



KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2021

SAYI / NUMBER : 4

CILT / VOLUME : 24



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

<http://jes.ksu.edu.tr/>

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.

This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.



Sahibi / Owner

Prof.Dr. Niyazi CAN
KSU Rector

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Hüseyin TEMİZ
htemiz@ksu.edu.tr

Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

Assist. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER
zeynepozger@ksu.edu.tr

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
asyilmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet ALKAN
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
aalkan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL
Civil Eng.
KSU Univ. TURKEY
munsal@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet KAYA
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
kaya38@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
Civil Eng.
Atatürk Univ., TURKEY
rsahin@atauni.edu.tr

Prof Dr. Yücel ÖZMEN
Mechanical Eng.
Karadeniz Teknik Univ., TURKEY
yozmen@ktu.edu.tr

Prof.Dr. Özlem TURGAY
Food Eng.
KSU Univ. TURKEY
ozlem@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU
Landscape Arc.
KSU Univ. TURKEY
fmengelo@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Suat ÇETİNER
Textile Eng.
KSU Univ. TURKEY
suatcetiner@ksu.edu.tr

Assoc. Prof.Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ.
TURKEY
tamer@ksu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Çetin AKINCI
Electrical Eng.
İstanbul Teknik Univ,
TURKEY
akincitc@itu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Toni NIKOLIC
Civil Eng.
Univ. Dzermal Bijedic,
BOSNIA AND HERZEGOVINA
nikolic_t@yahoo.com

Assist.Prof.Dr. Yakup CUCİ
Environmental Eng.
KSU Univ. TURKEY
cuci@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Beril ÖZÇELİK
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
bozcelik@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Hasan BADEM
Computer Eng.
KSU Univ. TURKEY
hbadem@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Özdeş ÇERMİK
Language Editor
KSU Univ. TURKEY
ozdescermik@ksu.edu.tr

Research Assist. Fahriye GEMCİ
Technical Editor
KSU Univ. TURKEY
fahriyegemci@ksu.edu.tr

Research Assist. Elif ÇELİK
Technical Editor
KSU Univ. TURKEY
elifcelik@ksu.edu.tr

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Cetin Kaya KOC

Dep. of Computer Eng.
Univ Of Cal.
Santa Barbara, USA
koc@cs.ucsb.edu

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Sakarya Univ. Sakarya,
TURKEY
aozdemir@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK

Dep. Of Elcn & Comm Eng.
İTU Univ.
İstanbul, TURKEY
korurek@itu.edu.tr

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ

Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI

Dep. of Mechanical Eng.
Alanya Alaaddin Keykubat
Univ. Antalya, TURKEY
apinarbasi@alanya.edu.tr

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER

Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
YBU Univ.
Ankara, TURKEY
serel@ybu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT

Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK

Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul, TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI

Dep. of Civil Eng.
Brunel Univ.
Uxbridge, UK
mizi.fan@brunel.ac.uk

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY

Dep. of Microelectronics
Panjab Univ,
Chandigarh, India
amit_chaudhry01@yahoo.com

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras, TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Selim AY

Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul, TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Murat PALA

Dep. of Civil Eng.
Adiyaman Univ.
Adiyaman, TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ

Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Piezoelektrik Malzemelerin Lityum İyon Batarya Anotlarında Katkı Olarak Kullanılması**
The Use of Piezoelectric Materials as Additives in Lithium Ion Battery Anodes 258-270
 Mehbare DOĞRUSÖZ, M. Taha DEMİRKAN
- Göksu Deltası Ostrakod Topluluğu**
Goksu Delta Ostracod Society 271-293
 Ümit ŞAFAK, Nusret NURLU
- Nehirlerdeki Katı Madde Miktarının Bulanık SMGRT Yöntemi İle Tahmini**
Prediction Of Sediment Amount In Rivers Using Fuzzy SMGRT Method 294-307
 Mustafa DEMİRCİ, Feyzullah DAYAN, Fatih ÜNEŞ, Bestami TAŞAR
- Yumurta Kabuğunun Odun Plastik Kompozit Üretiminde Kullanımı**
The Usage Of The Egg Shell In Wood Plastic Composite Production 308-318
 Ferhat ÖZDEMİR, Ali Osman ÖZĞAN
- Elektrik Direnç Kaynağı Proses Parametrelerinin Çekme Dayanımı Üzerine Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi**
Numerical Investigation Of The Effects Of Resistance Spot Welding Process Parameters On Tensile Stregth 319-331
 Oğuz DOĞAN, Çağrı UZAY, Muhammed Safa KAMER
- Kompozit Malzemelerin Charpy Darbe Testi Sonrası Ultrasonik C-Scan Yöntemi İle Hasar Analizi**
Damage Analysis Of Composite Materials By Ultrasonic C-Scan Method After Charpy Impact Test 332-340
 Burak ÖZTAŞ, Yasemin KORKMAZ, Halil İbrahim ÇELİK
- 3 Boyutlu Yazıcıda ABS Ve PLA Filamentler İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**
Investigation Of The Mechanical Properties Of Tensile Test Samples Produced With A 3D Printer Using Different Bed And Nozzle Temperatures With ABS And PLA Filaments 341-358
 Muhammed Safa KAMER, Şemsettin TEMİZ
- Çevrimsel Ön Yüklemenin Polipropilen'in Gevşeme Davranışı Üzerindeki Etkisi**
The Effect Of Cyclic Pre-Loading On Relaxation Behavior Of Polypropylene 359-370
 Necmi DÜŞÜNCELİ, Önder Çağdaş ÖZENSOY



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 9.01.2020
Kabul Tarihi : 12.10.2021

Received Date : 9.01.2020
Accepted Date : 12.10.2021

PIEZOELEKTRİK MALZEMELERİN LİTYUM İYON BATARYA ANOTLARINDA KATKI OLARAK KULLANILMASI

THE USE OF PIEZOELECTRIC MATERIALS AS ADDITIVES IN LITHIUM ION BATTERY ANODES

M. Taha DEMİRKAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-5041-5680)
Mehbare DOĞRUSÖZ^{2*} (ORCID: 0000-0002-3064-8081)

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye
² Gebze Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye
³ Gebze Teknik Üniversitesi, Nanoteknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: M. Taha DEMİRKAN, mtdemirkan@gtu.edu.tr

ÖZET

Lityum iyon bataryalarda, en popüler malzemelerden biri olarak gösterilen silisyum (Si) içerikli malzemelerle ilgili önemli sorunlar, bu pillerin ticari olarak yaygınlaşmasını engellemektedir. Si anot malzemelerinin şarj/deşarj esnasında yüksek hacim değişikliğine uğraması ve bu nedenle ortaya çıkan mekanik dayanıksızlığı bu sorunların başında gelmektedir. Bu çalışmada PZT tabanlı piezoelektrik malzemelerin, mevcut sorunların giderilmesi konusundaki katkısı incelenmiştir. Si ve karbon (C) karışımı anot malzemelerde, katkı olarak PZT parçacıkları kullanılarak elde edilen kompozit ile kapasite performansında artış olduğu görülmüştür. Bu artışın nedenleri tartışılmakla birlikte farklı türlerde PZT malzemeleri ile farklı oranlarda Si-C karışımları test edilmiş ve aralarındaki performans farkları araştırılmıştır. PZT kullanılmadığında, ilk 50 çevrimde 50 mAh/g'ın altında spesifik kapasite değerini vererek bozulmaya uğrayan anot malzemelerinin, PZT katkısı kullanılmasıyla 100. Çevrimde dahi 400 mAh/g üzerinde kapasite değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silisyum anot, lityum iyon batarya, piezoelektrik katkılama

ABSTRACT

Significant problems with silicon (Si) containing materials, which have been popular in lithium ion batteries in recent days, prevent commercialization. The high volume change and mechanical instability of Si anode materials during charging/discharging is one of the problems. In this study, the contribution of PZT based piezoelectric materials to the solution of these problems is studied. When PZT particles are used as an additive in Si and carbon (C) mixture anode materials, it is seen that the capacity performance of these materials fairly increases. The reasons for this increase are discussed, and different types of PZT materials and different ratios of Si-C mixtures are examined. It is observed that the anode material with no additives has given specific capacity values of less than 50 mAh/g in the first 50 cycles which is decreased rapidly, while much improved performance is observed when PZT additive was used i.e., above 400 mAh/g in the 100th cycles.

Keywords: Silicon anode, lithium ion battery, piezoelectric additive

GİRİŞ

Lityum-iyon Pillerinin Ticari Önemi

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte taşınabilir elektronik cihaz ve elektrikli araba gibi ürünlerin kullanımı çok hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artışla birlikte bu cihaz ve araçlarda güç kaynağı olarak kullanılan, yüksek kapasiteli bataryalara ihtiyaç duyulmaktadır (Cheng, Liang, Tao, & Chen, 2011). Gaines ve arkadaşları (Gaines & Nelson, 2011) tarafından yapılan çalışmadaki tahmine göre 2050 yılında yalnızca Birleşik Amerika Devletleri'ndeki elektrikli araba satışı 40 milyona ulaşacaktır. Şu ana kadar geliştirilen batarya teknolojilerine sahip araçlar ise bu ihtiyacın çok gerisindedir. Dolayısıyla bu teknolojilerin gereksinimlerini karşılamak için çeşitli batarya türleri test edilmektedir. Bu türler arasında en yaygın olarak kullanılan lityum-iyon piller, yüksek voltaj aralığı ve yüksek enerji yoğunluğu gibi özelliklere sahiptir (Tarascon & Armand, 2001). Bu üstün özellikleri sayesinde lityum-iyon (Li-iyon) piller bilgisayar ve telefon gibi taşınabilir cihazların yanı sıra elektrikli arabalar için de ideal bir güç kaynağıdır. Amerika'da sunulan bir rapora göre diğer pil türlerinin satışı azalmaktayken, lityum-iyon pillerin satışı gün geçtikçe artmaktadır (Comission, 2002). Elektrikli araçların geliştirilmesindeki en önemli engel günümüzde yeterli enerji depolama sistemlerinin üretilmemesi olarak görülmektedir. Tüm bu durumlar Li-iyon pillerin önemini göstermekle birlikte, ülkemizde de dünyada geliştirilen teknolojilerin takip edilmesi ve bağımsız yerli teknoloji üretilmesi gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle enerji depolama konusunda yapılan veya yapılacak çalışmalar daha acil bir duruma gelmektedir. Ülkemizde yerli elektrikli araçların üretilmesine yönelik planlanan/yürütülen projeler ve yatırımlar, pil teknolojisinde yapılacak her türlü geliştirmenin önemini bir kat daha artırmaktadır.

Lityum-iyon Teknolojisinde Temel Sorunlar

Bir pilin endüstriyel olarak kullanılabilmesi için göz önünde bulundurulacak en önemli faktörlerden biri üretim maliyetidir. Bir lityum-iyon pil anot, katot ve elektrolit gibi başlıca 3 bileşenden ve ayırıcı, pil kutusu gibi yan bileşenlerden oluşmaktadır. Her birinin toplam üretimdeki maliyeti ele alındığında en büyük payı, ilk üç bileşenin oluşturduğu görülmektedir. Tahmini bir değer olarak elektrolit, anot ve katot 70 dolar/kg maliyetle üretilirken, geri kalan malzemenin üretim maliyeti yalnızca 5 dolar/kg olmaktadır (Barnett et al., 2010). Günümüzde lityum-iyon pillerin maliyet/enerji verimliliği yaklaşık 700 dolar/kWh civarındadır (Barnett et al., 2010; Gert Berckmans 2017). Bu değer gittikçe düşmekte olduğu halde yine de yeterli seviyeye ulaşamamıştır. Başka bir rapora göre de 10 yıl sonra (2028 yılında) Li-iyon pillerinin piyasa değeri küresel olarak 130 milyar dolara ulaşacaktır (Grande, 2017).

Katot malzemelerinin maliyetine örnek olarak yaygın bir katot malzemesi olan LiMn_2O_4 bileşimini göz önünde bulundurabiliriz. LiMn_2O_4 malzemesinin üretiminde toplam pil üretiminin yaklaşık %15'ine denk gelen 10 MJ/kg değerinde enerji harcanmaktadır (Dunn, Gaines, Sullivan, & Wang, 2012). Bu sebeple katot, pilin diğer bileşenleri arasında en yüksek ikinci maliyeti teşkil etmektedir. Ek olarak, günümüz endüstrisinde standart anot malzemesi olarak kullanılan karbonun bir allotropu olan grafit de bu üretim maliyetinde büyük rol oynamaktadır. Grafitin yerini alacak olan yeni bir anot malzemesinin doğada kolay bulunan ve ucuz bir malzeme olması gerekmektedir.

Üçüncü ana bileşen olan elektrolitlerde yapılacak geliştirmeler de bataryaların elektrokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemlidir. Yeni geliştirilebilecek elektrolit malzemeleri de Li-iyon piller için başlıca gereksinimleri karşılamalıdır. Bunların başında kimyasal kararlılık, güvenlik, düşük elektronik iletkenlik, yüksek Li-iyon iletkenliği, katı-elektrolit ara yüzünün dayanıklı ve kararlı olması gerekmektedir (Goodenough & Kim, 2010).

Propilen karbonat (PE), etilen karbonat (EC) ve dietil karbonat (DEC) gibi elektrolit malzemelerindeki problemlerin, elektrot malzemelerinin hâlihazırda problemlerine göre daha düşük önem arz ettiği görülmektedir (Aurbach et al., 2007). Özellikle florometilen karbonat (FEC) ve vinilen karbonat (VC) gibi katkı malzemeleri, kullanılan elektrolitlerin performansını Si anot malzemeleri özelinde artırdığı görülmüştür (Choi et al., 2006; Zhang, He, Su, & Zhang, 2016). Bu durum, elektrolit malzemelerinin günümüz teknolojisi için diğer bileşenlere göre daha yeterli olduğunu ve Li-iyon pillerin geliştirilmesindeki en önemli engellerin elektrot malzemelerinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu yüzden, günümüzde Li-iyon pil ile ilgili çalışmaların çoğu elektrot malzemelerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Anot ve katot malzemelerinin geliştirilmesi birbiriyle uyumlu olarak ve eş zamanlı yapılmalıdır. Anot ve katot malzemelerinin teorik elektrokimyasal özellikleri ele alındığında, ticari katot malzemelerinin teorik spesifik kapasitelerinin birkaç yüz mAh/g değerlerinde olduğu bilinmektedir (Patil et al., 2008). Halihazırda çalışmalarda önerilen çoğu katot malzemesinin de bu değerlerde kapasiteye sahip

olduğu görülmektedir. Teorik olarak yüksek kapasiteli alternatif katot malzemelerin kullanımı ise çeşitli kimyasal kriterler nedeniyle sınırlandırılmış durumdadır (Goodenough & Kim, 2010). Şu ana kadar yapılan çalışmalara göre, anot ve katot malzemelerinin özellikleri kıyaslandığında, anot malzemelerinin kapasitesinin yükseltilmesi, katot malzemelerine göre daha uygun ve mümkündür (Kasavajjula, Wang, & Appleby, 2007). Örneğin spesifik kapasitesi 200 mAh/g olan bir katot malzemesinin kullanıldığı bir Li-iyon pilinde toplam pil kapasitesinin 86 mAh/g olması için, anot malzemesinin spesifik kapasitesi 1200 mAh/g veya daha fazla olmalıdır (Kasavajjula et al., 2007). Sonuç olarak, halihazırdaki Li-iyon pillerinin toplam kapasitelerini sınırlayan etkenin katottan ziyade anot malzemeleri olduğu kabul edilebilir.

Anot Malzemeleri, Silisyumun Önemi ve Karşılaşılan Sorunlar

Tablo 1'de Li-iyon piller için kullanılan çeşitli anot malzemeleri ile birlikte teorik özellikleri karşılaştırılmaktadır (B.A. Boukamp, 1981; Patil et al., 2008). Karbon (C) malzemeleri, mekanik dayanımı nedeniyle diğerlerinden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni Li yüklemesi durumunda %10 gibi düşük bir hacim genişlemesine sahip olmasıdır ki bu değer diğerlerine kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Karbonun bir kristal yapısı olan grafit, 372 mAh/g civarındaki teorik spesifik kapasite değeriyle günümüzde Li-iyon bataryalar için kullanılan en yaygın ticari anot malzemesidir. Bu değer yeni teknolojilerin gereklerini karşılayamayacak hale gelmesinden dolayı, yeni anot malzemeleri geliştirilerek karbonun yerine kullanılmasını bir zorunluluk haline gelmiştir. Karbon ile elde edilebilecek teorik kapasitenin düşük olması ve bu değere ulaşılmış olması, araştırmacıları daha iyi malzemeler bulmaya yöneltmiştir. Bunların başlıcaları Si, Sn, Ge ve Li kompozitleri gibi malzemelerdir. Örneğin bazı metal oksit malzemeler birden fazla Li iyonunu barındırabilme kabiliyetine ve dolayısıyla daha yüksek teorik kapasiteye sahip olmaktadır (Cabana, Monconduit, Larcher, & Palacín, 2010). Fakat bu malzemelerin Li yükleme potansiyelleri özellikle Si ile karşılaştırıldığında gayet yüksektir. Li yükleme potansiyeli yüksek olan malzemeler pilin kapalı devre potansiyelini düşürmekte ve verimlilik azalmaktadır. Diğer aday malzemelerle kıyaslandığında üstün özelliklere sahip olan Si son yıllardaki çalışmalarda gelecek vadeden bir anot malzemesi olarak önerilmiştir. Si'un teorik gravimetrik kapasitesi (~3580-4200 mAh/g) diğerlerinden çok daha yüksektir (doğada bilinen en yüksek değer). Si' un yer kabuğunda oksijenden sonra en çok bulunan ikinci element olması ve bu nedenle ekonomik olarak çok düşük maliyette üretilebiliyor olması da Si' un popülerliğine katkı sağlamıştır.

Tablo 1. Li-iyon Pilleri İçin Önerilen Anot Malzemelerinin Özellikleri
(B.A. Boukamp, 1981; Patil et al., 2008)

Şarj Durumundaki Bileşik	Şarj Durumundaki Bileşik Yoğunluğu (g/cm³)	Teorik Spesifik Kapasite (mAh/g)	Teorik Hacimsel Kapasite (mAh/cm³)	Hacim Genişlemesi (%)
LiC ₆	2,02	372	750	10
LiAl	1,35	993	1338	94
Li ₃ Sb	2,86	660	1888	150
Li ₂₂ Sn ₅	2,03	994	2022	259
Li ₁₃ Si ₄	0,62	3103	1939	236
Li ₂₂ Si ₅	0,56	4200	2354	315

Bu karşılaştırmalardan anlaşılacağı üzere, son zamanlarda yapılan çalışmalarla Si'nin bu özellikleriyle Li-iyon piller için uygun anot malzemesi olarak kullanılacağı anlaşılmış ve popüleritesi daha da artmıştır (Sharma & Seefurth, 1976).

Li₁₃Si₄ veyahut Li₂₂Si₅ gibi Li-Si alaşımlarının yapısal özellikleri üzerine yapılan araştırmalarda Li₂₂Si₅ yapısının termodinamik olarak daha kararlı olduğu görülmektedir. Bu yapı daha çok Li alma kabiliyetine sahip olup daha yüksek spesifik kapasiteye ulaşabileceği için Li-iyon pillerde daha çok öne çıkmıştır. Fakat son çalışmalarda yaklaşık 3580 mAh/g teorik spesifik kapasitesine sahip olan Li₁₃Si₄ yapısı da gözlemlenmiştir (Obrovac & Christensen, 2004; Xu, Yin, & Zuo, 2008). Her iki yapı kıyaslandığında ise, Li₂₂Si₅ yapısı her bir Si atomu başına 4,4 Li iyonu tutabilirken, Li₁₃Si₄ yapısı 2,75 Li iyonu tutabildiği görülmüştür (Hatchard & Dahn, 2004).

Si'un bu üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, Li-iyon pillerde anot malzemesi olarak kullanılmasının önünde bazı önemli sorunlar bulunmaktadır. Bu sorunların temelinde, Li iyonlarının Si içine yerleşme/ayrılma sırasında %400'ü bulabilen hacim değişimi bulunmaktadır. Si yapısındaki bu yüksek hacimsel genişleme/daralma; yüksek stres, çatlama, tozlaşma ve sonuçta da elektriksel iletkenliğin kaybına neden olur. Bu durum nihai olarak kapasite kaybı ve pilin bozulmasıyla sonuçlanır. Örneğin Li yerleşmesi esnasında $Li_{15}Si_4$ yapısının oluşumuyla yaklaşık %270 hacim değişimi olmaktadır ve bu değişim anot malzemesinde kırılmalara ve tozlaşmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda düşük şarj ve deşarj performansı ile birlikte pil kısa ömürlü olmaktadır. Silisyumun zaten düşük olan elektronik iletkenliği ($\sim 10^{-5}$ S/m), bu kırılmalarla birlikte daha da düşmekte ve bu da pilin performansını olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak Si malzemelerinin anot olarak kullanılabilirliklerinin önündeki en önemli engel, yüksek orandaki hacim değişikliği ve dolayısıyla mekanik dayanımının yetersiz olmasıdır. Bu sorunların üstesinden gelmek için son dönemlerde çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yaklaşımlar, aktif ve aktif olmayan katkı maddeleri, Si üzerine kaplama, Si-C kompozitler, diğer kompozit nanoyapılar ve ince filmleri kapsamaktadır. Bu yöntemler hacim genişlemesinin engellemesi için kısmi olarak başarı sağlamıştır.

Elektrot Yüzeyinde Oluşan Katı-Elektrolit Arayüzey (SEI) Katmanı

Li-iyon pillerinde şarj/deşarj esnasında yan reaksiyonlar sonucu oluşan artık maddelerin elektrotların yüzeyinde meydana getirdiği katman katı-elektrot arayüzeyi (Solid-Electrode Interface) olarak tanımlanmaktadır ve kısaca SEI olarak ifade edilmektedir. SEI katmanı genellikle ilk birkaç çevrimde oluşmaktadır ve elektrolitin kararlı çalışabileceği voltaj sınırlarının dışında kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Fears et al., 2016). Si ve C gibi anot malzemeleri için kararlı bir SEI katmanı oluşması bataryanın devamlılığı açısından faydalıdır. SEI katmanı daha fazla yan reaksiyon olmasını engelleyerek Li iyonlarının daha fazla tüketilmesinin önüne geçmektedir. Bunun yanında SEI katmanı, Li iyonlarını geçiren ve elektriksel iletkenliği azaltarak elektronların geçişini zorlaştıran bir katmandır. Bu sebeple, SEI katmanının kararlı bir şekilde oluşturulabilmesi önemlidir.

SEI katmanının oluşma nedeni ve gerekliliği kısaca şöyle açıklanabilir: Her bir elektrolit malzemesi için, anot ve katot malzemelerinin kimyasal potansiyelleri (Fermi enerjisi) ile uyumlu olması gereken bir enerji aralığı mevcuttur (Goodenough & Kim, 2010). Anot ve katot malzemelerinin Fermi enerjileri, elektrolitin en yüksek dolu moleküler orbit (HOMO, highest occupied molecular orbital) ve en düşük boş moleküler orbit (LUMO, lowest unoccupied molecular orbital) değerleriyle uyumlu olmalıdır (Goodenough & Kim, 2010). Bu uyumun olmadığı durumlarda anotta indirgenme ve katotta yükseltgenme şeklinde yan reaksiyonlar gerçekleşir. Örneğin C ve Si' un Li^+/Li indirgeme potansiyelleri sırasıyla 0,05 V ve 0,2 V' tur. Bu değerler yaygın bir elektrolit olan [1M $LiPF_6$ in EC/DEC (1:1)] karışımının HOMO enerji değeri olan 1 V' tan oldukça düşüktür. Bu durumda elektronların elektrolitten katoda ve anottan da elektrolite akmasını engelleyecek pasif bir SEI katmanı gereklidir. Böyle kararlı bir katman oluşumu nedeniyle C, Li-iyon pillerinde anot malzemesi olarak kullanılabilir olmuştur. Buna benzer olarak Si' un da anot malzemesi olarak kullanılabilmesi için kararlı ve dayanıklı bir SEI katmanına ihtiyacı vardır. SEI katmanının kırılması veyahut yüzeyden ayrılması sonucu, elektrolitle anot arasında istenmeyen reaksiyonlar tekrarlanır ve yeni SEI katmanı oluşur. Bu durum daha fazla Li iyonunun tüketilmesine ve istenmeyen bileşiklerin meydana gelmesine sebep olur. Bu tekrarlandığı sürece, biriken bileşikler pil içinde kısa devreye ve dolayısıyla ısınma ve patlama gibi tehlikeli durumlara sebep olabilir. SEI katmanından beklenen en önemli özellikler, kararlı olması ve herhangi bir parçalanma olduğunda kısa sürede kendisini tamir etmesidir. Si' un Li-iyon pillerde anot olarak kullanıldığında meydana gelen yüksek hacim değişikliği göz önüne alındığında, Si' un kendi içinde oluşan kırıklar ve daha fazla Si' un elektrolitle temas etmesiyle birlikte, SEI katmanı ile ilgili sorun devam eden şarj-deşarj çevrimleri süresince tekrarlanmaktadır. Sonuç olarak düzensiz ve daha çok kırılan SEI katmanı kısa sürede pilin bozulmasına yol açmaktadır. Si anot malzemeleri üzerinde oluşan SEI katmanının anot malzemesinin mekanik özellikleriyle ilgisi de incelenmesi gereken önemli bir konudur.

Si Anotlarla İlgili Problemleri Çözmek İçin Yapılan Çalışmalar

Şimdiye kadar Si anotlar ile ilgili problemlerin çözümü için birçok çalışma yapılmış ve farklı çözüm önerileri ileri sürülmüştür. Genel olarak şimdiye kadar incelenen malzemeler arasında nanomalzemeler (Wu et al., 2012), Si-metal kompozitler, Si-C kompozitler (Yang et al., 2015), kaplamalar, gözenekli yapılar (Li et al., 2014), ince filmler (Bourderau, Brousse, & Schleich, 1999) ve Si anot ile karıştırılmış katkı malzemeleri başı çekmektedir (Cheng et al., 2011; Hatchard & Dahn, 2004; Kasavajjula et al., 2007). Bu metodlar belirli özelliklerde, belirli bir dereceye kadar fayda sağlamış fakat problemi tamamen çözmek için yeterli olmamıştır. Örneğin bunların başta gelenlerinden nano boyuttaki yüksek yüzey alanına sahip olan malzemelerin kullanımıyla, Li yerleşmesi için daha kolay ulaşım sağlandığından ve pilin performansının artacağı varsayılmıştır. Fakat bu strateji, yüzey alanının artmasıyla birlikte, aynı zamanda yüzeyde daha fazla SEI katmanı oluşturmaya ve daha çok Li^+ iyonu kaybına

sebeptir. Dolayısıyla şarj/deşarj sayısı yine sınırlı kalarak pilin endüstriyel kullanımı için yeterli olmamaktadır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalardan birinde desenli yüzeyler üzerinde hazırlanmış yumuşak Si şeritler ile 500'üncü şarj/deşarj devrinde 3500 mAh/g civarı spesifik kapasite elde edilmiştir (Yu et al., 2012). Şeritler arası yeterli boşluk olması, hacim genişleme esnasındaki mekanik sıkışmayı azaltmakta ve dayanıklılığı artırmaktadır. Fakat bu malzemenin üretim zorluğu ve ince filmdeki aktif madde miktarının bakır akım toplayıcının ağırlığına kıyasla çok düşük kalması, endüstriyel anlamda istenmeyen bir durumdur. Si' un kompozit malzemeleri ile - özellikle Si-C malzemeleri üzerinde- çok sayıda çalışma yapılmaktadır. CNT-Si (karbon nanotüp-silisyum) ile yapılan testlerde 80 devire kadar 2900 mAh/g spesifik kapasite elde edilmiştir (Fan et al., 2013). Başka bir örnekte de nanoteller ile hazırlanan anotlarda mekanik olarak daha dayanıklı anotlar üretilmiş ve bu malzemeler 100. devirde 1000 mAh/g kapasite göstermiştir (Cui, Ruffo, Chan, Peng, & Cui, 2008). Benzer olarak başka bir çalışmada CNT-Si-Ni nanotellerinde 100. devirde 2000 mAh/g elde edilmiştir (Lu et al., 2013). Yine Si-C kompozitlerine bir örnek olarak 200. devirde 1500 mAh/g kapasitesine ulaşıldığını gösteren bir çalışma bulunmaktadır (Yi, Dai, Gordin, Chen, & Wang, 2013). Karbonun dışında SiO-Si kompozit malzemeleri de denenmiştir. Bir çalışmada Si nanotüplerinin SiO_x katmanı ile kaplanmasıyla elde edilen malzemede 6000 devire kadar düşük kapasite kaybı ile ulaşılabilmektedir. 1C şarj/deşarj hızıyla 600. devirde 1200 mAh/g, 12 C şarj/deşarj hızıyla 6000. devirde 600 mAh/g elde edilmiştir (Wu et al., 2012). Bu olağanüstü performansa ve yüksek devir sayılarına rağmen, bu üretim tekniklerinin zorluğu, çok aşamalı ve yüksek maliyette olmaları endüstriyel olarak önemli dezavantajlar oluşturmaktadır. Şu ana kadar inceleyebildiğimiz çalışmalara göre, nanoyapılı malzemeler arasında şimdiye kadar başarılı en yüksek çevrimleri ve en yüksek kapasite değerlerini veren çalışmaların bunlar olduğu gözükmektedir.

Si ile birlikte aktif olmayan katkı malzemeleri kullanmak da hacim değişikliği esnasında oluşan strese ve mekanik dayanıksızlığa karşı çözüm olarak öne sürülmüştür ve bu yöntemle de bir dereceye kadar başarı sağlandığı görülmüştür. Katkı malzemelerinin genişleme ve daralma esnasında Si arasında yumuşak yastık görevi yaparak, Si anot malzemesini mekanik olarak daha güçlü hale getirebileceği düşünülmüştür. Ayrıca iletken katkı malzemeleri kullanıldığında, Si parçaları arasında iletkenliği artırdığı için başka bir olumlu etkisi daha olmuştur. Buna karşılık olarak, aktif veya inaktif katkı malzemeleriyle kullanılan Si anotların teorik spesifik kapasiteleri 300-1700 mAh/g (Holzapfel et al., 2006; Kasavajjula et al., 2007; H. Y. Lee & Lee, 2004; J. H. Lee, Kim, Kim, Lim, & Lee, 2008) arasında bir değere ulaşmaktadır ve Si' un 3580 mAh/g olan teorik kapasitesinden çok düşük olduğu görülmektedir. Yukarıda bahsi geçen bazı örnekler değerlendirildiğinde ve deneysel sonuçlarına bakıldığında bundan çok daha da düşük değerler çıktığı sonucuna varılmaktadır (Shu, Li, Yang, Shi, & Huang, 2006). Dolayısıyla test edilen yöntemlerde belirli bir dereceye kadar başarı sağlandığı halde hala endüstrinin gerekliliklerini karşılayacak düzeyde ilerlemenin kaydedilemediği tespit edilmektedir.

Bu çalışmada bahsedilen sorunların çözümleri için PZT tabanlı piezoelektrik malzemelerin Si+C kompozit anotlarında katkı olarak kullanılması ele alınmıştır. Si anot malzemesinin Li ile etkileşimi esnasında gerçekleşen hacim genişlemesinin PZT malzemelerinin kullanılmasıyla ne ölçüde engellenebileceği incelenmiştir. Hacim genişlemesi nedeniyle ortaya çıkan stresin, PZT malzemesinin bu stres altında elektrik alan oluşturmasına sebep olabileceği varsayılmıştır. Bu şekilde PZT malzeme katkısının hacim genişlemesi esnasında stres azaltıcı bir etki üstlenmesi ve dolayısıyla Si anot malzemesinde oluşan hacim genişlemesini engelleyebileceği ve mekanik olarak daha dayanıklı hale gelmesini sağlayabileceği düşünülmüştür. Bu elektrik alan sayesinde yerel olarak oluşan polarizasyonun Li iyonlarının şarj esnasında girişini kolaylaştırabileceği veya daha derinlere girmesine sebep olabileceği gibi çıkarımlar yapılmıştır. Bu iki durum anot malzemesinin kapasite performansını olumlu yönde etkileyebilmiştir. Bu etkilerin incelemesi amacıyla PZT-8 ve PZT-5H olmak üzere iki farklı piezoelektrik malzeme ele alınmış ve farklı oranlardaki karışımlarla hazırlanan kompozit malzemelerde, kapasite kayıplarını ne kadar engellendiği, elektrokimyasal testler yapılarak kıyaslanmıştır.

MATERYAL VE METOD

Anot hazırlaması için kullanılan malzemeler, ticari Si (Sigma Aldrich) nano parçacıklar, amorf karbon ve piezoelektrik malzemedir (PZT-8 ve PZT-5H). Malzemedeki parçacıkların daha küçük ve homojen hale getirilmesi için her bir örnek MTI marka bilyalı değirmende 30 Hz hızda toplu öğütme metodu kullanılarak 90 dk. boyunca karıştırılmıştır. PZT-8 ve PZT-5H piezoelektrik malzemeleri, Si ve amorf karbonun karışım oranları parantez içinde gösterildiği gibi kütlece hesaplanarak, (%Si + % C + % Piezo = %100) örnekler hazırlanmıştır. **Tablo-2'** de ise sayısal olarak kompozitlerin içeriği verilmiş ve kısaca SiC şeklinde adlandırılmıştır. Daha sonra elde edilen

kompozite ağırlıkça %10 poliviniliden florit (PVDF) bağlayıcı eklenmiş ve N-metil prolidon ile çözülerek, elektrot çamuru haline gelmesi için bir gece karıştırılmıştır. Sodyum karboksil metil selüloz (CMC) bağlayıcı ise PVDF ile aynı oranda (%10) kompozit ile karıştırılmış ve saf su ile çözülerek çamur haline getirilmiştir. Homojen çamur karışımı, şerit döküm cihazı kullanılarak bakır (Cu) folyo üzerine kaplanmıştır. Bir gece 80°C vakumlu etüvde kurutulduktan sonra düğme hücrede kullanılmak üzere 1.1 cm çapında yuvarlak şekilde kesilmiştir. PZT-5H ve PZT-8 farklı oranlarda Si ve karbon ile kompozit haline getirilerek piezoelektrik etkinin kapasite kayıpları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca hiç PZT eklenmeden hazırlanan Si+C kompoziti de **Tablo 2**'de gösterildiği gibi hazırlanmış ve kapasite kaybı piezoelektrik eklenmiş kompozitlerle kıyaslanmıştır.

