiptir. Yüksek sıcaklık ve basınç deformasyonu bir dereceden sonra kalıcı deformasyona neden olabilir. Esnek köpükler, mobilya döşemelerinde ve otomotiv döşemelerinde, giysi kaplamalarında, süngerlerde, hava filtrelerinde ve ambalajlarda kullanılır [16].

Slabstock köpükleri, çoğu köpük gibi, poliollerden, izosiyanatlar ve sudan hazırlanırlar. Bu temel bileşiklerle birlikte katalizörler, yüzey aktif maddeler, şişirici ajanlar, alev geciktiriciler, antioksidanlar ve bazı renklendiriciler eklenir. İzosiyanat dışındaki tüm bileşenler köpük uygulamacısının uygun kombinasyonu şeklinde öncesinde karıştırılır, sonrasında bu karışım izosiyanat ile birlikte hızlıca karıştırılır. Karışım kimyasal bir reaksiyon oluşturur. Şekil 2.1 ve Şekil 2.3 'te gösterildiği üzere büyük köpük bir levha elde edilir. Reaksiyon sonunda köpük soğuması ve kürünü tamamlaması için çok iyi havalandırılan bir yerde bekletilir. Havalandırma gereksinimleri, reaksiyon ısısından kaynaklanan önemli ekzoterm ve poliüretan bileşenlerinin, özellikle izosiyanatların, katalitik aminlerin ve poliol üretiminden kaynaklanan küçük moleküllü kirliliklerin, çoğunlukla aldehitlerin uçuculuklarından kaynaklanmaktadır. Sonrasında soğuyan köpükler yönetilebilir boyutlara kesilir [28].



Şekil 2.1: Slabstock prosesi.



Şekil 2.2: Slabstock proses ekipmanları.

Esnek Poliüretan Köpük Türkiye'de genel olarak m^3 yoğunluk olarak 14 ile 100 kg arasında üretilmektedir. Firma, Şekil 2.2 'de gösterildiği gibi otomatik sistemle köpük üretmektedir. Köpük üretme prosesi, TDI, poliöl, su, amin ve kalay katalizörleri kullanılarak anlatılmaktadır. Poliüretan hammaddeleri Şekil 2.2 'deki a numaralı görselde görülen galonluk borular yardımıyla bir araya getirilir. Elde edilen karışım Şekil 2.2 'deki b numaralı görselde görüldüğü gibi belirli bir hızla hareket eden konveyör hattına dökülür. Şekil 2.2 'nin c numaralı görüntüsünde gösterildiği gibi, reaktiflerin hat boyunca reaksiyona sokulmasıyla köpüklü karışım katılaşır ve bir kek gibi yükselir. Ekzotermik reaksiyon tamamlandığında, oluşturulan 20 m'lik köpük bloklar, CO₂'nin tamamının uzaklaştırılması için 72 saat daha dinlenmeye bırakılır. Sürece kürlleme denir. Şekil 2.2 'deki d numaralı görsel köpük üretiminde kullanılan ekipmanı göstermektedir [21].

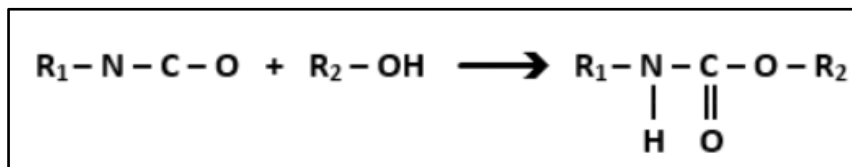


Şekil 2.3: Poliüretan slabstock esnek köpük.

2.3. Hücre Yapıları ve Reaksiyonları

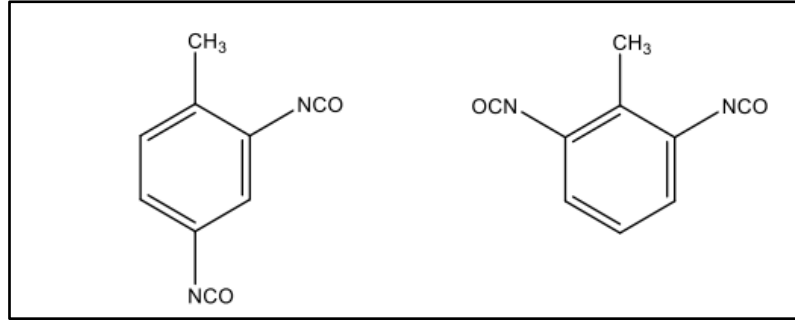
Poliüretanlar A ve B komponent olmak üzere iki bileşenin ekzotermik olarak kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşurlar. A komponent olarak tanımlanan bileşen içerisinde poliol ve katkıları ihtiva eden sıvı bir karışımdır. B komponent olarak ifade edilen komponent izosiyanat gruplarını ihtiva eden yapılardır.

A komponent ana hammadresi poliol, kendi içinde poliester ve polieter bazlı olmak üzere iki grupta incelenirken, B komponent en genel ifade ile MDI ve TDI bazlı kimyasal yapılardan oluşmaktadır. Bu ürünlerin yüzde yüz olarak sisteme dahil edilebileceği gibi, pure olarak ifade edilen yüksek saflıktaki ürünlerin prepolimer reaksiyonu adı verilen yarı doyurmayı temsil eden bir ön kimyasal reaksiyondan geçirilerek kullanıma hazır olması sağlanabilir. Bu yapıların kimyasal yapıları ve reaksiyonu Şekil 2.4 verilmiştir.

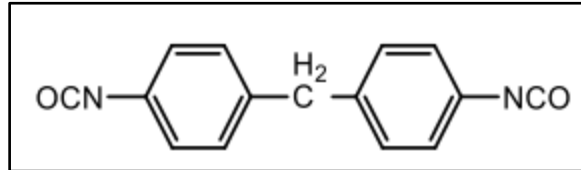


Şekil 2.4: Poliüretan reaksiyonu.

Reaksiyonda B komponent olarak sisteme girecek olan izosiyanat grubu bileşiği, aromatik, alifatik, di veya polifonksiyonel veya siklo alifatik molekül yapısına sahip bir ön polimer olarak sentezlenebilmektedirler. PMDI ve 4,4 MDI kimyasal yapıları ile 2,6 TDI ve 2,4-TDI molekülleri Şekil 2.5 ve Şekil 2.6. te verilmiştir.

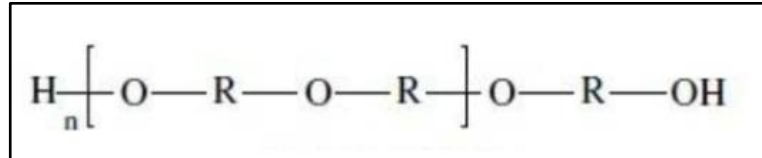


Şekil 2.5: 2,4 TDI (solda) ve 2,6 TDI (sağda) molekülleri.

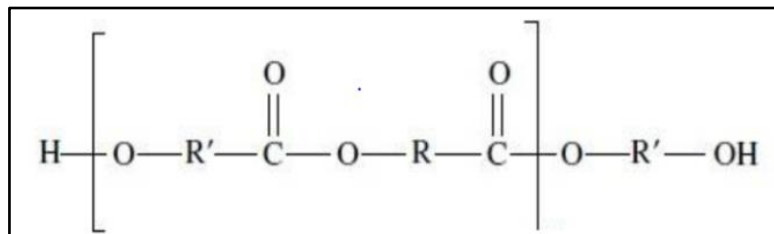


Şekil 2.6: 4,4 MDI yapısal formülü.

Ayrıca kullanılan poliolün kimyasal yapısı, zincir uzunluğu ve fonksiyonel grup sayısı poliüretan reçinenin özellikleri üzerindeki etkisi büyüktür [14]. Farklı fonksiyonel hidroksil grubu taşıyan reçineler, farklı ürün uygulamalarında kullanılabilirken ayrıca değişik özellik ve yapılarda olabilmektedir.



Şekil 2.7: Polieter poliol yapısal formülü.

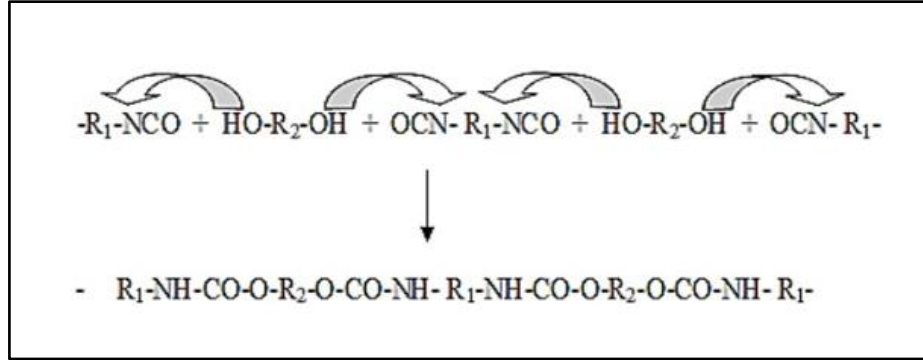


Şekil 2.8: Poliester poliol yapısal formülü.

İzosiyanatlar, (NHCOO) grubu içeren üretan (karbamat) yapısını oluşturmak için, özellikle fenoller ve alkoller ile aktif hidrojen bileşiklerini kolaylıkla reaksiyona

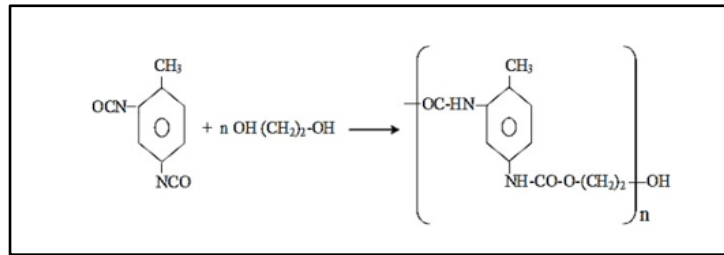
sokarlar. Böylelikle, yüksek molekül ağırlıklı ürünlerin oluşabilmesi için –NCO içeren gruplar ile –OH grubu içeren grupların reaksiyona girmesi sağlanır. Üretan yapısının oluşumunu gösteren alkol ve izosiyanatın reaksiyon mekanizması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Diizosiyanatın zincirli bir glikol ile verdiği reaksiyon Şekil 2.9.'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Glikol ve izosiyanat reaksiyonu.

Etilen glikol (EG) ile 2,4-toluen diizosiyanat (TDI)'ın reaksiyonu sonucu meydana gelen poliüretan kimyasal reaksiyonu da Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: TDI ve EG reaksiyonu.

Poliüretanlar, hücresel yapıda üretilen polimerdir. Bu tür yapılar köpük olarakta adlandırılırlar. Sert yapılı ve kapalı hücreli veya esnek yapılı ve açık hücreli formda bulunabilirler. Bir şişirici ajan, poliöl ve izosiyanat varlığında poliüretan reaksiyonu oluşur. Şişirici ajanlar olarak kimyasal ajanlar kullanılabileceği gibi su gibi fiziksel ajanlarda kullanılabilmektedir.

Genel olarak kalıplama prosesinde iki adet karıştırıcı kafası kullanılır. İlki poliüretan köpüğün enjeksiyonu olarak tanımlanan ve reaksiyonlu enjeksiyon

kalıplama (Reaction injection molding-RIM) makinesi ile gerçekleştirilendir. Bu yöntemde poliöl ve izosiyanat bileşenleri makinenin karıştırıcı kafasında çarpıştırma yoluyla karıştırılır ve kalıba enjekte edilir. Diğer i ise bir karıştırıcı mikser yardımıyla mekanik karıştırma sonucunda elde edilen köpük üretim prosesidir [25].

Köpük fiziksel ve mekanik özelliklerinin köpüğün kendi hücresel yapısı ile ilgili ilişkisi olduğu bilinmektedir. Bu durum mekanik özelliklerin, mikro yapısal özellikler ile geliştirilebilmesini mümkün kılmaktadır.

Hücre, Latince ‘‘cell’’ kelimesinden türetilmiş olup küçük bölme, kapalı bir alan anlamına gelmektedir. Köpük, üç boyutta uzay boşluğunu dolduran çokyüzlü hücresel yapılara verilen addır. Kapalı hücreli köpüklerde hücre yüzeyleri katı madde ile kaplıdır. Açık hücreli köpüklerde ise hücrelerin açık yüzleri bulunur ve köpük sadece kolonlardan oluşmuştur. Hem açık hem de kapalı hücreli köpüklerde bulunmaktadır. Köpüğün özelliklerini, hücre duvarının yapısı (topolojik), hücre boyutu, hücrenin şekli ve hücre duvarının geometrisi etki etmektedir.

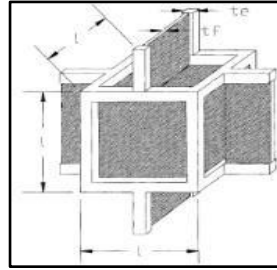
Hücre duvarları bulunmayan açık hücreli yapıların, yapısal anlamda tüm hücreleri yanındaki hücreler ile temas halindedir. Açık hücreli köpükler, süngerimsi bir görünüme ve düşük yoğunluğa sahiptirler. Sert malzemelerden oluşan kapalı hücreli köpükler yanındaki hücreden bağımsız yapıdadır. Yapısal olarak yüksek basma mukavemetine sahiptirler. Açık hücreli köpükten daha yüksek boyutsal kararlılık ve daha az nem çekiciliği bulunmaktadır.

Köpüklerin hücresel yapıları mükemmel bir dizilime sahip olmamakla birlikte farklı sayı ve farklı yüz ile köşe sayısına sahip hücrelerle yan yana bir yapı oluşturabilirler. Ama en gelişigüzel hücreli yapıdaki köpük bile topolojik kurallara uyar [32].

Polimerik köpüklerin özellikleri;

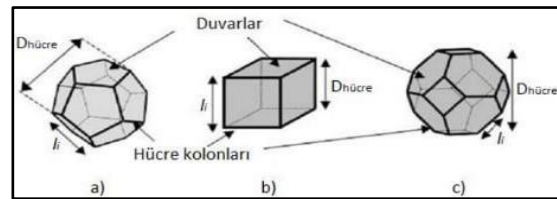
- Hücre kolon ve duvar kalınlığı
- Hücre boyutu
- Hücre şekli
- Hücre yönelmesi
- Açık ya da kapalı hücreli oluşu
- Hücre boyut dağılımı gibi yapısal faktörlere göre değişir.

Hücre yapısının gerçekteki geometrisini bilmek önemli olmasına rağmen, mekanik özellikleri morfolojiyle bağdaştırırken karmaşık şekilleri kullanmak zorlayıcı olabilmektedir. Bu sebeple Gibson ve Ashby, köpükteki deformasyon mekanizmalarını incelerken kolaylık için kübik hücre modelini tercih etmişlerdir. Kapalı hücreli köpük için bu model, “l” uzunluğundaki hücre duvarlarını, “te” kalınlığındaki hücre kenarlarını ve “tf” kalınlığındaki hücre yüzlerini kapsar. Şekil 2.11. Gerçek hücre yapısı ile tam bir uyuşma göstermemektedir ancak yapılan çalışmalar birçok köpük malzemesinde kullanılabilir bir model olduğunu göstermektedir [32].



Şekil 2.11: Gibson ve Ashby köpük hücrelerinin morfolojisi.

Çalışmalarının sonucunda Gibson ve Ashby köpük hücrelerinin morfolojisi hakkında bilgi sahibi olmak adına faydalı bir tablo hazırlamışlardır. Bu tablo yardımıyla mikroskobik olarak incelenen hücre yapılarının analiz edilmesine imkân sağlanmaktadır. Örneğin sert polimer köpükler, hücrelerden, hücreleri oluşturan yaklaşık sabit kalınlıkta duvarlardan ve üç hücrenin kesiştiği kolonlardan oluşur [20].



Şekil 2.12: Hücre yapısı.

Sert poliüretan köpük, yüksek yüzdede kapalı hücrelerden oluşurken esnek köpükler açık hücreli yapılardır.

Sert köpükler, yüksek hacimli köpükler olup yüksek mekanik dayanım istenen uygulamalarda tercih edilirler. Esnek köpükler, düşük hacimli köpükler olup araç koltukları, ambalajlar, ses yalıtımı, destekleme malzemesi, mobilya sektöründe tercih

edilirler. Sert köpükler yüksek kapalı hücre ve çapraz bağ yapısına sahiptirler. Buna rağmen açık hücreli köpükler düşük oranda çapraz bağlı polimerlerdir. Açık hücreli köpüklerde, komşu hücreler arasında bir bariyer olmadığı için yapıda hava geçişine izin veren bir yol vardır. Bu köpükler, son kullanıcı için yüksek konfor seviyesi sağlayan esnek ve elastik ürünler olarak kullanılabilirler.

2.4. Çeşitleri ve Uygulama Alanları

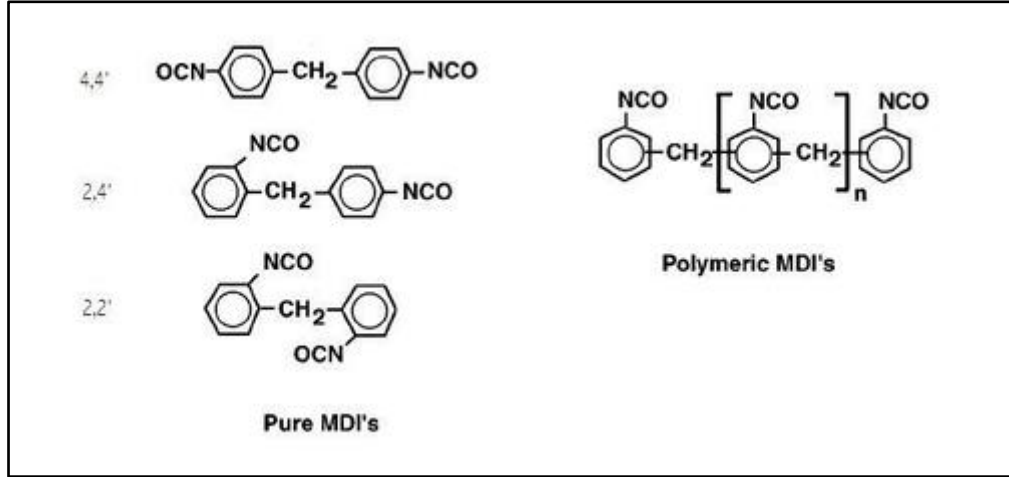
Tezin başlarında da ifade edildiği gibi poliüretanlar, esas olarak diğer plastik türlerinin çoğundan farklı olan üretan grupları ile bağlanan moleküler birimlerin zincirlerinden yapılan polimerlerdir. Poliüretanlar terminolojide PUR, alkol (-OH) ve izosiyanat (-NCO) grupları arasındaki üretan bağları yoluyla katılma polimerizasyonunun son ürünüdür.

