



**ODUN POLİMER KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİNDE
YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANIMI**

**2024
DOKTORA TEZİ
ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

MUSTAFA ALTAY EROĞLU

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Suat ALTUN**

**ODUN POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİNDE YAPAY SİNİR AĞLARININ
KULLANIMI**

MUSTAFA ALTAY EROĞLU

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Suat ALTUN

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Temmuz 2024

Mustafa Altay EROĞLU tarafından hazırlanan “ODUN POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİNDE YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANIMI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Suat ALTUN

.....

Tez Danışmanı, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Orman Endüstri Mühendisliği Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 05/07/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Suat ALTUN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hüseyin YÖRÜR (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU (DÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Şeref KURT (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Deniz AYDEMİR (BÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa Altay EROĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

ODUN POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİNDE YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANIMI

Mustafa Altay EROĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Suat ALTUN

Temmuz 2024, 114 sayfa

Bu tez çalışması, odun polimer kompozitlerin üretiminde, üretim parametrelerine bağlı olarak elde edilecek malzemenin mekanik özelliklerinin yapay sinir ağları (YSA) modeli kullanılarak, tahribatlı muayene yapılmadan, çok daha hızlı ve düşük maliyetle tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada odun polimer kompozitlerin bazı mekanik özellikleri YSA yöntemiyle modellenmiş ve yüksek doğruluk oranı ile tahmin edilmiştir. Bu kapsamda çalışma başlıca iki bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlere yönelik literatür araştırması yapılarak modelde kullanılacak girdi ve çıktı değişkenleri belirlenmiştir. Literatürde sıkça incelenen mekanik özelliklerin eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci olduğu; bu özellikleri etkileyen faktörlerin polimer çeşidi, dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu ve

bağlayıcı ajan kullanımı olduğu tespit edilmiştir. Polimer olarak düşük maliyeti ve işleme kolaylığı nedeni ile yüksek yoğunluklu polietilen (high density polyethylene (HDPE)), düşük yoğunluklu polietilen (low density polyethylene (LDPE)) ve polipropilen (PP) polimerlerinin sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiş, dolayısıyla da bu üç polimerin kullanıldığı 56 farklı çalışmadan elde edilen girdi parametreleri ile çıktı değerleri baz alınarak her bir mekanik özellik için YSA modelleri geliştirilmiş ve bu sayede daha gerçekçi tahminler yapılması amaçlanmıştır. YSA modellerinin güvenilirliğini belirlemek için daha önce modelin eğitimi ve testinde yer almayan girdi parametreleri kullanılarak çıktı değerleri tahmin edilmiştir. Aynı girdi parametreleri baz alınarak test numuneleri üretilmiş ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin üretiminde piyasada da yaygın olarak kullanılan polimerlerden HDPE, bağlayıcı ajan olarak maleic anhydride aşıllı polietilen (PE-g-MA) ve dolgu malzemesi olarak sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) tercih edilmiştir. Deneylerden ve YSA modellerinden elde edilen sonuçlar kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve belirlilik katsayısı (R^2) değeri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. YSA modelleri ile çekme direnci için 0,943 ve üzerinde, çekmede elastikiyet modülü için 0,972 ve üzerinde, eğilme direnci için 0,976 ve üzerinde ve eğilmede elastikiyet modülü için 0,971 ve üzerinde belirlilik katsayısı değerleri elde edilmiştir.

İkinci bölümde ise polimer olarak piyasada son yıllarda üretim hacmi genişleyen ve çevre dostu bir polimer olarak değerlendirilen polilaktik asit (PLA) matrisli odun polimer kompozitinin mekanik özelliklerinin tahmininde birinci bölümde başarılı sonuçlar alınan YSA modeli kullanılmıştır. Görece olarak yeni bir polimer olan PLA üzerine çok sayıda çalışma olmakla beraber, odun polimer kompoziti kapsamında yapılmış çalışma sayısı sınırlıdır. Bu nedenle de modelde kullanılan veriler deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. PLA, dolgu malzemesi olarak sarıçam ve bağlayıcı ajan olarak maleik anhidrit modifiye etilen elastomer kullanılmıştır. Girdi parametreleri olarak dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu ve bağlayıcı ajan oranı dikkate alınarak (4x4x3) tam faktöriyel olacak şekilde 48 farklı grup numune üretilmiştir. Numunelerin eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci değerleri elde edilmiş ve bu değerler YSA’da modellenerek modellerin performansları değerlendirilmiştir. YSA modelleri ile çekme direnci gruplarının 44’ünde 0,900 ve üzeri, çekmede elastikiyet

modülü gruplarının 1 grup hariç hepsinde 0,900 ve üzeri, eğilme direnci gruplarının 3 grup dışında 0,900 ve üzeri, eğilmede elastikiyet modülü gruplarının 44'ünde 0,900 ve üzeri ve darbe direnci gruplarının ise 42'sinde 0,900 ve üzeri belirlilik katsayısı (R^2) değerleri elde edilmiştir.

Her iki bölümde de elde edilen RMSE, MAPE ve R^2 değerleri dikkate alındığında YSA modellerinin performanslarının yüksek olduğu dolayısıyla odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Yapay sinir ağları, odun polimer kompozit, mekanik özellikler, HDPE, PLA, MAPE.

Bilim Kodu : 120403

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

MODELING OF MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Mustafa Altay EROĞLU

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Forest Industrial Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Suat ALTUN

July 2024, 114 pages

This thesis aims to predict the mechanical properties of the material to be obtained depending on the production parameters in the production of wood polymer composites by using artificial neural networks (ANN) model, without destructive testing, much faster and at low cost. In this study, some mechanical properties of wood polymer composites were modeled by ANN method and predicted with high accuracy. In this context, the study mainly consists of two parts.

In the first part, a literature review on the factors affecting the mechanical properties of wood polymer composites was conducted and the input and output variables to be used in the model were determined. The most studied mechanical properties in the literature are tensile strength, modulus of elasticity in tensile, flexural strength, modulus of elasticity and impact resistance, and the factors affecting these properties are polymer type, filler type, filler mixture ratio, filler particle size and use

of coupling agent. It has been determined that high density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE) and polypropylene (PP) polymers are frequently used as polymers due to their low cost and ease of processing. Therefore, ANN models were developed for each mechanical property based on the input parameters and output values obtained from 56 different studies using these three polymers, and thus ANN models were developed for each mechanical property, and it was aimed to make more realistic predictions. To determine the reliability of ANN models, output values were estimated using input parameters that were not previously included in the training and testing of the model. Based on the same input parameters, test specimens were produced, and mechanical tests were performed. HDPE, one of the polymers widely used in the market, maleic anhydride grafted polyethylene (PE-g-MA) as coupling agent and scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as filler material were preferred in the production of test specimens. The results obtained from the experiments and ANN models were compared by considering root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE) and coefficient of determination (R^2) values. With ANN models, coefficient of determination values of 0,943 and above for tensile strength, 0,972 and above for modulus of elasticity in tensile, 0,976 and above for flexural strength and 0,971 and above for modulus of elasticity were obtained.

In the second part, the ANN model, which obtained successful results in the first part, was used to predict the mechanical properties of polylactic acid (PLA) matrix wood polymer composite, which has expanded its production volume in the market in recent years and is considered as an environmentally friendly polymer. Although there are many studies on PLA, which is a relatively new polymer, the number of studies on wood polymer composite is limited. Therefore, the data used in the model were obtained from experimental studies. PLA, scots pine as filler and maleic anhydride modified ethylene elastomer as coupling agent were used. Considering the filler mixture ratio, filler particle size and coupling agent ratio as input parameters, 48 different groups of specimens were produced as (4x4x3) full factorial. Tensile strength, modulus of elasticity in tensile, flexural strength, modulus of elasticity and impact resistance values of the specimens were obtained, and these values were modeled in ANN and the performances of the models were evaluated. With ANN models, coefficient of determination (R^2) values of 0,900 and above were obtained in

44 of the tensile strength groups, 0,900 and above in all but 1 group of the modulus of elasticity in tensile groups, 0,900 and above in all but 3 groups of the flexural strength groups, 0,900 and above in 44 of the modulus of elasticity groups and 0,900 and above in 42 of the impact resistance groups.

Considering the RMSE, MAPE and R^2 values obtained in both parts, it has been determined that the performance of ANN models is high, and therefore can be used successfully in predicting the mechanical properties of wood polymer composites.

Key Word : Artificial neural networks, wood polymer composite, mechanical properties, HDPE, PLA, MAPE.

Science Code : 120403

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübeleri ile zorlandığım noktalarda bana yol gösteren sayın hocam Prof. Dr. Suat ALTUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

YSA modellerinin geliştirilmesine katkı sunan değerli hocalarım Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ, Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU ve Doç. Dr. Serhat DUMAN'a ve tez izleme komitesi toplantılarındaki pozitif eleştirileri ile tezin bilimsel içeriğini arttıran sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin YÖRÜR'e teşekkür ederim.

Tezin laboratuvar sürecinde yardımlarını eksik etmeyen Atageldi MURADOV ve Yahya SERKA'ya teşekkür ederim.

Tez sürecinde manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Öğr. Gör. Dr. Hülya Özçağlar EROĞLU'na, canım oğlum Umut EROĞLU'na ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezine, KBÜBAP-22-DS-133 kodlu proje desteği için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
GENEL BİLGİLER	5
2.1. KOMPOZİT MALZEME	5
2.1.1. Kompozitlerde Kullanılan Ana Faz (Matris) Malzemeleri	7
2.1.2. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları.....	8
2.1.3. Kompozitlerin Sınıflandırılması	9
2.2. ODUN POLİMER KOMPOZİTLER.....	10
2.2.1. Odun Polimer Kompozit Üretim Teknolojisi	11
2.2.1.1. Ekstrüzyon Yöntemiyle Odun Polimer Kompozit Üretimi.....	12
2.2.1.1.1. Tek Vidalı Extruder Makineleri.....	13
2.2.1.1.2. Çift Vidalı Extruder Makineleri.....	14
2.2.1.2. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Odun Polimer Kompozit Üretimi	16
2.2.1.3. Basınçlı Kalıplama ile Odun Polimer Kompozit Üretimi.....	17
2.2.2. Odun Polimer Kompozitler İle İlgili Yapılmış Çalışmalar	18

	<u>Sayfa</u>
2.3. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)	22
2.3.1. Normalizasyon İşlemi	29
2.3.2. YSA'nın Avantaj ve Dezavantajları.....	29
 BÖLÜM 3	 31
MATERYAL VE METOD	31
3.1. MATERYAL.....	32
3.1.1. Kimyasal Malzemeler	32
3.1.2. Odun Unu	35
3.2. METOD	36
3.2.1. Odun Polimer Kompozitlerin YSA Modellerinin Oluşturulması	37
3.2.2. Odun Polimer Kompozitlerin YSA Modellerinin Tahmin Performanslarının Belirlenmesi.....	42
3.2.3. Test Numunelerinin Hazırlanması	43
3.2.4. Mekanik Testler	47
3.2.5. PLA-Odun Kompozitlerinin YSA Modelleri	51
3.2.6. Mekanik Testler	55
3.2.7. PLA-Odun Kompozitlerin YSA Modellerinin Oluşturulması.....	55
 BÖLÜM 4	 58
BULGULAR	58
4.1. ODUN POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YSA İLE MODELLENMESİ	58
4.2. YSA MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANSI (GÜVENİLİRLİĞİ) ..	66
4.3. PLA-ODUN KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YSA İLE MODELLENMESİ	72
 BÖLÜM 5	 94
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	94
KAYNAKLAR.....	97
 EK AÇIKLAMALAR A.	 111

	<u>Sayfa</u>
YSA MODEL PARAMETRELERİ VE YSA TAHMİNİNDE KULLANILAN MATLAB KODLARI.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	114



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Şematik olarak kompozit malzemenin bileşenleri.....	5
Şekil 2.2. Ekstrüzyon yöntemi ile odun polimer kompozit üretimi.....	12
Şekil 2.3. Tek vidalı extruder makinesinin çalışma mekanizması.....	14
Şekil 2.4. Çift vidalı extruder makinesinin çalışma mekanizması.....	15
Şekil 2.5. Enjeksiyon kalıplama sürecinin çalışma mekanizması.....	16
Şekil 2.6. Basınçlı kalıplama ile odun polimer kompozit üretimi.....	17
Şekil 2.7. Çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı.....	23
Şekil 2.8. Ağırlık uzayında a) Düşük öğrenme oranı b) Büyük öğrenme oranı (salınım) c) Momentum terimi eklenmiş büyük öğrenme oranı.....	28
Şekil 3.1. Granül haldeki HDPE.....	32
Şekil 3.2. Granül haldeki PLA.....	33
Şekil 3.3. Toz haldeki maleik anhidrit aşılı polietilen.....	34
Şekil 3.4. Granül haldeki maleik anhidrit modifiyeli etilen elastomer.....	35
Şekil 3.5. Sarıçam odunu talaşı.....	36
Şekil 3.6. Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için geliştirilen YSA mimarisi.....	39
Şekil 3.7. (a) Sarsak elek (b) Kurutma fırını.....	44
Şekil 3.8. (a) Öğütme makinesi (b) Kurutma fırını.....	44
Şekil 3.9. Mekanik karıştırıcı.....	45
Şekil 3.10. Çift vidalı extruder makinesi.....	45
Şekil 3.11. Kırma makinesi.....	45
Şekil 3.12. Enjeksiyon kalıplama makinesi.....	46
Şekil 3.13. (a) Eğilme testi örneği (b) Çekme testi örneği.....	47
Şekil 3.14. Çekme direnci test örneği (tip 1).....	48
Şekil 3.15. Çekme direnci test cihazı.....	48
Şekil 3.16. Eğilme direnci test cihazı.....	50
Şekil 3.17. Darbe direnci test cihazı.....	51
Şekil 3.18. (a) Darbe testi örneği (b) Eğilme testi örneği (c) Çekme testi örneği.....	54
Şekil 3.19. PLA-odun kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için geliştirilen YSA mimarisi.....	56

Şekil 4.1. Odun polimer kompozitlerin çekme direnci için öğrenme eğrisi grafiği...	59
Şekil 4.2. Odun polimer kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.....	60
Şekil 4.3. Odun polimer kompozitlerin eğilme direnci için öğrenme eğrisi grafiği...	60
Şekil 4.4. Odun polimer kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.....	61
Şekil 4.5. Odun polimer kompozitlerin çekme direnci için eğitim grafiği.....	62
Şekil 4.6. Odun polimer kompozitlerin çekme direnci için test grafiği.....	62
Şekil 4.7. Odun polimer kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.....	63
Şekil 4.8. Odun polimer kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için test grafiği.....	63
Şekil 4.9. Odun polimer kompozitlerin eğilme direnci için eğitim grafiği.....	64
Şekil 4.10. Odun polimer kompozitlerin eğilme direnci için test grafiği.....	64
Şekil 4.11. Odun polimer kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.....	65
Şekil 4.12. Odun polimer kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için test grafiği.....	65
Şekil 4.13. HDPE-odun kompozit çekme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.14. HDPE-odun kompozit çekmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.15. HDPE-odun kompozit eğilme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.16. HDPE-odun kompozit eğilmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.17. PLA-odun kompozitlerin çekme direnci için öğrenme eğrisi grafiği.....	76
Şekil 4.18. PLA-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.....	77
Şekil 4.19. PLA-odun kompozitlerin eğilme direnci için öğrenme eğrisi grafiği.....	77
Şekil 4.20. PLA-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.....	78
Şekil 4.21. PLA-odun kompozitlerin darbe direnci için öğrenme eğrisi grafiği.....	78
Şekil 4.22. PLA-odun kompozitlerin çekme direnci için eğitim grafiği.....	79
Şekil 4.23. PLA-odun kompozitlerin çekme direnci için test grafiği.....	79
Şekil 4.24. PLA-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.....	80

Sayfa

Şekil 4.25. PLA-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için test grafiği...	80
Şekil 4.26. PLA-odun kompozitlerin eğilme direnci için eğitim grafiği.....	81
Şekil 4.27. PLA-odun kompozitlerin eğilme direnci için test grafiği.....	81
Şekil 4.28. PLA-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.....	82
Şekil 4.29. PLA-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için test grafiği...	82
Şekil 4.30. PLA-odun kompozitlerin darbe direnci için eğitim grafiği.....	83
Şekil 4.31. PLA-odun kompozitlerin darbe direnci için test grafiği.....	83
Şekil 4.32. PLA-odun kompozit çekme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.33. PLA-odun kompozit çekmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.34. PLA-odun kompozit eğilme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.35. PLA-odun kompozit eğilmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.36. PLA-odun kompozit darbe direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Transfer fonksiyonları	24
Çizelge 3.1. HDPE özellikleri (Teknik bilgiler broşürü).	32
Çizelge 3.2. PLA özellikleri (Ürün bilgilendirme kitapçığı).....	33
Çizelge 3.3. Maleik anhidrit aşılı polietilen özellikleri (Ürün teknik bilgi sayfası). ..	34
Çizelge 3.4. Maleik anhidrit modifiyeli etilen elastomer özellikleri (Ürün bilgi formu).	35
Çizelge 3.5. YSA modelinde yararlanılan çalışmalar.	38
Çizelge 3.6. Odun polimer kompozitlerin mekanik özellik tahmininde kullanılan YSA model parametreleri.	40
Çizelge 3.7. HDPE-odun kompozit numunelerin bileşim oranları.....	43
Çizelge 3.8. Çift vidalı extruder makinesi uygulama sıcaklıkları ve besleme hızları.	46
Çizelge 3.9. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde uygulanan yöntemler, numune boyutları ve sayıları.....	47
Çizelge 3.10. PLA-odun kompozit malzeme deneme desenleri.....	52
Çizelge 3.11. PLA-odun kompozit numuneler için çift vidalı extruder makinesi parametreleri.....	54
Çizelge 3.12. PLA-odun kompozit numuneler için enjeksiyon makinesi sıcaklık parametreleri.....	55
Çizelge 3.13. PLA-odun kompozitlerin mekanik özellik tahmininde kullanılan YSA model parametreleri.	57
Çizelge 4.1. Odun polimer kompozitlerde en yüksek R^2 değeri elde edilen modellere ait parametreler.....	58
Çizelge 4.2. Odun polimer kompozitlerin mekanik test sonuçları.	66
Çizelge 4.3. HDPE-odun kompozit test sonuçları ve YSA tahmin değerleri.	69
Çizelge 4.4. Modelin HDPE-odun kompozitlerin çekme direnci tahminindeki hata ve R^2 değerleri.....	69
Çizelge 4.5. Modelin HDPE-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü tahminindeki hata ve R^2 değerleri.....	70
Çizelge 4.6. Modelin HDPE-odun kompozitlerin eğilme direnci tahminindeki hata ve R^2 değerleri.....	70
Çizelge 4.7. Modelin HDPE-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü tahminindeki hata ve R^2 değerleri.....	71
Çizelge 4.8. PLA-odun kompozitlerin mekanik test sonuçları.....	73

Sayfa

Çizelge 4.9. PLA-odun kompozitlerde en yüksek R^2 değeri elde edilen modellere ait parametreler.....	75
Çizelge 4.10. Odun polimer kompozitler ile PLA-odun kompozitlerin eğitim ve test aşamalarındaki R^2 değerlerinin karşılaştırılması.	76
Çizelge 4.11. PLA-odun kompozitlerin test sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....	86
Çizelge 4.12. Modelin PLA-odun kompozitin çekme direnci tahminindeki R^2 ve hata değerleri.....	89
Çizelge 4.13. Modelin PLA-odun kompozitin çekmede elastikiyet modülü tahminindeki R^2 ve hata değerleri.....	90
Çizelge 4.14. Modelin PLA-odun kompozitin eğilme direnci tahminindeki R^2 ve hata değerleri.....	91
Çizelge 4.15. Modelin PLA-odun kompozitin eğilmede elastikiyet modülü tahminindeki R^2 ve hata değerleri.....	92
Çizelge 4.16. Modelin PLA-odun kompozitin darbe direnci tahminindeki R^2 ve hata değerleri.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

R^2	: Coefficient of Determination (Belirlilik Katsayısı)
%	: Yüzde
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
w_i	: Ağırlık değeri
x_i	: Girdi değeri
b	: Eşik (bias) değeri
n	: Girdi sayısı
V_N	: Normalize edilmiş veri
V_i	: Gerçek girdi değeri
V_{min}	: Girdi seti içerisinde yer alan en küçük sayı
V_{max}	: Girdi seti içerisinde yer alan en büyük sayı
c_i	: Gözlemlenen değer
c'_i	: Tahmin edilen değer
X_{po}	: Gerçek tahmin değeri
X_p	: Normalize tahmin değeri
X_{imax}	: En yüksek girdi değeri
X_{imin}	: En düşük girdi değeri
$\sigma_{\text{çd}}$	: Çekme direnci
F_{max}	: Kırılma anındaki maksimum kuvvet
$E_{\text{ç}}$	: Çekmede elastikiyet modülü
ΔF	: Yüklemin alt-üst limitleri arasındaki kuvvet
Δf	: Yüklemin alt ve üst limitlerindeki uzama farkı
σ_{ed}	: Eğilme direnci
E_e	: Eğilmede elastikiyet modülü
σ_{dd}	: Darbe direnci

KISALTMALAR

ANN	: Artificial Neural Network
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CPE	: Chlorinated Polyethylene
ÇD	: Çekme Direnci
ÇEM	: Çekmede Elastikiyet Modülü
DD	: Darbe Direnci
ED	: Eğilme Direnci
EEM	Eğilmede Elastikiyet Modülü
HDPE	: High Density Polyethylene
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu)
LDPE	: Low Density Polyethylene
MAE	: Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error (Ortalama Mutlak Yüzde Hata)
MAPP	: Maleic Anhydride Grafted Polypropylene
MF	: Melamin Formaldehit
MPE	: Mean Percentage Error (Ortalama Yüzde Hata)
MSE	: Mean Squared Error (Hata Kareleri Ortalaması)
OPK	: Odun Polimer Kompozit
PA20	: Poly (Methyl-Methacrylate-Cobutylacrylate)
PE	: Polietilen
PE-g-MA	: Maleic Anhydride Grafted Polyethylene
PF	: Fenol Formaldehit
PLA	: Polylactic Acid
pMDI	: Polimerik Difenil Diizosiyanat
PP	: Polypropylene
PS	: Polistiren
PVA	: Polivinil Asetat
PVC	: Polivinil Klorür
RF	: Resorsinol Formaldehit
RMSE	: Root Mean Squared Error (Kök Ortalama Kare Hata)

SSE	: Sum of Squared Errors (Hata Kareleri Toplamı)
SBP	: Standart Backpropagation Algoritması
Tanh	: Tanjant Hiperbolik Aktivasyon Fonksiyonu
UF	: Üreformatdehit
YSA	: Yapay Sinir Ağları



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde geleneksel malzemelerin yanısıra kompozit malzemelerin kullanımı da önemli ölçüde artmıştır. En az iki farklı malzemenin makro boyutlarda birleşmesi ile oluşan yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzeme üretiminde, tek başına uygun olmayan ve birbiri içerisinde çözünemeyen malzemeler, kullanım alanlarına uygun hale gelecek şekilde hafiflik, maliyet, esneklik ve dayanım gibi yeni özellikler kazanırlar (Bulut, 2014).

Kompozit malzeme çeşitlerinden biri de odun polimer kompozitlerdir. İki ya da daha fazla materyalin (odun unu, lignoselülozik hammaddeler, bağlayıcı ajan, termoplastik esaslı polimer, yağlayıcı, güçlendirici dolgu materyalleri vb.) bir araya getirilmesi ile oluşan, plastik içerikli ürünlere benzer yöntemlerle üretilen ve çoğunlukla kendilerini oluşturan materyallerden daha yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemelere odun polimer kompozit malzeme denir (Mengeloğlu vd, 2002; Simonsen, 1995).

Odun polimer kompozitlerin üretiminde odunsu materyal dışında lignoselülozik hammaddeler de (buğday sapları, keten, kendir, kenevir, jüt, fındık ve fıstık kabuğu) dolgu maddesi olarak değerlendirilebilmektedir. Lignoselülozik hammaddeler temel olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşmaktadır (Beyatlı, 1996).

Odun polimer kompozitler, termoset tutkallar ve termoplastik materyaller ile üretilen odun kompozitleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Termoset esaslı odun kompozitler, odun materyali ve termoset tutkalın (üreformaldehit, fenol formaldehit, polivinil asetat vb) ısı altında preslenmesi ile elde edilir (Matuana ve Heiden, 2004). Termoplastik esaslı odun kompozitlerin üretiminde ise polipropilen (PP), polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) gibi plastikler (polimerler) ve odun materyalleri kullanılır

(Mengeloğlu vd, 2002; Simonsen, 1995). Kompozit malzemeyi oluşturan hammaddeler karıştırıcı yardımıyla homojen olarak karıştırılarak birleştirilir. Birleştirilmiş olan malzemeler enjeksiyon, ekstrüzyon veya basınç kalıplama yöntemleriyle ikinci bir işlemde geçerek son şekillerini alırlar. Alternatif olarak ekstrüzyon sonunda ilk işlem sonrası elde edilen karışım ısı ve pres altında eritilip şekillendirilerek te üretim yapılabilir (Aslan, 2008).

Odun polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan malzeme ve üretim parametrelerinin çeşitliliği, elde edilen malzemenin mekanik özelliklerinin de çok farklı olmasına neden olmaktadır. Literatürde mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin; polimer çeşidi, dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu ve bağlayıcı ajan kullanımı olduğu görülmektedir. Bu faktörlerin etkisine bakıldığında örneklere bağlayıcı ajan ve mineral eklemenin genel olarak mekanik özellikleri arttırdığına dair çalışmalar (Adhikary vd, 2008; Koohestani vd, 2017; Mbarek vd, 2011; Nourbakhsh ve Ashori, 2009) bulunmaktadır. Genel olarak odun polimer kompozitlerdeki ahşap dolgu maddesi içeriğinin artması ile mekanik özelliklerde iyileşmeler (Koohestani vd, 2017; Martins vd, 2017; Mbarek vd, 2011; Nourbakhsh ve Ashori 2009; Bouafif vd, 2009) meydana geldiği rapor edilmiştir. Çoğu çalışmada kompozitlerdeki odun unu partikül boyutunun artmasının mekanik özellikleri arttırdığına (Rafighi vd, 2014; Chaudemanche vd, 2018; Bouafif vd, 2009) dair sonuçlar bulunmuştur. Dolgu malzemesi olarak odun unu dışında lignoselülozik hammaddelerin kullanıldığı çalışmalarda, buğday sapı ve fıstık kabuğu kullanarak üretilen örneklerin, odun unu kullanılan örneklerden daha düşük çekme ve eğilme özellikleri gösterdiği (Mengeloğlu vd, 2011), fındık kabuğu kullanılan örneklerde ise fındık kabuğu oranının artmasının çekme ve eğilme direnci değerlerinde azalma, eğilme ve çekmede elastikiyet modülü değerlerinde ise artış olduğu (Çukur, 2016) rapor edilmiştir. Çay fabrikası atıklarının kullanıldığı çalışmada ise örneklerin darbe direnci değerlerinin lignoselülozik dolgu malzemesi oranı arttıkça azaldığı tespit edilmiştir (Çavdar, 2011).

Her farklı bileşimdeki kompozitin mekanik özelliklerinin tahribatlı muayene yöntemleri ile tespit edilmesi hem zahmetli hem de yüksek maliyetlidir. Örneğin bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında gerçekleştirilen doğrulama deneyleri için

laboratuvar ortamında 2 kişi ile yaklaşık 40 çalışma saati harcanmıştır. Bir üretici açısından bakıldığında, üretim için harcanan ekstra zamanın yanı sıra, işçilik ve elektrik maliyetleri ile makine amortismanı vb. giderler ortaya çıkacaktır. Ayrıca, üretici mekanik testleri gerçekleştirmek için gerekli ekipman ve becerilere sahip olmayabilir. Bu da zaman alıcı ve maliyetli olabilen dışarıdan hizmet alma ihtiyacını doğurur. Bütün bu zaman ve maliyet kaybını önleyebilmek için odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin tahmin etmek için son zamanlarda tıp, mühendislik, ekonomi, matematik, meteoroloji başta olmak üzere birçok alanda başarı ile uygulanan ve kullanımı yaygınlaşan yapay sinir ağları (YSA) yöntemi kullanılabilir. YSA yöntemi ile farklı parametreler denenerek dakikalar içinde mekanik testler ile elde edilen sonuçlara çok yakın değerlere ulaşmak mümkündür.

YSA, örneklerle ilgili bilgiler toplamakta, genellemeler yapmakta ve daha sonra hiç görmediği örnekler ile karşılaştırıldığında öğrendiği bilgileri kullanarak o örnekler ile ilgili tahminler yapabilmektedir. YSA, bu üstün öğrenebilme ve genelleme özellikleri nedeniyle günümüzde birçok bilim alanında geniş uygulama olanağı bulmakta ve karmaşık problemleri başarı ile çözebilme yeteneğini ortaya koymaktadır (Ergezer vd, 2003). Dolayısıyla oluşturulacak YSA modelleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tahmininde de başarı ile kullanılabilir. Bu kapsamda YSA ile oluşturulan modellerin, odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine yönelik yüksek doğruluk oranları elde etmesi, üretilen malzemenin özelliklerinin önceden tahmin edilebilir olmasına imkan verecek ve böylece zaman ve maliyet kazancı sağlayacaktır.

Literatürde odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin YSA ile tahmin edilmesine yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu kapsamda üretimde çokça kullanılan ağaçlardan ziyade daha az tercih edilen hurma ağacının kullanıldığı bir adet çalışmaya ulaşılabilmektedir (Atuanya vd, 2014). Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında düşük maliyeti ve işleme kolaylığı nedeni ile high density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE) ve polypropylene (PP) polimerlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu polimerler yanında literatürde son yıllarda kullanımı artan ve biyobozunur bir polimer olan PLA'nın kullanıldığı odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine dair de az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda odun

polimer kompozitlere eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci testleri uygulandığı tespit edilmiştir. Yapılan testler sonunda bağlayıcı ajan kullanım durumu, odun unu türü, odun unu oranı ve odun unu partikül büyüklüklerinin sonuçlar üzerindeki etkileri raporlanmıştır.

Bu çalışmada, odun polimer kompozitlerin üretiminde, üretim parametrelerine bağlı olarak elde edilecek malzemenin mekanik özelliklerinin YSA modeli kullanılarak, tahribatlı muayene yapılmadan, çok daha hızlı ve düşük maliyetle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde PLA-odun kompozitlerin mekanik özelliklerine ait var olan verilerin sayısı YSA modelinin başarılı bir şekilde oluşturulmasına yeterli değildir. Bu kapsamda çalışma başlıca iki bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde YSA modellerinin oluşturulmasında odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine yönelik literatürdeki çalışmaların girdi parametreleri ile çıktı değerleri kullanılmış ve bu sayede daha gerçekçi tahminler yapılması amaçlanmıştır. Daha sonra, oluşturulan modellerin eğitim ve test aşamalarında yer almayan girdi parametreleri kullanılarak numuneler üretilmiş ve numuneler mekanik testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar modellerin performanslarının belirlenmesi açısından yorumlanmıştır.

İkinci bölümde ise polimer olarak polilaktik asit (PLA) ve dolgu malzemesi olarak sarıçam kullanılmış ve farklı girdi parametreleri dikkate alınarak 48 farklı grup numune üretilmiştir. Numunelere eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci testleri uygulanmış, elde edilen değerler YSA'da modellenmiş ve modellerin doğruluk oranları ve performansları değerlendirilmiştir.

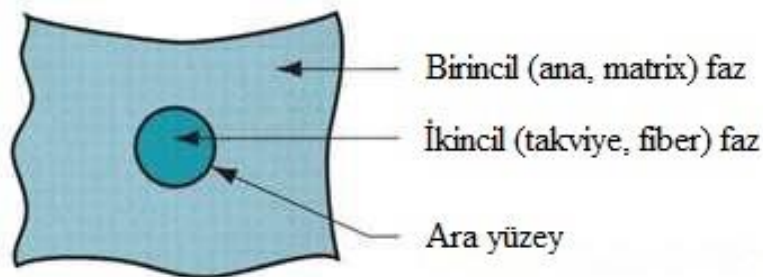
BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1. KOMPOZİT MALZEME

Günümüzde geleneksel malzemeler olarak adlandırılan metal, seramik ve plastik malzemelere göre farklı özellikler taşıyan kompozit malzemeler, endüstriyel kullanım alanları bakımından gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir malzeme grubudur. Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla (fiziksel ya da kimyasal özellik yönünden birbirinden farklı) malzemenin uygun özelliklerini tek bir malzemede toplamak ve yeni özellikler kazandırmak amacıyla makro düzeyde karıştırılmasıyla elde edilen malzemelerdir (Bulut, 2014).

Kompozit malzemelerde, malzemede oluşabilecek gerilimi taşıyan ve direnci arttıran bir takviye elemanı (fiber) ile bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir ana malzeme (matris) bulunmaktadır. Kompoziti oluşturan takviye ve ana malzeme, üretim sırasında kullanılan üretim yöntemine ve tasarlanan şekle bağlı olarak fiziki bir bağlanma meydana getirir. Farklı yöntemlerle bir araya getirilen ana malzeme ve takviye elemanı, özelliklerini tamamen kaybetmeden, aralarında ara yüzey olarak adlandırılan bir bağlantı bölgesi oluşturur (Bulut, 2014). Şekil 2.1’de parçacık takviyeli bir kompozitin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Şematik olarak kompozit malzemenin bileşenleri (Bulut, 2014).

Takviye ve ana malzeme olarak genellikle cam, seramik, plastik ve metaller kullanılmaktadır (Bulut, 2014). Kompoziti meydana getiren ana faz, takviye fazı ve ara yüzey bağı, sonuç üründe farklı görevler üstlenirler.

Ana faz, kompozit malzeme formunu koruyarak takviye fazını bir arada tutma ve uygulanan kuvvetleri, tahribata uğramadan, ara yüzey bağı ile takviye fazına iletme ve dağıtma görevini üstlenir (Chan vd, 1993). İdeal bir ana malzeme başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıya sahipken sonrasında elyafı uygun bir şekilde çevreleyecek katı forma kolayca geçebilmelidir. Kompozit malzemelerde yükü taşıyan takviye elemanlarının görevlerini yapabilmeleri için ana malzemenin mekanik özelliklerinin iyi olması gerekir (Bulut, 2014).

Takviye faz, üretim sırasında ana malzemenin tane büyüklüğünü kontrol etmek, tane sınırlarındaki hareketleri engellemek ve ana faz tarafından iletilen yükleri paylaşarak karşı koyma görevini üstlenir. Kompozit malzemelerde, gelen kuvvetlerin tümünü takviye fazı karşılamaz. Elyaf takviyeli kompozitlerde, malzemeye gelen yükün birçoğunu elyaf üstlenirken, parçacık takviyeli kompozitlerde ise yük paylaşımından söz etmek mümkündür (Jacobs ve Kilduff, 2005; İnem, 1993).

Ana faz ile takviye fazı arasında bağlayıcılık görevi olan ara yüzey bağı, kırılgan bir özelliğe sahip olmasına rağmen, ana fazın iletmek istediği yükü, herhangi bir çözülme ya da kırılmaya uğramadan takviye elemanına iletmekle görevlidir. Bununla birlikte malzemenin elastikiyet modülüne ve tokluk değerine etki eden en önemli bölgedir. Bu sebeple kompozitin direncinin iyi olması ara yüzey bağının istenilen şekilde oluşmasına bağlıdır (Jacobs ve Kilduff, 2005; İnem, 1993).

Kompozit malzemeleri diğer malzeme gruplarından ayıran özellikleri (Sur, 2008);

1. Düşük yoğunluklarına göre yüksek dayanım özelliklerine sahip olmaları,
2. Sonuç ürünü oluşturan malzemelerin katkıları ile elde edilen yük paylaşımının dengeli olması,
3. İhtiyaç duyulan dayanım özelliklerine göre farklı içeriklerde üretilebilme kolaylığı,

4. Yorulma, tokluk ve yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları kararlılık özelliklerinin yüksekliği,
5. Oksitlenme ve aşınma dayanımlarının yüksek olması.

Kompozit malzemelerin dezavantajlı yönleri (Sur, 2008);

1. Kompozit malzemelerin çoğunun, farklı yönlerden gelen kuvvetlere karşı farklı dayanım (mekanik) özellikleri göstermeleri,
2. Çalışılan ortamda yer alan çözücü ve aşındırıcı sıvılar sebebi ile polimer esaslı kompozitlerde matrisin özelliğini yitirmesi,
3. Kompozit üretiminde kullanılan hammaddelerin pahalı olması,
4. Kaynaklı birleştirme tarzı ve montaj yöntemlerinin sınırlı olması,
5. Üretimde kullanılan yöntemlerin zahmetli olması ve uzun süre alması,
6. Üretim sonrası şekil verme işlemlerinin sınırlı olması ve bünyelerinde yer alan aşındırıcılar sebebi ile geleneksel talaşlı üretimle şekillendirilmelerinin zor olması,
7. Kompozit malzemelerin çoğunun tekrar yenilenerek üretilmelerinin mümkün olmaması.

Kompozit malzemeler bu dezavantajlarına rağmen, sergilemiş oldukları yüksek dayanım özellikleri nedeniyle, geleneksel malzemelere nazaran daha fazla hizmet ömrüne sahip olmaları ve enerji tasarrufunun sağlanmasında bu sürenin etkili olması gibi nedenlerden dolayı ekonomik olmayı sürdürmektedir (Chan vd, 1993; Weeton vd, 1990; Groover, 1996).

2.1.1. Kompozitlerde Kullanılan Ana Faz (Matris) Malzemeleri

Kompozit malzemelerin yapı taşlarından biri olan matris fazı, takviye fazını, kendi içerisinde yer değiştirmesine izin vermeden tutmak ve kompozite uygulanan herhangi bir kuvveti tahribata uğramadan takviye fazına iletmekle görevlidir.

Bunun yanı sıra matris fazının hafif olması, kolay elde edilebilmesi, oksidasyon direncinin yüksek olması ve termal farklılıklara karşı uyum gösterebilmesi gibi özellikleri de taşıması gerekir (Chan vd, 1993).

Kompozit malzemelerin üretiminde ana faz malzemesi olarak kullanılabilen malzemelerin başında plastik ve türevleri, metaller ve seramikler gelmektedir. Bunlara ilaveten refraktör malzemeler olarak adlandırılan cam, karbon, grafit gibi malzemelerde kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır. Ana faz seçimi yapılırken, tasarlanan kompozitin üretim yöntemi, kullanılacak takviye fazı uyum durumu, üretim sırasındaki matrsten istenilen hal değişimleri, üretim sonrası uygulanacak ısı işlem ve mekanik şekil değiştirme kabiliyetleri, kullanım alanının durumu ve montaj işleminin tipi gibi faktörler etkili olmaktadır (Jacobs ve Kilduff, 2005; Çiftçi, 2003; Sur, 2002).

Kompozit malzemelerin, kullanılan ana faz malzemelerine göre birtakım üstün özellikleri vardır. Bunlar;

1. Kendisini oluşturan ana malzemeye göre akma ve çekme dirençleri fazladır.
2. Daha yüksek elastikiyet modülü değerleri verirler.
3. Farklı sıcaklıklarda termal boyut dengesine sahiptirler.
4. Yüksek sertlik ve yüksek aşınma direncine sahiptirler.
5. Yorulma dirençleri daha yüksektir.
6. Daha yüksek sürünme dayanımına sahiptirler (Sur, 2008).

2.1.2. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretimlerinde kullanılan takviye elemanları, istenilen özel dayanım özelliklerini yansıtacak şekilde farklı tip ve formlarda, tasarıma uygun olan malzemelerden seçilir. Genellikle takviye elemanları; fiber, kılcal kristal, ince plakalar, parçacık ve partikül formlarında kullanılmaktadır (Sur, 2002).

Özellikle 1930'lu yılların sonunda polimer endüstrisinin gelişmesi ve cam fiberlerin mühendislik malzemelerinde kullanılmaya başlanmasıyla kompozit malzemeler önem

kazanmaya başlamıştır. Polimerlerin elyaflarla takviye edilmesi sonucu yüksek performans ve dayanım özellikleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu boron, karbon, aramit ve yüksek elastikiyet modüllü fiber takviyeleri geliştirilmiştir (Chan vd, 1993; Çiftçi, 2003; Sur, 2002).

Polimer esaslı kompozitlerde ve takviye elemanlarındaki bu gelişmeler; metal matrisli kompozit, seramik matrisli kompozit ve intermetalik matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanlarının gelişmesinde rol oynamıştır. Bu tür kompozitlerde kullanılan takviye elemanlarından, yüksek direnç ve yüksek elastikiyet modülü özelliklerine sahip olmalarının yanında iyi bir kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklıklara dayanım özellikleri de beklenmektedir. Bu kriterlere uygun olacak şekilde, karbon fiberler, silikon bazlı nanoksit fiberler ve alümina bazlı oksitli fiberler geniş bir uygulama alanına sahiptirler (Chan vd, 1993).