Tablo 2. Hazırlanan Örneklerin Karışımını Gösteren Liste

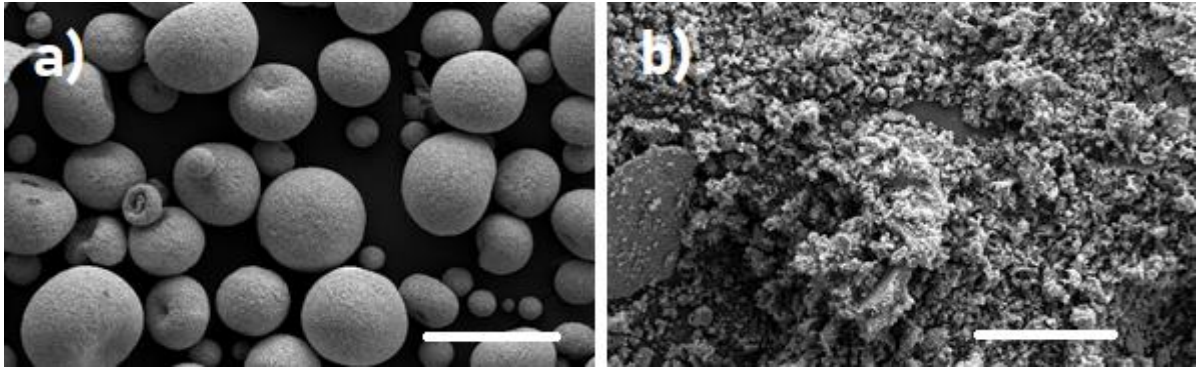
Örnek Kodu	Oranlar (% ağırlıkça)			PZT Türü
	Si	C	Piezo	
SiC2	30	40	30	PZT-5H
SiC3	35	35	30	PZT-8
SiC4	50	50	0	Yok
SiC8	40	40	20	PZT-5H
SiC9	45	45	10	PZT-5H
SiC10	50	40	10	PZT-5H
SiC11	50	30	20	PZT-5H
SiC12	60	20	20	PZT-5H
SiC13	60	30	10	PZT-5H
SiC14	70	20	10	PZT-5H
SiC15	70	10	20	PZT-5H
SiC16	80	10	10	PZT-5H
SiC17	80	20	0	Yok
SiC18	60	10	30	PZT-5H
SiC19	35	35	30	PZT-5H
SiC20	40	40	20	PZT-8
SiC21	45	45	10	PZT-8
SiC22	60	30	10	PZT-8
SiC23	80	10	10	PZT-8

Üretilen anot malzemeleri, Li metal katoda karşı yarım hücre şeklinde hazırlanarak elektrokimyasal testleri yapılmıştır. Elektrolit LiPF₆ tuzunun hacimce 1:1 oranındaki EC: DMC içinde 1M derişim değerinde çözülmesi ve ağırlıkça %5 oranında floretoilen karbonat (FEC) ilave edilmesiyle hazırlanmıştır. Çevrim testleri 0,001 – 1,5 V

potansiyel aralığında ve C/5 akım yoğunluğunda yapılmıştır. Elektrolit hazırlanması ve buton hücrenin sıkıştırılarak monte edilmesi argon atmosferine sahip eldivenli kabin içerisinde yapılmıştır. Projenin malzeme seçimi aşamasında öncelikle düşük çevrim sayılarıyla şarj/deşarj testleri yapılarak en iyi kapasite sonucunu veren piezoelektrik malzemelerinin seçilmesi hedeflenmiştir. Bu aşamada elde edilen sonuçlara bakılarak bazı kompozitler daha uzun çevrim süresi boyunca test edilmiştir. En iyi sonucun elde edildiği kompozit CMC bağlayıcı ile de test edilerek, kapasite kayıplarının, bağlayıcı etkisi ile nasıl değiştiği incelenmiştir.

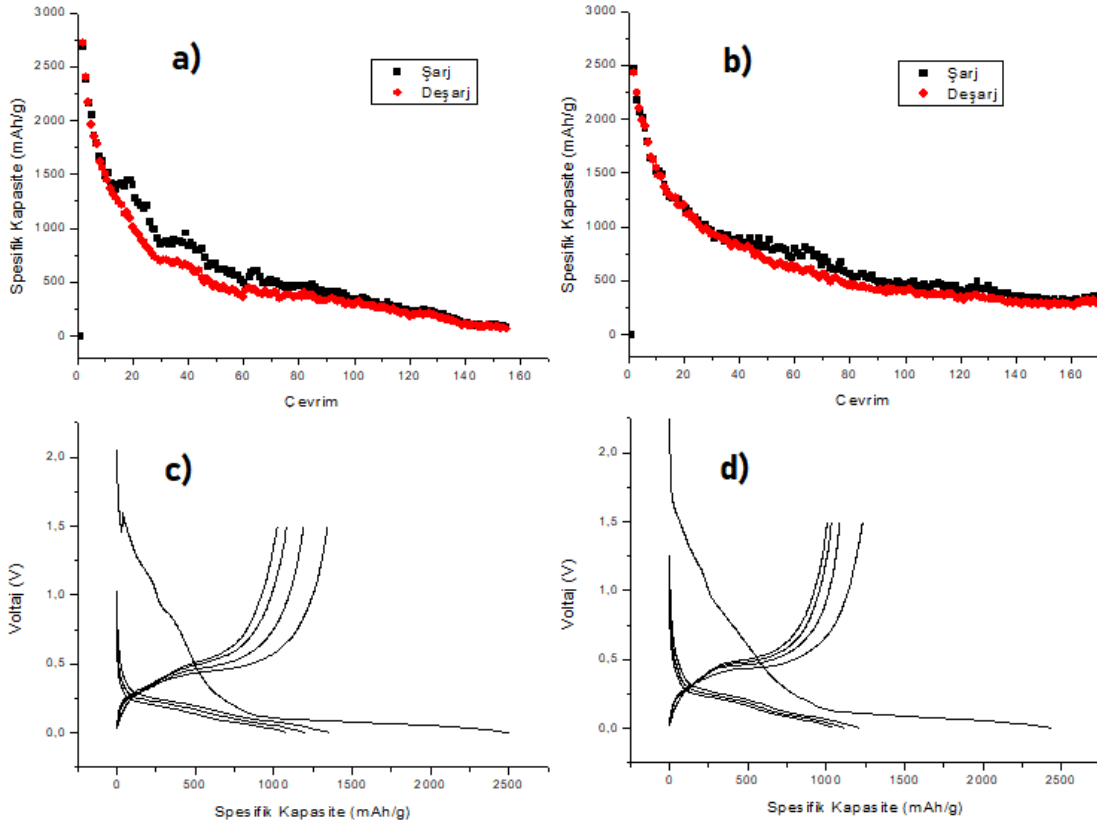
SONUÇLAR

Hazırlanan örneklerdeki yapısal değişiklikleri gözlemek için örneklerin SEM resimleri alınmıştır. **Şekil-1**'de hazır alınmış ticari PZT-5H malzemesinin morfolojisi ile bu malzemenin %10 oranında eklendiği SiC9 numaralı kompozitin morfolojisi gösterilmiştir. İki örnek karşılaştırıldığında, her biri 100 mikronu bulan PZT parçacıklarının Si-C ile birlikte karıştığı ve parçalanarak boyutunun küçüldüğü ortaya çıkmıştır.



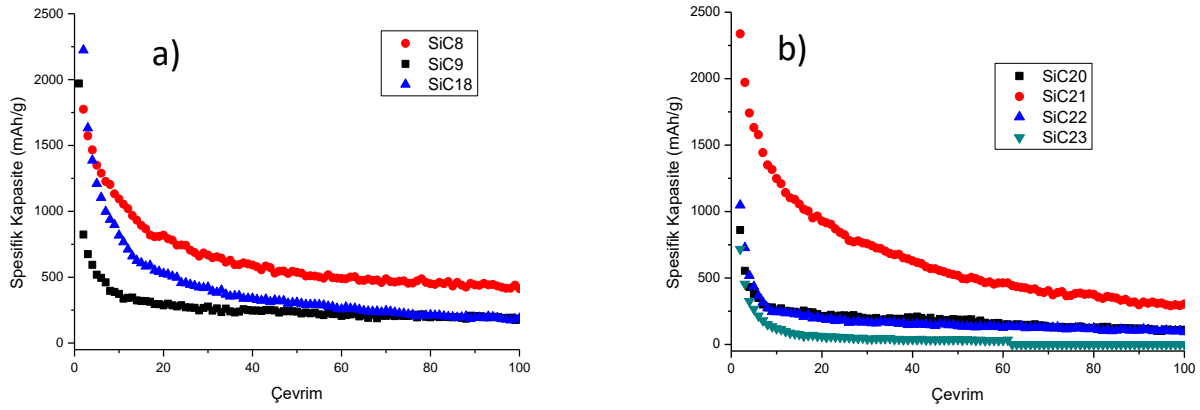
Şekil 1. Ticari PZT-5H (a) ile %10 PZT Katkılı (SiC9) Örneğin (b) Toplu Öğütmeden Sonra Karşılaştırılması
(Not: Ölçüt çizgisi 100 mikronu belirtmektedir.)

Piezoelektrik malzemelerin hangi türünün (PZT-8 veya PZT-5H), hangi oranda karıştırıldığında kapasite kayıplarına daha çok engel olabildiğini araştırmak için şarj-deşarj testleri yapılmıştır. Bu araştırmaya ilk olarak, **Tablo 2**'de karışım oranları belirtilmiş SiC3 ve SiC4 örnekleri seçilerek başlanmış ve bunların voltaj profilleri ve kapasite değerleri **Şekil-2**'de karşılaştırılmıştır. Hiç PZT eklenmemiş SiC 4 ile %30 oranında PZT-8 eklenmiş SiC 3'ün ilk 4 çevrimdeki voltaj profillerine bakıldığında 0,2 V civarında katodik, 0,3 ve 0,5 V civarında ise anodik reaksiyonları gösteren Si-C ikilisine has olan platolar belirgin bir şekilde görülmektedir. Yalnızca ilk çevrimde görülen 1 V civarındaki plato ise katı-elektrolit ara yüzeyi (SEI) oluşumuna atfedilmektedir (Wang, Ahn, Yao, Bewlay, & Liu, 2004). PZT katkısının herhangi belirgin bir plato oluşturmaması, PZT'nin aktif malzeme olarak reaksiyona girmediğini veya çok az girdiğini gösteren bir durumdur. Bu iki örneğin kapasite değerleri 100. şarj-deşarj çevrimi sonunda kıyaslandığında, PZT katkısı olan SiC3 örneğinin 400 mAh/g kapasite değerine ulaşmasına rağmen, SiC4 örneğinin 290 mAh/g değerinin de altına düştüğü tespit edilmiştir (**Şekil-2a**). Bu sonuca göre PZT-8 eklenmesi ile kapasite kayıplarının kısmi olarak önüne geçilebilmiştir. Dikkat edilirse, bu örneklerde aktif malzeme olarak Si'un C ile karışım oranları aynı tutulmuş, ek olarak yalnızca PZT eklenmiştir.



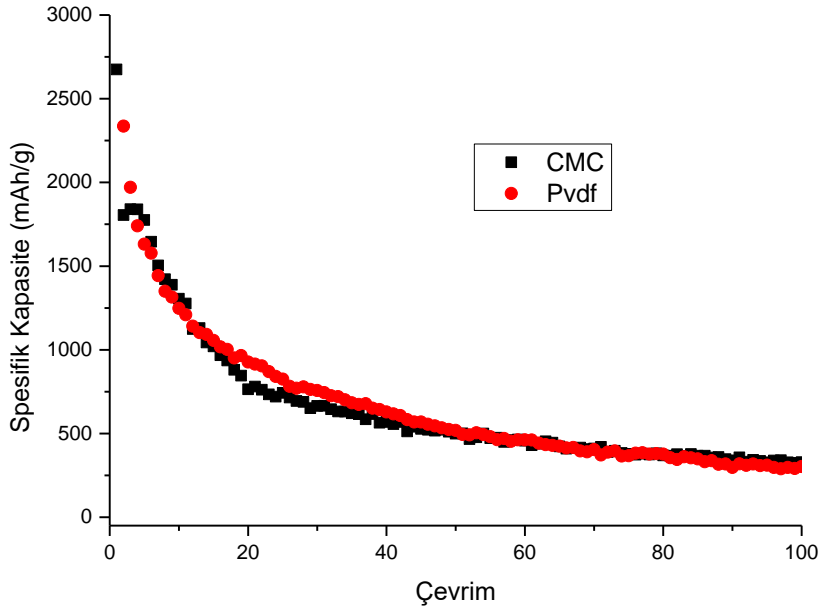
Şekil 2. PZT Katkısı Yapılmamış (SiC4) Anot Malzemesi (a,c) ile PZT Katkısı (SiC3) ile Hazırlanmış Anot (b,d) Malzemelerinin Performans Karşılaştırması. Not: Üstte çevrim sayısına göre spesifik kapasite değerinin değişimi altta ise voltaj profilleri grafikleri görülmektedir.

PZT-5H ve PZT-8 malzemeleri kullanılarak hazırlanmış örnekler için deşarj kapasite-çevrim grafikleri **Şekil-3**'de görülmektedir. PZT-5H katkılı örneklerde, PZT-8 katkılı örnekler için kapasite kaybının daha az olduğu görülmektedir. Bu fark ise, PZT-8 'in sert; PZT-5H'nin ise yumuşak piezoelektrik özelliklerine atfedilmiştir. Bir piezoelektrik malzemenin sert veya yumuşak olması ise malzemenin zor veya kolay polarize olabileceği ile ifade edilmektedir. Daha zor şartlarda polarize olabilen PZT-8 malzemesinin Si içinde biriken stresin belirli bir değere geldikten sonra –deşarjın sonlarına doğru- elektrik alan oluşturduğu varsayılabilir. Bu nedenle PZT-8 şarj/deşarj esnasında daha kısa süreli bir polarizasyon gerçekleştiriyor olabilir. Bu durumda, daha kolay polarize olan PZT-5H malzemesinin PZT-8'e göre daha geniş bir zaman aralığında polarize olduğu ve beklenen etkiyi daha uzun süre gösterdiği varsayılabilir. Bu kıyaslama ile, PZT-5H'nin Li iyonlarının anot malzemesine girişindeki katkısının PZT-8 malzemesine göre daha çok olduğu söylenebilir. Sonuç olarak PZT-5H, PZT-8 malzemesine göre kapasite kayıplarının önüne geçilmesinde daha çok katkı sağlayabilmektedir.



Şekil 3. En İyi Sonucu Veren (a) PZT-5H ve(b) PZT-8 Katkılı Örneklerin Çevrim Sayısına Göre Deşarj Kapasite Değişimi

Buraya kadar bahsedilen örneklerin hepsinde (SiC2 ve SiC23 arası tüm örnekler) bağlayıcı olarak PVDF kullanılmıştır. Farklı bağlayıcıların ne kadar etki edeceğini gözlemlemek amacıyla CMC bağlayıcı da kullanılarak test yapılmıştır. PVDF ile nispeten iyi kapasite değerlerine ulaşan örneklerden biri olan SiC21 örneği %10 CMC ile hazırlanarak şarj-deşarj testi yapılmıştır. **Şekil-4**'ten anlaşılacağı üzere, CMC ve PVDF bağlayıcı kullanılan örneklerin 100. çevrimde birbirine çok yakın değerlerde kapasite verdiği görülmüştür. Her ne kadar gözlemlerimize dayanarak PZT malzemelerinin CMC içinde tam olarak çözülmesi gerçekleşmemiş olsa da, PZT malzemesinin her iki örnekte de homojen olarak dağıldığını ve aynı etkiyi yapmış olduğunu görmekteyiz.



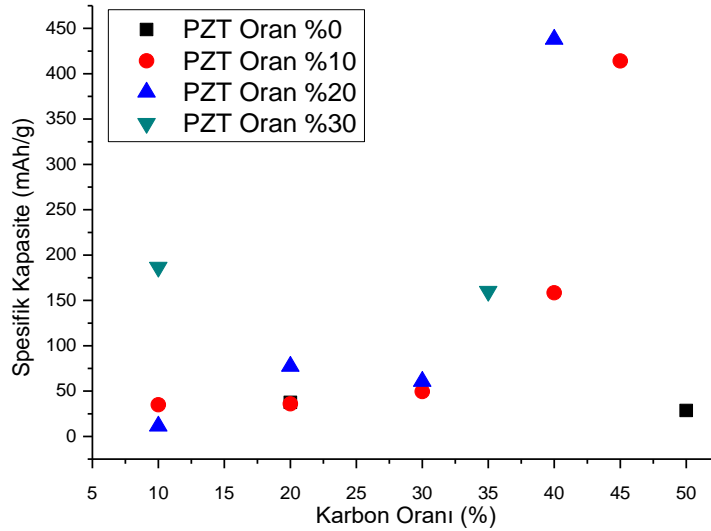
Şekil 4. CMC ve PVDF Kullanılan Si+C Anot Malzemelerinin Kapasite Performans Karşılaştırması

PZT malzemelerinin karışım oranının değiştirilmesiyle kapasite değerlerindeki değişimi gözlemlemek için farklı oranlardaki malzemelerin 100. çevrimdeki verdiği deşarj kapasite değerleri kıyaslanmıştır. Bu değerler C ve PZT oranlarına bağlı olarak **Şekil-5**'te özetlenmiştir. Buna göre genel olarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilmektedir:

Genelde, karbon oranı arttıkça kapasite artmaktadır ve %35-%50 arası en iyi sonuç gözlemlenmektedir. Bu durum karbonun oranının artmasının yanı sıra kullanılan nano-Si malzemelerinin oranının azalmasıyla da ilişkilendirilebilir.

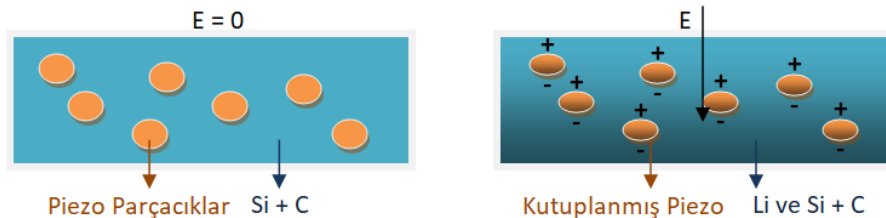
Karbon oranı yüksek olanlarda PZT oranı %0 olan örnek en düşük değeri vermektedir.

PZT katkısı olan bütün örneklerin olmayana göre daha yüksek performans verdiği görülmektedir. Katkısı olan örnekler içerisinde ise PZT %20 olan örnek (SiC8 numaralı örnek) en yüksek değeri vermektedir.



Şekil 5. PZT-5H ile Hazırlanan Örneklerde Karbon ve PZT Oranlarının Kapasiteye Etkisini Karşılaştıran 100. Çevrimdeki Deşarj Kapasite Değerleri

PZT katkısının, kapasite kayıplarının üzerindeki olumlu etkisi bahsi geçen referanslarda da değinildiği gibi şu şekilde açıklanabilir: Daha önce belirtildiği üzere, şarj/deşarj testleri sırasında Li iyonları anot içerisine yerleşmekte ve ayrılmaktadır ve bu esnada Si ile Li arasındaki reaksiyon nedeniyle hacim genişlemesi ve daralması olmaktadır. Oluşan Li-Si yapısının hacim genişlemesine neden olması ve stres oluşturmasıyla Şekil-6' daki gibi piezoelektrik parçacıkları üzerine baskı yapması beklenmektedir. Yerel olarak oluşan polarizasyon ile yerel olarak bir elektrik alan da oluşmaktadır. Bu elektrik alan Li difüzyonu yönünde olduğu durumlarda Li iyonlarının malzeme içine daha çok ve daha hızlı çekilmesine neden olmaktadır. Böylece Si tabanlı anodun kapasitesi ve şarj hızı olumlu yönde etkilenmektedir.



Şekil 6. Li Atomlarının Anoda a) Girmeden Önce ve b) Girdikten Sonra Piezoelektrik Malzemedeki Değişim ve Elektrik Alan Oluşumu

Kullanılan piezoelektrik malzemenin Si tabanlı anot içinde stresi ve baskıyı azaltması durumunda malzemedeki çatlak oluşumu ve akım toplayıcıdan kopma gibi durumların azalması ile mekanik olarak daha sağlam hale geleceği

de varsayılabilir. PZT malzemelerinin Si' un genişlemesi esnasında küçülerek yine Si üzerinde oluşan stresi bir dereceye kadar emebilmesi ve böylece ortalama stresin azaltılmasında faydası olabileceği düşünülmektedir. Si anottaki genişleme/daralma durumunda stres farkının daha az olması da mekanik olarak daha dayanıklı olması anlamına gelmektedir. Mekanik olarak daha istikrarlı bir anot elde edilmesi ile SEI katmanının da daha az kırılma ve kopmalara maruz kalarak daha kararlı hale gelmesi sağlanabilir. Bu şekilde istenmeyen yan reaksiyonların daha az gerçekleşmesi sağlanabilir ve aktif iyonların gereksiz tüketimi azaltılabilir. Genel olarak PZT katkısını iki yollu olarak hem mekanik hem de elektriksel olarak anot malzemesine faydası olduğu düşünülmektedir.

Sonuçlara genel olarak bakıldığında, PZT katkısı yapılmamış örneklerin spesifik kapasite değerlerinde çok kısa sürede hızlı düşüş meydana geldiği ve dolayısıyla anot malzemesinin bozulmaya uğradığı görülmektedir. Örneğin **Şekil-5**'te görüldüğü üzere, PZT-8 için %10 oranında ve PZT-5H için %20 oranında PZT katkısı kullanılan örneklerde 100. Çevrimde dahi 400 mAh/g üzerinde kapasite değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, optimum PZT katkı oranının %10-%20 aralığında olduğu söylenebilir. Günümüz teknolojilerinde ticari anot malzemelerinin 1000 mAh/g spesifik kapasite değerlerine ulaştığı durumu göz önüne alındığında bu sonuçlar her ne kadar gereksinimleri karşılayacak kadar yüksek olmasa da, böyle bir katkının ileri çalışmalar için umut vaat ettiği söylenebilir. Bu malzemelerin anot üzerindeki etkisi daha çok anlaşıldığında, yüksek kapasiteli anot malzemeleri üretimi için yeni bir yol açılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 118M340 no'lu proje ile desteklenmiştir. Yazar bu çalışmadaki desteklerinden ve yardımlarından dolayı Doç. Dr. Rezan Demir-Çakan'a ve Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Aurbach, D., Markovsky, B., Salitra, G., Markevich, E., Talyossef, Y., Koltypin, M., Kovacheva, D. (2007). Review on electrode–electrolyte solution interactions, related to cathode materials for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 165(2), 491-499. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.025>
- Boukamp B.A., Lesh G. C., Huggins R.A. (1981). All-solid lithium electrodes with mixed-conductor matrix. *Journal of Electrochemical Society*, 128(4), 4. <https://doi.org/10.1149/1.2127495>
- Barnett, B., Ofer, D., Yang, Y., Oh, B., Rempel, J., McCoy, C., Sririramulu, S. (2010). "PHEV Battery Cost Assessment". Retrieved from: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2010/electrochemical_storage
- Bourderau, S., Brousse, T., & Schleich, D. M. (1999). Amorphous silicon as a possible anode material for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 81, 233-236. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00194-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00194-9)
- Cabana, J., Monconduit, L., Larcher, D., & Palacín, M. R. (2010). Beyond Intercalation-Based Li-Ion Batteries: The State of the Art and Challenges of Electrode Materials Reacting Through Conversion Reactions. *Advanced Materials*, 22(35), E170-E192. <https://doi.org/10.1002/adma.201000717>
- Cheng, F., Liang, J., Tao, Z., & Chen, J. (2011). Functional materials for rechargeable batteries. *Adv Mater*, 23(15), 1695-1715. <https://doi.org/10.1002/adma.201003587>
- Choi, N.-S., Yew, K. H., Lee, K. Y., Sung, M., Kim, H., & Kim, S.-S. (2006). Effect of fluoroethylene carbonate additive on interfacial properties of silicon thin-film electrode. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1254-1259. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.049>
- Comission. (2002). *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods*. New York: United Nations.
- Cui, L.-F., Ruffo, R., Chan, C. K., Peng, H., & Cui, Y. (2008). Crystalline-Amorphous Core–Shell Silicon Nanowires for High Capacity and High Current Battery Electrodes. *Nano Letters*, 9(1), 491-495. <https://doi.org/10.1021/nl8036323>
- Dunn, J. B., Gaines, L., Sullivan, J., & Wang, M. Q. (2012). Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries. *Environmental Science & Technology*, 46(22), 12704-12710. <https://doi.org/10.1021/es302420z>

- Fan, Y., Zhang, Q., Lu, C. X., Xiao, Q. Z., Wang, X. H., & Tay, B. K. (2013). High performance carbon nanotube-Si core-shell wires with a rationally structured core for lithium ion battery anodes. *Nanoscale*, 5(4), 1503-1506. <https://doi.org/10.1039/C3nr33683b>
- Fears, T. M., Doucet, M., Browning, J. F., Baldwin, J. K. S., Winiarz, J. G., Kaiser, H., . . . Veith, G. M. (2016). Evaluating the solid electrolyte interphase formed on silicon electrodes: a comparison of ex situ X-ray photoelectron spectroscopy and in situ neutron reflectometry. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(20), 13927-13940. <https://doi.org/10.1039/c6cp00978f>
- Gaines, L., & Nelson, P. (2011). Lithium-Ion Batteries: Examining Material Demand And Recycling Issues *Argonne National Laboratory, Argonne, IL*. <https://doi.org/10.3141/2252-08>
- Gert Berckmans, M. M., Jelle Smekens, Noshin Omar, Lieselot Vanhaverbeke and Joeri Van Mierlo. (2017). Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies*, 10(1314). <https://doi.org/10.3390/en10091314>
- Goodenough, J. B., & Kim, Y. (2010). Challenges for Rechargeable Li Batteries. *Chemistry of Materials*, 22(3), 587-603. <https://doi.org/10.1021/Cm901452z>
- Grande, L. (2017). "Li-ion Batteries 2018-2028". Retrieved from <https://www.idtechex.com/research/reports/li-ion-batteries-2018-2028-000557.asp>
- Hatchard, T. D., & Dahn, J. R. (2004). In situ XRD and electrochemical study of the reaction of lithium with amorphous silicon. *Journal of the Electrochemical Society*, 151(6), A838-A842. <https://doi.org/10.1149/1.1739217>
- Holzappel, M., Buqa, H., Hardwick, L. J., Hahn, M., Wursig, A., Scheifele, W., . . . Petrat, F. M. (2006). Nano silicon for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 52(3), 973-978. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.06.034>
- Kasavajjula, U., Wang, C. S., & Appleby, A. J. (2007). Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells. *Journal of Power Sources*, 163(2), 1003-1039. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.084>
- Lee, H. Y., & Lee, S. M. (2004). Carbon-coated nano-Si dispersed oxides/graphite composites as anode material for lithium ion batteries. *Electrochemistry Communications*, 6(5), 465-469. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.03.005>
- Lee, J. H., Kim, W. J., Kim, J. Y., Lim, S. H., & Lee, S. M. (2008). Spherical silicon/graphite/carbon composites as anode material for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 176(1), 353-358. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.119>
- Li, X., Gu, M., Hu, S., Kennard, R., Yan, P., Chen, X., . . . Liu, J. (2014). Mesoporous silicon sponge as an anti-pulverization structure for high-performance lithium-ion battery anodes. *Nature Communications*, 5, 4105. <https://doi.org/10.1038/ncomms5105>
- Lu, C. X., Fan, Y., Li, H., Yang, Y., Tay, B. K., Teo, E., & Zhang, Q. (2013). Core-shell CNT-Ni-Si nanowires as a high performance anode material for lithium ion batteries. *Carbon*, 63, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.06.038>
- Obrovac, M. N., & Christensen, L. (2004). Structural changes in silicon anodes during lithium insertion/extraction. *Electrochemical and Solid State Letters*, 7(5), A93-A96. <https://doi.org/10.1149/1.1652421>
- Patil, A., Patil, V., Shin, D. W., Choi, J. W., Paik, D. S., & Yoon, S. J. (2008). Issue and challenges facing rechargeable thin film lithium batteries. *Materials Research Bulletin*, 43(8-9), 1913-1942. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.08.031>
- Sharma, R. A., & Seefurth, R. N. (1976). Thermodynamic Properties of Lithium-Silicon System. *Journal of the Electrochemical Society*, 123(8), C239-C239.
- Shu, J., Li, H., Yang, R., Shi, Y., & Huang, X. (2006). Cage-like carbon nanotubes/Si composite as anode material for lithium ion batteries. *Electrochemistry Communications*, 8(1), 51-54. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.08.024>
- Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359-367. <https://doi.org/10.1038/3510464435104644>

- Wang, G. X., Ahn, J. H., Yao, J., Bewlay, S., & Liu, H. K. (2004). Nanostructured Si-C composite anodes for lithium-ion batteries. *Electrochemistry Communications*, 6(7), 689-692. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.05.010>
- Wu, H., Chan, G., Choi, J. W., Ryu, I., Yao, Y., McDowell, M. T., . . . Cui, Y. (2012). Stable cycling of double-walled silicon nanotube battery anodes through solid-electrolyte interphase control. *Nature Nanotechnology*, 7(5), 309-314. <https://doi.org/10.1038/Nnano.2012.35>
- Xu, Y. H., Yin, G. P., & Zuo, P. J. (2008). Geometric and electronic studies of Li₁₅Si₄ for silicon anode. *Electrochimica Acta*, 54(2), 341-345. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.07.083>
- Yang, L. Y., Li, H. Z., Liu, J., Sun, Z. Q., Tang, S. S., & Lei, M. (2015). Dual yolk-shell structure of carbon and silica-coated silicon for high-performance lithium-ion batteries. *Scientific Reports*, 5, 10908. <https://doi.org/10.1038/srep10908>
- Yi, R., Dai, F., Gordin, M. L., Chen, S. R., & Wang, D. H. (2013). Micro-sized Si-C Composite with Interconnected Nanoscale Building Blocks as High-Performance Anodes for Practical Application in Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 3(3), 295-300. <https://doi.org/10.1002/aenm.201200857>
- Yu, C., Li, X., Ma, T., Rong, J., Zhang, R., Shaffer, J., . . . Jiang, H. (2012). Silicon Thin Films as Anodes for High-Performance Lithium-Ion Batteries with Effective Stress Relaxation. *Advanced Energy Materials*, 2, 68-73. <https://doi.org/10.1002/aenm.201100634>
- Zhang, S., He, M., Su, C.-C., & Zhang, Z. (2016). Advanced electrolyte/additive for lithium-ion batteries with silicon anode. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 13, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.08.003>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.03.2021
Kabul Tarihi : 08.06.2021

Received Date : 02.03.2021
Accepted Date : 08.06.2021

GÖKSU DELTASI OSTRAKOD TOPLULUĞU

GOKSU DELTA OSTRACOD SOCIETY

Ümit ŞAFAK¹ (ORCID: 0000-0002-4268-8750)
Nusret NURLU¹ (ORCID: 0000-0002-3293-150X)

¹ Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ümit ŞAFAK, usafak@cu.edu.tr

ÖZET

Çalışma alanı, Göksu Irmağı'nın Silifke-Taşucu arasında denize açıldığı bölge olan Göksu Deltası'dır. Deltanın sağında iki sığ lagün gölü olan Paradeniz ve Akgöl, bu iki gölün arasında Kuğu Gölü, Paradeniz doğusunda ise Arapalanı Gölü yer alır. Bu çalışmada, Göksu Deltası (İçel)'nin kumulu (İncekum Burnu), Akgöl, Kuğu gölü, Paradeniz ve Arapalanı gölleri içerisinde alınan yıkama örneklerindeki ostrakod topluluğu çalışılmıştır. İncekum Burnu'nun çamurlu-killi örneklerinde 8, Paradeniz Lagün örneklerinde 12, Kuğu Gölü sığ sulu çamur örneklerinde 8, Akgöl örneklerinde 10, Arapalanı Gölü'nün örneklerinde 15 ostrakod türü tanımlanmıştır. Güncel olan bu ostrakod topluluğundan *Leptocytheridae*, *Limnocytheridae*, *Cytherideidae*, *Hemicytheridae*, *Cytherettidae*, *Loxoconchidae*, *Darwinulidae*, *Ilyocyprididae*, *Candonidae*, *Cyprididae*, *Cypridopsidae* familyaları ve *Limnocytherinae*, *Cytherideinae*, *Hemicytherinae*, *Candoninae*, *Cyclocypridinae*, *Cyprinotinae*, *Eucypridinae*, *Cypridopsinae* alt familyalarına ait 13cins, 3 alt cins ve 24 tür tanımlanmıştır. Bu çalışmadaki ostrakod türleri, Türkiye ve diğer ülkelerde bulunan delta, göl ve tuzlu göllerdeki ostrakod çalışmaları ile karşılaştırılmış, tatlı sudan oligo-mesohalin, polihalın-öhalin tuzluluk kriterlerinde ostrakod toplulukları ile benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Türkiye, ostrakod, göksu delta

ABSTRACT

The study area is the Göksu Delta, where the Göksu River flows into the sea between Silifke and Taşucu. To the right of the delta are two shallow lagoon lakes, Paradeniz and Akgöl. Between these two lakes is Kuğu Lake and to the east of Paradeniz, there is Arapalani Lake. In this study, the ostracod group in wash samples taken from Göksu Delta (İçel) dune (İncekum Cape), Akgöl, Kuğu lake, Paradeniz and Arapalani lakes were studied. 8 ostracod species have been identified in the muddy-clayey samples of İncekum Cape, 12 in the Paradeniz Lagoon samples, 8 in the shallow sludge samples of the Kuğu Lake, 10 in the Akgöl samples, and 15 in the Arapalani Lake samples. Ostracods types in this study, located in Turkey and other countries were compared with ostracods research on delta, lakes and saltwater lake. From this current ostracod community *Leptocytheridae*, *Limnocytheridae*, *Cytherideidae*, *Hemicytheridae*, *Cytherettidae*, *Loxoconchidae*, *Darwinulidae*, *Ilyocyprididae*, *Candonidae*, *Cyprididae*, *Cypridopsidae* families and *Limnocytherinae*, *Cytherideinae*, *Hemicytherinae*, *Candoninae*, *Cyclocypridinae*, *Cyprinotinae*, *Eucypridinae*, *Cypridopsinae* subfamily 13 genus and 24 species described. It has been observed that oligo-mesohaline and polyhaline-ohaline from freshwater show similarities with ostracod assemblages in salinity criteria.

Keywords: Turkey, ostracod, göksu delta

GİRİŞ

Silifke ve Taşucu arasında yer alan Göksu Deltası, İçel ili Silifke ilçesinin güneyinde Göksu Nehri'nin getirdiği alüvyonlarla oluşmuş, Türkiye'nin Akdeniz kıyısındaki en önemli sulak alanlarından biridir (Şekil 1). Taşeli Platosu'ndan doğan ve Geyik Dağları'ndan gelen sularla beslenen Göksu Nehri'nin Akdeniz'e döküldüğü yerde irili ufaklı göller, sazlıklar, kumullar, kumsallar ve yerleşim alanları deltayı oluşturur. Paradeniz Dalyanı, Akgöl, Kuğu Gölü ve Arapalanı göllerin en büyükleridir.