Poliüretan köpük, beş hammaddenin karıştırılmasıyla oluşturulur. Bu beş hammadde; poliöl, diizosiyanat; şişirici ajan, katalizör ve silikon yüzey aktif maddedir. Ürün grupları sırasıyla ayakkabı sistemleri, rijit sistemler, esnek sistemlerdir; CASE sistemleri, prepolimerler, polyester polioller, termoplastik poliüretanlardır. PUR köpük, polieter esaslı poliüretan köpükler olarak iki gruba ayrılır. Polyester esaslı poliüretan köpükler; güçlü hidroliz direncine sahiptirler ve formülasyona ilave edilecek katkı maddeleri ile uyumludurlar. Ancak yangın dayanımı ve mekanik özellikleri düşüktür. Polieter poliöl esaslı poliüretan köpüklere alternatif olarak geliştirilen poliüretan esaslı poliüretan köpükler çok daha iyi yangın dayanımı ve ısıl kararlılık sağlar. Tozlanma oranları düşüktür ve kırılğan bir yapıya sahip değildirler. Isı etkisinden kaynaklanan genleşme, nihai ürünün uyumlaştırılmasına katkıda bulunur. Poliüretan formülasyonları son derece geniş bir tokluk, sertlik ve yoğunluk aralığını kapsar.

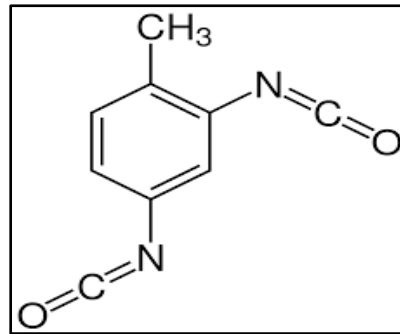
Poliüretan ürünlerin birçok kullanım alanı vardır. Bunlarda bazıları: yapı ve inşaat sektörü, otomotiv sektörü, ısıtma ve soğutma sektörü, mobilya sektörü, uçak ve savunma endüstri sektörü, taban ve ayakkabı sektörü, tıbbi ve medikal ürünler sektörü, ambalaj ve denizcilik sektörü, izolasyon uygulamaları bunlara örnek olarak verilebilir. Poliüretanı oluşturan yapı taşları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

İzosiyanatlar, içeriğinde NCO grubu bulunduran moleküllerdir. Alifatik ya da aromatik yapıları olabilirler. Endüstride en yaygın olanları MDI ve TDI bazlı olanları kullanılır. Poliüretan reçellerinde B komponenttirler. Reaktif formları stok stabilitesi

sağlanması adına on prosten geçirilebilir. Yarı doyun ya da daha az reaktif ürünle prepolimer olarak tanımlanabilir. Poliüretan üretiminde kullanılan tipik diizosiyanatlar MDI (difenilmetan-4,4-diizosiyanat), NDI (naftalen-1,5-diizosiyanat ve TDI (toluen diizosiyanat)'dır [33].

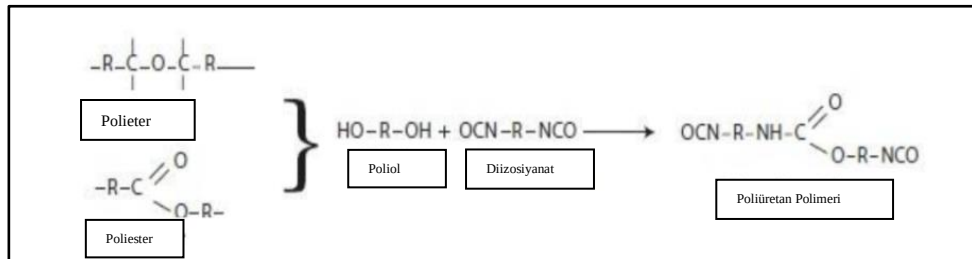


Şekil 2.13: MDI türleri.



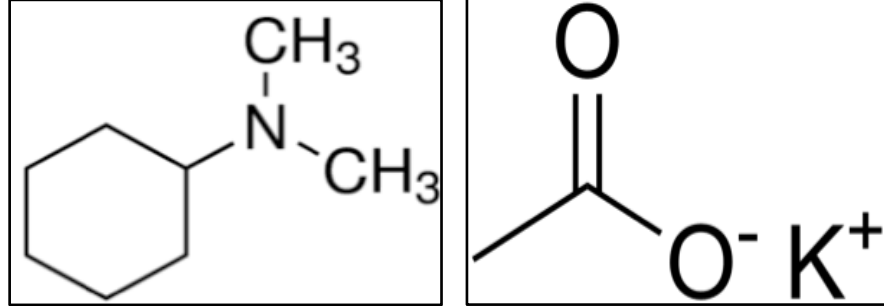
Şekil 2.14: 2,4 TDI molekülü.

Polioller polieter ve polyester bazlı olarak iki grupta toplanırlar. Poliester bazlılar esterifikasyon reaksiyonu ile elde edilir, prosesi kolaydır. Polieter bazlılar ise proses sırasında yüksek ekzoterm açığa çıkardıklarından proses şartları çok tehlikelidir. Alifatik ve aromatik yapıları olabilirler. Nihai ürüne farklı özellikler katarlar.



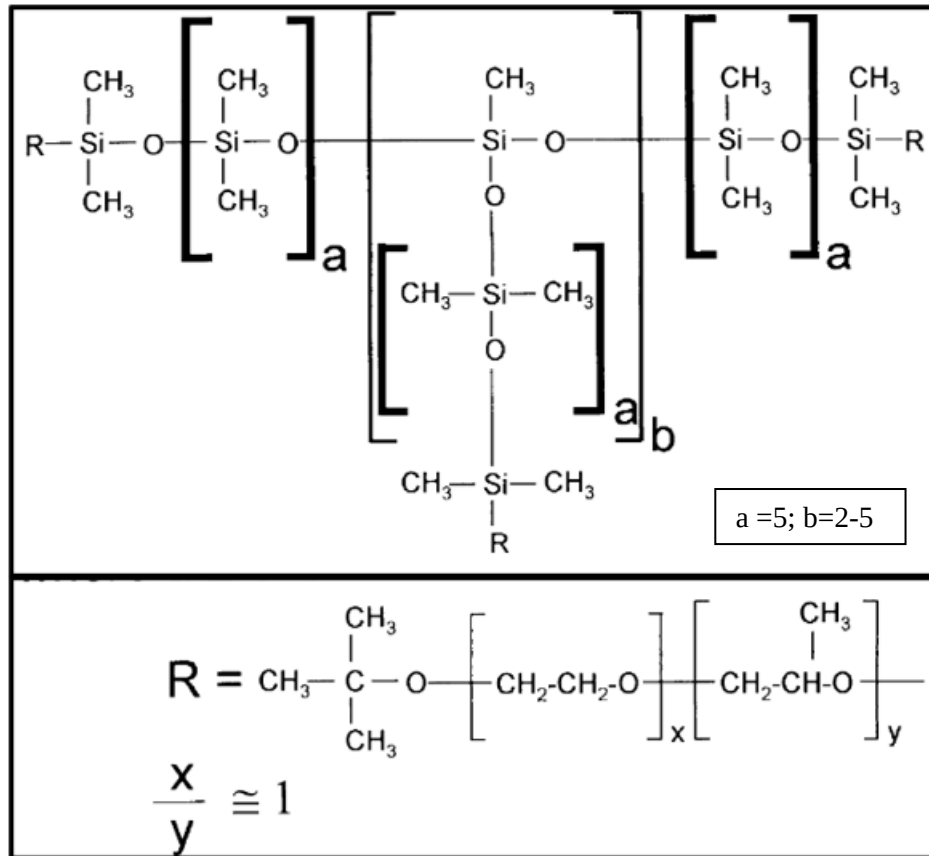
Şekil 2.15: Poliollerin izosiyanat ile reaksiyonu.

Katalizörler, poliüretan reaksiyonlarında değişkenlerin kinetiğini ayarlar için kullanılırlar. Amin ya da metal bazlı katalizörler tercih edilir. Uygulama türüne göre katalizör türü, miktarı değişebilir. Şekil 2.16 de verilmiştir.



Şekil 2.16: a) Amin bazlı(solda) b) Metal bazlı katalizör(sağda).

Silikonlar, poliüretan köpükte hücre yapısı, tipini ve büyüklüğünü ayarlayan bileşendir. Hücre stabilitesini sağlamaya yardımcı olur.



Şekil 2.17: Silikon türevi.

Fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki türevi vardır. Fiziksel kabarma ajanları kaynama noktaları düşük sıvılardır. Poliöl ve izosiyanatın ekzotermik reaksiyonu sırasında buhar fazına geçerek ortamdan uzaklaşır. Kimyasal ajanlar H bağı ile bağlanırlar. Su kimyasal bir kabarma ajanıdır.

Diğer katkılar, UV stabilizatörü, renk ve antioksidan vb. kimyasallar olabilir.

2.5. Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Poliüretanın türüne göre değişkenlik gösteren fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri bulunmaktadır. Poliüretan özelliklerinin bir bölümü aşağıda tanımlanmıştır. Sıcaklık, poliüretanlar çok çeşitli sıcaklıklara dayanarak orijinal şekil ve fiziksel özelliklerini koruyabilmektedirler. Standart termoset poliüretanlar için çalışma sıcaklık aralığı -26°C ila 93°C şeklindedir. Ancak, bazı non-cellüler yapıdaki poliüretan ürünlerini, 148°C sıcaklığa karşı toleransa sahip olabilmektedirler.

Termoset poliüretanlar yüksek sıcaklıklara karşın zamanla deformasyon veya bozulma eğilimi göstermektedirler [34].

Isıl İletkenlik Katsayısı Değeri, bir malzemenin ısı transfer etme veya iletme kapasitesini ifade eder. Yapı ve izolasyon kullanımında önemli bir veridir. Bir diğer deyişle lambda değeri olan bu veri, genellikle λ ile gösterilir ve bir ürünün ısı geçirgenlik seviyesini referans alarak ürünün yalıtım kapasitesini tanımlar.

Su buharı difüzyon direnci, havanın su buharı geçirgenliğinin numunenin su buharı geçirgenliğine oranıdır. Bu veri yüksek su buharına maruz kalacak ürünlerde talep edilir.

Boyutsal stabilite, özellikle sert poliüretan yapılarda yüksek olan bir değerdir. İnşaat ve yapı sektörü için önemli bir değerdir. Sıcaklık stabiliteyi etkileyen bir faktördür. Yapı uygulamaları için genellikle köpük -30°C ila $+70^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında test edilir.

Poliüretan köpüğünün mekanik özellikleri, hücrelerin şekli ve boyutu, doldurma hacmi, poliüretanın iç ve dış yapısı ve kullanılan polimerin hücresel yapı özelliklerinden etkilenmektedir. Poliüretanın mekanik özellikleri, gerilim dağılımı, gerilimin gerinim hızından, temas basınçlarından etkilenmektedir.

Yanma dayanımı, kullanılan poliüretan türüne bağlı olmakla birlikte, başarılı ve üstün performanslar alınabilir.

Kimyasal dayanımı, poliüretanın kimyasal direnci poliüretan reçetelerine bağlı olarak farklılıklar gösterirler. Örneğin polyester tipi poliüretanlar, zayıf asit ve bazlara, yağlara ve solventlere karşı daha dayanıklı iken polieter tipi poliüretanlar suya maruz kalmaya ve daha üstün mekanik performanslı ürünlerin üretimine karşı daha dayanıklıdır.

2.6. Kullanılan Cihazlar ve Çalışma Standartları

Yoğunluk, birim hacim başına ağırlık, ağırlık/hacimdir ve lbs/ft³ (pcf) olarak ifade edilir. Yoğunluk genellikle gram/cm³ cinsinden ölçülür ve lbs/ft³e (pcf) dönüştürmek için 62,4 ile çarpılır. Yoğunluk, herhangi bir numune boyutundan elde edilebilir. Gözenekli yapılarda yoğunluk gözenek boyutuyla ilgili değildir, yani kaba gözenekli ve ince gözenekli köpükler eşit yoğunluklara sahip olabilir. Yoğunluk, sıklılığın, sertliğin veya yük taşıma kapasitesinin bir ölçüsü de değildir. Bu veriler Girinti Kuvveti Sapması (IFD) veya Sıkıştırma Kuvveti Sapması (CFD) ile tanımlanır.

Girinti Kuvvet Sapması (IFD) (ILD), yük taşıma kapasitesini belirlemek için bir test yöntemidir ve köpüğün belirli bir yüzde sapması için 50 inç² başına libre kuvvet olarak ifade edilir. Kuvvet okuması ne kadar yüksek olursa, köpüğün yük taşıma kapasitesi o kadar yüksek olur [35].

Sıkıştırma Yüğü Sapması (CLD), aynı zamanda bir sıklılık ölçüsüdür ve belirli bir sapma yüzdesinde pound/inç kare (psi) olarak ifade edilir. Numune boyutu 2" x 2"

x 1" kalınlığındadır. Bu testte numunenin tamamı 50 inç² girinti plakası altında sıkıştırılır. Prosedür IFD ile aynıdır. %25R ve %65R değerlerini kaydedilir. Köpük spesifikasyonlarında yaygın bir uygulama, yalnızca %25 R-değerini belirtmektir. Hem IFD hem de CFD, müşteri/tedarikçi anlaşmasına dayalı olarak %50R'de veya başka herhangi bir sapma noktasında test edilebilir.

% Sıkıştırma Seti, kontrollü bir süre ve sıcaklık koşulu için iki metal plaka arasında sıkıştırıldıktan sonra bir köpüğün kalıcı deformasyonunun bir ölçüsüdür. Standart koşullar, 70°C'de (158°F) 22 saattir. Köpük, orijinal kalınlığının yüzdesi olarak verilen bir kalınlığa, genellikle %50'ye sıkıştırılır. Sıkıştırma seti, orijinal kalınlığının "ayarlanmış" olarak kalan yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin: 2" x 2" x 1" boyutunda bir numune, sıkıştırmadan önce 1,00 inç ve testten sonra 0,95 inç ölçüldüğünde, %5'lik bir sıkıştırma ayar değerine sahip olduğu, yani orijinalinin %5'ini

geri kazanmadığı kalınlık rapor edilir.

Buhar ile Yaşlandırma işlemi, köpük numunesinin bir buhar otoklavında maruz bırakılarak sıcak ve nemli koşullardan sonra köpüğün boyutsal değişimini tespit etmek için maruziyet öncesi analizlerin yeniden test edilerek aradaki farkın tanımlanması yöntemidir. ASTM D 3574'ün belirttiği iki koşul grubu vardır: $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 'de 3 saat ve $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de 5 saat. İlk yaşlandırma şartları polyester köpükler ve ikinci şartlar ise polieter köpükler içindir.

Kuru Isıl Yaşlandırma, bu yaşlandırma testi 22 saat boyunca $140^{\circ} + 1.2^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilir. Kuru sıcak havaya maruz bırakılan köpüğün ilk ve son verileri analizlenir.

Yorulma, yük taşıma kabiliyetindeki kaybın bir ölçümüdür ve yük kaybının yüzdesi olarak ifade edilir. Yorulmadan önce ve sonraki değerler karşılaştırılır ve yüzde yük kaybı hesaplanır.

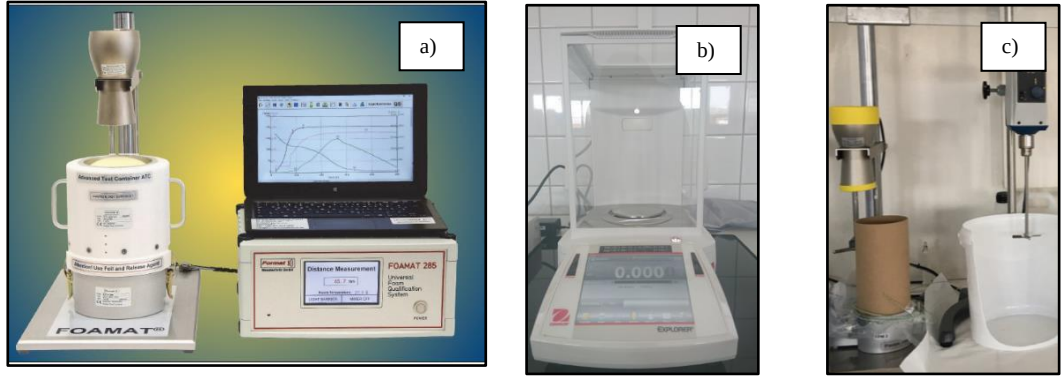
Çekme mukavemeti, 1/2 inç karelik bir köpük alanını çekilirken kırmak için gereken kuvvet miktarının bir ölçüsüdür. Gerilme mukavemeti pound/inç kare (psi) olarak ifade edilir. Çekme numunesi, 6" x 1" x 0.5" kalınlığında bir papyon kalıp yardımıyla kesilir.

Uzama, köpüğün kırılmadan önce ne kadar gerilebileceğinin bir ölçüsüdür ve orijinal uzunluğunun yüzdesi olarak ifade edilir.

Yırtılma mukavemeti, ayrılma başladıktan sonra köpükte yırtılmayı sürdürmek için gereken kuvvetin bir ölçüsüdür ve pound/lineer inç (pli) olarak ifade edilir. Bir uygulamada köpük dikilecek veya zımbalanacaksa yırtılma mukavemeti önemli bir özelliktir.