2.1.3. Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. En genel anlamda kompozit malzemeler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Sur, 2008);

1. Doğal kompozit malzemeler
2. Yapay kompozit malzemeler
 - 2.1. Güncel yaşamda kullanılan kompozit malzemeler
 - 2.2. Endüstriyel alanlarda makine ve imalat sektöründe kullanılan kompozit malzemeler
 - 2.2.1. Takviye fazının şekline göre kompozit malzemeler
 - 2.2.1.1. Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemeler
 - 2.2.1.2. Kılcal kristal takviyeli kompozit malzemeler
 - 2.2.1.3. Parçacık ya da partikül takviyeli kompozit malzemeler
 - 2.2.1.4. Plaka takviyeli kompozit malzemeler
 - 2.2.1.5. Karma (hybrid) takviyeli kompozit malzemeler
 - 2.2.2. Matris fazının tipine göre kompozit malzemeler
 - 2.2.2.1. Polimer esaslı kompozit malzemeler
 - 2.2.2.2. Metal esaslı kompozit malzemeler

2.2.2.3. Cam esaslı kompozit malzemeler

2.2.2.4. Refraktör malzeme esaslı kompozit malzemeler

2.2.2.4.1. Karbon esaslı kompozit malzemeler

2.2.2.4.2. Seramik esaslı kompozit malzemeler.

Bu tez çalışmasında, polimer esaslı odun kompozitler kullanıldığı için bir sonraki bölümde bu tip kompozit malzemeler üzerinde durulacaktır.

2.2. ODUN POLİMER KOMPOZİTLER

Odun kompozitleri, termoset tutkallar ile üretilen odun kompozitleri ve termoplastik materyaller ile üretilen odun kompozitleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır.

Termoset esaslı odun kompozitler, odun materyali ve termoset tutkalın ısı altında preslenmesi ile elde edilir. Bu tip kompozitlerde odun materyalini birbirine bağlamak için üre formaldehit (UF), fenol formaldehit (PF), polivinil asetat (PVA), polimerik difenil diizosiyanat (pMDI), melamin formaldehit (MF) ve resorsinol formaldehit (RF) gibi çeşitli yapıştırıcılar kullanılır (Matuana ve Heiden, 2004).

Termoplastik esaslı odun kompozitlerin üretiminde ise PP, polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) gibi plastikler ve odun materyalleri kullanılır. İki ya da daha fazla materyalin (odun unu, bağlayıcı ajan, termoplastik esaslı polimer, yağlayıcı, güçlendirici dolgu materyalleri vb.) bir araya getirilmesi ile oluşan, plastik içerikli ürünlere benzer yöntemlerle üretilen ve çoğunlukla kendilerini oluşturan materyallerden daha yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemelere odun polimer kompozit malzeme denir (Mengeloğlu vd, 2002; Simonsen, 1995). Tanımda kullanılan “odun unu” sadece odun parçasını değil, lifli yapıda olan tüm yıllık bitkiler, tarımsal atıklar gibi odunsu materyalleri ifade etmektedir. Bu materyaller un halinde ya da lifli yapılar olarak odun polimer kompozit üretiminde kullanılmaktadır (Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Karakuş, 2008). Odun polimer kompozit üretiminde genel olarak odun unu ile poliefinler kullanılmaktadır. Çünkü poliefinlerin işlenmesi için gerekli olan sıcaklık, dolgu maddesi olarak kullanılan odunsu materyallerin bozunma sıcaklığının (190-210 °C) altındadır. Polistiren (PS), PVC, PP ve HDPE en

çok kullanılan poliefinlerdir (Chowdhury ve Wolcott, 2007). Odun polimer kompozitler iki aşamada üretilmektedir. Kompozit malzemeyi oluşturan hammaddeler karıştırıcı yardımıyla homojen olarak karıştırılarak birleştirilir. Birleştirilmiş olan malzemeler enjeksiyon, ekstrüzyon veya basınç kalıplama yöntemleriyle ikinci bir işlemden geçerek son şekillerini alırlar. Alternatif olarak ekstrüzyon sonunda ilk işlem sonrası elde edilen karışım ısı ve pres altında eritilip şekillendirilerekte üretim yapılabilir (Aslan, 2008).

Odun polimer kompozitlerin sağlamış olduğu başlıca avantajlar şunlardır:

1. Rutubete karşı dirençleri yüksektir.
2. Yüksek boyutsal stabiliteye sahip oldukları için çalışma miktarları çok azdır.
3. Üretimde kullanılan atık malzemelerden dolayı ekolojik bir malzemedir.
4. Kullanım yerine uygun olarak boyutlandırılabilir.
5. Hizmet süresince daha az bakım gerektirir.
6. Mantar ve böceklerle karşı dayanıklıdır.

Bütün bu avantajlarının yanında üretim kapasitelerinin düşük oluşu, enerji giderlerinin yüksek oluşu, odunsu materyale göre yoğunluklarının yüksek oluşu odun polimer kompozitlerin başlıca dezavantajlarıdır (Karakuş, 2008; Mengeloğlu ve Karakuş, 2008).

2.2.1. Odun Polimer Kompozit Üretim Teknolojisi

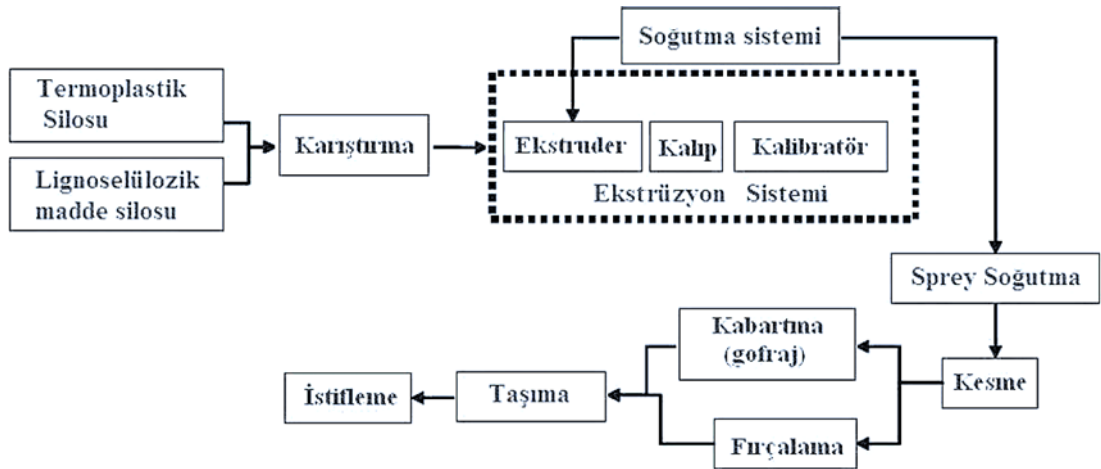
Lignoselülozik un veya liflerin termoplastikler ile kullanılması mekanik ve fiziksel avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte dolgu maddelerinin termoplastik polimerler içinde homojen bir şekilde dağılmaması en büyük problemidir. Odun polimer kompozit üretiminde son ürünün kalitesi karışımın kalitesi ile yakından ilgilidir (Gramann ve Osswald, 1993; Wolcot ve Englund, 1999). Üretim sırasında karıştırma süreci çok önemlidir. Yeterli karışım yapılamazsa lignoselülozik ya da odun liflerinin termoplastik matris içindeki dağılımı homojen olamayacağı için dolgu maddesi ile polimer arasındaki bağlanma da zayıf olacaktır. Gereğinden fazla karışım olması

halinde ise lifler zarar görebilmektedir. Her iki durumda mekanik özelliklerde azalmaya sebep olmaktadır (Yam vd, 1990).

Termoplastik sanayi farklı üretim teknikleri kullanarak ürünler üretmektedir. Odun polimer kompozit üretiminde de ekstrüzyon, enjeksiyon ve basınçlı kalıplama yöntemleri kullanılmaktadır (Çavdar, 2011).

2.2.1.1. Ekstrüzyon Yöntemiyle Odun Polimer Kompozit Üretimi

Ekstrüzyon yönteminde tek ve çift vidalı extruder makineleri kullanılmaktadır. Odun polimer kompozit üretiminde lignoselülozik maddenin termoplastik matris içinde homojen dağılımını sağlayabilmek için çift vidalı extruder makineleri daha fazla kullanılmaktadır (Wolcott ve Englund, 1999). Odun polimer kompozit üretimine ait süreç Şekil 2.2.'de verilmiştir. Odun polimer kompozitler, direkt ekstrüzyon ve kademeli ekstrüzyon olmak üzere iki şekilde üretilirler. Direkt ekstrüzyon yönteminde, odun polimer kompozitler granül hale getirilmeden, karışım tek safhada ekstrüzyona tabi tutularak son ürün elde edilir. Bu üretim yöntemi kullanılarak sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerde artış ile ürün ve üretim maliyetinde azalma gibi avantajlar elde edilmektedir. Bununla birlikte hammadde çeşitliliği ve üretim sıcaklıklarında düşüş imkânı da bulunmaktadır. Kademeli ekstrüzyonda ise odun ve polimer ilk extruder makinesinde granül hale getirilir, daha sonra enjeksiyon veya extruder makinesinde işleme tabi tutularak ürün üretilir (Çavdar, 2011).



Şekil 2.2. Ekstrüzyon yöntemi ile odun polimer kompozit üretimi (Çavdar, 2011).

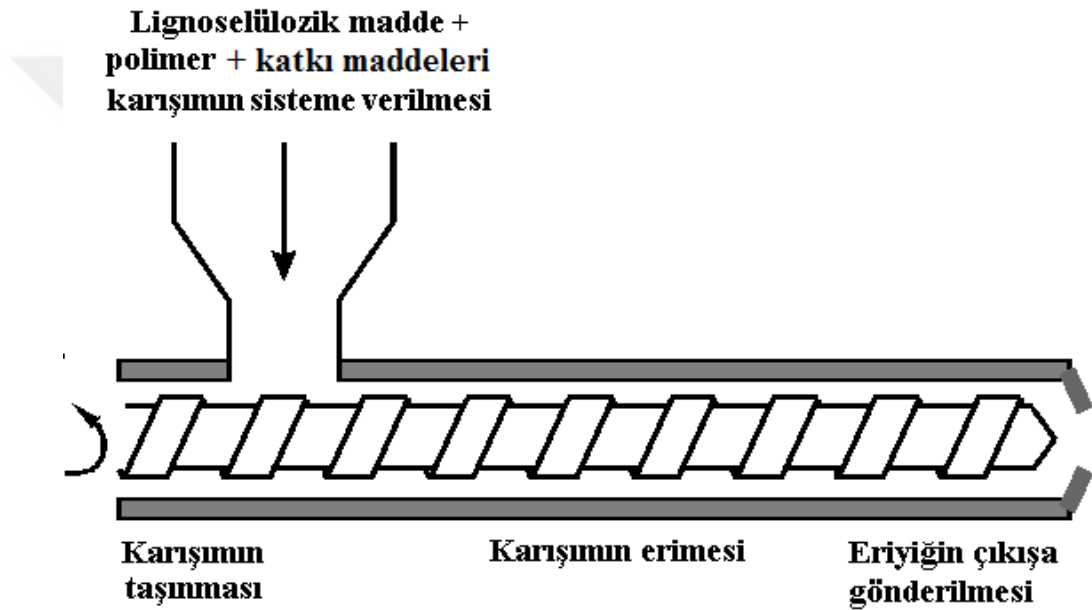
Geleneksel extruder makinelerinde çalışırken malzemenin rutubet içermesi istenmemektedir. Malzeme, %1,5 rutubetin altında olacak şekilde bir ön kuruluğa sahip olmalı ve ekstruder bu rutubette beslenmelidir. Bu rutubet oranı polimerin yanı sıra lif malzemesi için de geçerlidir. Plastik extruder makineleri öğütülmüş yongaları işleyemediği için odun unu veya lifler, çekiç değirmenler yardımı ile inceltir ve istenilen boyutlardaki gözeneklere sahip eleklerde (40 mesh) elenirler. Bu işlemler sonucu çift vidalı extruder makineleri, kuru lifleri ve polimer granülleri aynı anda kullanılabilir hale getirirler. Son dönemlerde kademersiz olarak tasarlanmış konik yapıdaki extruder makineleri ile rutubeti yüksek ve işleme tabi tutulmamış taze haldeki testere talaşları ve kaba lifli hammaddeler rutubetli (%50) halde olsalarda işlenebilmektedir. Bu tarz extruder makineleri ile rutubet serbest hale getirilir ve gövde içerisindeki buhar dışarı atılır. Çıkan buhar ile, extruder makinesindeki odun materyali ön ısıtmaya tabi tutularak enerjinin değerlendirilmesi sağlanmaktadır (Vilkki, 2006; Gökalp, 2006).

2.2.1.1.1. Tek Vidalı Extruder Makineleri

Modern extruder makinelerinde malzemeler vidalar ile taşınmaktadır. Vida, bir shaft etrafına sarılı olan ve helezon şeklindeki paralel (metal) halkalardır. Vida hareketi silindirik şeklindeki duvarlara sahip kanallar içinde olur ve bu kanallarda vidanın hareketi ile parçalanma ya da makaslama hareketleri meydana gelir. Silindirik duvarlarda oluşan vida ve sürtünme hareketi, karışımın ileri itilmesini ve vidayla aynı düzlemde hareketini sağlar (Martelli, 1983). Malzemenin ileri yönde taşınması; vida yolunun çapı ve açısı ile, kanalın derinliği ve vida dönme hızıyla orantılıdır (Wolcott ve Englund, 1999).

Tek vidalı extruder makineleri, son ürün ya da yarımamül ürünlerde kullanılan termoplastik malzemeler için kullanışlı makinelerdir. Tek vidalı ekstruder makineleri sürükleyici ya da itici pompa görevi görürler. Ekstrüzyon işlemi sırasında sürüklenme alanını arttırabilmek için vidanın içinde hareket ettiği kanalın uzunluğu arttırılabilir. Kanal boyu ve vida çapı oranı tek vidalı ekstrüzyon işleminde çok önemlidir. Çap ve boy oranının artması ile fazla sürtünme oluşmakta ve ileri doğru taşınım kolaylaşmaktadır.

Bu makinelerdeki kontrol panelleri vasıtası ile hammaddenin türüne ve üretim profiline uygun programlar kullanılabilir. Üretim sırasında malzemedeki rutubetin fazlalığı ve gazlar sonucu ortaya çıkan lekeler ile hava kabarcıkları gaz alma ünitesi yardımı ile engellenir. Tek vidalı extruder makinelerinde vidanın içine konduğu silindir bölme çok bölgeli olarak üretilir. Bu şekilde farklı bölgelerde farklı sıcaklıklar elde edilebilmekte ve sıcaklıklar soğutma fanları yardımı ile ayarlanabilmektedir (Stevens, 1985; Gökalp, 2006). Şekil 2.3'te tek vidalı extruder makinesinin kesidi gösterilmektedir.

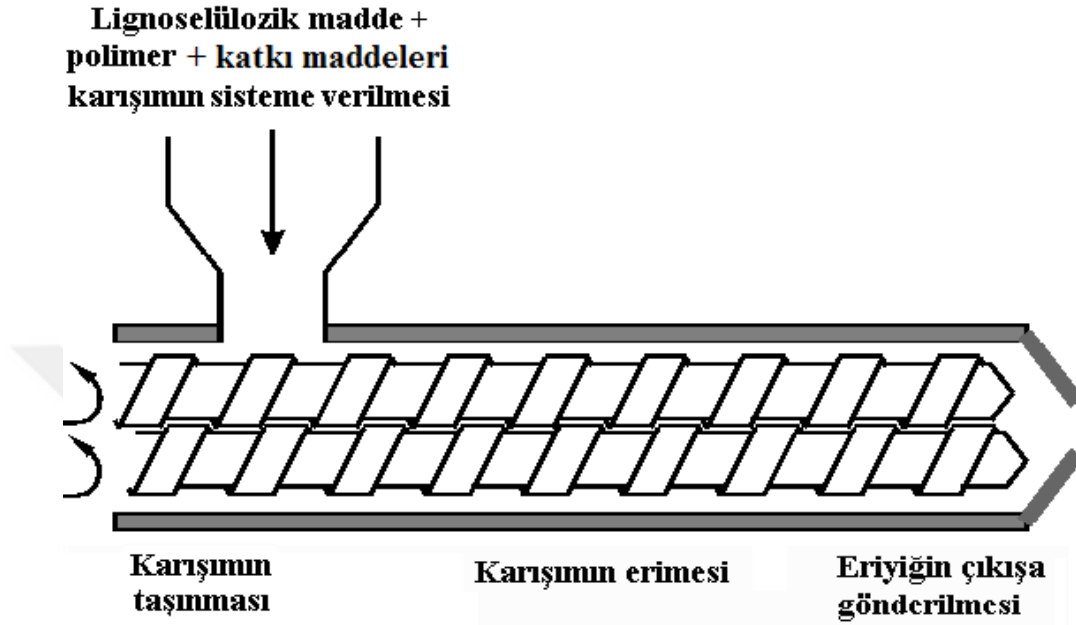


Şekil 2.3. Tek vidalı extruder makinesinin çalışma mekanizması (Çavdar, 2011).

2.2.1.1.2. Çift Vidalı Extruder Makineleri

Çift vidalı extruder makineleri genellikle, basınç ve karıştırma ihtiyacı olan ve tek vidalı extruder makinelerinin kullanılmadığı üretim süreçlerinde tercih edilir. Şekil 2.4'te çift vidalı extruder makinesinin kesidi gösterilmiştir. Çift vidalı extruder makineleri iç içe geçmiş vida dişleri olanlar ve olmayanlar olmak üzere çeşittir. Vida dişleri iç içe geçmemiş extruder makinelerinin çalışma prensibi, tek vidalı extruder makinelerine benzer. Bu makinelerde ileri yönde akış kanal ve vida arasında oluşan sürtünme ile olur. Vida dişleri iç içe geçmiş extruder makinelerinde ise vida adımlarının birbiri üzerinden geçmesi ile malzemenin ileri doğru akışı sağlanır.

Malzeme bu şekilde homojen olarak karışır. İç içe geçmiş vidalar ile çalışan çift vidalı extruder makinelerinde malzeme, sürtünme gücü olmadan bitişik vidalar arasındaki kanallarda taşınır (Çavdar, 2011).



Şekil 2.4. Çift vidalı extruder makinesinin çalışma mekanizması (Çavdar, 2011).

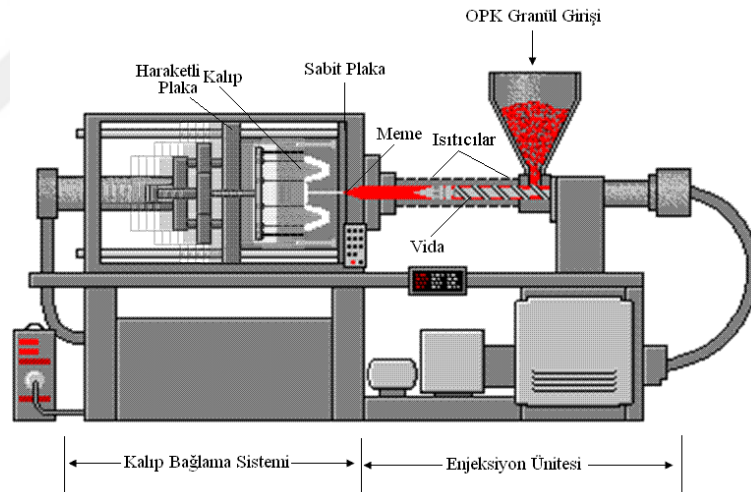
Çift vidalı extruder makinelerinde vidalar, birbiri ile aynı ve birbirine ters yönde dönenler olmak üzere iki çeşittir. Birbiri ile aynı yönde dönen vidalar, aynı yönde ilerleme sağlarken birbirine ters yönde dönen vidalar ise farklı yönlerde hareket ederler (Martelli, 1983). Vidaları birbirine ters yönde dönen makineler standart olmayan uygulamalar için gerekli olan yüksek basıncı üretirler. Buna karşın vidaları aynı yönde dönen makineler yüksek basınç üretememekte fakat vida tasarımındaki mükemmellik ile çok iyi bir karıştırma yapabilmektedir. Üretim süreci sonunda bütün malzemeler aynı parçalanma enerjisi ve aynı sıcaklığa tabi tutulmuş olur (Rosen, 1993; Wolcot ve Englund, 1999).

Çift vidalı extruder makinelerinin, yüksek kapasitede ve düşük hızlarda çalışabilme ile daha iyi mekanik özelliklere sahip ürün elde etme gibi avantajları vardır. Çift vidalı extruder makineleri, yüksek kalitede ürün sunmasının yanı sıra, ekstrude edilmesi zor malzemeleri işleyebilmesi ve tek vidalı extrudere göre çok iyi karıştırma yapabilmesi sayesinde maliyetleri düşürebilmektedir (Alavi vd, 2009; Wolcot ve Englund, 1999).

2.2.1.2. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Odun Polimer Kompozit Üretimi

Seri üretim için en uygun üretim yöntemi enjeksiyon kalıplama yöntemidir. Enjeksiyon yöntemi ile odun polimer kompozit veya plastik ürünler 4 kademe elde edilir (Şekil 2.5).

1. Odun polimer kompozit granülleri veya karışım sıvı hale gelene kadar ısıtılır.
2. Sıvı polimer, bir basınç yardımı ile “nozzle” denilen bir ağızdan kalıp içine enjekte edilir.
3. Kalıp içine giren malzeme katılaşana kadar basınç altında soğuması için tutulur.
4. Kalıp açılır ve pim biçimdeki iticiler ile parça kalıptan çıkartılır (Akkurt, 2007).

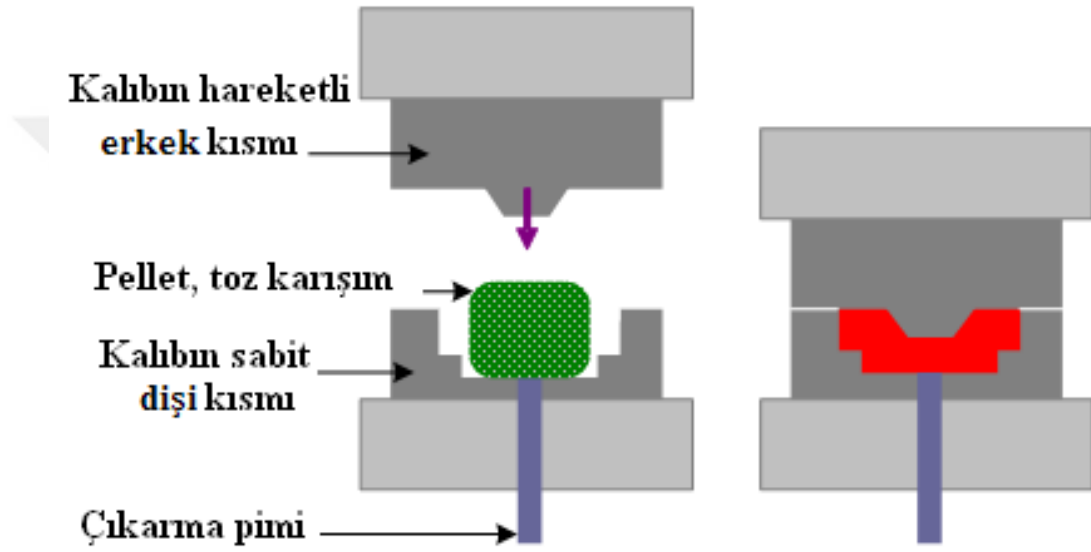


Şekil 2.5. Enjeksiyon kalıplama sürecinin çalışma mekanizması (Çavdar, 2011).

Enjeksiyon sürecinde, atık ürün oluşum miktarının çok az olması, işlem süresinin çok kısa olması ve otomasyona tam uyum sağlanabilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarıdır (Englund, 2001; Akkurt, 2007). Bununla birlikte, odun polimer kompozit üretiminde lignoselülozik malzemelerin kullanımı yüksek oranlarda olduğunda viskozite artacağı için enjeksiyon safhasında problemler olabilmektedir. Bu sebeple viskoziteyi düşürücü katkı maddelerinin kullanımı önemlidir (Fulmer, 1999). Enjeksiyon makineleri, pistonlu enjeksiyon ve vidalı enjeksiyon makineleri olmak üzere iki farklı çeşittir.

2.2.1.3. Basınçlı Kalıplama ile Odun Polimer Kompozit Üretimi

Odun polimer kompozitlerin basınçlı kalıplama ile üretim sürecinde, karışımın kalıplamadan önce titizlik ile hazırlanması çok önemlidir. Ürün kalitesinin en üst seviyede olması için karışımın hava ile temasının önlenmesi gerekmektedir. Levha şeklinde üretimler düz preslerde yapılabilmekle birlikte şekilli presler (Şekil 2.6) kullanılarak da üretimler yapılabilmektedir (Çavdar, 2011).



Şekil 2.6. Basınçlı kalıplama ile odun polimer kompozit üretimi (Çavdar, 2011).

Basınçlı kalıplama ile odun polimer kompozit üretimi 3 safhada yapılmaktadır.

1. Toz haldeki karışım ya da granüller kalıbın dişi kısmındaki boşluğa doldurulur.
2. Kalıbın erkek kısmıyla basınç uygulanır. Sıcaklığın etkisi ile eriyik hale gelen karışım, basıncın etkisi ile de kalıbın tüm boşluğunu doldurur.
3. Kalıp içindeki malzeme katılaştıktan sonra kalıp açılır ve parça, itici pimlerin hareketi ile kalıptan dışarı alınır (Akkurt, 2007).

Basınçlı kalıplama yönteminde, ürünün tüm parçaları için ayrı bir kalıp hazırlanması gerekliliği, seri üretime uygun olmaması ve yüksek maliyetli olması bu yöntemin dezavantajlarıdır. Bu sebepler ile basınçlı kalıplama yöntemi, odun polimer kompozit üretiminde eskisi kadar kullanılmamaktadır. (Çavdar, 2011).

2.2.2. Odun Polimer Kompozitler İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında düşük maliyeti ve işleme kolaylığı nedeni ile HDPE, LDPE ve PP polimerlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmüş, bunun yanında son yıllarda üretim hacmi genişleyen PLA’nda yer aldığı çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmalarda odun polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinden en çok eğilme elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekme elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci değerlerinin incelendiği, bununla birlikte dolgu malzemesi oranı, partikül boyutu ve bağlayıcı ajan kullanımının bu mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı tespit edilmiştir.

Polimer olarak HDPE kullanılan çalışmalara bakıldığında, dolgu maddesi olarak sarıçam, kavak, göknar, akasya, meşe, akçaağaç, kayın, kauçuk ve sedir odunu unu, bağlayıcı ajan olarak maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP), maleic anhydride grafted polyethylene (PE-g-MA) ve katkı maddesi olarak çeşitli mineraller kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş HDPE-radyata çamından elde edilen kompozitlerin çekme ve eğilme özelliklerinin, saf HDPE-radyata çamından elde edilen kompozitler ile benzer değerler verdiği belirtilmiştir (Adhikary vd, 2008). Örneklere %3-5 oranında MAPP (Adhikary vd, 2008), %3 oranında PE-g-MA (Koohestani vd, 2017; Mbarek vd, 2011), %2-4 oranında PE-g-MA ve %1-3-5 oranında silanlanmış silikat bazlı mineraller (Nourbakhsh ve Ashori, 2009) gibi bağlayıcı ajan ve katkı malzemelerinin eklenmesi ile mekanik değerlerde önemli artış olduğu kaydedilmiştir. Genel olarak odun polimer kompozitlerdeki ahşap dolgu maddesi içeriği %30’dan %40’a (Koohestani vd, 2017; Martins vd, 2017), %10’dan %30’a (Mbarek vd, 2011), %55’ten %85’e (Nourbakhsh ve Ashori 2009) ve %25’ten %45’e (Bouafif vd, 2009) çıktıkça mekanik özelliklerde iyileşmeler meydana geldiği rapor edilmiştir. Bazı çalışmalarda ise odun unu oranı artışının eğilme, çekme ve darbe dirençlerini azalttığı da (Balasuriya vd, 2001) belirtilmiştir. Kompozitlerdeki odun unu partikül boyutu 80 meshten 40 meshe (Rafighi vd, 2014), 70 meshten 20 meshe (Chaudemanche vd, 2018) ve 65 meshten 24 meshe (Bouafif vd, 2009) büyüdükçe elastikiyet modülü, eğilme ve çekme direnci değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak literatürde partikül boyutunun 80 meshten 40 meshe artması ile eğilme ve çekme direnci değerlerinin

düştüğünü (Homkhiew vd, 2018) belirten çalışmalar da mevcuttur. Rafeighi vd, (2014) odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinde göknar ve kayın odunu türleri açısından anlamlı bir fark olmadığını belirtmişlerdir.

PP kullanılarak yapılan çalışmalarda dolgu malzemesi olarak sarıçam, kavak, akçaağaç, meşe, veymut çamı, kayın, selvi, ladin, göknar, kızılçam, okaliptüs, bağlayıcı ajan olarak MAPP ve katkı maddesi olarak çeşitli mineraller tercih edilmiştir. Literatürde PP-odun kompozitlerinin mekanik özelliklerine yönelik farklı sonuçlar ortaya konmuştur. Bazı çalışmalarda odun unu oranının %30'dan %50'ye (Kaymakçı, 2015; Bledzki vd, 2002) artmasının kompozitlerin mekanik özelliklerini azalttığı, bazı çalışmalarda ise odun unu oranının %5'ten %50'ye (Ndiaye vd, 2010), %20'den %60'a (Stark ve Berger, 1997a), %30'dan %60'a (Leu vd, 2012) ve %10'dan %50'ye (Karmarkar vd, 2007) artmasının bazı mekanik özellikleri arttırdığı bazılarını ise azalttığı rapor edilmiştir. PP-odun kompozit karışımı (%70 PP-%30 kavak) (Nourbakhsh ve Ashori, 2010), (%75 PP-%25 selvi) (Haque vd, 2019) örneklerin, saf PP polimere kıyasla daha düşük darbe direnç değerleri verdiği belirlenmiştir. Örneklere %2 oranında MAPP (Nourbakhsh ve Ashori, 2010; Oksman ve Clemons, 1997), %3 oranında MAPP (Kaymakçı, 2015; Stark ve Rowlands, 2002), %5 oranında MAPP (Ndiaye vd, 2010; Bledzki ve Faruk, 2003; Bledzki vd, 2002) gibi bağlayıcı ajan ve %10 oranında mineral (Oksman ve Clemons, 1997) eklenmesinin PP-odun kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırdığı raporlanmıştır. PP-odun kompozitlerdeki odun unu partikül boyutu, 40 meshten 60 meshe (Nourbakhsh ve Ashori 2010), 40 meshten 90 meshe (Haque vd, 2019), 60 meshten 120 meshe (Leu vd, 2012), 80 meshten 170 meshe (Delviawan vd, 2019) ve 50 meshten 140 meshe (Murayama vd, 2019) düştüğünde mekanik özelliklerin arttığı tespit edilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada ise odun unu boyutu 235 meshten 35 meshe büyüdükçe çentikli darbe direncinin arttığı belirlenmiştir (Stark ve Rowlands, 2002).

LDPE kullanılarak yapılan çalışmalarda dolgu malzemesi olarak ladin, radiata çamı, okaliptüs, akasya, meşe ve kauçuk, bağlayıcı ajan olarak PE-g-MA ile katkı maddesi olarak çeşitli mineraller tercih edilmiştir. Odun unu oranının %10'dan %60'a (Turku vd, 2017), %1,5'tan %30'a (Moreno ve Saron, 2017), %30'dan %50'ye (Effah vd, 2018), %0'dan %50'ye (Prachayawarakorn vd, 2006) ve %0'dan %30'a (Atuanya vd,

2014) çıkmasının bazı mekanik özellikleri artırıp bazılarını azalttığına dair çalışmalar vardır. Örneklere %3 oranında bağlayıcı ajan (PE-g-MA) (Turku vd, 2017) ve %15 oranında uyumlaştırıcı (Chlorinated polyethylene (CPE), poly(methyl-methacrylate-cobutylacrylate) (PA20), poly(ethylene-co-methacrylate) (Elvaloy)) (Prachayawarakorn vd, 2006) eklemenin kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırdığı rapor edilmiştir.

PLA kullanılarak bambu elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalarda bağlayıcı ajan olarak epoxy, silan, di-izosiyanat, glisidil metakrilat ve maleik anhidrit, katkı maddesi olarak ise alkali ve tanen asidi gibi çeşitli kimyasallar kullanılmıştır. Bambu elyaf oranının artması ile eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri (Yang vd, 2015), çekme direnci ve çekmede elastikiyet modülü değerleri (Puspita vd, 2019; Qian vd, 2016; Wang vd, 2017; Lee ve Wang, 2006) ve darbe direnci ile kopmada uzama değerlerinin arttığı (Qian vd, 2016; Zuo vd, 2018) tespit edilmiştir. Bununla birlikte PLA ile takviye edilen bambu kompozitlerin çekme direncinin, saf bambu ile elde edilen kontrol grubundan daha düşük tespit edildiği (Zuo vd, 2018; Lee ve Wang, 2006) çalışmalar da vardır. Bambu elyaf katkılı odun polimer kompozitlerde bağlayıcı ajan (Lee ve Wang, 2006; Ma vd, 2019) ve uyumlaştırıcı (Qian vd, 2013; Wang vd, 2014; Liu vd, 2019) kullanımının çekme ve darbe direnç özellikleri ile elastikiyet modülü değerlerini geliştirdiği, kopmada uzama değerlerini arttırdığı (Ma vd, 2019; Qian vd, 2018; Liu vd, 2019; Lee ve Wang, 2006) rapor edilmiştir. Silan tipi uyumlaştırıcı maddelerin kompozitlerin çekme direncini düşürdüğüne (Qian vd, 2018) yönelik çalışmalar da vardır. Kompozitlerin içeriğinde katkı maddesi olarak kullanılan alkaninin (Wang vd, 2014; Chen vd, 2020; Qian vd, 2015; Lin vd, 2018) kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe direncini geliştirdiği, tanen asidinin (Liu vd, 2019) ise kompozitlerin çekme ve darbe dirençleri ile kopma uzama değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Bambu elyafın partikül boyutu küçüldükçe çekme direnci ve elastikiyet modülünün arttığı, bambu elyaf miktarının artması ile de kopma uzama değerinin azaldığı rapor edilmiştir (Sheng vd, 2019).

PLA kullanılarak üretilen odun polimer kompozitlerin olduğu çalışmalarda bambu dışında maun, akçaağaç, göknar, sarıçam, kavak ve kauçuk odun unları da kullanılmıştır. Bu çalışmalar da odun unu oranının artmasının çekme ve eğilme direnci

(Sachin vd, 2020; Farrokhpayam vd, 2021; Petchwattana ve Covavisaruch, 2014), darbe direnci, (Sachin vd, 2020; Butylina vd, 2010; Dalu vd, 2019), eğilmede elastikiyet ve çekmede elastikiyet değerlerini (Huda vd, 2006; Dalu vd, 2019; Petchwattana ve Covavisaruch, 2014; Pilla vd, 2008; Kelleci vd, 2022) arttırdığı rapor edilmiştir. Odun unu oranının artmasının bazı mekanik özelliklerde azalmaya neden olduğuna dair yapılan çalışmalar da (Butylina vd, 2010; Huda vd, 2006; Dalu vd, 2019; Wan ve Zhang, 2018; Petchwattana ve Covavisaruch, 2014; Pilla vd, 2008; Kelleci vd, 2022) mevcuttur. Bağlayıcı ajan kullanımının aynı çalışmada bazı mekanik özellikleri artırıp diğer mekanik özellikleri azalttığına (Butylina vd, 2010; Huda vd, 2006; Dalu vd, 2019; Pilla vd, 2008) yönelik çalışmalar da vardır. Partikül boyutu büyüdükçe daha yüksek mekanik özellikler (Sachin vd, 2020) elde edildiği de rapor edilmiştir.

Odun polimer kompozitlerin üretiminde odunsu materyal dışında lignoselülozik hammaddeler de kullanılmaktadır. Lignoselülozik hammaddeler temel olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşmaktadır (Beyatlı, 1996). Lignoselülozik özelliğe sahip tarımsal atıklar, farklı endüstri kollarında da kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu endüstri kollarından en önemlisi orman endüstri (kâğıt, levha ürünleri vb) sektörüdür. Bu sanayi kolunda kullanılan tarımsal atıklardan (buğday sapları, keten, kendir, kenevir, jüt, fındık ve fıstık kabuğu) elde edilen lifler ya da unlar odun polimer kompozit üretiminde dolgu maddesi olarak değerlendirilebilmektedir (Sanadi vd, 1997).

Lignoselülozik hammaddeler kullanılarak üretilen odun polimer kompozitler ile yapılan çalışmalarda çay fabrikası atıkları kullanılarak üretilen örneklerin darbe direnci değerleri lignoselülozik dolgu malzemesi oranı arttıkça azalmıştır (Çavdar, 2011).

Lignoselülozik maddelerin kullanım oranı arttıkça eğilme ve çekme dirençlerinde azalma (Chaharmahali vd, 2010; Rowell vd, 1997; Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Çavdar, 2011), çekmede elastikiyet modülü (Rowell vd, 1997; Çavdar, 2011) ve eğilmede elastikiyet modülü (Çavdar, 2011) değerlerinde ise artış gözlemlendiği rapor edilmiştir. Literatürde, çekme direncindeki azalmanın ana sebebinin, kullanılan lignoselülozik dolgu maddesi ile polimer arasındaki uyumsuzluk sebebi ile ortaya

ıkan adhezyon problemleri olduğu rapor edilmiştir (Carroll vd, 2001; Mishra ve Naik, 2005; Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Cui vd, 2010; Kord, 2011). Bununla birlikte hidrofıl özelliğe sahip olan lignoselülozik madde ve hidrofobik polimer arasındaki bağlanmanın zayıflığı, lignoselülozik maddenin polimer içerisinde homojen olarak dağılmasını engellemekte ve dolayısıyla bölgesel yığılmalara neden olmaktadır (Carroll vd, 2001; Mishra ve Naik, 2005; Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Cui v.d., 2010; Kord, 2011).

Brandt ve Fridley (2003), lignoselülozik dolgu oranının artmasının levhanın akıcılığını azalttığını ve buna bağlı olarak elastikiyet modülünü arttırdığını tespit etmişlerdir. Yine lignoselülozik dolgu oranının artması ile levhanın daha sert ve gevrek hale gelmesi sonucu kopmada uzama miktarlarında azalma meydana geldiği rapor edilmiştir (Raj vd, 1989; Yam vd, 1990; Clemons, 2002; Sain ve Panthapulakkal, 2006; avdar, 2011).

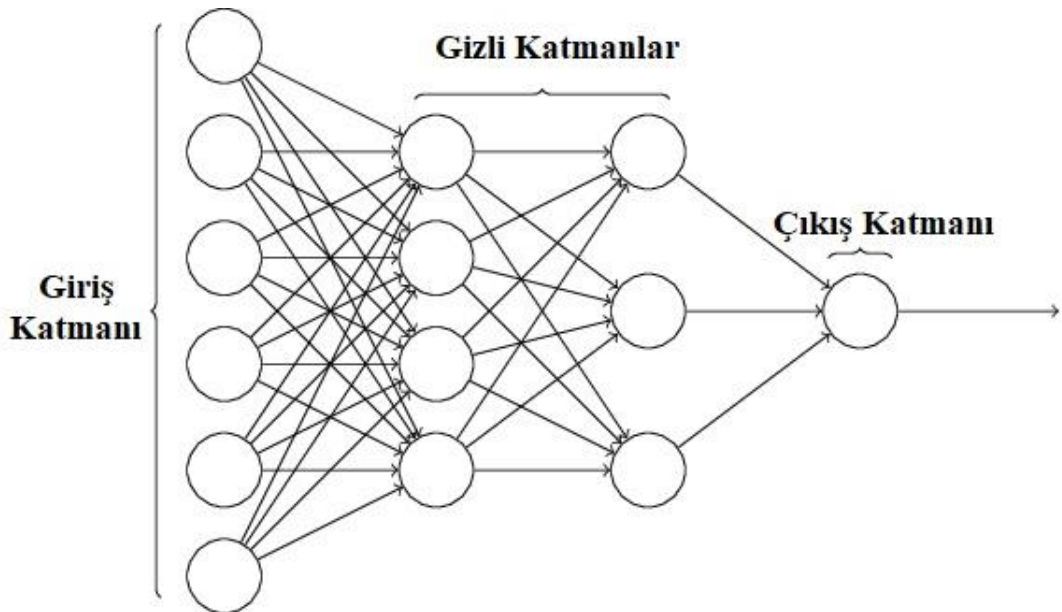
PS, buğday sapı ve fıstık kabuğu kullanarak üretilen örnekler ile aynı oranda odun unu (%30) ve PS kullanarak üretilen örneklerin mekanik özelliklerinin karşılaştırıldığı çalışmada darbe direnci dışındaki çekme ve eğilme özelliklerinde buğday sapı ve fıstık kabuğu kullanılan örneklerin daha düşük değerler elde ettiği rapor edilmiştir (Karakuş vd, 2011). HDPE ve fındık kabuğu kullanarak üretilen örneklerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada fındık kabuğu oranı artıkça eğilme ve çekmede elastikiyet modülü değerlerinde artış, eğilme ve çekme direnci değerlerinde ise azalma tespit edilmiştir. Çalışmada bağlayıcı ajan (MAPE) kullanımı ile darbe direnci dışındaki çekme ve eğilme özelliklerinde iyileşmeler olduğu rapor edilmiştir (ukur, 2016).