Şekil 1. İnceleme Alanı Yer Bulduru Haritası

Deltanın kuzeydoğusunda Arkum, kuzeyinde Kurtuluş mahalleleri, batısında deltanın diğer büyük gölü olan Akgöl yer alır. Bu gölün suları hafif tuzludur, tuzluluk % 0,20-0,30 civarındadır. Komşu Akgöl balıkçıların açtığı kanalla Paradeniz'e bağlıdır. Paradeniz lagünü acı su karakteri sunmakta (tuzluluk oranı % 0,20-0,30) ve sığ kısmının derinliği 1,5 m. civarındadır. Paradeniz ile Akgöl arasında Kuğu Gölü, Paradeniz'in doğusunda oldukça tuzlu olan Arapalanı Gölü yer alır.

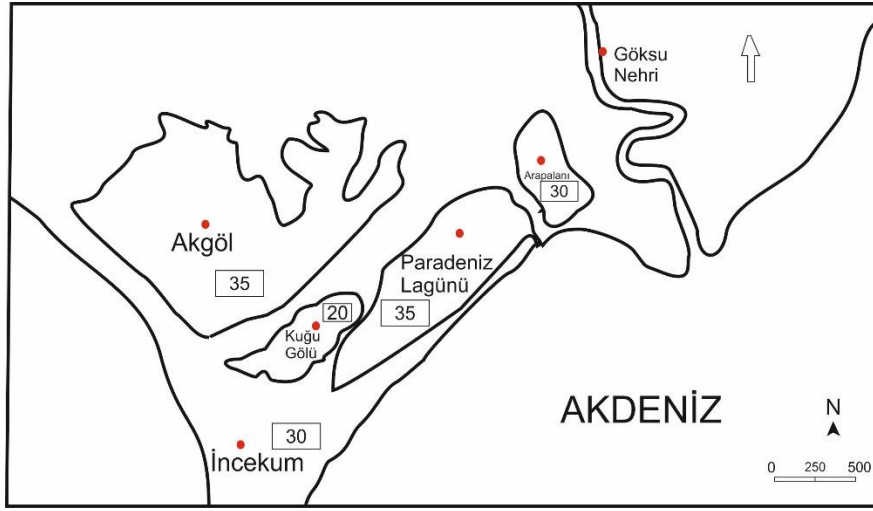
Günümüzde deltanın büyük bir bölümü, yoğun olarak insan kullanımına ve yerleşime açılmıştır. Delta ve yakın çevresinde Bal (1984); Orhon (1985); Erol (1983, 1993); Gürbüz (1997); Menengiç (1998), Şafak (1999, 2001) jeolojik, jeomorfolojik, paleontolojik, hidrojeolojik amaçlı çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada özellikle haritalar konusunda Çevre Bakanlığı tarafından 1993'te yayımlanan Özel Çevre Koruma Kurumu yayını ve 2021 Google Earth haritasından yararlanılmıştır.

Çalışmanın amacı, Göksu Deltası'nda bulunan lagün göllerindeki ostrakod topluluğunu, ostrakodların ortam belirleyici özelliklerinden yararlanılarak incelemek ve yanısıra topluluğun ortamsal özelliklerini ortaya koymaktır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Şafak (2001) tarafından çalışılarak bitirilen bir araştırma projesi olan, 2001 yılında Japonya'da poster olarak sunulan çalışmada, Göksu Deltası'nın farklı ostrakod familyalarına ait örneklerde sayısal ve sınıflama açısından yetersizlik gözlenmiştir. Bu çalışmada deltaya ait yeni göllerin isimleri Google Earth 2021 haritasındaki değişiklikler ile yeniden değerlendirilmiş, Kuğu Gölü, Arapalanı Gölü gibi yeni göller çalışmaya dahil edilmiştir. Ayrıca farklı lagün ve göllerde oluşan, tuzlu ve tatlı su gölleri ile ırmak ağızlarından alınan çok sayıda yıkama örneklerinin, ostrakod faunasına dayalı mikropaleontolojik olarak ayrıntılı değerlendirilmesi ile araştırmanın bilimsel boyut ve veri skalası genişletilmiştir. Çalışmada İncekum Burnu ve civarından 30, Paradeniz'in doğu kesiminde yer alan Arapalanı Gölü'nden 30 örnek, Akgöl'den 35 örnek, Paradeniz'den 35 örnek, Kuğu Gölünden

20 örnek olmak üzere toplam 150 yıkama örneği alınarak incelenmiş, içerdiği ostrakod cins ve türleri tanımlanmıştır. (Şekil 2)



Şekil 2. İnceleme Alanından Alınan Ostrakod Sayıları

İnceleme için 100 gr. lık kuru örnek tartılarak 1 litrelik cam beherlere konulmuştur. 24 saat boyunca sıcak su ve % 15 seyreltilmiş hidrojen peroksit (H_2O_2) ile işleme tabi tutulmuştur. Ufalanmış örnekler daha sonra 0.60, 0.120 ve 0.230 mm eleklerden oluşan elek takımı kullanılarak yıkanmış ve etüvde kurutulmuştur. Sonrasında kuruyan malzeme numune elek numaralarına göre ayrı ayrı torbalara aktarılmış ve mikrofosillerin ayıklanma işlemine geçilmiştir. Mikrofosillerin tanelere ayrılmasının ardından, ostrakodlar cins ve tür tanımlanması için mikrofosil toplama slaytlarına yerleştirilmiştir. Tanımlanan ostrakod cins ve türleri, yanal ve dikey dağılımlarını ve bolluklarını belirlemek için sayılmıştır.

Çalışmada 13 ostrakod cinsi, 3 alt cinsi ve 24 türü tanımlanmıştır. Tanımlanan cins ve türler sayılmış, ostrakodların yanal ve düşey yayılımları hesaplanmış ve sayısal bollukları belirlenmiştir. Bu dağılım tablosunda ostrakodların frekansını açıklayan simgeler kullanılmıştır. Ostrakodların sınıflamasında için Hartmann ve Puri (1974) sistematüğinden yararlanılmıştır.

İstatiksel ve göreceli değerlendirilen bu veriler baz alınarak, inceleme alanının paleoortam yorumu Van Morkhoven (1963), Barbeito-Gonzales (1971), Bassiouni (1979), Freels (1980), Neale (1988), Athersuch vd. (1989), Meisch (2000), Gliozzi vd. (2005), ortam ve tuzluluk ölçütlerinden yararlanılarak yapılmıştır. Tuzluluk için Venice Tuzluluk Skalası kullanılmıştır. Ostrakod fotoğrafları Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarının (ÇÜMERLAB)'ta bulunan Quanta 650 Field Emission SEM marka taramalı elektron mikroskopunda (Scanning Electron Mikroskopi) çekilmiştir. tanımlanan ostrakod tür ve cinslerinin SEM görüntüleri Şekil 4-8' de sunulmuştur.

Şekil 4' de Paradeniz Lagünü, Arapalanı Gölü, Akgöl'den alınan *Leptocythere*, *Limnocythere*, *Cyprideis* ostrakod türleri yer almaktadır.

Şekil 5 Arapalanı Gölü, Akgöl, Paradeniz lagünü ve İncekum Burnu'ndan alınan *Cyprideis*, *Heterocypris* ile *Aurila* türünü içermektedir.

Şekil 6' de Paradeniz, İncekum Burnu, Akgöl ve Arapalanı göllerinden alınan yıkama örneklerinde *Aurila*, *Loxoconcha*, *Ilyocypris*, *Darwinula*, *Eucypris* gibi ostrakod cins ve türleri gözlenmektedir.

Şekil 7 İncekum Burnu, Arapalanı Gölü, Akgöl'den alınan örneklerdeki *Eucypris*, *Heterocypris*, *Sarscypridopsis*, *Cyclocypris* gibi limnik karakterli ostrakod cins ve türlerinden oluşmaktadır.

Şekil 8 Arapalanı Gölü, Akgöl ve Paradeniz Lagünü'den örneklerde tanımlanan *Cypria*, *Candona* cins ve türleri ile *Chara* dan oluşmaktadır.

Çalışmanın amacına uygun biçimde önemli 5 lokasyondan (Akgöl, Kuğu Gölü, Paradeniz, Arapalanı Gölü, İncekum Burnu) alınan örneklerdeki ostrakod cins ve türleri ile 100 gr. içerisindeki sayısal bollukları (Sissingh, 1972'den değiştirilerek kullanılmıştır.

Çalışma alanında bulunan ostrakodlar tatlı su, brahik ve sığ denizel ortam karakteri yansıtmaktadırlar (Morkhoven, 1963; Bassiouni, 1979; Freels, 1980; Nazik vd., 1999; Meisch, 2000; Martin-Rubio vd., 2005; Escriva vd., 2014, Altınsaçlı vd, 2018, Doğan vd, 2020).

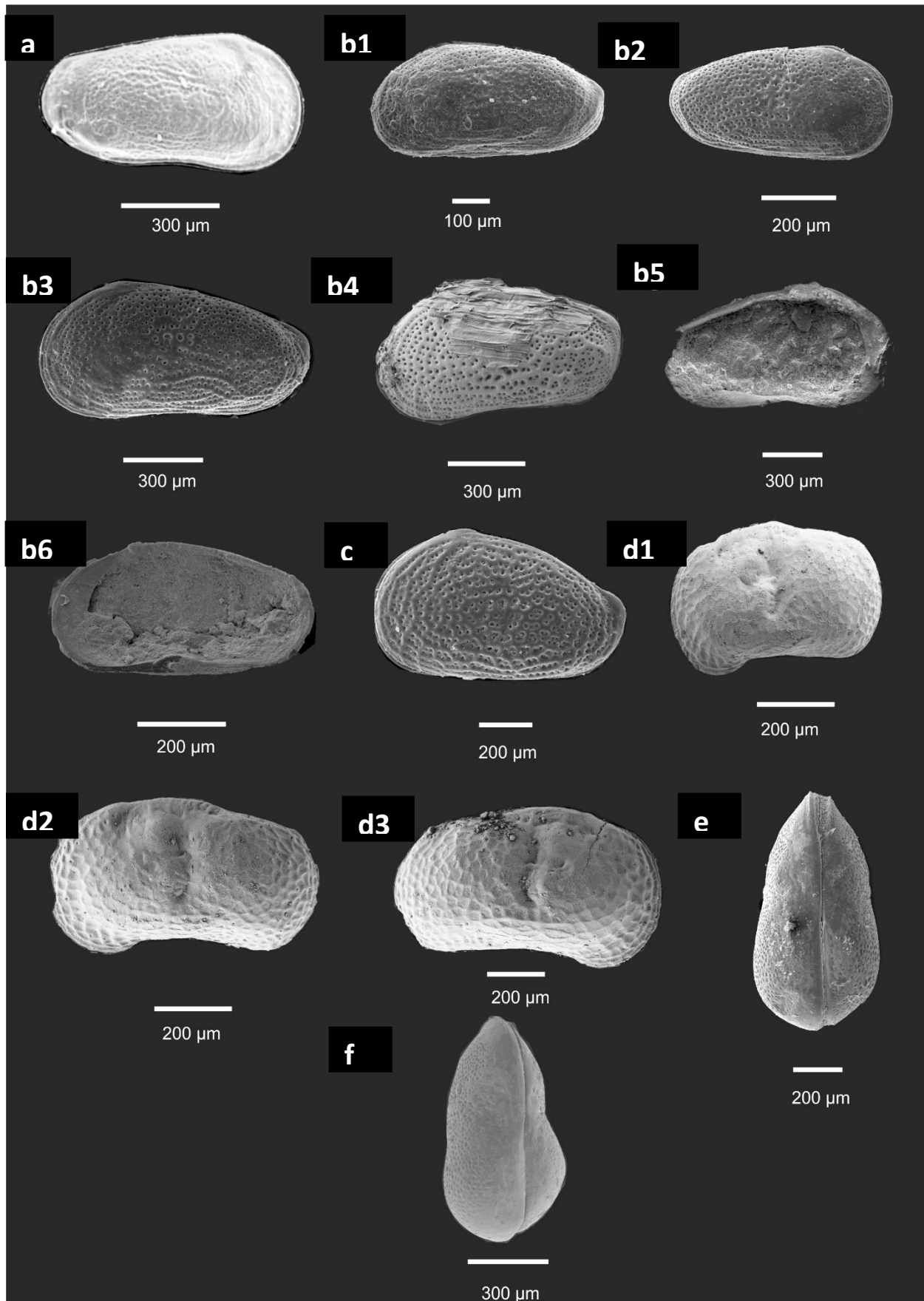
Göksu Deltası Ostrakod Türlerinin Dağılımı

İncekum Burnu

Çalışma alanının bu kesiminde tanımlanan *Leptocythere rara* çok nadir-nadir, *Cyprideis torosa* sık-çok sık, , *Heterocythereis albomaculata* çok nadir-nadir, *Aurila arborescens* nadir, *Cytheretta* sp. nadir, *Loxoconcha parallela* çok nadir-nadir, *Ilyocypris biplicata* çok nadir-nadir, *Heterocypris salina* nadir, *Eucypris dulcifons* nadir olarak gözlenen ostrakod türleridir. Bu türler eşliğinde ortamın tatlısu, oligo-mesohalin, polihalın ve öhalin karaktere geçen bir tuzluluk sergilemiş olduğu görülmektedir. Baskın olarak gözlenen *Cyprideis torosa* oligo-mesohalin tuzluluk için çok iyi bir örnektir (Şekil 3) (Şekil 9) (Şekil 4) (Şekil 5).

Ostrakodlar	Göl		Brahik		Litoral-Epineritik	
	Tatlısu/ Limnik	Oligohalin	Mesohalin	Polihalın	Öhalın (Denizel)	Hiperholın
	%0<0,5	%00,5-5	%00 5-18	%00 18-30	% 30-40	≥%00 40
<i>Leptocythere rara</i>						
<i>Leptocythere bituberculata</i>						
<i>Leptocythere lacertosa</i>						
<i>Limnocythere inopinata</i>						
<i>Cyprideis torosa</i>						
<i>Cyprideis pannonica</i>						
<i>Cyprideis seminulum</i>						
<i>Cyprideis anatolica</i>						
<i>Heterocythereis albomaculata</i>						
<i>Aurila arborescens</i>						
<i>Aurila freudenthali</i>						
<i>Loxoconcha parallela</i>						
<i>Loxoconcha elliptica</i>						
<i>Darwinula cylindrica</i>						
<i>Ilyocypris gibba</i>						
<i>Ilyocypris biplicata</i>						
<i>Candona (Candona) ar menia</i>						
<i>Candona (Candona) parallela pannonica</i>						
<i>Candona (Candona) alta</i>						
<i>Candona (Typhlocypris) amblygonica</i>						
<i>Cyclocypris ovum</i>						
<i>Heterocypris salina</i>						
<i>Eucypris dulcifons</i>						
<i>Sarscypridopsis aculeata</i>						

Şekil 3. Çalışma Alanı Ostrakodlarının Tuzluluk Dağılımları



Şekil 4

a. *Leptocythere bituberculata* Bonaduce, Ciampo ve Massoli

Sağ Kapak, Dış Görünüm, Juvenil, Erkek, Paradeniz Lagünü, 4 Nolu örnek

b. *Leptocythere rara* (Mueller)

b1. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 4 Nolu Örnek

b2. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 4 Nolu Örnek

b3. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Akgöl, 22 Nolu Örnek

b4. Sol Kapak, Dış Görünüm, Juvenil, Paradeniz Lagünü, 18 Nolu Örnek

b5. Sol Kapak, İç Görünüm, Juvenil, İncekum Burnu, 2 Nolu Örnek

b6. Sağ Kapak, İç Görünüm, Juvenil, Akgöl, 7 Nolu Örnek

c. *Leptocythere lacertosa* (Hirschmann)

Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 15 Nolu Örnek

d. *Limnocythere Inopinata* (Baird)

d1. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Paradeniz Lagünü, 10 nolu örnek

d2. Sol Kapak, Dış Görünüm, Akgöl, 26 Nolu Örnek

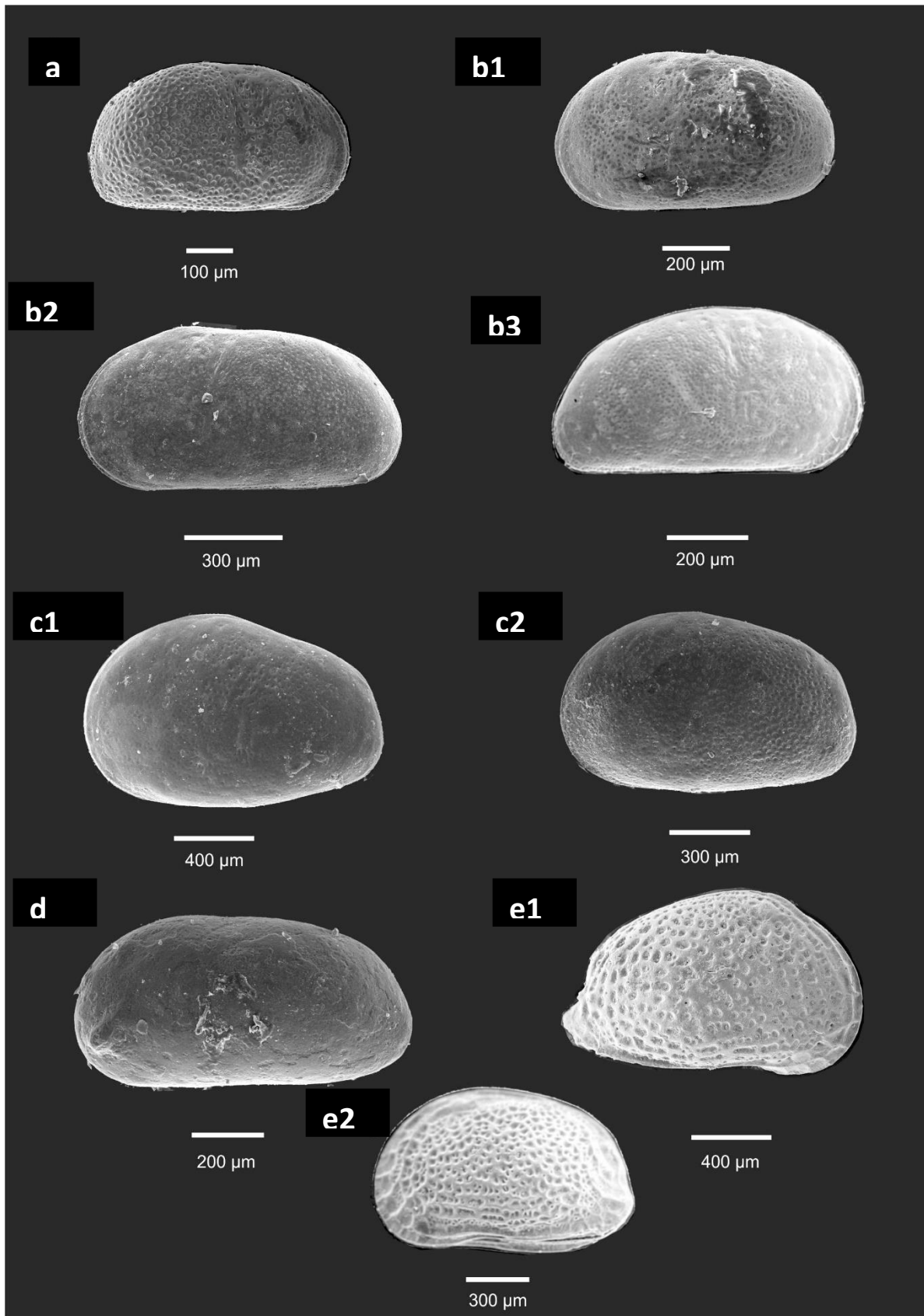
d3. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Kuğu Gölü, 17 Nolu Örnek

e. *Cyprideis pannonica* (Mehes)

Kabuk, Sırttan Görünüm, Paradeniz Lagünü, 8 Nolu Örnek

f. *Cyprideis seminulum* (Reuss)

Kabuk, Sırttan Görünüm, Arapalanı Gölü, 19 Nolu Örnek



Şekil 5

a. *Cyprideis seminulum* (Reuss)

Sağ Kapak, Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 5 Nolu Örnek

b. *Cyprideis torosa* (Jones)

b1. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Akgöl, 11 Nolu Örnek

b2. Sol Kapak, Dış Görünüm, Akgöl, 6 Nolu Örnek

b3. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Paradeniz Lagünü, 14 Nolu Örnek

c. *Cyprideis anatolica* Bassiouni

c1. Sol Kapak, Dış Görünüm, Juvenil, Akgöl, 7 Nolu Örnek

c2. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Paradeniz Lagünü, 14 Nolu Örnek

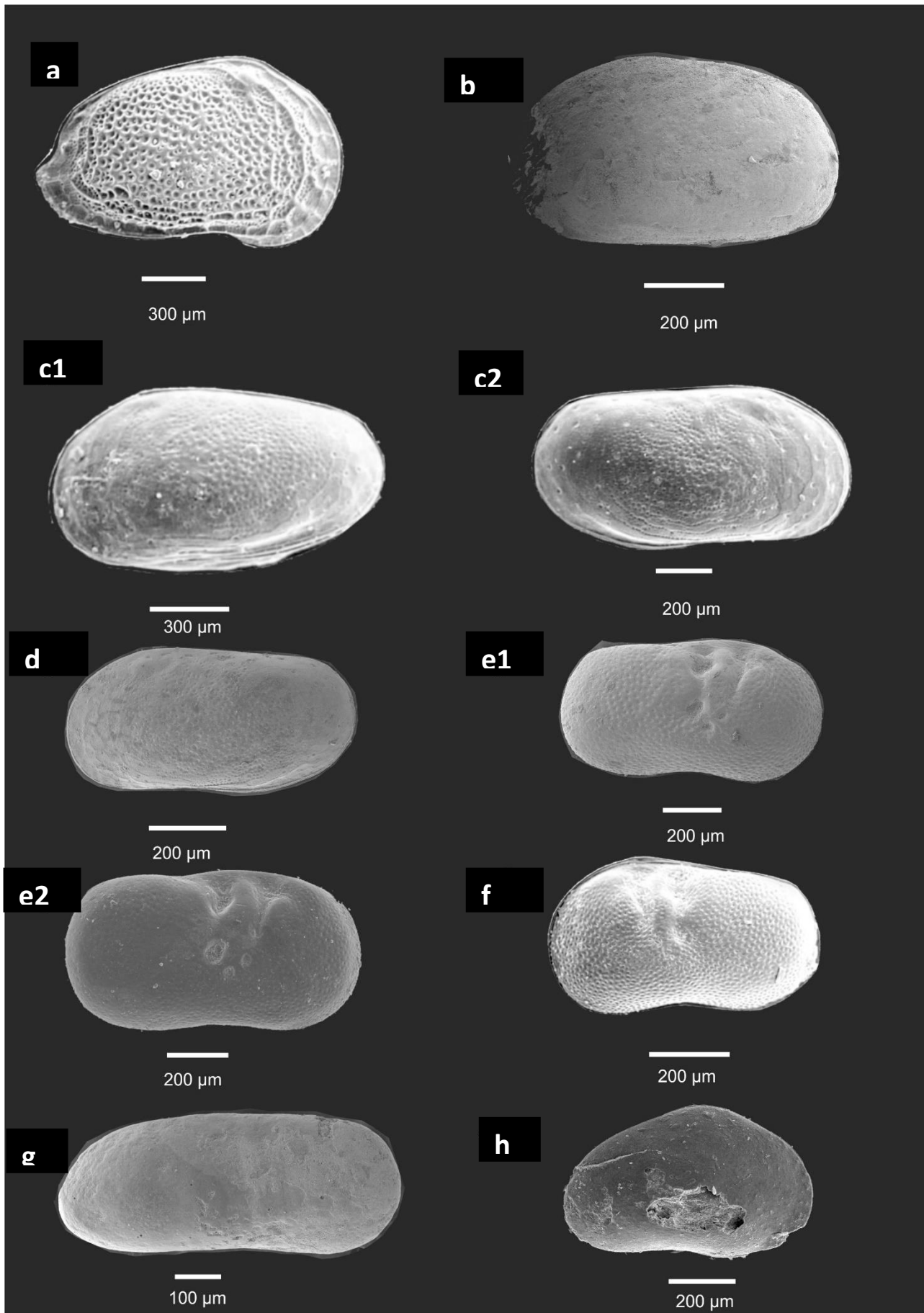
d. *Heterocythereis albomaculata* (Baird)

Kabuk, Sol Dış Görünüm, İncekum Burnu, 16 nolu örnek

e. *Aurila arborescens* (Brady)

e1. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, İncekum Burnu, 12 nolu örnek

e2. Kabuk, Sol Dış Görünüm, İncekum Burnu, 5 nolu örnek



Şekil 6

a. *Aurila freudenthali* Sissingh

Sağ Kapak, Dış Görünüm, Paradeniz Lagünü, 21 Nolu Örnek

b. *Cytheretta* sp.

Kabuk, Sol Dış Görünüm, İncekum Burnu, 5 Nolu Örnek

c. *Loxoconcha Parallela* Mueller

c1. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Juvenil Dişi, Paradeniz Lagünü, 4 Nolu Örnek

c2. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Juvenil Erkek, Paradeniz Lagünü, 12 Nolu Örnek

d. *Loxoconcha elliptica* Brady

Kabuk, Sol Yan Görünüm, Arapalanı Gölü, 9 Nolu Örnek

e. *Ilyocypris biplicata* (Koch)

e1. Sağ Kapak, Dış Görünüm, Akgöl, 28 Nolu Örnek

e2. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 17 Nolu Örnek

f. *Ilyocypris gibba* Ramdohr

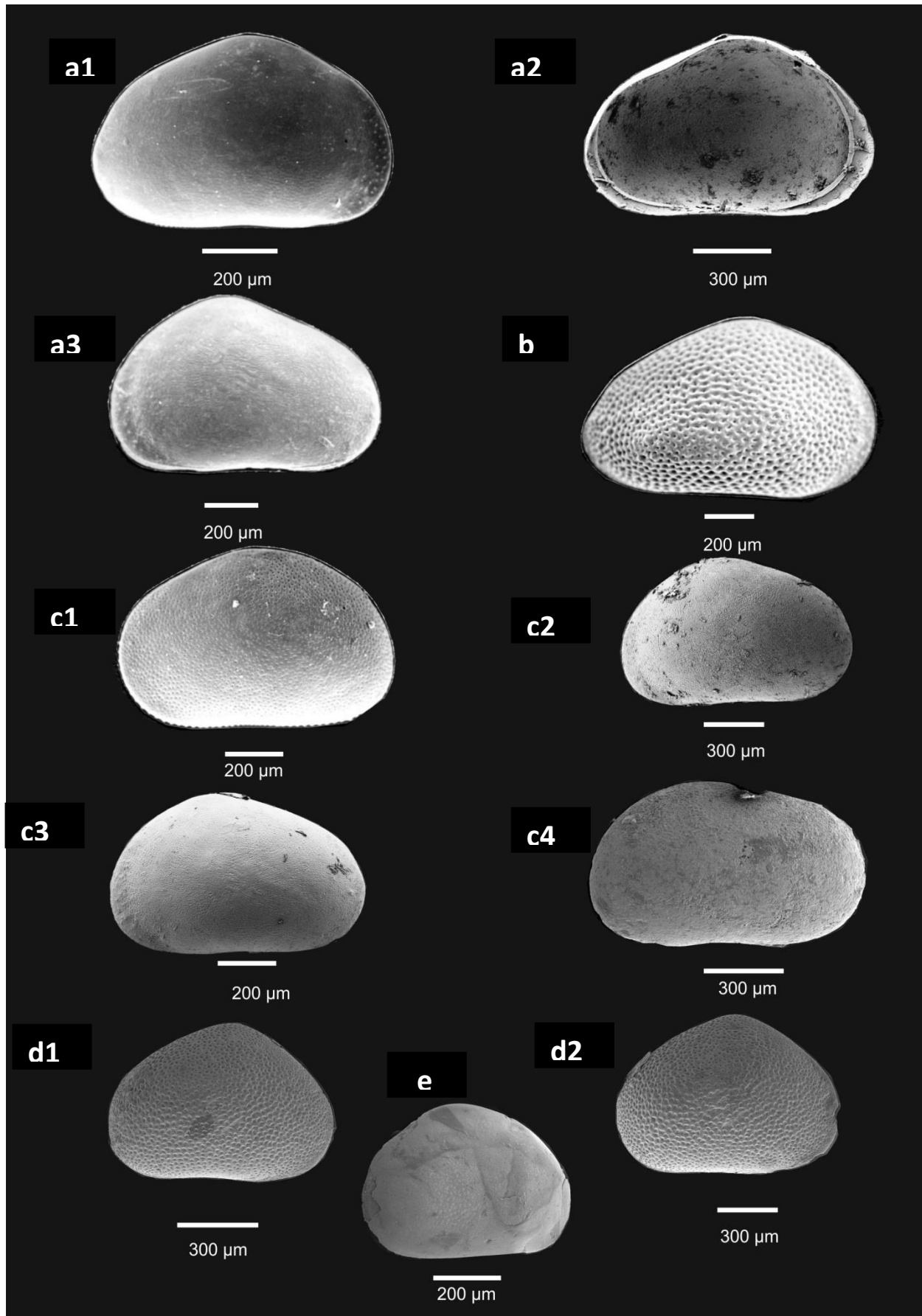
Sol Kapak, Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 8 Nolu Örnek

g. *Darwinula cylindrica* Straub

Kabuk, Sol Dış Görünüm, Akgöl, 25 Nolu Örnek

h. *Eucypris dulcifons* (Diebel ve Pietrzenuik)

Sol Kapak, Dış Görünüm, İncekum Burnu, 26 Nolu Örnek



Şekil 7

a. *Eucypris dulcifons* (Diebel ve Pietrzenuik)

a1. Kabuk, Sağ Dış Görünüm, İncekum Burnu, 26 Nolu Örnek

a2. Sol Kapak, İç Görünüm, Juvenil, İncekum Burnu, 14 Nolu Örnek

a3. Kabuk, Sol Dış Görünüm, İncekum Burnu, 14 Nolu Örnek

b. *Eucypris* sp.

Kabuk, Sağ Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 4 Nolu Örnek

c. *Heterocypris salina* (Brady)

c1. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Akgöl, 22 Nolu Örnek

c2. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Akgöl, Juvenil, 12 Nolu Örnek

c3. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, Juvenil, 7 Nolu Örnek

c4. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 1 Nolu Örnek

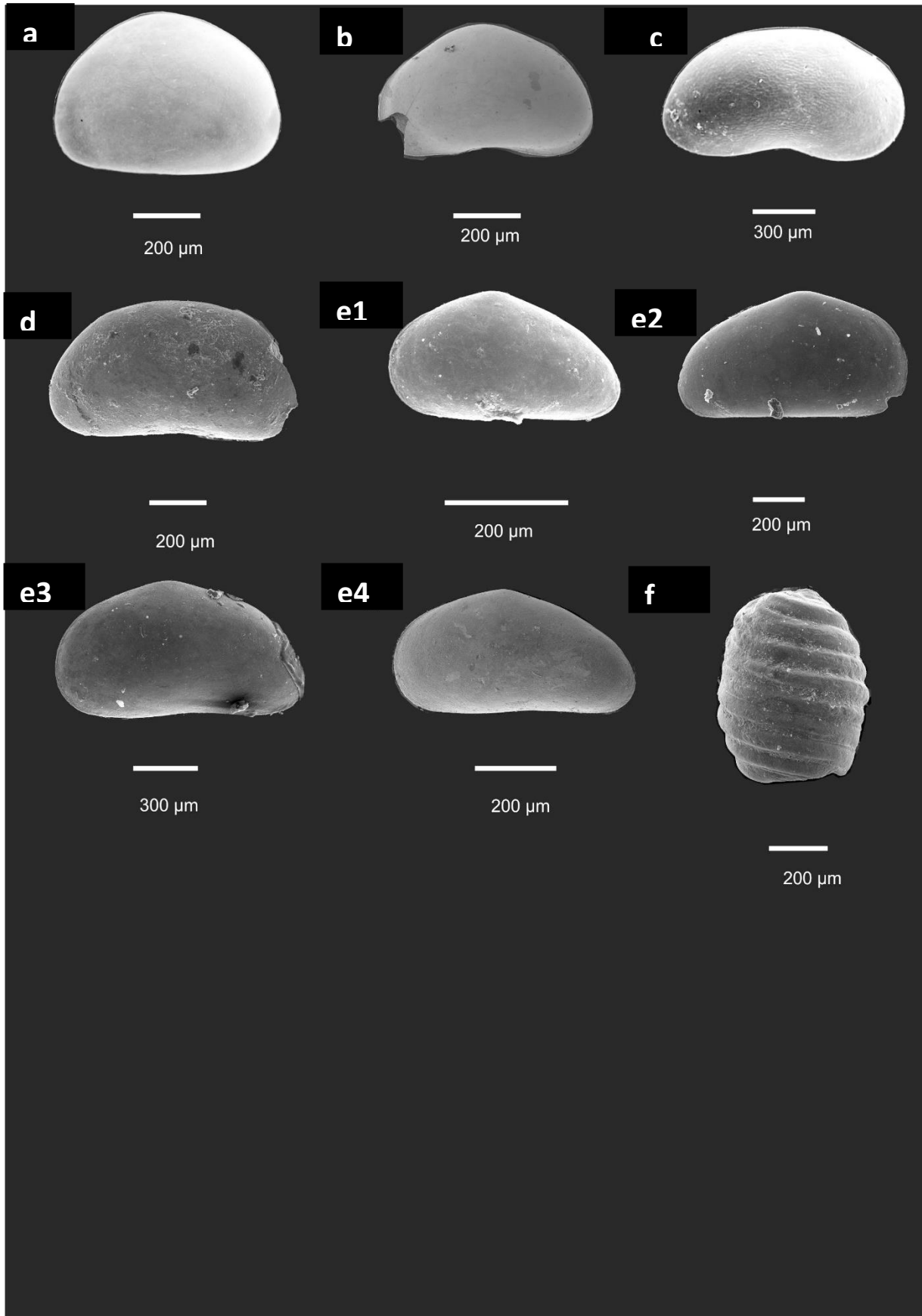
d. *Sarscypridopsis aculeata* (Costa)

d1. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 17 Nolu Örnek

d2. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Kuğu Gölü, 7 Nolu Örnek

e. *Cyclocypris ovum* (Jurine)

Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 11 Nolu Örnek



Şekil 8.

a. *Cypria* sp.

Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 15 Nolu örnek

b. *Candona (Candona) armenia* Freels

Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 9 Nolu Örnek

c. *Candona (Caspiocypris) alta* (Zalanyi)

Sağ Kapak, Dış Görünüm, Paradeniz Lagünü, 10 Nolu Örnek

d. *Candona (Candona) parallela pannonica* Zalanyi

Sol Kapak, Dış Görünüm, Akgöl, 20 Nolu Örnek

e. *Candona (Typhlocypris) amblygonica* Freels

e1. Sol Kapak, Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 14 Nolu Örnek

e2. Sağ Kapak, Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 19 Nolu Örnek

e3. Kabuk, Sol Dış Görünüm, Arapalanı Gölü, 24 Nolu Örnek

e4. Sol Kapak, Dış Görünüm, Juvenil, Arapalanı Gölü, 6 Nolu Örnek

f. *Chara* sp.