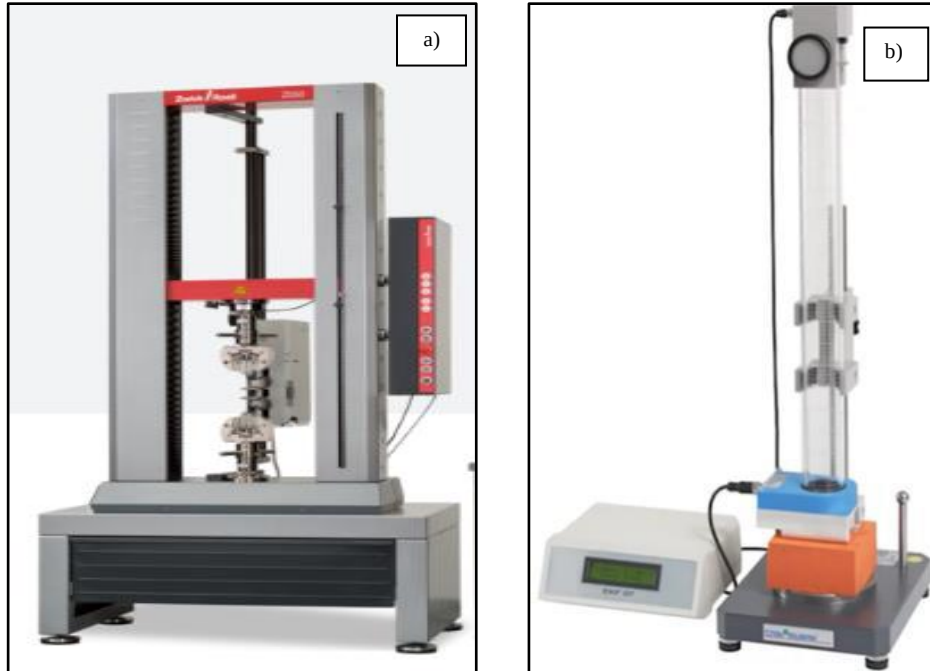
Geçirgenlik, bir köpük numunesinden çekilebilen ve dakikada fit küp olarak ifade edilen, dakikada hava hacminin ölçüsüdür. Kalınlık ürüne göre değişir.

Darbe Direnci, köpüğün esnekliğinin, sıçramasının veya yaylanabilirliğinin bir ölçüsüdür ve geri dönüş yüzdesi veya esneklik yüzdesi olarak ifade edilir. Örnek boyutu 4" x 4" x 2" olmalıdır. % Esneklik elde etmek için 16,3 gram, 5/8 inçlik bir çelik bilye, her %5 dönüş kalibrasyonu işaretlenmiş olarak şeffaf plastik bir tüp aracılığıyla köpüğün üzerine 18 inç düşürülür. Üç analiz gerçekleştirilir ve üç okumanın ortalaması, topun orijinal yüksekliğinin dönüş yüzdesine eşittir [35].



Şekil 2.18: a)Foamat cihazı, b)Analitik terazi c)Foamat mikseri.

Deneyler sırasında ölçümler için kullanılan cihaz görselleri Şekil 2.18 ve Şekil 2.19 'da verilmiştir. Buna göre, foamat cihazı ile reaksiyon profili analiz edilirken, uzama, gerinme gibi değerler Zwick cihazında ve darbe mukavemeti bareiss cihazında ölçülmüştür. Tartımlar analitik terazide ölçülmüştür. Ölçüm değerleri dördüncü bölümde verilmiştir.



Şekil 2.19: a) Zwick Roell Proline, b) Bareiss cihazı.

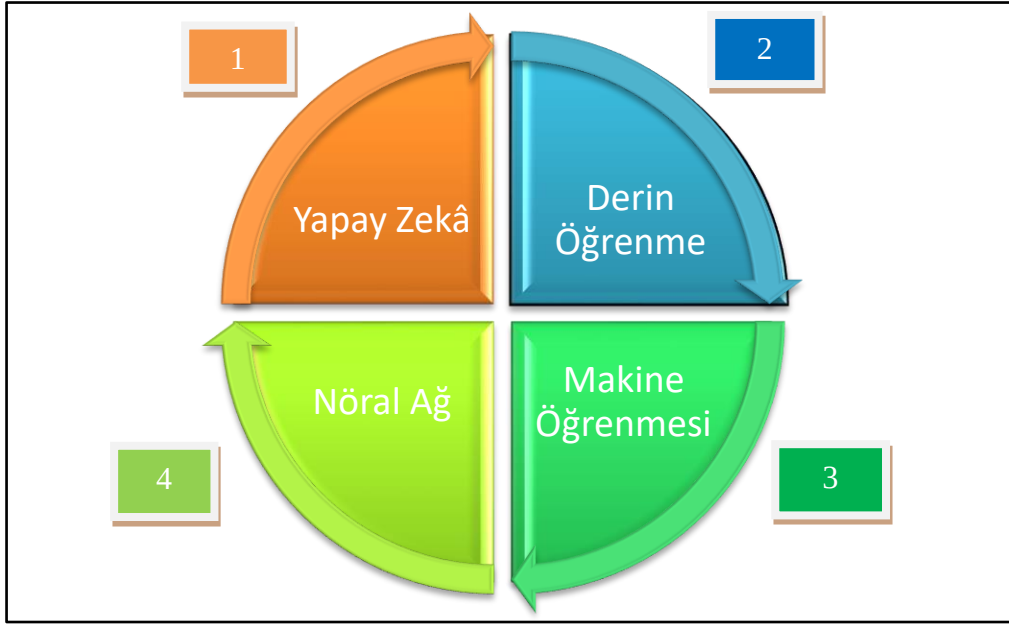
3. YAPAY ZEKÂ

Biyolojik bir beyindeki nöronlar üzerinde -yapay bir nöral ağ (ANN) modellenir [1]. Yapay nöronlar düğüm olarak adlandırılır, paralel olarak çalışır ve birden fazla katmanda bir araya getirilerek kümelenir. Yapay bir nöron sayısal bir sinyal aldığında onu işler ve ona bağlı diğer nöronlara sinyal verir. İnsan beyinde olduğu gibi nöral güçlendirme de uzmanlık, gelişmiş örüntü tanıma ve genel öğrenme ile sonuçlanır.

Makine öğrenimi, yapay zekanın (AI) ve bilgisayar biliminin, insanların öğrenme şeklini taklit etmek için veri ve algoritmaların kullanımına odaklanan ve doğruluğunu giderek artıran bir dalıdır [36].

Makine öğrenmesi, farklı makine öğrenmesi modelleri türünden oluşur ve çeşitli algoritmik teknikler kullanılarak çalışır. İstenilen sonuca ve verilerin niteliğine bağlı olarak dört öğrenme modelinden biri kullanılabilir: denetimli, denetimsiz, takviye veya yarı denetimli. Bu modellerin her birinde, bir veya daha fazla algoritmik teknik kullanılabilir. Referans noktası veri kümelerine ve amaçlanan sonuçlara göre uygulanabilirliktir. Makine öğrenmesi algoritmaları temel olarak olayları sınıflandırmak, örnekler bulmak, bilinçli kararlar vermek ve sonuçları tahmin etmek için tasarlanmıştır. Mümkün olan en iyi doğruluğu elde etmek için, algoritmalar karmaşık ve daha öngörülemez veriler söz konusu olduğunda tek seferde bir veya bir arada kullanılabilir.

Yapay zekâ, tahminleri ve kararları almak amacıyla verileri işler. Makine öğrenmesi algoritmaları yapay zekânın bu verileri işlemesine değil, daha akıllı bir şekilde öğrenmesi ve elde etmesi için kullanmasına olanak sağlar.

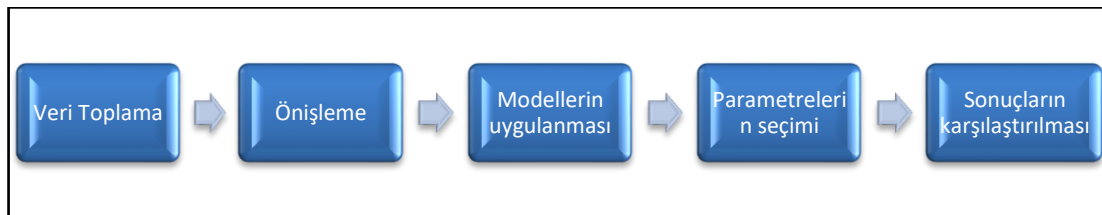


Şekil 3.1: Yapay Zekânın dıştan içe alt kümeleri.

Yapay zekanın bir numarası en geniş kümeyi tanımlarken saat yönünde hareket edildiğinde en küçük küme olan nöral ağı erişilmektedir. Şekil 3.1 de gösterildiği gibidir.

3.1. Makine Öğrenmesi

Yapay zekânın (AI) bir alt kümesi olan makine öğrenmesi, bilgisayarları verilerden öğrenmeyi öğretmeye ve bunu yapmak için açıkça programlanmak yerine deneyimle geliştirmeye odaklanır. Makine öğrenmesinde algoritmalar korelasyonları bulmak ve büyük veri kümelerinde desenleri ve bu analize dayalı en iyi tahminleri ve kararları yapmak için eğitilir. Makine öğrenmesi uygulamaları kullanımla gelişir ve daha fazla veri erişimi olduğunda daha doğru hale gelir.



Şekil 3.2: Makine öğrenmesi çalışma prensibi.

Veri sorunlarını çözmek için, makine öğrenimi farklı algoritmalar kullanır. Veri bilimcileri, bir sorunu çözmek için her duruma uyan ve en iyi olan, tek bir algoritma türü olmadığını belirtirler. Kullanılan algoritma türü, çözmek istediğiniz problemin türüne, ona en uygun modelin türüne, değişkenlerin sayısına, vb. bağlıdır. Makine öğrenmesinin dört türü vardır.

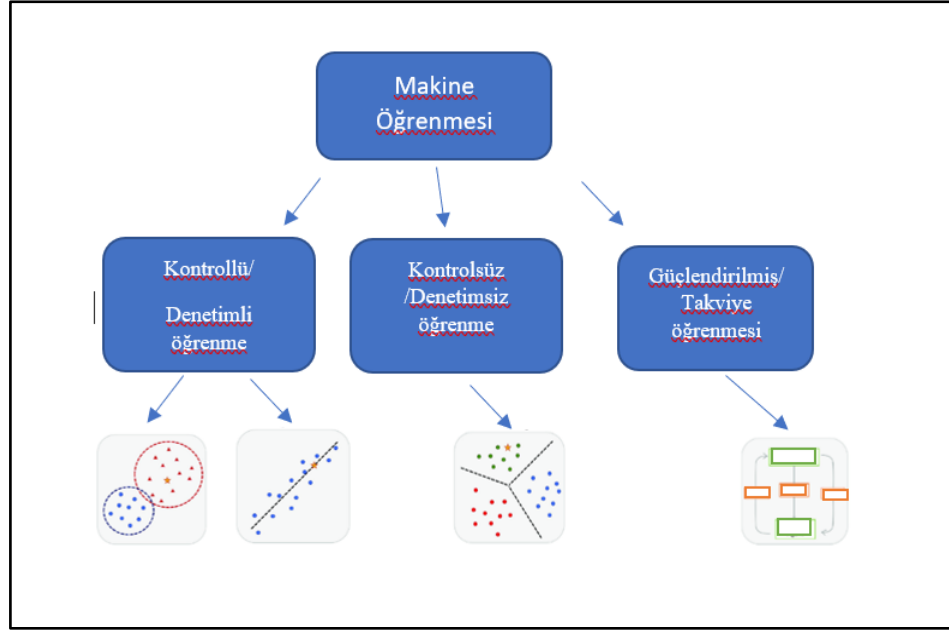
3.1.1. Makine Öğrenmesi Türleri

Dört makine öğrenmesi modelinden ilki kontrollü öğrenmedir. Kontrollü öğrenme algoritmalarında makine örneğin tarafından öğretilir. Denetlenen öğrenme modelleri, çıktının istenilen değerle etiketlendiği "girdi" ve "çıktı" veri çiftlerinden oluşur. Bir çocuğa bir cevap anahtarıyla bir dizi sorun vermenin, sonra işlerini göstermelerini istemenin ve mantığını açıklamalarının karşılığıdır. Denetlenen öğrenme modelleri, günün farklı zamanlarında en hızlı rotayı tahmin eden Waze gibi ürünler ve trafik analizi uygulamaları için öneri motorları gibi her gün etkileşime geçtiğimiz birçok uygulamada kullanılıyor.

Birçok yönden bu model, birine satranç oynamayı öğretmeye benzer. Belli ki onlara her potansiyel hamleyi göstermeye çalışmak imkânsız olurdu. Bunun yerine, kuralları açıklarsınız ve uygulama yoluyla becerilerini oluştururlar. Ödüller sadece oyunu kazanmak değil aynı zamanda rakibin parçalarını da kazanmak şeklinde gelir. Güçlendirme öğrenimi uygulamaları arasında çevrimiçi reklam alıcıları için otomatik fiyat teklifi, bilgisayar oyunu geliştirme ve yüksek hisse senedi piyasası ticareti yer alıyor.

3.1.1.1. Kontrollü Öğrenme Modeli

Bu teknik denetimli model olacakta adlandırılmaktadır. Bu modele bir örnek olarak, amacın makinenin papatya ve panzehir arasındaki farkı söylemesi olduğunu belirtildiğinde; bir ikili giriş veri çifti hem bir daisy resmini hem de pansy resmini içerir [25]. Bu özel çift için istenen sonuç, daisy'yi seçmektir, bu nedenle doğru sonuç olarak önceden tanımlanacaktır. Algoritma yoluyla, sistem tüm bu eğitim verilerini zaman içinde derler ve bağıl benzerlikleri, farklılıkları ve diğer mantık noktalarını daisy-or-pansy sorularının yanıtlarını kendi başına tahmin edebilene kadar belirlemeye başlar.



Şekil 3.3: Makine öğrenmesi alt grupları.

Dört makine öğrenmesi modelinin ikincisi kontrolsüz öğrenmedir. Cevap anahtarları kontrolsüz öğrenme modellerinde yoktur. Makine, yapılandırılmamış ve çoğu etiketsiz giriş verilerini inceler ve erişilebilir, tüm ilişkili verileri kullanarak korelasyonları ve modelleri tanımlamaya başlar. Denetimsiz öğrenme, insanların dünyayı birçok yönden nasıl gözlemlediği üzerine modellenir. Kontrolsüz öğrenme uygulamalarının yaygın örnekleri arasında gen sırası analizi, yüz tanıma, siber güvenlik ve pazar araştırmaları sayılabilir.

Dört makine öğrenmesi modelinin üçüncüsü yarı denetimli öğrenmedir. Bu model, etiketlenmemiş veri kümelerini artırmak için az miktarda etiketli veri girmekten oluşur. Öğrenme hızını ve doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirebilir. Aslında etiketlenen veriler, sisteme çalışan bir başlangıç yapmaya çalışır ve yarı denetimli öğrenme algoritması, makineye etiketlenmemiş verilere uygulanabilecek bağıl özellikler için etiketli verileri analiz etme talimatı verir. Yarı denetimli öğrenme, protein kategorizasyonu gibi karmaşık tıbbi araştırmalarda, konuşma ve dil analizinde ve üst düzey dolandırıcılık tespitinde kullanılır.

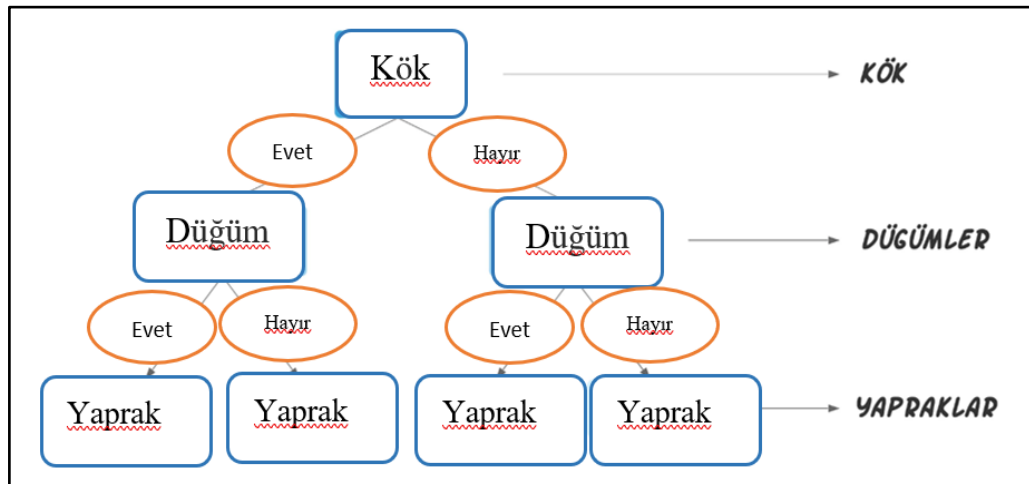
Dördüncü makine öğrenmesi modeli güçlendirme öğrenmesidir. Kontrollü öğrenmede makineye cevap anahtarları verilir ve tüm doğru sonuçlar arasında korelasyonlar bularak öğrenilir. Bir cevap anahtarını içermeyen güçlendirme öğrenme modeli, bunun yerine izin verilen eylemler, potansiyel bitiş durumları kümesini ve kurallarını girer. Algoritmanın istenen algoritmanın hedefi sabit ya da ikili olduğunda

makineler örnek olarak öğrenilebilirler. Ancak istenilen sonucun değişebilir olduğu durumlarda sistemler ödülle ve tecrübe öğrenmelidir. Güçlendirme öğrenme modellerinde “ödül” sayısal olup sistemin toplamak istediği bir şey olarak algoritmaya programlanır.

3.1.1.2. Kontrollü Öğrenme Modeli Karar Ağacı Metodu

Karar Ağacı hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilen denetimli bir öğrenme tekniğidir, ancak daha çok sınıflandırma problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir. İç düğümlerin bir veri kümesinin özelliklerini temsil ettiği, dalların karar kurallarını temsil ettiği ve her yaprak düğümün sonucu temsil ettiği ağaç yapılı bir sınıflandırıcıdır.