2.3. YAPAY SİNİR AğLARI (YSA)

YSA, deneysel bilgiler edinebilen, depolayabilen ve kullanabilen hücresel sistemlerdir (Zurada, 1992). YSA'lar, insan beyninin ve sinir sistemlerinin bilgileri işleme ve saklama kabiliyetinden ilham almaktadır. YSA'lar, kendini uyarlayabilen, kendi kendine organize olabilen ve gerçek zamanlı öğrenebilen işlemci elemanlardan (nöronlar) oluşan, non-lineer yapılarıdır (McCulloch ve Pitts, 1943). Sinir ağları genel

olarak birbirine bağılı ve mevcut sorunu çözmek için birlikte çalışan nöronlardan oluşur. Sinir ağındaki her bir nöron genellikle birden fazla girişe ve tek çıkışa sahip olan bir transfer işlevidir (Ding vd, 2013). Nöron sayısı, ağırlık değerleri ve her bir katmanın transfer fonksiyonu, ağı yaklaşımını betimlemektedir. YSA'lar, deneysel verileri kullanarak genellemeler elde etmek, giriş ve çıkış değerleri arasında doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri çözmek için eğitilirler. YSA'lar günümüzde matematik, ekonomi, tıp, meteoroloji, mühendislik başta olmak üzere farklı alanlarda başarı ile kullanılmaktadır (Kalogirou, 2001). Bununla birlikte YSA'lar sınıflandırma, optimizasyon ve tahmin gibi birçok mühendislik probleminde de kullanılabilmektedir (Mohandes vd, 2004).

YSA, bağlantı ağırlıkları değiştirilerek eğitilir ve öğrenir. Öğrenme süreci; denetimli, denetimsiz ve takviyeli öğrenme olmak üzere üç şekilde gerçekleştirilebilir (Ding vd, 2013). İleri beslemeli bir sinir ağı, aynı katmandaki nöronlar birbirinden bağımsız ve her biri bir önceki ve bir sonraki katmanın nöronları ile bağlantılı nöronlardan oluşan bir ağ mimarisine sahiptir (Şekil 2.7). İleri beslemeli bir YSA'da geri besleme süreci bulunmamakta, bilgi akışı giriş katmanından gizli katmanlara, gizli katmanlardan da çıkış katmanına geçiş yaparak işlenmektedir. Geri beslemeli YSA'da ise bir geri besleme süreci bulunmaktadır. Bu ağ yapısında bir nöronun (sinir hücresinin) çıkışı diğer her bir nöronun girişi ile bağlantılıdır (Elmas, 2007).



Şekil 2.7. Çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı (Ribeiro vd, 2021).

Genel bir YSA yapısı bir giriş katmanı, bir veya birden fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşmaktadır (Sözen vd, 2005). Standart problemlerde belli sayıda nöron içeren bir adet gizli katman genel olarak yeterli olsa da, daha karmaşık problemler için birden fazla gizli katman tercih edilebilmektedir (Bhanot, 2017). Sinir ağında her bir katman bir veya birden fazla girdiden veri alan ve bir çıktıyı hesaplayan nöronlardan oluşur. Nöronlar, eğitim süresince değerleri tekrarlı olarak değişen ağırlık değerleri ile birbirine bağlıdır. Çıktı değeri, transfer (aktivasyon) fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. Genel olarak en yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonları doğrusal (lineer), sigmoid, ve hiperbolik tanjant fonksiyonlarıdır. Doğrusal aktivasyon fonksiyonu, doğrusal problemleri çözmek için kullanılabilir. Toplama fonksiyonundan elde edilen sonuç, belli bir katsayı ile çarpılarak hücrenin çıktısını oluşturur. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu sürekli ve türevi alınabilir bir fonksiyon olup, girdi değerlerinin her biri için 0 ile 1 arasında bir değer üretir. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu, sigmoid fonksiyonuna benzer yapıdadır. Hiperbolik tanjant fonksiyonuna ait çıkış değerleri -1 ile +1 aralığındadır (Çelik, 2022).

Çizelge 2.1’de en yaygın kullanılan transfer fonksiyonları, Eşitlik 2.1’de ise transfer fonksiyonlarının matematiksel eşitlikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Transfer fonksiyonları (Kökten, 2019).

Transfer Fonksiyonu	Eşitlik
Doğrusal (<i>purelin</i>)	$f(z) = z$
Tanjant Sigmoid (<i>tansig</i>)	$f(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$
Logaritmik Sigmoid (<i>logsig</i>)	$f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$

$$f(z) = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b) \quad (2.1)$$

Burada; n girdi sayısını, w_i ağırlık değerini, x_i girdi değerini ve b ise eşik (bias) değerini göstermektedir.

Bir ileri beslemeli YSA'nın eğitimi sırasında, nöronlar arasındaki bağlantılara gelişigüzel değerler atanır. Sonrasında girdiler ağı tanımlanır ve bir çıktı değeri hesap edilir. Denetimli öğrenmede elde edilen çıktı değeri, hedef çıktı değeri ile karşılaştırılır ve hata oranı hesaplanır. Bağlantı ağırlıklarını güncelleyerek hatayı minimize edebilmek için geri yayılım (backpropagation) öğrenme algoritması uygulanır. Bu algoritma temel olarak, her ağırlık değişiminin son hata değerindeki etkisini hesaplar. Elde edilen hata değeri istenen seviyeye ulaşınca kadar eğitim süreci devam eder. Giriş katmanından gizli katmana ve oradan da çıkış katmanına ve geri yayılım yolu ile tekrar giriş katmanına kadar olan her bilgi geçişine bir "epoch" adı verilmektedir (Bhanot, 2017).

Tahmin modellerinin performanslarının (güvenilirlikleri) karşılaştırılması için farklı performans ölçütleri kullanılmaktadır. Tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki öngörü hataları (farklar), birtakım formüllerle modelin tahmin performansını değerlendirecek şekilde standartlaştırılır. Modelin tahmin performansının (güvenilirliği) ölçümünde; hata kareleri toplamı (sum of squared errors-SSE), hata kareleri ortalaması (mean squared error-MSE), ortalama mutlak yüzde hata (mean absolute percentage error-MAPE), ortalama mutlak hata (mean absolute error-MAE), kök ortalama kare hata (root mean squared error-RMSE) ve ortalama yüzde hata (mean percentage error-MPE) gibi hesaplamalar kullanılır (Ataseven, 2013).

Ölçülen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki regresyon analizi ve elde edilen belirlilik katsayısı (R^2) değeri de modelin geçerliliğini ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan bir kriterdir. R^2 değerinin bire (1) yakın olması hedeflenen değerler ile tahmin edilen değerler arasında güçlü bir bağlantı olduğu ve modelin iyi tahmin yaptığı anlamına gelmektedir (Bewick vd, 2003).

Karmaşık verilerin tasnif edilmesinde kullanılan YSA modellerinden birisi; ilk olarak Werbos (1974) tarafından gündeme getirilen, daha sonra Rummelhart ve McClelland (1986) tarafından geliştirilen geri yayılım ağıdır (Backpropagation Network). Geri beslemeli YSA modellerinde en az bir hücrenin çıkışı kendine veya diğer hücrelere giriş olarak verilir ve geri besleme genellikle bir geciktirme ögesi vasıtası ile yapılır. Geri besleme süreci, bir katmandaki hücreler arasında olabileceği gibi katmanlar

arasındaki hücrelerin etkileşimi ile de gerçekleşebilir. Geri beslemeli YSA modelleri bu özellikleri ile (non-lineer) doğrusal olmayan dinamik bir özelliğe de sahiptir. Dolayısıyla, geri beslemenin türüne göre farklı yapılarda ve davranışlarda geri beslemeli YSA modelleri söz konusu olabilmektedir. Yayılma (propagate) ve uyum gösterme (adapt) olacak şekilde iki işlem basamağında gerçekleştirilen Standart Backpropagation Algoritması (SBP), farklı katmanlar arasında uyumlu bir aktarma sisteminin bulunduğu çok katmanlı, ileri beslemeli ve öğreticili olmak üzere farklı yöntemlerle eğitilen bir YSA modelidir (Çetin vd, 2006).

SBP; hataları çıkıştan girişe (geriye) doğru azaltmaya çalışması sebebi ile bu ismi almıştır. Geri yayımlı öğrenme algoritması, ağ çıkışında elde edilen hata oranına göre her bir katmandaki ağırlıkları güncellemek için kullanılır. Bir geri yayımlı ağ modelinde 3 katman (giriş katmanı, gizli katman, çıkış katmanı) bulunmaktadır. Problemin özelliğine göre gizli katman sayısını arttırabilmek mümkündür (Çetin vd, 2006).

Giriş katmanı; giriş veri gruplarının ağa tanıtıldığı terminallerdir. Bu katmandaki nöron sayısı, giriş veri sayısı kadardır ve her bir giriş nöronu bir veriyi temsil eder. Bu katmandaki veri, işlenmeden bir sonraki katman olan gizli katmana geçer (Çetin vd, 2006).

Gizli katman; ağın ana işlevinin yapıldığı katmandır ve bazı problemlerde birden fazla gizli katman kullanılabilir. Gizli katman sayısı ve katmandaki nöron sayısı, çözülecek probleme göre değişebilir. Gizli katman; giriş katmanından ağırlıklandırılmış olarak aldığı veriyi probleme uygun olan bir aktivasyon (etkinlik) fonksiyonu ile işleyerek bir sonraki katmana aktarır. Bu katmanda, gerekli olan nöron sayısından daha az nöron kullanılması giriş veri setine göre daha az hassasiyette çıkış değerleri elde edilmesine sebep olur. Gereğinden fazla nöron kullanılması durumunda ise yeni veri setlerinin işlenmesinde birtakım zorluklar ortaya çıkabilir (Çetin vd, 2006).

Çıkış katmanı; YSA'nın en uçtaki katmanıdır ve gizli katman(lar)dan aldığı veriyi aktivasyon fonksiyonu ile işleyerek ağın çıktı değerini verir. Çıkış katmanında yer alan nöron sayısı, ağa tanıtılan her bir verinin çıkış sayısı kadardır. Çıkış katmanından elde

edilen değerler YSA'nın problem için elde ettiği çıkış değerleridir. Bir geri yayımlı ağ modelinde; bir katmandan başka bir katmana geçiş yaparken aradaki katmanları atlamak mümkün değildir (Çetin vd, 2006).

Giriş verileri, ağın giriş katmanında yer alan düğümlere uygulandığında çıkış katmanına gelene kadar farklı işlemlere maruz kalır. Bu işlemler sonunda elde edilen çıktı değerleri ile hedeflenen çıktı değerleri karşılaştırılır. Hedeflenen çıkış değerleri ile YSA çıkış değerleri arasındaki fark, çıktı düğümlerinin her biri için bir hata sinyali olarak algılanır. Hesap edilen hata sinyalleri, çıktı düğümlerine karşılık gelen gizli katmandaki düğümlere transfer edilir. Böylelikle gizli katmandaki düğümlerden her biri toplam hatanın bir miktarını içerir. Bu proses, katmanlardaki düğümlerin toplam hatanın belli bir kısmını içereceği şekilde giriş katmanına kadar devam eder. Hata sinyalleri baz alınarak, her düğümde bağlantı ağırlıkları güncellenir. Bu süreç, tüm verilerin tanımlanabileceği bir duruma ağın yakınsamasını sağlar (Çetin vd, 2006).

İleri besleme aşamasında, giriş katmanında bulunan nöronlar veri setlerindeki değerleri gizli katmana iletir. Gizli katmandaki nöronlar, giriş değerlerini ağırlıklandırarak toplam değeri hesap eder. Daha sonra hesap edilen değerler bir aktivasyon fonksiyonu ile işlenerek bir sonraki gizli katmana veya doğrudan doğruya çıkış katmanına iletilir (Çetin vd, 2006).

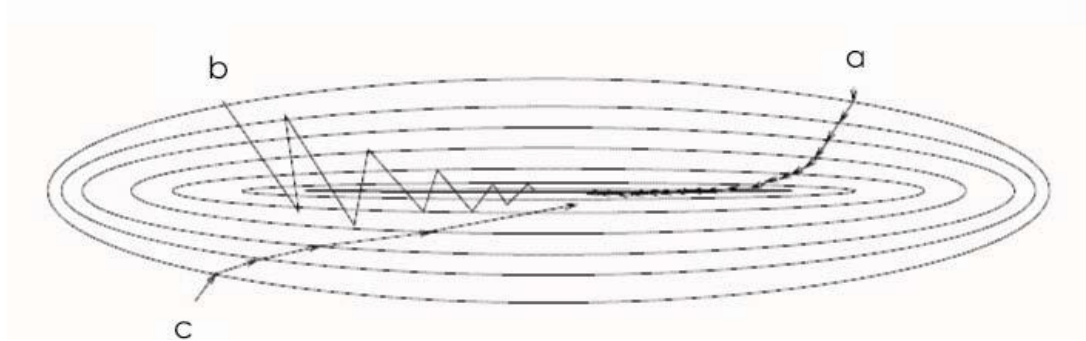
Çıkış katmanındaki nöronlar ağırlıklandırılmış değeri hesap ettikten sonra, bu değer aktivasyon fonksiyonu ile tekrar işlenerek hata değeri en düşük seviyede tutulmaya çalışılır. Hata değeri belli bir seviyeye inene dek iterasyon işlemi devam eder. Bu işlem sonunda ağın eğitim aşaması sona ermiş olur. Katmanlar arası bağlantılardaki ağırlık değerleri eğitimi tamamlanmış ağdan alınır ve deneme aşamasında kullanılmak üzere kaydedilir (Çetin vd, 2006).

SBP, YSA için önemli bir aşama olmakla birlikte bir takım pratik uygulamalar için yeterli olmamaktadır. SBP algoritmasının en büyük dezavantajı, eğitim süreçlerinin çok uzun sürmesidir (Çetin vd, 2006).

YSA'da model oluşturulurken dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri de bağlantı ağırlıklarındaki değişme miktarını kontrol eden öğrenme katsayısıdır. Öğrenme katsayısı (oranı) öğrenme sürecinin hızı ve işlevi bakımından önemlidir. YSA'nın hızı ile öğrenme gücü ters orantılıdır. Daha fazla öğrenme, daha düşük bir hız ve buna bağlı olarak daha fazla zaman anlamına gelmektedir. Buna karşılık daha fazla hız ise daha az öğrenme demektir. Sonuçta, ağırlık eğitilebilme kapasitesi öğrenme oranı ile doğru orantılıdır (Bayır, 2006).

Öğrenme oranının tespitinde; ağırlık mimarisi, karmaşıklık seviyesi, büyüklüğü, kullanılan öğrenme kuralı ve istenen doğruluk derecesi gibi faktörler etkilidir. Öğrenme fonksiyonlarının, öğrenme katsayısı için standartları vardır. Öğrenme katsayısı genel olarak 0-1 aralığı içinde seçilir. Ağırlık ağırlıkları bu katsayı kullanılarak artırılır. Öğrenme katsayısının düşük olması öğrenme sürecinin yavaş olacağı anlamına gelirken en yüksek doğruluk derecesine ulaşmayı da sağlayabilir (Yurtoğlu, 2005; Anderson ve McNeill, 1992). Öğrenme hızı, öğrenme katsayısının büyütülmesi ile artırılabilir. Fakat öğrenme katsayıları büyütüldüğünde kullanılan ağırlık mutlak minimuma ulaşamayabilir ki bu duruma da "salınım" adı verilmektedir. Yüksek öğrenme oranlarında salınımı engellemenin yollarından biri de momentum katsayısının doğru seçilmesidir (Bayır, 2006).

Momentum katsayısı bilhassa yerel çözümleri aşamayan ağırlıkların bir sıçrama ile daha iyi değerlere ulaşması için kullanılır ve 0-1 aralığında seçilir. Momentum katsayısının doğru seçilmesi ile YSA'nın öğrenme oranında belli bir hızlanma elde etmekle birlikte yerel minimuma da hızlı bir şekilde ulaşabilmektedir (Bayır, 2006). Momentum katsayısının etkisi Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Ağırlık uzayında a) Düşük öğrenme oranı b) Büyük öğrenme oranı (salınım) c) Momentum katsayısı eklenmiş büyük öğrenme oranı (Gurney, 1996).

2.3.1. Normalizasyon İşlemi

Verilerdeki ekstrem salınımları engelleyebilmek ve ağın performansını arttırabilmek için veriler ağa tanıtılmadan önce normalizasyon (ölçeklendirme) işlemine tabi tutulur. Veri seti normalizasyon işlemi ile geçerli eksen etrafında sıkıştırılır. Veri seti aşırı salınım içeren veya girdiler arasında ekstrem değerler bulunan problemler YSA modellerini olumsuz yönde etkileyip ve ağı yanlış yönlendirebilir. Bu sebeple verilerin ölçeklendirilmesi ([0,1] veya [-1,1] aralıklarına) önerilir (Saraç, 2004). Bütün girdi değerlerinin belli aralıklarda ölçeklendirilmesi hem farklı çalışmalardan gelen verilerin aynı ölçek kapsamında değerlendirilmesini hem de yanlış girilen ekstrem değerlerin etkisinin ortadan kaldırılmasını sağlar (Öztemel, 2003). Normalizasyon, farklı teknikler kullanılarak yapılabilen bir ön işlemdir. Literatürde; Z-Score, Medyan, Sigmoid, Min ve Max kuralı gibi farklı normalizasyon seçenekleri mevcuttur (Jayalakshmi ve Santhakumaran, 2011).

2.3.2. YSA'nın Avantaj ve Dezavantajları

YSA metodolojisi; veri setinden öğrenebilme, genelleme yapabilme ve farklı sayıda değişkenle çalışabilme gibi çok önemli özelliklere sahiptir. YSA'nın avantajları;

1. YSA'nın makine öğrenmesini gerçekleştirebilmesi,
2. Bilgilerin ağıın tamamında saklanması,
3. Verileri kullanarak öğrenebilmesi ve daha önce deneyimlenmemiş veriler hakkında tahmin yürütebilmesi,
4. Algılamaya özgü olaylarda kullanılabilmesi,
5. Örüntü ilişkilendirme, sınıflandırma ve tamamlama yapabilmesi,
6. Kendi kendine öğrenebilme ve organize etme yeteneğinin olması,
7. Eksik bilgi ile çalışabilmesi, hata toleransına sahip olması,
8. Dereceli bozulma gösterebilmesi,
9. Her işlemcinin kendi belleğine sahip olduğu dağıtık belleğe sahip olmasıdır.

Dezavantajları ise;

1. Ağın davranışlarının zaman zaman açıklanamaması,
2. Uygun ağ yapısının tespit edilmesinde belli bir kuralın olmaması,
3. Ağın parametrelerinin belirlenmesinde belli bir kuralın olmaması,
4. Öğrenilecek problemin ağa tanıtılması ve kullanılan donanımın probleme bağımlı olması,
5. Ağın eğitiminin ne zaman bitirileceğine dair belirli bir yöntemin olmamasıdır (Gönül vd, 2015).

Tüm bu bilgiler ışığında literatürde YSA modelinin güvenilirliğini araştıran çalışmalardan bazılarında Kökten (2019), biyoyağ verimliliğini ileri beslemeli ve geri yayımlı ağ yapısı kullanarak YSA’da modellemiş ve R^2 değerini 0,95, hata değerlerinden MSE değerini 0,00058, MAPE değerini ise %3,7 olarak tespit etmiş ve yüksek bir tahmin oranı bulduğunu rapor etmiştir. Nasri ve Toubal (2024) doğal elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerini YSA’da geri yayılım algoritması kullanarak eğitmiş ve test etmişler, çalışma sonucunda R^2 değerini 0,990, MAPE değerlerini farklı mekanik özelliklere göre %3-6 arasında tespit etmişlerdir. Tosun ve Sofuoğlu (2023) yoğunlaştırılmış ağaç malzemenin yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için YSA kullanmışlar, eğitim, doğrulama ve test için ortalama R^2 değerini 0,92, modelin hata değerlerinden MSE değerini 0,0019914, MAPE değerini ise %6,6 olarak rapor etmişlerdir. Odunun yüzey pürüzlülüğünün ve adezyon direncinin ileri beslemeli ve geri yayımlı çok katmanlı YSA modelleri kullanarak tahmin edilmesine ilişkin yapılan çalışmalarda, 0,960-0,990 arasında yüksek R^2 değerleri ile %1,5-4,4 (MAPE) ve 0,11-0,95 (RMSE) gibi düşük hata oranları elde edildiği rapor edilmiştir (Özşahin ve Singer, 2019; İlçe ve Singer, 2019). Sözen vd (2018) nanokompozitlerdeki deformasyonu derin öğrenme modeli ve YSA ile tahmin etmişler ve R^2 değerlerini sırasıyla 0,844 ve 0,822 bulmuşlardır. Hata fonksiyonlarından MAPE’yi ise sırasıyla %5,1 ve %5,5 tespit etmişlerdir. Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini YSA’da (geri yayımlı çok katmanlı perceptron mimarisi) tahmin etmek için yapılan çalışmada R^2 değerinin 0,990, MSE değerinin ise 0,0001-0,0006 arasında tespit edildiği belirtilmiştir (Atuanya vd, 2014).

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOD

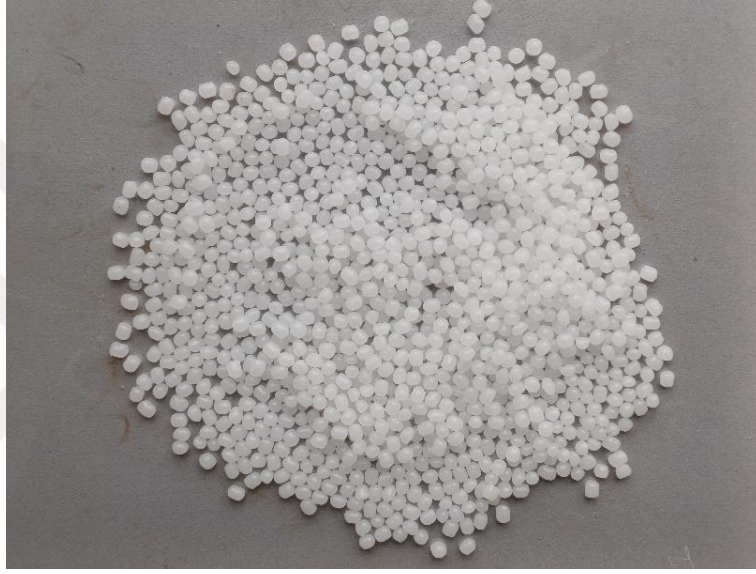
Bu tez çalışması iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde deneysel çalışmalardan önce YSA'nın odun polimer kompozitlerinin mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde başarılı olup olmayacağını belirleyebilmek amacıyla literatüre dayalı bir model geliştirilmiştir. Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine yönelik literatür araştırması yapılmış ve çalışmalardan elde edilen değerler YSA modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Elde edilen modellerin performanslarını belirlemek için daha önce modellerin eğitim ve test aşamasında yer almayan girdi parametreleri kullanılarak çıktı değerleri tahmin edilmiştir. Aynı girdi parametreleri baz alınarak test numuneleri üretilmiş ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin üretiminde literatürde en çok kullanılan polimer olan HDPE, bağlayıcı ajan olarak maleik anhidrit aşı polietilen (MAPE) ve dolgu malzemesi olarak sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) tercih edilmiştir.

İkinci bölümde ise son yıllarda üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı ve üretim hacmi genişleyen PLA kullanılmıştır. PLA'nın odun polimer kompozitlerde kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar sınırlı olduğundan, bu kompozitlerin mekanik özellikleri hakkındaki verilerde sınırlıdır. Bu nedenle PLA matrisli odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin YSA ile modellenmesinde kullanılan verilerin tamamı gerçekleştirilen mekanik testler sonucu elde edilmiştir. Test numunelerinde polimerin yanı sıra bağlayıcı ajan olarak maleik anhidrit modifiyeli etilen elastomer (Lushan AR493) ve dolgu malzemesi olarak sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) kullanılmıştır.

3.1. MATERYAL

3.1.1. Kimyasal Malzemeler

Çalışmada kullanılan polimerlerden biri olan KT 10000 UE ticari adlı HDPE, Özgür Metal Kalıp ve Plastik San. Tic. LTD. ŞTİ. (Bursa/Türkiye)’den temin edilmiştir. Granül haldeki (Şekil 3.1) HDPE polimere ait özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

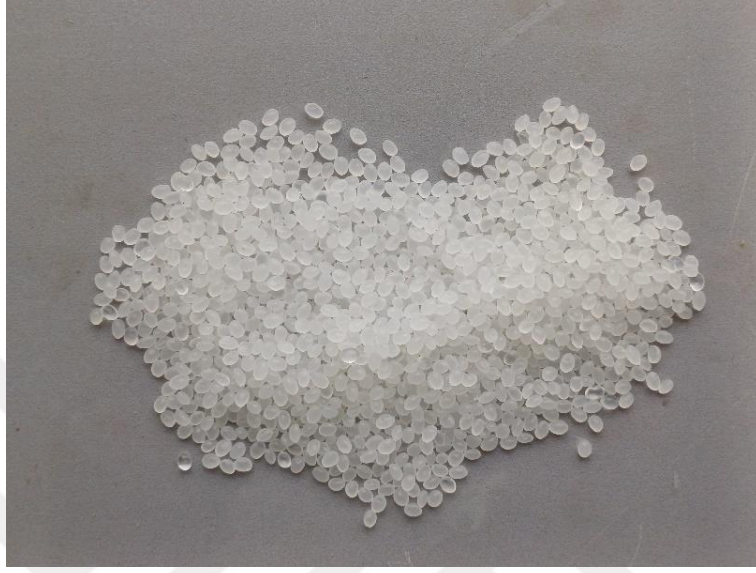


Şekil 3.1. Granül haldeki HDPE.

Çizelge 3.1. HDPE özellikleri (Teknik bilgiler broşürü).

Yoğunluk (ASTM D792)	0,964 g/cm ³
Eriyik akış indeksi-190 °C/2,16 kg, (ISO 1133)	8 g/10 dk
Eriyik akış indeksi-190 °C/5 kg, (ISO 1133)	22 g/10 dk
Çekme direnci için esneklik sınırı (ASTM D638)	4210 psi (29 Mpa)
Çekme direnci için kırılma sınırı (ASTM D638)	4640 psi (32 Mpa)
Çekme uzama yüzdesi (ASTM D638)	%800
Elastikiyet modülü (ASTM D790)	152000 psi (1050 Mpa)
Darbe direnci (ASTM D 1822)	77 kJ/m ²

Çalışmada kullanılan polimerlerden bir diğeri, Luminy L105 ticari adlı PLA, Kumru Kimya San. ve Tic. LTD. ŞTİ. (İstanbul/Türkiye)'den temin edilmiştir. Granül haldeki (Şekil 3.2) PLA polimere ait özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

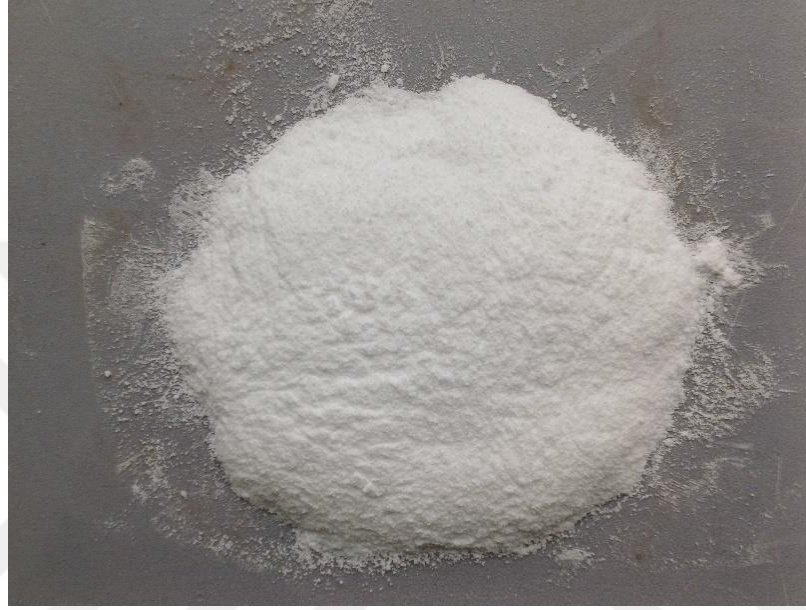


Şekil 3.2. Granül haldeki PLA.

Çizelge 3.2. PLA özellikleri (Ürün bilgilendirme kitapçığı).

Yoğunluk	1,24 g/cm ³
Eriyik akış indeksi-210 °C/2,16 kg, (ISO 1133-A)	70 g/10 dk
Eriyik akış indeksi-190 °C/5 kg, (ISO 1133-A)	30 g/10 dk
Stereokimyasal saflık	≥ 99%
Görünüş	Kristal beyaz pelet
Erime sıcaklığı (DSC)	175 °C
Camsı geçiş sıcaklığı (DSC)	60 °C
Çekmede elastikiyet modülü (ISO 527-1)	3500 Mpa
Çekme direnci (ISO 527-1)	50 Mpa
Kopma anındaki uzama (ISO 527-1)	≤5%
Charpy çentikli darbe direnci (ISO 179-1eA)	≤5 kJ/m ²
Darbe direnci (ASTM D 1822)	77 kJ/m ²

Çalışmada, polimer ile dolgu malzemesi arasındaki bağlantıyı güçlendirmek için kullanılan bağlayıcı ajanlardan biri olan PE MA 4221 ticari adlı bağlayıcı ajan, Clariant Türkiye Boya Kimyevi Maddeler ve Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İstanbul/Türkiye)'den temin edilmiştir. Toz haldeki (Şekil 3.3) PE MA bağlayıcı ajana ait özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

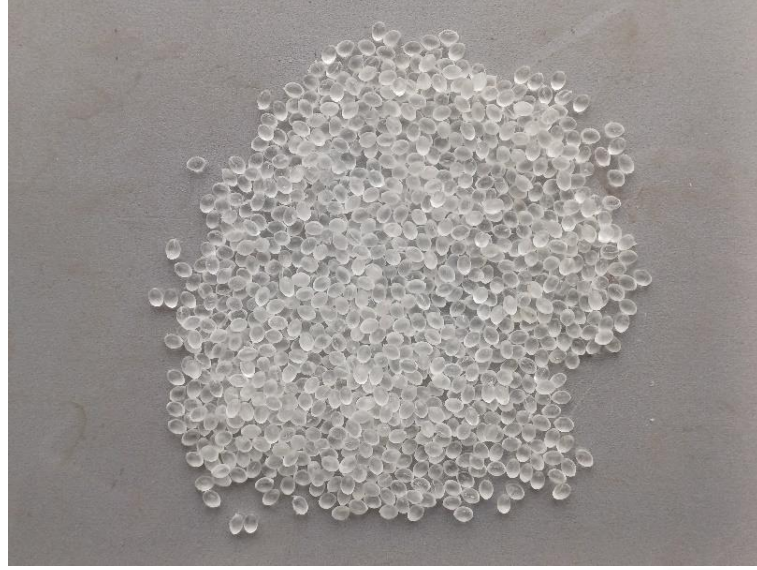


Şekil 3.3. Toz haldeki maleik anhidrit aşılı polietilen.

Çizelge 3.3. Maleik anhidrit aşılı polietilen özellikleri (Ürün teknik bilgi sayfası).

Görünüş (QM-AA-634)	beyaz ince taneli
Asit değeri (QM-AA-351a)	16 - 20 mg KOH/g
Yoğunluk (ISO 1183)	0,97-0,99 g/cm ³
Akışkanlık noktası (ASTM D 3954)	120-126 °C
Viskozite (QM-AA-158 at 140°C)	80 - 200 mPa·s

Çalışmada kullanılan Lushan AR493 ticari adlı diğer bağlayıcı ajan Hayim Pinhas A.Ş. (İstanbul/Türkiye)'den temin edilmiştir. Granül haldeki (Şekil 3.4) Lushan AR493 bağlayıcı ajana ait özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Granül haldeki maleik anhidrit modifiyeli etilen elastomer.

Çizelge 3.4. Maleik anhidrit modifiyeli etilen elastomer özellikleri (Ürün bilgi formu).

Görünüş	Doğal renk veya açık sarı granül
Yoğunluk (ASTM D792)	0,8-1,0 g/cm ³
Eriyik akış indeksi (190°C/2.16 Kg) (ASTM D1238)	0,2 g/10 dk
Erime sıcaklığı (DSC) (ASTM D3418)	<170 °C
Aşılama Oranı (Lushan metodu)	H*
Sertlik (Shore A) (ASTM D2240)	67
Suda çözünürlük	İhmal edilebilir

* Aşılama oranı $\geq$ % 1,0 ise H, aşılama oranı $\geq$ % 0,5 ise M.

3.1.2. Odun Unu

Bu çalışmada kullanılan ağaç türü seçiminde, piyasa değeri yüksek ve sık kullanılan türlerin fire olarak artan talaşlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır ve bu amaçla Sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) tercih edilmiştir. Kereste üretimi sırasında ortaya çıkan ve herhangi bir işlem görmeyen testere talaşı (Şekil 3.5) Bağdatlı kerestecilik emprenye ve ekleme tesisleri (Karabük/Türkiye)’nden temin edilmiştir.



Şekil 3.5. Sarıçam odunu talaşı.

3.2. METOD

İki bölümden meydana gelen bu çalışmanın birinci bölümünde odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine yönelik literatür araştırması yapılmış; benzer üretim yöntemleri kullanılan 56 farklı çalışmadan elde edilen veriler ile YSA modelleri geliştirilmiştir. Her bir mekanik özellik için en yüksek R^2 değerine sahip modellerin performanslarını belirlemek için daha önce eğitim ve test aşamalarında kullanılmamış girdi parametreleri kullanılarak çıktı değerleri tahmin edilmiştir. Aynı girdi parametreleri ile HDPE, bağlayıcı ajan ve sarıçam odunu kullanılarak test numuneleri üretilmiş ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Deneylerden ve YSA modellerinden elde edilen sonuçlar RMSE, MAPE hata değerleri ve R^2 değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

İkinci bölümde ise polimer olarak piyasada son yıllarda üretim hacmi genişleyen PLA, bağlayıcı ajan olarak maleik anhidrit modifiyeli etilen elastomer ve dolgu malzemesi olarak sarıçam kullanılmış ve farklı girdi parametreleri (dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu, bağlayıcı ajan kullanımı) dikkate alınarak tam faktöriyel olacak şekilde 48 farklı grup numune üretilmiştir. Numunelere eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci testleri uygulanmış, elde edilen veriler kullanılarak YSA'da modeller oluşturulmuş ve modellerin elde ettiği doğruluk oranları ve performansları değerlendirilmiştir.

3.2.1. Odun Polimer Kompozitlerin YSA Modellerinin Oluşturulması

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan (karmaşık) girdi ve çıktı korelasyonlarını özeyilme yeteneğinden dolayı (Öztemel, 2003), odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini modellemek amacıyla YSA yönteminden yararlanılmıştır.

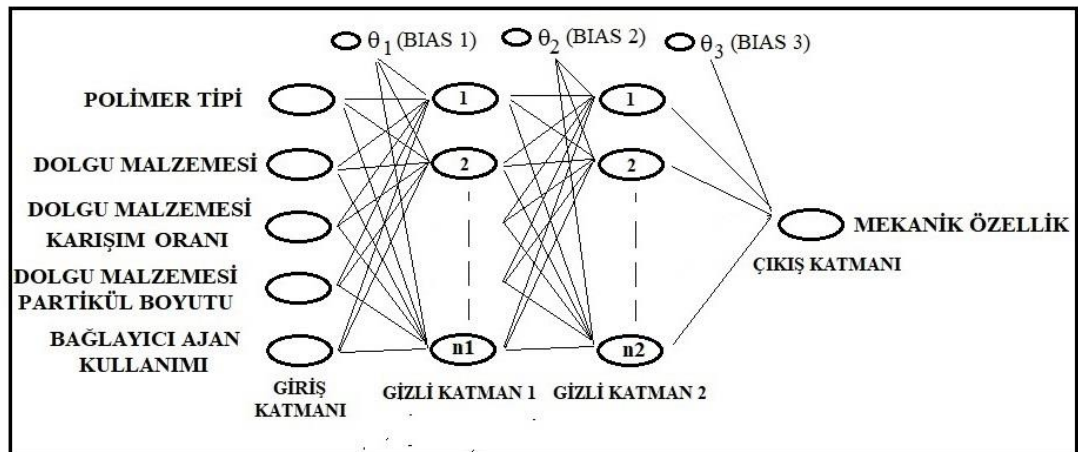
Çalışmanın birinci bölümünde yer alan YSA modellerini oluşturmak amacı ile yararlanılan veriler, odun polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine literatürdeki deneysel çalışmalardan seçilmiştir. Literatürde odun polimer kompozit malzemelerin çoğunlukla eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü ve çekme direnci değerlerinin incelendiği, bununla birlikte dolgu malzemesi oranı, partikül boyutu ve bağlayıcı ajan kullanımının bu mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda darbe direnci değerleri de incelenmiş olmakla birlikte kullanılan standartların ve yöntemlerin farklı olması, aynı yöntemi kullanan çalışmaların çok az olması ve dolayısıyla modelleme için yeterli veriye ulaşılamaması nedeni ile darbe direnci çalışmanın bu bölümüne dahil edilmemiştir. Çizelge 3.5 bu tez çalışmasının birinci bölümünde yer alan YSA modellerini oluşturmak için yararlanılan çalışmaları ve bu çalışmalarda hangi mekanik özelliklerin incelendiğini göstermektedir. Bu izelgede yer alan çalışmalardaki veriler kullanılarak YSA modellerinin girdi parametreleri ve çıktı değerleri belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda farklı mekanik özellikler üzerine araştırmalar yapıldığı için her bir mekanik özellik için ayrı bir model oluşturulmuştur. Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen temel faktörler olması sebebi ile polimer çeşidi, dolgu malzemesi türü, dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu ve bağlayıcı ajan kullanımı girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. ıktı parametresi olarak ise ilgili mekanik özellik dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.5. YSA modelinde yararlanılan çalışmalar.