Paradeniz Lagünü, 17 Nolu Örnek

Örnek numaraları	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ostrakod cins ve türleri																														
<i>Leptocythere rara</i>		+									+							+												□
<i>Cyprideis torosa</i>	+						○							○									●		●	●				
<i>Heterocythereis albomaculata</i>							+									□													+	+
<i>Aurila arborescens</i>					+							□			●	□		●												
<i>Cytheretta</i> sp.					+							+											+							
<i>Loxoconcha parallela</i>						□										+					+									
<i>Ilyocypris biplicata</i>	□				+	+													+	□		+								+
<i>Heterocypris salina</i>						□							□													□				+
<i>Eucypris dulcifons</i>														+												□				+

Şekil 9. İncekum Burnu (Göksu Deltası) Örneklerindeki Ostrakod Cins ve Türlerinin Dağılımları ve Sayısal Bollukları

FREKANS	SAYI	SEMBOL
Çok Nadir	1 - 2	+
Nadir	3 - 5	□
Yaygın	6 - 15	■
Sık	16 - 25	○
Çok Sık	>25	●

Şekil 10. Ostrakod Türlerinin Frekans Tablosu (Sissingh, 1972'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 13. Kuğu Gölü (Göksu Deltası) Örneklerindeki Ostrakod Cins ve Türlerinin Dağılımları ve Sayısal Bollukları

FREKANS	SAYI	SEMBOL
Çok Nadir	1 - 2	+
Nadir	3 - 5	□
Yaygın	6 - 15	■
Sık	16 - 25	○
Çok Sık	>25	●

Şekil 14. Ostrakod türlerinin frekans tablosu (Sissingh, 1972'den değiştirilerek alınmıştır)

Akgöl

Bu gölde tanımlanan *Leptocythere rara* ve *Limnocythere inopinata* nadir - yaygın, *Cyprideis torosa* yaygın, sık-çok sık, *Cyprideis anatolica* yaygın –sık, *Loxoconcha parallela* çok nadir-nadir, *Darwinula cylindrica* çok nadir, *Ilyocypris gibba* ve *Ilyocypris biplicata* çok nadir-nadir, *Heterocypris salina* nadir, *Candona (Candona) parallela pannonica* çok nadir-nadir olarak gözlenen ostrakod türleridir. Akgöl'de *Cyprideis torosa* ve *Cyprideis anatolica* ve *Chara sp.*'nin baskınlığı izlenmektedir. Özellikle bu iki türde juvenil örnek sayısı çok sıklıkla yer almaktadır. *Leptocythere rara* göl içerisinde ikincil sıklıkla bulunmaktadır. *Limnocythere inopinata* da göldeki üçüncü yaygın türdür. Bu durumda tatlısu koşullarına kısmen uyumlu, oligo-mesohalin tuzluluğun yoğun olduğu bir göl ortamı izlenmektedir (Şekil 15) (Şekil 4) (Şekil 5).

Örnek numaraları	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35		
Ostrakod cins ve türleri																																					
<i>Leptocythere rara</i>		□					□						□			+						□						+							+		
<i>Limnocythere inopinata</i>	+	□					□						■							■						■										□	
<i>Cyprideis torosa</i>	□	□	+	□	+	■	+		■	+	■	○	■	■	●	■	●	+	□	+	+	□		■		□		□		+	□	□	□	○	○	○	
<i>Cyprideis anatolica</i>		□	□				□		+				+			○	+			□	□		□		□		□	○		○	○				+	○	
<i>Loxoconcha parallela</i>	+					+					□						□									+											
<i>Darwinula cylindrica</i>		+										+								□	+					□						+					
<i>Ilyocypris gibba</i>		□							□											+			+				+									+	
<i>Ilyocypris biplicata</i>		□		□				□																		+											□
<i>Heterocypris salina</i>		□						+								+							□				○			□							
<i>Candona (C) parallela pannonica</i>	+											+										□										+					
<i>Chara sp.</i>	*				*		*				*			*	*				*			*		*	*		*	*		*	*			*	*	*	

Şekil 15. Akgöl (Göksu Deltası) Örneklerindeki Ostrakod Cins ve Türlerinin Dağılımları ve Sayısal Bollukları

FREKANS	SAYI	SEMBOL
Çok Nadir	1 - 2	+
Nadir	3 - 5	□
Yaygın	6 - 15	■
Sık	16 - 25	○
Çok Sık	>25	●

Şekil 16. Ostrakod Türlerinin Frekans Tablosu (Sissingh, 1972'den değiştirilerek alınmıştır)

Arapalanı Gölü

Bu gölde *Leptocythere rara* ve *Leptocythere lacertosa* çok nadir-nadir, *Cyprideis torosa* sık-çok sık, *Cyprideis pannonica* çok nadir-nadir, *Cyprideis seminulum* nadir, *Cyprideis anatolica* sık-çok sık, *Loxoconcha elliptica* nadir, *Ilyocypris biplicata* nadir, *Ilyocypris gibba* çok nadir-nadir, *Candona (Candona) armenia* nadir, *Candona (Typhlocypris) amblygonica* sık, *Candona (Caspioypris) alta* nadir, *Cyclocypris ovum* nadir, *Cypria sp.* çok

nadir-nadir, *Heterocypris salina* nadir, *Eucypris* sp. çok nadir-nadir, *Sarscypridopsis aculeata* nadir olarak tanımlanan ostrakod türleridir. Arapalrı Gölü'nde de *Cyprideis torosa* ve *Cyprideis anatolica*'nın baskınlığı gözlenmektedir. *Candona (Typhlocypris) amblygonica* türü dışındaki diğer *Candona* türleri, *Heterocypris salina*, *Sarscypridopsis aculeata* türleri de ortamda tatlısu koşullarının bulunduğu, oligo-mesohalin tuzluluğun da yoğun olduğu acısu ortamını yansıtmaktadır (Şekil 17) (Şekil 4) (Şekil 5) (Şekil 7) (Şekil 8) .

Örnek numaraları	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ostrakod cins ve türleri																														
<i>Leptocythere rara</i>		+		□					+							□									□					
<i>Leptocythere lacertosa</i>										+					□		□													
<i>Cyprideis torosa</i>	●	●	○	●	●	●	■	●	●	○	●	●	□	○	+	+	+	□	□	+	□	□	+	○	+	○	○	+	+	+
<i>Cyprideis pannonica</i>	+				+					+			+				+		□	□				■	□	+	+			
<i>Cyprideis seminulum</i>	+		+		○	+	○			□			□					□			□				+		+			
<i>Cyprideis anatolica</i>	□		□		●			●		○		○	○			○		■		■			+	○	□		□	+		
<i>Loxococoncha elliptica</i>									■											+							+	□		
<i>Ilyocypris biplicata</i>	+	□						+									□						□	□		+				
<i>Ilyocypris gibba</i>	+				+			□				+					+				□			+			□			
<i>Caundona(Candona) armenia</i>	□			□					□			+										□							+	
<i>Candona (Typhlocypris) amblygonica</i>	○			○		○							○							●			□				□			
<i>Candona (Caopiocypris) alta</i>	+					□										□											□			
<i>Cyclocypris ovum</i>				+							□											□				□				
<i>Cypria</i> sp.				+				+							□															
<i>Heterocypris salina</i>	□						□											+					□				+			
<i>Eucypris</i> sp.				+													□													
<i>Sarscypridopsis aculeata</i>				+													□							□						

Şekil 17. Arapalrı Gölü (Göksu Deltası) Örneklerindeki Ostrakod Cins ve Türlerinin Dağılımları ve Sayısal Bollukları

FREKANS	SAYI	SEMBOL
Çok Nadir	1 - 2	+
Nadir	3 - 5	□
Yaygın	6 - 15	■
Sık	16 - 25	○
Çok Sık	>25	●

Şekil 18. Ostrakod Türlerinin Frekans Tablosu (Sissingh, 1972'den değiştirilerek alınmıştır)

Göksu Deltası Ostrakod Topluluğu ve Diğer Delta Ostrakodları ile Karşılaştırılması

Göksu Deltası, 10.000 km² lik havzaya sahip Göksu Irmağı'nın Silifke-Taşucu arasında denize açıldığı bölgedir. İl sınırları içerisinde, kuzey ve kuzeybatı sınırları Toros Dağları ile çevrilmiş olan delta güneyde tamamen Akdeniz'e açılmakta ve Göksu Irmağı tarafından ikiye bölünmektedir. Bu nehrin 260 km. boyunca sürüklediği tortuların ovada çökerek oluşturduğu Göksu Deltası'nda tarım arazileri, göller ve sazlıklar, tuzlu bataklıklar, kumullar, kumsallar ve yerleşim merkezleri bulunmaktadır. Deltanın sağında iki sığ lagün gölü olan Paradeniz ve Akgöl, bu iki gölün arasında Kuğu Gölü, Paradeniz doğusunda ise Arapalrı Gölü yer alır.

Bu çalışmada Göksu Deltası'nda bulunan ostrakod türleri Türkiye ve diğer ülkelerde bulunan delta ve göllerdeki türler ile karşılaştırılmış, bu bölgelerde de benzer ostrakod türlerinin bulunduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada tanımlanan ostrakod türlerinden;

Leptocythere rara Riva-Çayağzı/Türkiye'de (Doğan vd., 2020);

Leptocythere bituberculata Büyük Menderes Deltası ve Riva-Çayağzı / Türkiye 'nda (İlhan ve Öner, 2019; Doğan vd., 2020);

Leptocythere lacertosa Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Melides Lagünü / Portekiz (Cabral vd., 2006), Mira Nehri / Portekiz (Laureiro vd., 2009), Çamaltı Tuzla / Türkiye (Meriç vd., 2010), Bafa Gölü / Türkiye (Altınışaçlı, 2014), Evroz Delta / Türkiye (Altınışaçlı vd., 2018);

Limnocythere inopinata Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Ebru Baseni/İspanya'da (Martin-Rubio vd., 2005), Sünnet Gölü,Bolu/Türkiye (Külköylüođlu vd., 2010), Ulunger Gölü /Çin (Mischke ve Zhang, 2011), İber Yarımadası doğusu /İspanya (Escriva vd., 2014), Evroz Delta/Türkiye (Altınışaçlı vd., 2018), Büyük Menderes Deltası /Türkiye (İlhan ve Öner, 2019), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019), Kızılırmak Deltası / Türkiye (Demirci vd., 2020);

Cyprideis torosa Nil Deltası / Mısır (Slack vd., 1995), Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Yumurtalık Koyu / Türkiye (Şafak, 2003), Melides Lagünü / Portekiz (Cabral vd., 2006), Saros Körfezi / Türkiye (Kubanç, 2006), Melides Lagünü / Portekiz (Cabral vd., 2006), Hersek Lagünü / Türkiye (Mischke vd., 2012), Bafa Gölü / Türkiye (Altınışaçlı, 2014), İber Yarımadası doğusu /İspanya (Escriva vd., 2014), Evroz Delta/Türkiye (Altınışaçlı vd., 2018), Büyük Menderes Deltası /Türkiye (İlhan ve Öner, 2019), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019), Enez /Türkiye (Perçin-Paçal, 2019), Kızılırmak Deltası / Türkiye (Demirci vd., 2020), Riva-Çayağzı / Türkiye (Doğan vd., 2020).

Heterocythereis albomaculata Yumurtalık Koyu / Türkiye (Şafak, 2003), Melides Lagünü / Portekiz (Cabral vd., 2006);

Loxoconcha elliptica Nil Deltası / Mısır (Slack vd., 1995), Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Yumurtalık Koyu / Türkiye (Şafak, 2003), Melides Lagünü / Portekiz (Cabral vd., 2006), Mira Nehri / Portekiz (Laureiro vd., 2009), Çamaltı Tuzla / Türkiye (Meriç vd., 2010), Hersek Lagünü / Türkiye (Mischke vd., 2012), Bafa Gölü / Türkiye (Altınışaçlı, 2014), Evroz Delta/Türkiye (Altınışaçlı vd., 2018), Büyük Menderes Deltası /Türkiye (İlhan ve Öner, 2019), Enez /Türkiye (Perçin-Paçal, 2019), Riva-Çayağzı / Türkiye (Doğan vd., 2020).

Ilyocypris gibba Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Ebru Baseni / İspanya (J. Rodriguez-Lazaro ve Martin-Rubio, 2005), Sünnet Gölü, Bolu/Türkiye (Külköylüođlu vd., 2010), İber Yarımadası doğusu /İspanya (Escriva vd., 2014), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019).

Ilyocypris biplicata Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Evroz Delta/Türkiye (Altınışaçlı vd., 2018).

Candona (Candona) parallela pannonica Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Büyük Menderes Deltası /Türkiye (İlhan ve Öner, 2019), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019).

Cyclocypris ovum Ebru Baseni/İspanya'da (Martin-Rubio vd., 2005), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019).

Heterocypris salina Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Ebru Baseni / İspanya (J. Rodriguez-Lazaro ve Martin-Rubio, 2005), Ulunger Gölü /Çin (Mischke ve Zhang, 2011), Hersek Lagünü / Türkiye (Mischke vd., 2012), İber Yarımadası doğusu /İspanya (Escriva vd., 2014), Evroz Delta/Türkiye (Altınışaçlı vd., 2018), Büyük Menderes Deltası /Türkiye (İlhan ve Öner, 2019), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019), Kızılırmak Deltası / Türkiye (Demirci vd., 2020).

Eucypris dulcifons Akyatan Lagünü/Türkiye (Nazik vd., 1999), Eski Konya Gölü /Türkiye (Kabakçı, 2019).

Sarscypridopsis aculeata Ulunger Gölü /Çin (Mischke ve Zhang, 2011) çalışmalarında da bulunmuştur (Şekil 19).

Çalışma, Göksu Deltası'nda bulunan lagün göllerindeki (Akgöl, Kuğu Gölü, Paradeniz, İncekum, Arapalanı Gölü) ostrakod topluluğunu, ostrakodların ortam belirleyici özelliklerinden yararlanılarak incelemek, topluluğun tuzluluk dağılımına ağırlık verilerle paleoortamsal özelliklerini ortaya koymak amacı ile yapılmıştır.

Göksu Deltası'nda 4 lagün ve kıyı kesiminin iç ve dış zonunda tanımlanan ostrakodların tuzluluk ve ortamsal dağılımları incelenmiş olup, delta ortamı şöyle özetlenmiştir:

İncekum Burnu'nda *Aurila arborescens*, *Heterocythereis albomaculata* gibi epineritik deniz ortamında, *Loxoconcha parallela* gibi oligohalin, öhalin tuzlulukta gölden başlayarak litoral ortama dek ortamda gözlenen ostrakod türleri tanımlanmıştır. Bu kesimde bulunmuş olan *Ilyocypris biplicata* limnik, oligohalin; *Eucypris dulcifons* limnik, mesohaline; *Cyprideis torosa* oligohalin, polihalin tuzlulukta bulunabilen göl, brahik ve litoral-epineritik ortam ostrakod türleridir.

Paradeniz Lagünü'nde *Aurila freudenthali* gibi epineritik deniz ortamında, *Loxoconcha elliptica* gibi oligohalin, öhalin tuzlulukta gölden başlayarak litoral ortama dek gözlenen ostrakod türleri tanımlanmıştır. Bu lagündeki *Leptocythere bituberculata* mesohaline, polihalin; *Limnocythere inopinata*, *Ilyocypris gibba*, *Ilyocypris biplicata* türleri limnik, oligohalin; *Cyprideis torosa*, *Cyprideis pannonica*, *Cyprideis anatolica* türleri oligohalin, mesohaline; *Candona (Caspiocypris) alta* türü limnik, mesohalin tuzlulukta bulunabilen göl, brahik ortam ostrakod türleridir.

Kuğu Gölü'nde *Candona (Caspiocypris) alta*, *Sarscypridopsis aculeata* limnik, mesohaline; *Limnocythere inopinata*, *Ilyocypris gibba*, *Ilyocypris biplicata* limnik, oligohalin; *Cyprideis torosa*, *Cyprideis anatolica* oligohalin, mesohaline; *Heterocypris salina* limnik, meso-polihalin tuzlulukta bulunabilen göl, brahik ortam ostrakod türleridir.

Akgöl'de *Leptocythere rara* mesohaline, polihalin; *Limnocythere inopinata*, *Ilyocypris gibba*, *Ilyocypris biplicata* limnik, oligohalin; *Cyprideis torosa*, *Cyprideis anatolica* oligohalin, mesohaline; *Loxoconcha parallela* oligohalin, öhalin; *Darwinula cylindrica*, *Candona (Candona) parallela pannonica* limnik, mesohaline; *Heterocypris salina* limnik, meso-polihalin tuzlulukta bulunabilen göl, brahik ve litoral ortam ostrakod türleridir.

Arapalanı Gölü'nde *Leptocythere rara*, *Leptocythere lacertosa* mesohaline, polihalin; *Cyprideis torosa*, *Cyprideis pannonica*, *Cyprideis seminulum*, *Cyprideis anatolica* türleri oligohalin, mesohaline; *Loxoconcha elliptica* oligohalin, öhalin; *Ilyocypris biplicata*, *Ilyocypris gibba* limnik, oligohalin; *Candona (Candona) armenia Candona (Typhlocypris) amblygonica Candona (Caspiocypris) alta* limnik, mesohaline; *Cyclocypris ovum*, *Sarscypridopsis aculeate* limnik, mesohaline; *Heterocypris salina* limnik, meso-polihalin tuzlulukta bulunabilen göl, brahik ve litoral ortam ostrakod türleridir.

İncekum Burnu, Paradeniz Lagünü Akdeniz kıyısı kesiminde limnik koşullar yanında litoral ve epineritik ortam koşullarının olduğu; Kuğu Gölü, Akgöl ve Arapalanı göllerinde limnik ve brahik ortam koşullarının baskın olduğu gözlenmektedir.

Araştırmada Göksu Deltası'nda tanımlanmış olan ostrakod türleri ile Türkiye ve diğer ülkelerde yer alan delta ve göllerdeki ostrakod türlerinin benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma önceki yıllarda Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü Araştırma Fonu destekli MMF 99-6 nolu proje ile desteklenmiştir. Yıllar sonra gerçekleştirilen Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü Araştırma Fonu destekli FBA-2016-5464 nolu projede de yine deltanın gelişen göl ve nehir lokasyonundan yıkama örnekleri alınarak araştırma zenginleştirilmiştir. Çalışmaya maddi destek sağlayan Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu'na sonsuz teşekkür ederim. Araştırmanın 2000 ile 2001 yıllarındaki lagün ve göllerden çamurlu yıkama örneklerinin toplanmasında yardımlarını esirgemeyen, 2000 yılında bölümde Araştırma Görevlisi olarak görev yapan Sayın Arzu Korkmaz'a;

makalenin çizimlerinin oluşmasında emeği geçen Ç.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans öğrencim Sayın Hande Sonsun'a içten teşekkür ederim. Ostrakod fotoğraflarının çekilmiş olduğu Çümerlab (Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı) birimine ve Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Altınışalı, S. (2014). Species diversity and distribution of Ostracoda (Crustacea) in mesosaline Lake Bafa (Aegean Region, Turkey). *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 2(2), 16-32.
- Altınışalı, S., Perçin-Paçal, F., & Altınışalı, S. (2018). Assesments of environmental variables affecting the spatiotemporal distribution and habitat preferences of living Ostracoda (Crustacea) species in the Enez Lagoon Complex (Enez-Evros Delta, Turkey). *Ecologica Montenegrina* 19, 130-151. <https://doi.org/10.37828/em.2018.19.14>
- Athersuch, J., Horne, D.J., & Whittaker, J.E. (1989). Marine and Brackish water ostracods (Superfamilies Cypridacea and Cytheracea), New Series, vol. 43, in: D.M. Kermack, R.S.K. Barnes, Editors, *Synopses of the British Fauna*, E. J. Brill, Leiden, 1-343. *Synopses of the British Fauna* (N.S.), 1-343.
- Bal, Y. (1984). Doğu Akdeniz Kıyı Çizgisi Değişimleri. *Ç. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, 67 sayfa, Adana.
- Barbeito-Gonzales, P. J. (1971). Die Ostracoden des Küstenbereiches von Naxos (Griechenland) und ihre Lebensbereiche. *Mitteilungen aus dem Hamburgischen Zoologischen Museum und Institut*, 67: 255-3262005
- Bassiouni, M. A. (1979). Brackische und marine Ostrakoden (Cytherideinae, Hemicytherinae, Trachyleberidinae) aus dem Oligozän und Neogen der Türkei. *Geologisches Jahrbuch*, Reihe B, Heft 31, 200 s., Hannover.
- Cabral, M.C., Freitas, M.C., Andrade, C., & Cruces, A. (2006.) Coastal evolution and Holocene ostracods in Melides lagoon (SW Portugal). *Marine Micropaleontology*, 60, 181-204. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2006.04.003>
- Demirci, E., Tunoğlu, C., Tuncer, A., & Bilen, C. (2020). Karaboğaz Gölü (Bafra Kızılırmak Deltası) Karofitleri ve Ostrakodları. *21. Paleontoloji Stratigrafi Çalıştayı Bildiri Özleri Pandemi Özel*, s. 64-65.
- Doğan, B., Karakaş, A., Nazik, A., & Meriç, E. (2020). Traces of Mediterranean origin Holocene transgression in the drainage basin of Riva Çayağzı Creek of the Black Sea (northeastern İstanbul-Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29, 2, 280-294. <https://doi.org/10.3906/yer-1907-15>
- Erol, O. (1993). Türkiye Kıyılarındaki Bağlı deniz Düzeyi Değişmeleri ve bunun Göksu Deltası ile Diğer Deltaların Evrimine Etkisi. *Uluslararası Göksu Deltası Çevresel Kalkınma Semineri*, DHKD, İstanbul.
- Erol, O. (1983). Historical changes on the coastline of Turkey. *Proceedings "Coastal Problems in the Mediterranean Sea"* Eric, C. F. Bird and Paolo fabbri (Editors), p. 95-107. Bologna.
- Escriva, A., Rueda, J., Armengol, X., & Mesquita-Joanes, F.(2014). Artificial dam lakes as suitable habitats for exotic invertebrates: Ostracoda ecology and distribution in reservoirs of the Eastern Iberian Peninsula, *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 412 (09), 1-12. <https://doi.org/10.1051/kmae/2013091>
- Freels, D. (1980). Limnische Ostrakoden aus Jungtertiär und Quartar der Türkei. *Geologisches Jahrbuch*, B 39, 3-169, 2 Abb., 18 Taf., Hannover.
- Gliozzi, E., Rodriguez-Lazaro, J., Nachite, D., Martin-Rubio, M., & Bekkali, R. (2005). An overview of Neogene brackish leptocytherids from Italy and Spain: Biochronological and palaeogeographical implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 225, 283-301. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.015>

- Gürbüz, K. (1997). Seyhan ve Ceyhan Delta'larının kronolojik evrimi ve bunların kıyı değişimine etkileri, *Yerbilimleri*, Çukurova Üniversitesi'nde Jeoloji Mühendisliği Eğitiminin 20. Yılı Sempozyumu, Sayı 30, s. 175-189, Adana.
- İlhan, R., & Öner, E. (2019). Büyük Menderes Deltası'nın Kuzeyinde Yapılan Delgi Sondajlarda Mikropaleontolojik Bulgular. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 17 (2), 345-366. <https://doi.org/10.33688/aucbd.558247>
- Kabakçı, M. (2019). Eski Konya Gölü (Çumra Doğusu/Konya) Kuvaterner Çökelleri ostrakodları, paleoortam özellikleri, Paleocoğrafya ve Paleoklim koşulları. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, 75 s., Adana.
- Kubanç, N. (2006).Saros Körfezi Ostracod (Crustacea) Faunası, *İstanbul Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 20, 27-4, İstanbul.
- Loureiro, I.M., Cabral, M.C., & Fatela, F. (2009). Marine Influence in Ostracod Assemblages of the Mira River Estuary: Comparison between Lower and Mid Estuary Tidal Marsh Transects. *Journal of Coastal Research*, (Proceedings), SI 56, 1365-1369.
- Martin-Rubio, M., Rodriguez-Lazaro, J., Anadon, P., Robles, F., Utrilla, R., & Vázquez, A. (2005). Factors affecting the distribution of recent lacustrine Ostracoda from the Caicedo de Yuso-Arreo Lake (Western Ebro Basin, Spain). *Paleogeography, Paloclimatology, Paleoecology*. 225, 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2003.10.021>
- Meisch, C. (2000). Freshwater Ostracoda of Western and Central Europe. *Süßwasserfauna von Mitteleuropa*, 8/3, 522p, Heidelberg, Germany, Spektrum Akademischer Verlag.
- Menengiç, M. (1998). Göksu Deltası (Silifke-İçel) Yeraltı Suyu Kirliliği, *Mersin Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, 77 s., 4 Ek.
- Mischke, S., & Zhang, C. (2011). Ostracod distribution in Ulungur Lake (Xinjiang, China) and a reassessed Holocene record. *Ecol. Res.* 26, 133-145. <https://doi.org/10.1007/s11284-010-0768-1>
- Mischke, S., Schudack, U, Bertrand, S., & Leroy, S.A.G. (2012). Ostracods from a Marmara Sea lagoon (Turkey) as tsunami indicators. *Quaternary International*, 261, 156-161. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.11.013>
- Morkhoven, F. P. M. (1962). Post Paleozoic ostracoda. Elsevier edit., II, 478s.
- Nazik, A., Evans, G., & Gürbüz, K. (1999). Sedimentology and Paleontology with Special Reference to the Ostracoda Fauna of Akyatan Lagoon (Adana-SE Turkey), *4 th European Ostracodologists Meeting. Geosound 35*, 127-149.
- Neale, J.W. (1988). Ostracods and palaeosalinity reconstruction. In: P. de Deckker, J.-P. Colin and J.-P. Peypouquel (Editors), *Ostracoda in the Earth Sciences. Elsevier*, Amsterdam, pp. 125 155.
- Orhon, A. R. (1985). A qualitative study of the distribution of Recent ostracodes and some Foraminiferida in Paradeniz and Akgöl Lagoons, (Göksu River Delta, Southern Turkey). *The Middle East Technical University Institute of Marine Sciences*, İçel.86 p.
- Perçin-Paçal, F. (2019). Spatiotemporal Distribution and Habitat Preferences of Ostracods in the Coastal Karagöl Lagoon, Enez, Edirne, Turkey. *Acta zool. bulg.*,71 (4), 589-596.
- Rodriguez-Lázaro, J., & Martin-Rubio, M. (2005). Pliocene Ilyocyprididae (Ostracoda) from the Ebro Basin (N. Spain). *Revue de Micropaléontologie*, 48, 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2004.12.004>
- Slack, J.M., Kontrovitz, M., & Stanley, D.J. (1995). Ostracoda from Lake Manzala, Nile Delta, Egypt. In: Riha, J. (ed.) *Ostracoda and Biostratigraphy*, Riha (ed.), Rotterdam, Balkema,333-342.
- Şafak, Ü. (2001). Göksu Deltası Holosen Ostrakodları (İçel-Türkiye), Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü Araştırma Fonu, Proje No MMF 99/6

Şafak, Ü. (2001). Recent ostracoda assemblage of the Göksu River Delta and environmental features, 14th *International Symposium on Ostracoda, Abstracts*, p. 82, Shizuoka, Japan.

Şafak, Ü. (2003). Yumurtalık Koyu (Adana) Ostrakod Topluluğu. *MTA Dergisi*, 126, 1-10, Ankara.

The Venice system for the classification of marine waters according to salinity (1958). *Limnol. Oceanogra.*, 3 (3), 346-347. <https://doi.org/10.4319/lo.1958.3.3.0346>.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 09/04/2021
Kabul Tarihi : 07/09/2021

Received Date : 09/04/2021
Accepted Date : 07/09/2021

NEHİRLERDEKİ KATI MADDE MİKTARININ BULANIK SMGRT YÖNTEMİ İLE TAHMİNİ

PREDICTION OF SEDIMENT AMOUNT IN RIVERS USING FUZZY SMGRT METHOD

*Feyzullah DAYAN*¹ (ORCID: 0000-0001-8640-8821)
Mustafa DEMİRCİ^{*} (ORCID: 0000-0002-3249-2586)
*Fatih ÜNEŞ*¹ (ORCID: 0000-0001-5751-6970)
*Bestami TAŞAR*¹ (ORCID: 0000-0003-4842-3937)

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İskenderun-HATAY, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Feyzullah Dayan, feyzullahdayan1@gmail.com

ÖZET

Nehirlerdeki katı madde miktarının doğru tahmin edilmesi; kirliliğin belirlenmesi, akarsu taşımacılığı, baraj ömrünün tespiti vb. konularda oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) Bulanık Mantık- Simple Membership Functions and Fuzzy Rules Generation Technique (Bulanık SMRGT) yöntemleri kullanılarak nehirlerdeki katı madde tahmini yapılmıştır. Katı madde tahmini için Catonsville yakınında Patapsco Nehri üzerinde bulunan katı madde (sediment) gözlem istasyonuna ait 2015-2018 yılları arasında bulunan akım verileri, girdi parametresi olarak kullanılarak modeller geliştirilmiştir. Model sonuçları birbirleriyle karşılaştırıldığında Bulanık Mantık modellerinin gözlem sonuçları ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, katı madde, SMRGT, modelleme, regresyon

ABSTRACT

Determination of pollution, river transport, determination of dam life, etc. matters are very important in the accurate estimation of the amount of sediment in rivers. In this study, sediment estimation in river was made using Multiple Linear Regression (MLR) Fuzzy Logic-Simple Membership Functions and Fuzzy Rules Generation Technique (Fuzzy SMRGT) methods. For the sediment estimation, the models were developed by using the flow data of the sediment observation station located on the Patapsco River near Catonsville between the years 2015-2018 as input parameters. The model results were compared with each other and it was seen that the Fuzzy SMRGT model gave consistent results with the observation results.

Keywords: Fuzzy logic, sediment, SMRGT, model, regression

GİRİŞ

Akarsu üzerine inşa edilen yapıların planlanması ve projelendirilmesinde, nehirlerde taşınan katı madde miktarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi mühendislik ve su yapıları planlaması açısından oldukça önemlidir. Akarsularda katı madde miktarı, akarsu üzerine yapılan tesislerin ömrünü azaltmakta, akarsu taşımacılığına ve tarımsal alanlara da zarar vermektedir. Özellikle baraj hazneleri gibi su depolama tesislerinde biriken katı maddeler hazne kapasitesini azaltır ve zamanla baraj haznesinin işlevini yerine getiremez duruma gelmesine sebebiyet verir. Ayrıca taşkın kontrolü için akarsu düzenlemelerinde, viyadük, köprü gibi diğer yapıların akarsu içerisinde kalan ayaklarında meydana gelebilecek oyulma ya da yığılma miktarlarının belirlenmesinde ve gerekli önlemlerin.