Bir karar ağacında, karar düğümü ve yaprak düğümü olmak üzere iki düğüm vardır. Karar düğümleri herhangi bir karar vermek için kullanılır ve birden fazla dala sahiptir, yaprak düğümleri ise bu kararların çıktısıdır ve başka dallar içermez. Kararlar veya test, verilen veri setinin özelliklerine göre gerçekleştirilir. Belirli koşullara dayalı olarak bir soruna/karara tüm olası çözümlerin elde edilmesi için grafiksel bir gösterimdir. Karar ağacı olarak adlandırılır, çünkü bir ağaca benzer şekilde, daha fazla dallara yayılan ve ağaç benzeri bir yapı oluşturan kök düğümle başlar. Bir ağaç oluşturmak için, Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı algoritması anlamına gelen CART algoritmasını kullanılır. Bir karar ağacı basitçe bir soru sorar ve cevaba göre (Evet/Hayır), ağacı alt ağaçlara ayırır. Şekil 4.4 teki diyagram, bir karar ağacının genel yapısını açıklamaktadır.



Şekil 3.4: Karar Ağacı.

Algoritmik tahminlemeye başlamadan önce kokun modeli olabildiğince çok açıklaması istenmektedir. Kökün seçilmesinde kullanılan birtakım veriler ve formüller mevcuttur. Gini değeri, alt küme saflık değeri olarak tanımlanır. Entropi değeri, log2 tabanına göre ölçümleme yapar. Hedef değişkene göre gruplamanın bozukluğunu tespit eder. J sınıfının gerçekleşme olasılığı. Pj değeri olarak ifade edilir.

Tablo 3.1: Gini ve Entropi Formülleri.

Tanım	Kısaltma	Formül
Altküme Saflık Değeri	Gini	$Gini = 1 - \sum_j p_j^2$
Entropi Değeri	I_H	$I_H = - \sum_{j=1}^c p_j \log_2(p_j)$

Gini değeri 0 ile 1 arasındadır çıkar. Gini frekans fazlası sınıfı ayırıştırırken, entropi daha dengeli bir ağaç modellemesi ortaya çıkarır. Gini değeri hesaplaması verilmiştir. $Gini = 1 - [(\sum \text{Evet sayısı})^2 - (\sum \text{Hayır sayısı})^2]$ [26].

3.1.1.3. Kontrollü Öğrenme Modeli Gaussain Prosesi

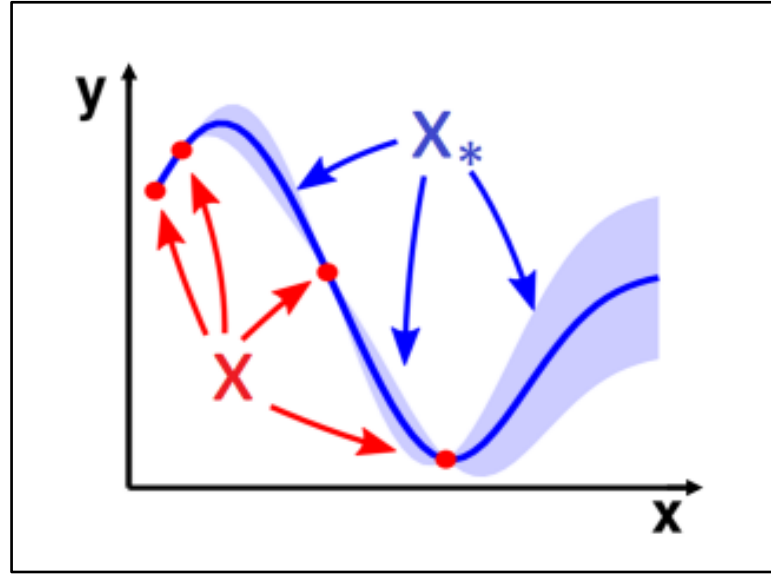
Gauss süreci (GP) regresyonu, regresyon görevleri için kullanılabilen bir tür olasılıksal modeldir. Öğrenilecek fonksiyonun bir Gauss sürecinden alındığı varsayımına dayanan, parametrik olmayan bir yöntemdir. Bu varsayım, modelin, aktif öğrenme ve belirsizliğin farkında karar verme gibi görevler için yararlı olabilecek, iyi tanımlanmış bir belirsizlikle tahminler yapmasına izin verir [38].

Gauss süreçleri regresyonunun sezgisel olarak anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Gauss süreçleri regresyon (GPR) modelleri, temsil esneklikleri ve tahminler üzerindeki doğal belirsizlik ölçümleri nedeniyle makine öğrenimi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir Gauss süreci, bir dizi noktaya uyan olası fonksiyonlar üzerindeki bir olasılık dağılımıdır. Bir Gauss süreçleri regresyon modeli, tahmin değerleri ile birlikte belirsizlik tahminleri sağlar. İşlevlerin biçimine ilişkin ön bilgi, çekirdek işlevleri kullanılarak entegre edilebilir. Bu eğitimdeki GPR modeli, standart veya vanilya Gauss süreçleridir. Bununla ilgili iki ana kısıtlama vardır:

1) Genel hesaplama karmaşıklığı $O(N^3)$, burada N kovaryans matrisi K 'nin boyutudur.

2) Bellek tüketimi ikinci derecedendir. Hesaplama karmaşıklığı ve bellek tüketimi nedeniyle, standart Gauss süreçleri modeli hızla sıkışır. Bu sebeple büyük bir veri kümesine sahip regresyon görevleri için, hesaplama karmaşıklığını azaltmak için seyrek GP kullanılır.



Şekil 3.5: Gauss Süreci grafiği.

Gauss süreçleriyle regresyon yürütmenin açıklayıcı bir süreci Şekil 3.5'te verilmiştir. Kırmızı noktalar gözlemlenen verilerdir, mavi çizgi gözlemlenen veri noktaları tarafından tahmin edilen ortalama işlevi temsil eder ve tahminler yeni mavi noktalarla yapılacaktır.

Matematiksel Gauss modeli aşağıdaki gibidir. Veri girişleri x olarak gösterilen d -boyutlu bir vektördür. Y değeri x verilerine karşılık gelen çıktılardır ve skaler bir büyüklüktür. GP regresyon modeli, girdileri çıktılarla ilişkilendiren f fonksiyonunun ortalama μ ve kovaryans fonksiyonu k olan bir Gauss sürecinden alındığını varsayar. Bir x^* test noktası kümesindeki f 'in dağılımı formül (3.1) deki gibi verilir. Ortalama fonksiyon ve kovaryans fonksiyonu tipik olarak Kernel fonksiyonları kullanılarak tanımlanır. Örneğin, yaygın olarak kullanılan kareli üstel Kernel formül (3.2) deki gibi tanımlanır [40].

$$f(x^*) \sim N(\mu(x^*), k(x^*, x^*)) \quad (3.1)$$

$$k(x_i, x_j) = \exp \left(-\frac{1}{2} \|x_i - x_j\|^2 \right) \quad (3.2)$$

$$p(f|x, y) = \frac{p(y|x, f)p(f)}{p(y|x)} \quad (3.3)$$

$$p(f^*|x^*, y, z) = \int p(f^*|x^*, f)p(f|y, x) df \quad (3.4)$$

Bir dizi eğitim verisi (x, y) verildiğinde, GP regresyon modeli, verileri oluşturması en muhtemel olan f 'nin dağılımını öğrenmek için Bayesian çıkarımı kullanır. Bu şekilde formül (3.3) te tanımlanan veriler verilen f 'nin sonsal dağılımının hesaplanmasını içerir. Burada $(y|x, f)$, f fonksiyonu verilen verinin olasılığı, $p(f)$ f 'nin önceki dağılımı ve $p(y|x)$ verinin marjinal olasılığıdır.

f 'nin sonsal dağılımı öğrenildikten sonra, model aşağıdaki şekilde tanımlanan sonsal öngörü dağılımını hesaplayarak yeni x^* test noktalarında formül (3.4) kullanılarak tahminler yapılabilir.

Bu dağılım, aktif öğrenme ve belirsizliğin farkında karar verme gibi görevler için faydalı olabilecek tahminin belirsizliğinin bir ölçüsünü sağlar. Gauss süreci regresyonu (GPR), tahminler yapmak için k -en yakın komşulara benzer eğitim verilerini kullanır. Küçük veri kümeleriyle iyi çalışır ve belirsizlik ölçümü ile bir tahmin sağlar.

3.1.1.4. Makine Öğrenmesi Test Yöntemleri

Makine Öğrenimi modülünde test için uzatma ve çapraz doğrulama yöntemleri gibi birtakım yöntemler kullanılmaktadır.

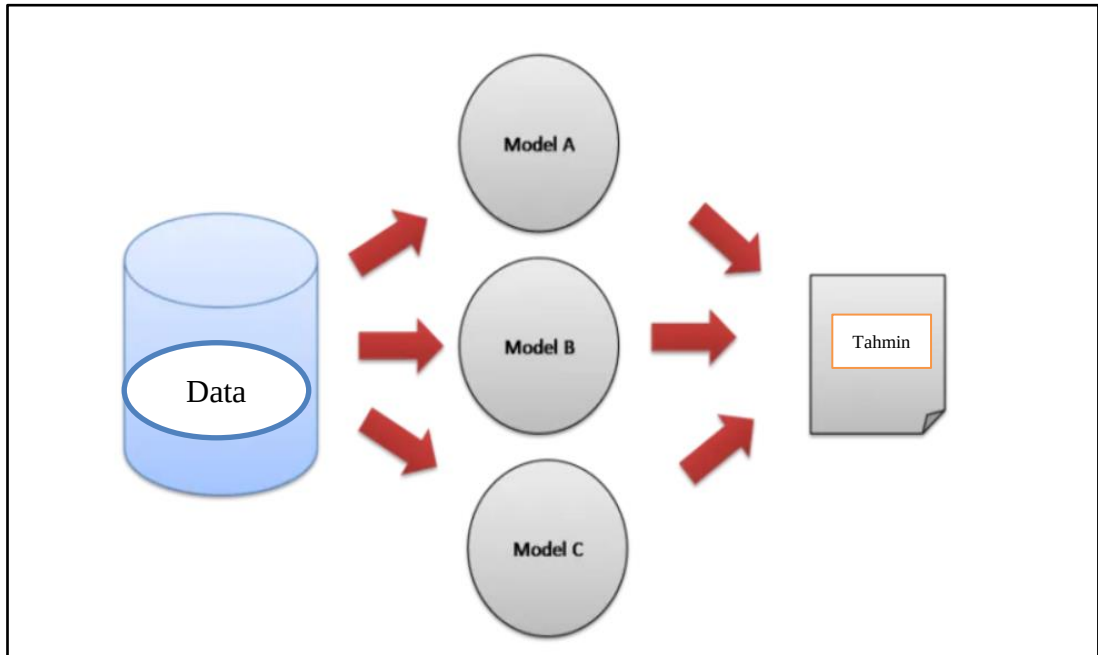
Uzatma ya da Bekletme Yöntemi, veri kümenizi bir "eğitim" ve "test" kümesine böldüğünüz zamandır. Eğitim seti, modelin üzerinde eğitildiği şeydir ve test seti, modelin görünmeyen veriler üzerinde ne kadar iyi performans gösterdiğini görmek için kullanılır. Bekletme yöntemini kullanırken uygulanan ayrımlar %80-%20, %75-

%25, %60-40 şeklinde olup, en yaygın olarak görülen ayırım, verilerin %80' ini eğitim için ve kalan %20'sini test için kullanan yöntemdir [41].

Çapraz doğrulama veya "k-katlı çapraz doğrulama" yöntemi ise, veri kümesinin rastgele "k" grubuna bölünmesidir. Gruplardan biri test seti, diğerleri eğitim seti olarak kullanılır. Model, eğitim setinde eğitilir ve test setinde puanlanır. Daha sonra, her benzersiz grup test seti olarak kullanılabilece kadar işlem tekrarlanır.

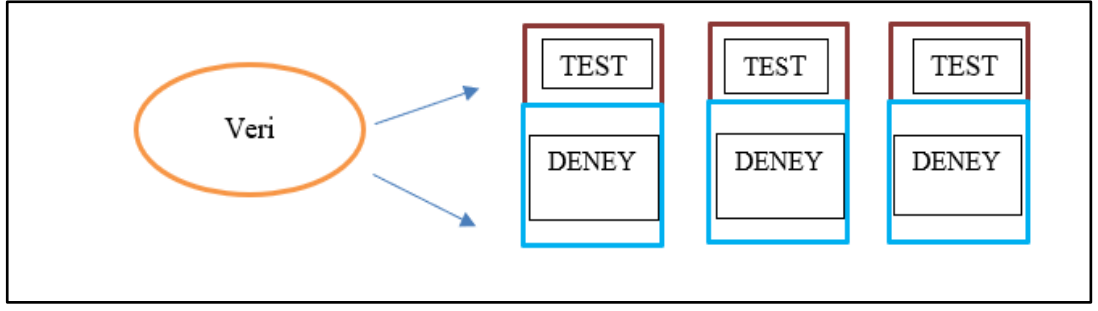
Çapraz doğrulama genellikle tercih edilen yöntemdir çünkü modelde birden çok seri testi bölümü üzerinde eğitim yapma fırsatı verir. Bu, modelin görünmeyen veriler üzerinde ne kadar iyi performans göstereceğine dair size daha iyi bir gösterge sağlar. Öte yandan, uzatma, yalnızca bir seri testi bölünmesine bağlıdır.

Bekletme yöntemi, çok büyük bir veri kümesi olduğunda, zaman darlığında veya veri bilimi projesinde bir başlangıç modeli oluşturmaya başladığında kullanışlıdır. Çapraz doğrulama, çoklu seri testi bölmeleri kullandığından, çalıştırma yöntemini kullanırken daha fazla hesaplama gücü ve zaman gereklidir.



Şekil 3.6: Test Metodu ve Modelleme.

Uzama test analizleri %80-%20, %75-%25, ve %60-%40 oranında gerçekleşebilir. Genel olarak kullanımını 80-20 dir. Verilerin %80 'nini eğitim % 20 sini test için kullanan metottur.



Şekil 3.7: Bekleme Verisi a) %80-%20, %75-%25, c) %60-%40.

4. DENEYSEL ve MODELLEME ÇALIŞMALARI

4.1. Hammadde Hazırlanması

Bu çalışmada aynı uygulama için yaklaşık 100 adet poliüretan reçete hazırlanmıştır. Reçetelerin A bileşeni poliol, katalizör, silikon; şişirici ajan içeren bir polimiksten oluşurken, B bileşeni TDI bazlı bir izosiyanattır. Hazırlanan reçetelerde poliolün ve izosiyanatın farklı batchleri kullanılırken, diğer katkılarda aynı bileşenler değiştirilmeden köpük numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu köpüklerin mekanik analizleri yapılarak kaydedilmiş ve toplanan veriler kontrollü makine öğrenmesi metodu kullanılarak verilerin tahmin edilmesindeki yaklaşıma bakılmıştır.

Tablo 4.1: Poliüretan bileşenleri.

Kullanılan Hammaddeler	
Bileşen A	Poliol
Bileşen B	İzosiyanat
Katkı-1	Silikon
Katkı-2	Katalizör
Katkı-3	Şişirici ajan

4.2. Reçetelerin Oluşturulması

Hammaddeler aşağıdaki firmalardan tedarik edilerek Tablo 4.2. 'deki miktarlarda belirtildiği üzere reçeteleri hazırlanmıştır. A bileşen içerisinde poliol ve katkıları ihtiva eden komponent olup, B bileşen TDI bazlı bir izosiyanat türevidir.

Reçeteyi oluştururken kullanılan A/B karışım oranı ve uygulanan indeks değeri Tablo 4.3'te verilmiştir. B bileşenin % NCO değeri 48 iken reçete de kullanılan poliolün ortalama % OH değeri 56 dir. Index değeri ise sisteme giren toplan NCO sayısının toplam OH sayısına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 4.2: Poliüretan hammadde tedarikçileri ve reçetesi.

Bileşen	Hammadde	Üretici	Miktar (phr)
A	Polieter Poliol 1	PCC Rokita	100
	Polieter Poliol 2	BASF	
	Polieter Poliol 3	Covestro	
	Dolgulu Polieter Poliol	DOW	
	Silikon Stabilizatörü	Evonik	1-3
	Katalizör 1	Evonik	0,5- 2
	Katalizör 2	Evonik	0,1-0,5
	Fiziksel kabarma ajanı	Ravago	0,5-5
	Kimyasal kabarma ajanı	-	
B	Izosiyanat	BorsodChem	30

Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verildiği şekliyle reçeteler hazırlanıp dökümleri laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Dökümler sonrası poliüretanın kürlenmesi için gerekli süre olan 24 saat boyunca köpükler dinlendirilmiş ve sonrasında ölçümler için uygun boyutlarda kesilmiştir.

Tablo 4.3: Karışım oranı ve indeksi.

Karışım Oranı ve İndeksi	
A/B Karışım Oranı	100/30
İndeks	105

4.3. Deney Analiz Metodu

Deney suresince köpüklere reaksiyon profili, köpük yüksekliği, yoğunluk, uzama, darbe mukavemeti ve sıkıştırma deneyi testleri uygulanmıştır.

Yoğunluk deneyinde, dinlendirme işlemi tanımlanan köpük numuneleri ciltlerinden ayrılarak çekirdek yoğunlukları 10x10x10 olarak kesilen numunelerin terazide tartılması metoduyla kg/m³ cinsinden ölçülüp hesaplanmıştır.

Maksimum yükseklik deneyinde, reaksiyonu tamamlanan numuneler cetvel yardımıyla maksimum yükseklikleri ölçülünerek kaydedilirler.

Reaksiyon profili deneyinde Foamat cihazı kullanılmıştır. Cihaz A ve B

komponentin kendi karıştırıcısında karıştırılması suretiyle sureyi başlatıp reaksiyon sonuncunda reaksiyonun kinetik grafiğini oluşturup kreleme, iplikleşme ve yükselme zamanlarını kaydeder.