No	Verileri kullanılan çalışmalar	ÇD	ÇEM	ED	EEM	No	Verileri kullanılan çalışmalar	ÇD	ÇEM	ED	EEM
1	Ratanawilai ve Taneerat, (2018)	+	+	+	+	29	Ghahri vd, (2014)			+	+
2	Turku vd, (2017)	+	+	+	+	30	Gozdecki vd, (2012)	+	+	+	+
3	Adhikary vd, (2008)	+	+	+	+	31	Khonsari vd, (2015)			+	+
4	Fabiyi ve McDonald, (2010)			+	+	32	Bledzki ve Faruk, (2003)	+	+	+	+
5	Kaymakçı, (2015)	+	+	+	+	33	Turku vd, (2018)	+	+	+	+
6	Nourbakhsh ve Ashori, (2010)	+	+			34	Gosselin vd, (2006)		+		+
7	Koohestani vd, (2017)	+	+	+	+	35	Homkhiew vd, (2018)	+	+	+	+
8	Stark ve Rowlands, (2002)	+	+	+	+	36	Najafi vd, (2006)	+	+	+	+
9	Rafighi vd, (2014)	+		+	+	37	Nourbakhsh ve Ashori, (2009)	+		+	
10	Stark ve Berger, (1997a)	+	+	+	+	38	Bouafif vd, (2009)	+	+	+	+
11	Ndiaye vd, (2010)	+		+	+	39	Bledzki vd, (2002)	+			
12	Stark ve Berger, (1997b)	+	+	+	+	40	Prachayawarakorn vd, (2006)	+	+	+	+
13	Moreno ve Saron, (2017)	+	+			41	Atuanya vd, (2014)	+	+	+	+
14	Mbarek, (2011)	+	+			42	Balasuriya vd, (2001)	+	+	+	+
15	Oksman ve Clemons, (1997)	+	+			43	Murayama vd, (2019)	+		+	+
16	Arwinfar vd, (2016)	+	+	+	+	44	Rasat vd, (2013)		+	+	+
17	Effah vd, (2018)	+	+			45	Ayrilmis vd, (2015)	+	+	+	+
18	Haque vd, (2019)	+	+			46	Ge vd, (2018)	+		+	+
19	Martins vd, (2017)	+				47	Gezer vd, (2016)	+	+	+	+
20	Leu vd, (2012)	+	+	+	+	48	Soccalingame vd, (2015)			+	+
21	Chaudemanch vd, (2018)	+	+	+	+	49	Hyvärinen vd, (2019)	+	+	+	+
22	Delviawan vd, (2019)	+			+	50	Keskisaari vd, (2016)			+	+
23	Kamdern vd, (2004)			+	+	51	Keskisaari ve Kärki, (2018)			+	+
24	Bengtsson vd, (2006)			+	+	52	Badji vd, (2017)	+	+		
25	Zhang vd, (2018)	+	+	+	+	53	Homkhiew vd, (2014)			+	+
26	Karmarkar vd, (2007)	+	+	+		54	Tajvidi vd, (2006)			+	+
27	Najafi ve Englund, (2013)	+	+	+	+	55	Nitz vd, (2000)	+	+		
28	Ghahri vd, (2012)			+	+	56	Raj vd, (1990)	+	+		

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci, EEM: Eğilmede elastikiyet modülü

Çalışmanın birinci bölümde kullanılan YSA modellerinin ağ mimarisi (Şekil 3.6) bir giriş katmanı, iki gizli katman ve bir çıkış katmanından ($5-n_1-n_2-1$) oluşmaktadır. Giriş katmanındaki 5 nöron modelin girdi parametrelerini (polimer çeşidi (HDPE, LDPE, PP), dolgu malzemesi türü (yapraklı, iğne yapraklı), dolgu malzemesi karışım oranı (%0-100), dolgu malzemesi partikül boyutu (10-200 mesh), bağlayıcı ajan kullanımı (kullanıldı, kullanılmadı), çıktı katmanındaki bir nöron ise modelin bağımlı parametresi olan mekanik özelliği temsil etmektedir. Gizli katman nöron sayısı 5-20 arasında denenmiş ve en iyi performans gösteren YSA modelleri belirlenmiştir. YSA eğitimindeki girdi çeşitliliği ve buna bağlı olarak tahmin edilen mekanik özelliklerdeki değişkenlik nedeniyle daha çok değer alabilen, daha hızlı öğrenen ve eğitim esnasında yakınsamayı hızlandırabilme gibi üstünlüklerinden dolayı daha istikrarlı bir eğitim vaat eden (Szandala, 2021) tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonunun (Tanh) (Eşitlik 3.1) kullanılması uygun görülmüştür. YSA modellenirken hataları geriye doğru ve çıkıştan girişe doğru azaltabilmesi (Gönül vd, 2015) sebebi ile ileri beslemeli ve geri yayımlı ağ yapısı tercih edilmiştir. Verilerin %80'i modelin eğitiminde, %20'si ise test edilmesinde kullanılmak üzere ayrılmıştır. YSA modelleri, MATLAB® R2017b yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Oluşturulan modellerin performanslarını belirlemek amacıyla daha önce ağa tanıtılmamış ve modellerin eğitim ve test sürecinde kullanılmamış girdi parametreleri kullanılarak çıktı değerleri tahmin edilmiştir. Aynı girdi parametreleri baz alınarak test numuneleri üretilmiş ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Deneylerden ve YSA modellerinden elde edilen sonuçlar RMSE, MAPE ve R^2 değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.6. Odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için geliştirilen YSA mimarisi.

Odun polimer kompozit numunelerin mekanik özelliklerini YSA’da modellerken kullanılan parametreler Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Odun polimer kompozitlerin mekanik özellik tahmininde kullanılan YSA model parametreleri.

Ağ yapısı	İleri beslemeli geri yayılım ağı
Giriş katmanındaki nöron sayısı	5
Gizli katman sayısı	2
Gizli katmandaki nöron sayısı	6-13
Çıkış katmanındaki nöron sayısı	1
Aktivasyon fonksiyonu	Tanjant hiperbolik fonksiyon
Performans fonksiyonu	RMSE - MAPE
İterasyon sayısı	100000-205000
Veri ayırma	80:20

YSA modellerinde aktivasyon (etkinlik) fonksiyonu olarak kullanılan tanjant hiperbolik fonksiyon Eşitlik 3.1’de verilmiştir.

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3.1)$$

YSA modelleri öğrenme algoritmasında kullanılan ağırlık ve bias değerlerinin değişiminin hesaplanması (Duman vd, 2018) Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3’te verilmiştir.

$$\Delta w_{st}(k) = \alpha_{st} \Delta w_{st}(k-1) + \eta_{st} \left(- \frac{\nabla E}{\nabla e} \frac{\nabla e}{\nabla y_t} \frac{\nabla y_t}{\nabla c_t} \frac{\nabla c_t}{\nabla w_{st}} \right) \quad (3.2)$$

$$\Delta q_t(k) = \alpha_{st} \Delta q_t(k-1) + \eta_{st} \left(- \frac{\nabla E}{\nabla e} \frac{\nabla e}{\nabla y_t} \frac{\nabla y_t}{\nabla c_t} \frac{\nabla c_t}{\nabla w_{st}} \right) \quad (3.3)$$

Bu eşitliklerde, Δw_{st} ağırlık değerlerinin değişimini, $\Delta \Theta_t$ bias değerlerinin değişimini, α_{st} momentum katsayısını, η_{st} ise öğrenme katsayısını ifade etmektedir.

YSA modellerinde salınımı önlemek ve yerel minimuma ulaşmak için kullanılan momentum ve öğrenme katsayıları 0-1 aralığında seçilir (Duman vd, 2018). YSA modellerinde en yüksek R^2 değerini elde etmek için yapılan denemeler sonucunda momentum ve öğrenme katsayıları 0,0001 olarak belirlenmiştir.

Geri yayılım modelinde girdi parametreleri ve çıktı değerlerinin ölçeklendirilmesi YSA'nın performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Cay, 2012). Bu sebeple YSA modellerinde kullanılan giriş ve çıkış veri setleri, eğitim ve test sürecinden önce normalize edilmiş (Eşitlik 3.4) ve verilerin 0 ile 1 arasında değerler alması sağlanmıştır.

$$V_N = \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte;

V_N = Normalize edilmiş veriyi,

V_i = Girdi değerini,

V_{min} = Girdi seti içerisinde yer alan en küçük sayıyı,

V_{max} = Girdi seti içerisinde yer alan en büyük sayıyı göstermektedir.

Oluşturulan YSA modellerinin eğitim ve test aşamalarındaki hata değerleri Eşitlik 3.5'te verilen RMSE değeri ile; doğruluk oranları ise eşitlik 3.6'da verilen R^2 değeri ile tespit edilmiştir.

$$RMSE(\chi', \chi) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c'_i - c_i)^2} \quad (3.5)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum (c_i - c'_i)^2}{\sum (c'_i)^2} \right) \quad (3.6)$$

Bu eşitliklerde, c_i gözlemlenen değeri, c'_i tahmin edilen değeri, N ise toplam numune sayısını ifade etmektedir.

YSA modellerinin verdiği çıktı değerleri de normalize edilen değerler gibi 0-1 arasındadır. Bu normalize değerler Eşitlik 3.7 kullanılarak gerçek değerlerine dönüştürülmüştür.

$$X_{po} = X_p(X_{imax} - X_{imin}) + X_{imin} \quad (3.7)$$

Bu eşitlikte X_{po} tahmin edilen değeri (N/mm²), X_p normalize tahmin değerini, X_{imax} en yüksek girdi değerini (N/mm²), X_{imin} (N/mm²) ise en küçük girdi değerini ifade etmektedir.

Modellerin test edilirken yüksek R² değerleri elde etmesi ancak iyi bir eğitim ve öğrenme süreci ile mümkündür. Modellerin öğrenme performansları, iterasyon sayısına göre RMSE hata değerlerindeki değişimi gösteren öğrenme eğrileri aracılığı ile değerlendirilmiştir.

3.2.2. Odun Polimer Kompozitlerin YSA Modellerinin Tahmin Performanslarının Belirlenmesi

Modellerin tahmin performanslarını belirlemek için daha önce ağa tanıtılmamış girdi değerleri kullanılarak test numuneleri hazırlanmış ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu testler için polimer olarak HDPE, dolgu maddesi olarak sırcam odunu ve bağlayıcı ajan olarak PE-g-MA kullanılmış ve numunelerin karışım oranları bölüm 3.2.3'te detaylı olarak verilmiştir. Aynı girdi değerleri kullanılarak modellerin verdiği tahmin değerleri ile test sonuçları R², MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) (Eşitlik 3.8) ve RMSE değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler YSA'da modellenerek modellerin tahmin performansları değerlendirilmiştir.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_{ie} - X_{po}|}{X_{ie}} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

Eşitlikte X_{ie} deneysel değerleri, X_{po} tahmin değerlerini, n ise kullanılan numune sayısını göstermektedir.

3.2.3. Test Numunelerinin Hazırlanması

YSA modellerinin performanslarını belirlemek için üretilen HDPE-odun kompozit numunelerin bileşimi Çizelge 3.7’de verilmiştir. Bileşimdeki oranlar daha önce ağa tanıtılmamış ve ağın eğitilip test edilmediği oranlardır. Bu amaçla dolgu maddesi olarak kullanılan sarıçam odun talaşı sarsak elekte (LOYKA ESM-200) (Şekil 3.7a) sırası ile 30-35-100-120 mesh eleklerde elenmiştir. 30-35 mesh ve 100-120 mesh elekler arasında kalan farklı partikül büyüklüklerindeki %40-50 rutubete sahip odun unları $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’deki kurutma fırınında (NÜVE KD 400) (Şekil 3.7b) değişmez ağırlığa gelinceye kadar (yaklaşık 120 saat) kurutulmuştur. Granül şeklinde temin edilen HDPE, öğütme makinesinde (Elmas Makine, Türkiye) (Şekil 3.8a) öğütülerek toz hale getirilmiş ve elenerek talaş ile aynı partikül boyutlarına getirilmiştir. Toz halde temin edilen bağlayıcı ajan (MAPE) topaklanmış kısımların kullanılmaması için sarsak elekte elenmiş ve elenen kısımlar 60°C ’deki kurutma fırınlarında (NÜVE FN 055) (Şekil 3.8b) (yaklaşık 48 saat) değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. <https://lab.karabuk.edu.tr/laboratuvar.aspx?val=25>

Çizelge 3.7. HDPE-odun kompozit numunelerin bileşim oranları.

Kompozit malzeme kodu	HDPE polimer oranı (%)	Sarıçam dolgu malzemesi oranı (%)	Bağlayıcı ajan oranı (%)	Dolgu malzemesi partikül boyutu (Mesh)
67H30S3M-30	67	30	3	30
70H30S-30	70	30	0	30
67H30S3M-120	67	30	3	120
70H30S-120	70	30	0	120
52H45S3M-30	52	45	3	30
55H45S-30	55	45	0	30
52H45S3M-120	52	45	3	120
55H45S-120	55	45	0	120



(a) (b)
Şekil 3.7. (a) Sarsak elek (b) Kurutma fırını.



(a) (b)
Şekil 3.8. (a) Öğütme makinesi (b) Kurutma fırını.

Aynı partikül büyüklüklerinde tam kuru ağırlığa getirilen dolgu maddesi, polimer ve bağlayıcı ajan, her bir grup için numune bileşim oranları dikkate alınarak çok yönlü mekanik karıştırıcıda (Şekil 3.9) 30 dk. karıştırılmış ve karışım homojen bir hale getirilmiştir. Elde edilen karışım çift vidalı extruder makinesinde (vida çapı:18 mm; L/D: 44; devir:20 rpm) (Polartek Polymer Research Technologies Ind. Trade Co. Ltd., İstanbul, Türkiye) (Şekil 3.10) polimerin erime sıcaklığına uygun olacak şekilde filament formuna getirilmiş ve kırma makinesinde (Şekil 3.11) kırılarak granül hale dönüştürülmüştür. Her numune grubu için çift vidalı extruder makinesinin ısıtma hücrelerindeki sıcaklık değerleri ve besleme hızları Çizelge 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.9. Mekanik karıştırıcı.



Şekil 3.10. Çift vidalı extruder makinesi.



Şekil 3.11. Kırma makinesi.

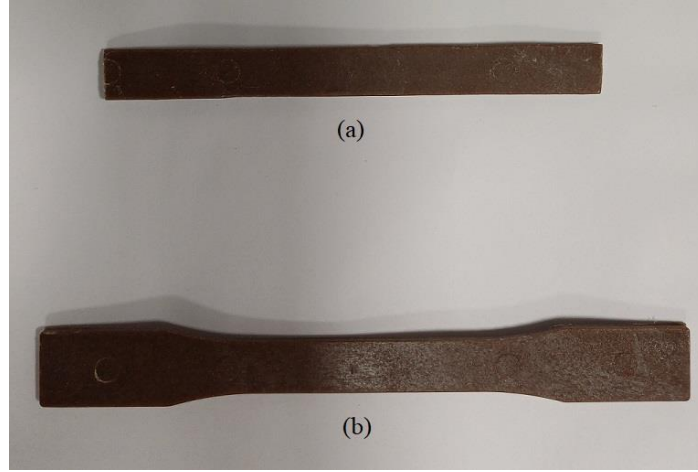
Çizelge 3.8. Çift vidalı extruder makinesi uygulama sıcaklıkları ve besleme hızları.

Kompozit Malzeme Kodu	Sıcaklıklar (°C)				Besleme Hızı (dev/dk)
	1.Hücre (Giriş)	2. Hücre	3-10. Hücre	11.Hücre (Çıkış)	
67H30S3M-30	80	150	170	180	40
70H30S-30	80	150	170	180	40
67H30S3M-120	80	140	160	170	50
70H30S-120	80	140	160	170	50
52H45S3M-30	80	150	180	190	40
55H45S-30	80	150	180	190	40
52H45S3M-120	80	140	170	180	50
55H45S-120	80	140	170	180	50

Çekme testi numuneleri (tip 1) ASTM D638 (2014) standardına göre, eğilme testi numuneleri ise ASTM D790 (2003) standardına göre enjeksiyon kalıplama makinesinde (Jiangsu Tianyuan Testing Equipment Co. LTD., China) (Şekil 3.12) üretilmiştir. Her grup için 10 adet çekme direnci ve 10 adet eğilme direnci örneği olmak üzere 8 grup için toplamda 160 adet numune hazırlanmıştır (Şekil 3.13). Enjeksiyon kalıplama makinesinde 3 ısıtma hücresi bulunmaktadır. İlk ısıtma hücresi (besleme hücresi) 160 °C, diğer ısıtma hücreleri ise 180 °C sıcaklığa ayarlanmıştır. Makinenin eriyik itme hızı ise 25 rpm olacak şekilde enjeksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Enjeksiyon kalıplama makinesi.



Şekil 3.13. (a) Eğilme testi örneği (b) Çekme testi örneği.

3.2.4. Mekanik Testler

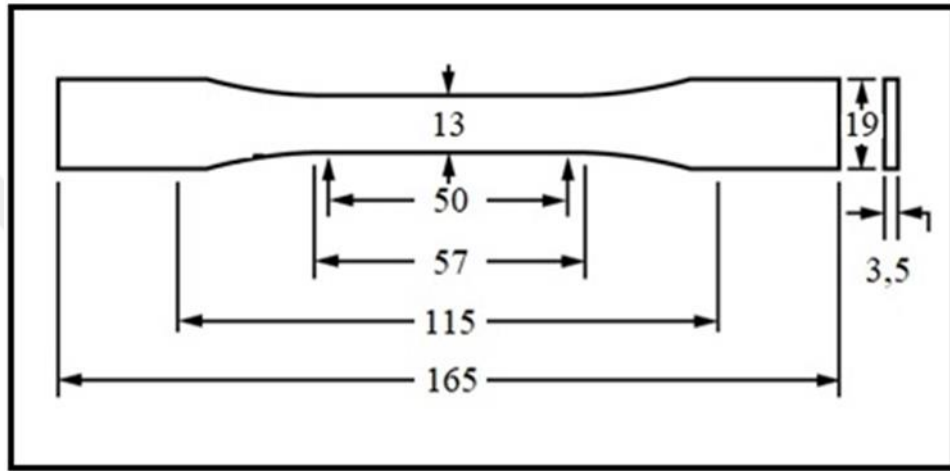
Elde edilen HDPE-odun kompozit numunelerin eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü ve çekme direnci değerleri incelenmiştir. PLA-odun kompozit numunelerin ise eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci tespit edilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılan standartlar ve numune sayıları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Mekanik özelliklerin tespitinde uygulanan yöntemler, numune boyutları ve sayıları.

Test Adı	İlgili Standart	Numune Boyutları	Numune Sayısı
Çekme direnci	ASTM D638	165 x 19 x 3,5	10
Çekmede elastikiyet modülü	ASTM D638	165 x19 x 3,5	10
Eğilme direnci	ASTM D790	125 x 12 x 3,5	10
Eğilmede elastikiyet modülü	ASTM D790	125 x 12 x 3,5	10
Darbe direnci*	ISO 179-1	80 x 10 x 4	10

* Darbe direnci sadece PLA-odun kompozitlerinde uygulanmıştır.

HDPE-odun kompozit ve PLA-odun kompozit numunelerin çekme direnci ve çekmede elastikiyet modülü değerleri ASTM D638 esaslarına göre belirlenmiştir. Çekme direnci testleri için toplam 560 adet (80 adet HDPE-odun kompozit ve 480 adet PLA-odun kompozit) tip 1 (Şekil 3.14) numune hazırlanmıştır. Çekme testleri, Shimadzu AG-IS test cihazı (Şekil 3.15) ile 5 mm/dk'lık çekme hızında ve oda sıcaklığında (23°C) yapılmıştır. Numunelerin çekme dirençleri ve çekmede elastikiyet modülü değerleri sırasıyla Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10'a göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.14. Çekme direnci test örneği (tip 1).



Şekil 3.15. Çekme direnci test cihazı.

$$\sigma_{\zeta d} = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.9)$$

$\sigma_{\zeta d}$: Çekme direnci (N/mm²)

F_{max} : Kırılma anındaki maksimum kuvvet (N)

A : Kesit alanı (mm²)

$$E_{\zeta} = \frac{\Delta F x L^3}{4 x b x h^3 x \Delta f} \quad (3.10)$$

E_{ζ} : Çekmede elastikiyet modülü (N/mm²)

ΔF : Elastik deformasyon bölgesinde yüklemenin alt-üst limitleri arasındaki kuvvet (N)

L : Dayanak noktaları arasındaki açıklık (mm)

Δf : Çekme alanındaki uzama, yüklemenin alt ve üst limitlerindeki uzama farkı (mm)

b : Deney parçasının en kesit genişliği (mm)

h : Deney parçasının en kesit kalınlığı (mm)

Numunelerin eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri ASTM D790 esaslarına göre belirlenmiştir. Testler Zwick/Roell Z50 test cihazında (Şekil 3.16), 125x12x3,5 mm boyutlarındaki numuneler ile, destekler arası mesafe 54 mm olacak şekilde, 2 mm/dk test hızında ve oda sıcaklığında (23°C) yapılmıştır. Her bir deney grubu için 10'ar adet olacak şekilde eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü testlerinde toplam 560 adet (80 adet HDPE-odun kompozit ve 480 adet PLA-odun kompozit) numune hazırlanmıştır. Numunelerin eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri sırasıyla Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12'ye göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.16. Eğilme direnci test cihazı.

$$\sigma_{ed} = \frac{3xF_{max}xL}{2xbxh^2} \quad (3.11)$$

σ_{ed} : Eğilme direnci (N/mm²)

F_{max} : Kırılma anındaki maksimum kuvvet (N)

L : Destekler arası açıklık (mm)

b : Numune genişliği (mm)

h : Numune kalınlığı (mm)

$$E_e = \frac{FL^3}{4xbxd^3} \quad (3.12)$$

E_e : Eğilmede elastikiyet modülü (N/mm²)

F : Deformasyonu sağlayan kuvvet (N)

L : Destekler arası açıklık (mm)

b : Numune genişliği (mm)

h : Numune kalınlığı (mm)

PLA-odun kompozit numunelerin charpy çentiksiz darbe dirençleri ISO 179-1 esaslarına göre belirlenmiştir. Darbe direnci testleri için toplam 480 adet numune kullanılmıştır. Darbe testleri, DVT CD OK test cihazı (Şekil 3.17) ile oda sıcaklığında (23°C) numune gruplarına göre değişmekle birlikte 3-7,3 kJ/m² enerji harcanarak yapılmıştır. Numunelerin darbe direnç değerleri Eşitlik 3.13'e göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.17. Darbe direnci test cihazı.

$$\sigma_{dd} = \frac{Q}{hxb} \quad (3.13)$$

σ_{ed} = Darbe direnci (kJ/m²)

Q = Deney parçasının kırılması için gerekli enerji (kJ)

h = Deney parçasının kalınlığı (m)

b = Deney parçasının genişliği (m)

3.2.5. PLA-Odun Kompozitlerinin YSA Modelleri

Çalışmanın ikinci bölümünde yer alan YSA modellerini oluşturmak amacı ile kullanılan veriler, PLA'nın odun polimer kompozitlerde kullanımının sınırlı ve verilerin yetersiz olması nedeniyle gerçekleştirilen mekanik testler sonucu elde edilmiştir. Bu sebeple odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine etki eden girdi parametreleri (dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu, bağlayıcı ajan kullanımı) dikkate alınarak tam faktöriyel olacak şekilde 48 farklı grup numune üretilmiştir. Numunelere eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci,

çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci testleri uygulanmış, elde edilen değerler YSA’da modellenerek modellerin elde ettiği doğruluk ve hata oranları ile performansları değerlendirilmiştir.

YSA modellerini oluşturmak, modellerin doğruluk ve hata oranları ile performanslarını belirlemek amacı ile üretilen PLA-odun kompozit numunelerin bileşimi Çizelge 3.10’da verilmiştir.

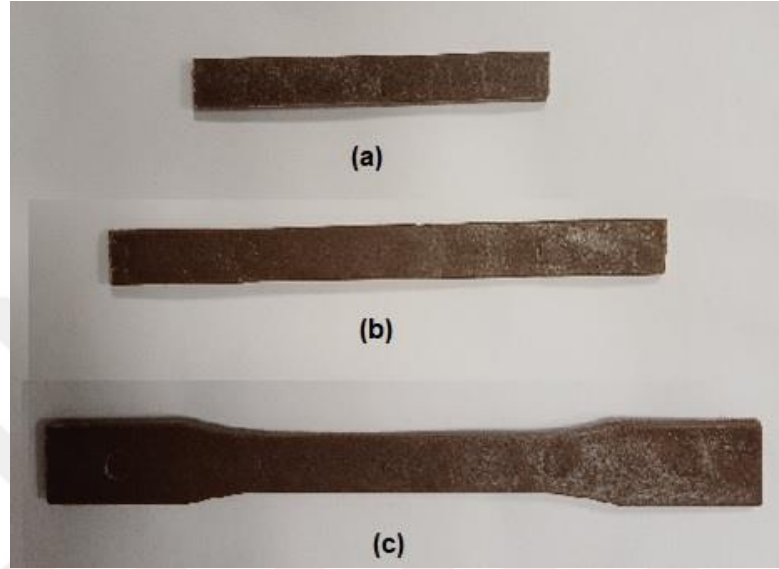
Çizelge 3.10. PLA-odun kompozit malzeme deneme desenleri.

Kompozit malzeme grup no	Odun unu partikül boyutu (mesh)	Odun unu oranı (%)	Polimer oranı (%)	Bağlayıcı ajan oranı (%)
1	40-60	10	90	0
2	40-60	10	89	1
3	40-60	10	87	3
4	40-60	20	80	0
5	40-60	20	79	1
6	40-60	20	77	3
7	40-60	30	70	0
8	40-60	30	69	1
9	40-60	30	67	3
10	40-60	40	60	0
11	40-60	40	59	1
12	40-60	40	57	3
13	60-80	10	90	0
14	60-80	10	89	1
15	60-80	10	87	3
16	60-80	20	80	0
17	60-80	20	79	1
18	60-80	20	77	3
19	60-80	30	70	0
20	60-80	30	69	1
21	60-80	30	67	3
22	60-80	40	60	0
23	60-80	40	59	1

24	60-80	40	57	3
25	80-100	10	90	0
26	80-100	10	89	1
27	80-100	10	87	3
28	80-100	20	80	0
29	80-100	20	79	1
30	80-100	20	77	3
31	80-100	30	70	0
32	80-100	30	69	1
33	80-100	30	67	3
34	80-100	40	60	0
35	80-100	40	59	1
36	80-100	40	57	3
37	100-120	10	90	0
38	100-120	10	89	1
39	100-120	10	87	3
40	100-120	20	80	0
41	100-120	20	79	1
42	100-120	20	77	3
43	100-120	30	70	0
44	100-120	30	69	1
45	100-120	30	67	3
46	100-120	40	60	0
47	100-120	40	59	1
48	100-120	40	57	3

Numuneleri üretirken dolgu maddesi olarak kullanılan sarıçam odun talaşı sırası ile 40-60-80-100-120 mesh eleklerde (Şekil 3.7a) elenmiştir. 40-60 mesh, 60-80 mesh, 80-100 mesh ve 100-120 mesh elekler arasında kalan farklı partikül büyüklüklerindeki odun unları 103±2°C'deki kurutma fırınında (Şekil 3.7b) değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Granül halinde temin edilen PLA ve bağlayıcı ajan (Lushan AR493) öğütme makinesinde (Şekil 3.8a) öğütülerek toz hale getirilmiş ve elenerek talaş ile aynı partikül boyutlarına getirilmiştir. Toz haldeki PLA ve bağlayıcı ajan 60°C'deki kurutma fırınlarında (Şekil 3.8b) değişmez ağırlığa gelinceye kadar

kurutulmuştur. <https://lab.karabuk.edu.tr/laboratuvar.aspx?val=25>Tam kuru hale gelen malzemeler odun polimer kompozit numunelerin üretim sırası ile aynı olacak şekilde ve aynı standartlar dikkate alınarak bir sürece tabi tutulmuş ve mekanik testler için gerekli numuneler üretilmiştir. Numune görselleri Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18. (a) Darbe testi örneği (b) Eğilme testi örneği (c) Çekme testi örneği.

Çizelge 3.11’de PLA-odun kompozit numune grupları için çift vidalı extruder makinesinin ısıtma hücrelerindeki sıcaklık değerleri ve besleme hızları verilmiştir.

Çizelge 3.11. PLA-odun kompozit numuneler için çift vidalı extruder makinesi parametreleri.

Kompozit Malzeme Kodu	Extruder Sıcaklıklar (°C)				Besleme Hızı (dev/dk)
	1.Hücre (Giriş)	2. Hücre	3-10. Hücre	11.Hücre (Çıkış)	
1-3	80	140	160	170	40
4-12	80	150	170	180	40
13-15	80	140	160	170	40
16-24	80	150	170	180	40
25-27	80	140	160	170	40
28-36	80	150	170	180	40
37-39	80	140	160	170	40
40-48	80	150	170	180	40

Enjeksiyon kalıplama makinesinin hücre sıcaklıkları 3 ısıtma hücresinden oluşmaktadır. PLA-odun kompozitleri üretirken kullanılan hücre sıcaklıkları ve eriyik itme hızları Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. PLA-odun kompozit numuneler için enjeksiyon makinesi sıcaklık parametreleri.

Kompozit Malzeme Kodu	Enjeksiyon Sıcaklıklar (°C)			Eriyik itme hızı (rpm)
	1.Hücre (Besleme)	2. Hücre	3-10. Hücre	
1-3	150	160	170	25
4-12	160	170	180	25
13-15	150	160	170	25
16-24	160	170	180	25
25-27	150	160	170	25
28-36	160	170	180	25
37-39	150	160	170	25
40-48	160	170	180	25

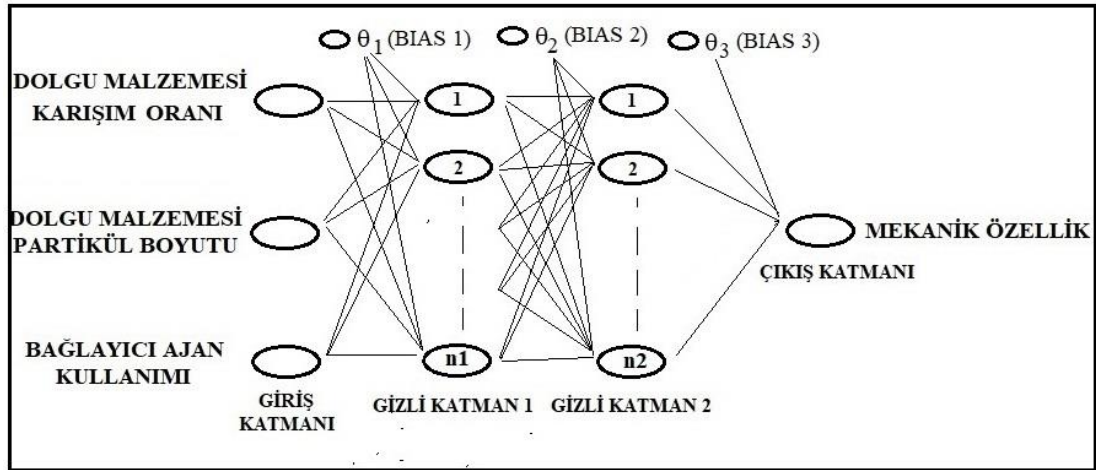
3.2.6. Mekanik Testler

PLA-odun kompozit numunelerin eğilmede elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci ve darbe direnci testleri bölüm 3.2.4’te belirtildiği yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.

3.2.7. PLA-Odun Kompozitlerin YSA Modellerinin Oluşturulması

İkinci bölümde kullanılan YSA modellerinin ağ mimarisi (Şekil 3.19) birinci bölümde kullanılan ağ mimarisi ile aynıdır. Sadece bu bölümde tek polimer (PLA) ve tek dolgu maddesi (sarıçam) kullanıldığı için giriş katmanındaki nöron sayısı 3’tür. Bu parametre dışında bu modellerde de iki gizli katman ve bir çıkış katmanı bulunan ileri beslemeli geri yayılım ağı uygulanmıştır. Sonuç itibari ile kullanılan ağ yapısı (3-n₁-n₂-1) şeklinde olmaktadır. Giriş katmanındaki 3 nöron modelin girdi parametrelerini (dolgu malzemesi karışım oranı, dolgu malzemesi partikül boyutu, bağlayıcı ajan

oranı), çıktı katmanındaki bir nöron ise modelin bağımlı parametresi olan mekanik özelliği temsil etmektedir. Laboratuvarda yapılan mekanik testler sonucu elde edilen verilerin %80'i modellerin eğitiminde, %20'si ise test edilmesinde kullanılmıştır. Eğitim ve test aşamalarında tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu uygulanmıştır. Gizli katmanlarda 5'ten 20 nörona kadar deneme yapılmış ve farklı mekanik özellikler için 11-20 arasında nöron kullanılmıştır. Gizli katmanlardaki nöron sayılarının fazlalığı modellerin daha iyi öğrendiği, ezberleme yapmadığı ve genelleme yeteneğinin üst seviyede olduğu anlamına gelmektedir (Aran vd, 2009). İterasyon sayıları ise modellerin en yüksek R^2 değerine ulaştıkları durum dikkate alınarak belirlenmiştir. Performans fonksiyonu olarak RMSE ve MAPE seçilmiştir. Modellerin öğrenme performansları, iterasyon sayısına göre RMSE hata değerlerindeki değişimi gösteren öğrenme eğrileri aracılığı ile değerlendirilmiştir.



Şekil 3.19. PLA-odun kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için geliştirilen YSA mimarisi.

Çalışmanın ikinci bölümünde PLA-odun kompozit numunelerin mekanik özelliklerini YSA'da modellerken kullanılan parametreler Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.13. PLA-odun kompozitlerin mekanik özellik tahmininde kullanılan YSA model parametreleri.

Ağ yapısı	İleri beslemeli geri yayılım ağı
Giriş katmanındaki nöron sayısı	3
Gizli katman sayısı	2
Gizli katmandaki nöron sayısı	11-20
Çıkış katmanındaki nöron sayısı	1
Aktivasyon fonksiyonu	Tanjant hiperbolik fonksiyon
Performans fonksiyonu	RMSE - MAPE
İterasyon sayısı	120000-260000
Veri ayırma	80:20

BÖLÜM 4

BULGULAR

4.1. ODUN POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YSA İLE MODELLENMESİ

Odun polimer kompozit numunelerin mekanik özelliklerini modellerken kullanılan YSA mimarileri, en yüksek R^2 değerini bulabilmek ve RMSE değerini en aza indirebilmek amacıyla çekme direnci için 88, çekmede elastikiyet modülü için 76, eğilme direnci için 111 ve eğilmede elastikiyet modülü için 163 farklı deneme sonucunda belirlenmiştir. Her bir mekanik özellik için literatürden alınan veri sayıları farklı olduğu için modelleme yaparken kullanılan veri sayıları da farklıdır. Çizelge 4.1’de farklı mekanik özelliklere ait YSA modellerinin eğitim ve test adımlarında elde edilen R^2 ve RMSE değerleri ile bu değerlere ulaşılrken kullanılan veri, nöron ve iterasyon sayıları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, YSA'nın gizli katmanlarında kullanılan nöron sayıları ile R^2 değerlerinin her zaman doğrusal bir ilişkiye sahip olmadığını, en yüksek R^2 değerlerinin gizli katmanlardaki farklı nöron sayıları ile elde edilebileceğini göstermiştir.

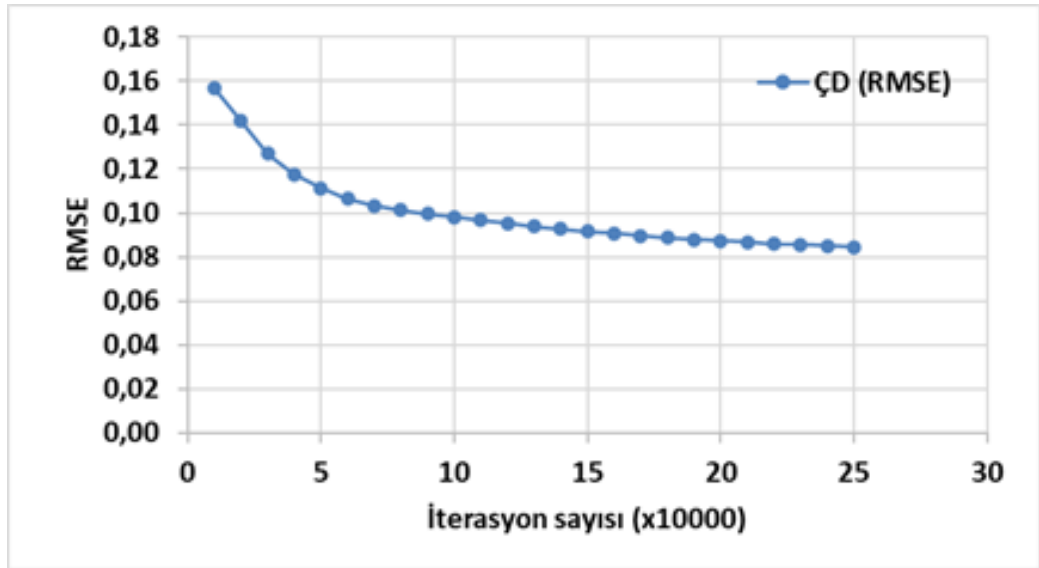
Çizelge 4.1. Odun polimer kompozitlerde en yüksek R^2 değeri elde edilen modellere ait parametreler.

Mekanik özellik	Kullanılan veri sayısı	Gizli katman nöron sayısı (n_1-n_2)	İterasyon sayısı	R^2 (Eğitim)	R^2 (Test)	RMSE (Eğitim)	RMSE (Test)
ÇD	190	6	140000	0,948	0,911	0,086	0,113
ÇEM	155	13	100000	0,942	0,903	0,092	0,122
ED	165	13	205000	0,970	0,952	0,104	0,166
EEM	143	8	100000	0,926	0,919	0,128	0,136

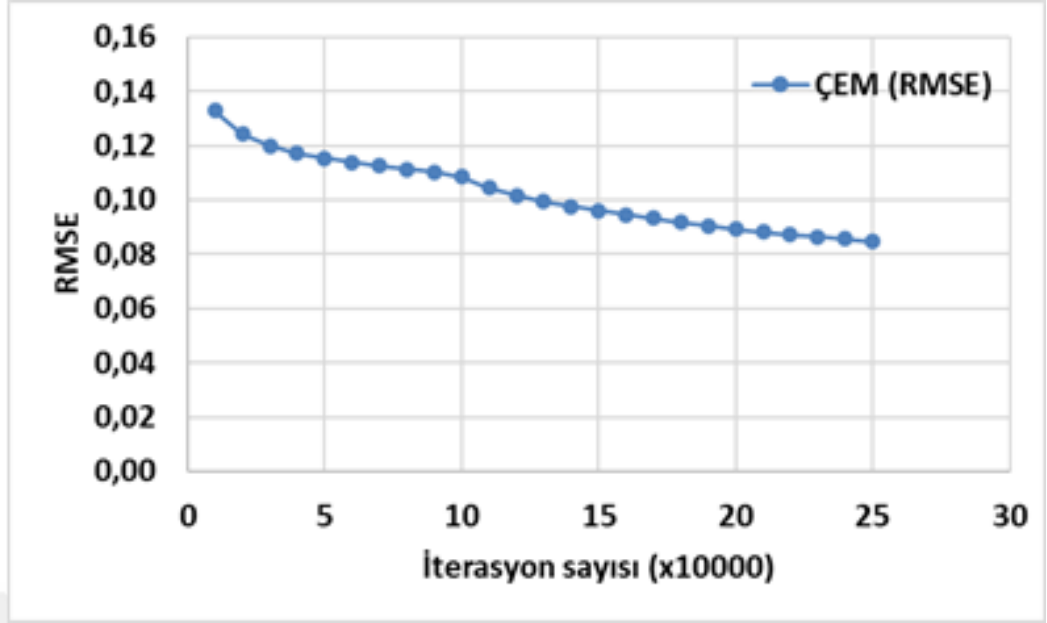
ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci, EEM: Eğilmede elastikiyet modülü.

Doğruluk oranlarını gösteren R^2 değerleri eğitim ve test adımlarında sırasıyla çekme direnci için 0,948 ve 0,911, çekmede elastikiyet modülü için 0,942 ve 0,903, eğilme direnci için 0,970 ve 0,952, eğilmede elastikiyet modülü için ise 0,926 ve 0,919 olarak bulunmuştur. Çizelge 4.2'deki değerlerden de görüldüğü ve beklendiği üzere tüm mekanik özelliklerde eğitim sırasında elde edilen R^2 değerleri, test sırasında elde edilen R^2 değerlerinden yüksektir. Bu değerler literatür (Tosun ve Sofuoğlu, 2023; İlçe ve Singer, 2019; Kökten, 2019; Özşahin ve Singer, 2019; Özşahin ve Singer, 2021; Nasri ve Toubal, 2024; Duman vd, 2018; Çay vd, 2012) ile uyumlu sonuçların elde edildiğini göstermektedir.

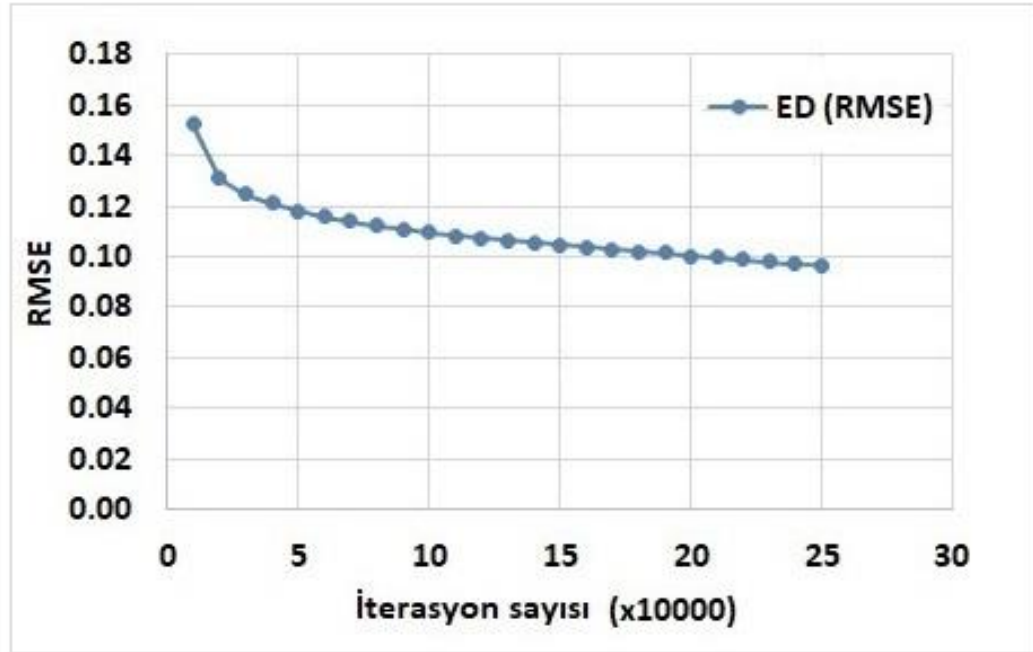
Modellerin test edilirken yüksek R^2 değerleri elde etmesi ancak iyi bir eğitim ve öğrenme süreci ile mümkündür. Modellerin öğrenme performanslarının değerlendirildiği öğrenme eğrileri Şekil 4.1-Şekil 4.4'te verilmiştir. Modellerin öğrenme performansında kullanılan öğrenme eğrileri dikkate alındığında odun polimer kompozitlerde iterasyon sayısının artması ile RMSE'nin azaldığı ve belli bir noktadan sonra hata değerlerinin yatay bir seyir izlediği ve öğrenmenin yeterince gerçekleştiğini tespit edilmiştir. Bu noktadan sonra öğrenme eğrilerinin devam etmesi zaman kaybı yaratacağı düşüncesi ile durdurulmuş ve yatay konumda elde edilen en yüksek R^2 değerine sahip modeller dikkate alınmıştır.