To Cite: DAYAN, F., DEMİRCİ, M., ÜNEŞ, F., & TAŞAR, B., (2021). NEHİRLERDEKİ KATI MADDE MİKTARININ BULANIK SMGRT YÖNTEMİ İLE TAHMİNİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(4),294-307.

alınması bakımından katı madde taşınım miktarının tahmini oldukça önemlidir

Katı maddenin doğrudan akarsudan ölçüm metoduyla belirlenmesi en güvenilir yol olmasına rağmen, zaman alan ve pahalı bir yöntemdir. Ayrıca birçok gözlem istasyonlarından akarsuyun debisi ölçülmesine karşın, hem maliyet ve zaman alması hem de ölçme zorluğu nedeni ile katı madde ölçümü yapılmamaktadır. Bununla birlikte ayrıca taşkınlar ve seller gibi doğal afet durumunda nehirlerde katı madde gözlem ve ölçümleri yapılamamaktadır. Son yıllarda nehirlerdeki katı madde tahmini üzerine yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

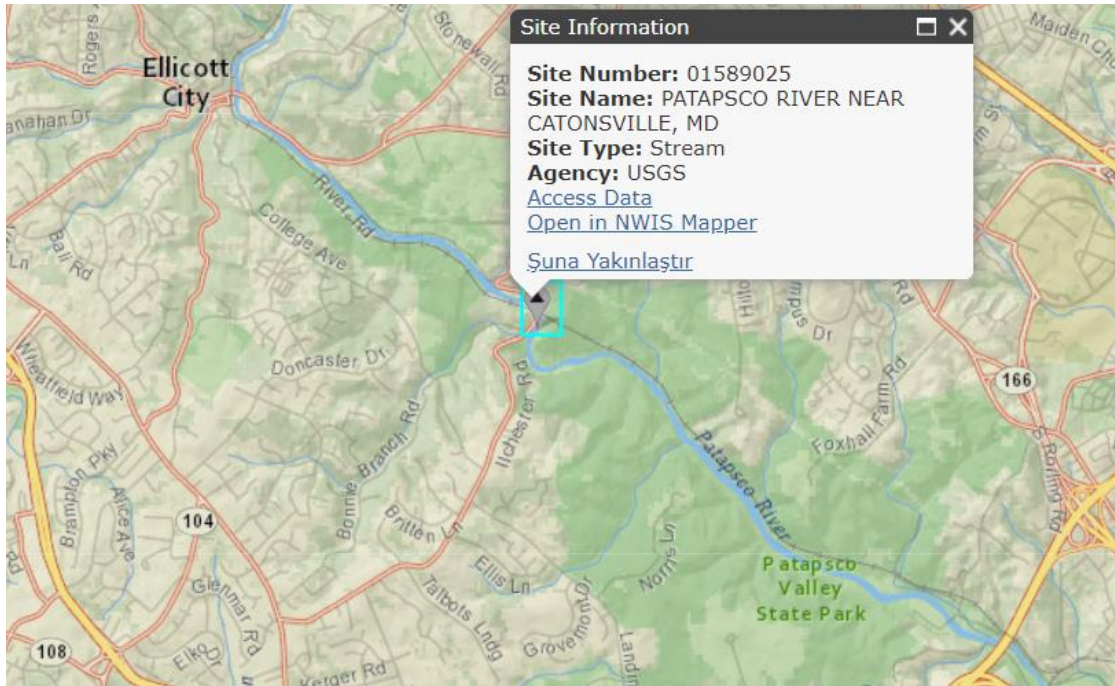
Kisi (2005), ABD’de 2 istasyondaki günlük akım verilerini kullanarak Yapay Sinir Ağları (YSA), Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE) ve Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) modellerini kullanarak akarsuda katı madde miktarını tahmin etmiştir. Model sonuçlarını karşılaştırdığında ANFIS ve YSA modelleri klasik yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir. Rajae ve vd. (2009), ABD’de Little Black Nehri ve Salt Nehri istasyonlarına ait verileri kullanarak Bulanık Mantık (BM), Yapay Sinir Ağları (YSA), Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) ve Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE) metodlarını kullanarak günlük katı madde konsantrasyonunu hesaplamaya çalışmışlar. BM ve YSA modelleri için nehir debisi, zamansal ötelenmiş nehir debisi ve katı madde konsantrasyon miktarı kullanmışlardır. YSA ile tahmin edilen sonuçların ise klasik metotlara göre daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Mirbagheri vd. (2010), nehirlerdeki katı madde konsantrasyonu tahmininde, Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve bulanık kural tabanlı modellerin performansını determinasyon katsayısı kullanarak değerlendirmiş, sonuçları karşılaştırdığında bulanık kural tabanlı modelin katı madde konsantrasyonu tahmini için daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Fırat ve Güngör (2010), Türkiye’de Büyük Menderes Nehrinde 3 farklı istasyonda aylık ölçülen akım debisi verilerini kullanarak katı madde miktarı tahmin etmeye çalışmışlar. Katı madde tahmini için Yapay Sinir Ağları (YSA), Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) ve Bulanık Mantık (BM) yöntemlerini kullanmışlar. Model sonuçları değerlendirildiğinde BM yaklaşımının yüksek performans ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Mianaei ve Keshavarzi (2010), Escanaba Nehrinde günlük akım debisi ve katı madde debi ölçümlerini kullanmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada Bulanık Mantık algoritmaları ve Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE) sonuçları ile karşılaştırmışlar ve Bulanık Mantık algoritması ile oluşturulan katı madde tahminlerinin diğerlerinden daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Vafakhah (2013), İran’da Hazar Denizi yakınlarındaki Kojor havzasına ait yağış ve akım debisi verilerini katı madde tahmini için kullanmıştır. Çalışmalarında 2007-2010 yıllarına ait 776 günlük veri çalışmışlardır. Çalışma sonuçları Ortalama Karesel Hata (OKH), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Korelasyon Katsayısı (R) kriterlerine göre kıyasladığında BM modellemesi YSA modelinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Olyae ve vd. (2015), ABD’de bir nehirde katı madde tahmini için Yapay Sinir Ağları (YSA), Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE) ve Birleştirilmiş Dalgacık Yapay Sinir Ağları (WANN) metodlarını karşılaştırmışlar. Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) en düşük performansına sahip modeller olduğunu, WANN ve ANFIS yöntemlerinin en iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Kisi ve Zounemat (2016), ABD’de Muddy nehrinde 2 istasyonda katı madde miktarını tahmin etmek için çalışma yapmışlardır. Çalışmada günlük akım debisi ve katı madde konsantrasyon miktarı verilerini kullanmışlardır. Yapay Sinir Ağları (YSA), Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Katı Madde Anahtar Eğrisi (KMAE) ve Kümeleştirilmiş Nöro-Bulanık (KNB) modellerini karşılaştırmışlar. KNB yönteminin nehirlerde katı madde tahmini daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Shameei ve Kaedi (2016), ABD’de Rio Valenciano ve Quebrada Blanca istasyonlarında ölçülmüş katı madde miktarı tahmini için; Lineer Genetik Programlama (LGP) ile Nöro Bulanık (NB) yöntemlerinin performansını araştırmış ve her iki yöntemin de uygun sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Cherif, vd. (2017), Kuzeybatı Cezayir, Wadi El Hammam’da, SRC yöntemini kullanarak 22 yıllık bir süre boyunca fırtına döneminde nehirlerdeki sediment yükünü tahmin etmişlerdir. Riahi-Madvar ve Seifi (2018), farklı girdi parametreleri kombinasyonlarını kullanarak sediment yükünü tahmin etmek için ANN ve ANFIS modellerini uygulamışlardır. Rahman ve Chakrabarty, (2020), YSA yönteminin alüvyonlu bir nehirde sediment taşınımını tahmin etme ve morfolojik değişiklikleri değerlendirmedeki başarısını araştırmıştır. Zounemat-Kermani, vd. (2020), askıdaki sediment ve yatak yükü tahmini için ANFIS, destek vektör regresyonu ve hibrit genetik algoritma modellerini (GAANFIS ve GA-SVR) içeren makine öğrenme modellerini incelediler. Rajae ve Jafari, (2020), nehir sediment konsantrasyonu tahmini için yapay zekâ modelleriyle ilgili literatürü gözden geçirdiler. Yapay zekâ modellerinin nehirlerdeki sediment konsantrasyonunu etkili bir şekilde tahmin edebildiğini göstermişlerdir. Ayrıca yapay zekâ yöntemleri birçok bilim alanında yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirci vd. 2016; Demirci vd. 2017; Üneş vd. 2018; Demirci vd. 2018; Üneş vd. 2019; Üneş vd. 2020; Cansız ve Ünsalan, 2021).

Bu çalışmada katı madde tahmini için Patapsco Nehri Catonsville yakınında gözlem istasyonuna ait 2015-2018 yılları arasında bulunan akım verileri, girdi parametresi olarak kullanılarak Bulanık Mantık (Bulanık SMRGT) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modele ek ÇDR (Çoklu Doğrusal Regresyon) modelleri oluşturulmuş olup katı madde tahmini yapılmıştır ve modeller birbiriyle karşılaştırılmıştır.

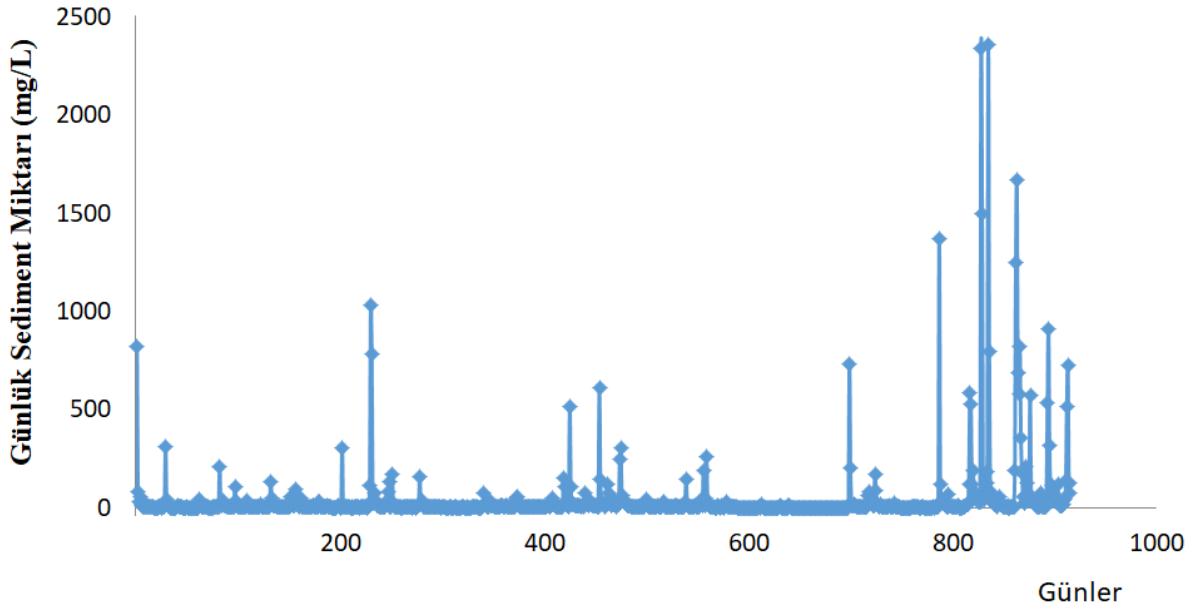
MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanı

Bu çalışma kapsamında ABD'nin Catonsville yakınındaki Patapsco nehri üzerinde 39°15'04.5" Kuzey enlemi ve 76°45'49.6" Doğu boylamında yer alan ve 01589025 nolu istasyona ait 2015-2018 yılları arasındaki 915 tane günlük meteorolojik veri kullanılmıştır. Çalışmada, tüm verilerin %78'i eğitim; %22'si test için ayrılmıştır. Eğitim için 715 günlük veri, test için 200 günlük ölçüm verisi kullanılmıştır. Bu model uygulamalarında Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu'ndan (USGS) elde edilen ortalama günlük debi (Q), bulanıklık (B), kullanılarak katı madde miktarı (S) tahmin edilmiştir. Patapsco nehrine ait çalışılan istasyonun konumu Şekil 1.'de gösterilmiştir. Çalışılan istasyondaki Patapsco Nehrine ait 2015-2018 yılları arasındaki günlük sediment (mg/L) miktarı değişimleri Şekil 2.'de verilmiştir. Patapsco Nehri 39 mil uzunluğunda (63 km) ve 950 mil karelik (2.460 km²) bir havza alanına sahiptir. Patapsco, uzunluğunun büyük bir bölümünde küçük bir nehirdir ve çoğunlukla dar bir vadiden akar. Patapsco Nehri ana kolu, Baltimore şehir merkezinin yaklaşık 15 mil (24 km) batısında, Marriottsville yakınlarındaki Kuzey ve Güney Şubelerinin birleştiği yerde başlar.



Şekil 1. Çalışılan İstasyonun Konumu (USGS)



Şekil 2. Çalışılan İstasyondaki Patapsco Nehrine Ait 2015- 2018 Yılları Arasındaki Günlük Ortalama Sediment (mg/L) Miktarı Değişimleri

YÖNTEM

Bulanık SMRGT

Bulanık Mantık ilk olarak 1965’de Azeri kökenli sistem bilimci Zadeh tarafından önerilen bulanık küme teorisi ile ortaya çıkmıştır (Zadeh, 1965). Bu yöntem ile modern anlamda belirsizlik kavramı açıklığa kavuşmuştur. İnsanlar günlük yaşantılarında karşılaştıkları problemleri tanımlama ve çözme ihtiyacı duyarlar. Bu problemler bazen basitçe tanımlanıp çözülebilirken bazen de karmaşık olup basitçe tanımlanmaktan uzaktırlar. BM (Bulanık Mantık) teorisi problemi keskin sınırlarla ayırmak yerine kümeleme veya sınıflandırma şeklinde değerlendirmektedir.

Modelleme kesin olmayan bulanık kümelerden oluştuğu için Bulanık ya da “Fuzzy” olarak ifade edilir. Kesin sonuçlarla sınırları ifade edilemeyen, yaklaşık olarak sınırların belli olduğu durumlarda bulanık mantık olayın fiziğine kolaylık ile girmenizi sağlayarak daha anlamlı ve gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Böylelikle lineer ilişkilerin olmadığı fiziksel olayların araştırılmasında ortaya çıkan belirsizlikler çözülebilmektedir. Bir bulanık modellemede en önemli iki husus bulanık kümelerin ve bulanık kural tabanının doğru şekilde belirlenmesidir. Bu amaçla geliştirilen çok sayıda yöntem olmakla birlikte, ikisini birlikte belirleme imkânını veren ve henüz yeni bir yöntem olan Bulanık SMRGT yöntemi ilk kez Toprak (2009) tarafından sunulmuştur. Yöntem, hem üyelik fonksiyonlarının (üçgen/trapez) hem de bulanık kuralların belirlenmesinde sadece “ağırlık merkezi” durulaştırma yöntemi ile birlikte kullanılabilir. Seçilen girdi ve çıktı verilerine göre Bulanık SMRGT yöntemi kullanılarak veriler bulanıklaştırılarak bulanık kümeler ve en uygun küme aralıkları elde edilmiştir. Bulanık kümeler ve bulanık kurallar Matlab programı kullanılarak çözümler elde edilmiş ve sonuçları Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6 da verilmiştir.

Bulanık SMRGT yönteminde ilk olarak bağımlı ve bağımsız değişkenler için maksimum ve minimum değerler belirlenir. Sonrasında üyelik fonksiyon sayısı ve şekli belirlenir. Üyelik fonksiyonlarının şeklini ve yapısını oluşturmak için kullanılan parametreler aşağıdaki denklemlerle hesaplanır. (Denklem 1-9). Bulanık SMRGT'ye dayalı tahmin modelinin üyelik fonksiyonlarının yapısı Şekil 3’te temsili olarak verilmiştir. Bulanık kümeler üçgen olarak seçilmiştir. Çalışılan istasyonda 2015-2018 yıllarına ait 3 yıllık toplam 915 tane veri kullanılmıştır. Çalışmada tüm verilerin %78’i eğitim %22’i Eğitim için 715 veri, test için 200 ölçüm verisi kullanılmıştır. Bu verilere ait Bulanık SMRGT tahmin modeli için denklemlerden bulunan sonuçlar/sınır değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

$$X_R = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

$$UW = \frac{X_R}{n_u} \quad (2)$$

$$EUW = \frac{X_R}{n_u} + A \quad (3)$$

$$A = \frac{UW}{2} \quad (4)$$

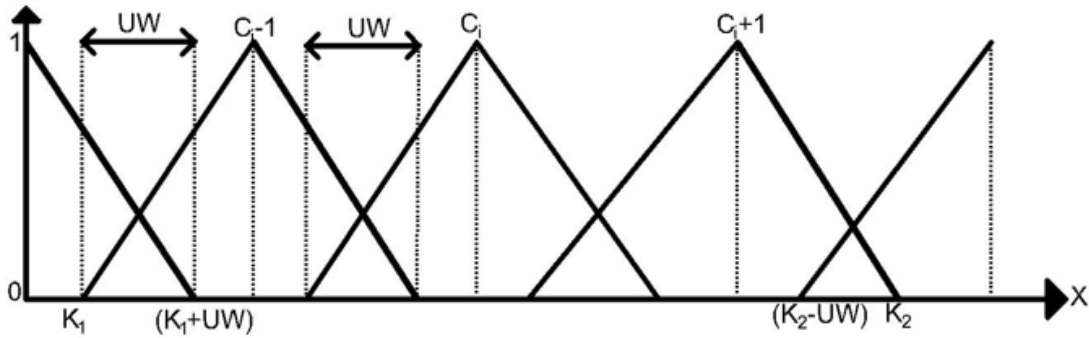
$$K_1 = X_{\min} + \frac{EUW}{3} \quad (5)$$

$$K_2 = X_{\max} - \frac{EUW}{3} \quad (6)$$

$$C_i = \frac{X_R}{2} + X_{\min} \quad (7)$$

$$C_{i-1} = \left(\frac{C_i - X_{\min}}{2} \right) + X_{\min} \quad (8)$$

$$C_{i+1} = X_{\max} - \left(\frac{X_{\max} - C_i}{2} \right) \quad (9)$$



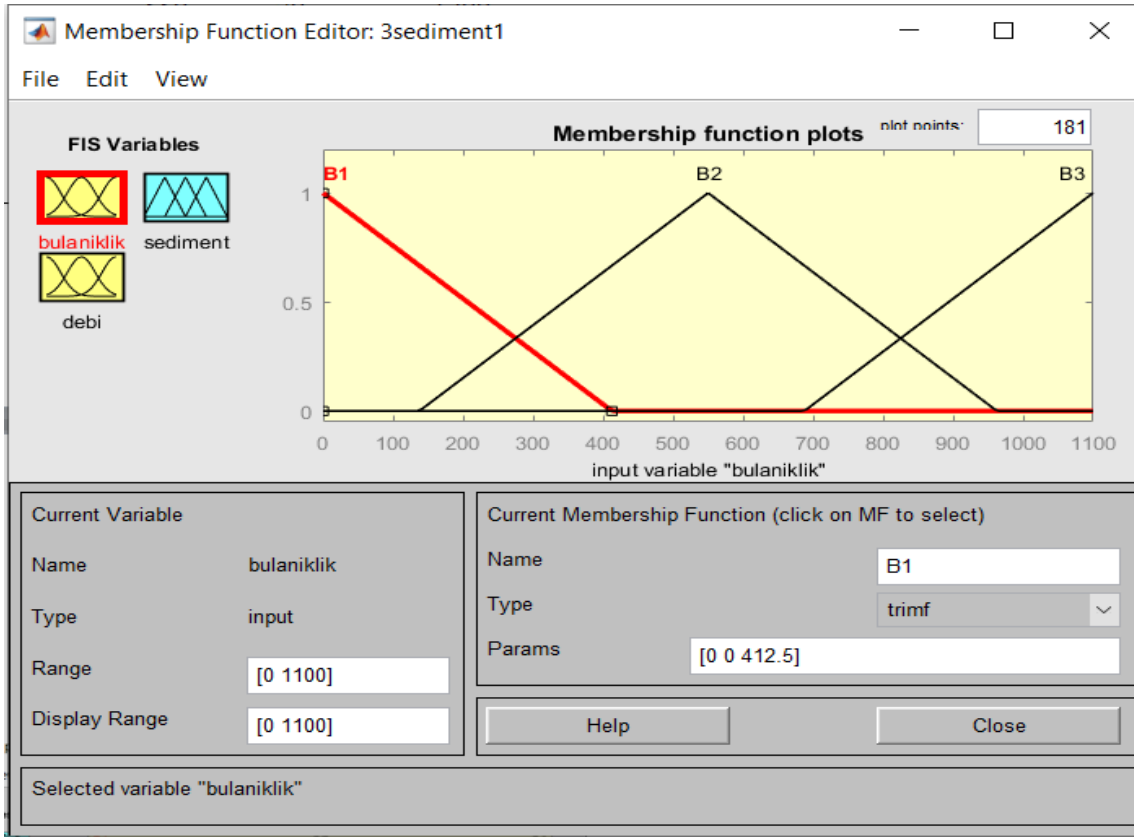
Şekil 3. Bulanık SMRGT Yöntemine Ait Sınır Parametreler

Tablo 1. Bulanık SMRGT Yöntemine Ait Sınır Değerler

	Bulanıklık	Debi	Sediment
X_{\min}	0	0	0
X_{\max}	1100	140	2400
X_R	1100	140	2400
C_{i-1}	-	-	-
C_i	550	70	1200
C_{i+1}	-	-	-
n_u	4	4	4
UW	275	35	600
EUW	412,5	52,5	900
K1	137,5	17,5	300
K2	962,5	122,5	2100

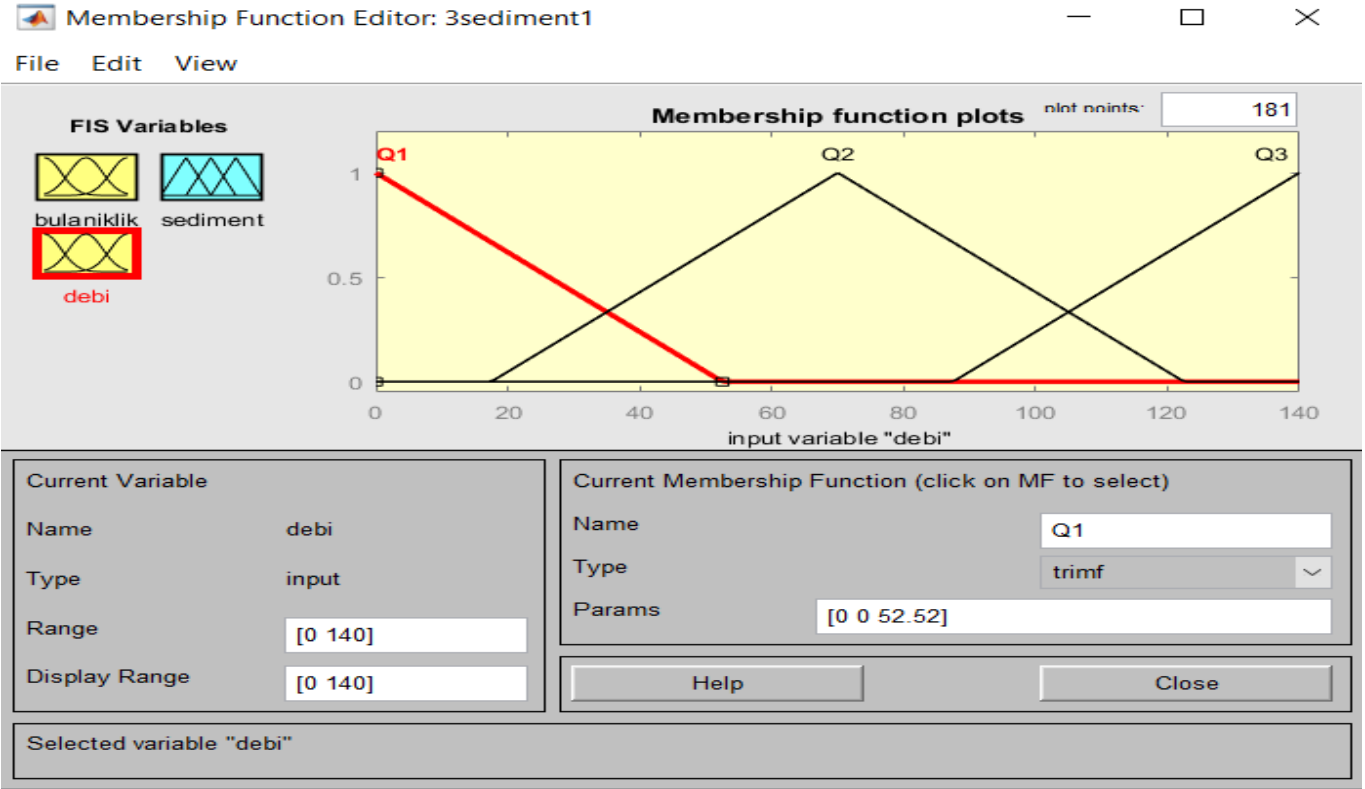
Tahmin modeli için oluşturulan her bir üyelik fonksiyonuna ait bulanık kümelerin birim genişliği (UW), çekirdek değeri (C_i) ve anahtar değerleri (K_i) belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenebilmesi için ilk olarak bulanık kümelerin değişim aralığının (X_R) bilinmesi gerekmektedir. Değişim aralığını belirleyebilmek için ikinci aşamada belirtilen bulanık kümelerin en düşük ve en yüksek değerleri kullanılmıştır. Bulanıklık, sediment ve debi için değişim aralığı

(X_R) formülünde görülmektedir. Bulanık modelde, komşu kümeler iç içe geçtiğinden genişletilmiş taban genişliğine (EUW) gerek duyulmaktadır. (UW), Şekil 3'te gösterilen birim genişliği ifade etmektedir. n_u dik üçgen sayısını göstermektedir. Dik üçgen sayısı 4 ve belirlenen çekirdek değeri (C_i) 1 olarak kabul edilmiştir.



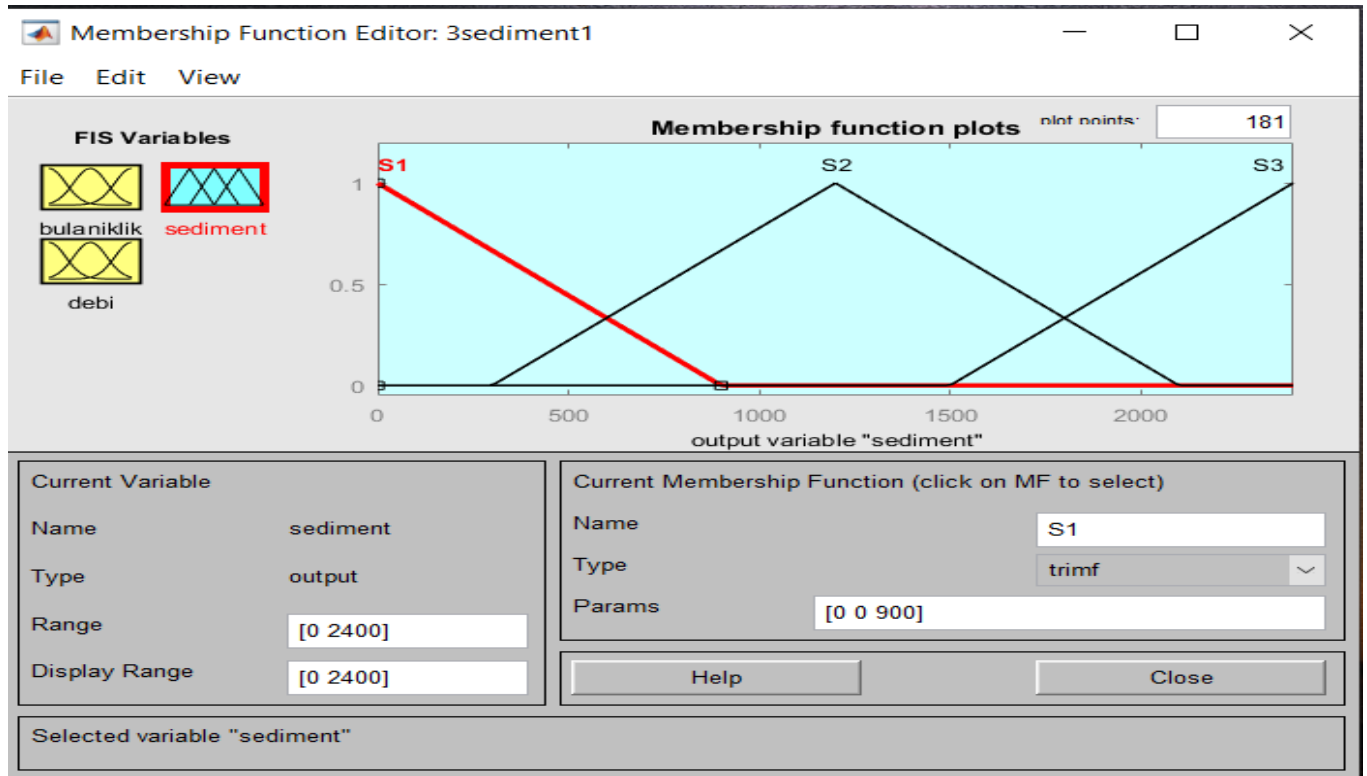
Şekil 4. Bulanıklık Girdisine Ait Bulanık Kümelerin (B1,B2,B3) Matlab'da Oluşturulması

(Şekil 4)'te matlab programında bulanık mantığa göre bulanıklık için üç farklı üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu üyelik fonksiyonlarına B1,B2 ve B3 ismi verilmiştir. Taban ve tavan değerleri bulanık mantık ve üyelik fonksiyonlarına bağlı oluşturulmuştur.



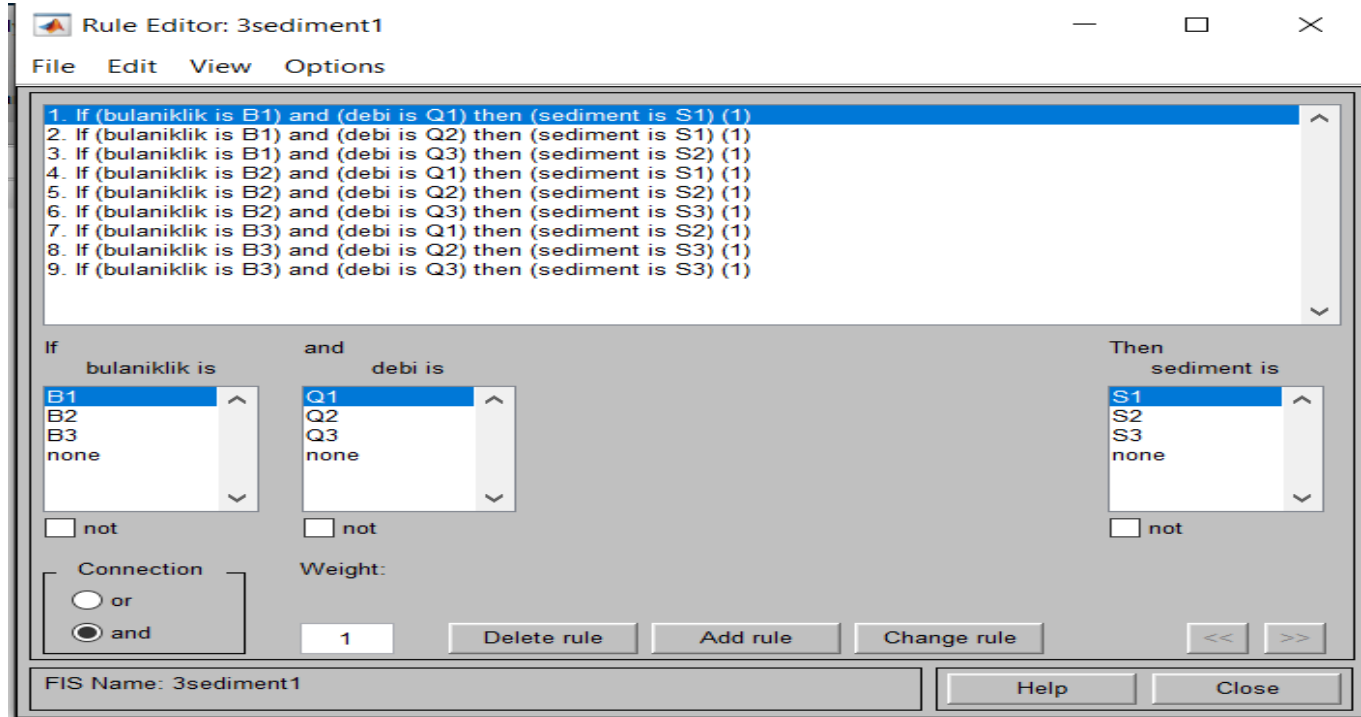
Şekil 5. Debi Girdisine Ait Bulanık Kümelerin (Q1,Q2,Q3) Matlab’da Oluşturulması

(Şekil 5)’de matlab programında bulanık mantığa göre debi için üç farklı üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu üyelik fonksiyonlarına Q1,Q2 ve Q3 ismi verilmiştir.



Şekil 6. Sediment Çıktısına Ait Bulanık Kümelerin (S1,S2,S3) Matlab’da Oluşturulması

(Şekil 6)'da matlab programında bulanık mantığa göre katı madde miktarı için üç farklı üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu üyelik fonksiyonlarına S1,S2 ve S3 ismi verilmiştir. Bu uygulamada debi ve bulanıklık girdi parametreleri katı madde miktarı ise çıktı parametresidir.

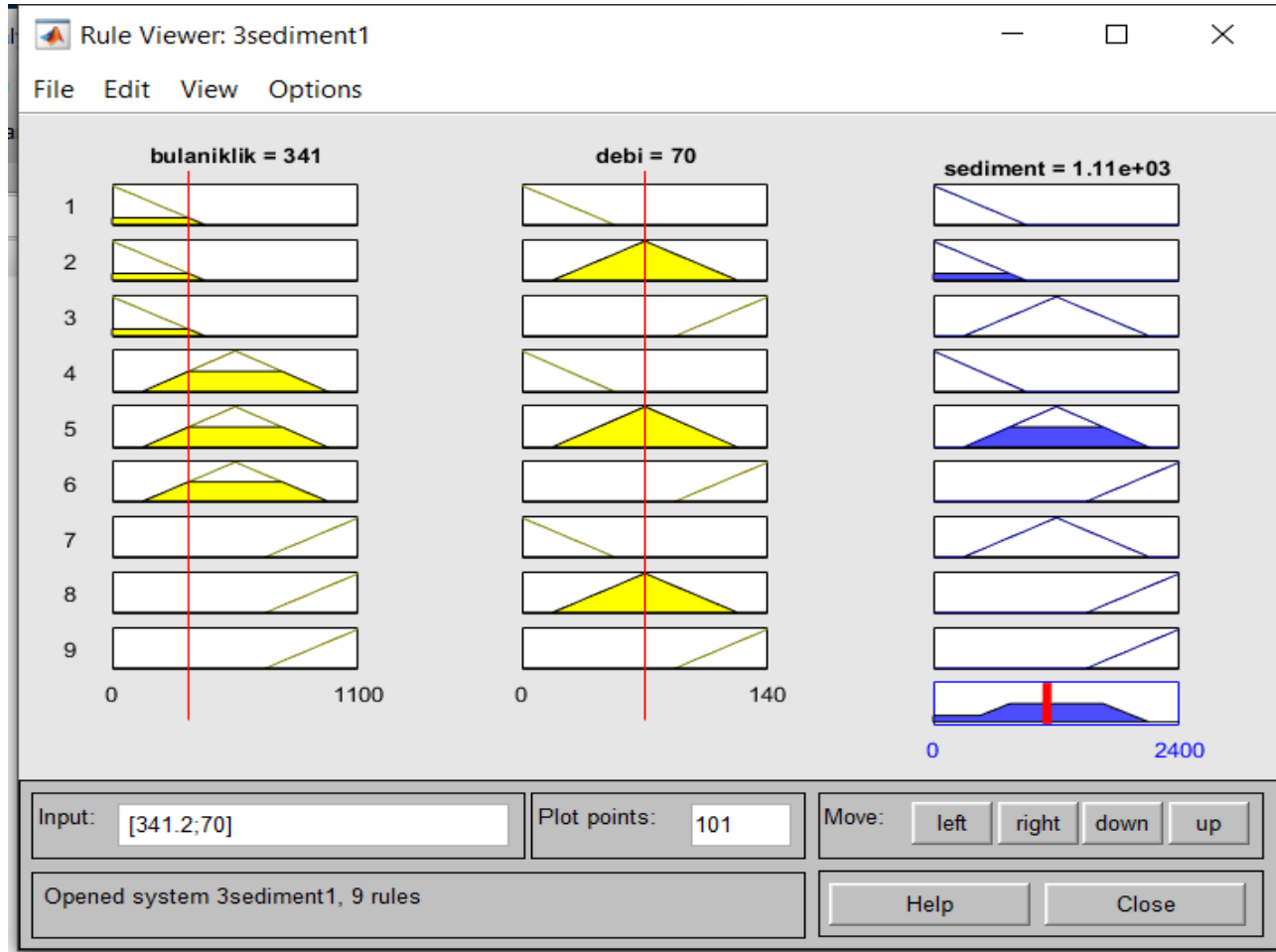


Şekil 7. Matlab'de Bulanık Mantık Kural Oluşturulması

(Şekil 7) ve (Tablo 2) de matlab programında bulanık mantığa göre oluşturulan üyelik fonksiyonları için üretilen kurallar gösterilmiştir. Bu kurallara göre analiz yapılmış olup çıkan sonuç (Şekil 8) de gösterilmiştir.

Tablo 2. Bulanık Mantık Modellemesi için Yazılan Kurallar

Kural 1	Eğer Bulanıklık 'B1' Ve Debi 'Q1' İse Katı madde Miktarı "S1" dir
Kural 2	Eğer Bulanıklık 'B1' Ve Debi 'Q2' İse Katı madde Miktarı "S1" dir
Kural 3	Eğer Bulanıklık 'B1' Ve Debi 'Q3' İse Katı madde Miktarı "S2" dir
Kural 4	Eğer Bulanıklık 'B2' Ve Debi 'Q1' İse Katı madde Miktarı "S1" dir
Kural 5	Eğer Bulanıklık 'B2' Ve Debi 'Q2' İse Katı madde Miktarı "S2" dir
Kural 6	Eğer Bulanıklık 'B2' Ve Debi 'Q3' İse Katı madde Miktarı "S3" dir
Kural 7	Eğer Bulanıklık 'B3' Ve Debi 'Q1' İse Katı madde Miktarı "S2" dir
Kural 8	Eğer Bulanıklık 'B3' Ve Debi 'Q2' İse Katı madde Miktarı "S3" dir
Kural 9	Eğer Bulanıklık 'B3' Ve Debi 'Q3' İse Katı madde Miktarı "S3" dir



Şekil 8. Bulanık SMRGT Modeline Ait Sediment Sonuçlarının Eldesi

Matlab programında oluşturulan üyelik fonksiyonları ve kuralların oluşturulması sonrasında sediment miktarının elde edilmesi (Şekil 8)'de gösterilmiştir. Bu grafikte bulanıklık 341 fnu ve debi 70 (m³/s) için sediment yani katı madde miktarı 1110 mg/L çıkmıştır.