% Sıkıştırma Seti deneyinde 2" x 2" x 1" boyutunda bir numune 70°C'de 22 saat boyunca iki metal plaka arasında %50'ye sıkıştırıldıktan sonra bir köpüğün kalıcı deformasyonu bir ölçülür. Başlangıç ve son yükseklikler arasındaki fark üzerinden % kayıp hesaplanır. Köpük yoğunluğuna göre de hedef kabul değeri değişmekle birlikte bu oran yaklaşık %40 olarak kabul edilmiştir.

Uzama değeri, köpüğün kırılmadan önce ne kadar gerilebileceğinin bir ölçüsüdür ve orijinal uzunluğunun yüzdesi olarak ifade edilir. Zwick cihazı kullanılarak ölçümler yapılmış ve değerler kaydedilmiştir.

Darbe Direnci, köpüğün esnekliğinin bir ölçütü olarak kabul edilir. 4" x 4" x 2" olarak hazırlanan numunelerin analizi standart ağırlığı 16,3 gram olan 5/8 inçlik bir çelik bilye ile deney yapılır. Köpük numunesi, ölçüğü olan şeffaf plastik bir tüp içerisine yerleştirilir ve çelik bilye 18 inc yükseklikten aşağı bırakılır. Test üç kez tekrarlanır ve ortalama değeri not edilir. Orijinal yükselme değeri referans alınarak hesaplanır.

4.4. Deney Proses Süreleri

Reçetesi hazırlanan ve dökümleri yapılan köpük numuneleri; 24 saat dinlendirildikten sonra kesimleri yapılarak yukarıda tanımlandığı şekliyle analiz edilmiştir. Analiz edilen değerler Tablo 5.5' te verilmiştir.

Dinlendirilmiş köpük numunesi üzerinden ortalama yoğunluk ölçümü yaklaşık 90 dakika, sıkıştırılma deneyi 28 saat, darbe mukavemeti deneyi 90 dakika, uzama 120 dakika, maksimum köpük yüksekliği 10 dakika kadar zaman almaktadır. Reaksiyon profili reçete hazırlama süresini de kapsadığında 90-120 dakika sürmektedir.

4.5. Deneysel Ölçüm Verileri

Analizler boyunca köpüklerin reaksiyon profili, maksimum yükseklik, % sıkıştırma set analizi, darbe analizi (ball rebound), sıkıştırma yük sapması, uzama vb. ölçümler yapılmıştır.

Reaksiyon profili, köpüğün kabarmaya başladığı süre olarak tanımlanan

kremleşme zamanını, hücrelerin oluşmaya başladığı an olarak tanımlanan iplikleşme zamanını, köpüğün yükselmesini tamamlayıp hücrelerin kapandığı anı tanımlayan yükselme zamanını tanımlar. Bu veriler, Foamat 285 olarak tanımlanan cihaz ile analiz edilmiştir. Kullanılan cihazlar ve görselleri Şekil 6.2 de gösterilmektedir.

Uzama gibi mekanik ölçümler Zwich Roell Proline cihazı ile darbe dayanımı Bareiss cihazı ile ölçülmüştür. Cihazlar Şekil 6.3'te verilmiştir.

Yapılan deneylerin tüm sonuçları Tablo 4.4 ve verilerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri Tablo 4.5'te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.4: Deney verileri ortalamaları.

Veri	RT(s)	Maks H (mm)	D(kg/m ³)	CLD (N)	B (%)	TS (Mpa)	E (%)	C(%)
MİN	69.3	198.1	20.0	2.0	41.7	0.1	100.8	3.4
MAKS	204.5	291.1	42.7	4.0	65.2	0.1	192.5	42.3
ORT	136.9	244.6	31.4	3.0	53.4	0.1	146.7	22.9

Bu veriler kullanılarak sitemin korelasyon eğrileri çizilerek sonuçlar bölümünde grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 'de verilmiştir.

Tablo 4.5: Deneyisel veri tablosu.

Numune	RT(s)	Maks H (mm)	D(kg/m ³)	CLD (N)	B (%)	TS (Mpa)	E (%)	C(%)	Numune	RT(s)	Maks H (mm)	D(kg/m ³)	CLD (N)	B (%)	TS (Mpa)	E (%)	C(%)
1	70.7	291.1	20.05	2.35	50.63	0.121	132.4	42.3	51	78.7	264.6	20.93	2.42	44.6	0.1184	182.1	40.32
2	160.8	265.5	42.25	3.27	65.21	0.108	123.2	14.1	52	78.0	271.5	20.82	2.39	45.6	0.1045	164.3	39.11
3	81.9	264.3	21.15	2.61	51.77	0.106	123.4	40.1	53	79.0	267.1	20.92	2.43	47.2	0.1190	185.4	37.39
4	78.4	270	22.39	2.74	52.97	0.117	128.8	41.5	54	79.3	261.1	20.75	2.50	45.2	0.1066	166.0	41.3
5	79.0	273.6	21.61	2.55	51.94	0.118	134.0	40.3	55	75.7	265.5	21.33	2.61	44.8	0.0971	147.2	39.41
6	87.4	254.6	22.05	2.71	48.08	0.1112	140.8	37.4	56	78.2	264.8	20.88	2.56	46.5	0.1102	172.7	37.87
7	90.0	248.6	22.02	2.61	48.99	0.1084	151.2	38.1	57	80.6	263.6	20.83	2.58	44.4	0.1013	159.2	41.59
8	91.1	253.7	21.59	2.55	48.47	0.1122	156.9	38.1	58	78.7	265.4	20.92	2.61	46.1	0.0998	155.5	39.18
9	136.1	198.1	36.12	2.94	62.20	0.0984	113.0	39.9	59	87.7	247.2	20.87	2.83	45.1	0.1172	166.8	42.08
10	141.1	199.8	42.75	4.00	60.14	0.1192	100.8	38.9	60	75.3	258.9	20.82	2.46	46.8	0.1368	170.5	38.51
11	88.4	253.6	21.62	2.49	48.41	0.1024	137.1	40.6	61	78.3	241.5	21.65	2.36	53.93	0.1138	159.9	24.89
12	85.8	260.1	21.66	2.59	49.46	0.0897	150.6	39.67	62	82.0	240.1	21.74	2.40	49.82	0.1142	150.1	31.51
13	84.3	251.0	21.53	2.57	47.04	0.0837	121.0	40.42	63	72.8	253.0	21.24	2.28	52.68	0.1144	158.0	32.90
14	80.9	256.6	21.28	2.45	48.07	0.0964	145.9	39.44	64	91.4	249.0	21.75	2.17	55.16	0.1166	154.6	31.58
15	80.1	256.5	21.16	2.49	48.50	0.0999	157.2	41.26	65	146.5	281.9	39.14	2.22	60.77	0.1134	192.5	11.29
16	81.0	257.5	21.34	2.43	47.74	0.0939	148.8	41.40	66	143.5	267.8	39.75	2.50	61.44	0.1146	188.7	8.85
17	79.9	263.7	20.41	2.42	48.24	0.0996	159.0	39.34	67	164.7	235.1	40.59	2.65	62.57	0.0852	133.5	10.81
18	84.0	246.1	21.62	2.52	44.3	0.0936	152.6	40.8	68	158.7	239.9	40.63	2.57	63.29	0.0716	120.5	11.88
19	80.1	237	21.42	2.39	45.8	0.1011	187.9	39.8	69	164.5	236.9	40.34	2.58	62.30	0.1024	154.6	10.22
20	84.4	245.1	25.62	3.41	46.8	0.0928	101.4	41.9	70	116.4	244.8	29.41	2.26	59.49	0.1061	157.7	20.79
21	76.9	265.3	21.14	2.38	45.3	0.0907	150.7	38.3	71	112.2	235.9	29.46	2.44	55.93	0.1028	158.3	13.50
22	81.2	250.3	21.31	2.62	41.7	0.1008	157.4	42.1	72	158.0	233.8	39.75	2.68	61.37	0.1009	158.00	7.46
23	73.9	250	21.13	2.18	46.8	0.1104	177.1	37.6	73	154.6	238.6	39.54	2.81	61.76	0.0920	148.95	7.03
24	71.9	273.7	20.80	2.18	44.6	0.0883	155.5	39.9	74	109.4	235.7	29.23	2.43	55.97	0.1029	169.40	13.08
25	73.1	267.4	21.17	2.23	43.6	0.1082	176.7	38.9	75	107.8	238.5	29.17	2.61	55.73	0.0954	149.15	12.20
26	75.1	269.6	20.76	2.30	42.8	0.0902	118.0	40.6	76	76.0	253.7	20.94	2.32	48.43	0.1007	157.85	34.16
27	88.7	250.7	21.23	2.62	45.7	0.1030	156.1	39.67	77	73.4	258.3	21.04	2.17	48.84	0.0937	140.50	14.45
28	88.9	247.5	21.19	2.68	45.5	0.0954	134.2	40.42	78	73.8	250.4	21.19	2.14	49.17	0.1036	142.75	25.47

Tablo 4.5: Devamı.

Numune	RT(s)	Maks H (mm)	D(kg/m ³)	CLD (N)	B (%)	TS (Mpa)	E (%)	C(%)	Numune	RT(s)	Maks H (mm)	D(kg/m ³)	CLD (N)	B (%)	TS (Mpa)	E (%)	C(%)
30	86.6	248.9	21.55	2.57	46.1	0.1043	154.0	41.26	80	77.7	253.3	21.18	2.24	50.10	0.0923	136.58	26.29
31	88.8	251.4	20.97	2.67	45.3	0.0908	141.6	41.40	81	80.5	253.3	21.23	2.19	49.33	0.0958	150.17	24.42
32	89.5	246.6	20.81	2.66	45.9	0.0936	152.6	39.34	82	88.7	240.2	21.83	2.44	47.70	0.1008	145.42	32.04
33	86.5	248.7	20.97	2.67	45.7	0.0924	136.9	40.80	83	76.9	255.3	21.54	2.40	49.71	0.0918	131.17	16.43
34	87.7	250.8	20.56	2.46	46.2	0.0988	159.5	41.90	84	80.2	261.4	21.10	2.27	49.28	0.0842	132.17	21.92
35	84.6	245.9	21.44	2.51	45.4	0.1039	144.6	39.1	85	165.6	234.0	39.92	2.62	60.20	0.0836	152.92	6.24
36	83.6	251.4	20.71	2.37	45.5	0.1113	159.4	38.1	86	165.1	243.3	39.66	2.56	60.97	0.0815	144.33	6.25
37	85.0	257.6	21.47	2.34	45.7	0.0960	158.8	38.2	87	150.6	228.8	40.92	2.77	61.73	0.0864	144.33	7.21
38	82.3	259.7	20.74	2.38	44.9	0.0960	145.8	35.8	88	152.2	230.2	39.75	2.58	62.23	0.0839	142.67	7.01
39	69.3	264.5	20.95	2.40	47.7	0.1072	162.8	40.60	89	171.4	239.1	39.62	2.63	60.80	0.0720	133.25	6.22
40	71.2	266.9	21.40	2.36	47.2	0.1088	155.9	38.35	90	164.2	230.9	40.07	2.64	59.03	0.0765	135.67	6.26
41	73.1	266.9	21.21	2.47	46.9	0.1091	161.6	37.35	91	204.5	220.9	41.88	3.15	61.77	0.0828	126.42	5.84
42	73.3	264.0	21.04	2.50	47.1	0.1016	149.4	36.88	92	161.9	243.5	39.22	2.66	61.47	0.0728	125.50	4.29
43	73.4	261.5	21.35	2.54	45.3	0.1097	152.0	38.36	93	171.0	239.4	39.18	2.50	62.40	0.0804	135.00	4.14
44	73.4	261.5	21.41	2.70	43.8	0.0924	125.0	36.90	94	160.0	236.4	39.60	2.76	63.67	0.0842	133.25	3.43
45	73.8	260.9	21.45	2.73	44.4	0.0961	128.2	32.17	95	161.5	226.4	40.15	2.80	63.73	0.0848	142.20	3.74
46	72.3	263.3	21.28	2.61	47.6	0.0983	130.6	31.62	96	105.4	238.2	29.02	2.57	57.29	0.0952	150.55	4.77
47	73.5	268.7	21.30	2.62	45.8	0.1116	163.7	39.38	97	107.1	229.4	29.74	2.58	57.27	0.1038	166.50	5.20
48	71.6	262.8	20.71	2.62	45.7	0.1053	143.7	39.80	98	72.1	249.3	21.17	2.34	50.49	0.0977	137.83	6.61
49	91.6	263.1	21.29	2.67	45.7	0.1030	137.0	40.05	99	74.3	245.8	21.98	2.59	49.38	0.1077	142.17	5.65
50	73.5	263.8	21.44	2.88	45.2	0.1116	161.2	33.94	100	72.1	249.3	21.17	2.57	50.49	0.0977	137.83	5.65

Tablo 4.5 ‘te verilen başlıkların açıklamaları şu şekildedir. RT(s) ile gösterilen reaksiyon zamanı (saniye), Maks H (mm) ile gösterilen maksimum yükseklik (milimetre), D(kg/m³) ile gösterilen yoğunluk (kilogram/metreküp), CLD (N) ile gösterilen sıkıştırma Testi (Newton), B(%) ile gösterilen darbe mukavemeti/ ball rebound (%), TS (mPa) ile gösterilen gerilme direnci (megapaskal), E (%) ile gösterien uzama (%) ve C(%) ile gösterilen sıkıştırma testi (%) olarak verilmektedir.

4.6. Modelleme Çalışması

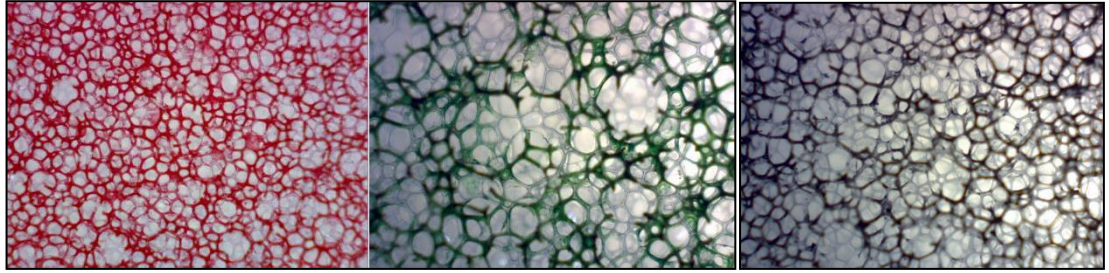
Deneyisel sonuçlarının paylaşıldığı Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’teki veriler kullanılarak yapay zekâ matematiksel modellemesi ile bir algoritma oluşturulmuştur. Karar ağacı ve Gaussian Proses metotları ile ölçümlenen değerlerin analiz sonuçları dördüncü bölümde açıklanmıştır. Bu metotlar kullanılarak yoğunluk verisinin tahmini, darbe mukavemetinin tahmini ve sıkıştırma (%) verisinin tahmini yapılmıştır. Ayrıca Tablo 4.4 verileri kullanılarak Histogram ve Pearson korelasyon grafikleri çizilmiştir. Modelleme grafikerleri ve yorumları dördüncü bölümde anlatılmaktadır.

5. SONUÇLAR

5.1. Poliüretan Esnek Köpük Deneysel Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada aynı uygulama için yaklaşık 100 adet poliüretan reçeteler hazırlanmıştır. Hazırlanan reçetelerde A ve B komponent olarak poliöl ve izosiyanatın farklı batchleri kullanılmış ve aynı diğer katkıları değiştirilmeden köpük numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu köpüklerin mekanik analizleri yapılarak kaydedilmiş ve toplanan veriler kontrollü makine öğrenmesi metodu kullanılarak verilerin tahmin edilmesi yaklaşımına bakılmıştır.

Çalışmalarda A komponent olarak polieter bazlı poliöl, TDI bazlı izosiyanatlar ve amin bazlı katalizörler kullanılmıştır. Poliüretanın açık hücreli köpükleri reçetelenmiş ve esnek köpükler elde edilmiştir. Seri üretimde kullanılan reçete bazı ile çalışmalar yapılmış ve uzun süreli analizlerin makine öğrenmesi metodu ile tahminlenebilmesi amaçlanmıştır. Literatürde poliüretan için benzer çalışmalara rastlanmış ve sonuçların başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Analizi yapılan açık hücreli köpüklerin hücresel yapıları Şekil 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.1: Açık hücreli yapıların mikroskopik görüntüsü.

Yükseklik cetveli yardımıyla standart kalıplama üzerinden ölçümlenmiş olup ölçüm metodu ve bazı ölçüm numunelerinin görselleri Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 5.2: Köpük numuneleri.

Hazırlanan köpük numuneleri öncesinde tam kürlenmenin gerçekleşmesi için 24 saat bekletilmiş. Sonrasında mekanik testler için kesilerek uygun şekillere getirilmiştir. Dinlenmeye bırakılması ve kesilen parça görselleri Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.3: Kesilmiş köpük numuneleri.



Şekil 5.4: Dinlendirilen köpük numuneleri.

Elde edilen veriler makine öğrenmesi metodu ile analiz edilip ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Tablo 4.5 ‘deki formüller Şekil 5.5 ve Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5. grafikleri ve Tablo 5.5’teki tahminleme sonuçları elde edilmiştir.

Poliüretanın mekanik özelliklerini tahmin etmek tipik bir regresyon problemidir. Regresyon probleminin makine öğrenimi modelinin değerlendirme indeksi MAE, ortalama karesel hatanın kökü (RMSE), korelasyon katsayısı R ve belirleme katsayısı R²'yi içerir; burada N örnek sayısı, $\hat{y}_i$ şu şekilde ifade edilebilir: i. örnek indisi, y_i , i. örneğin tahmin değeri ve $\bar{y}$, örneklerin ortalama değeri, Cov (x, y) kovaryans, Var(x) varyans olarak gösterilmiştir. Makine öğrenimi modellerini oluşturmak ve eğitmek için MATLAB 2023a kullanıldı.