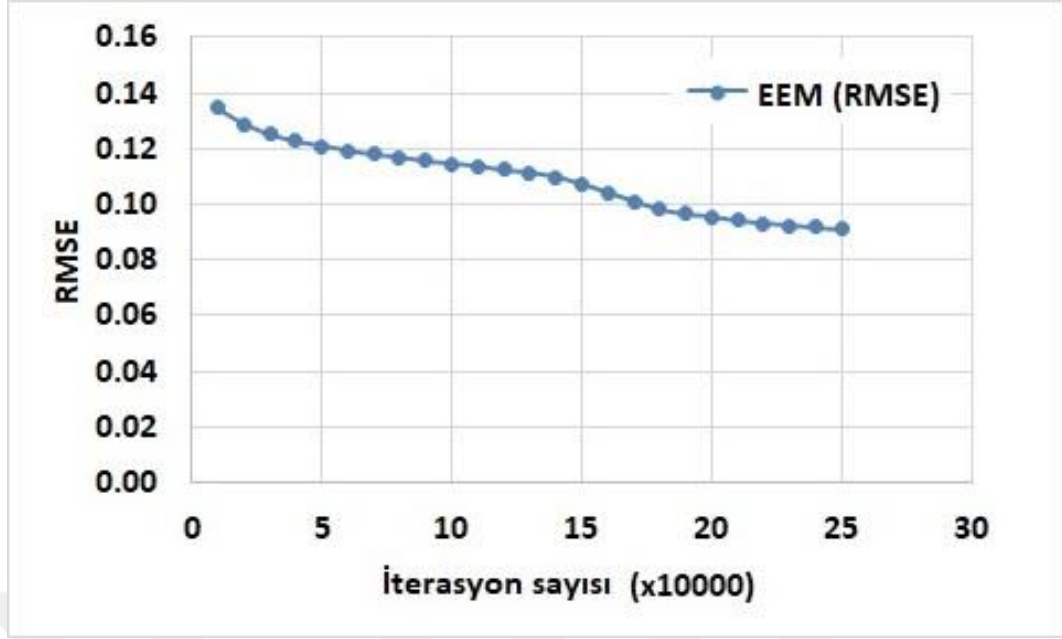
Şekil 4.1. Odun polimer kompozitlerin çekme direnci için öğrenme eğrisi grafiği.



Şekil 4.2. Odun polimer kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.

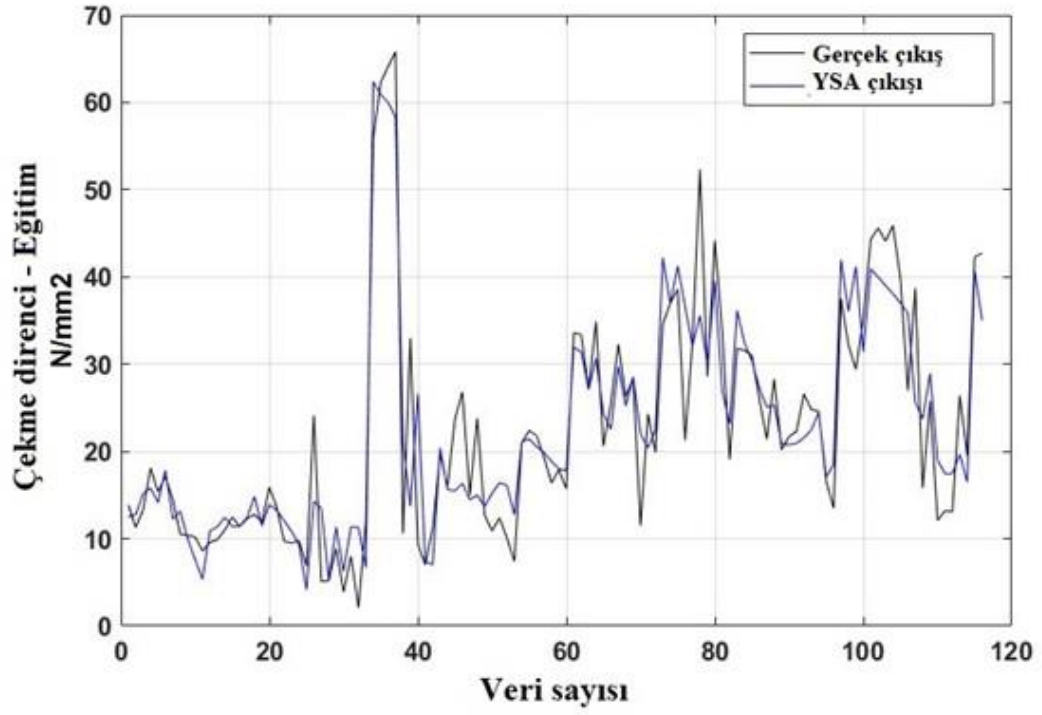


Şekil 4.3. Odun polimer kompozitlerin eğilme direnci için öğrenme eğrisi grafiği.

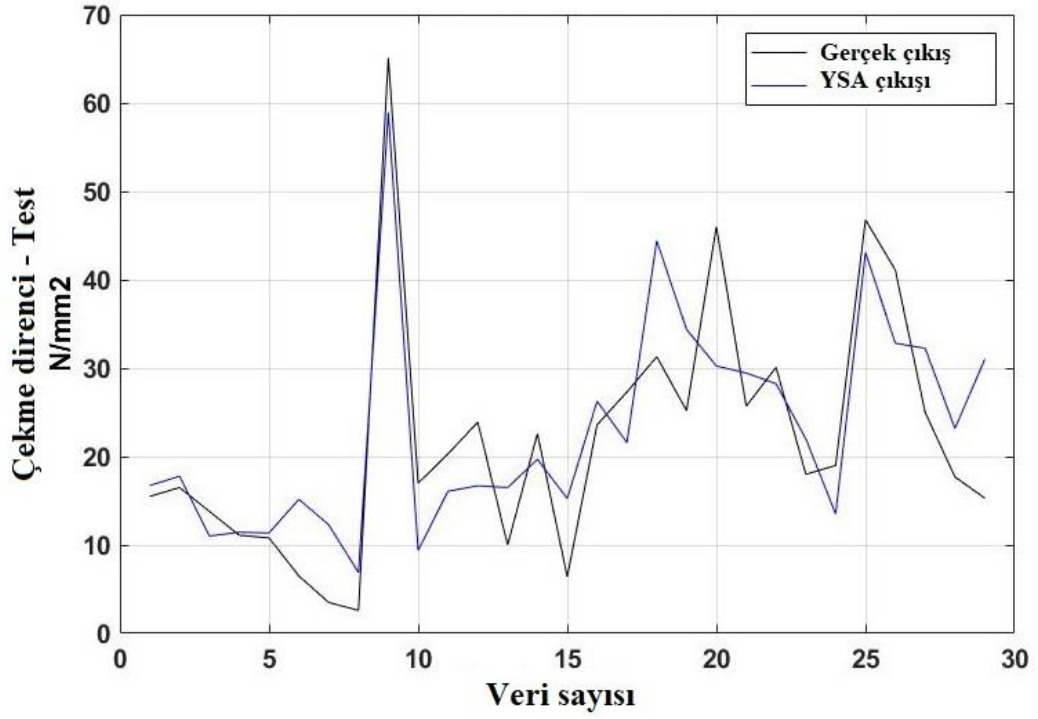


Şekil 4.4. Odun polimer kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.

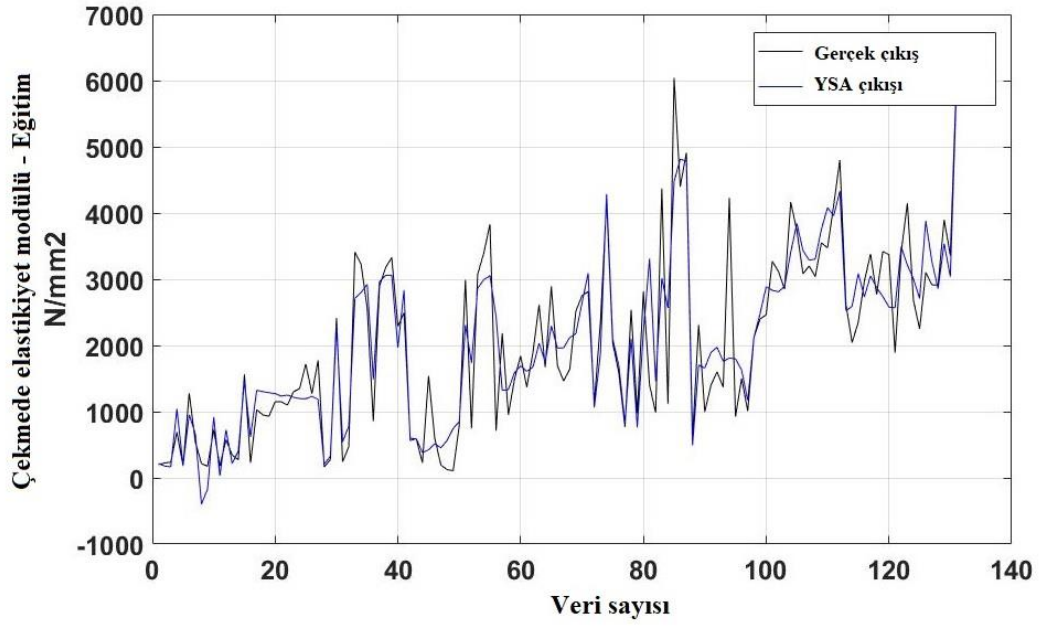
Odun polimer kompozit modellerin eğitim ve test aşamalarındaki tahmin değerleri ile gerçek değerlerin ilişkisini gösteren görseller Şekil 4.4-Şekil 4.7’de verilmiştir. Grafiklerde, gerçek çıkış eğrisi ile YSA çıkış eğrisinin üst üste gelmesi hedeflenmektedir. Özellikle eğitim aşamasında bu eğrilerin daha yüksek oranda çakıştığı ve dolayısıyla daha yüksek R^2 ve daha düşük RMSE değerleri elde edildiği gözlenmiştir. Verilerin literatürden alınmış olması, literatürdeki çalışmaların farklı fiziksel ortamlarda gerçekleştirilmesi ve kullanılan malzemelerin farklı özelliklere sahip olması sebebi ile veri setinin homojen ve doğrusal bir dağılım göstermemesi ve ahşap malzemenin heterojen yapısı göz önünde bulundurulduğunda özellikle test aşamasında R^2 değerlerinin biraz düştüğü fakat yinede 0,90’ın üzerinde bir doğruluk oranına ulaşıldığı görülmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarda (Atuanya vd, 2014, Nasri ve Toubal, 2024, Tosun ve Sofuoğlu, 2023) daha yüksek R^2 değerlerine (0,990) ulaşıldığı rapor edilmekle birlikte bu çalışmalardaki yüksek R^2 değerleri, az sayıda numune kullanılması ve sabit numune üretim ve test koşulları nedeniyle elde edilmiş olabilir. Dolayısıyla öğrenme ve test etme sürecinde elde edilen bu R^2 değerlerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu sonucuna varılmıştır. Zira, bire (1) yakın R^2 değerleri, modellerin iyi bir şekilde eğitildiği ve test edildiği anlamına gelmektedir (Bewick vd, 2003).



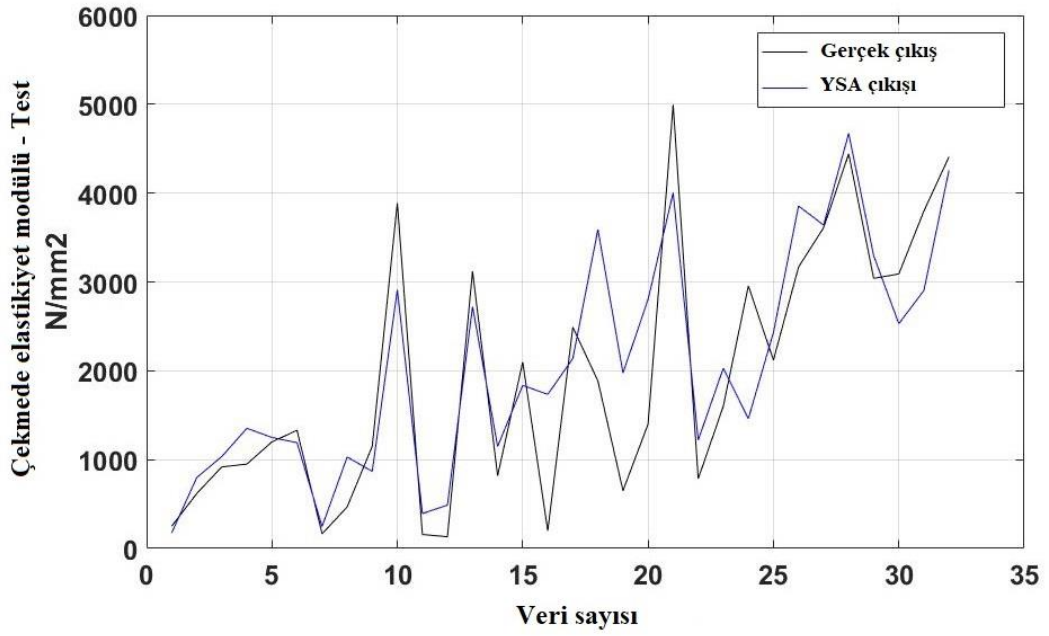
Şekil 4.5. Odun polimer kompozitlerin çekme direnci için eğitim grafiği.



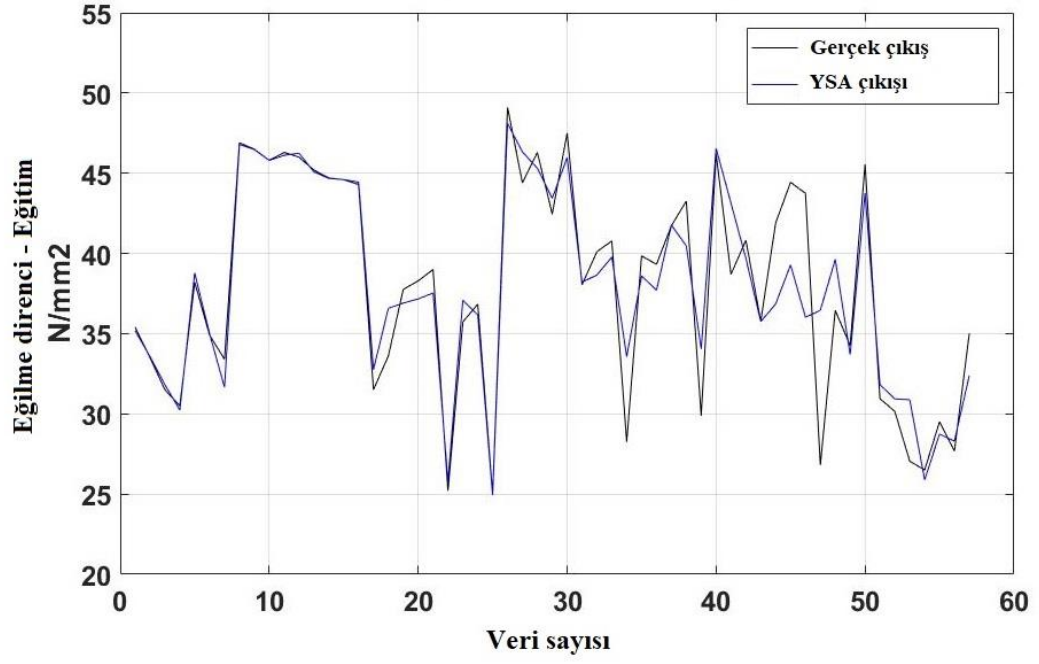
Şekil 4.6. Odun polimer kompozitlerin çekme direnci için test grafiği.



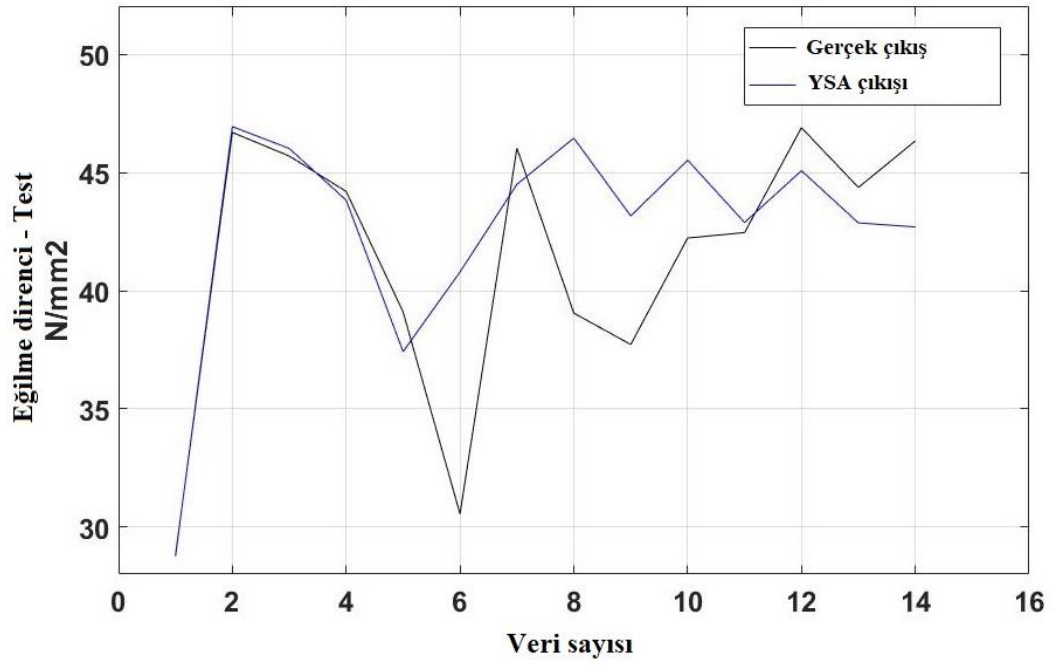
Şekil 4.7. Odun polimer kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.



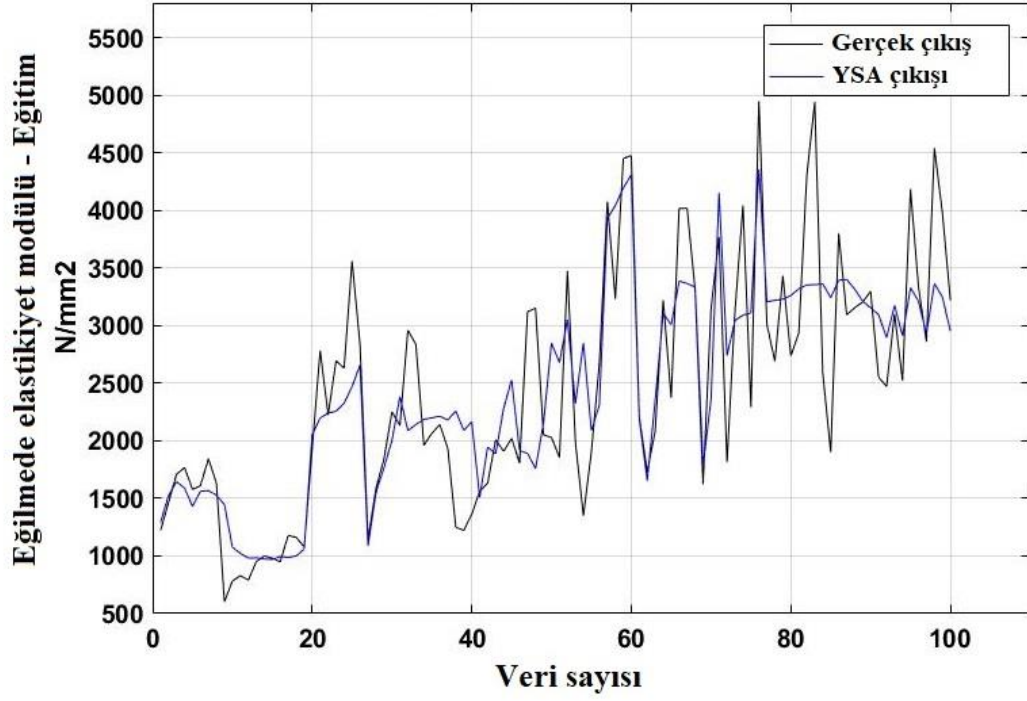
Şekil 4.8. Odun polimer kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için test grafiği.



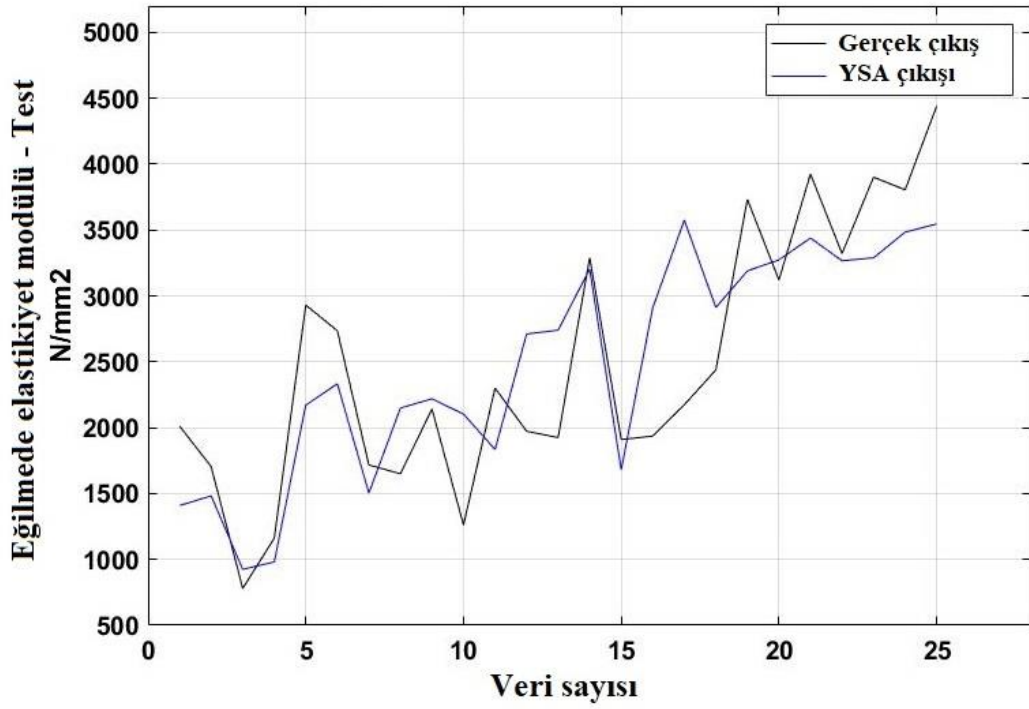
Şekil 4.9. Odun polimer kompozitlerin eğilme direnci için eğitim grafiği.



Şekil 4.10. Odun polimer kompozitlerin eğilme direnci için test grafiği.



Şekil 4.11. Odun polimer kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.



Şekil 4.12. Odun polimer kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için test grafiği.

4.2. YSA MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANSI (GÜVENİLİRLİĞİ)

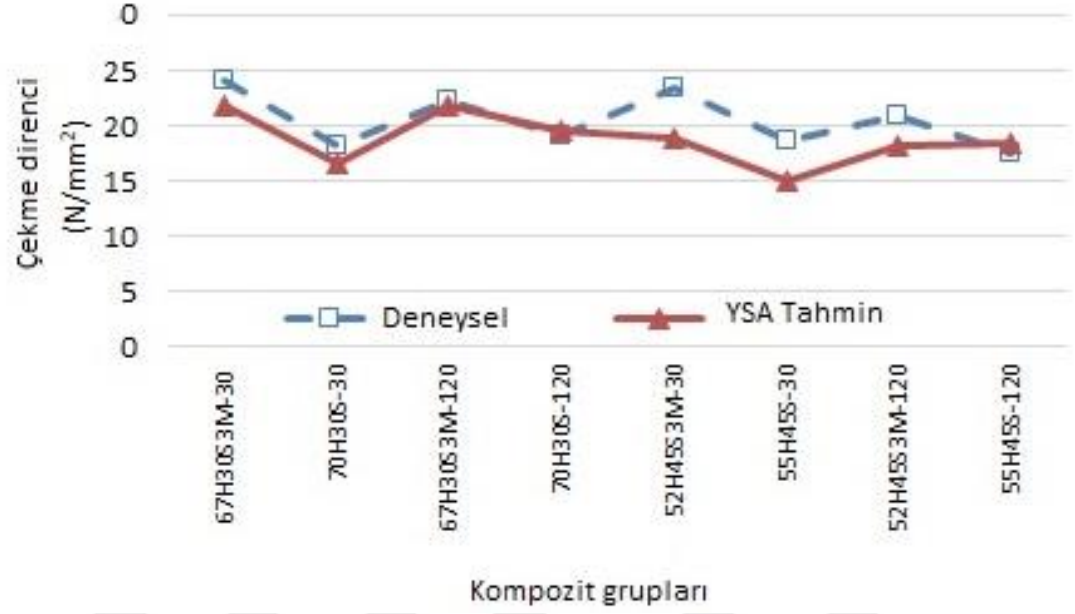
YSA modellerinin performanslarını belirlemek için yapılan mekanik testlerin sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Testler sonucunda elde edilen çekme ve eğilme direnci değerleri dolgu malzemesi oranının artması ile azalırken, çekmede elastikiyet modülü ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde ise artış gözlenmiştir. Balasuriya vd, (2001) eğilme ve çekme dirençlerinin odun unu oranının artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Gosselin vd, (2006) odun unu oranının artmasının HDPE ile yapılan kompozitlerde elastikiyet modülü değerlerini arttırdığını bildirmişlerdir. Bağlayıcı ajan kullanımı beklendiği üzere tüm numune gruplarının olumlu bir etki yaratmış ve değerleri arttırmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuş ve MAPE gibi bağlayıcı ajanlar ve katkı maddelerinin eklenmesiyle mekanik değerlerde önemli artışlar gözlenmiştir (Adhikary vd, 2008; Nourbakhsh ve Ashori 2009; Mbarek vd, 2011; Koohestani vd, 2017). Numunelerde kullanılan odun unu partikül boyutunun etkisine bakıldığında, daha büyük partikül boyutuna sahip numunelerin tüm mekanik özelliklerde daha yüksek değerler verdiği gözlenmiştir. Rafighi vd, (2014), Chaudemanche vd, (2018), Bouafif vd, (2009), çekme ve eğilme direnci ile eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin odun unu partikül boyutunun artması ile arttığını rapor etmişlerdir. Elde edilen değerler dikkate alındığında mekanik test sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.2. Odun polimer kompozitlerin mekanik test sonuçları.

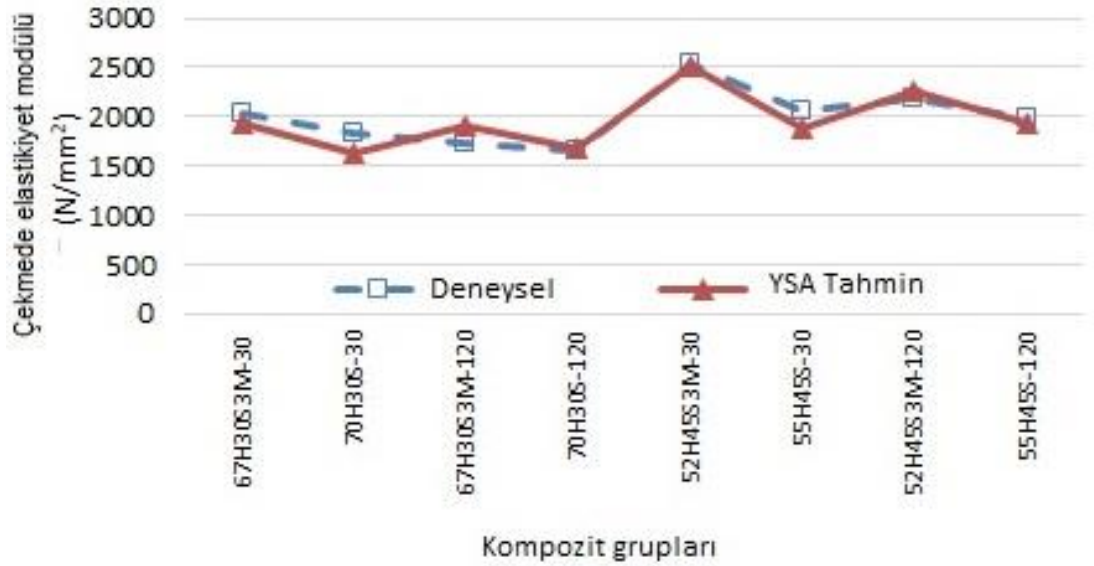
Kompozit malzeme kodu	Mekanik Özellik			
	ÇD (N/mm ²)	ÇEM (N/mm ²)	ED (N/mm ²)	EEM (N/mm ²)
67H30S3M-30	24,1 ± 1,1	2031 ± 187,6	46,2 ± 1,2	2515 ± 134,9
70H30S-30	18,1 ± 2,2	1835 ± 214,1	41,7 ± 0,5	2132 ± 69,1
67H30S3M-120	22,2 ± 0,3	1733 ± 111,5	36,6 ± 0,9	1566 ± 103,6
70H30S-120	19,0 ± 0,7	1661 ± 118,1	31,3 ± 1,6	1365 ± 74,6
52H45S3M-30	23,3 ± 0,9	2547 ± 210,0	40,8 ± 2,3	2713 ± 136,1
55H45S-30	18,6 ± 0,8	2050 ± 225,4	37,6 ± 2,0	2281 ± 305,3
52H45S3M-120	21,0 ± 0,3	2181 ± 171,1	33,3 ± 1,0	1909 ± 134,2
55H45S-120	17,5 ± 1,1	1994 ± 186,9	30,5 ± 0,5	1792 ± 158,6

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci,
EEM: Eğilmede elastikiyet modülü, ± : Standard sapma

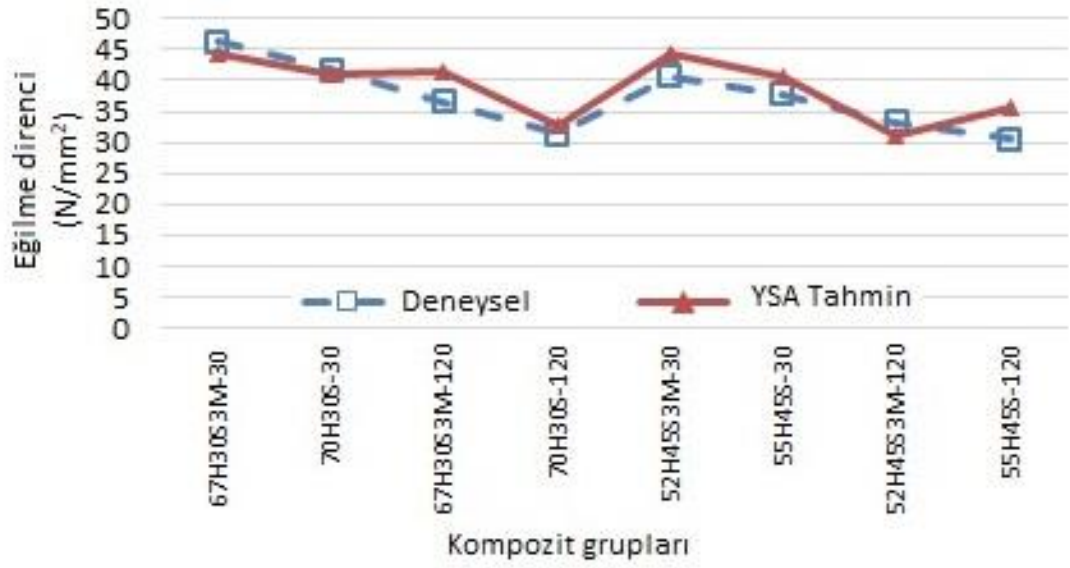
Mekanik testlerin sonuçları ile aynı girdi parametrelerine sahip YSA modellerinin çıktı değerlerinin grafiksel karşılaştırması her bir mekanik özellik için Şekil 4.13-Şekil 4.16'da, aynı değerlerin tablo halinde karşılaştırması ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.



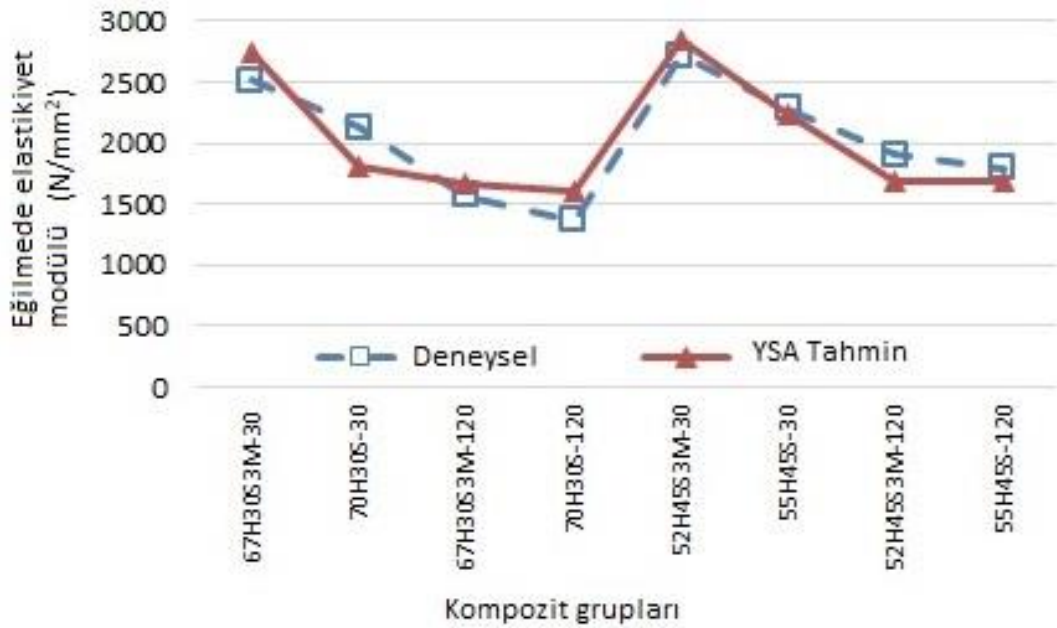
Şekil 4.13. HDPE-odun kompozit çekme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.14. HDPE-odun kompozit çekmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.15. HDPE-odun kompozit eğilme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.16. HDPE-odun kompozit eğilmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

YSA modellerini eğitmek için kullanılan verilerin elde edildiği üretim koşullarının çeşitliliği nedeniyle bazı gruplarda tahmin ve test değerleri arasındaki farkın nispeten yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 4.3. HDPE-odun kompozit test sonuçları ve YSA tahmin değerleri.

Kompozit malzeme kodu	ÇD (N/mm ²)		ÇEM (N/mm ²)		ED (N/mm ²)		EEM (N/mm ²)	
	Test	Tahmin	Test	Tahmin	Test	Tahmin	Test	Tahmin
67H30S3M-30	24,1	21,7	2031	1933	46,2	44,3	2515	2739
70H30S-30	18,1	16,5	1835	1637	41,7	41,2	2132	1814
67H30S3M-120	22,2	21,8	1734	1915	36,6	41,5	1566	1665
70H30S-120	19,0	19,6	1661	1681	31,3	32,7	1365	1599
52H45S3M-30	23,3	18,9	2547	2525	40,8	44,4	2714	2835
55H45S-30	18,6	15,1	2050	1884	37,6	40,6	2281	2227
52H45S3M-120	21,0	18,2	2181	2263	33,3	31,2	1909	1694
55H45S-120	17,5	18,5	1994	1929	30,5	35,8	1792	1681

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci, EEM: Eğilmede elastikiyet modülü,

YSA modellerinin performanslarını belirlemek için hesaplanan R^2 , RMSE ve MAPE değerleri her bir mekanik özellik için Çizelge 4.4-Çizelge 4.7’de verilmiştir. Mekanik testler sonucu, çekme direnci için R^2 değerleri 55H45S-30 ve 52H45S3M-30 grupları ($R^2=0,943$) hariç 0,975 ve üzerinde bulunmuştur. Çekmede elastikiyet modülü ve eğilme dirençlerinin tahminlerinde elde edilen R^2 değerleri tüm gruplarda 0,972 ve üzerindedir. Eğilmede elastikiyet modülü için ise R^2 değerleri 0,969 ve üzerindedir. Elde edilen R^2 değerlerinin 1’e yakın olması tahmin edilen değerler ve gerçek değerler arasında iyi bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.4. Modelin HDPE-odun kompozitlerin çekme direnci tahminindeki hata ve R^2 değerleri.

Kompozit malzeme kodu	Çekme direnci		
	R^2	RMSE	MAPE (%)
67H30S3M-30	0,984	0,038	9,8
70H30S-30	0,978	0,039	9,2
67H30S3M-120	0,999	0,007	2,1
70H30S-120	0,997	0,014	3,6
52H45S3M-30	0,943	0,071	18,9
55H45S-30	0,943	0,056	18,8
52H45S3M-120	0,975	0,045	13,4
55H45S-120	0,996	0,017	5,7

Çizelge 4.5. Modelin HDPE-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü tahminindeki hata ve R^2 değerleri.

Kompozit malzeme kodu	Çekmede elastikiyet modülü		
	R^2	RMSE	MAPE (%)
67H30S3M-30	0,990	0,033	7,9
70H30S-30	0,972	0,046	12,9
67H30S3M-120	0,984	0,033	10,7
70H30S-120	0,996	0,019	6,3
52H45S3M-30	0,994	0,033	6,4
55H45S-30	0,981	0,043	10,9
52H45S3M-120	0,994	0,030	6,8
55H45S-120	0,991	0,030	8,4

Çizelge 4.6. Modelin HDPE-odun kompozitlerin eğilme direnci tahminindeki hata ve R^2 değerleri.

Kompozit malzeme kodu	Eğilme direnci		
	R^2	RMSE	MAPE (%)
67H30S3M-30	0,994	0,093	4,1
70H30S-30	0,999	0,027	1,3
67H30S3M-120	0,984	0,205	13,4
70H30S-120	0,996	0,085	4,6
52H45S3M-30	0,991	0,172	9,1
55H45S-30	0,993	0,145	8,8
52H45S3M-120	0,994	0,092	6,2
55H45S-120	0,976	0,222	17,5

Çizelge 4.7. Modelin HDPE-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü tahminindeki hata ve R^2 değerleri.