ÇDR (Çoklu Doğrusal Regresyon)

Bağımlı bir değişkenin, bağımsız değişkenlerin hangisinden ne kadar fazla etkilendiğini ve değerini bulmak için kullanılan bir yöntemdir. ÇDR yönteminde, bağımlı değişken y, bağımsız değişkenler X₁, X₂ X_n, ile ifade edildiğinde aralarındaki bağıntı Denk. 10 da gösterilmektedir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (10)$$

Burada $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j, \dots, \beta_n$ bilinmeyenlerine regresyon katsayısı denir. Herhangi bir β_j regresyon katsayısı, diğer değişkenler sabit tutulduğunda yani diğer değişkenlerin etkisi kalktığında x_j de görülen bir birimlik değişmeye karşılık y değişkenindeki değişiklik değerini vermektedir. β_j (j = 1, 2, ..., n), genellikle kısmi regresyon katsayıları olarak adlandırılmaktadır. β_0 'a ise kesim noktası veya sabit denir ve tüm x_j değişken değerleri sıfır olduğunda bağımlı değişkenin aldığı değeri gösterir. ε ise hata terimidir.

MODEL SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Bulanık SMRGT ve Çoklu Doğrusal Regresyon yöntemleri kullanılarak Patapsco nehrinde katı madde miktarının tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle istatistiksel bir yaklaşımla karşılaştırılmıştır. Çalışılan istasyonda 2015-2018 yıllarına ait 3 yıllık toplam 915 tane veri kullanılmıştır. Çalışmada tüm verilerin %78'i eğitim %22'i Eğitim için 715 veri, test için 200 ölçüm verisi kullanılmıştır.

Bulanık SMRGT ve ÇDR uygulamalarda debi, bulanıklık veri olarak kullanılmıştır. Modellerin sonuçlarının değerlendirmesinde determinasyon katsayısı (R^2), ortalama karesel hataların karekökü (KKOH) ve mutlak ortalama hata (MOH) hesaplanmıştır. (Denk. 11-13)

$$R^2 = \left(\frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)}\sqrt{(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \right) \quad (11)$$

$$MOH = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |S_{ölçüm} - S_{tahmin}| \quad (12)$$

$$KKOH = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ölçüm} - S_{tahmin})^2} \quad (13)$$

ÇDR ve Bulanık SMRGT yöntemlerine ait elde edilen sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. ÇDR ve SMRGT Yöntemlerine Ait İstatistiksel Sonuçlar

Model İsimleri	Model Girdileri	R^2	MOH (mg/L)	KKOH (mg/L)
ÇDR	Q_t, B_t	0,83	55,47	143,65
Bulanık SMRGT	Q_t, B_t	0,91	43,91	129,73

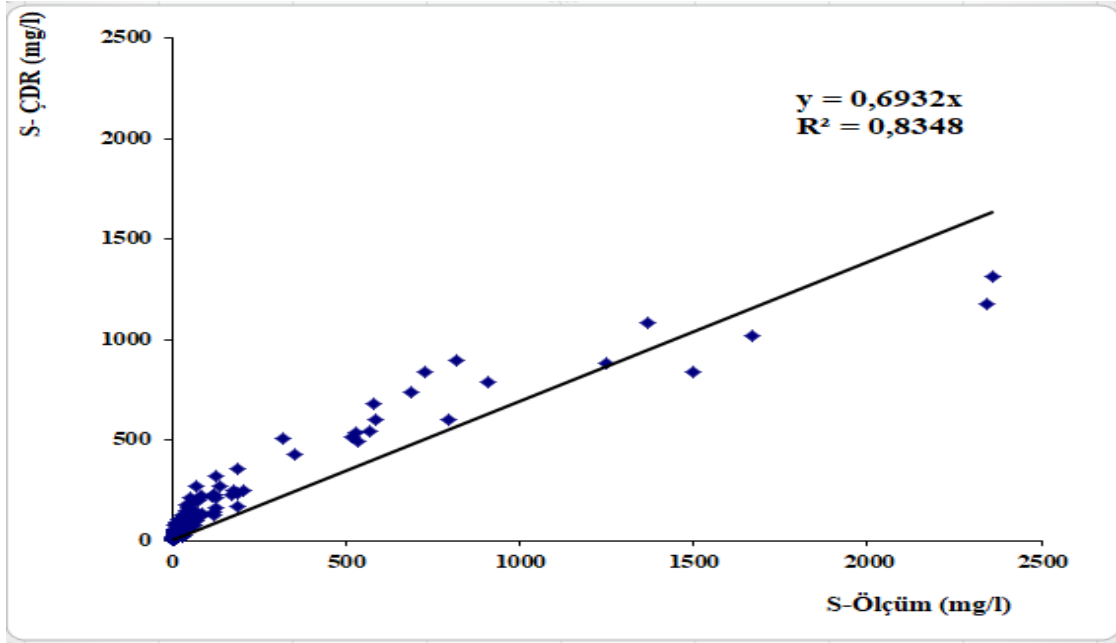
R^2 : Determinasyon katsayısı, **KKOH**: Ortalama karesel hataların karekökü, **MOH**: Mutlak ortalama hata.
Q(t): günlük Debi (m^3/s), B(t): günlük kirlilik (bulanıklık) miktarı (fnu)

Tablo 3 incelendiğinde Bulanık SMRGT modelinin, ÇDR modeline göre daha iyi sonuç verdiğini yüksek determinasyon katsayısı (0,91) ve düşük MOH (43,91) ve KKOH (129,73) değerlerinden görülmektedir.

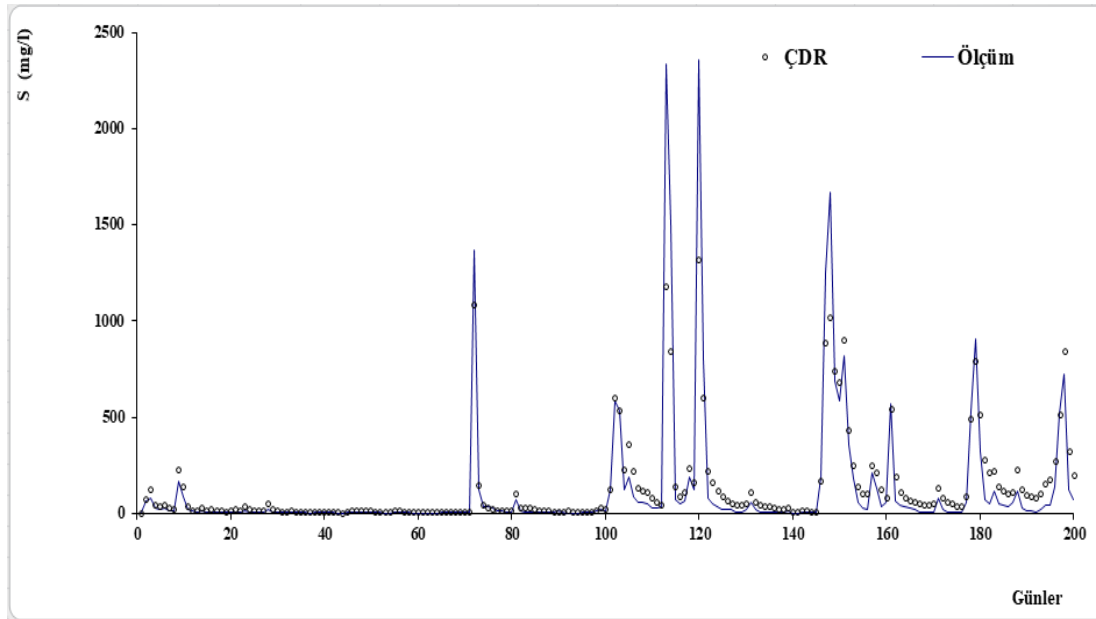
Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) Sonuçları

Bu çalışmada ÇDR model uygulamalarında günlük nehir debisi (Q), Bulanıklık miktarları (B), kullanılarak katı madde konsantrasyonu (S) tahmininde bulunulmuştur. Katı madde tahmininde kullanılan ÇDR denklemi Denk. 14’de verilmiştir.

$$S = 15,57 + 0,91 * B_t + 5,96 * Q_t \quad (14)$$



Şekil 9. Nehirde Katı Madde Tahmini Test Verileri için Ölçüm ve ÇDR Saçılım Grafiği

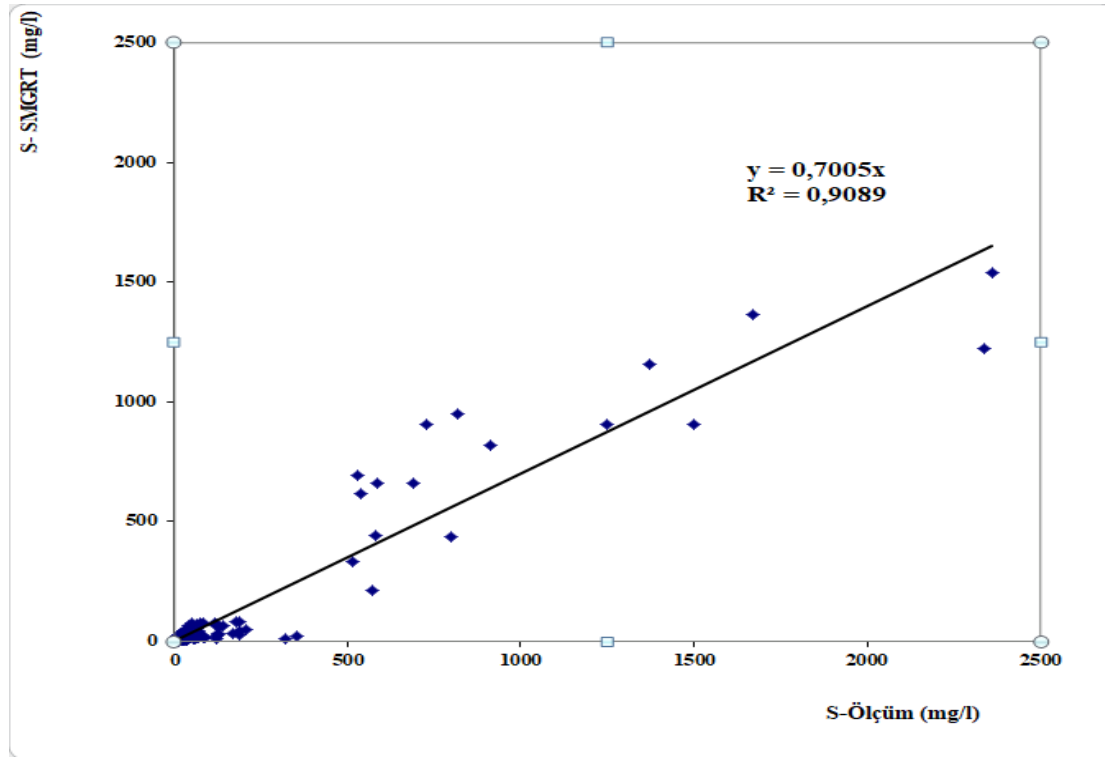


Şekil 10. Nehirde Katı Madde Tahmini Test Verileri için Ölçüm ve ÇDR Dağılım Grafiği

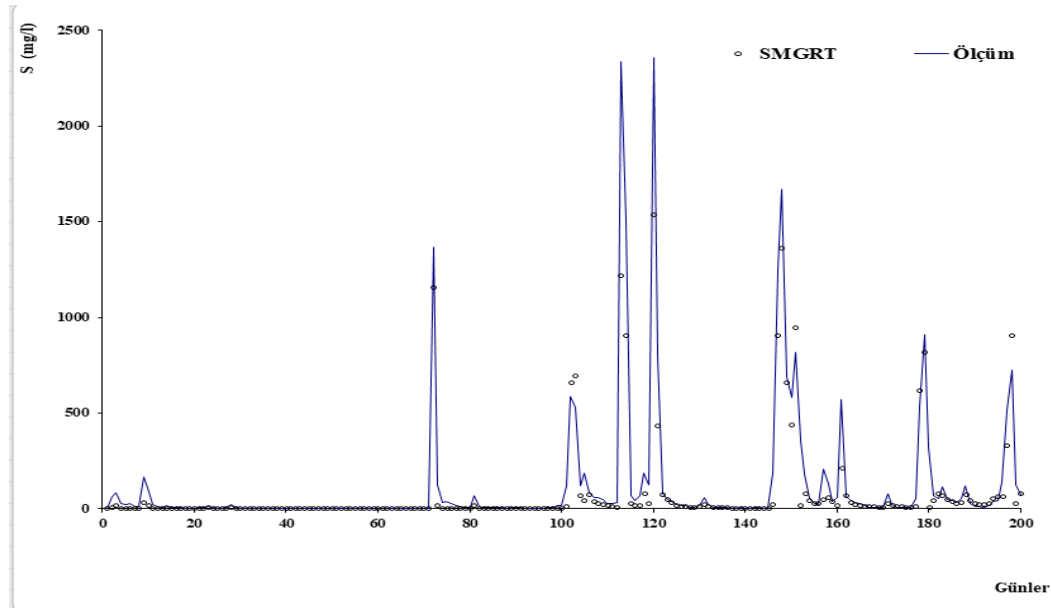
ÇDR yöntemi saçılım ve dağılım grafikleri sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. ÇDR için çizilen dağılım grafiği incelendiğinde tahmin değerleri ile ölçüm değerleri arasındaki büyük ölçüde uyumluluk görülmektedir. Tahmin ve ölçüm değerleri arasındaki uyumlu ilişki saçılım grafiğindeki yüksek determinasyon değeri ($R^2=0.8348$) ile de görülmektedir.

Bulanık SMRGT Sonuçları

Bu çalışmada Bulanık SMRGT model uygulamalarında günlük nehir debisi (Q), Bulanıklık miktarı (B), kullanılarak katı madde miktarı (S) tahmininde bulunulmuştur.



Şekil 11. Nehirde Katı Madde Tahmini Test Verileri için Ölçüm ve Bulanık SMRGT Saçılım Grafiği



Şekil 12. Nehirde Katı Madde Tahmini Test Verileri için Ölçüm ve Bulanık SMRGT Dağılım Grafiği

Bulanık SMRGT yöntemi saçılım ve dağılım grafikleri sırası ile Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Tablo 3’den ve Şekil 11 ve 12’den de görüldüğü gibi, Bulanık SMRGT modeli test verileri için uygulandığında 0,9089’ lük bir determinasyon ve oldukça düşük hata değerleri ile nehirlerdeki katı madde miktarını tahmininde başarılı olmuştur. Dağılım grafiği ölçüm değerleri ile Bulanık SMRGT modeli tahmin sonuçları arasındaki uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca Bulanık SMRGT ve ÇDR modelleri kendi içerisinde kıyaslandığında Bulanık SMRGT modelinin, ÇDR modeline göre daha iyi sonuç verdiğini yüksek determinasyon katsayısı (0,91) ve düşük MAE (43,91) ve KKOH (129,73) değerlerinden görülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, ABD’nin Catonsville yakınında Patapsco nehri civarında bir istasyonun 2015-2018 yılları arasındaki ortalama günlük debi (Q), bulanıklık (B), katı madde miktarı (S) verileri kullanılarak günlük ortalama katı madde

tahmin edilmiştir. Katı madde tahmini için SMRGT ve ÇDR modelleri kullanılmıştır. SMRGT ve ÇDR modellerinde toplam 915 verinin 715 verisi eğitim için 200 verisi de test için uygulanmıştır. Model ile elde edilen sonuçlar ölçüm değerleri ile karşılaştırılmıştır.

SMRGT ve ÇDR modellerinin performans değerlendirmesi için determinasyon katsayısı (R^2), mutlak ortalama hata (MOH) ve ortalama karesel hataların karekökü (KKOH) hesaplanmıştır. Katı madde tahmini için SMRGT modeli düşük MOH, MAE değerleri ve yüksek determinasyon katsayısı ile daha başarılı performans göstermiştir.

Çalışmada Bulanık SMRGT ve ÇDR modellerinin bölgesel bazda günlük katı madde tahmininde kullanılabileceği görülmüştür. Ancak bu çalışma kapsamında yapılan hata hesaplamaları ve determinasyon değerleri göz önüne alındığında Bulanık SMRGT yönteminin ÇDR modelinden daha doğru tahmin sonuçları verdiği anlaşılmıştır. Çalışmada kullanılan her iki metodunda tahmin sonuçları açısından kabul edilebilir düzeyde olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Bulanık mantık, Wikipedia (2021). <https://tr.wikipedia.org/>

Cansız, Ö. F., & Ünsalan, K. (2021). Türkiye demiryolları karbon ayak izinin temel bileşen analizi destekli yapay sinir ağları yöntemi ile tahmini. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 314-324.

Cherif, H. M., Khanchoul, K., Bouanani, A., & Terfous, A. (2017). Prediction of sediment yield at storm period in Northwest Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(9), 198.

Demirci, M., Unes, F., & Akoz, M. S. (2016). Determination of nearshore sandbar crest depth using neural network approach. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12), 236960.

Demirci, M., Unes, F., Kaya, Y. Z., Mamak, M., Tasar, B., & Ispir, E. (2017, March). Estimation of groundwater level using artificial neural networks: a case study of Hatay-Turkey. *In 10th International Conference Environmental Engineering*.

Demirci, M., Unes, F., Kaya, Y. Z., Tasar, B., & Varcin, H. (2018). Modeling of dam reservoir volume using adaptive neuro fuzzy method. *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, 145-152.

Firat, M., & Güngör, M. (2010). Monthly total sediment forecasting using adaptive neuro fuzzy inference system. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(2), 259-270.

Jeoloji Araştırmaları Kurumu, Amerika Birleşik Devletleri, USGS, <https://www.usgs.gov/>

Kisi, Ö. (2005). Daily river flow forecasting using artificial neural networks and auto-regressive models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 29(1), 9-20.

Kiş, Ö., Karahan, M. E., & Şen, Z. (2010). Nehirlerdeki askı maddesi miktarının bulanık mantık ile modellenmesi. *İtü Dergisi/d*, 2(3).

Kisi, O. & Zounemat-Kermani, M. (2016). Nöro-bulanık gömülü bulanık c-araç kümeleme tekniğini kullanarak askıya alınmış sediman modellemesi. *Su kaynakları yönetimi*, 30 (11), 3979-3994.

Mathworks, (2016). MATLAB: R2016a. Mathworks Inc, Natick.

Mianaei, S. J., & Keshavarzi, A. R. (2010). Prediction of riverine suspended sediment discharge using fuzzy logic algorithms, and some implications for estuarine settings. *Geo-Marine Letters*, 30(1), 35-45.

Mirbagheri, S. A., Nourani, V., Rajaei, T., & Alikhani, A. (2010). Neuro-fuzzy models employing wavelet analysis for suspended sediment concentration prediction in rivers. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(7), 1175-1189.

Olyaie, E., Banejad, H., Chau, K. W., & Melesse, A. M. (2015). A comparison of various artificial intelligence approaches performance for estimating suspended sediment load of river systems: a case study in United States. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(4), 1-22.

Rahman, S. A., & Chakrabarty, D. (2020). Sediment transport modelling in an alluvial river with artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 588, 125056.

- Rajae, T., Mirbagheri, S. A., Zounemat-Kermani, M., & Nourani, V. (2009). Daily suspended sediment concentration simulation using ANN and neuro-fuzzy models. *Science of the Total Environment*, 407(17), 4916-4927.
- Rajae, T., & Jafari, H. (2020). Two decades on the artificial intelligence models advancement for modeling river sediment concentration: State-of-the-art. *Journal of Hydrology*, 588, 125011.
- Riahi-Madvar, H., & Seifi, A. (2018). Uncertainty analysis in bed load transport prediction of gravel bed rivers by ANN and ANFIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), 1-20.
- Shamaei, E., & Kaedi, M. (2016). Suspended sediment concentration estimation by stacking the genetic programming and neuro-fuzzy predictions. *Applied Soft Computing*, 45, 187-196.
- Toprak, Z. F. (2009). Flow discharge modeling in open canals using a new fuzzy modeling technique (SMRGT). *CLEAN–Soil, Air, Water*, 37(9), 742-752.
- Toprak, A., Aykaç, Z., Toprak, Z.F. (2017). Bulanık SMRGT yönteminin pratik uygulamaları. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*. 8(1), 123-132
- Üneş, F., Doğan, S., Taşar, B., Kaya, Y., & Demirci, M. (2018). The evaluation and comparison of daily reference evapotranspiration with ann and empirical methods. *Natural and Engineering Sciences*, 3(3), 54-64.
- Üneş, F., Demirci, M., Taşar, B., Kaya, Y.Z., & Varçin, H. (2019). Modeling of dam reservoir volume using generalized regression neural network, support vector machines and m5 decision tree models. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(3), 7043-7055.
- Üneş, F., Karaeminoğulları, A. B., & Taşar, B. (2020). Forecasting of river sediment amount using machine model. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(1), 9-15.
- Vafakhah, M. (2013). Comparison of cokriging and adaptive neuro-fuzzy inference system models for suspended sediment load forecasting. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8), 3003-3018.
- Zadeh, L. A. (1965). Information and control. Fuzzy sets, 8(3), 338-353.
- Zounemat-Kermani, M., Mahdavi-Meymand, A., Alizamir, M., Adarsh, S., & Yaseen, Z. M. (2020). On the complexities of sediment load modeling using integrative machine learning: Application of the great river of Loíza in Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 585, 124759.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi: 19.08.2021
Kabul Tarihi: 23.11.2021

Received Date : 19.08.2021
Accepted Date : 23.11.2021

YUMURTA KABUĞUNUN ODUN PLASTİK KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANIMI

THE USAGE OF THE EGG SHELL IN WOOD PLASTIC COMPOSITE PRODUCTION

Ferhat ÖZDEMİR¹* (ORCID: 0000-0002-2282-1884)
Ali Osman ÖZĞAN² (ORCID: 0000-0001-9646-1984)

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
²İğdır Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, İğdir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ferhat ÖZDEMİR, ferhatozd@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmanın amacı odun plastik kompozit (OPK) üretiminde dolgu maddesi olarak yumurta kabuğu kullanımının etkisi belirlemek olacaktır. OPK üretiminde polipropilen, kızılçam odun unu, yumurta kabuğu ve Maleik Anhidrit Polipropilen (MAPP) kullanılmıştır. Tek vidalı ekstruder kullanılarak elde edilen karışımdan enjeksiyon kalıplama yöntemi ile test numuneleri üretilmiştir.

Numunelerin fiziksel (kalınlık şişme, su alma) ve bazı mekanik özellikleri (eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve darbe direnci) incelenmiştir. Elde edilen verilere göre yumurta kabuğu kullanımına bağlı olarak kompozitlerin fiziksel özelliklerinin olumsuz etkilendiği tespit edilirken, mekanik özelliklerde ise yapılan testlere göre bu durumun farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yumurta kabuğu, polipropilen, kızılçam, kompozit.

ABSTRACT

The aim of this study will be to determine the effect of using egg shell as filler in wood plastic composite (WPC) production. Polypropylene, red pine wood flour, egg shell and Maleic Anhydride Polypropylene (MAPP) were used in the production of WPC. Test samples were produced by injection molding method from the mixture obtained by using a single screw extruder.

The physical (thickness swelling, water absorption) and some mechanical properties (bending resistance, modulus of elasticity in bending and impact resistance) of the samples were investigated. According to the data obtained, it was determined that the physical properties of the composites were negatively affected due to the use of egg shells, while it was determined that this situation differed according to the tests performed in the mechanical properties.

Keywords: Eggshell, polypropylene, red pine, composite

GİRİŞ

İnsanlar yaşamlarını sürürken kullandıkları malzemeleri seçerken işlerini daha hızlı yapabilmesini sağlayacak, güvenli, dayanıklı, ergonomik olmasının yanı sıra hafifliği, iletkenliği ile ekonomik olması gibi birçok özelliğin bir arada olmasını istemektedir. Bu malzemelerin geliştirilmesi için dezavantajlarının azaltılması avantajlarının ise

To Cite: ÖZDEMİR, F., & ÖZĞAN, A. O., (2021). YUMURTA KABUĞUNUN ODUN PLASTİK KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANIMI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 308-318.

artırılması çalışmaları günümüzde hızla devam etmektedir. Bu çalışmalar ile kullanım alanına bağlı olarak uygun kompozit malzeme üretimi hedeflenmektedir.

İlk kompozit malzemeye saman ve çamur karışımı örnek olarak gösterilebilir. Bugün ise selülozik maddeler, mineral maddeler ve metalleri içeren birçok kompozit üretilmektedir (Arkaz, 2016).

İşletmelerin en temel hedeflerinden bir tanesi düşük maliyettir. Günümüzde maliyetlerin azaltılabilmesi için atık kullanımının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle bu atıkların kompozit malzemelerde kullanımı önem kazanmaktadır. Odun plastik kompozit üretiminde (OPK) ülkemizde yaygın olan kızılçam odununu kullanılmaktadır. Kızılçam temel olarak reçine üretiminde kullanıldığı gibi tel-maden direği, ahşap yapı malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca yat- tekne yapımı, ambalaj sandığı, kâğıt ve selüloz sanayiinde kullanım alanı bulmaktadır (Göker vd., 2000). OPK üretiminde ise odununu ya da lif olarak kullanılmaktadır (Rowell, 2006). Ancak OPK üretiminde ekstruder içerisinde odununu ve plastik matrisi arasında sürtünme, basınç- sıcaklık yükselmesi sebebiyle yüzey uyumsuzlukları ve bağlanma problemlerinin olumsuz etkileri muhtemel problemler olarak karşımıza çıkabilmektedir (Mengeloğlu & Karakuş 2008). Odun plastik kompozit üretiminde poliolefin esaslı uyumsuzluk gidericileri maleik anhidrit ile Kraft edilmiş polipropilen (MAPP) ve polietilen (MAPE) kullanımı birçok çalışmada değerlendirilmiştir. (Li, & Matuana, 2003; Özdemir vd., 2018; Tufan vd., 2015).

Ülkemizdeki yeteri kadar geri dönüşüm malzemesi olarak düşünülmeyen en önemli atıklardan bir tanesi de yumurta kabuğudur. Yumurta kabuğu sadece tavuk değil ayrıca hindi, kaz ve ördek gibi birçok kümes hayvanlarından da elde edilebilmektedir. Türkiye de yaklaşık olarak 109 milyon tavuk bulunmaktadır (TUİK, 2017). Türkiye’ de sadece 21 milyar civarında tavuk yumurta üretimi bulunmaktadır. Kişi başı tüketim ise 214 adettir (URL-1). Yumurtanın yaklaşık olarak %11’i kabuk, %59’u yumurta akı, %30’u sarı kısmından oluşmaktadır. Kabuk, yumurtanın dış çevre ile gaz ve nem alışverişini gerçekleştiren gözeneklere sahip olan çok ince bir yapıdan oluşmaktadır (Erol, 1994). Yumurta kabuğunun büyük bir bölümünü kalsiyum karbonat (%94-97) ile fosfor (0,3) ve magnezyum (0,2) oluşturmaktadır. Son zamanlarda küresel ısınmanın etkisi ve kaynakların sınırlılıkları nedeniyle hem atıkların geri dönüşümü hem de hammadde kullanımını azaltılması önem kazanmıştır. Bu kadar ciddi miktardaki yumurta kabuğu atığının farklı alanlarda dolgu maddesi olarak kullanılmasını amaçlayan çalışmalar yapılmış olduğu görülmektedir.

Günümüzde Yumurta kabuğu atığını potansiyel olarak kullanılması yönünde çalışmalar gittikçe artmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalara örnekler şu şekilde verilebilir. İnorganik bir madde olan ve ülkemizde geri dönüşümü henüz yapılmayan içerisinde (%98) kalsiyum karbonat olan atık yumurta kabuklarından kalsiyum karbonat (ECC) üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu dolgu maddesi Ofis kâğıdı üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır (Tutuş, A. vd., 2020). Yumurta kabuğu katkılı harçların mekanik Özellikleri çalışmasında öğütülmüş atık yumurta kabuğunun yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği ve dayanım performansını değerlendirmiştir. Bu kapsamda belirli oranlarda inşaat kumunun yerine yumurta kabuğu eklemiş, çimento ve su kullanılarak harçlar üretilmiştir. Atık yumurta kabuğu katkılı harç numunelerinin, ultra ses geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin azalma göstermektedir. (Akyıldız A., 2018). Yapılan bir diğer çalışmada atık pil Kömürü ve yumurta kabuğunun radyasyon tutucu materyal olarak üretimde Kullanılması araştırılmıştır. (Binici vd., 2013) Yumurta kabuğu atığının OPK üretiminde kullanımının araştırılması düşünülmüştür.

Ülkemizde ciddi bir atık olan yumurta kabuğunun değerlendirilmesi için bu çalışmada OPK üretiminde dolgu maddesi olarak yumurta kabuğu kullanımının etkisinin araştırılması ve en uygun kullanım miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada kullanılan odununu Kahramanmaraş ili kereste atölyelerinden elde edilen kızılçam talaşlarından elde edilmiştir. Polimer matris olarak PETKİM firmasından (İzmir) temin edilen Polipropilen (PP) kullanılmıştır. MAPP uyumlaştırıcı ise Clariant International firmasından temin edilerek kullanılmıştır. Dolgu maddesi olarak kullanılan yumurta kabuğu atığı da yaşam alanlarında kullanılan yumurta atıklarından elde edilmiştir.

Metot

Kereste atölyelerinden elde edilen Kızılçam talaşları kompozit malzeme içerisinde kullanılabilmesi için odun unu haline Willey değirmeni kullanılarak öğütülmüştür. Sarsak elekte elenmiştir ve 60 mesh'lik elekten geçip 80 mesh'lik eleğin üzerinde kalan odun unu kullanılmıştır. Yumurta kabuğu ise yıkanmış, etüvde 12 saat boyunca %1-3 rutubet düzeyine ulaşıncaya kadar 103 ± 2 °C'de kurutulduktan sonra Willey değirmeninde öğütülerek 200 mesh boyutlarında toz haline getirilmiştir. Farklı oranlarda polipropilen (PP), yumurta kabuğu, kızılçam odun unu ve Maleik Anhidrit Polipropilen (MAPP) kullanılarak karışım elde edilmiştir. Karışım tek vidalı ekstruder da 90-175 °C de karıştırılmış, ekstruder makinesinden çıkan sıcak malzeme soğuk su içinde soğutulmuştur. Soğutulan malzemeden su süzülerek uzaklaştırılmıştır. Süzülen malzeme kırıcı yardımıyla pelet haline getirilmiştir. Kırıcıdan çıkan pelet malzeme etüvde 12 saat boyunca %1-3 rutubet düzeyine ulaşıncaya kadar 103 ± 2 °C'de kurutulmuştur. Rutubetleri alınan pelet halindeki malzeme, 180-190-200 °C sıcaklık aralığında enjeksiyon kalıplama makinesinde ASTM standartlarına göre ilgili test örnekleri boyutlarında kalıplanmıştır. Test numuneleri hazırlanırken, enjeksiyon makine ayarı enjeksiyon hızı 80 mm/sn vida hızı 40 dev/dk ve enjeksiyon basıncı 100 bar olarak ayarlanmıştır. Deney numuneleri üretimi Tablo 1'de verilen üretim reçetesine göre gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. OPK Üretim Reçetesi

Levha Kod	Odun Unu (%)	PP (%)	Yumurta kabuğu (%)	MAPP (%)
A	30	70	0	0
B	30	65	5	0
C	30	60	10	0
D	30	55	15	0
E	30	50	20	0
F	30	67	0	3
G	30	62	5	3
H	30	57	10	3
I	30	52	15	3
J	30	47	20	3
K	0	70	30	0

Enjeksiyon yardımıyla kızılçam odun unu, PP, yumurta kabuğu ve MAPP ilave edilerek test numuneleri üretilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Enjeksiyon İle Üretilen Odun Plastik Kompozit Numuneler

Test numunelerinin fiziksel testleri için kalınlık şişme ile su alma (ASTM D 570), mekanik testleri için eğilme ve eğilmede elastikiyet modülü direnci testi (ASTM D 790) ve darbe direnci testi (ASTM D 256) ilgili standartlara bağlı kalınarak yapılmıştır.

Morfolojik özellikler

Yumurta kabuğu katkılı odun plastik kompozit numunelerin morfolojik özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Electron Microscope) ile incelenmiştir.