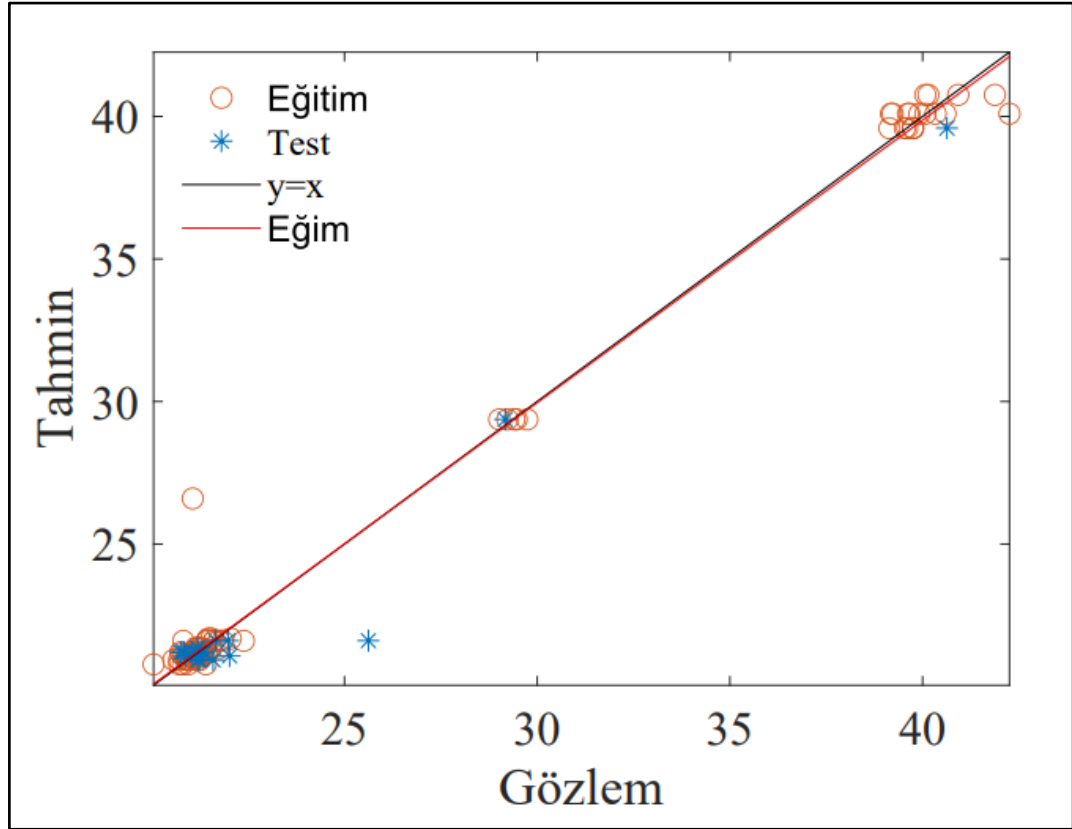
Tablo 5.1: Çalışmalarda kullanılan formüller.

Tanım	Kısaltma	Formül
Korelasyon Katsayısı	R^2	$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_1^n (y_i - y_i^{prep})^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \right]$
İyileştirilmiş Korelasyon Katsayısı	Adj_R^2	$Adj. R^2 = 1 - \frac{ (1 - R^2) * (m - 1) }{m - n - 1}$
Kök Ortalama Kare Sapma	RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - y_i^{pred})^2}{n}}$
Normal Kök Ortalama Kare Sapma	NRMSE	$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\frac{y_i - y_i^{pred}}{y_i} \right)^2}{n}}$
Ortalama Mutlak Hata	AAE	$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - X $
Model Değerlendirme İndeksi	MAE	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^* - \hat{y}_i) $
Ortalama Yüzde Mutlak Hata	MAPE	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right \times 100$

Analizlerde MATLAB 2023a üzerinde çalışmalar yapılmıştır. İki adet metot kullanılmış olup PUR köpüklerin mekanik özellikleri makine öğrenmesi kontrollü ölçüm metodu ile ölçümlenmiştir. Her iki algoritmanın da grafikler aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.

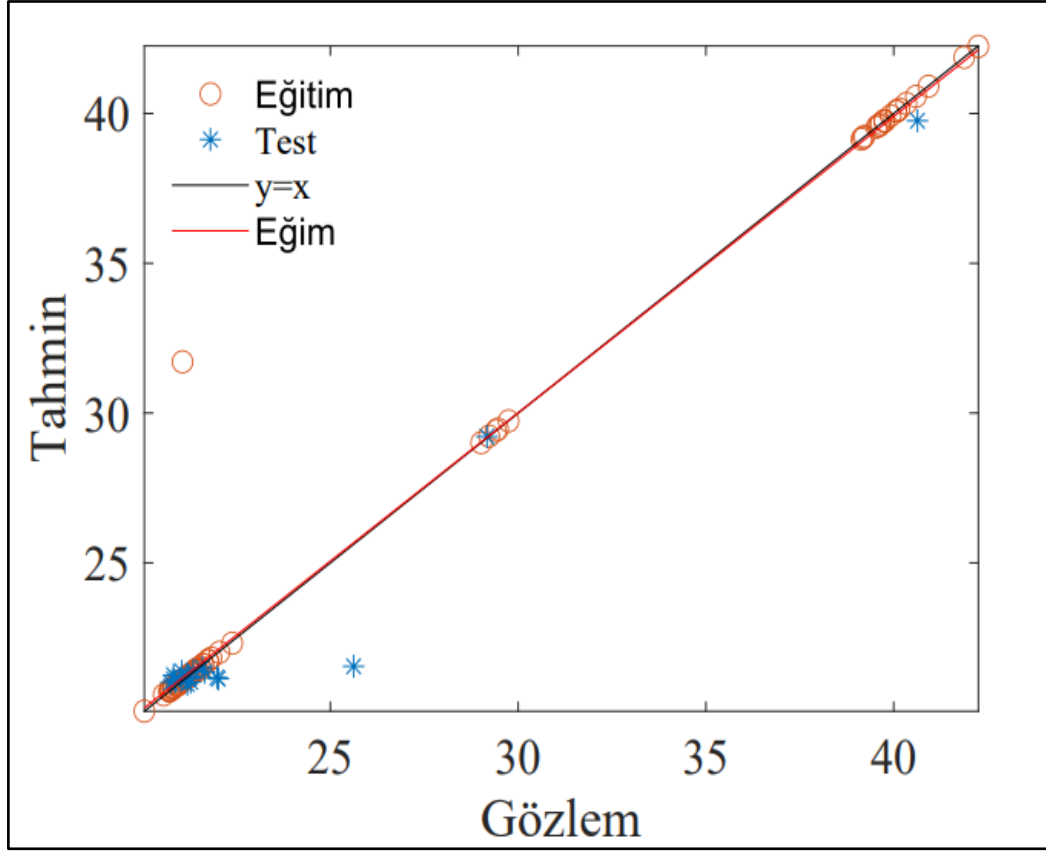
5.2. Yoğunluk Değerinin Modellemesi

Bu analizde reaksiyon profili ve maksimum yükseklik verileri girdi parametre yoğunluk ise çıktı parametre olarak tahminlenmeye çalışılmıştır. Yapay zekâ makine öğrenmesi yönteminin karar ağacı (DT) ve Gaussian prosesi (GP) metotları kullanılmıştır. Reaksiyon profili köpüğün sıvı formdan katı forma kek gibi kabarak geçtiği ve kürlenmenin sonlandığı zamana kadar ki geçen zamanı tanımlar. Bu süre poliüretan köpük türlerine bağlı değişken gösterirken esnek köpük için bu süre yaklaşık maksimum 3 dakika olarak ölçülmüştür. Maksimum yükseklik ise köpüğün kabarak geldiği yüksekliktir. Foamat cihazı kullanılarak veriler analiz edilmiştir. Tahminlemede kullanılan veriler Tablo 4.5 ‘de verilmiştir.



Şekil 5.5: Yoğunluk için DT yaklaşımı grafiği.

Şekil 5.5’ de grafiği üzerinde yoğunluk deneyinin karar aracı metodu (DT) ile test ve analiz verileri grafiği verilmiştir. Buna göre girdiler maksimum yükseklik ve reaksiyon profili, çıktı yoğunluktur. Eğitim ve test verileri 80’e 20 olarak ayrılmıştır. $R^2=0,9518$ olarak tahminlenmiştir.



Şekil 5.6: Yoğunluk için GP yaklaşımı grafiği.

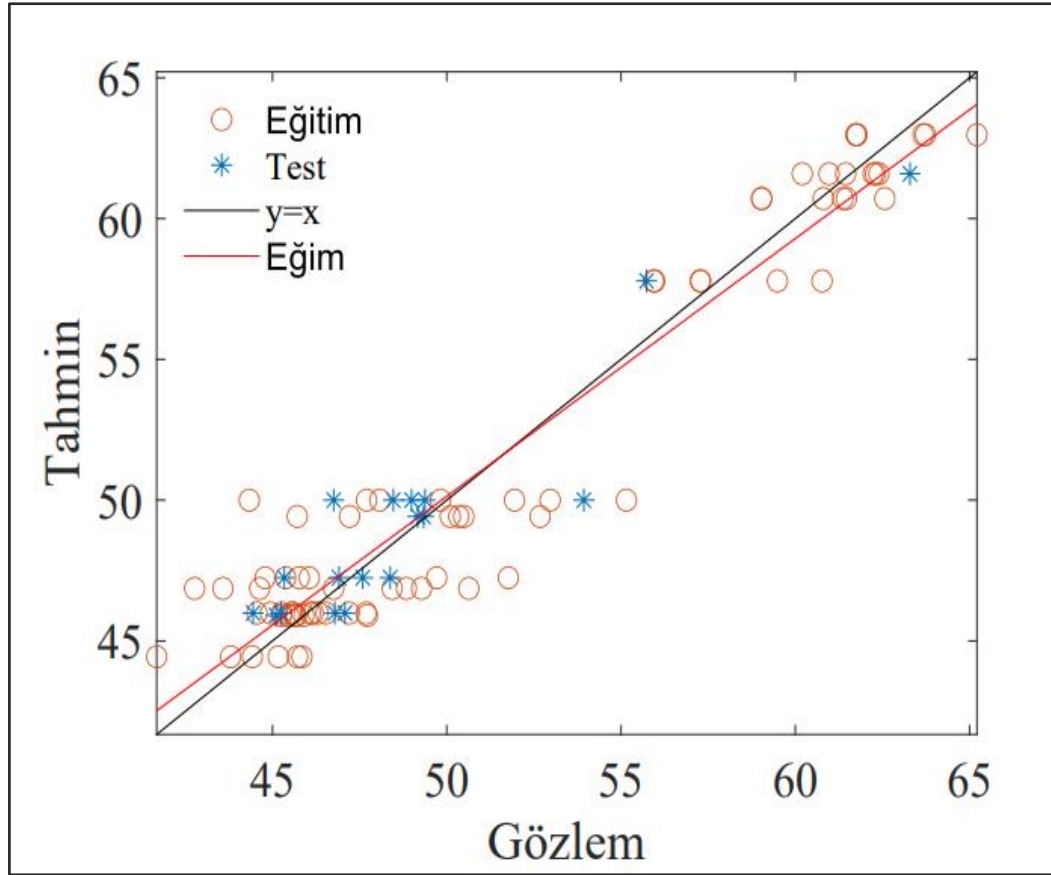
Şekil 5.6’ de grafiği üzerinde yoğunluk deneyinin Gaussian prosesi (GP) ile test ve analiz verileri grafiği verilmiştir. Buna göre girdiler maksimum yükseklik ve reaksiyon profili, çıktı yoğunluktur. Eğitim ve test verileri 80’e 20 olarak ayrılmıştır. $R^2=0,9516$ olarak tahminlenmiştir.

Kullanılan her iki metotta da tahminleme sonuçları $R^2=0,9518$ ve $R^2=0,9516$ olup, yoğunluk için yaklaşım doğruluğu yüksektir.

5.3. Darbe Mukavemetinin Modellemesi

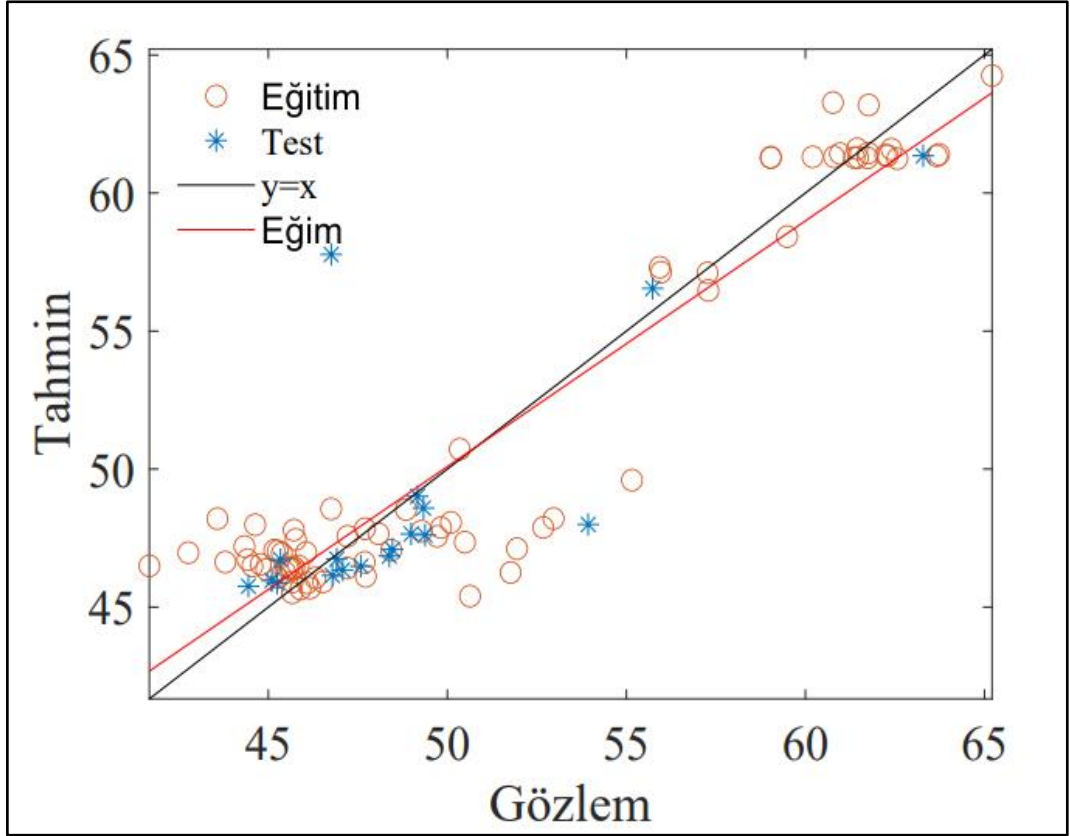
Bu analizde yoğunluk ve uzama verileri girdi parametre darbe mukavemeti ise çıktı parametre olarak tahminlenmeye çalışılmıştır. Yapay zekâ makine öğrenmesi yönteminin karar ağacı (DT) ve Gaussian prosesi (GP) metotları kullanılmıştır. Yoğunluk verisi gözenekli yapıya sahip açık hücreli serbest yükselme ile kürlenmesini tamamlayan köpüğün, birim kütlesine karşılık gelen hacmine oranıdır. Uzama, Zwick cihazı kullanılarak papyon kesilen örnek köpüklerin analizinden elde edilmiştir. Darbe

mukavemeti ise silindir içine yerleştirilen köpüğün üzerine bırakılan bilyenin geri gelme mesafesi üzerinden ölçümlenmesi analizidir. Tahminlemede kullanılan veriler Tablo 4.5 'de verilmiştir.



Şekil 5.7: Darbe Mukavemeti için DT yaklaşımı grafiği.

Şekil 5.7' de grafiği üzerinde Darbe mukavemetinin karar aracı metodu (DT) ile test ve analiz verileri grafiği verilmiştir. Buna göre girdi parametreler yoğunluk ve % uzama değeri olup, darbe mukavemeti ölçümlenmiştir. Eğitim ve test verileri 80'e 20 olarak ayrılmıştır. $R^2=0,8674$ olarak tahminlenmiştir.



Şekil 5.8: Darbe Mukavemeti için GP yaklaşımı grafiği.

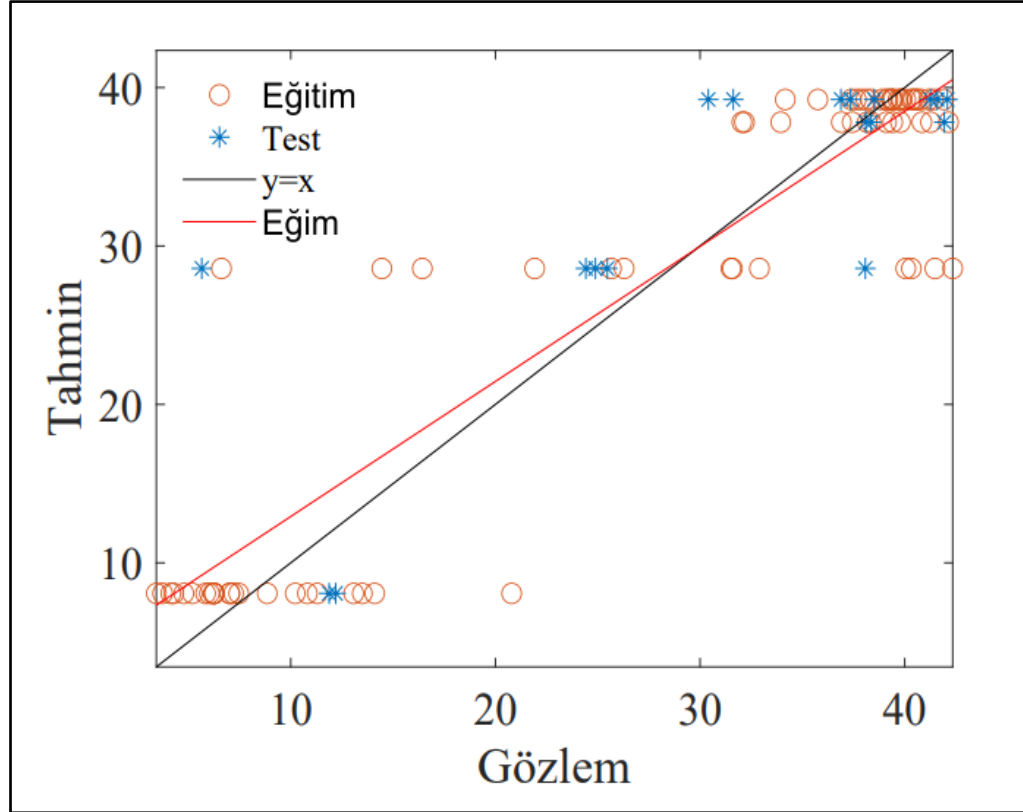
Şekil 5.8’ de grafiği üzerinde darbe mukavemeti deneyinin Gaussian prosesi (GP) ile test ve analiz verileri grafiği verilmiştir. Buna göre girdi parametreler yoğunluk ve % uzama değeri olup, darbe mukavemeti ölçümlenmiştir. Eğitim ve test verileri 80’e 20 olarak ayrılmıştır. $R^2=0,5036$ olarak tahminlenmiştir.