Kompozit malzeme kodu	Eğilmede elastikiyet modülü		
	R^2	RMSE	MAPE (%)
67H30S3M-30	0,991	0,054	9,0
70H30S-30	0,969	0,073	12,6
67H30S3M-120	0,994	0,028	6,6
70H30S-120	0,979	0,054	17,1
52H45S3M-30	0,996	0,040	5,0
55H45S-30	0,993	0,042	7,1
52H45S3M-120	0,971	0,056	11,0
55H45S-120	0,982	0,041	9,5

Elde edilen hata oranlarına bakıldığında RMSE değerlerinin 0'a yakın olması hedeflenen bir durumdur. Çekme direnci için MAPE değerlerinin 3 grup (55H45S-30, 52H45S3M-30, 52H45S3M-120) dışında %10'un altında olduğu tespit edilmiştir. Çekmede elastikiyet modülü için MAPE değerinin tüm kompozit gruplarında %6,3-12,9 arasında olduğu tespit edilmiştir. Eğilme direnci için MAPE değerlerinin iki kompozit grup (67H30S3M-120 ve 55H45S-120) dışında %10'un altında olduğu gözlenmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü için ise 3 grup (70H30S-30, 70H30S-120 ve 52H45S3M-120) haricinde MAPE değerleri %10 ve altındadır. MAPE değerleri %50'den yüksek olan modeller hatalı, %20-50 olan modeller kabul edilebilir, %10-20 olan modeller iyi ve %10'un altında olan modeller ise çok iyi modeller sınıfına girmektedir (Lewis, 1982). Odunun yüzey pürüzlülüğünün, adezyon direncinin ve ahşap kaplamaların parlaklığının YSA ile tahminine yönelik çalışmalarda da (Özşahin ve Singer, 2019; Özşahin ve Singer, 2021; İlçe ve Singer, 2019) benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde elde edilen R^2 , RMSE ve MAPE değerlerine dayanarak, YSA modellerinin iyi tahminler yaptığı ve odun polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

4.3. PLA-ODUN KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YSA İLE MODELLENMESİ

PLA-odun kompozitlerin mekanik özelliklerini modellemek için gerekli olan test verileri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Testler sonucunda elde edilen çekme, eğilme ve darbe direnci değerleri dolgu malzemesi oranının artması ile azalırken, çekmede elastikiyet modülü ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde artış gözlenmiştir. Literatürde benzer çalışmalara bakıldığında odun unu oranının artmasının çekme ve eğilme direnci (Sachin vd, 2020; Farrokhpayam vd, 2021; Petchwattana ve Covavisaruch, 2014), darbe direnci, (Sachin vd, 2020; Butylina vd, 2010; Dalu vd, 2019), eğilmede elastikiyet ve çekmede elastikiyet değerlerini (Huda vd, 2006; Dalu vd, 2019; Petchwattana ve Covavisaruch, 2014; Pilla vd, 2008) arttırdığı rapor edilmiştir. Odun unu oranının artmasının bazı mekanik özelliklerde azalmaya neden olduğuna dair yapılan çalışmalarda (Butylina vd, 2010; Huda vd, 2006; Dalu vd, 2019; Wan ve Zhang, 2018; Petchwattana ve Covavisaruch, 2014; Pilla vd, 2008) mevcuttur. Bağlayıcı ajan kullanımı darbe direnci dışındaki mekanik özelliklerde herhangi bir gelişme sağlamamıştır. Literatürde, bağlayıcı ajan kullanımının aynı çalışma kapsamında bazı mekanik özellikleri arttırıp diğer mekanik özellikleri azalttığına (Butylina vd, 2010; Huda vd, 2006; Dalu vd, 2019; Pilla vd, 2008) yönelik çalışmalar vardır. Dolgu maddesi partikül boyutlarının test sonuçları üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, daha büyük partikül boyutuna sahip numunelerin eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direncini genel olarak azalttığı, çekme direnci ve çekmede elastikiyet modülünü ise bazı gruplarda arttırıp bazı gruplarda azalttığı gözlenmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda partikül boyutu büyüdükçe numunelerin daha yüksek mekanik özellikler (Sachin vd, 2020) elde ettiği de rapor edilmiştir.

Çizelge 4.8. PLA-odun kompozitlerin mekanik test sonuçları.

Kompozit malzeme kodu	Mekanik testler sonucunda elde edilen değerler				
	ÇD (N/mm ²)	ÇEM (N/mm ²)	ED (N/mm ²)	EEM (N/mm ²)	DD (kJ/m ²)
1	54,9 ± 1,9	2911 ± 83,5	111,5 ± 7,1	3634 ± 256,2	4,3 ± 0,7
2	46,1 ± 0,3	2463 ± 31,7	107,5 ± 1,5	3605 ± 197,3	5,3 ± 0,4
3	45,7 ± 0,9	2274 ± 137,4	102,9 ± 2,2	3469 ± 73,6	5,9 ± 0,5
4	43,8 ± 1,4	2986 ± 260,5	95,0 ± 12,3	4652 ± 420,8	2,9 ± 0,4
5	38,4 ± 1,3	2618 ± 163,1	70,1 ± 2,2	3777 ± 387,7	3,5 ± 0,5
6	37,3 ± 0,4	2663 ± 64,7	75,4 ± 1,8	3494 ± 127,0	3,6 ± 0,5
7	36,7 ± 3,9	3011 ± 301,9	76,6 ± 3,0	4505 ± 211,3	2,3 ± 0,1
8	28,8 ± 2,7	2376 ± 372,1	60,6 ± 2,6	3704 ± 171,3	2,2 ± 0,4
9	28,2 ± 1,2	2380 ± 172,9	57,3 ± 2,9	3700 ± 261,4	2,5 ± 0,4
10	30,9 ± 2,5	3276 ± 298,4	57,4 ± 11,6	4542 ± 760,3	1,9 ± 0,1
11	23,2 ± 2,1	2022 ± 540,8	47,3 ± 0,9	4087 ± 68,0	2,0 ± 0,2
12	20,3 ± 1,7	2033 ± 202,5	39,9 ± 6,4	3249 ± 387,9	2,0 ± 0,1
13	50,8 ± 2,1	2552 ± 51,2	115,2 ± 4,4	3705 ± 88,4	5,1 ± 0,4
14	44,6 ± 0,3	2370 ± 313,0	107 ± 3,1	3527 ± 260,2	5,7 ± 0,1
15	46,6 ± 0,4	2341 ± 63,3	100,1 ± 0,8	3367 ± 69,5	5,8 ± 0,3
16	44,0 ± 2,1	3149 ± 207,4	87,6 ± 12,0	3899 ± 471,8	3,4 ± 0,5
17	34,7 ± 2,7	2269 ± 292,5	82,4 ± 3,0	3866 ± 156,9	3,8 ± 0,3
18	38,0 ± 2,8	2542 ± 250,1	83,2 ± 3,0	3688 ± 160,7	4,1 ± 0,3
19	40,5 ± 0,8	3464 ± 98,2	76,1 ± 6,1	4437 ± 426,6	3,4 ± 0,3
20	33,5 ± 1,8	2768 ± 138,9	65,3 ± 6,5	4376 ± 415,1	3,1 ± 0,4
21	29,8 ± 1,1	2388 ± 321,9	67,9 ± 2,9	4154 ± 209,0	3,1 ± 0,3
22	40,1 ± 2,7	3858 ± 202,1	82,8 ± 3,8	5059 ± 255,2	2,0 ± 0,4
23	31,2 ± 0,5	3332 ± 329,8	64,5 ± 0,7	4486 ± 108,7	2,3 ± 0,2
24	22,0 ± 1,0	2319 ± 207,7	47,8 ± 1,2	3932 ± 221,6	2,0 ± 0,3
25	52,5 ± 1,4	2604 ± 138,5	111,7 ± 4,6	3619 ± 129,0	5,7 ± 0,4
26	43,8 ± 0,6	2286 ± 161,9	104,7 ± 3,6	3551 ± 110,7	5,6 ± 0,9
27	42,8 ± 0,8	2222 ± 68,0	100,1 ± 1,0	3329 ± 51,6	5,4 ± 0,6
28	43,6 ± 1,0	2980 ± 11,5	91,2 ± 2,0	3879 ± 280,4	4,1 ± 0,3
29	36,9 ± 0,5	2519 ± 394,2	82,9 ± 3,5	3842 ± 165,6	4,7 ± 0,3

30	34,5 ± 0,6	2507 ± 103,2	81,8 ± 1,2	3633 ± 131,5	4,2 ± 0,8
31	43,7 ± 0,6	3477 ± 310,6	90,8 ± 6,3	4882 ± 219,8	3,9 ± 0,5
32	33,5 ± 0,6	2729 ± 148,9	72,1 ± 7,9	4317 ± 304,6	4,3 ± 0,7
33	29,4 ± 0,6	2363 ± 345,8	66,8 ± 2,2	3914 ± 42,9	3,2 ± 0,5
34	37,8 ± 4,0	3502 ± 332,9	75,0 ± 6,9	5259 ± 316,9	2,5 ± 0,4
35	26,9 ± 1,4	3047 ± 48,6	58,8 ± 0,7	4860 ± 291,7	2,6 ± 0,1
36	28,4 ± 0,7	2242 ± 214,6	62,0 ± 4,1	3762 ± 211,6	3,7 ± 0,3
37	50,3 ± 1,0	2499 ± 302,6	114,2 ± 3,1	3790 ± 339,5	5,4 ± 0,7
38	44,8 ± 0,3	2182 ± 164,8	110,3 ± 3,0	3622 ± 99,8	6,7 ± 0,5
39	42,1 ± 0,4	2360 ± 60,6	102,2 ± 3,0	3326 ± 218,8	7,3 ± 0,6
40	43,4 ± 0,3	2900 ± 175,8	93,6 ± 3,7	4054 ± 209,9	4,9 ± 0,3
41	37,0 ± 0,9	2718 ± 78,4	87,0 ± 5,5	3763 ± 276,7	5,0 ± 0,1
42	35,1 ± 0,9	2168 ± 118,0	86,1 ± 0,9	3613 ± 156,0	5,6 ± 1,1
43	45,2 ± 1,0	3161 ± 522,4	88,5 ± 8,2	4734 ± 415,2	3,5 ± 0,4
44	32,6 ± 0,5	2935 ± 205,8	72,4 ± 3,3	4423 ± 243,7	4,1 ± 0,7
45	29,4 ± 0,5	2424 ± 218,1	70,4 ± 0,7	3721 ± 338,4	4,0 ± 0,2
46	37,7 ± 4,1	3445 ± 466,2	82,3 ± 2,6	5215 ± 104,5	2,4 ± 0,1
47	28,9 ± 0,9	2755 ± 328,5	65,3 ± 5,9	4395 ± 555,6	2,8 ± 0,1
48	25,1 ± 0,3	2499 ± 163,6	59,1 ± 1,4	4221 ± 222,6	2,7 ± 0,2

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci, EEM: Eğilmede elastikiyet modülü, DD: Darbe direnci, ± : Standart sapma

PLA-odun kompozit numunelerin mekanik özelliklerini modellerken kullanılan YSA mimarileri, en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerlerini bulabilmek amacıyla çekme direnci için 26, çekmede elastikiyet modülü için 30, eğilme direnci için 30, eğilmede elastikiyet modülü için 41 ve darbe direnci için 29 farklı deneme sonucunda belirlenmiştir. Her bir mekanik özellik için 48 farklı girdi kombinasyonu ve 48 farklı çıktı değeri kullanılmıştır. Verilerin %80'i modellerin eğitiminde, %20'si ise modellerin test edilmesinde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Çizelge 4.9'da farklı mekanik özelliklere ait YSA modellerinin eğitim ve test adımlarında elde edilen R^2 ve RMSE değerleri ile bu değerlere ulaşılırken kullanılan nöron ve iterasyon sayıları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, odun polimer kompozitlerde olduğu gibi PLA-odun kompozitlerde de YSA'nın gizli katmanlarında kullanılan nöron sayıları ile R^2 değerlerinin her zaman doğrusal bir ilişkiye sahip olmadığını göstermiştir.

Odun polimer kompozitlerdekine benzer şekilde PLA-odun kompozitlerin modellerinde de eğitim aşamasında elde edilen R^2 değerleri, test aşamasında elde edilen R^2 değerlerinden daha yüksek çıkmıştır (Çizelge 4.9). Bu değerler literatür (Kökten, 2019; Özşahinve Singer, 2021; Tosun ve Sofuoğlu; 2023; Nasri ve Toubal, 2024; Özşahinve Singer, 2019; İlçe ve Singer, 2019; Duman vd, 2018; Çay vd, 2012) ile uyumludur.

Çizelge 4.9. PLA-odun kompozitlerde en yüksek R^2 değeri elde edilen modellere ait parametreler.

Mekanik özellik	Kullanılan veri sayısı	Gizli katman nöron sayısı (n_1-n_2)	İterasyon sayısı	RMSE (Eğitim)	RMSE (Test)	R^2 (Eğitim)	R^2 (Test)
ÇD	48	20	140000	0,037	0,062	0,996	0,987
ÇEM	48	10	180000	0,075	0,109	0,974	0,943
ED	48	14	120000	0,049	0,088	0,994	0,979
EEM	48	11	260000	0,042	0,082	0,992	0,966
DD	48	13	160000	0,048	0,073	0,988	0,970

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci, EEM: Eğilmede elastikiyet modülü, DD: Darbe direnci,

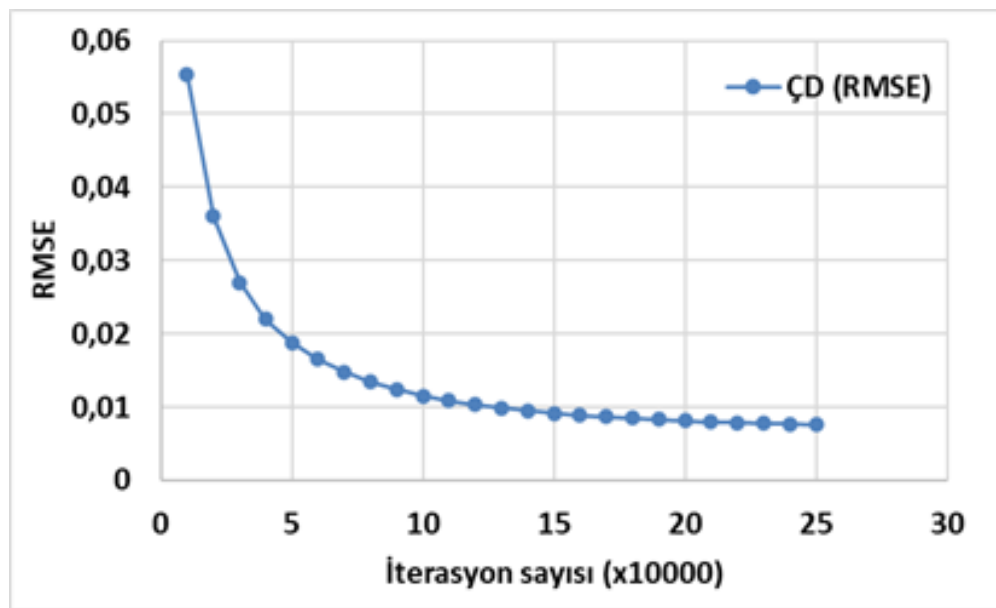
R^2 değerleri eğitim ve test adımlarında sırasıyla çekme direnci için 0,996 ve 0,987, çekmede elastikiyet modülü için için 0,974 ve 0,943, eğilme direnci için 0,994 ve 0,979, eğilmede elastikiyet modülü için 0,992 ve 0,966, darbe direnci için ise 0,988 ve 0,970 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte en yüksek R^2 değerine sahip modellerde farklı iterasyon sayıları ve farklı gizi katman nöron sayıları kullanılmıştır. PLA-odun kompozitlerde elde edilen R^2 değerlerinin odun polimer kompozitlerde elde edilen R^2 değerlerinden yüksek çıkmasının (Çizelge 4.10) nedeninin numunelerin üretim ve test aşamalarında aynı fiziki şartların kullanımından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.10. Odun polimer kompozitler ile PLA-odun kompozitlerin eğitim ve test aşamalarındaki R^2 değerlerinin karşılaştırılması.

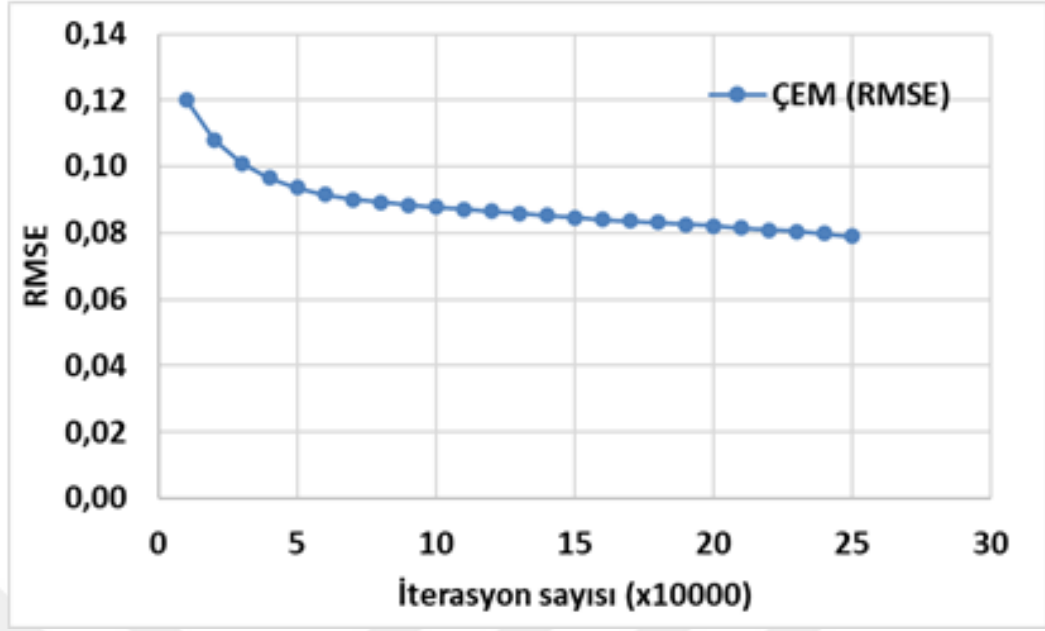
Mekanik özellik	OPK (Eğitim)	PLA-OPK (Eğitim)	OPK (Test)	PLA-OPK (Test)
ÇD	0,948	0,996	0,911	0,987
ÇEM	0,942	0,974	0,903	0,943
ED	0,970	0,994	0,952	0,979
EEM	0,926	0,992	0,919	0,966
DD	-	0,988	-	0,970

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci, EEM: Eğilmede elastikiyet modülü, DD: Darbe direnci, OPK: Odun polimer kompozit.

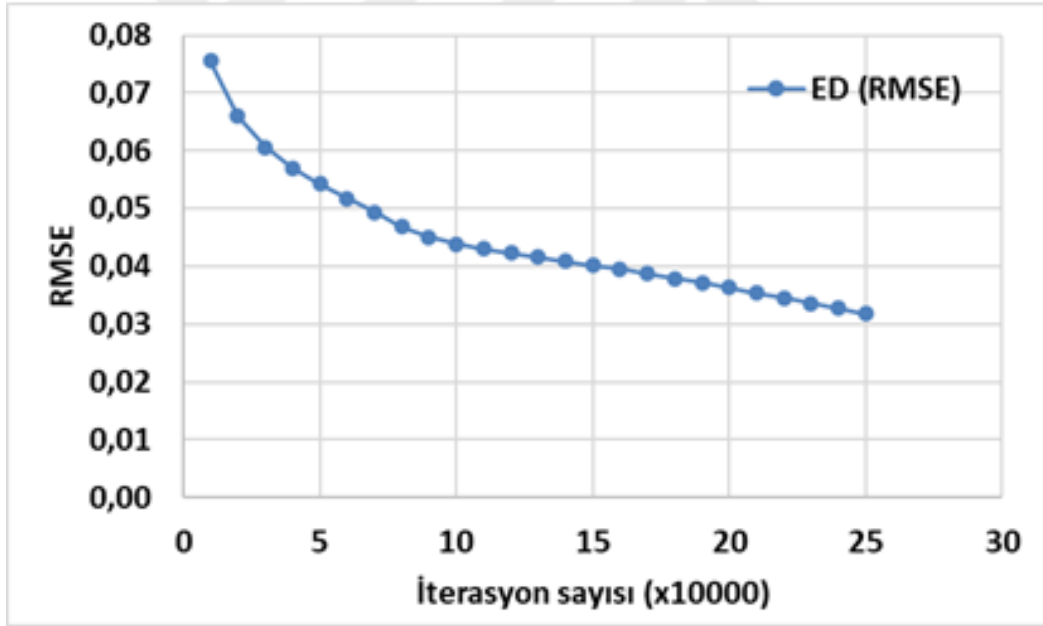
PLA-odun kompozit modellerin öğrenme performansı iterasyon sayısına göre hata değerlerindeki (RMSE) değişimi gösteren öğrenme eğrileri (Şekil 4.17- Şekil 4.21) aracılığı ile değerlendirilmiştir. Modellerin öğrenme performansında kullanılan öğrenme eğrileri dikkate alındığında PLA-odun kompozitlerde iterasyon sayısının artması ile RMSE'nin azaldığı ve belli bir noktadan sonra hata değerlerinin yatay bir seyir izlediği ve öğrenmenin yeterince gerçekleştiğini tespit edilmiştir. Bu noktadan sonra öğrenme eğrilerinin devam etmesi zaman kaybı yaratacağı düşüncesi ile durdurulmuş ve yatay konumda elde edilen en yüksek R^2 değerine sahip modeller dikkate alınmıştır.



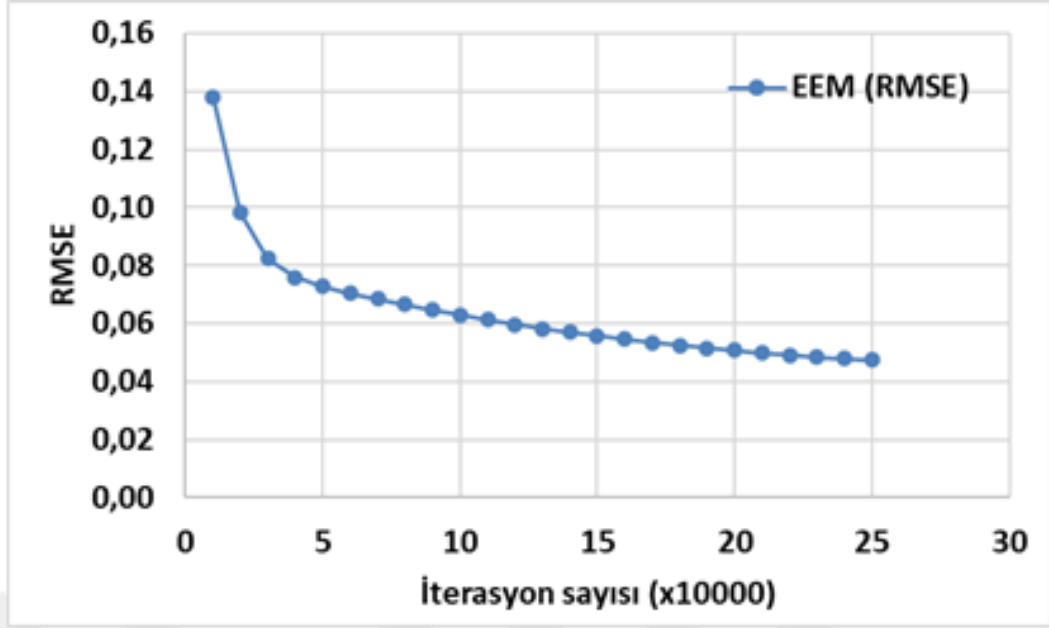
Şekil 4.17. PLA-odun kompozitlerin çekme direnci için öğrenme eğrisi grafiği.



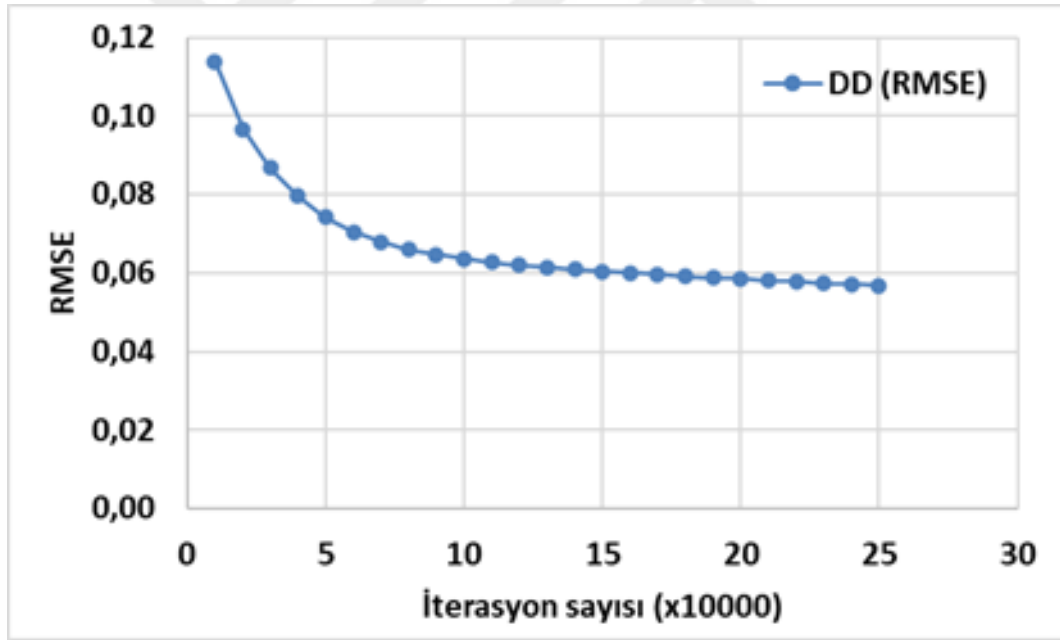
Şekil 4.18. PLA-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.



Şekil 4.19. PLA-odun kompozitlerin eğilme direnci için öğrenme eğrisi grafiği.

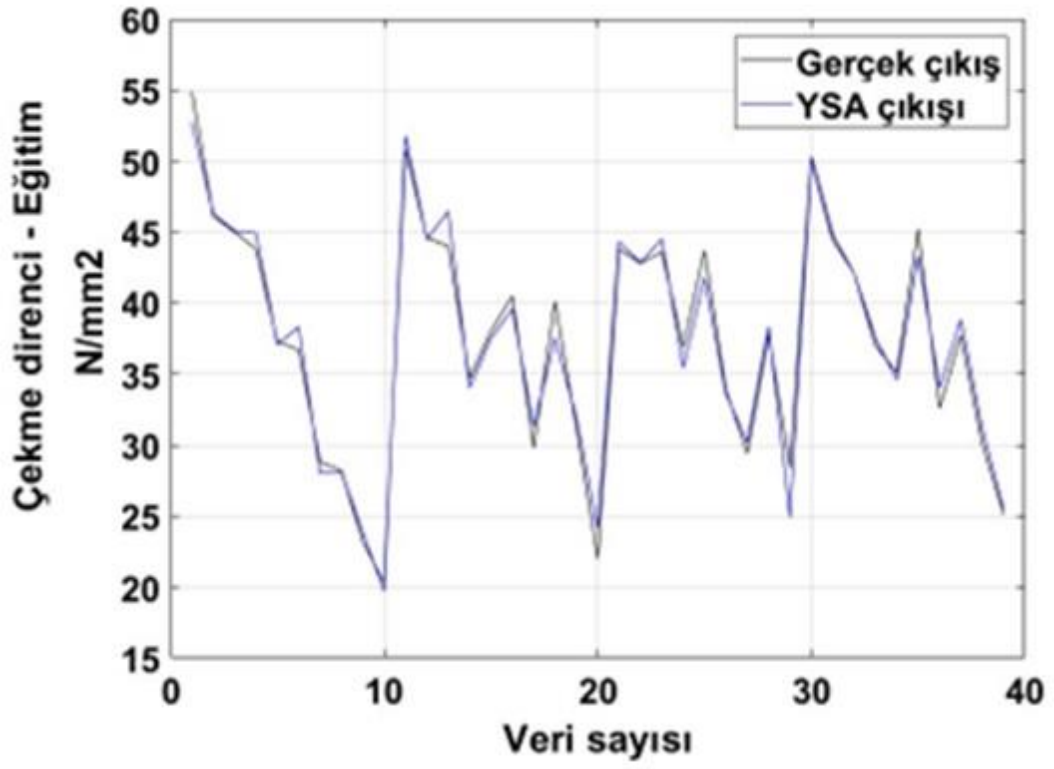


Şekil 4.20. PLA-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için öğrenme eğrisi grafiği.

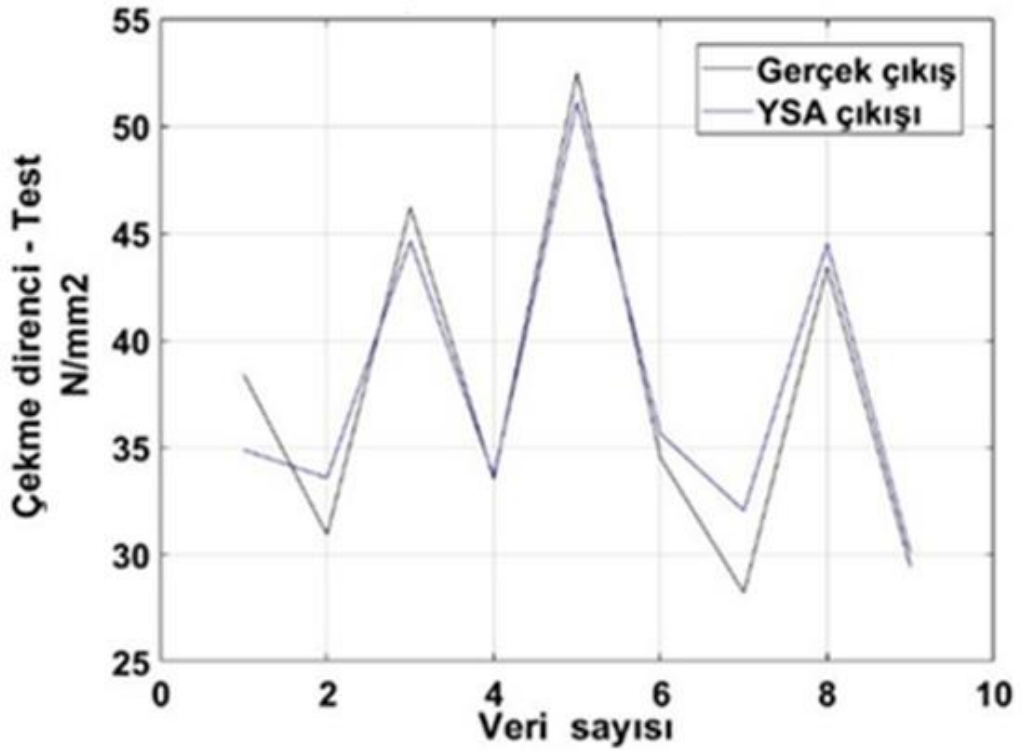


Şekil 4.21. PLA-odun kompozitlerin darbe direnci için öğrenme eğrisi grafiği.

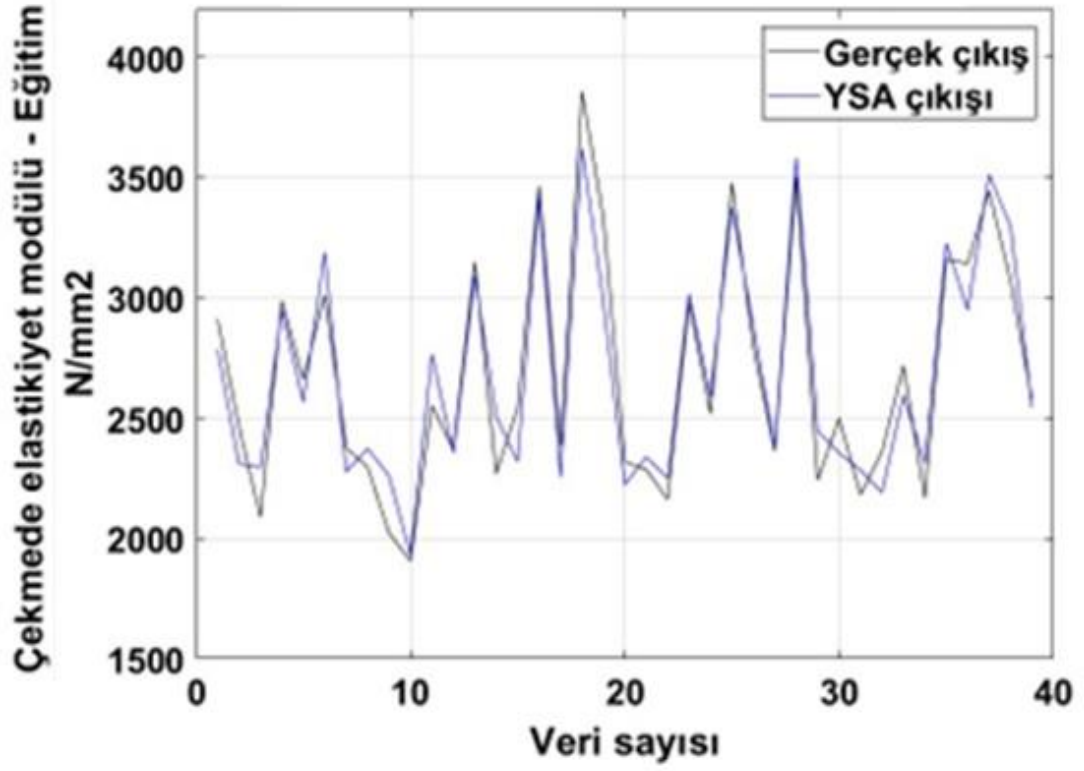
Tüm modellerin eğitim ve test aşamalarında elde edilen R^2 değerleri, PLA-odun kompozitlerin iyi bir eğitim süreci geçirdiği ve bu sebeple de test aşamalarında yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir. Modellerin eğitim ve test aşamalarındaki YSA çıkış değerleri ile gerçek değerlerin ilişkisini gösteren görseller Şekil 4.22-Şekil 4.31’de verilmiştir.



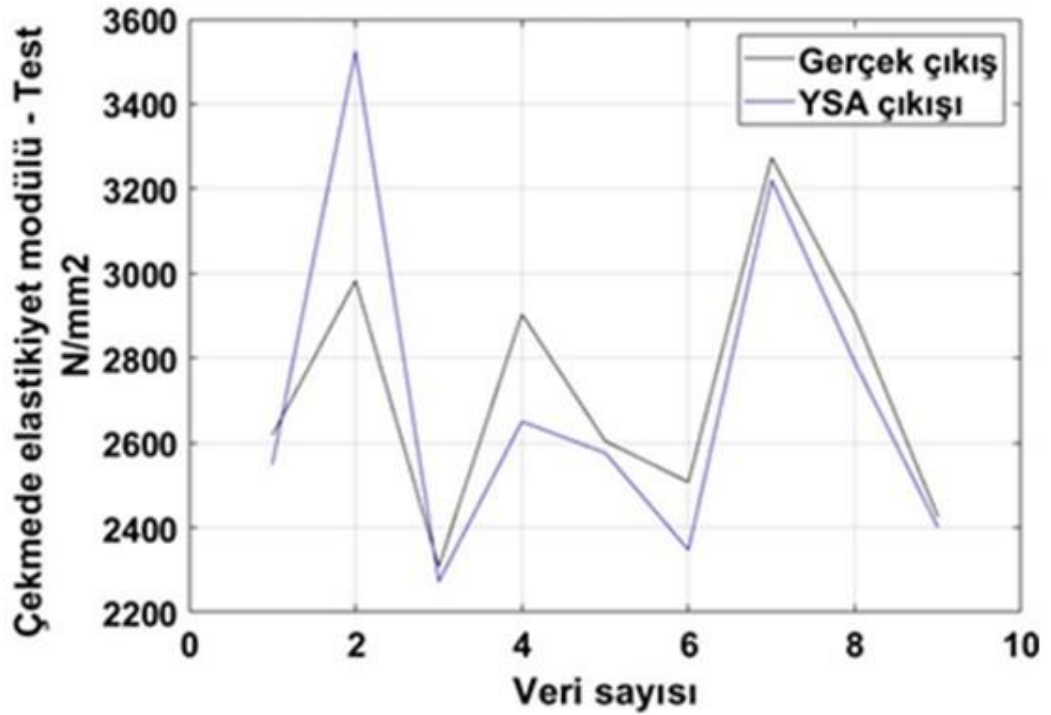
Şekil 4.22. PLA-odun kompozitlerin çekme direnci için eğitim grafiği.



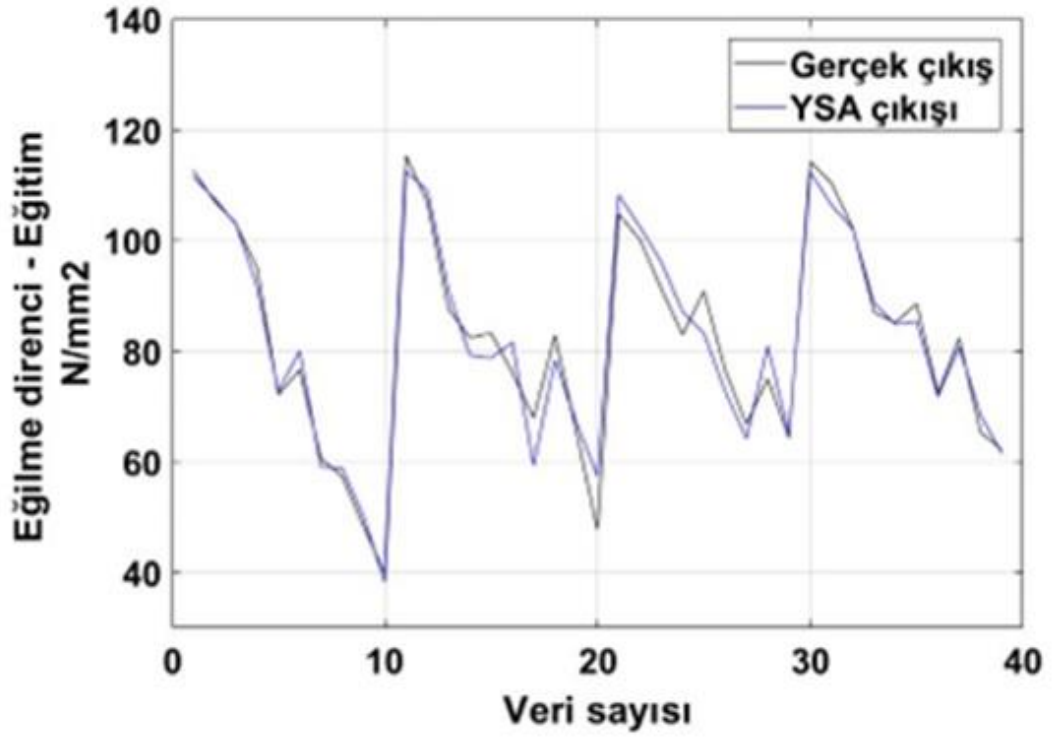
Şekil 4.23. PLA-odun kompozitlerin çekme direnci için test grafiği.



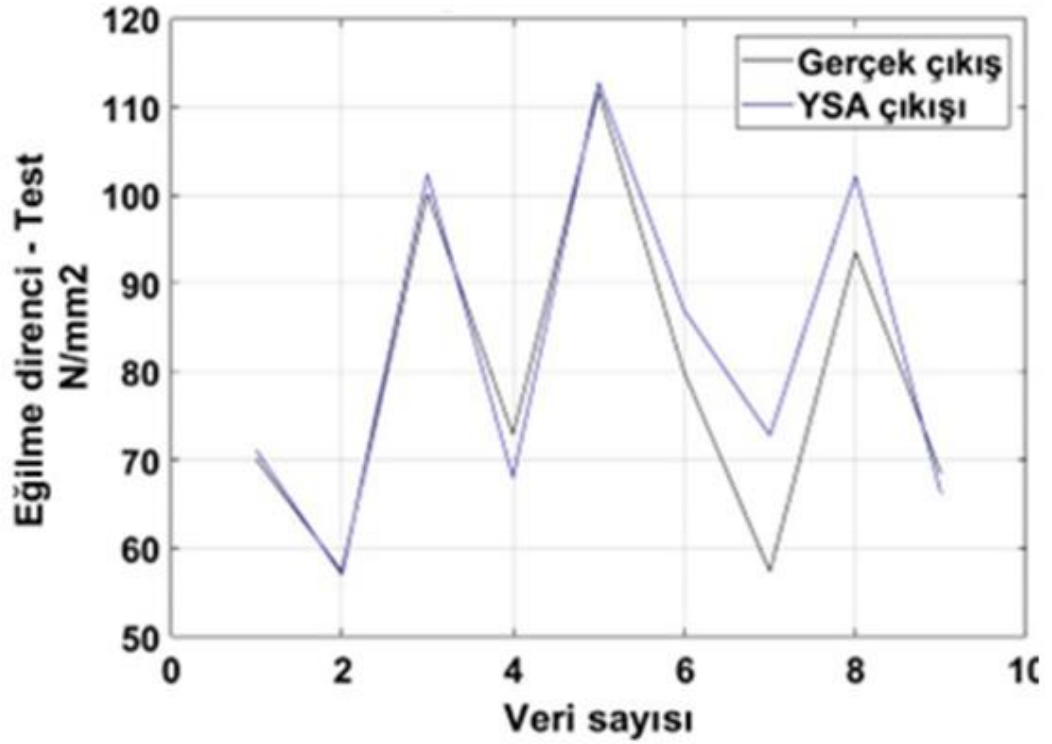
Şekil 4.24. PLA-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.