KSU ÜSKİM laboratuvarında bulunan Neo Scope marka Scanning Electron Microscope (SEM) cihazı kullanılarak numunelerdeki polipropilen, odun unu ve yumurta kabuğu dağılımının görüntüsü elde edilmiştir. Üretilen numune yüzeylerinde ortaya çıkacak yansımaları gidermek için yüzeyler 120 sn boyunca 10 mA akımda altın tozu ile kaplama işlemi yapılmış ve numunelerden SEM fotoları elde edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Fiziksel özellikler

A-Su alma oranı

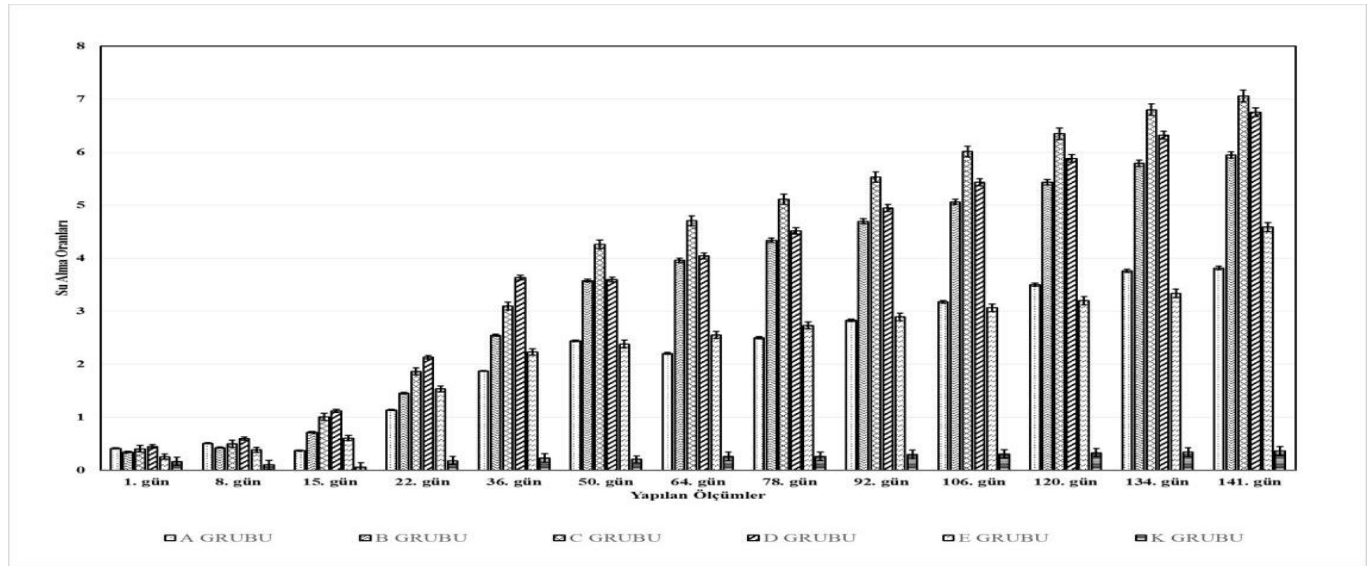
Kızılçam odun unu, PP, MAPP ve yumurta kabuğu ile üretilen odun plastik kompozit malzemelerin gün sayısına bağlı olarak su alma oranı ve standart sapmaları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. OPK Levhaların Su Alma Oranları

Levha Kodu		Su Alma Oranları (%)												
		1. gün	8. gün	15. gün	22. gün	36. gün	50. gün	64. gün	78. gün	92. gün	106. gün	120. gün	134. gün	141. gün
A	Ort.	0,41 (0,01)*	0,51 (0,01)	0,77 (0,01)	1,14 (0,01)	1,87 (0,01)	2,44 (0,02)	2,47 (0,02)	2,50 (0,02)	2,83 (0,02)	3,17 (0,03)	3,50 (0,03)	3,76 (0,04)	3,82 (0,04)
B	Ort.	0,35 (0,01)	0,43 (0,01)	0,72 (0,01)	1,45 (0,02)	2,55 (0,03)	3,58 (0,04)	3,96 (0,04)	4,34 (0,05)	4,70 (0,05)	5,06 (0,05)	5,43 (0,06)	5,79 (0,06)	5,95 (0,06)
C	Ort.	0,35 (0,01)	0,43 (0,01)	0,72 (0,01)	1,45 (0,02)	2,55 (0,03)	3,58 (0,04)	3,96 (0,04)	4,34 (0,05)	4,70 (0,05)	5,06 (0,05)	5,43 (0,06)	5,79 (0,06)	5,95 (0,06)
D	Ort.	0,45 (0,03)	0,60 (0,03)	1,12 (0,03)	2,13 (0,04)	3,13 (0,04)	3,60 (0,06)	4,04 (0,06)	4,51 (0,06)	4,95 (0,07)	5,43 (0,07)	5,88 (0,08)	6,32 (0,08)	6,75 (0,08)
E	Ort.	0,26 (0,05)	0,39 (0,05)	0,61 (0,05)	1,53 (0,06)	2,14 (0,08)	2,38 (0,07)	2,55 (0,07)	2,73 (0,07)	2,89 (0,07)	3,06 (0,08)	3,20 (0,08)	3,33 (0,09)	4,59 (0,09)
F	Ort.	0,19 (0,01)	0,22 (0,01)	0,33 (0,01)	0,64 (0,01)	0,90 (0,01)	1,03 (0,01)	1,26 (0,01)	1,44 (0,01)	1,60 (0,01)	1,73 (0,01)	1,89 (0,01)	2,00 (0,01)	2,06 (0,01)
G	Ort.	0,21 (0,03)	0,33 (0,03)	0,53 (0,03)	0,78 (0,03)	1,19 (0,04)	1,47 (0,04)	1,59 (0,04)	1,83 (0,04)	2,12 (0,05)	2,40 (0,05)	2,62 (0,05)	2,86 (0,06)	3,03 (0,06)
H	Ort.	0,36 (0,02)	0,36 (0,01)	0,59 (0,02)	0,66 (0,02)	1,35 (0,02)	1,67 (0,01)	1,98 (0,01)	2,24 (0,01)	2,53 (0,01)	2,78 (0,02)	3,02 (0,03)	3,33 (0,04)	3,71 (0,05)
I	Ort.	0,35 (0,03)	0,41 (0,03)	0,78 (0,04)	1,14 (0,04)	2,20 (0,05)	3,15 (0,06)	3,78 (0,07)	4,26 (0,06)	4,67 (0,05)	5,10 (0,06)	5,31 (0,07)	5,70 (0,08)	6,27 (0,09)
J	Ort.	0,39 (0,06)	0,56 (0,06)	0,97 (0,06)	1,74 (0,07)	2,82 (0,08)	4,40 (0,10)	5,02 (0,10)	5,31 (0,10)	5,53 (0,10)	6,21 (0,09)	6,38 (0,10)	6,60 (0,12)	6,80 (0,13)
K	Ort.	0,16 (0,08)	0,17 (0,08)	0,18 (0,08)	0,18 (0,08)	0,23 (0,07)	0,21 (0,08)	0,26 (0,08)	0,26 (0,08)	0,30 (0,08)	0,31 (0,08)	0,33 (0,08)	0,35 (0,08)	0,36 (0,08)

* Standart sapma değerleri parantez içerisinde verilmiştir.

Tablo 2’de su alma oranları ve standart sapmaları verilen kızılçam odun unu, yumurta kabuğu, PP ile üretilen A, B, C, D, E ve K kompozit gruplarının su alma oranları değerleri grafiği Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2. A, B,C, D,E ve K Kompozit Grupların Su Alma Oranı Grafiği

OPK malzemede dolgu maddesi olarak kullanılan yumurta kabuğu ve odunsu materyal kullanım miktarının su alma oranı üzerinde etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre MAPP kullanarak elde edilen karışımlarla üretilen kompozit malzemelerin (F grubu) MAPP kullanılmayan (A grubu) kompozit numunelere kıyasla su alma oranının daha az olduğu tespit edilmiştir. Ancak yumurta kabuğu ve polipropilen ile üretilen K grubu kompozit malzemenin su alma oranı en az olan grup olarak belirlenmiştir. MAPP kullanılmadan üretilen A, B, C, D, E ve K kompozit gruplar içerisinde 141 gün sonunda kontrol (A) numunesi su alma oranı %3,82 iken; Yumurta kabuğu kullanımının en fazla (%20) olduğu E grubu OPK' da su alma oranı %4,59'dir. MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I ve J kompozit grupları incelendiğinde ise kontrol için üretilen F grubu su alma oranı %2,06 iken, yumurta kabuğu eklentisinin en fazla (%20) olduğu J grubu su alma oranı %6,80'dir. Odun plastik kompozit malzemelerde plastik matrise göre dolgu maddesi artığında su alma oranının arttığı görülmekle birlikte su içerisinde bırakılan E ve J grubu kompozit malzemelerde zamanla su içerisinde çok az miktarda ayrılarak çözünme gözlemlenmiştir. PP ve odununu kullanılan ancak MAPP kullanılmayan A grubu (%3,82) numunelere göre aynı içeriğe sahip F grubu (%2,06) MAPP kullanılan numunelerde su alma oranının azaldığı belirlenmiştir. A ve F kontrol numuneleri incelendiğinde MAPP kullanımının su alma oranı üzerine olumlu etki yaptığı belirlenmiştir.

Odun unu gibi lignoselülozik malzemelerin yapısındaki hidroksil grupları hidrofilik yapıdadır (Najafi vd. 2008). Ancak hidrofobik yapıdaki plastik levhaların su alma oranı, odun ve odun esaslı levha ve diğer lignoselülozik materyallere göre daha düşüktür (Wang & Morrell, 2004, Kylosov, 2007). Plastik sınırlardan su geçişleri mümkün olmadığı için su kompozit malzemelerde lignoselülozik materyalin bulunduğu bölgelerde absorbe edilir. Bu nedenle lignoselülozik dolgu miktarı kullanımı arttıkça levhaların su alma oranları da artmaktadır (Adhikary vd., 2008; Ghasemi & Kord, 2009; Kord, 2011'a). Test grupları karışımı hazırlanırken odun unu sabit kalırken matris materyali olan PP eklenen yumurta kabuğu kadar azalmaktadır. Çalışmada yumurta kabuğu eklentisi bünyesinde bulundurduğu gözenekler nedeniyle malzeme içerisine köprü vazifesi gördüğü suyu OPK malzemenin içerisine ilettiği düşünülmüştür. Lignoselülozik dolgu içermeyen PP ve yumurta kabuğu içeriğine sahip K grubu (%0,36) numunelerde ise su alma oranı en düşük grup olarak tespit edilmiştir. K grubu su alma oranı en düşük olması, yumurta kabuğu gözeneklerini su ile doldurduğu ve kapasitesi dolması sonrasında su almadığı düşünülmüştür. K grubu hidrofilik lignoselülozik dolgu içermemesi elde edilen sonuçları ile bu bakımdan literatüre uygun olduğu görülmektedir.

B- Kalınlık artış oranı

Kızılçam odun unu, PP, yumurta kabuğu ve MAPP ile hazırlanan odun plastik kompozit gruplarına ait tespit edilen kalınlık artış oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. OPK Levhaların Kalınlık Artış Miktarı (%)

Levha Kodu		Kalınlık Artış Oranları (%)												
		1. gün	8. gün	15. gün	22. gün	36. gün	50. gün	64. gün	78. gün	92. gün	106. gün	120. gün	134. gün	141. gün
A	Ort.	0,16 (0,03)*	0,47 (0,03)	0,82 (0,02)	1,14 (0,01)	1,43 (0,01)	1,73 (0,01)	1,73 (0,01)	1,73 (0,01)	1,77 (0,01)	1,77 (0,01)	1,89 (0,01)	1,96 (0,01)	1,96 (0,01)
B	Ort.	0,20 (0,02)	0,31 (0,02)	0,55 (0,02)	0,86 (0,02)	1,14 (0,03)	1,45 (0,02)	1,65 (0,02)	1,84 (0,03)	2,04 (0,03)	2,16 (0,03)	2,23 (0,03)	2,43 (0,04)	2,51 (0,03)
C	Ort.	0,36 (0,02)	0,63 (0,02)	0,95 (0,02)	1,23 (0,03)	1,46 (0,02)	1,70 (0,02)	1,74 (0,02)	1,86 (0,02)	1,98 (0,02)	2,10 (0,02)	2,18 (0,02)	2,26 (0,02)	2,34 (0,02)
D	Ort.	0,28 (0,03)	0,51 (0,04)	0,83 (0,04)	1,06 (0,04)	1,46 (0,04)	1,81 (0,04)	1,85 (0,04)	2,01 (0,04)	2,05 (0,04)	2,16 (0,04)	2,24 (0,04)	2,40 (0,04)	2,44 (0,04)
E	Ort.	0,16 (0,03)	0,27 (0,03)	0,47 (0,03)	0,67 (0,03)	0,90 (0,03)	1,21 (0,02)	1,29 (0,02)	1,37 (0,03)	1,45 (0,03)	1,53 (0,03)	1,64 (0,03)	1,68 (0,03)	1,68 (0,03)
F	Ort.	0,08 (0,03)	0,08 (0,03)	0,24 (0,03)	0,51 (0,04)	0,66 (0,05)	0,75 (0,04)	0,87 (0,04)	0,99 (0,04)	1,03 (0,04)	1,07 (0,04)	1,15 (0,04)	1,18 (0,04)	1,22 (0,04)
G	Ort.	0,04 (0,02)	0,12 (0,02)	0,20 (0,02)	0,24 (0,02)	0,36 (0,01)	0,51 (0,02)	0,59 (0,02)	0,63 (0,02)	0,71 (0,02)	0,83 (0,02)	0,91 (0,02)	0,99 (0,02)	1,03 (0,02)
H	Ort.	0,08 (0,03)	0,08 (0,03)	0,20 (0,02)	0,35 (0,02)	0,39 (0,02)	0,67 (0,02)	0,71 (0,02)	0,87 (0,02)	0,95 (0,02)	1,03 (0,03)	1,18 (0,03)	1,34 (0,04)	1,42 (0,04)
I	Ort.	0,12 (0,02)	0,12 (0,02)	0,28 (0,02)	0,35 (0,02)	0,59 (0,03)	0,75 (0,03)	0,91 (0,03)	0,94 (0,03)	0,98 (0,03)	1,02 (0,03)	1,02 (0,03)	1,14 (0,04)	1,22 (0,04)
J	Ort.	0,08 (0,05)	0,08 (0,05)	0,15 (0,05)	0,31 (0,05)	0,50 (0,05)	0,74 (0,05)	0,85 (0,05)	0,89 (0,05)	1,01 (0,05)	1,20 (0,05)	1,28 (0,05)	1,28 (0,05)	1,32 (0,05)

* Standart sapma değerleri parantez içerisinde verilmiştir.

Üretilen odun plastik kompozit içerisinde dolgu maddesi olarak kullanılan yumurta kabuğu miktarı ve odunsu materyal kullanımın kalınlık artış oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MAPP kullanılan karışımlarla üretilen kompozit malzemelerin MAPP kullanılmayan kompozit numunelere kıyasla kalınlık artış oranının su alma oranında olduğu gibi daha az olduğu tespit edilmiştir. MAPP kullanılmadan üretilen A, B, C, D ve E grubu kompozit gruplar içerisinde 141 gün sonunda kontrol (A) numunesinin kalınlık artış oranı %1,96 iken; yumurta kabuğu katkısının en fazla olduğu E grubu (%20) kompozit malzemelerde su alma oranı %1,68'dir. MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I ve J kompozit grupları incelendiğinde ise kontrol için üretilen F grubu kalınlık artış oranı %1,22 iken, yumurta kabuğu ilavesinin en fazla olduğu J grubu (%20) kalınlık artış oranı %1,32'dir. MAPP kullanım etkisinin su alma test sonuçlarına paralel olarak kalınlık şişme özelliğini azalttığı belirlenmiştir. Plastik matris materyal oranı aynı olmasına rağmen sadece odun unu içeren A grubu ve sadece yumurta kabuğu içeren K grubu kıyaslandığında su alma oranına paralel olarak K grubunun en az kalınlık artış oranı olduğu görülmektedir. Lif oranının artmasına bağlı olarak su alma ve kalınlık artış oranının arttığı belirlenmiştir. (Shakeri ve Ghasemian 2010). 141 gün süre incelendiğinde su alma ve kalınlık artış değerlerinin günlere bağlı olarak da değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Örneğin 92 ve 106 gün sonunda elde edilen verilere göre yumurta kabuğu kullanım oranının %20 olduğu J grubu numunelerde kalınlık artışı en fazla iken 141 sonunda ise %10 kullanım oranına sahip numunelere göre kalınlık artışının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Odun plastik kompozit içerisindeki plastik matrise göre dolgu maddesi artığında su alma oranının arttığı görülmekle birlikte su içerisinde bırakılan E ve J grubu kompozit malzemelerde zamanla su içerisinde çok az miktarda ayrışarak çözünme olduğu düşünülmektedir. Odun lifi tipleri ve birleştirme tekniklerinin PP katkılı kompozit malzemelerin üretiminde polimer matrisi ve odun arasında uyumsuzluğu gidermek için MAPP kullanılmıştır. MAPP kullanılması hidrofobik özelliği artırmıştır (Bledzki vd., 2005).

Mekanik Özellikler

Odun unu, polipropilen (PP), yumurta kabuğu ve MAPP karıştırılması sonucunda elde edilen odun plastik kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde yumurta kabuğu katkısının etkisi Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. Üretilen Odun Plastik Kompozit Malzemelerin Eğilme Direnci, Eğilmede Elastikiyet Modülü ve Darbe Direnci Değerleri

Numune Grubu	Yoğunluk (g/cm ³)	Eğilme Direnci (N/mm ²)	Eğilmede Elastikiyet Modülü (N/mm ²)	Darbe Direnci (N/mm ²)
A	0,95 (0,01)	42,9 (0,51)	2210 (23,7)	3,32 (0,37)
B	1,00 (0,01)	41,9 (0,75)	2318 (44,9)	2,74 (0,10)
C	1,02 (0,02)	42,0 (0,28)	2470 (18,6)	3,03 (0,29)
D	1,07 (0,00)	41,1 (0,50)	2458 (37,1)	2,97 (0,26)
E	1,07 (0,03)	39,9 (0,72)	2281 (95,8)	3,00 (0,25)
F	0,96 (0,01)	53,0 (0,72)	2377 (40,3)	3,07 (0,35)
G	1,00 (0,01)	51,8 (0,31)	2492 (61,1)	3,31 (0,49)
H	1,03 (0,01)	50,7 (0,73)	2613 (36,1)	2,97 (0,24)
I	1,06 (0,01)	48,6 (0,52)	2712 (87,9)	3,00 (0,75)
J	1,10 (0,02)	47,6 (1,10)	2912 (126,7)	2,94 (0,27)
K	1,01 (0,02)	40,1 (0,37)	1529 (43,5)	2,97 (0,68)

A- Eğilme direnci

Kızılçam odun unu, yumurta kabuğu, PP ve MAPP ile üretilen kompozit malzemelerin eğilme direnci ölçüm değerleri ve standart sapmaları Tablo 4' de görülmektedir. Eğilme direnci değerlerinin MAPP kullanılmadan üretilen A, B, C, D ve E grupları 42.9- 39.9 N/mm², MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I ve J gruplarında ise 53.0- 47.6 N/mm² arasındadır. A ve K gruplarının eğilme direnci sırasıyla 42.9 N/mm² ve 40.1 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I ve J grup kompozit malzemelerin, MAPP katkısı olmadan üretilen A, B, C, D ve E grubu kompozit numunelerine göre eğilme direncinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Numunelerde genel olarak yumurta kabuğu artmasına bağlı olarak eğilme direncinin azaldığı görülmektedir. Kompozit malzemede kullanılan MAPP katkısının eğilme direncini artırdığı belirlenmiştir. Hem MAPP katkılı hem de MAPP kullanılmayan numune gruplarında karışımdaki yumurta kabuğunun miktarının artmasına bağlı olarak ise eğilme direnci değerlerinin belirli oranlarda azaldığı tespit edilmiştir. K ve A kontrol grubu kompozit malzemelerin çekme direnci karşılaştırıldığında, plastik matris materyali aynı olmasına rağmen, A grubu kompozit malzemelerin eğilme direnci K grubuna göre yüksek görülmektedir. Bu karşılaştırmada yumurta kabuğunun, odun ununa göre eğilme direncini olumsuz etkilediği sonucu çıkmaktadır.

B- Eğilmede elastikiyet modülü

Kızılçam odun unu, yumurta kabuğu, PP ve MAPP ile üretilen kompozit malzemelerin eğilmede elastikiyet modülü ölçüm değerleri ve standart sapmaları Tablo 4'de görülmektedir. Eğilmede elastikiyet modülü numuneler bazında değerlendirilirse MAPP kullanılmadan üretilen A, B, C, D ve E grupları 2210 – 2281 N/mm² aralığında artarak değişmektedir. MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I ve J gruplarında eğilmede elastikiyet modülü 2377 – 2912 N/mm² aralığında artmaktadır. A ve K gruplarının eğilmede elastikiyet modülü sırasıyla 2210 N/mm² ve 1529 N/mm² değerindedir. Grupların eğilmede elastikiyet modül değerleri Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 4'de görüldüğü gibi MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I, ve J grup kompozit malzemelerinde yumurta kabuğu artmasına bağlı olarak eğilme elastikiyet modülü değerleri de artmaktadır. MAPP katkısı olmadan üretilen A, B, C, D ve E gruplarında yumurta kabuğu miktarı artarken, eğilme elastikiyet modülü değerleri artarak C grubunda pik yaptıktan sonra düşme eğilimi göstermektedir. MAPP katkılı kompozit grupların MAPP kullanılmadan üretilen gruplara göre eğilmede elastikiyet modül değeri yüksek olduğu görülmektedir. K ve A kontrol grubu kompozit malzemelerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri karşılaştırıldığında, plastik matris materyali aynı olmasına rağmen, A grubu kompozit malzemelerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri K grubuna

göre yüksek görünmektedir. Bu karşılaştırmada yumurta kabuğunun, odun ununa göre eğilmede elastikiyet modülünü olumsuz etkilediği sonucu çıkmaktadır.

Kızılçam odun unu, yumurta ve polipropilen karışımında, polipropilen ve dolgu maddeleri arasında mikro boşluklar oluşması ve yüzey alanlarında bağlanmaların zayıflaması beklenir. Bu zayıflamanın sebebi odun unu ve polimer matrisinin uyumsuz olmasından kaynaklanmaktadır (Li & Matuanna, 2003). Literatürde belirtilen bu sonucuna aksine belirli oranda yumurta kabuğu katılımı ile mekanik özellikler üzerine olumlu etki yaptığı belirlenmiştir.

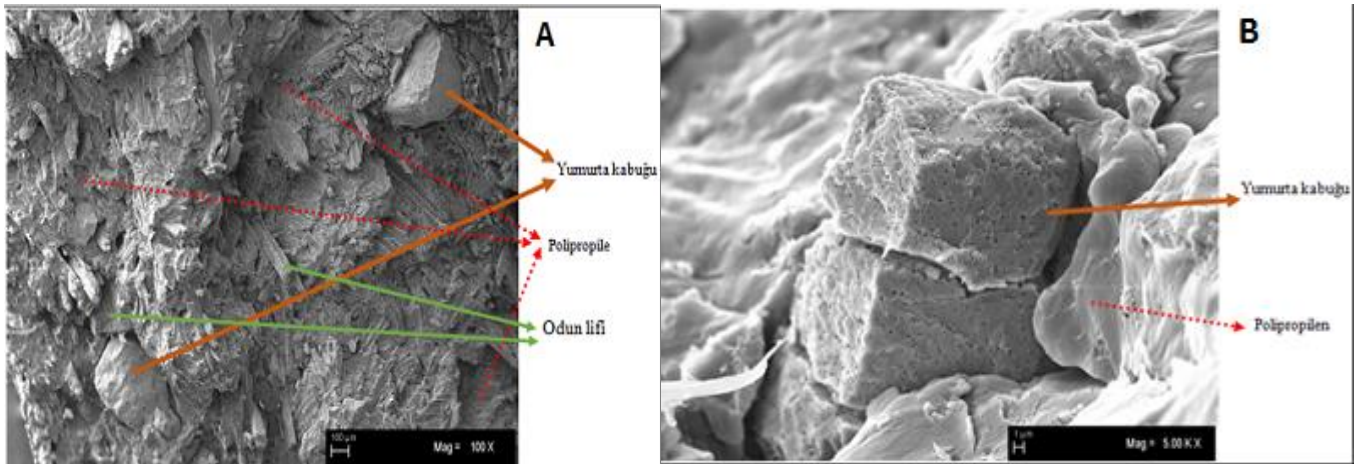
C- Darbe direnci (ASTM D 256)

Darbe direnci üzerine numunelerin içerisinde kullanılan malzemelerin fiziksel karışımı, tane boyutu, mikro yapısı ve sıcaklık etkenleri önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Darbe direnci değerleri üretilen malzemenin süneklik ve gevreklik özelliklerini ortaya koyar. Darbe direnci gruplar arasında değerlendirilirse MAPP kullanılmadan üretilen A, B, C, D ve E grupları 3.32 – 2.74 kJ/m² aralığında değişmektedir. MAPP kullanılarak üretilen F, G, H, I ve J gruplarında çekme direnci 2.94 – 3.31 kJ/m² aralığındadır. A ve K gruplarının darbe direnci sırasıyla 3.33 kJ/m² ve 2.97 kJ/m² değerindedir (Tablo 4).

K ve A kontrol grubu kompozit malzemelerin darbe direnci değerleri karşılaştırıldığında, plastik matris materyali aynı olmasına rağmen, A grubu kompozit malzemelerin darbe direnci değerleri K grubuna göre yüksek görünmektedir. Ayrıca kompozit malzemede kullanılan yumurta kabuğu darbe direnci değerlerinde küçük oranlarda değişikliklere sebep olmaktadır. Fakat Nie vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada dolgu maddesi olarak yumurta kabuğu kullanım miktarının artmasına bağlı olarak darbe direncinin de arttığı belirlenmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ile üretilen OPK malzemelerin çekme ve eğilme özelliklerine PP ve PE esaslı polimerlerin etkileri araştırılmış ve bunun sonucunda PE katkılı MAPE gibi uyum sağlayıcılar, YYPE OPK malzemelerin direnç özelliklerini iyileştirdiği, PP katkılı olanlara göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Li & Matuanna, 2003). MAPP kullanımı eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülünde olumlu bir etki görülmüş ancak darbe direnci üzerinde belirgin bir etki göstermemiştir.

Morfolojik Özellikler

OPK malzeme içerisinde kızılçam odun unu, PP ve yumurta kabuğu karışımı SEM fotolarının belirgin bir şekilde görülebilmesi için en yüksek yumurta kabuğu ilave edilmiş numuneler tercih edilmiştir. SEM fotosunda da görüldüğü gibi kızılçam odun unu, PP ve yumurta kabuğu homojen bir şekilde dağılım göstermiştir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyi olabilmesi için partikül-matris ara yüz bağının güçlü olması gereklidir. Bu özelliğinde partikül boyutu küçüldükçe daha çok arttığı belirtilmiştir (Akpınar vd., 2019).



Şekil 3. A.-Odun unu, PP ve Yumurta Kabuğu İçeren Numune, B- Yumurta kabuğu ve PP

SONUÇ VE ÖNERİLER

Üretilen OPK levhaların fiziksel (su alma oranı, kalınlık artış oranı), mekanik (eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, darbe direnci) ve morfolojik özellikleri ile elde edilen bulgulara göre:

Su alma ve kalınlık artışı sonuçlarına göre MAPP kullanarak yapılan karışımlarla üretilen kompozit malzemelerin MAPP kullanılmayan kompozit numunelere kıyasla kalınlık artış oranının daha az olduğu tespit edilmiştir. Sadece yumurta kabuğu ve polipropilen ile yapılan kompozit malzemenin kalınlık artış oranı en az olduğu görülmektedir.

Odun unun, yumurta kabuğuna göre su alma ve kalınlık artış değerinin daha büyük olduğu sonucuna ulaşıldı. Ayrıca yumurta kabuğu katkılı odun plastik kompozit malzemelerde yumurta kabuğu miktarının artışına bağlı olarak su alma oranı artmaktadır.

Yumurta kabuğu, odun ununa göre yoğunluk değerlerini yükseltmektedir. Üretilen numunelerin karışımında odun unu ve yumurta kabuğunun yüzdeleri artması buna karşılık PP yüzdelerinin azalması yoğunluk değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

Kompozit malzemede kullanılan yumurta kabuğu darbe direnci değerlerinde küçük oranlarda değişikliklere sebep olmaktadır. Yumurta kabuğunun, odun ununa göre eğilmede elastikiyet modülünü olumsuz etkilediği sonucu çıkmaktadır. Belirli oranda yumurta kabuğu katılımı ile mekanik özellikler üzerine olumlu etki yaptığı belirlenmiştir.

Odun plastik kompozit MAPP katkısı kompozit malzemelerin eğilmede elastikiyet modülünü yükseltmektedir. Yumurta kabuğunun, odun ununa göre eğilmede elastikiyet modül değeri düşüktür. Odun plastik kompozit malzemelerde PP matrisine göre dolgu maddesi arttığında mekanik değerlerinde değişim görülmektedir.

Yumurta kabuğu iyi bir geri dönüşüm ile odun plastik kompozit malzemelerde katkı ve dolgu maddesi olarak kullanılabilirdiği sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışma oda nem ve sıcaklığında gerçekleşmiştir. Yumurta kabuğu geçirgenlik özelliği sıcaklık ve nem şartları değişmesine bağlı olarak değiştiği akademik çalışmalarda görülmektedir. Yumurta kabuğu farklı sıcaklık, nem ve ortam değerlerinde özellikleri değişebileceği bir gerçektir. Bu kapsamda farklı ortamlarda üretilen OPK malzemenin özellikleri araştırılması yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma KSU-BAP birimi tarafından 2018/1-7 YLS nolu proje ile desteklenmiştir. OPK üretiminde ve mekanik testlerin yapılmasında destek veren Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU' na teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Adhikary, K.B., Pang, S. &, Staiger M.P. (2008) Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with Pinus radiata sawdust. *Chem Eng J* 142:190—198.

Akpınar B. A., Kuru, D. & Sert, S. (2019). Atık Yumurta Kabuğu Katkısının Polyester Kompozit Malzeme Üretimine Etkisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 6, 135 – 145.

Akyıldız, A. (2018). Yumurta Kabuğu Katkılı Harçların Mekanik Özellikleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2), 570-574.

ASTM D 256, (2002). Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 790, (2004). Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, PA.

ASTM D570-98 (2005), Standard test method for water absorption of plastics.

- Binici, H., Temiz, H., Sevinç, A., Mustafa, E. K. E. N., Küçükonder, A., & Ergül, T. (2013). Atık PİL Kömürü ve Yumurta Kabuğunun Radyasyon Tutucu Materyal Olarak Üretimde Kullanılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 8-14.
- Bledzki, A.K., Letman, M., Vıksine, A. & Rence, L. (2005). Science Direct. A Comparison of Compounding Processes and Wood Type for Wood Fiber – PP. *Composites, Composites Part A*, 36; 789-797.
- Ghasemi, E. & Kord, B. (2009). Long-term water absorption behaviour of polypropylene/wood flour/organoclay hybrid nanocomposite. *Iranian Polymer Journal*, 18 (9), 683-691.
- Göker, Y., As, N., Akbulut, T. & Dündar, T. (2000). Lif Kıvrıklığının Kızılcım (Pinus brutia Ten.) Odununun Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi *Turk J Agric For*, 24 s45–50.
- Güneş, A. (2019). Yumurta kabuğu takviyeli polimer esaslı kompozitlerin mekanik davranışının incelenmesi (Master's thesis, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- İpekçi, H. H.; Arkaz, H. H.; Onses, M. S. & Hancer, M. (2016). Superhydrophobic Coatings with Improved Mechanical Robustness Based on Polymer Brushes. *Surf. Coatings Technol.* 299, 162–168.
- Kord, B. (2011). Effect of nanoparticles loading on properties of polymeric composite based on hemp fiber/polypropylene. *J Thermoplast Compos*, 2, p. 4.
- Li, Q. & Matuana, L.M. (2003). Effectiveness of maleated and acrylic acid-functionalized polyolefin coupling agents for HDPE-wood-flour composites. *J Thermoplast Compos*; 16: 551-564.
- Mengeloğlu, F. & Karakuş, K. (2008). Thermal degradation, mechanical properties and morphology of wheat straw flour filled recycled thermoplastic composites, *Sensors* 2008, 8(1), 500–519.
- Najafi, S.K., Sharifnia, H. & Tajvidi, M., (2008). Effects of water absorption on creep behavior of wood-plastic composites. *J Compos Mater*; 42: 993-1002.
- Nie, H.K., Liu, F., Xu, D.M., Liu, Q.Q., Xu, J. & Cheng, A.Y. (2011) Properties of WPC based on PP filled and modified by eggshell powder. *Eng Plast Appl* 39:21–23.
- Rowell, Roger M. (2006). Advances and Challenges of Wood Polymer Composites. Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, 1–10.
- Özdemir, F., Ayşegül, Ç. O. T., & Hakkı, A. L. M. A. (2018). Odun plastik kompozit malzemelerin termal ve ısı iletkenliği özellikleri üzerine sepiolit mineralinin etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 19(2), 205-209.
- Shakeri, A. & Ghasemian, A. (2010). Water absorption and thickness swelling behavior of polypropylene reinforced with hybrid recycled newspaper and glass fiber. *Appl. Compos. Mater.*, 17, 183.
- Tufan, M., Güleç, T., Çukur, U., Akbaş, S., & İmamoğlu, S. (2015). Atık Bardaklardan Üretilen Odun Plastik Kompozitlerin Bazı Özellikleri. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 15(2), 176-182.
- TUİK (2017). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kumes-Hayvanciligi-Uretimi>.
- Tutus, A., Killi, U., & Cicekler, M. (2020). Evaluation of eggshell wastes in office paper production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-10.
- URL -1, 2017. Yumurta tavukçuluğu verileri- <https://www.yum-bir.org/UserFiles/File/yumurta-veriler2017web.pdf>.
- Yang, H.S., Wolcott, M.P., Kim, H.S, Kim S.& Kim, H.J. (2007), Effect of Different Compatibilizing Agents on the Mechanical Properties of Lignoselulosic Material Filled Polyethylene Bio-Composites. *Compos. Struct.*, 79:369-375.

Wang, W. & Morrell, J.J. (2004). Water sorption characteristics of two novel plastic composites .*Forest Product J.*, 54, 209-212.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.08.2021
Kabul Tarihi : 04.10.2021

Received Date : 25.08.2021
Accepted Date : 04.10.2021

ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI PROSES PARAMETRELERİNİN ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS PARAMETERS ON TENSILE STRENGTH

Oğuz DOĞAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-4203-8237)

Çağrı UZAY¹ (ORCID: 0000-0003-3852-1031)

Muhammed Safa KAMER¹ (ORCID: 0000-0002-7713-8951)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Oğuz DOĞAN, oguzdogan@ksu.edu.tr

ÖZET

Kaynak prosesi başta otomotiv sektörü olmak üzere, endüstride çelik sacların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik direnç kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre kolay uygulanabilirlik, otomasyona uygunluk, dolgu metali gerektirmemesi vb. avantajlar gibi bir çok avantaja sahiptir. Elektrik direnç kaynağı uzun yıllardır bilinen bir işlem olmasına rağmen otomotiv endüstrisinde çok fazla kullanıldığı için üzerinde en çok çalışılan kaynak yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada, elektrik direnç kaynağı proses parametrelerinin çekme dayanımı üzerine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Akım, sıkıştırma kuvveti ve kaynak süresi parametreleri değişken olarak ele alınmıştır. Dokuz farklı sonlu elemanlar kaynak analizi sonucunda elde edilen birleştirilmiş sac parçalar çekme analizine girdi olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen kaynak ve çekme analizleri sonucunda maksimum punta çapı ve çekme kuvvet değerleri çıktı olarak ele alınmıştır. Elde edilen çıktılar varyans analizi (ANOVA) tabii tutularak hangi parametrenin çekme dayanımı üzerine daha etkili olduğu araştırılmıştır. Sonuç olarak, akım ve zamanın artması ile çekme mukavemet değerlerinin arttığı, sıkıştırma kuvvetinin artması ile mukavemetin azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma ayrıca, sonuçların minimum hata ile yaklaşık olarak tahmin edilebileceği ampirik denklemler de önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik direnç kaynağı, sonlu elemanlar yöntemi, çekme testi, ANOVA, Simufact Welding

ABSTRACT

Welding is widely used joining method of the steel sheets in many industry especially in automotive. Compared to the other welding processes, the method provides ease of handling, simple implementation, is suitable for automation, no need any filler material, and etc. Although the resistance spot welding is the most commonly known method and has been applied for a long time, the research studies have continued since it is used highly in automotive industry. In this study, the effects of process parameters of resistance spot welding on tensile properties were investigated by using finite element method. Current, compression force, and welding time are considered process variables. Nine different finite element analyses (FEA) were conducted based on the welding parameters and the joined steel sheets obtained from FEA were defined as input into tensile analysis. The welding simulations and tensile test analysis yielded the maximum weld diameter and maximum tensile force values, respectively. The analysis of variance (ANOVA) was also carried out to examine which welding parameter is more significant on the tensile properties and weld size. As a result, while tensile properties increase with the increase of current and welding time, the increase of compression force decreases the maximum tensile forces. The study also recommends empirical equations to predict the approximate values of the responses with minimum error.