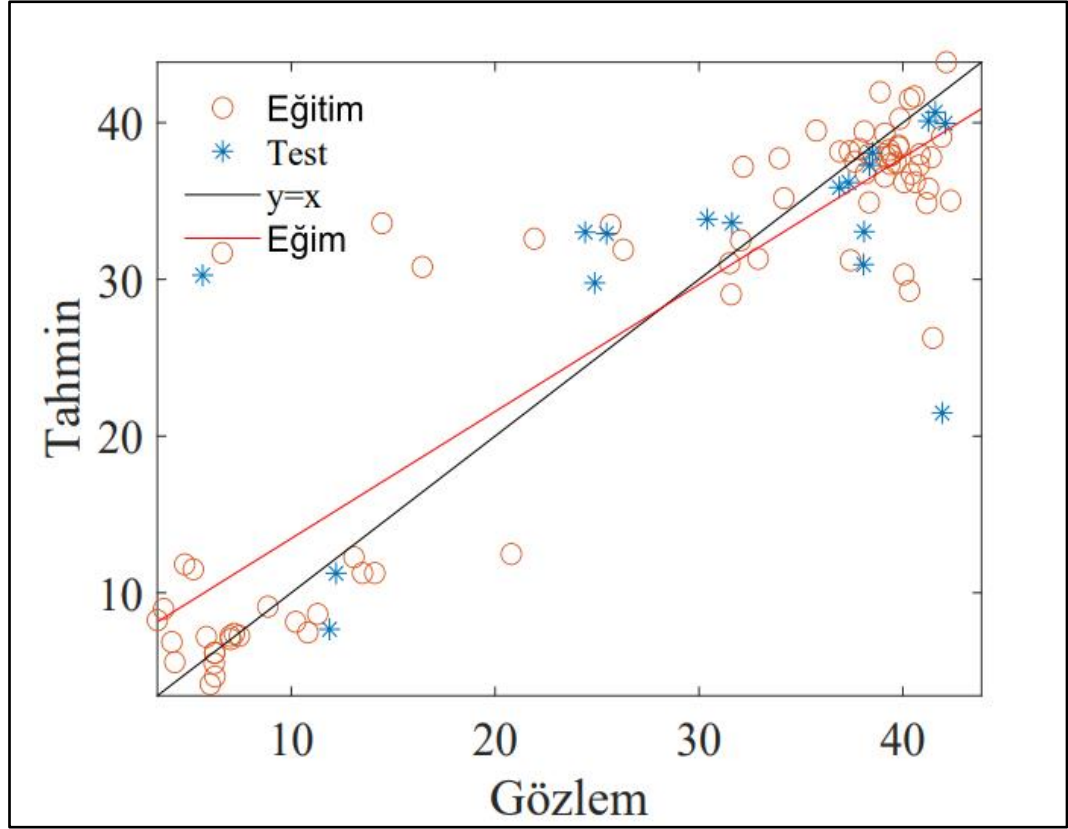
Kullanılan her iki metotta da tahminleme sonuçları sırasıyla karar ağacı metodu ile $R^2 = 0,8674$ ve Gaussian prosesi metodu ile $R^2 = 0,5036$ olup, darbe mukavemeti için karar ağacı metodu yaklaşımının doğruluk oranı daha yüksektir.

5.4. Sıkıştırma (%) Değerinin Modellemesi

Bu analizde yoğunluk, uzama ve darbe mukavemeti verileri girdi parametre Sıkıştırma tesisi (%) ise çıktı parametre olarak tahminlenmeye çalışılmıştır. Yapay zekâ makine öğrenmesi yönteminin karar ağacı (DT) ve Gaussian prosesi (GP) metotları kullanılmıştır. Yoğunluk verisi gözenekli yapıya sahip açık hücreli serbest yükselme ile kürlenmesini tamamlayan köpüğün, birim kütlesine karşılık gelen hacmine oranıdır. Uzama, Zwick cihazı kullanılarak papyon kesilen örnek köpüklerin

analizinden elde edilmiştir. Darbe mukavemeti, silindir içine yerleştirilen köpüğün üzerine bırakılan bilyenin geri gelme mesafesi üzerinden ölçülmesi analizidir. Sıkıştırma testi iki metal plaka arasına yerleştirilerek sıkıştırılan köpüklerin, farklı sıkıştırma oranları deformasyon değerlerinin orijinal formlarına kıyasla ölçülmesi ve analizi şeklindedir. Sıkıştırma oranları kullanım yerlerine göre yüzde 20 ila 60 arasında belirlenebilir. Tahminlemede kullanılan veriler Tablo 4.5 'de verilmiştir.





Şekil 5.10: Sıkıştırma testi için GP yaklaşımı grafiği.

Şekil 5.10' de grafiği üzerinde sıkıştırma testi deneyinin Gaussian prosesi (GP) ile test ve analiz verileri grafiği verilmiştir. Buna göre girdiler yoğunluk ve darbe mukavemeti, çıktı sıkıştırma test analizidir. Eğitim ve test verileri 80'e 20 olarak ayrılmıştır. $R^2 = 0,4147$ olarak tahminlenmiştir.

Kullanılan her iki metotta da tahminleme sonuçları sırasıyla karar ağacı metodu ile $R^2 = 0,6084$ ve Gaussian prosesi metodu ile $R^2 = 0,4147$ olup, sıkıştırma testi (%) için karar ağacı metodu yaklaşımının doğruluk oranı daha yüksektir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak üç girdi parametre kullanılarak tahminlemeler yapılmıştır.

Tablo 5.2: Makine öğrenmesi tahminleme ölçüm sonuçları.

Metotlar	R^2	İyileştirilmiş R^2	RMSE	Normalize RMSE	AAE
DT için D (kg/m^3)	0.9518	0.9454	1.0388	0.0408	0.0225
GP için D (kg/m^3)	0.9516	0.9452	1.0406	0.0410	0.0210
DT için B (%)	0.8674	0.8498	1.6242	0.0324	0.0259
GP için B (%)	0.5036	0.4374	3.1431	0.0651	0.0379
DT için C (%)	0.6084	0.5245	6.9484	0.9711	0.3536
GP için C (%)	0.4147	0.2893	8.4946	1.0451	0.3784

Tablo 5.2 'te verilen makine öğrenmesi tahminleme ölçüm sonuçlarında kullanılan metotların açıklamaları şu şekildedir. DT için D (kg/m³) yoğunluk için karar ağacı metodu, GP için D (kg/m³) yoğunluk için gaussan prosesi, DT için B (%) darbe mukavemeti için karar ağacı, GP için B (%) darbe mukavemeti için gaussan prosesi, DT için C (%) sıkıştırma için karar ağacı ve GP için C (%) sıkıştırma için gaussan prosesi metotları olarak verilmektedir.

Özetle deney adımları şu şekilde tanımlanabilir. İlk adım reçetelerin hazırlanması, köpüklerin üretilmesi ve 24 saat dinlendirilmesi, dinlenen köpüklerin kesilerek mekanik ve fiziksel denetler için numune hazırlanması, analizlerin yapılması, ölçülen verilerin denetimli makine öğrenmesi metodu ve uzama test yöntemi ile tahminlenmesi gerçekleşmiştir. Mevcut veriler değerlendirildiğinde yoğunluk için tahminleme yaklaşımı 0,95 üzerinde olup, bu veri ve % uzaman ile darbe mukavemet değeri karar ağacı metodu uygulandığında 0,87 'lik bir yaklaşımla doğru tahminleme yapabilmektedir. Gaussian prosesi (GP) metodu yoğunluk için paralel bir yaklaşım göstermiş olsa da darbe mukavemeti ve % sıkıştırma testleri için karar ağacı yaklaşımları daha başarılı sonuçlar vermiştir.

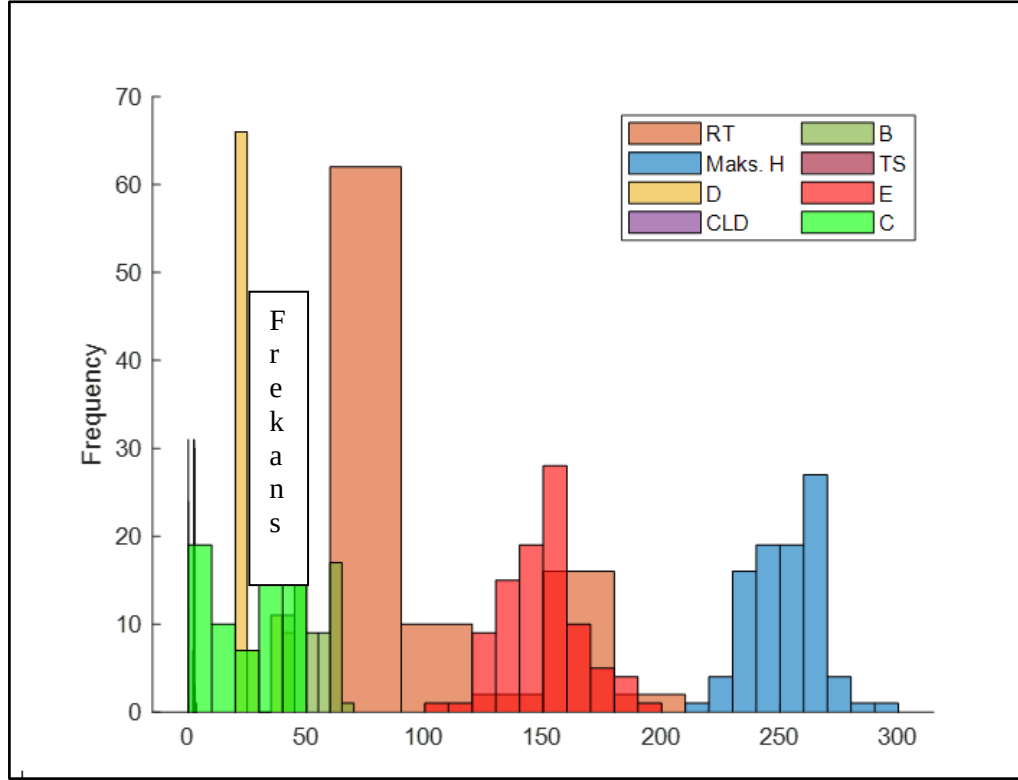
İlk tahminlemede maksimum yükseklik ve reaksiyon profili ile yoğunluk analiz edilmiştir. İkinci tahminlemede ilk tahminlemeden elde edilen yoğunluk ve uzama verisi girdi olarak kullanılarak darbe mukavemeti hesaplanmıştır. Sonrasında uzama, yoğunluk ve darbe mukavemeti girdi ile kullanılarak sıkıştırma % değeri hesaplanmıştır. Bu veriler slabstock üretim prosesi ve nihai ürünün ürün özelliklerini tahminlemede bu alanda zaman ve verimlilik kazanılmasını sağlayacaktır.

5.5. Korelasyon Grafikleri

Yapılan deneysel verilerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri Tablo 5.3 'te verilmiştir.

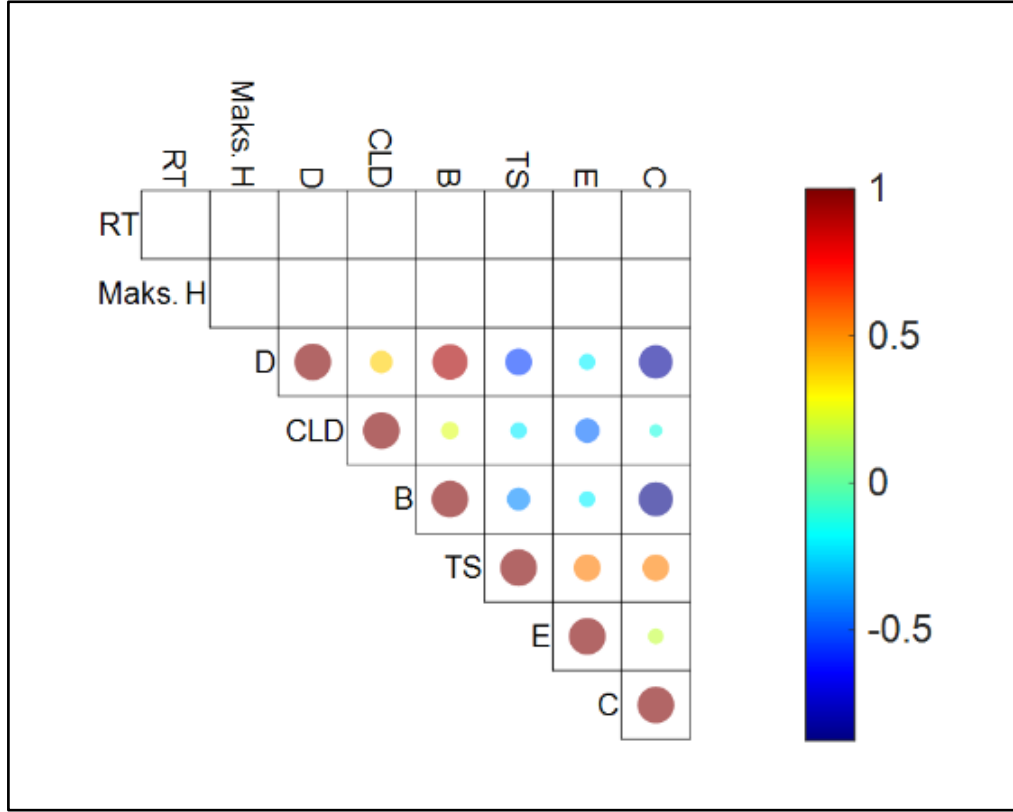
Tablo 5.3: Deney verileri ortalamaları.

Veri	RT(s)	Maks H (mm)	D(kg/m ³)	CLD (N)	B (%)	TS (Mpa)	E (%)	C(%)
MIN	69.3	198.1	20.0	2.0	41.7	0.1	100.8	3.4
MAKS	204.5	291.1	42.7	4.0	65.2	0.1	192.5	42.3
ORT	136.9	244.6	31.4	3.0	53.4	0.1	146.7	22.9



Şekil 5.11: Histogram doğrulama grafiği.

Histogram grafiği veri dağılımının sütun grafiğiyle gösterimidir [42]. Sürekli iyileştirme analizlerinde değişkenlik, kaynaklarının tanımlanması ve kontrol edilmesi adına önemli bir yaklaşımdır. Dağılımın şekli ve boyutu, gizli değişkenlik kaynaklarının tanımlanmasında yardımcı olur. Histogram, süreçteki istatistiksel değişkenliğin bir göstergesidir. Bu değişkenliğin tanımlanması adına histogram kullanılabilir, böylece sapma değişkenlik tanımlanarak verimlilik adına proses iyileştirmesi yapılmasına olanak sağlar [43].



Şekil 5.12: Pearson doğrulama grafiği.

Pearson Korelasyonu, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve derecesini ölçer. Mükemmel doğrusal ilişkide X teki her bir değişime karşılık Y de bir değişim mevcuttur. Korelasyon -1.00 veya $+1.00$ olur. Korelasyon grafiği verilerin geçerlik, güvenirlik ve teori doğrulaması için kullanılır [44].

Tüm veriler kullanılarak elde edilen Histogram ve Pearson korelasyon grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 'te verilmiştir. Histogram grafiğinde sıkıştırma testi bimodal dağılım gösterirken, diğer mekanik özellikler normal dağılım göstermişlerdir. Pearson grafiğinde reaksiyon profili ve maksimum yükseklik dışındaki mekanik ölçüm sonuçları mükemmel doğrusal ilişkiye yakın sonuçlar vermiştir. Maksimum yükseklik ve reaksiyon profili hiçbir mekanik parametreyi etkilemediğinden korelasyon çıkmamıştır.

6. YORUMLAR

Bu çalışmada makine öğrenmesi kontrollü ölçüm metodu ile laboratuvar ortamında üretilen poliüretan esnek köpüklerin uzama, darbe dayanımı, yoğunluk, maksimum yükselme ve reaksiyon profili ilişkisi gibi bazı özelliklerin analizi yapılmıştır.

Metot olarak denetimli makine öğrenmesinin Gausssan prosesi ve Karar ağacı yöntemleri kullanılmış ve testlerin ölçümlemesinde ise uzama deneyinin 80-20 oranında değerler analiz edilmiştir.

Analizlerde çalışmalar esnek köpükler için yapılmıştır. Polieter bazlı polioller ile TDI bazlı izosiyanat kullanılmıştır. Reçetede hem amin hem metal katalizör kullanılmıştır. Silikon TDI uyumlu olarak seçilmiştir. Hem fiziksel hem de kimyasal kabarma ajanları kullanılmıştır. Reçeteleri hazırlanan numuneler önce foamat cihazında reaksiyon profili analizi yapılmış, sonrasında maksimum yükseklik ölçülmüştür, Maksimum yükseklik köpüğün yoğunluğuna ilişkin bilgi vermektedir.

Eğer bir köpüğün yoğunluğu istenen değerden düşük ise bunun anlamı hücre stabilitesi sağlanamamış ve hücreler zamanla küçülmeye başlayacaktır, bu da nihai üründe deformasyon bozukluklarına ve çekmelere neden olur. Çekme köpükte hemen olabileceği gibi zamanlarda da gözlemlenebilmektedir. Endüstride yoğunluk önemli bir parametredir. Maksimum yükseklikte yoğunluk dağılımına ilişkin bilgi verir. Poliüretan neme duyarlı bir yapıya sahip olduğundan havadaki nem ile de reaksiyona girebilmektedir. Bunun olması da yoğunluk ve maksimum yükseklikte sapmalara neden olur. Yükseklik arttıkça köpük çekirdek yoğunluğu azalacaktır. Her uygulama için farklı asgari yoğunluk hedefi vardır. Bu sebeple çalışmalarda yoğunluk analizi için reaksiyon suresi ve maksimum yüksekliği girdi parametre olarak kullanarak makine öğrenmesi ile yoğunluk tahmininde bulunduk. Analizlerde kullanılan her iki yöntem içinde doğruluk yaklaşımı 0.95 üzerindedir.