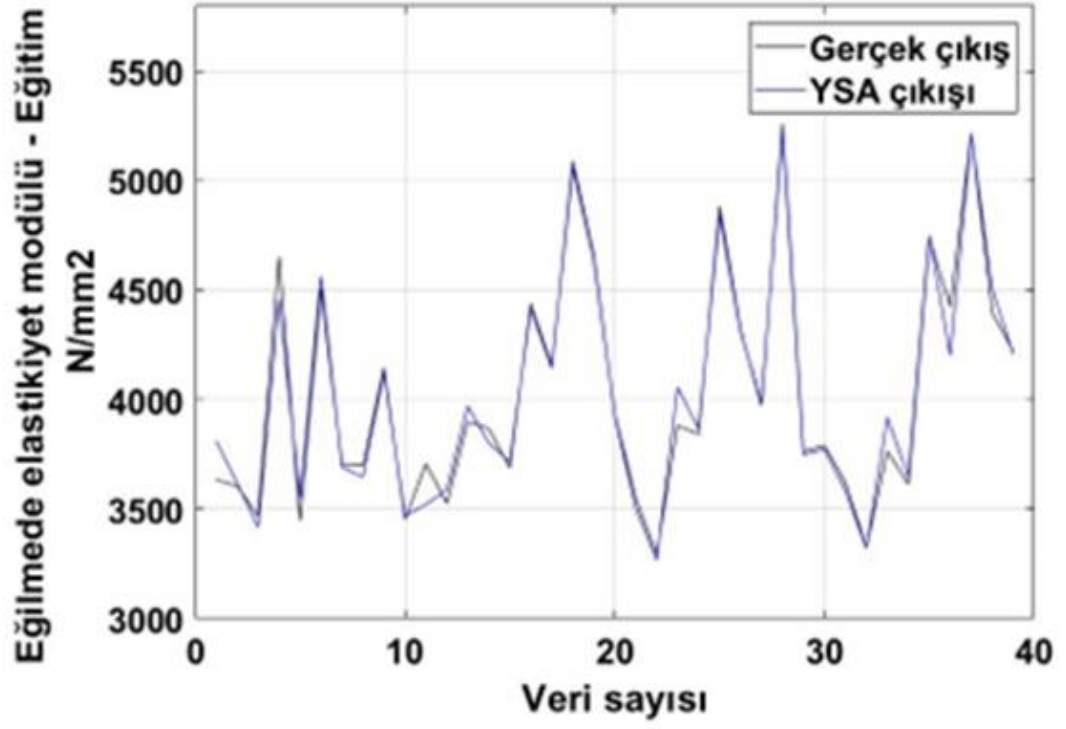
Şekil 4.25. PLA-odun kompozitlerin çekmede elastikiyet modülü için test grafiği.



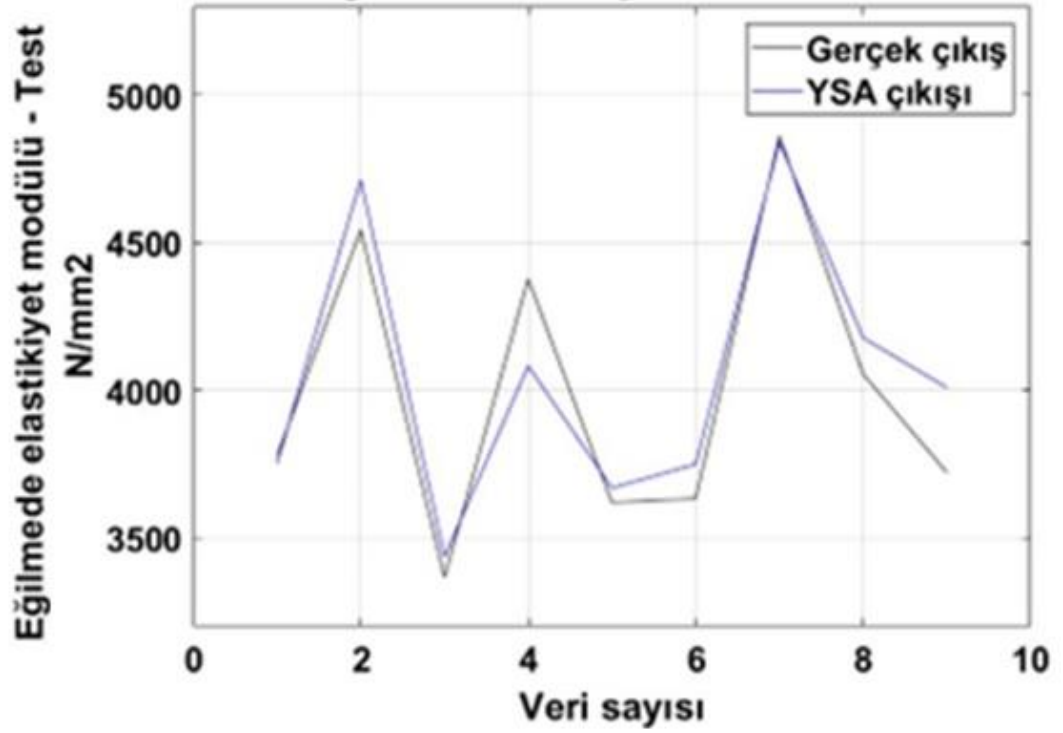
Şekil 4.26. PLA-odun kompozitlerin eğilme direnci için eğitim grafiği.



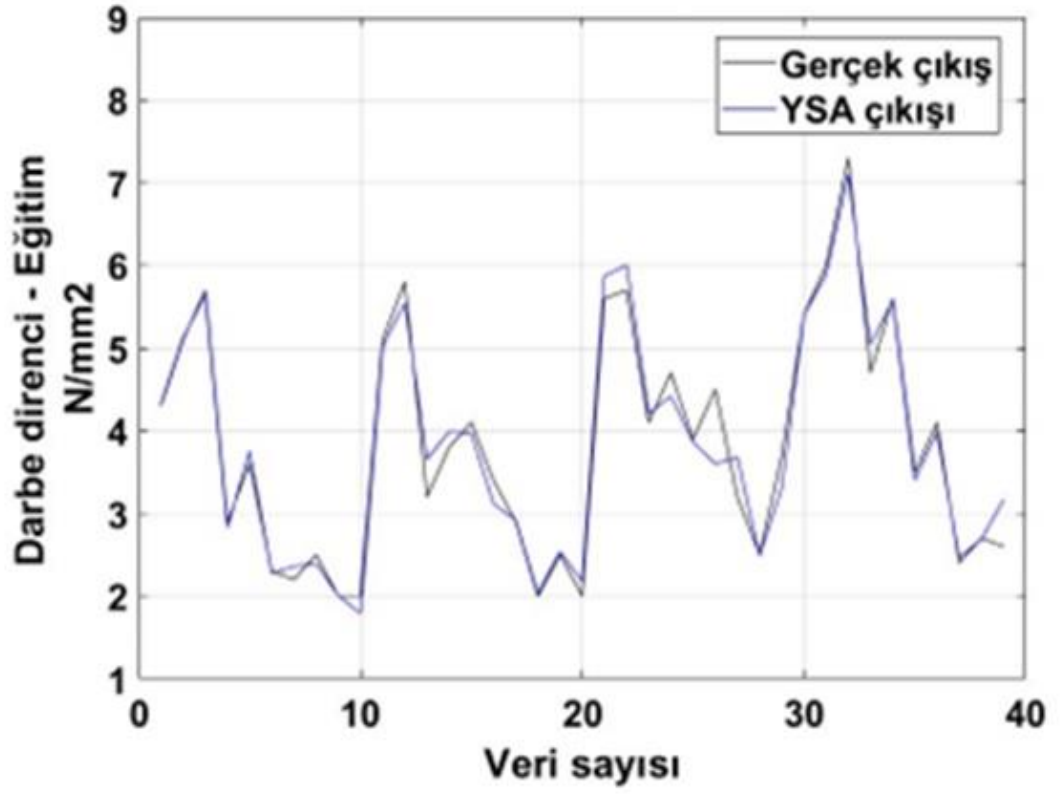
Şekil 4.27. PLA-odun kompozitlerin eğilme direnci için test grafiği.



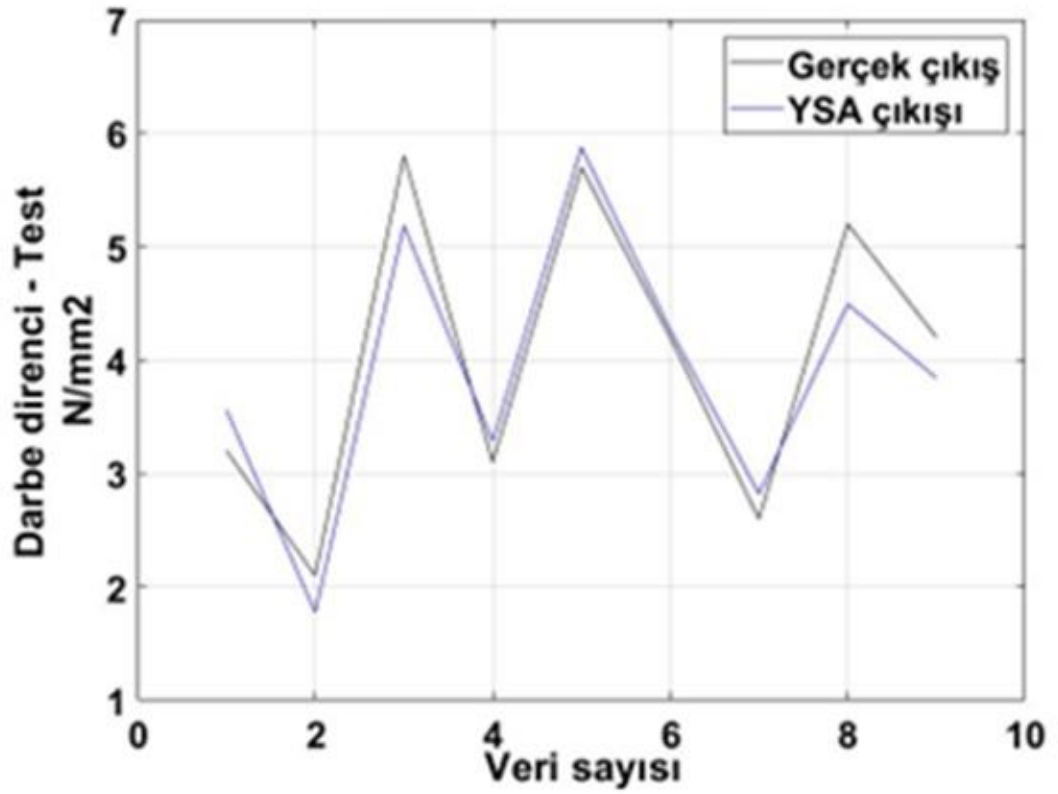
Şekil 4.28. PLA-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için eğitim grafiği.



Şekil 4.29. PLA-odun kompozitlerin eğilmede elastikiyet modülü için test grafiği.



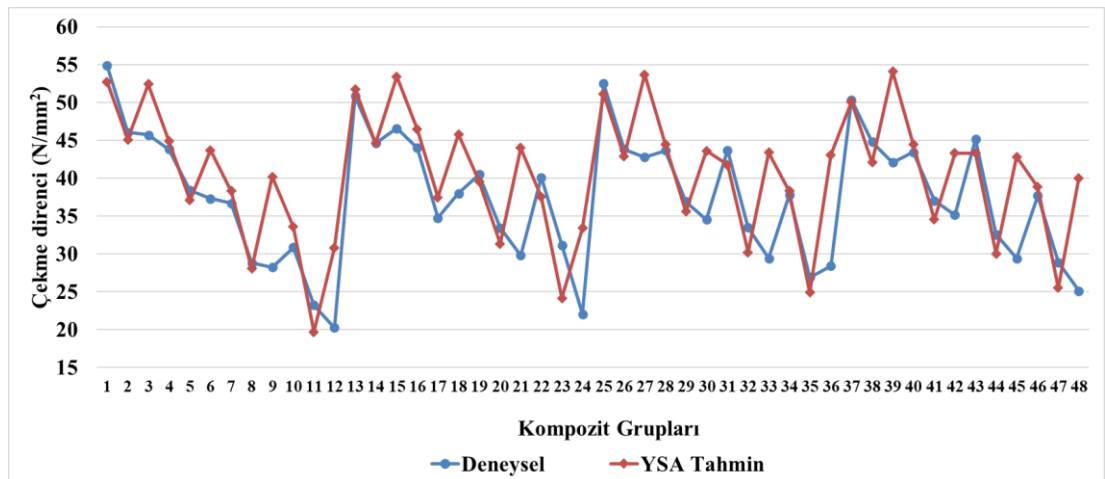
Şekil 4.30. PLA-odun kompozitlerin darbe direnci için eğitim grafiği.



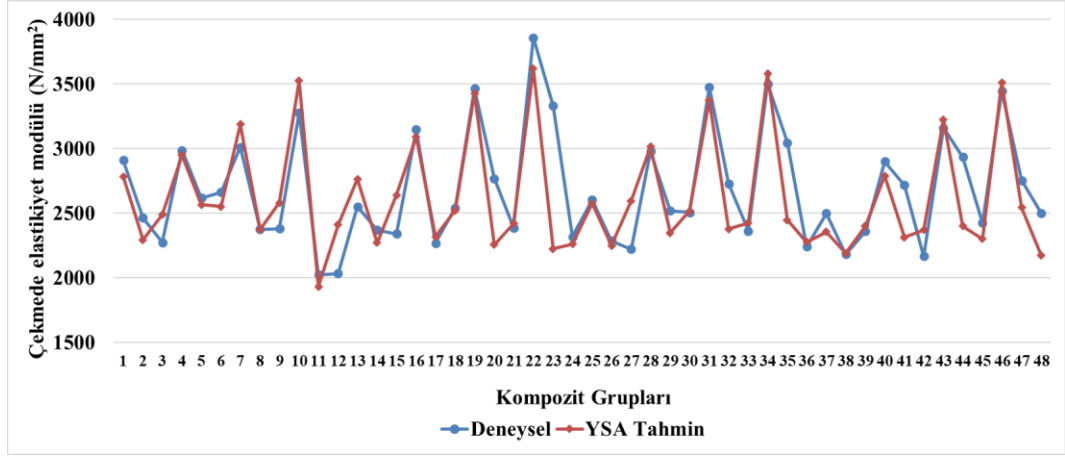
Şekil 4.31. PLA-odun kompozitlerin darbe direnci için test grafiği.

Grafiklere bakıldığında eğitim aşamasındaki YSA çıkış eğrileri ile gerçek çıkış değerlerini gösteren eğrilerin test aşamasından daha fazla çakıştığı, dolayısıyla daha yüksek R^2 ve daha düşük RMSE değerleri elde edildiği gözlenmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmalara (Kökten, 2019; Nasri ve Toubal, 2024; Özşahin ve Singer, 2019; İlçe ve Singer, 2019; Atuanya vd, 2014) görede bu değerlerin öğrenme ve test etme sürecinde yeterli olduğu düşünülmektedir.

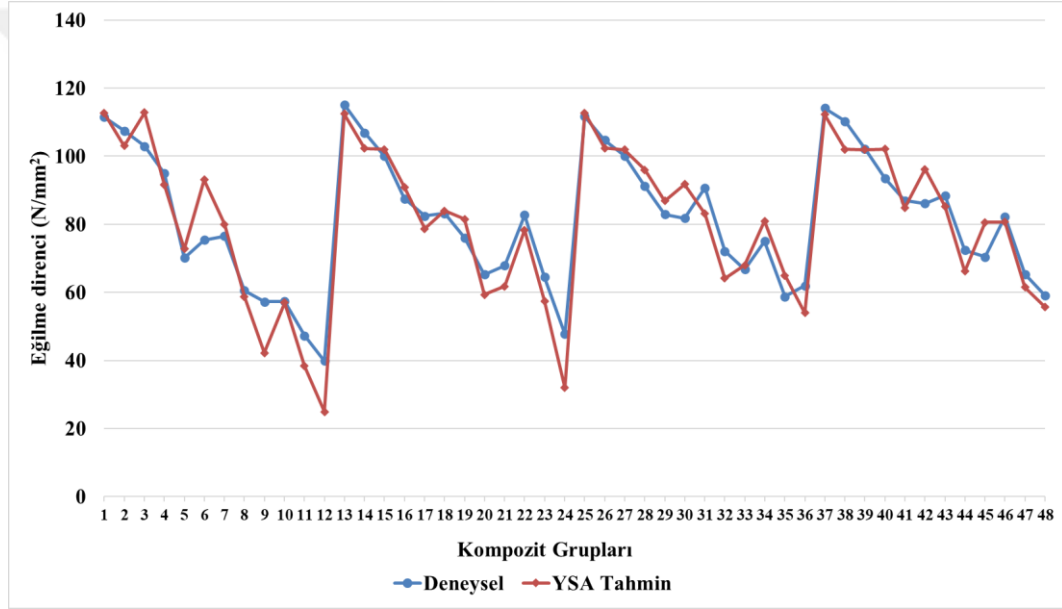
Mekanik testlerin sonuçları ile aynı girdi parametrelerine sahip YSA modellerinin çıktı değerlerinin grafiksel karşılaştırılması her bir mekanik özellik için Şekil 4.32-Şekil 4.36'da, aynı değerlerin tablo halinde karşılaştırılması ise Çizelge 4.11'de verilmiştir. YSA modellerini eğitmek için kullanılan verilerin elde edildiği üretim ve test koşullarının aynı olması, özellikle çekme direncinin ölçüldüğü bazı gruptaki (9,12,21,24,33,36,45,48) test değerleri ile tahmin değerleri arasındaki farkın beklenenden fazla olmasını engelleyememiştir. Bu farkın, yapılacak farklı çalışmalarda üretim süreçleri ve kullanılan parametrelerin çeşitlendirilmesi ile azaltılacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte tüm mekanik özelliklere bakıldığında, numune gruplarının çoğunda 0,90 ve üzeri R^2 değeri elde edilmesi beklenen bir sonuç olmakla birlikte değerlerin literatür (Kökten, 2019; Nasri ve Toubal, 2024; Tosun ve Sofuoğlu, 2023; Özşahin ve Singer, 2019; İlçe ve Singer, 2019; Atuanya vd, 2014) ile de uyumlu olduğu söylenebilir.



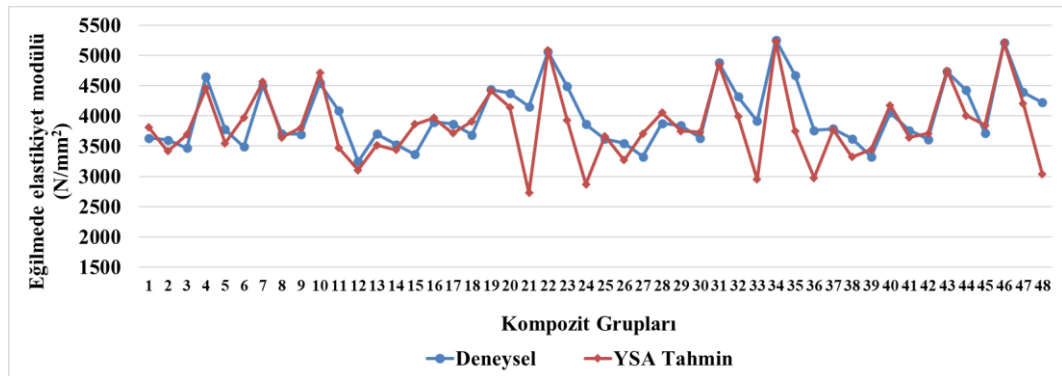
Şekil 4.32. PLA-odun kompozit çekme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



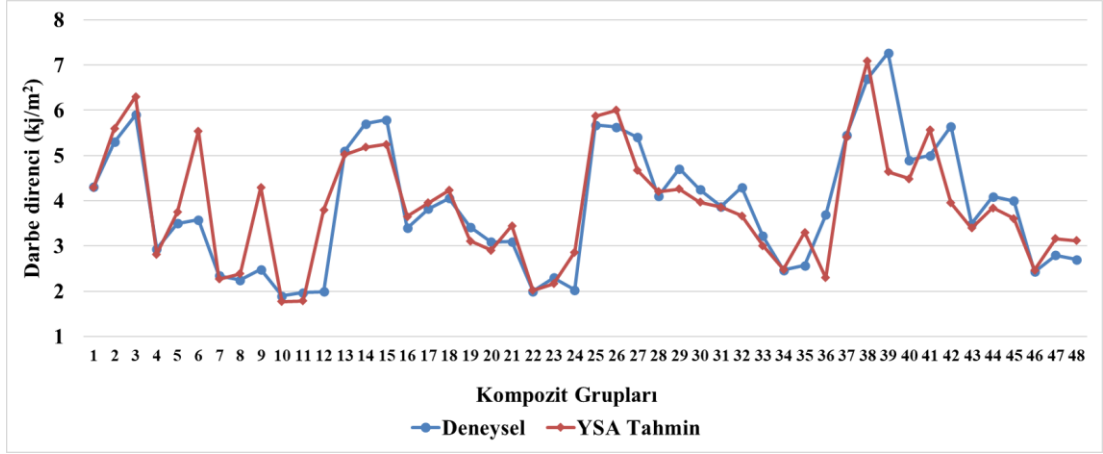
Şekil 4.33. PLA-odun kompozit çekmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.34. PLA-odun kompozit eğilme direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.35. PLA-odun kompozit eğilmede elastikiyet modülü test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.36. PLA-odun kompozit darbe direnci test sonuçları-YSA tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.11. PLA-odun kompozitlerin test sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

Kompozit no	ÇD (N/mm ²)		ÇEM (N/mm ²)		ED (N/mm ²)		EEM (N/mm ²)		DD (kJ/m ²)	
	Test	Tahmin	Test	Tahmin	Test	Tahmin	Test	Tahmin	Test	Tahmin
1	54,9	52,7	2911	2784	111,5	112,6	3634	3812	4,3	4,3
2	46,1	45,1	2463	2295	107,5	103,1	3605	3417	5,3	5,6
3	45,7	52,4	2274	2488	102,9	112,8	3469	3695	5,9	6,3
4	43,8	44,9	2986	2950	95,0	91,6	4652	4457	2,9	2,8
5	38,4	37,1	2618	2566	70,1	72,8	3778	3550	3,5	3,8
6	37,3	43,7	2663	2552	75,4	93,1	3494	3976	3,6	5,5
7	36,7	38,3	3011	3189	76,6	80,0	4505	4561	2,3	2,3
8	28,8	28,1	2376	2374	60,6	58,8	3704	3645	2,2	2,4
9	28,2	40,2	2380	2580	57,3	42,2	3701	3805	2,5	4,3
10	30,9	33,6	3276	3524	57,4	57,0	4542	4712	1,9	1,8
11	23,2	19,7	2022	1932	47,3	38,3	4087	3469	2,0	1,8
12	20,3	30,8	2033	2409	39,9	24,9	3249	3105	2,0	3,8
13	50,8	51,8	2552	2764	115,2	112,4	3705	3521	5,1	5,0
14	44,6	44,6	2370	2272	106,9	102,3	3527	3437	5,7	5,2
15	46,6	53,4	2341	2640	100,1	102,0	3367	3861	5,8	5,3
16	44,0	46,5	3149	3091	87,6	90,9	3899	3970	3,4	3,7
17	34,7	37,5	2269	2319	82,4	78,7	3867	3716	3,8	4,0
18	38,0	44,8	2542	2522	83,2	83,9	3688	3912	4,1	4,2
19	40,5	39,6	3464	3427	76,1	81,5	4438	4413	3,4	3,1
20	33,5	31,3	2768	2256	65,3	59,4	4377	4143	3,1	2,9
21	29,8	44,0	2388	2421	67,9	61,8	4155	2728	3,1	3,5
22	40,1	37,5	3858	3621	82,8	78,3	5059	5088	2,0	2,0
23	31,2	24,1	3332	2223	64,5	57,5	4486	3929	2,3	2,2
24	22,0	33,4	2319	2261	47,8	32,0	3864	2870	2,0	2,9

25	52,5	51,1	2604	2576	111,7	112,8	3620	3669	5,7	5,9
26	43,8	42,9	2286	2250	104,7	102,4	3551	3268	5,6	6,0
27	42,8	53,7	2222	2595	100,1	101,9	3329	3709	5,4	4,7
28	43,6	44,5	2980	3014	91,2	96,0	3880	4055	4,1	4,2
29	36,9	35,6	2519	2347	82,9	86,9	3843	3749	4,7	4,3
30	34,5	43,6	2507	2516	81,8	91,7	3633	3728	4,2	4,0
31	43,7	41,8	3477	3374	90,8	83,2	4882	4842	3,9	3,9
32	33,5	30,2	2729	2378	72,1	64,2	4318	3988	4,3	3,7
33	29,4	43,4	2363	2426	66,8	68,0	3915	2950	3,2	3,0
34	37,8	38,3	3502	3582	75,0	80,9	5260	5232	2,5	2,5
35	26,9	24,9	3047	2446	58,8	64,9	4674	3748	2,6	3,3
36	28,4	43,1	2242	2277	62,0	53,9	3763	2979	3,7	2,3
37	50,3	50,1	2499	2355	114,2	112,3	3790	3773	5,4	5,4
38	44,8	42,1	2182	2190	110,3	102,0	3622	3321	6,7	7,1
39	42,1	54,1	2360	2400	102,2	101,9	3326	3446	7,3	4,6
40	43,4	44,5	2900	2790	93,6	102,2	4054	4177	4,9	4,5
41	37,0	34,6	2718	2313	87,0	84,8	3764	3648	5,0	5,6
42	35,1	43,3	2168	2371	86,1	96,2	3614	3710	5,6	4,0
43	45,2	43,3	3161	3226	88,5	85,3	4735	4748	3,5	3,4
44	32,6	30,0	2935	2400	72,4	66,2	4423	4009	4,1	3,8
45	29,4	42,8	2424	2302	70,4	80,6	3721	3847	4,0	3,6
46	37,7	38,8	3445	3512	82,3	80,7	5215	5212	2,4	2,5
47	28,9	25,5	2755	2544	65,3	61,5	4396	4207	2,8	3,2
48	25,1	40,0	2499	2172	59,1	55,8	4221	3034	2,7	3,1

ÇD: Çekme direnci, ÇEM: Çekmede elastikiyet modülü, ED: Eğilme direnci,
EEM: Eğilmede elastikiyet modülü, DD: Darbe direnci

YSA modellerinin performanslarını belirlemek için hesaplanan R^2 , RMSE ve MAPE değerleri Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.16’da verilmiştir. Mekanik testler sonucu, elde edilen veriler ışığında test sonuçları ile tahmin değerleri arasındaki R^2 değerleri, çekme direnci için 48 gruptan 42’sinde 0,900 ve üzerinde, diğer gruplarda ise (12, 21, 24, 33, 36, 48) 0,862-0,896 arasında bulunmuştur. Çekmede elastikiyet modülü için R^2 değerleri bir gruptaki (23) 0,729 değeri dışında 0,919 ve üzerinde bulunmuştur. Eğilme direnci için R^2 değerleri üç grup (9,12,24) dışında 0,945 ve üzerinde bulunmuştur. Eğilmede elastikiyet modülü için R^2 değerleri dört grup (21, 24, 33, 48) dışında 0,906 ve üzerinde bulunmuştur. Darbe direnci için R^2 değerleri altı grup (6, 9, 12, 36, 39, 42) dışında 0,900 ve üzerinde bulunmuştur. Tüm mekanik özelliklerde elde edilen R^2 değerlerinin çoğunun 0,900 ve üzerinde olması beklenen bir sonuç olmakla birlikte tahmin edilen değerler ve gerçek değerler arasında iyi bir

ilişki olduğu söylenebilir. Literatürde R^2 değerini 0,900'ün altında (0,762) bulan çalışmalar yapılmıştır (Tosun ve Sofuoğlu, 2023).

Bu bağlamda RMSE değeri için bir başarı kistası olmamakla birlikte elde edilen değerlerin 0'a yakın olması hedeflenen bir durumdur. Çekme direnci için tüm gruptaki RMSE değerleri 0,430 ve altındadır. Çekmede elastikiyet modülü için tüm gruptaki RMSE değerleri 0,630 ve altındadır. Eğilme direnci için tüm gruptaki RMSE değerleri 0,236 ve altındadır. Eğilmede elastikiyet modülü için tüm gruptaki RMSE değerleri 0,717 ve altındadır. Darbe direnci için ise tüm gruptaki RMSE değerleri 0,518 ve altındadır. Performans fonksiyonlarından biri olan RMSE değerleri geliştirilebilir olmakla birlikte kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır. Literatürde RMSE değerini 1'in üzerinde (1,245) bulan çalışmalarda (Özşahin ve Singer, 2021) mevcuttur.

Çekme direnci için MAPE değerlerinin 13 grup (9, 12, 21, 23, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48) dışında %17,8'in altında olduğu tespit edilmiştir. Çekmede elastikiyet modülü için MAPE değerinin bir grup (23) dışındaki tüm kompozit gruplarında %19,7'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Eğilme direnci için MAPE değerlerinin dört kompozit grup (6, 9, 12, 24) dışında %18,9'un altında olduğu gözlenmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü için MAPE değerlerinin beş grup (21, 24, 33, 36, 48) haricinde %19,8 ve altında olduğu tespit edilmiştir. Darbe direnci için ise MAPE değerlerinin sekiz kompozit grup (6, 9, 12, 24, 35, 36, 39, 42) dışında %15,5'in altında olduğu gözlenmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere %10'un altında olan modeller çok iyi, %10-20 olan modeller ise iyi model olarak sınıflandırılmaktadır. Dolayısıyla MAPE hata değerlerine bakıldığında çekme direnci için oluşturulan modelin biraz daha geliştirilmesi gerekmektedir. Buna karşın diğer mekanik özelliklerde elde edilen modeller çok iyi tahminler yapmıştır.

Çizelge 4.12. Modelin PLA-odun kompozitin çekme direnci tahminindeki R^2 ve hata değerleri.

No	Çekme Direnci			No	Çekme Direnci		
	R^2	RMSE	MAPE (%)		R^2	RMSE	MAPE (%)
1	0,997	0,085	4,0	25	0,998	0,058	2,7
2	0,999	0,029	2,1	26	0,999	0,031	2,2
3	0,983	0,196	14,7	27	0,959	0,317	25,5
4	0,998	0,051	2,4	28	0,999	0,038	1,9
5	0,998	0,053	3,5	29	0,998	0,040	3,5
6	0,978	0,186	17,2	30	0,956	0,263	26,3
7	0,988	0,124	4,4	31	0,998	0,057	4,4
8	0,989	0,083	2,6	32	0,987	0,096	9,9
9	0,911	0,347	42,3	33	0,896	0,405	47,6
10	0,993	0,083	8,8	34	0,989	0,116	1,5
11	0,956	0,119	15,2	35	0,990	0,070	7,5
12	0,880	0,309	52,1	36	0,884	0,425	51,7
13	0,998	0,066	1,9	37	1,000	0,031	0,5
14	1,000	0,008	0,00	38	0,996	0,078	6,0
15	0,984	0,196	14,6	39	0,950	0,347	28,7
16	0,995	0,279	5,6	40	0,999	0,031	2,5
17	0,989	0,112	7,9	41	0,994	0,075	6,7
18	0,973	0,212	17,9	42	0,964	0,237	23,2
19	0,999	0,385	2,3	43	0,998	0,062	4,1
20	0,992	0,081	6,4	44	0,993	0,076	7,8
21	0,896	0,411	47,6	45	0,902	0,388	45,6
22	0,990	0,108	6,5	46	0,988	0,125	3,0
23	0,915	0,205	22,6	47	0,981	0,101	11,7
24	0,884	0,330	51,5	48	0,862	0,430	59,2

Çizelge 4.13. Modelin PLA-odun kompozitin çekmede elastikiyet modülü tahminindeki R^2 ve hata değerleri.

No	Çekmede Elastikiyet Modülü			No	Çekmede Elastikiyet Modülü		
	R^2	RMSE	MAPE (%)		R^2	RMSE	MAPE (%)
1	0,997	0,083	4,4	25	0,997	0,077	1,1
2	0,994	0,094	6,9	26	0,995	0,090	1,6
3	0,989	0,139	9,5	27	0,979	0,207	16,8
4	0,992	0,143	1,2	28	0,999	0,064	1,1
5	0,996	0,093	2,0	29	0,966	0,234	6,8
6	0,997	0,070	4,2	30	0,998	0,097	0,4
7	0,988	0,191	5,9	31	0,991	0,178	3,0
8	0,975	0,203	0,1	32	0,974	0,208	12,9
9	0,990	0,144	8,4	33	0,979	0,192	2,7
10	0,988	0,212	7,6	34	0,991	0,187	2,3
11	0,919	0,299	4,5	35	0,939	0,329	19,7
12	0,969	0,233	18,5	36	0,991	0,118	1,5
13	0,994	0,119	8,3	37	0,980	0,183	5,7
14	0,979	0,179	4,1	38	0,994	0,900	0,4
15	0,987	0,167	12,8	39	0,999	0,400	1,7
16	0,995	0,117	1,9	40	0,994	0,262	3,8
17	0,984	0,162	2,2	41	0,968	0,187	14,9
18	0,990	0,137	0,8	42	0,990	0,128	9,4
19	0,999	0,057	1,1	43	0,973	0,287	2,1
20	0,945	0,289	18,5	44	0,943	0,312	18,2
21	0,982	0,176	1,4	45	0,988	0,136	5,1
22	0,993	0,170	6,1	46	0,982	0,257	2,0
23	0,729	0,631	33,3	47	0,976	0,213	7,7
24	0,991	0,117	2,5	48	0,972	0,199	13,1

Çizelge 4.14. Modelin PLA-odun kompozitin eğilme direnci tahminindeki R^2 ve hata değerleri.

No	Eğilme Direnci			No	Eğilme Direnci		
	R^2	RMSE	MAPE (%)		R^2	RMSE	MAPE (%)
1	0,996	0,096	1,0	25	0,998	0,063	0,9
2	0,998	0,068	4,1	26	0,998	0,057	2,2
3	0,992	0,134	9,6	27	1,000	0,028	1,8
4	0,980	0,171	3,6	28	0,997	0,069	5,3
5	0,998	0,046	3,7	29	0,996	0,071	4,9
6	0,963	0,237	23,4	30	0,988	0,133	12,2
7	0,997	0,061	4,5	31	0,986	0,131	8,4
8	0,997	0,042	3,0	32	0,969	0,149	11,0
9	0,868	0,204	26,3	33	0,999	0,034	1,8
10	0,959	0,154	0,7	34	0,987	0,121	7,9
11	0,945	0,120	19,0	35	0,991	0,082	10,4
12	0,570	0,202	37,6	36	0,972	0,121	13,0
13	0,998	0,069	2,4	37	0,999	0,049	1,6
14	0,997	0,074	4,3	38	0,993	0,117	7,5
15	1,000	0,028	1,9	39	0,999	0,040	0,3
16	0,981	0,166	3,8	40	0,992	0,125	9,2
17	0,996	0,064	4,5	41	0,995	0,079	2,5
18	0,999	0,041	0,8	42	0,989	0,135	11,7
19	0,990	0,109	7,1	43	0,989	0,117	3,6
20	0,978	0,117	9,1	44	0,989	0,094	8,5
21	0,988	0,900	8,9	45	0,984	0,135	14,5
22	0,994	0,078	5,4	46	0,999	0,041	1,9
23	0,985	0,093	10,9	47	0,987	0,094	5,9
24	0,756	0,210	33,0	48	0,996	0,048	5,7

Çizelge 4.15. Modelin PLA-odun kompozitin eğilmede elastikiyet modülü tahminindeki R^2 ve hata değerleri.

No	Eğilmede Elastikiyet Modülü			No	Eğilmede Elastikiyet Modülü		
	R^2	RMSE	MAPE (%)		R^2	RMSE	MAPE (%)
1	0,993	0,155	4,9	25	0,999	0,069	1,4
2	0,994	0,135	5,2	26	0,991	0,151	8,0
3	0,996	0,118	6,5	27	0,989	0,191	11,4
4	0,989	0,231	4,2	28	0,993	0,165	4,5
5	0,984	0,224	6,0	29	0,997	0,095	2,4
6	0,984	0,248	13,8	30	0,998	0,081	2,6
7	0,998	0,109	1,2	31	0,998	0,111	0,8
8	0,998	0,090	1,6	32	0,987	0,223	7,6
9	0,995	0,140	2,8	33	0,893	0,480	24,7
10	0,973	0,388	3,7	34	0,996	0,158	0,5
11	0,968	0,309	15,1	35	0,906	0,572	19,8
12	0,982	0,206	4,4	36	0,926	0,404	20,8
13	0,997	0,102	5,0	37	0,992	0,169	0,5
14	0,994	0,137	2,6	38	0,991	0,158	8,3
15	0,983	0,248	14,7	39	0,995	0,124	3,6
16	0,986	0,237	1,8	40	0,997	0,121	3,0
17	0,997	0,108	3,9	41	0,993	0,149	3,1
18	0,995	0,137	6,1	42	0,998	0,091	2,7
19	0,991	0,213	0,6	43	0,992	0,207	0,3
20	0,987	0,207	5,4	44	0,986	0,239	9,4
21	0,720	0,717	34,4	45	0,991	0,180	3,4
22	0,997	0,128	0,6	46	1,000	0,052	0,1
23	0,979	0,282	12,4	47	0,981	0,292	4,3
24	0,874	0,507	25,7	48	0,842	0,601	28,1

Çizelge 4.16. Modelin PLA-odun kompozitin darbe direnci tahminindeki R^2 ve hata değerleri.

No	Darbe Direnci			No	Darbe Direnci		
	R^2	RMSE	MAPE (%)		R^2	RMSE	MAPE (%)
1	0,974	0,131	0,3	25	0,993	0,097	3,5
2	0,990	0,108	5,7	26	0,972	0,190	6,5
3	0,989	0,126	6,8	27	0,955	0,188	13,5
4	0,979	0,079	3,9	28	0,989	0,083	2,5
5	0,973	0,120	7,1	29	0,983	0,100	9,5
6	0,864	0,379	54,7	30	0,954	0,158	6,4
7	0,994	0,030	3,1	31	0,982	0,097	0,3
8	0,964	0,086	6,4	32	0,938	0,169	14,7
9	0,868	0,260	53,0	33	0,958	0,118	6,6
10	0,981	0,043	6,8	34	0,973	0,077	0,4
11	0,968	0,060	9,1	35	0,948	0,142	28,5
12	0,871	0,210	55,4	36	0,617	0,269	37,7
13	0,992	0,084	1,6	37	0,981	0,139	0,9
14	0,988	0,102	9,1	38	0,991	0,129	5,8
15	0,985	0,113	9,4	39	0,659	0,519	36,2
16	0,968	0,127	7,4	40	0,987	0,094	8,4
17	0,991	0,075	3,3	41	0,991	0,107	11,4
18	0,991	0,072	4,2	42	0,738	0,374	30,1
19	0,975	0,095	9,0	43	0,986	0,077	2,7
20	0,972	0,092	5,8	44	0,955	0,156	6,2
21	0,978	0,104	11,3	45	0,984	0,088	9,8
22	0,944	0,090	1,1	46	0,994	0,038	1,7
23	0,981	0,055	5,7	47	0,987	0,076	12,9
24	0,900	0,177	41,2	48	0,976	0,105	15,6

Tez çalışmasının ikinci bölümünde elde edilen R^2 , RMSE ve MAPE değerlerine bakarak, YSA modellerinin iyi tahminler yaptığı ve PLA-odun kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, odun polimer kompozitlerin üretiminde, üretim parametrelerine bağlı olarak elde edilecek malzemenin mekanik özelliklerinin YSA modeli kullanılarak, tahribatlı muayene yapılmadan, çok daha hızlı ve düşük maliyetle tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Birinci bölümde literatüre dayalı veriler kullanılarak YSA modelleri oluşturulmuş, bu modellerle odun polimer kompozitlerinin eğilme elastikiyet modülü, eğilme direnci, çekmede elastikiyet modülü ve çekme direnci özellikleri tahmin edilmiştir. Başarılı sonuçlar alınmasıyla da ikinci bölümde PLA-odun kompozitinin mekanik özellikleri deneysel verilere dayalı olarak YSA ile tahmin edilmiştir. YSA modellerinin doğruluk oranları R^2 ve performansları RMSE ve MAPE hata değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Literatüre dayalı oluşturulan YSA modellerinde elde edilen R^2 değerleri her dört mekanik özellik için de 0,903 ve üzerindedir. Dolayısıyla tüm modeller için yüksek doğruluk oranına ulaşılmıştır.
2. Odun polimer kompozitler için oluşturulan modellerin doğrulama aşamalarındaki en küçük RMSE değerlerine mekanik özelliklere göre farklılık göstermekle birlikte 6-13 gizli katman nöron sayılarında, 100000-205000 iterasyonda ve tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu ile ulaşılmıştır. Düşük iterasyon sayılarında, düşük RMSE değerlerine ulaşılması modellerin zaman kullanımı açısından da başarılı olduğunu göstermiştir.
3. Odun polimer kompozitler için test sonuçları ile YSA tahmin değerlerinin karşılaştırıldığı ve modellerin performanslarını belirleyen fonksiyonlardan biri olan RMSE değerleri çekme direnci için 0,007-0,071, çekmede elastikiyet modülü için 0,019-0,046, eğilme direnci için 0,027-0,222 ve eğilmede elastikiyet modülü için 0,028-0,073 olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler

modellerin tahmin performanslarının yüksek olduğunu göstermektedir. Odun polimer kompozitler için modellerin performansını belirleyen fonksiyonlardan bir diğeri olan MAPE değerleri; çekme direnci için %2,1-18,8, çekmede elastikiyet modülü için %6,2-12,8, eğilme direnci için %1,2-17,4 ve eğilmede elastikiyet modülü için %4,9-17,1 arasında bulunmuştur. Değerler incelendiğinde hata oranlarının büyük bir bölümünün %10'un altında olması oluşturulan modellerin çok iyi tahminler yaptığını göstermektedir. Geri kalan %10-20 arasındaki hata oranına sahip modeller ise iyi tahmin yapan modeller sınıfına girmektedir.

4. PLA-odun kompozit modellerinde elde edilen R^2 değerleri her beş mekanik özellik için de 0,943 ve üzerindedir. Dolayısıyla tüm modeller için yüksek doğruluk oranına ulaşılmıştır.
5. PLA-odun kompozitler için oluşturulan modellerin doğrulama aşamalarındaki en küçük RMSE değerlerine mekanik özelliklere göre farklılık göstermekle birlikte 10-20 gizli katman nöron sayılarında, 120000-260000 iterasyonda ve tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu ile ulaşılmıştır.
6. PLA-odun kompozitler için test sonuçları ile YSA tahmin değerlerinin karşılaştırıldığı ve modellerin performansını belirleyen fonksiyonlardan biri olan RMSE değerleri çekme direnci için 0,008-0,430, çekmede elastikiyet modülü için 0,039-0,630, eğilme direnci için 0,027-0,236, eğilmede elastikiyet modülü için 0,052-0,717 ve darbe direnci için 0,030-0,518 olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler modellerin tahmin performanslarının yüksek olduğunu göstermektedir. Modellerin performansını belirleyen fonksiyonlardan diğeri olan MAPE değerleri çekme direnci için 29 grupta çok iyi tahmin performansı, 6 grupta ise iyi tahmin performansı göstermiştir. Çekmede elastikiyet modülü için YSA modeli 38 grupta çok iyi, 9 grupta ise iyi tahmin performansı göstermiştir. Eğilme direnci için YSA modeli 36 grupta çok iyi, 8 grupta ise iyi tahmin performansı göstermiştir. Eğilmede elastikiyet modülü için YSA modeli 37 grupta çok iyi, 6 grupta ise iyi tahmin performansı göstermiştir. Darbe direnci için ise YSA modeli 34 grupta çok iyi, 6 grupta ise iyi tahmin

performansı göstermiştir. Elde edilen hata oranlarına bakıldığında eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, çekmede elastikiyet modülü ve darbe direnci modelleri çok iyi tahminler yapmıştır. Çekme direnci modelinin ise geliştirilmeye ihtiyacı vardır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak yapılan öneriler maddeler halinde sunulmuştur. Buna göre;

1. Özellikle çekme direnci için aynı veri seti kullanılarak farklı ağ mimarisi ve aktivasyon fonksiyonları ile daha iyi tahmin yapabilecek modeller üzerinde çalışılabilir.
2. Mekanik özelliklerin yanı sıra maliyeti de dikkate alan, en uygun üretim parametrelerinin belirlenebileceği bir optimizasyon çalışması yapılabilir.
3. Ara yüz modelleri geliştirilerek üretim yapan firmalara hizmet sunulabilir.

KAYNAKLAR

1. Bulut, M., "Türkiye’de kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2014).
2. Mengeloğlu, F., Alma, M. H. ve Çetin, N. S., "Plastik endüstrisinde buğday sapı ununun kullanılabilirliği", **Orman Fakültesi Dergisi**, 2 (2) 57-65 (2002).
3. Simonsen, J., "The mechanical properties of wood fiber plastic composites: theoretical vs. experimental. In: Proceedings of wood fiber plastic composites", **Forest Products Society**, 47-55 (1995).
4. Beyatlı, Y. "Biyoteknoloji ve biyoprotein üretimi", **Kökem Derneği Bilimsel Yayınları**, Ankara, 54-59 (1996).
5. Matuana, L. M. and Heiden, P. A., "Wood composites", **Encyclopedia Of Polymer Science And Technology**, 12 521-546. (2004).
6. Aslan, M., "Odun plastik kompozitlerinde geri dönüşüm ve atık malzeme kullanımı", **VI. Ulusal Orman Fakülteleri Öğrencileri Kongresi**, Düzce, 63-67 (2008).
7. Adhikary, K. B., Pang, S. and Staiger, M.P., "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)", **Sciencedirect, Composites: Part B** 39,807-815 (2008).
8. Koohestani, B., Ganetri, I. and Yılmaz, E., "Effects of silane modified minerals on mechanical, microstructural, thermal, and rheological properties of wood plastic composites", **Composites Part B**, Elsevier, 103-111 (2017).
9. Mbarek, T. B., Robert, L., Hugot, F. and Orteu, J. J., "Mechanical behavior of wood-plastic composites investigated by 3d digital image correlation", **Journal Of Composite Materials**, 45 (26), 2751-2764 (2011).
10. Nourbakhsh, A. and Ashori, A., "Preparation and properties of wood plastic composites made of recycled high-density polyethylene", **Journal Of Composite Materials**, Vol 43, No. 8, 877-883 (2009).
11. Bouafif, H., Koubaa, A., Perré, P. and Cloutier, A., "Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites", **Composites: Part A** 40, 1975-1981 (2009)

12. Rafighi, A., Dorostkar, A. and Madhoushi, M., "Investigation on mechanical properties of composite made of sawdust and high density polyethylene", *International Journal Of Lignocellulosic Products*, 1 (2), 134-141 (2014).
13. Chaudemanche, S., Perrot, A., Pimbert, S., Lecompte, T. and Faure, F., "Properties of an industrial extruded HDPE-wpc: The effect of the size distribution of wood flour particles", *Construction And Building Materials*, 162, 543-552 (2018).
14. Karakuş, K., Şeker, B., Kılıç, İ., Ciobanu, R. C. ve Mengeloğlu, F., "Lignoselülozik esaslı atıkların termoplastik kompozit üretiminde değerlendirilmesi", *I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, Kahramanmaraş (2011).
15. Çukur, U., "Giresun ilinde bulunan lignoselülozik materyallerden polimer kompozit üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Artvin Çoruh Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Artvin (2016).
16. Çavdar, A. D., "Farklı lignoselülozik ve termoplastik maddelerle üretilen odunplastik kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon (2011).
17. Ergezer, H., Dikmen, M. ve Özdemir, E., "Yapay sinir ağları ve tanıma sistemleri", *Pivolka*, Sayı: 6, s.14-17 (2003).
18. Atuanya, C. U., Goverment M.R., Nwobi-Okoye, C. C. and Onukwuli O. D., "Predicting the mechanical properties of date palm wood fibre-recycled low density polyethylene composite using artificial neural network", *International Journal Of Mechanical And Materials Engineering*, 1:7 (2014).
19. Chan, R.W., Haasen, P. and Kramer, E.J., "Structure and properties of composites", *Materials Science And Technology*, 13: 1-339 (1993).
20. Jacobs, A. J. and Kilduff, T. F., "Engineering materials technology: Structure, processing, properties and selection", 5. Edition, *Prentice-Hall Inc.*, USA, 357-397, 645-749 (2005).
21. İnem, B., "The development of the structures and properties of magnesium matrix silicon carbide reinforced composites", Ph.D Thesis, *School Of Materials, University Of Leeds, England, Leeds*, 1-50 (1993).
22. Sur, G., "Karma takviyeli alüminyum matriksli kompozitlerin üretimi, mekanik özellikler ve işlenebilirliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2008).
23. Weeton, J.W., Peters, D.M., Thomas, K.L., "Engineer's guide to composite materials", *American Society For Metals*, 1-50 (1990).
24. Groover, M.P., "Fundamentals of modern manufacturing", *Prentice-Hall Inc.*, USA, 251-260, 430-639 (1996).

25. Çiftçi, İ., "Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-90 (2003).
26. Sur, G., "Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-40 (2002).
27. Mengeloglu, F. and Karakus, K., "Thermal degradation, mechanical properties and morphology of wheat straw flour filled recycled thermoplastic", **Sensors**, 8 497-516 (2008).
28. Karakuş, K., "Üniversitemizdeki polietilen ve polipropilen atıkların polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kahramanmaraş (2008).
29. Chowdhury, M. J. A. and Wolcott, M. P., "Compatibilizer selection to improve mechanical and moisture properties of extruded wood-HDPE composites", **Forest Product Journal**, 57 (9) 46-53 (2007).
30. Gramann, P. J. and Osswald, T. A., "Simulation of the melt mixing process of natural fiber-filled polyolefin composites: A boundary element approach. In: Proc. wood fiber-polymer composites, process, and material options" Ed. Wolcott, E.D., **Forest Product Society**, Madison, WI. 25-32 (1993).
31. Wolcott, M. P. and Englund, K. A., "Technology review of wood-plastic composite", **Proceeding of 33rd International Particleboard/ Composite Materials Symposium**, Washington, USA, 103-111 (1999).
32. Yam, K. L., Gogoi, B. K., Lai, C. C. and Selke, S. E., "Composites from compounding wood fibers recycled high-density polyethylene", **Polymer Engineering and Science**, 30 (11), 693-699 (1990).
33. Vilkki, M., "WPC processing-products-applications", **The Finnish-Swedish Wood Material Science and Engineering Research Programme's Annual Seminar**, Helsinki (2006).
34. Gökalp, E., "Odunsu materyal kullanımının polyester esaslı (mermerit) levhaların bazı teknolojik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon (2006).
35. Martelli, F. G., "Twin-screw extruders: A basic understanding", **Van Nostrand Reinhold Company**, New York, NY., 137 (1983).
36. Stevens, M. J., "Extruder principles and operation", **Elsevier Applied Science Publisher**, New York, NY., 339 (1985).
37. Rosen, S. L., "Fundamental principles of polymeric materials", **John Wiley and Sons, Inc.**, New York, NY., 444 (1993).

38. Alavi, S. A. R., Angaji, M. T. and Gholami, Z., "Twin-screw extruder and effective parameters on the HDPE extrusion process", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 49, 204-207 (2009).
39. Akkurt, S., "Plastik malzeme bilimi teknolojisi ve kalıp tasarımı", *Birsan Yayinevi*, İstanbul, 552 (2007).
40. Fulmer, M. S., "Compounding and processing additives for woodfiber-plastic composites", *5th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, May, Madison, WI (1999).
41. Martins, G., Antunes, F., Mateus, A. and Malça, C., "Optimization of a wood plastic composite for architectural applications", *Procedia Manufacturing*, 12, 203-220 (2017).
42. Balasuriya, P.W., Ye, L. and Mai Y. W., "Mechanical properties of wood flake-polyethylene composites. part I: Effects of processing methods and matrix melt flow behaviour", *Composites: Part A* 32, 619-629 (2001).
43. Homkhiew, C., Rawangwong, S., Boonchouytan, W., Thongruang, W. and Ratanawilai, T., "Composites from thermoplastic natural rubber reinforced rubberwood sawdust: Effects of sawdust size and content on thermal, physical, and mechanical properties", *International Journal Of Polymer Science*, Volume 2018, Article ID 7179527, 11 pages (2018).
44. Kaymakçı, A., "Çeşitli güçlendirici dolgularla üretilen ahşap plastik nanokompozitlerin karakterizasyonu", Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2015).
45. Bledzki, A. K., Faruk, O. and Huque, M., "Physico-mechanical studies of wood fiber reinforced composites", *Polymer-Plastics Technology And Engineering*, 41(3), 435-451 (2002).
46. Ndiaye, D., Matuana, L. M., Therias, S. M., Vidal, L., Tidjani, A. and Gardette, J. L., "Thermal and mechanical properties of polypropylene/wood-flour composites", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 119, 3321-3328 (2010).
47. Stark, N. M. and Berger, M. J., "Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites", *Intertech Conferences*, December 8-10 (1997a).
48. Leu, S. Y., Yang, T. H., Lo, S., F. and Yang, T. H., "Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (Wpcs)", *Construction And Building Materials*, 29, 120-127 (2012).
49. Karmarkar, A., Chauhan, S. S., Modak J., M. and Chanda, M., "Mechanical properties of wood-fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel

- compatibilizer with isocyanate functional group", *Composites: Part A*, 38, 227-233 (2007).
50. Nourbakhsh, A. and Ashori, A., "Effects of particle size and coupling agent concentration on mechanical properties of particulate-filled polymer composites", *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, 23:2,169-174 (2010).
 51. Haque, M. M. U., Goda, K., Ito, H., Ogoe, S., Okamoto, M., Ema, T., Kagawa, K. and Nogami, H., "Melt-viscosity and mechanical behaviour of polypropylene (PP)/wood flour composites: Effect of pulverization of wood flour with and without water", *Advanced Industrial And Engineering Polymer Research* 2, 42-50 (2019).
 52. Oksman, K. and Clemons, C., "Mechanical properties and morphology of impact modified polypropylene-wood flour composites", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 67, 1503-1513 (1997).
 53. Stark, N. M. and Rowlands, R. E., "Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites", *Wood And Fiber Science*, 35 (2), 167-174 (2002).
 54. Bledzki, A. K. and Faruk, O., "Wood fibre reinforced polypropylene composites: Effect of fibre geometry and coupling agent on physico-mechanical properties", *Applied Composite Materials*, 10: 365-379 (2003).
 55. Delviawan, A., Kojima, Y., Kobori, H., Suzuki, S., Aoki, K. and Ogoe, S., "The effect of wood particle size distribution on the mechanical properties of wood-plastic composite", *Journal Of Wood Science*, 65:67 (2019).
 56. Murayama, K., Ueno, T., Kobori, H., Kojima, Y., Suzuki, S., Aoki, K., Ito, H., Ogoe S. and Okamoto, M., "Mechanical properties of wood/plastic composites formed using wood flour produced by wet ball-milling under various milling times and drying methods", *Journal Of Wood Science*, 65:5 (2019).
 57. Turku, I., Keski-saari, A., Kärki, T., Puurtinen, A. and Marttila, P., "Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends", *Composite Structures*, 161 469-476 (2017).
 58. Moreno, D. D. P. and Saron, C., "Low-density polyethylene waste/recycled wood composites", *Composite Structures*, 176, 1152-1157 (2017).
 59. Effah, B., Reenen, A. V. and Meincken, M., "Mechanical properties of wood-plastic composites made from various wood species with different compatibilisers", *Eur. J. Wood Prod.* 76: 57-68 (2018).
 60. Prachayawarakorn J., Khamsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., "Effects of compatibilizer type and rubber-wood sawdust content on the mechanical, morphological, and thermal properties of PVC/LDPE blend", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 102, 598-606 (2006).

61. Yang, T. C., Wu, T. L., Hung, K. C., Chen, Y. L., and Wu, J. H., "Mechanical properties and extended creep behavior of bamboo fiber reinforced recycled poly (lactic acid) composites using the temperature superposition principle", ***Construction And Building Materials***, vol. 93, pp. 558–563 (2015).
62. Puspita, D., Musyarofah, L., Hidayah, E. and Sujito, S., "Fabrication and tensile properties of bamboo micro-fibrils (BMF)/poly-lactic acid (PLA) green composite", ***Journal Of Physics Conference Series***, vol. 1217, no. 1, p. 012005 (2019).
63. Qian, S., Sheng, K., Yao, W. and Yu, H., "Poly (lactic acid) biocomposites reinforced with ultrafine bamboo-char: morphology, mechanical, thermal, and water absorption properties", ***Journal Of Applied Polymer Science***, vol. 133, no. 20, pp. 1-9 (2016).
64. Wang, F., Yang, M., Zhou, S., Ran, S. and Zhang, J., "Effect of fiber volume fraction on the thermal and mechanical behavior of polylactide-based composites incorporating bamboo fibers", ***Journal Of Applied Polymer Science***, vol. 135, pp. 1-9 (2017).
65. Lee, S. H. and Wang, S., "Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent", ***Composites. Part A, Applied Science And Manufacturing***, vol. 37, no. 1, pp. 80-91 (2006).
66. Zuo, Y., Li, W., Li, P., Liu, W., Li, X. and Wu, Y., "Preparation and characterization of polylactic acid-g-bamboo fiber based on insitu solid phase polymerization", ***Industrial Crops And Products***, vol. 123, pp. 646-653 (2018).
67. Ma, Y., Qian, S., Hu, L., Qian, J., Lopez, C. A. F. and Xu, L., "Mechanical, thermal, and morphological properties of PLA biocomposites toughened with silylated bamboo cellulose nanowhiskers", ***Polymer Composites***, vol. 40, no. 8, pp. 3012-3019 (2019).
68. Qian, S., Mao, H., Sheng, K., Lu, J., Luo, Y. and Hou, C., "Effect of low-concentration alkali solution pretreatment on the properties of bamboo particles reinforced poly (lactic acid) composites", ***Journal Of Applied Polymer Science***, vol. 130, no. 3, pp. 1667-1674 (2013).
69. Wang, Y. N., Weng, Y. X. and Wang, L., "Characterization of interfacial compatibility of polylactic acid and bamboo flour (PLA/BF) in biocomposites", ***Polymer Testing***, vol. 36, pp. 119-125 (2014).
70. Liu, W., Qiu, J., Chen, T., Fei, M., Qiu, R. and Sakai, E., "Regulating tannic acid-crosslinked epoxidized soybean oil oligomers for strengthening and toughening bamboo fibers-reinforced poly (lactic acid) biocomposites", ***Composites Science And Technology***, vol. 181, p. 107709 (2019).
71. Qian, S., Sheng, K., Yu, K., Xu, L. and Lopez, C. A. F., "Improved properties of PLA biocomposites toughened with bamboo cellulose nanowhiskers through

- silane modification", *Journal Of Materials Science*, vol. 53, no. 15, pp. 10920-10932 (2018).
72. Chen, T., Wu, Y., Qiu, J., Fei, M., Qiu, R. and Liu, W., "Interfacial compatibilization via in-situ polymerization of epoxidized soybean oil for bamboo fibers reinforced poly (lactic acid) biocomposites", *Composites. Part A, Applied Science And Manufacturing*, vol. 138, p. 106066 (2020).
 73. Qian, S., Mao, H., Zarei, E. and Sheng, K., "Preparation and characterization of maleic anhydride compatibilized poly (lactic acid)/bamboo particles biocomposites", *Journal Of Polymers And The Environment*, vol. 23, no. 3, pp. 341-347 (2015).
 74. Lin, J., Yang, Z., Hu, X., Hong, G., Zhang, S. and Song, W., "The effect of alkali treatment on properties of dopamine modification of bamboo fiber/polylactic acid composites", *Polymers*, vol. 10, no. 4, p. 403 (2018).
 75. Sheng, K., Zhang, S., Qian, S. and Lopez, C. A. F., "High-toughness PLA/bamboo cellulose nanowhiskers bionanocomposite strengthened with silylated ultrafine bamboo char", *Composites Part B: Engineering*, vol. 165, pp. 174-182 (2019).
 76. Sachin, S. R., Kannan, T. K. and Rajasekar, R., "Effect of wood particulate size on the mechanical properties of PLA biocomposite", *Pigment & Resin Technology*, 49/6, 465-472 (2020).
 77. Farrokhpayam, S. R., Shahabi, M. A., Sheshkal, B. N. and Gargari, R. M., "The morphology, physical, and mechanical properties of poly (lactic acid)-based wood flour and pulp fiber biocomposites", *Indian Academy Of Wood Science*, 20-25 (2021).
 78. Petchwattana, N. and Covavisaruch, N., "Mechanical and morphological properties of wood plastic biocomposites prepared from toughened poly (lactic acid) and rubber wood sawdust (*Hevea brasiliensis*)", *Journal Of Bionic Engineering*, 11 630-637 (2014).
 79. Butylina, S., Martikka, O. and Kärki, T., "Comparison of water absorption and mechanical properties of wood-plastic composites made from polypropylene and polylactic acid", *Wood Material Science & Engineering*, 5:3-4, 220-228 (2010).
 80. Dalu, M., Temiz, A., Altuntaş, E., Demirel, G. K. and Aslan, M., "Characterization of tanalith E treated wood flour filled polylactic acid composites", *Polymer Testing*, 76 376-384 (2019).
 81. Huda, M. S., Drzal, L. T., Misra, M. and Mohanty, A. K., "Wood-fiber-reinforced poly (lactic acid) composites: Evaluation of the physicommechanical and morphological properties", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 102, 4856-4869 (2006).

82. Pilla, S., Gong, S., O'Neill, E., Rowell, R. M. and Krzysik, A. M., "Roger Polylactide-Pine Wood Flour Composites", ***Polymer Engineering And Science***, 578-587 (2008).
83. Kelleci, O., Aydemir, D., Altuntas, E., Kurt, R., Oztel, A., Yorur, H. and Istek, A., "Wood flour-reinforced green composites: Parameter optimization via multi-criteria decision-making methods", ***Journal of Polymers and the Environment***, 30:3091-3106 (2022).
84. Wan, L. and Zhang, Y., "Jointly modified mechanical properties and accelerated hydrolytic degradation of PLA by interface reinforcement of PLA-WF", ***Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials***, 88 223-230 (2018).
85. Sanadi, A. R., Caufield, D. F. and Jacobson, R. E., "Agro-fiber Thermoplastic Composites" In: R.M. Rowell, R.A. Young, J.K. Rowell (Eds.). ***Proceeding Paper and Composites From Agro-Based Resources***. CRC Lewis Press Boca Raton, Florida, 377-401 (1997).
86. Chaharmahali, M., Mirbagheri, J., Tajvidi, M., Najafi, S. K. and Mirbagheri Y., "Mechanical and physical properties of wood-plastic composite panels", ***Journal of Reinforced Plastics and Composites***, 29, 310-319 (2010).
87. Rowell, R. M., Sandi, A. R., Caulfield, D. F. and Jacobson, R. E., "The utilization of natural fibers in plastic composites: Problem and opportunities", In: Leao, A. L., Carvalho, F. X. and Frollini, E. (eds.), ***Lignocellulosic Plastic Composites***, Brazil, 23-51 (1997).
88. Carroll, D. R., Stone R. B., Sirignano A. M., Saindon, R. M., Gose, S. C. and Friedman, M. A., "Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks", ***Resources, Conserve & Recycling***, 31 (3) 241–251 (2001).
89. Mishra, S. and Naik, J. B., "Mechanical properties of wood polymer composites prepared from agro-waste and HDPE", ***Polymer-Plastics Technology and Engineering***, 44, 511–522 (2005).
90. Cui, Y. H., Tao, J., Noruziaan, B., Cheung M. and Lee, S., "DSC analysis and mechanical properties of wood--plastic composites", ***Journal of Reinforced Plastics and Composites***, 29, 2, 278-289 (2010).
91. Kord, B., "Investigation of reinforcing filler loading in the mechanical properties of wood plastic composites", ***World Applied Sciences Journal***, 13 (1), 171-174 (2011).
92. Brandt, C. W. and Fridley, K. J., "Effect of load rate on flexural properties of woodplastic composites", ***Wood Fiber Science***, 46 (6), 812-819 (2003).
93. Raj, R. G., Kokta, B. V. and Daneault, C., "Polypropylene-wood fiber composites: Effect of fiber treatment on mechanical properties", ***International Journal of Polymeric Materials***, 1989 (12), 239-250 (1989).

94. Clemons, C., "Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries", *Forest Products Journal*, 52 (6), 10-18 (2002).
95. Sain, M. and Panthapulakkal, S., "Bioprocess preparation of wheat straw fiber and characterization", *Industrial Crops and Products*, 23, 1-8 (2006).
96. Zurada, J. M., "Introduction to artificial neural systems", *West Publishing*, St. Paul (1992).
97. McCulloch, W. S. and Pitts, W. H., "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *The Bulletin Of Mathematical Biophysics*, 5 (4): 115-133 (1943).
98. Ding, S., Li, H., Su, C., Yu, J., and Jin, F., "Evolutionary artificial neural networks: A review", *Artificial Intelligence Review*, 39: 251-260 (2013).
99. Kalogirou, S. A., "Artificial neural networks in renewable energy systems applications: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 5 (4): 373-401 (2001).
100. Mohandes, M. A., Halawani, T. O., Rehman, S., and Hussain, A. A., "Support vector machines for wind speed prediction", *Renewable Energy*, 29 (6): 939-947 (2004).
101. Elmas, Ç., "Yapay zeka uygulamaları (yapay sinir ağı, bulanık mantık, genetik algoritma)", *Seçkin Yayıncılık*, Ankara (2007).
102. Ribeiro, J. P. A, Tavares, S. M. O. and Parente, M., "Stress-strain evaluation of structural parts using artificial neural networks", *J Materials: Design and Applications*, 0(0) 1-16 (2021).
103. Sözen, A., Arcaklioğlu, E., Özalp, M., and Çağlar, N., "Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey", *Renewable Energy*, 30 (7): 1075-1090 (2005).
104. Bhanot, N., "Artificial neural networks-based modeling & analysis of semi-active damper system", *Faculty Of The Virginia Polytechnic Institute*, Virginia (2017).
105. Çelik, Ş., "Yapay sinir ağlarının farklı aktivasyon fonksiyonlarında uygulaması: Türkiye’de ördek popülasyonu öngörüsü", *OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2): 800-811 (2022).
106. Kökten, E. S., "Biyoyağ verimliliğinin yapay sinir ağları ile modellenmesi: Endüstriyel reçine sentezinde bir uygulama", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2019).
107. Ataseven, B., "Yapay sinir ağları ile öngörü modellemesi", *İstanbul Kültür*

Üniversitesi, Öneri.C.10. S.39.101-115 (2013).

108. Bewick, V., Cheek, L., and Ball, J., "Statistics review 7: Correlation and regression", **Critical Care**, 7 (6): 451-459 (2003).
109. P. J. Werbos, "Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences", Ph. D. Thesis, **Harvard University**, Cambridge, MA (1974).
110. Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L., eds., "Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition", **vol. 1, Cambridge, MA: MIT Press** (1986).
111. Çetin, M., Uğur, A. ve Bayzan, Ş., "İleri beslemeli yapay sinir ağlarında backpropagation (geriye yayılım) algoritmasının sezgisel yaklaşımı", **8. Akademik Bilişim Konferansı**, Denizli (2006).
112. Bayır, F., "Yapay sinir ağları ve tahmin modellemesi üzerine bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü**, İstanbul (2006).
113. Yurtoğlu, H., "Yapay sinir ağları metodolojisi ile öngörü modellemesi: Bazı makroekonomik değişkenler için Türkiye örneği", Uzmanlık Tezi, **DPT Uzmanlık Tezleri, Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü**, Yayın No: 2683 (2005).
114. Anderson, D. and McNeill, G., "Artificial neural networks technology", **Rome Laboratory, A DACS State-of-the-Art Report**, ELIN: A011 (1992).
115. Gurney, K., "An introduction to neural networks", **Department Of Human Sciences**, Brunel University, Uxbridge, Middx (1996).
116. Saraç, T., "Yapay sinir ağları", **Seminer Projesi**, Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı (2004).
117. Öztemel, E., "Yapay sinir ağları", **İstanbul: Pa-patya Yayıncılık** (2003).
118. Jayalakshmi, T. and Santhakumaran, A., "Statistical nor-malization and back propagation for classification", **International Journal Of Computer Theory And Engineering**, 3(1), pp. 1793-8201 (2011).
119. Gönül, Y., Ulu, S., Bucak, A. ve Bilir, A., "Yapay sinir ağları ve klinik araştırmalarda kullanımı", **Genel Tıp Derg**; 25:104-111 (2015).
120. Nasri, K. and Toubal, L., "Artificial neural network approach for assessing mechanical properties and impact performance of natural-fiber composites exposed to UV radiation", **Polymers**, 16, 538 (2024).

121. Tosun, M. and Sofuoğlu, S. D. "The use of an artificial neural network for predicting the machining characterizing of wood materials densified by compressing", *Bilge International Journal Of Science And Technology Research*, Volume:7, Issue:1, 55-62 (2023).
122. Özşahin Ş., and Singer, H. "Prediction of surface roughness and adhesion strength of wood by artificial neural networks", *Journal Of Polytechnic*, 22(4), 889-900 (2019).
123. İlçe, A. C., and Singer, H., "Doğu kayını ahşabının yüzey pürüzlülüğünün bir yapay sinir ağı ile modellenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 1867-1878 (2019).
124. Sözen, E., Bardak, T., Aydemir, D. ve Bardak, S., "Yapay sinir ağları ve derin öğrenme algoritmaları kullanarak nanokompozitlerde deformasyonun tahmin edilmesi", *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 20 (2): 223-231, 15 (2018).
125. Ratanawilai, T. and Taneerat K., "Alternative polymeric matrices for wood plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering", *Construction And Building Materials*, 172, 349-357 (2018).
126. Fabiyi, J.S. and McDonald, A.G., "Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites", *Composites: Part A* 41. 1434-1440 (2010).
127. Stark, N. M. and Berger, M. J., "Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced polypropylene composites", *The Fourth International Conference On Woodfiber-Plastic Composites* (1997b).
128. Arwinfar, F., Hosseinihashemi, S.K., Latibari, A.J., Lashgari, A. and Ayrilmis, N., "Mechanical properties and morphology of wood plastic composites produced with thermally treated beech wood", *BioResources* 11(1), 1494-1504 (2016).
129. Kamdem, D. P., Jiang, H., Cui, W., Freed, J. and Matuana, L. M., "Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service", *Composites: Part A* 35 347–355 (2004).
130. Bengtsson, M., Oksman, K. and Stark, N. M. "Profile extrusion and mechanical properties of crosslinked wood–thermoplastic composites", *Polymer Composites*, 184-194 (2006).
131. Zhang, X., Haoa, X., Haoa, J. and Wang, Q., "Heat transfer and mechanical properties of wood-plastic composites filled with flake graphite", *Thermochimica Acta* 664 26-31 (2018).
132. Najafi, S. K. and Englund, K. R., "Effect of highly degraded high-density polyethylene (HDPE) on processing and mechanical properties of wood flour-HDPE composites", *J. Appl. Polym. Sci.* (2013).

133. Ghahri, S., Najafi, S. K., Mohebbi, B. and Tajvidi, M., "Impact strength improvement of wood flour–recycled polypropylene composites", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 124, 1074-1080 (2012).
134. Ghahri, S., Najafi, S. K. and Mohebbi, B., "Influence of impact modifier and coupling agent on impact strength of wood flour/recycled plastic composites", *Pro Ligno* Vol. 10 No 1, 3-9 (2014).
135. Gozdecki, C., Wilczyn'ski, A., Kociszewski, M., Tomaszewska, J. and Zajchowski, S., "Mechanical properties of wood-polypropylene composites with industrial wood particles of different sizes", *Wood And Fiber Science*, 44(1), pp. 14-21 (2012).
136. Khonsari, A., Taghiyari, H. R., Karimi, A. and Tajvidi, M., "Study on the effects of wood flour geometry on physical and mechanical properties of wood-plastic composites", *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17(3): 545-558 (2015).
137. Turku I., Karki T. and Puurtinen, A., "Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic", *Heliyon* 4. (2018).
138. Gosselin, R., Rodrigue, D. and Riedl, B., "Injection molding of postconsumer wood-plastic composites II: Mechanical properties", *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 19, 659 (2006).
139. Najafi, S. K., Hamidinia, E and Tajvidi M., "Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 100, 3641-3645 (2006).
140. Rasat, M. S. M., Wahab, R., Shafie, A., Yunus, A. A. M., Yusoff, M., Ramle, S. F. M. and Zulhisyam A. K., "Effect of wood-fiber geometry size on mechanical properties of wood-fiber from neolamarckia cadamba species reinforced polypropylene composites", *Journal Of Tropical Resources And Sustainable Science* Volume 1 Number 1, January:42-50 (2013).
141. Ayrimis, N., Kaymakci A. and Gülec, T., "Potential use of decayed wood in production of wood plastic composite", *Industrial Crops And Products* 74, 279-284 (2015).
142. Ge, S., Gu, H., Ma, J., Yang, H. Jiang, S., Liu, Z. and Peng, W., "Potential use of different kinds of carbon in production of decayed wood plastic composite", *Arabian Journal Of Chemistry*, 11, 838-843 (2018).
143. Gezer, E. D., Akbas, S., Tufan, M. and Temiz A., "Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and remediated wood flour from CCA/CCB treated wood removed from service", *The International Research Group On Wood Protection*, Section 4 (2016).
144. Soccalingame L., Perrin, D., Benezet, J.C., Mani, S., Coiffier, F., Richaud, E. and Bergeret A. "Reprocessing of artificial uv-weathered wood flour reinforced

- polypropylene composites", *Polymer Degradation And Stability*, 120, 313-327 (2015).
145. Hyvärinen, M., Ronkanen, M. and Kärki, T., "The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood-plastic composite", *Composite Structures* 210, 321- 326 (2019).
 146. Keskiö, A., Butylina, S. and Kärki, T., "Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood-polymer composites", *J. Appl. Polym. Sci.* (2016).
 147. Keskiö, A. and Kärki, T., "Utilization of industrial wastes from mining and packaging industries in wood-plastic composites", *J Polym Environ*, 26:1504-1510 (2018).
 148. Badji, C., Soccalingame, L., Garay, H., Bergeret, A. and Benezet J.C., "Influence of weathering on visual and surface aspect of wood plastic composites: Correlation approach with mechanical properties and microstructure", *Polymer Degradation And Stability*, 137, 162-172 (2017).
 149. Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Thongruang, W., "Effects of natural weathering on the properties of recycled polypropylene composites reinforced with rubberwood flour", *Industrial Crops And Products*, 56, 52-59 (2014).
 150. Tajvidi, M., Shekaraby, M. M., Motiee, N. and Najafi, S. K., "Effect of chemical reagents on the mechanical properties of natural fiber polypropylene composites", *Polymer Composites* (2006).
 151. Nitz, H., Reichert, P., Römling, H. and Mülhaupt, R., "Influence of compatibilizers on the surface hardness, water uptake and the mechanical properties of poly (propylene) wood flour composites prepared by reactive extrusion", *Macromol. Mater. Eng.* 276/277, 51-58 (2000).
 152. Raj, R. G., Kokta, B. V. and Daneault, C., "A comparative study on the effect of aging on mechanical properties of LLDPE-glass fiber, mica, and wood fiber composites", *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 40, 645-655 (1990).
 153. Szandała, T., "Review and comparison of commonly used activation functions for deep neural networks" in: *Bio-inspired Neurocomputing. Studies in Computational Intelligence*: Bhoi, A., Mallick, P., Liu, CM., Balas, V. (eds), Vol. 903. Springer, Singapore (2021).
 154. Duman, S., Yorukeren, N. and Altas, İ. H., "A novel MPPT algorithm based on optimized artificial neural network by using FPSOGSA for standalone photovoltaic energy systems", *Neural Comput & Applic*, 29:257-278 (2018).
 155. Cay, Y., Cicek, A., Kara, F. and Sagiroglu S., "Prediction of engine performance for an alternative fuel using artificial neural network", *Applied Thermal Engineering* 37,217-225 (2012).

156. ASTM D 638-14, "Standard test method for tensile properties of plastics", **American National Standards Institute (ANSI)**, New York, (2014).
157. ASTM D 790-03, "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials", **Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards**, Philadelphia, (2003).
158. ISO 179-1, "Plastics-determination of charpy impact properties, Part 1: Non-instrumented impact test", **European Standard**, Berlin, Germany, (2000).
159. Aran, O., Yıldız, O. T. and Alpaydın, E., "An incremental framework based on cross-validation for estimating the architecture of a multilayer perceptron", **Int. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.**, vol. 23, no. 2, pp. 159-190 (2009).
160. Özşahin, Ş. and Singer H., "The use of an artificial neural network for predicting the gloss of thermally densified wood veneers", **Baltic Forestry**, 27(2): 422 (2021).
161. Lewis, C. D. "Industrial and business forecasting methods", **Butterworths**, London (1982)

EK AÇIKLAMALAR A.

YSA MODEL PARAMETRELERİ VE YSA TAHMİNİNDE KULLANILAN MATLAB KODLARI

```

%===== YSA parametreleri=====
YSAgirisn0=5; %Giriş Sayısı;
YSAgizlinl=6; % Birinci gizli katman sayısı
YSAgizlin2=6; % ikinci gizli katman sayısı
YSAcikisn3=1; % Çıkış sayısı
iter_maxx=10000; %YSA'nın Eğitimi için maksimum iterasyonsayısı;
iter=0;
bias_minn=-2; % Eşik değerlerinin sınır değerleri
bias_maxx=2; % Eşik değerlerinin sınır değerleri
w_maxx=2; % Ağırlık değerlerinin sınır değerleri
w_minn=-2; % Ağırlık değerlerinin sınır değerleri
ogrn_katt=0.0001; % Öğrenme katsayısı
momentum_katt=0.0001; % Momentum katsayısı
%=====

```

Şekil Ek A.1. Odun polimer kompozitler ve PLA-odun kompozitler için YSA model parametreleri.

```

clc
clear
maxed=0;
aa=2;
bb=1;
cc=30;
dd=1;
ee=12;

% aa=1
% bb=0;
% cc=50;
% dd=0;
% ee=6;

it=1;
% for aa=1:3
%     for bb=0:2
%         for cc=0:1:100
%             for dd=0:1
%                 for ee=1:20

x(1)=aa;
x(2)=bb;
x(3)=cc;
x(4)=dd;
x(5)=ee;

x;
Test. polimer tipi = (x(1)-1) ./ (3-1);
Test. dolgu mal. = x(2);
Test. dolgu oranı = (x(3)-5) ./ (85-5);
Test. bağ. ajan = x(4);
Test. partikül boyutu = (x(5)-1) ./ (15-1);

```

Şekil Ek A.2. YSA'nın odun polimer kompozit ve PLA-odun kompozitlerin test sonuçları tahmininde kullanılan MATLAB kodları.

```

%===== Giriş ve çıkış verisi matrisi=====

grs11=Test. polimer tipi;
grs22=Test. dolgu malzemesi;
grs33=Test. dolgu karışım oranı;
grs44=Test. bağlayıcı ajan;
grs55=Test. partikül boyutu;
giris_matrisi1=[grs11 grs22 grs33 grs44 grs55];

YSA.giris.n0=5; %Giriş Sayısı;
YSA.gizli.n1=6; % Birinci gizli katman sayısı
YSA.gizli.n2=6; % ikinci gizli katman sayısı
YSA.cikis.n3=1; % Çıkış sayısı

y1=zeros(1,YSA.gizli.n1);
y2=zeros(1,YSA.gizli.n1);
y2_sonn=zeros(1,YSA.gizli.n2);
nett=zeros(1,YSA.gizli.n2);
actv1_sonucc=zeros(1,YSA.gizli.n1);
actv2_sonucc=zeros(1,YSA.gizli.n2);

w_giris=[-1.60213034310747 -1.97723493039873 -1.72855409027687 -2.25540
w_gizli=[0.350154172479616 -1.21708941942024 2.00344654994777 0.2609202
w_cikiss=[0.510724804790646 -0.740769554870336 1.07813569394296 0.47243
bias1=[-0.0400573097023411 -0.239660125662486 -1.17175420620670 -0.7807
bias2=[0.832630488405453 -1.04391865571280 1.89985786189865 -0.55142981
bias3=[-0.808838127269938];

```

Şekil Ek A.3. YSA'nın odun polimer kompozit ve PLA-odun kompozitlerin test sonuçları tahmininde kullanılan MATLAB kodları.

```

y22(m)=(actv1_sonucc(m)*w_gizli(1,m));
end
y2_sonn(1)=sum(y22)+bias2(1);
end
% 2. katman aktivasyon işlemi
for n=1:1:YSA.gizli.n2
actv2_sonucc(n)=aktivasyon_fnc_tugba(y2_sonn(n));
end

for nn=1:1:YSA.cikis.n3
for mm=1:1:YSA.gizli.n2
nett(mm)=actv2_sonucc(mm)*w_cikiss(nn,mm);
end
net_sonnn(nn)=sum(nett)+bias3(nn);
end
%===== Cikti Hesaplanıyor=====
actv3_sonuc=aktivasyon_fnc_tugba(net_sonnn);
ysa_cikis11(k)=actv3_sonuc;
end
% egilme_direnci(it)=(ysa_cikis11'.*(83.35-3.79))+3.79;

egilme_direnci(it)=(ysa_cikis11'.*(65.8-2.1))+2.1
% if egilme_direnci(it)>0
s=[aa bb cc dd ee egilme_direnci(it)];
veriler(it,:)=s;
if egilme_direnci(it)>maxed
aaa=aa; bbb=bb; ccc=cc; ddd=dd; eee=ee;
maxed=egilme_direnci(it);
end
it=it+1;
% end

```

Şekil Ek A.4. YSA'nın odun polimer kompozit ve PLA-odun kompozitlerin test sonuçları tahmininde kullanılan MATLAB kodları.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Altay EROĞLU, ilk, orta ve lise öğrenimini Bursa’da tamamladı. 2001 yılında Hacettepe Üniversitesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp ingilizce hazırlık öğrenimi ile birlikte 2006 yılında mezun oldu. 2006-2007 yılları arasında askerlik görevini tamamladı. 2019 yılına kadar ahşap endüstrisinde çeşitli kademelerde görev yaptı. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Safranbolu Meslek Yüksek Okulu’nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı kurumda görev yapmaktadır.