Daha sonra endüstride önemli olan ve ürünün fiziksel davranışına ilişkin bilgi alabileceğimiz darbe mukavemeti analizini makine öğrenmesi yöntemiyle geliştirdik. Darbe mukavemeti sonucu özellikle esnek köpüklerde nihai kullanıcıya konfor sağlayan bir parametredir. Örneğin medikal yastık ve yataklar, koltuk ve sandalye gibi ürünler için bu değer önemlidir. Çalışmalar neticesinde yoğunluk ve % uzama verisini

girdi olarak kullanarak karar ağacı yönteminde darbe mukavemeti için en iyi sonuçları aldık. Yaklaşım oranı 0,86 dolaylarındadır.

Üçüncü deneyimiz sıkıştırma oranını, uzama, yoğunluk ve darbe mukavemeti değerlerini girdi olarak kullanarak tahminlemeye çalıştık. Bu değer esnek köpüğün zamana bağlı deformasyonu ya da boyutsal stabilitesinin bir ölçütü olarak değerlendirilebilir. Yaklaşım oranı karar ağacı yöntemiyle 0,60 olarak ölçülmüştür. Bu deney, diğer deneylere kıyasla en uzak yaklaşım sonucunu vermiştir.

Analizi yapılan tüm veriler yapay zekâ tabanı üzerinde tanımlanarak verilerin islenmesi ve ölçülen değerlerin verilerin iki ya da üç girdi parametreyi referans azalarak tahminlemesi beklenmiştir.

Özetle yapılan ölçümler sonucunda reaksiyon profili ve yükseklik ile yoğunluk tahmini yapılması, yoğunluk ve uzama girdi parametreleri üzerinden darbe dayanımı (ballrebound), yoğunluk ve sıkıştırma % verisi girdileri üzerinden yine darbe dayanımı değeri tahminlenmeye çalışılmıştır. Yaklaşık yüz veri üzerinden yapılan çalışmalar sonucunda yoğunluğun %94 olasılıkla her iki algoritmada doğru tahminlenebildiği analiz edilmiştir. Analiz edilen bu veri üzerinden tahminlenen yoğunluk değeri girdisi ile darbe mukavemetine ilişkin yaklaşımda bulunulabildiği gözlemlenmiştir. Veri miktarı arttıkça sonuçların daha başarılı olacağı öngörülmektedir.

Bu metot ile, özellikle seri üretim proseslerinde üretilen esnek köpüklerin örneğin yatak süngerleri ve medikal yastık, yatak gibi üretimlerde, reaksiyon profili ve yükseklik ile yoğunluk dağılımı tahminlenebilir. Ayrıca darbe dayanımı ve uzama ya da deformasyona karşı kararlılık değerleri tahminlenebilir.

Zamana bağlı sıkıştırma yüzdesi metodu ile ölçümleme 22 saat ila 48 saat arasında gerçekleşebilir. Yapay zekâ yöntemleri ile zamanı daha verimli kullanarak, nihai ürünlerin mekanik özellikleri adına yaklaşımda bulunulabilir.

Yapay zekâ yöntemlerinin poliüretan uygulamaları için de kullanımının yaygınlaştırılması ve endüstri hayatının kolaylaştırılması mümkün kılınabilir. Poliüretanın diğer uygulama alanlarında da makine öğrenmesi metodu ile mekanik özelliklerin tahminlenmesi; üretilmesi ve geliştirilmesi sağlanabilir.

7. TARTIŞMA ve ÖNERİ

Poliüretan, sıvı bir kimyasal formun ekzotermik bir kimyasal reaksiyonu sonucunda katı formuna dönüşerek dünyada birçok sektörde yaygın kullanımı olan bir polimer türüdür. Termoplastik ve termoset yapıları bulunmaktadır. Diğer polimer türlerine göre hafif ve düşük maliyetli tasarlanabileceği gibi, kimyasallara ve hidrolize dayanıklı veya yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere kazandırılmak suretiyle formülize edilebilir. Bu özgürlük, bu ürün grubunu gelecekte tercih edilen bir konuma taşımaktadır. Birçok market araştırması, bu ürün grubunun 2030 yılına kadar tüketiminin artacağını ifade etmektedir. Bu da bu yöndeki akademik ve ticari araştırmaların geliştirilmesi ve yapılacak gelecek yatırımlar adına ipuçları vermektedir.

Makine öğrenmesi ve bilgisayar tabanlı algoritmaların geliştirilmesine yönelik çalışmalar geleceğe yönelik yükseliş trendindedir. Büyüyen veri bilimi alanının önemli bir bileşeni olan makine öğrenmesi, istatistiksel metotların kullanımı yoluyla sınıflandırmalar, algoritmalar, tahminler yapmak ve veri kaynaklarının projelerindeki önemli kabul edilen noktaları belirlemek ve ortaya çıkarmak için eğitilir. Bu veri kaynakları daha sonra uygulamalar ve işletmelerde karar alma sürecini yönlendirerek temel büyüme ölçümlerini pozitif yönde ve ideal olarak etkiler. Veri bilimcilerle yönelik pazar talebi, büyük veri genişlemeyi ve büyümeyi sürdürdükçe artacaktır. En ilişkili iş sorularını ve bunları yanıtlayacak verileri yapay zekâ kullanımı aracılığıyla belirlemeye yardımcı olmaları beklenecektir.

Literatürde makine öğrenmesi metotları kullanılarak yapılan poliüretan çalışmalarda genel olarak daha kararlı hücre yapıları içeren sert köpük uygulamaları ve elastomerler adına çalışmalara rastlanmıştır. Bunun dışında makine öğrenmesi kullanılmadan esnek köpüğün fiziksel ve mekanik özelliklerinin öngörülmesinin nispeten diğer sistemlere nazaran daha güç olduğundan analizler için ampirik metotların geliştirilmesi, bu alanda matematiksel modelleme çalışmalarının yapıldığı görülmüştür. Ayrıca üretimde özellikle kontinü sistemler için zaman ve maliyet verimlilikleri adına çalışmalara rastlanmıştır.

Bu bilgiler ışığında özellikle esnek köpükler için makine öğrenmesi metotlarının geliştirilmesi, üretim ve proses iyileştirilmesine yönelik çalışmaları yapay zekâ yöntem ve farklı metotları denenerek çalışmalar genişletilebilir. Bu çalışma için de daha fazla girdi veri daha fazla yakın tahminleme yapabilme olanağı sağlayacaktır.

Makine öğrenmesi çalışmalarında girdi veri sayısının miktarı ne kadar fazla ise, sonuçlar o denli daha yakın tahminlenecektir. Bu alandaki çalışmalar genişletilebilir.

Ayrıca bu çalışmada her bir çıktı diğer sistemin girdi parametresi olarak kullanılmış ve bu şekilde ölçümler yapılmıştır. Zincirleme ilerlettiğimiz modelleme akışı karar ağacı metodunda en başarılı sonucu vermiştir. Bu örneklemeden yola çıkılarak rijit ve elastomer köpükler içinde benzer çalışmalar yapılması ve gelecekte bu ürün grupları içinde benzer bir modellemelerin yapılması sağlanabilir.

Bu çalışma nihai ürün üreticileri, sistem evleri, hammadde üreticileri için poliüretan uygulama alanlarındaki geliştirmelerin, makine öğrenmesi ve yapay zekâ algoritmalarının kullanımını arttırarak uygulanmasına ve kaynak veri sağlanması adına rehber niteliğinde olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2023), <https://www.sap.com/turkey/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html> , (Erişim Tarihi: 14/6/2023).
- [2] Schubert M., Klausler O., (2019), “Applying machine learning to predict the tensile shear strenght of bonded beech wood as a function of the composition of polyurethane prepolymers and various pretreatments”, World Science and Technology (2020) 54:19–29.
- [3] Aditya M., James A., Thompson C., Newell R.W., (2019), “Hierarchical Machine Learning Model for Mechanical property Predictions of Polyurethane Elastomers From Small Datasets”, Frontiers in Materials 2019.
- [4] Antony P.J., Jnanesh N.A., Prajna M.R, (2016), “Machine learning models for material selection”, 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT).
- [5] Allibhai E., (2018), “Building an Ensemble Learning Model Using Scikit-learn”, Toward Data Science. (2018).
- [6] Josef A. Pugar., Christopher M. Childs., Christine Huang., Karl W. Haider., Newell R.Washburn.,(2020), “Elucidating the physicochemical basis of the glass transition temperature in linear polyurethane elastomers with machine learning ”, The Journal of Physical Chemistry B, J. Phys. Chem. B 2020, 124, 9722–9733.
- [7] Yücel Ö., Mutlu A.Y., (2018), “An Artifical intelligient based approch to predicting syngas composition for downdraft biomass gasification”, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Elsevier (2018), Energy 165 (2018) 895e901.
- [8] Elmaz F., Yücel Ö., Mutlu A.Y., (2020), “Makine Öğrenimi Tabanlı Regresyon yöntemiyle biyokütle gazlaştırmanın tahmine dayalı modellenmesi”, Elsevier. (2020), Cilt 191, 15 Ocak 2020, 116541.
- [9] Kailaj X., Tartakovsky M.A., Burghardt J., Darve E., (2021), “Learning viscoelasticity models from indirect data using deep neural networks , Elsevier Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 387 (2021) 114124.
- [10] Zeydan M., (2020), “Potimization of Flexible Polyurethane Foam Harrdness by Reducing Process Variance”, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences (2020) 38 (4) 2020, 1851-1867.
- [11] Coste G., Benrne D., Ladmiral V., Negrell C., Caillol S., (2022), “Non-isocyanate

- polyurethane foams based on six-membered cyclic carbonates”, *European Polymer Journal* 176 (2022) 111392.
- [12] Abdullah M., Ramtani S., Yagoubi N., (2023), “Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers”, *Elsevier, Results in Engineering* 19 (2023) 101237.
- [13] Yang C., Ma W., Zhang J., Zhang Z., (2021) “Comparative Study of Machine Learning Approaches for Predicting Creep Behavior of Polyurethane Elastomer”, *Nanjing University of Science and Technology Universities, Polymers* 2021, 13(11), 1768.
- [14] Shivakumar D.N, Deb A., (2022), “Depence of the mechanical properties of rigid PU foam on density”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 41(9-10).
- [15] Guelcher S, Srinivasan A, Hafeman A, (2007), “Synthesis, in vitro degradation, and mechanical properties of two-component poly(ester urethane)urea scaffolds: effects of water and polyol composition”, 13(9): 2321–2333.
- [16] Lifshitz JM. “Some mechanical properties of rigid polyurethane structural foam”. *Polym Eng Sci* 1983; 23(3): 144–154.
- [17] Ozturk U.E, Anlas G., (2009), “Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams.”, *Mater Des* 2009; 30(1): 15–22.
- [18] Rao P.N., Hofer K.E., (1971), “Mechanical behavior of flexible polyurethane foams under high-rate loading”, *Journal Materials* 1971; 6(3): 704.
- [19] Patel P.S, Shepherd D.E, Hukins D.W, (2008), “Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous bone”, *BMC Musculoskelet Disord* 2008; 9(1): 137.
- [20] Liu Q and O’Toole B., (2007), “Behavior pattern and parametric characterization for low density crushable foams.” *Journal Materials Processing Technology* 2007; 191(1–3): 73–76.
- [21] Saint-Michel F, Chazeau L, Cavaille J-Y, (2006), “Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. Effect of the density”. *Composites Sci Technol* 2006; 66(15): 2700–2708.
- [22] Kim Y., Kang S., (2003), “Development of experimental method to characterize pressure-dependent yield criteria for polymeric foams”. *Polym Testing* 2003; 22(2): 197–202.
- [23] Saha M.C, Mahfuz H, Chakravarty U.K, (2005), “Effect of density,

- microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams.”
Mater Sci Eng A 2005; 406(1–2): 328–336.
- [24] Hinckley W.M., Yang J.C.S. (1975), “Analysis of rigid polyurethane foam as a shock mitigator.” Exp Mech 1975; 15(5): 177–183.
- [25] Kabakçı E., (2015), “Sert poliüretan köpük üretim süreç parametrelerinin mikroyapı gelişimi ve köpük özelliklerine etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi.
- [26] Eroğlu A.R., (2008), “Yüksek koruyucu kaplamalarda akrilik-poliüretan reçinelerin kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [27] Szycher, M., “Szycher's Handbook of Polyurethanes”, (2. baskı), New York: CRC Yayınları, (1999).
- [28] Westhues M., “Polyurethanes Coating, Adhesives, and Sealants”, (2. baskı), Ultrich: European Coatings tech files, (2007).
- [29] Web 2, (2023), <https://www.safirabeds.com/post/pu-foam-explained> (Erişim Tarihi: 25/06/2023).
- [30] Sonnens M.F., “Polyurethanes Science, Technology, Markets and Trends”, Wiley Yayınları, (2014).
- [31] Aneja A., (2002), “Structure-Property Relationships of Flexible Polyurethane Foams”, Doktora tezi, Virginia Polytechnic Institute and State Üniversitesi.
- [32] Çavuşoğlu F., (2019), “Atık PET ara ürünlerinden üretan modifiye alkid reçinesi üretimi”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [33] Tuğçe, Y. Ü. C. E., & Kabak, M. (2021), “Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Detay Üretim Alanları İçin İş Merkezi Kırılımında Üretim Süresi Tahminleme,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 37(1), 47-60.
- [34] Web 3, (2023), <https://kimpur.com/tr/poliuretan-nedir/>, (Erişim Tarihi: 05/07/2023).
- [35] Web 4, (2023), <http://www.qualityfoam.com/polyurethane-glossary.asp>, (Erişim Tarihi: 25/06/2023).
- [36] Web 5, (2023), <https://www.ibm.com/topics/machine-learning> (Erişim Tarihi: 05/07/2023).
- [37] Rasmussen C. E., Williams C. K. I., (2006), “Gaussian Processes for Machine Learning”, the MIT Press, (2006), ISBN 026218253X. Massachusetts Institute of Technology.
- [38] Rasmussen E.C., (2022), “Gaussian Processes in Machine Learning”, German

Research Council (DFG), RA 1030/1.

- [39] Rasmussen C. E., Hannes N., (2010), “Gaussian Processes for Machine Learning (GPML) Toolbox”, Journal of Machine Learning Research 11 (2010) 3011-3015.
- [40] Wang J., (2022), “An Inuitive Tutorial to Gaussian Processes Regression”, Elsevier, arXiv:2009.10862v4 [stat.ML].
- [41] Web6,(2023),<https://apmonitor.com/pds/index.php/Main/GaussianProcessRegression#>, (Erişim Tarihi: 25/06/2023).
- [42] Web 7, (2023), https://yunus.hacettepe.edu.tr/~dcaktan/EBB629_sunuc/chapter15_regresyon_korelasyon.pdf (Erişim Tarihi: 25/08/2023).
- [43] Web 8, (2023), <https://yalin-dunya.com/2020/06/10/histogram-nedir-histogram-nasil-yorumlanir/> (Erişim Tarihi: 25/08/2023).
- [44] Web 9, (2023), <https://www.maarifcedid.com/makalegoster/2996/matplotlib-kutuphanesiyle-histogram-grafik-cizimi> (Erişim Tarihi: 25/08/2023)
- [45] Web 10, (2023), <https://www.format-messtechnik.de/products.html>, (Erişim Tarihi: 05/07/2023).
- [46] Web 11, (2023), <https://www.zwickroell.com/tr/ueruenler/darbe-testine-ait-ueruenler/>, (Erişim Tarihi: 05/07/2023).
- [47] Web 12, (2023), <http://www.directindustry.com/prod/bareiss/product-13751-2300789.html>, (Erişim Tarihi: 05/07/2023).
- [48] Schmidt R.S., (2009), “Nasa pressure-relieving foam technology is keeping the leadaing innerspring matters firms awake at night”,Elsevier Technovation 29 (2009) 181–191.
- [49] Web 13, (2023), <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/polyurethane-resin-adhesives> (Erişim Tarihi: 01/09/2023).
- [50] Sevim H., (2018), “Doğal kaynaklı poliol içeren poliüretanların hazırlanması ve özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi.
- [51] Kaushiva B.D., McCartney S.R., Rossmly G.R., Wilkes G.L, (1999), “Surfactant level influences on structure and properties of flexible slabstock polyurethane foams”, Volume 41, Issue 1, January 2000, Pages 285-310.

ÖZGEÇMİŞ

Zeynep ÇETİN, 2006 yılında Ege Üniversitesi Kimya bölümünü, 2011 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünü başarıyla tamamlayarak 2013 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında başladı.

Profesyonel iş hayatına ise 2011 yılında Mikrosan Makine ve Kalıp Sanayi A.Ş. firmasında AR-GE Laboratuvarı Sorumlusu olarak başladı. Sonrasında sırasıyla 2015 yılında Kimpur Poliüretan firmasına AR-GE Laboratuvarı Sorumlusu, 2018 yılında Ravago Petrokimya Üretim firmasında AR-GE Lideri olarak devam etti. Son olarak 2023 yılında başladığı Mol Grup firmasının ARGE departmanında Poliol Geliştirme ve Teknik Destek Uzmanı olarak çalışmalarına devam etmektedir.

Günümüze kadar “Polimer Kimyası” ve “Ekstrüzyon prosesi” üzerine çalışmalar ve projeler yürütmüş, bu alanlarda tecrübe kazanmıştır. ARGE çalışmalarını sürdürülebilirlik, re-cycle ürünler ile proses ve üretimde enerji verimliliği üzerine devam ettirmektedir.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

ÇETİN Z., Yücel Ö., (2023), “The production and improvement of mechanical properties of polyurethane with artificial intelligence method”, UMTEB International scientific research congress-XIII.