Keywords: Resistance spot welding, finite element method, tensile test, ANOVA, Simufact Welding

To Cite: DOĞAN, O., UZAY, Ç., & KAMER, M.S., (2021). ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI PROSES PARAMETRELERİNİN ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4),319-331.

GİRİŞ

Kaynak işlemleri, otomotiv endüstrisinde, farklı ve aynı tip çelik sacların birleştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde otomotiv endüstrisinde elektrik direnç kaynağı en çok kullanılan birleştirme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Binek araçlarda ortalama 4000 ile 6000 arasında elektrik direnç kaynağı bulunmaktadır. Bu nedenle otomotiv endüstrisinde elektrik direnç kaynağı her zaman önemini korumaktadır (Özgül & Arslan, 2018). Doruk (2016), otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağının önemini ve uygulama alanlarını açıklamıştır.

Literatür incelendiğinde elektrik direnç kaynağı üzerine gerçekleştirilen birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunun elektrik direnç kaynağı işlem parametrelerinin kaynak performansına etkilerinin araştırılması üzerine olmuştur. Antika vd. (2018), TRIP ve DP çeliklerini farklı kaynak akımı ve kaynak sürelerinde kaynatarak hazırladıkları numuneleri çekme makaslama, mekanize soyma ve sertlik testlerine tabii tutmuşlardır. Mekanize soyma ve çekme makaslama dayanımlarının, artan kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak arttığını, ayrıca kaynak çekirdeğinin sertlik değerinin de esas metale göre yaklaşık %70 arttığını belirlemişlerdir. Özçatalbaş vd. (2018), AISI 304 paslanmaz çeliğin elektrik direnç kaynağındaki akım şiddeti ve soğutma ortamının, birleştirmenin mekanik özelliklerine ve mikro yapısına etkisini araştırmışlardır. Üç farklı akım şiddeti ve soğutma ortamında yaptıkları birleştirme numunelerine çekme-makaslama ve sertlik deneyleri yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda, uygun birleştirme özelliklerinin 7,5 kA akımda ve hava soğutmalı ortamda sağlandığını, akım şiddetinin artmasıyla çekme makaslama dayanımının artmasına rağmen birleştirmenin aşırı bir şekilde deforme olduğunu belirlemişlerdir.

Elektrik direnç kaynağı proses parametrelerinin mekanik özellikler üzerine etkilerinin incelenmesinin yanı sıra bu parametrelerinin optimize edilerek en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik de literatürde farklı çalışmaların olduğu görülmektedir. Özgül & Arslan (2018), Al 5754-H111 malzemesini elektrik direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımı, kaynak süresi ve sıkıştırma yükü ile birleştirerek, kaynak işlemi uyguladıkları numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kaynaklı bağlantılara çekme deneyi yapmışlardır. Kaynak parametrelerindeki değişimin kaynak mukavemetini artırabileceğini, optimum kaynak parametrelerinin analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Ertek Emre (2019), mukavemet ve kaynak çekirdek geometrisinin optimizasyonu için çeşitli kaynak parametrelerinde TWIP (Twinning Induced Plasticity) çelik sacları nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Deney numunelerinin çekme, makaslama dayanımı ve kaynak çekirdek çapının optimizasyonunu Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanarak belirlemiştir. Çekme makaslama dayanımına etki eden en önemli kaynak parametresi kaynak akımı, kaynak çekirdek çapı değeri için en etkili değişkenin kaynak zamanı olduğunu tespit etmiştir. Kekik vd. (2021), 1200M ve DP800HF AHSS sacların elektrik direnç kaynağında kullanılan kaynak akımı, kaynak zamanı ve kaynak çene baskı kuvvetlerinin kaynak çekirdeği sertliği üzerine etkisini Taguchi yöntemiyle incelemişlerdir. Elektrik direnç kaynağı işleminde kaynak performansını arttırmak ve kaynak parametrelerini optimize etmek için kullanılan Taguchi yönteminin geçerliliğini deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. DP800HF ve 1200M saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile sorunsuz bir şekilde kaynatılabildiğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada farklı proses parametrelerinin elektrik direnç kaynağı dayanımı üzerine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Akım, kaynak süresi ve sıkıştırma kuvveti parametreleri değişken proses parametresi olarak ele alınmıştır. Dokuz farklı sonlu elemanlar kaynak analizi sonucunda elde edilen sonuçlar çekme analizlerine girdi olarak verilmiştir. Gerçekleştirilen kaynak ve çekme analizleri sonucunda, her bir kaynak için kaynak çapı ve çekme eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar varyans analizine (ANOVA) tabi tutularak incelenen parametreler arasında hangi parametrenin daha etkili olduğu araştırılmıştır. Oluşturulan matematiksel modellere dayanarak sonuçları yaklaşık olarak tahmin edebilen ampirik denklemler türetilmiştir.

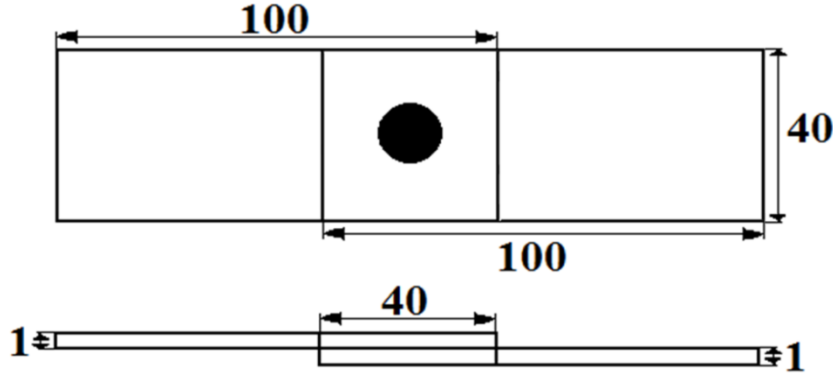
MATERYAL VE METOT

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektrik Direnç Kaynağının Modellenmesi

Bu çalışmadan elektrik direnç kaynağı prosesi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nümerik olarak modellenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Elektrik direnç kaynağı sonlu elemanlar modeli Simufact Welding paket programı içerisinde bulunan “Resistance Spot Welding” modülü içerisinde gerçekleştirilmiştir. Analizlerde standart sonlu elemanlar analiz prosedürü takip edilmiştir. Altı basamaktan oluşan yöntem şu şekilde sıralanabilir. Geometrinin oluşturulması, malzeme tanımı, sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması, analiz sınır şartlarının tanımlanması, analizin çalıştırılması ve sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir.

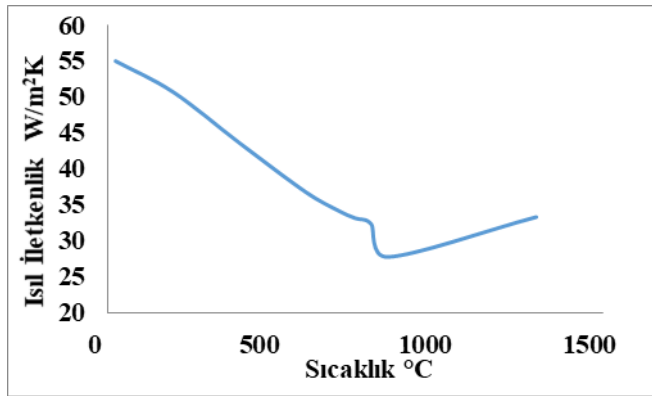
Analizin birinci basamağında analiz geometrisi oluşturulmuştur. ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 standardında belirtildiği üzere test numuneleri 100 mm boyunda, 40 mm genişliğinde ve 1 mm kalınlığında olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca test numunelerinin 40 mm uzunluğundaki kısımları üst üste Şekil 1’de görüldüğü gibi konumlandırılmıştır. Numunelerinin tasarlanma işlemi Solidworks ortamında yapılmış olup, Simufact Welding programı içerisinde step dosya formatında gönderilmiştir.

Kaynak elektrotu olarak ise 6 mm çapında B tipi elektrik direnç kaynağı elektrotu seçilmiştir. Elektrotun modellenmesi ise doğrudan Simufact Welding programı içerisinde gerçekleştirilmiştir.

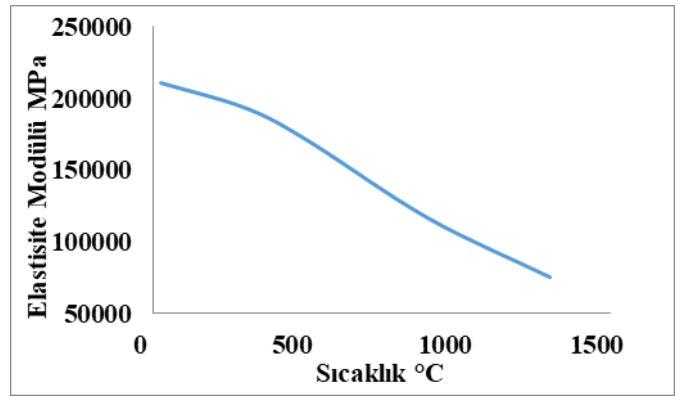


Şekil 1. Sonlu Elemanlar Test Numunelerinin Standart Boyutları

Geometrik modellemenin tamamlanmasından sonra oluşturulan geometrilere malzeme tanımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. SHGA370 galvanizli çelik deney numunelerinin malzemesi olarak belirlenmiştir. Elektrotlar malzemesi olarak ise bakır alaşımı tanımlanmıştır. Tanımlanan malzemeler “Simufact Material” malzeme kütüphanesinden seçilerek tanımlanmıştır. Bu nedenle malzemelerin mekanik ve termal özellikleri de otomatik olarak kütüphaneden çekilmektedir. Bu kütüphane sayesinde çok farklı malzeme için seçim yapma imkânı bulunmaktadır.



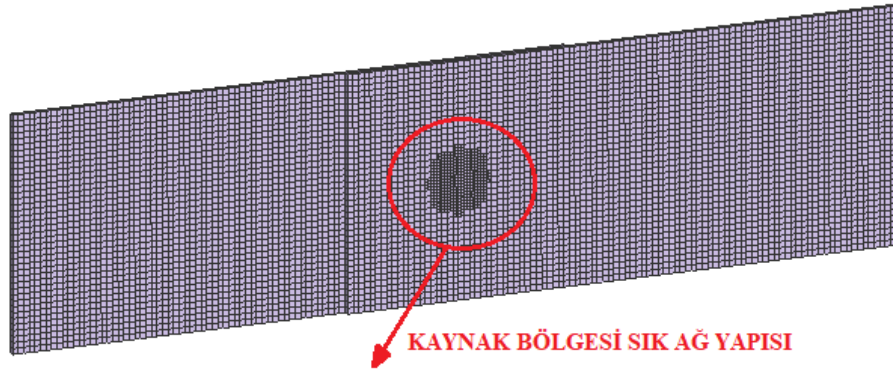
a)



b)

Şekil 2. Sıcaklığa Bağlı Malzeme Özelliklerinin Değişimi, a) Isıl İletkenlik, b) Elastisite Modülü

Malzemelerin ısı iletkenlik ve elastisite modülü değerleri kütüphane üzerinde sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2’de SHGA370 malzemesi için sıcaklığa bağlı olarak ısı iletkenlik ve elastisite modülü değişimi gösterilmektedir. Katılma sıcaklığı 1466 °C, erime sıcaklığı ise 1517 °C olarak tanımlanmıştır. Temas ısı transfer katsayısı (α) 1000 W/m²K, emisyon katsayısı (ϵ) 0,6 ve analizin başlangıç sıcaklığı 20 °C olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Simufact Welding programında otomatik olarak verilen standart değerler olup değiştirilmesi mümkündür.



Şekil 3. Sonlu Elemanlar Analizlerde Kullanılan Ağ Yapısının Genel Görünümü

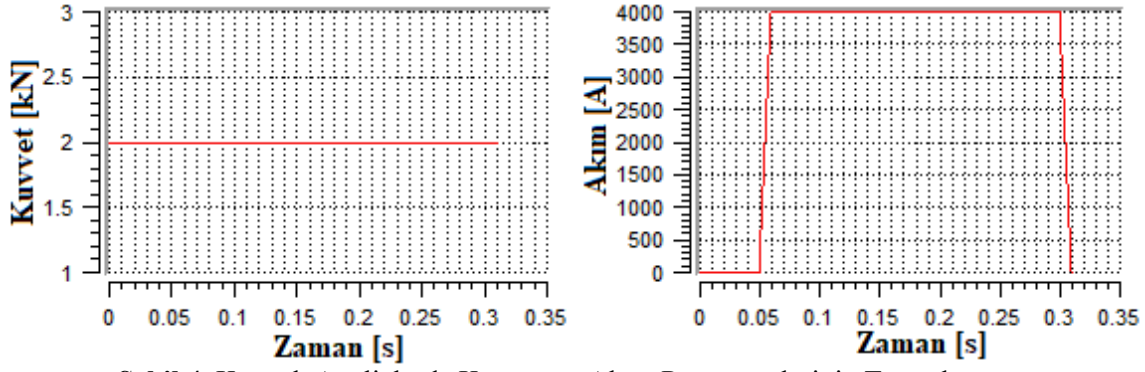
Malzeme tanımlanmasından sonra modelin ağ yapısının oluşturulması gerçekleştirilmiştir. Modelin ağ yapısı iki aşamada oluşturulmuştur. Öncelikle sac parçalara tamamına 1 mm boyutunda hexahedral yapıda ağ yapısı oluşturulmuş, ardından kaynağın yapılacağı bölge Şekil 3'te görüldüğü gibi 10 mm çapındaki bölgeye 0,25 mm boyutunda elemanlar oluşturulmuştur. Bu sayede kaynak bölgesindeki sonuçların daha doğru olması sağlanmıştır. Ayrıca kaynak işleminden etkilenmeyen diğer bölgelere gereksiz yere sık eleman oluşturulmayarak analizin çözüm süresi ve bilgisayar hafızasında kaplayacağı alan minimuma indirgenmiştir. Bu çalışmada ağdan bağımsızlık çalışması sadece kaynak bölgesi için gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgesindeki 10 mm çapa sahip olan bölge 1 – 0,5 -0,25 ve 0,1 mm boyutlarında ağ yapıları ile sıra ile denemiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. 0,25 mm eleman boyutundan sonra kaynak bölgesinde önemli bir değişim görülmediğinden kaynak bölgesine uygulanan sık ağ yapısının eleman boyutu 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kurulan sonlu elemanlar modeli yaklaşık olarak 20000 hexahedral eleman ve 45000 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Ağ yapısının tanımlanmasından sonra modelin sınır şartları tanımlanmıştır. Bu çalışmanın amacı farklı kaynak parametrelerinin kaynak dayanımı üzerine olan etkisinin görülmesi olduğundan dolayı üç farklı sıkıştırma kuvveti (1,5 kN – 2 kN – 2,5 kN), üç farklı akım (4000 A – 8000 A – 12000 A) ve üç farklı kaynak süresi (0,1 s – 0,25 s – 0,5 s) değişken parametre olarak incelenmiş ve bu parametrelerin çeşitli kombinasyonları dikkate alınarak toplamda dokuz farklı deney tasarlanmıştır.

Tablo 1. Sonlu Elemanlar Kaynak Analizlerinde Kullanılan Farklı Proses Parametreleri

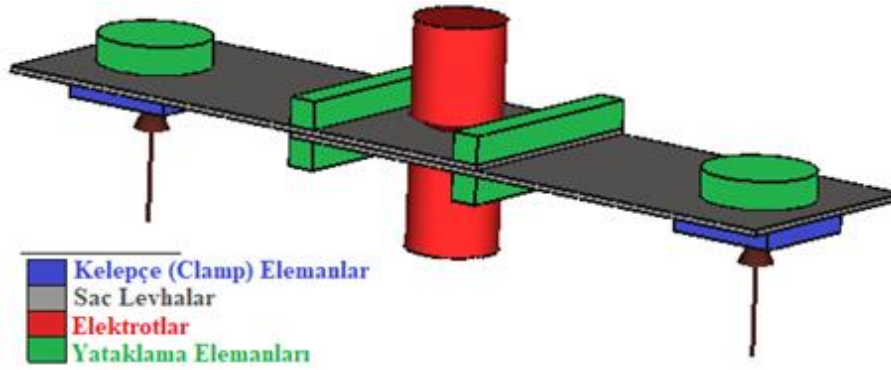
Deney No	Sıkıştırma Kuvveti (kN)	Akım (A)	Zaman (s)
1	1,5	4000	0,10
2	1,5	8000	0,25
3	1,5	12000	0,50
4	2,0	4000	0,25
5	2,0	8000	0,50
6	2,0	12000	0,10
7	2,5	4000	0,50
8	2,5	8000	0,10
9	2,5	12000	0,25

Bu çalışma için gerçekleştirilen deney tasarımı çalışması Tablo 1de gösterilmektedir. Deney 4 için, sıkıştırma kuvveti ve akımın zamana göre değişimi ise Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde öncelikle elektrot uçları kapanarak sıkma kuvveti uygulanır ardından, akım parçalar üzerine etkimektedir. Akımın sistem üzerinden kalkmasından sonra sıkma kuvveti de parçalar üzerinden kaldırılmaktadır.



Şekil 4. Kaynak Analizlerde Kuvvet ve Akım Parametrelerinin Tanımlanması

Kaynak işlemi Tablo 1'de gösterildiği gibi deney numarasının karşısında yer alan süre kadar devam etmektedir. Kaynak işleminin bitmesinin ardından analiz sanal olarak soğumaya bırakılmaktadır. Kaynak işlemi bittikten sonra analiz 150 s boyunca soğumaya bırakılmaktadır. Analiz sırasında elektrot kuvvetinden dolayı sac levhaların düz bir düzlem üzerinde sabit kalması için kelepçe (clamp) ve yataklama elemanları Şekil 5'te görüldüğü gibi eklenmiştir. Kelepçe (clamp) elemanlar sac parçalarının alt yüzeylerine, yataklama elemanları ise üst yüzeye gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca 100 N değerinde kelepçeleme (clamp) kuvveti uygulanarak sistemin sabit kalması sağlanmıştır. Şekil 5'te elektrik direnç kaynağı için tanımlanan tüm sınır şartları görülmektedir. Çözüm için hazır hale getirilen analizler son olarak çözdürülerek sonuçlar incelenmiştir.

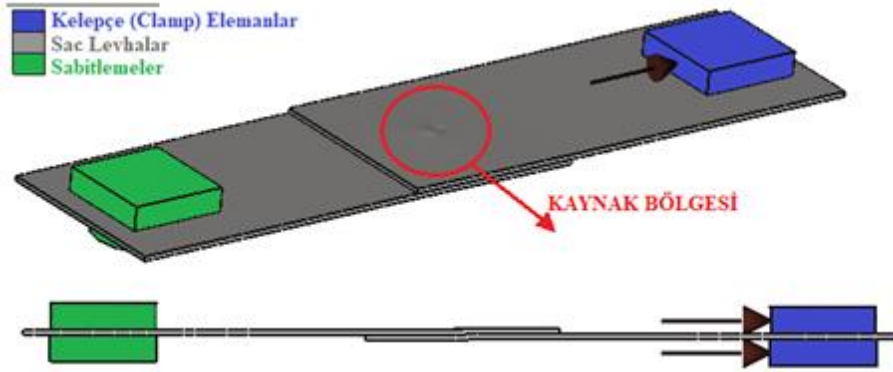


Şekil 5. Elektrik Direnç Kaynağı Sonlu Elemanlar Analizi Sınır Şartlarının Genel Görünümü

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çekme Deneylerinin Modellenmesi

Farklı proses parametrelerine göre gerçekleştirilen elektrik direnç kaynağı analizlerinin sonucunda oluşan yapıların çekme dayanımlarının tespit edilebilmesi için yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çekme analizleri gerçekleştirilmiştir. 150 s sonucunda soğuması tamamlanan elektrik direnç kaynağı analiz sonuçları, çekme analizi için girdi olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle geometri, malzeme ve ağ yapısı bilgileri doğrudan birinci analizde tanımlanan değerler ile birebir aynıdır.

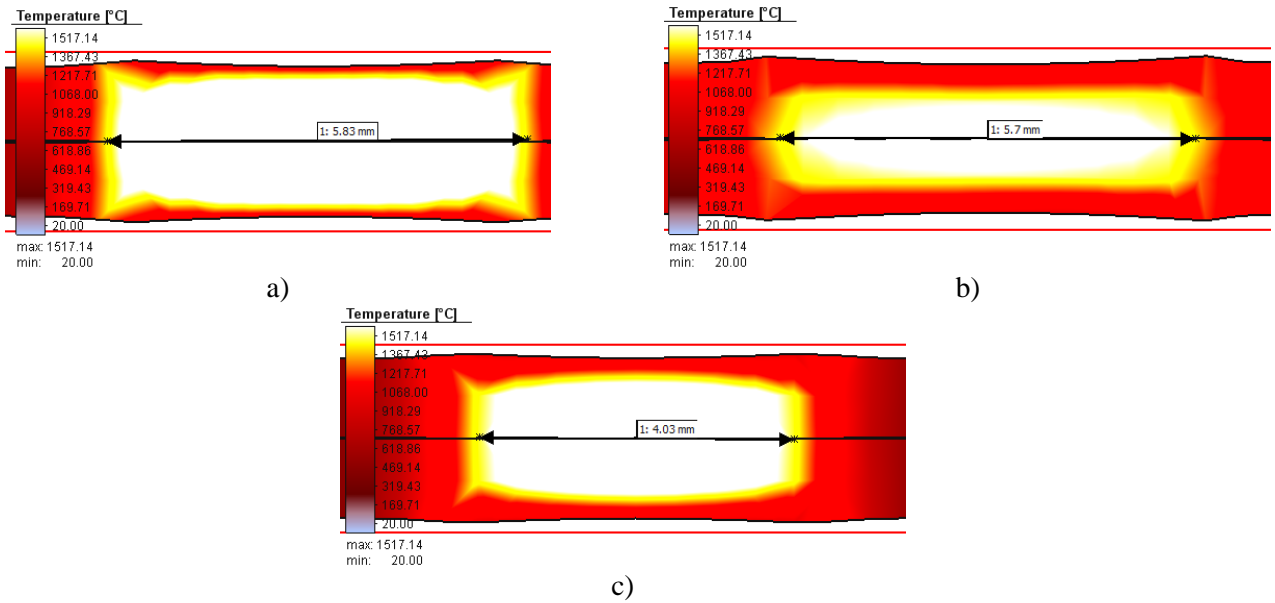
Çekme analizlerinde kaynak analizlerinden farklı olarak sistemin sınır şartları değiştirilmiştir. Şekil 6'da çekme analizleri için tanımlanan sınır şartları görülmektedir. Kaynak edilmiş sac levhaların sol tarafındaki alt ve üst uç noktalarının tüm serbestlik dereceleri sıfır olacak şekilde sabitlenmiştir. Sac levhaların sağ tarafındaki alt ve üst kısımlar ise hareketli kelepçe elemanlar ile tutturularak eksen doğrultusunda hareket ettirilmiştir. Çekme analizlerinde hareketli kelepçe elemanlar toplamda 4 mm hareketi 8 s içerisinde kat etmek sureti ile ilerletilmiştir. Her bir saniye toplamda 10 alt adıma bölünerek toplamda 80 nokta için çekme analizi gerçekleştirilmiş ve her bir nokta için kuvvet değerleri kayıt edilmiştir.



Şekil 6. Sonlu Elemanlar Çekme Analizi Sınır Şartları Genel Görünümü

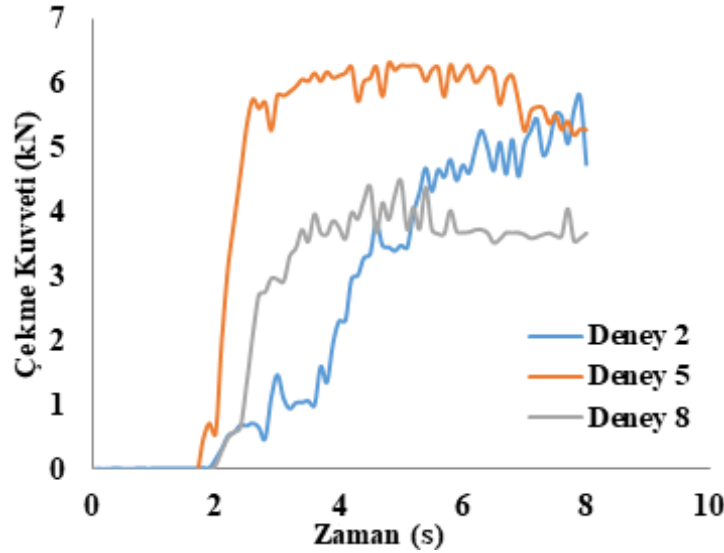
BULGULAR VE TARTIŞMA

Elektrik direnç kaynağı analizleri sonucunda, farklı proses parametreleri altında kaynak bölgesinde meydana gelen sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Şekil 7’de bazı analizler (2 – 5 ve 8 numaralı deneyler) için elde edilen kaynak bölgeleri sıcaklık dağılımları görülmektedir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, tüm analizler için alt ve üst parçalarda simetrik bir sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçların tutarlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, farklı parametrelerin etkisi ise birlikte kaynak olan bölgenin boyutları ölçülerek, proses parametrelerinin kaynak bölgesine olan etkisi de incelenmiştir. Bazı parametreler altında kaynak bölgesinin büyüdüğü bazılarında ise küçüldüğü görülmektedir. Proses parametrelerinin kaynak bölgesine olan etkisi detaylı olarak varyans analizi bölümünde anlatılmıştır.



Şekil 7. Farklı Deneyler için Elde Edilen Elektrik Direnç Kaynak Bölgeleri a) Deney 2, b) Deney 5, c) Deney 8

Şekil 8’de bazı analizler (2 – 5 ve 8 numaralı deneyler) için elde edilen çekme eğrileri görülmektedir. Çekme eğrileri toplam 8 saniye için her bir saniyede 10 kuvvet değeri olacak şekilde toplam 80 değer birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Şekil incelendiğinde, en yüksek kuvvet değerinin 5. analizde olduğu görülmekle birlikte en düşük kuvvet değerlerinin ise 2. analizde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı Deneyler için Analizlerden Elde Edilen Çekme Grafikleri

Tablo 2’ de tüm deneyler için kaynak çapları ve analizlerden elde edilen maksimum çekme kuvvetlerinin değişimi gösterilmektedir. Kaynak çapının artması ile birlikte maksimum çekme kuvveti değerlerinin arttığı, kaynak çapının azalması ile birlikte ise kuvvet değerlerinin azaldığı görülmektedir. En yüksek kuvvet ve kaynak çapı 3 numaralı deneyde, en düşük kaynak çapı ve kuvvet değerinin ise 1 numaralı deneyde olduğu tespit edilmiştir. Parametrelerin kaynak çapı ve maksimum çekme kuvvetine olan etkileri detaylı olarak ANOVA analizi bölümünde ele alınmıştır.

Tablo 2. Kaynak Çapları, Çekme Deneyi Sonuçları Deneysel Tasarımı ve Sonuç Çıktıları

Deney	Faktör 1: Sıkıştırma kuvveti (kN)	Faktör 2: Akım (A)	Faktör 3: Zaman (s)	Yanıt 1: Kaynak çapı (mm)	Yanıt 2: Maksimum çekme kuvveti (kN)
1	1,5	4000	0,1	1,20	0,21
2	1,5	8000	0,25	5,83	5,79
3	1,5	12000	0,5	8,14	8,33
4	2	4000	0,25	2,20	2,48
5	2	8000	0,5	5,70	6,31
6	2	12000	0,1	5,64	6,05
7	2,5	4000	0,5	2,36	2,47
8	2,5	8000	0,1	4,03	4,48
9	2,5	12000	0,25	7,07	7,20

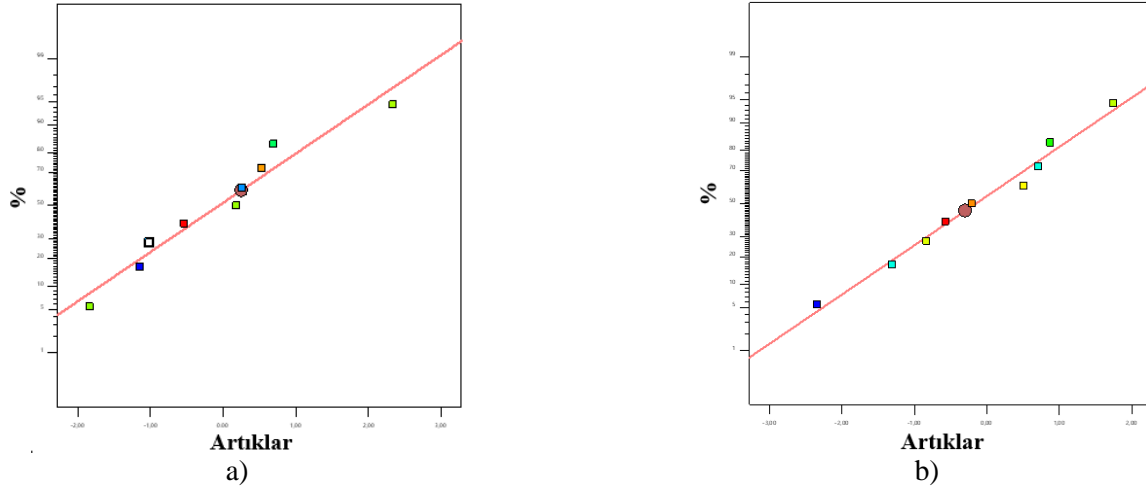
Varyans Analizi (ANOVA)

Çalışmada göz önünde bulundurululan Sıkıştırma Kuvveti (F), Akım (A) ve Zaman (t) gibi kaynak parametrelerinin, kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım parametreleri ve seviyeleri Tablo 3’te verilmiştir. Yüzey Yanıt Metodu (RSM: Response Surface Methodology) ile Merkezi Kompozit Tasarım (CCD: Central Composite Design) yapılmış ve matematiksel ve istatistiksel olarak optimum deney şartları belirlenmiştir. CCD deneysel tasarım sayesinde her parametrenin birbiri ile olan etkisini incelemek yerine daha az sayıda ancak yeterli olabilecek kadar (Croarkin ve Tobias, 2015) etkileşim göz önünde bulundurulmuş ve daha önceki bölümlerde de belirttiği gibi toplam dokuz farklı konfigürasyonda inceleme yapılmıştır. Yüzey Yanıt Metodunun bu avantajı hem mühendislik uygulamalarında hem de akademik çalışmalarda başvurulan bir yöntem olmasını sağlamakta ve böylece fazla deney sayısını elimine ederek malzeme, zaman, proses bakımından maliyet-etkin çözümler sunmaktadır (Türk, 2016; Basmacı vd., 2018). Deneysel tasarım, Design Expert 12 paket programı ile gerçekleştirilmiş olup Tablo 2’de parametreler ve bunun sonucunda elde edilen yanıtlar (response) görülmektedir.

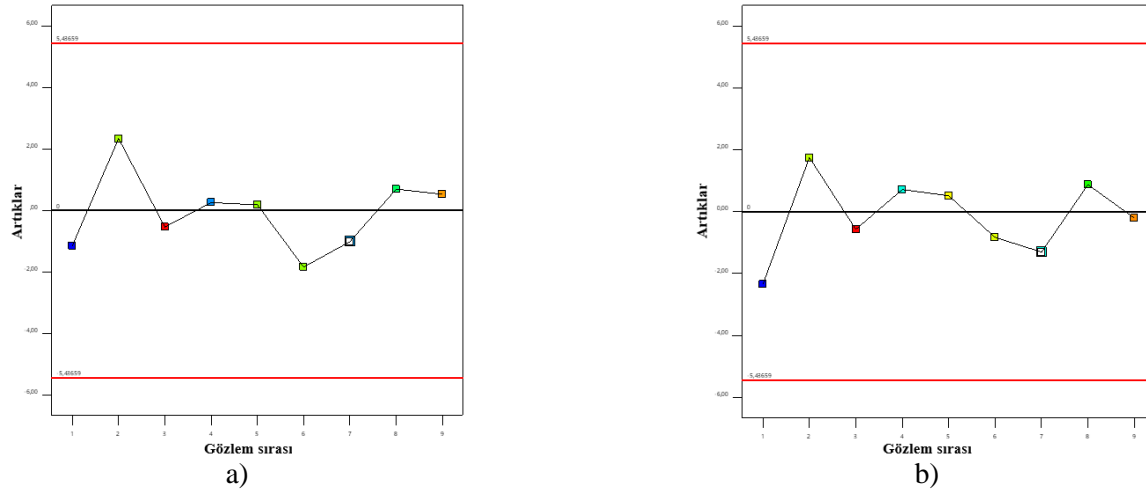
Tablo 3. Kaynak Parametreleri ve Seviyeleri

Parametreler	Seviyeler		
	I	II	III
Sıkıştırma Kuvveti (F)	1,5 kN	2 kN	2,5 kN
Akım (A)	4000 A	8000 A	12000 A
Zaman (t)	0,1 s	0,25 s	0,5 s

Varyans analizlerine (ANOVA) geçmeden önce verilerin normal dağılım eğrisine uygun olup olmadığının araştırılması gerekmektedir (Akkuş 2021). Bu yüzden Şekil 9'da gösterildiği gibi normallik testi gerçekleştirilmiştir. Verilerin normal dağılıma uygun olması normallik varsayımının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

**Şekil 9.** Normallik Testi; a) Kaynak Çapı, b) Maksimum Çekme Kuvveti

Şekil 10'da ise verilerin rastgele dağıldığı görülmekte olup parametrelerin bağımsızlık varsayımlarının sağlandığı anlaşılmaktadır.

**Şekil 10.** Bağımsızlık Varsayımı; a) Kaynak Çapı, b) Maksimum Çekme Kuvveti

ANOVA işlemi, kaynak çapı ve maksimum çekme kuvvetlerinin analizleri için %95 güven aralığında yapılmıştır. Bu sebeple ANOVA tablolarında yer alan p değerinin 0,05'ten küçük elde edildiği durumlarda parametrelerin yanıtlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir. ANOVA sonuçları sırasıyla kaynak çapı için Tablo 4, maksimum çekme kuvveti için ise Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 4. Kaynak Çapı için ANOVA Sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-değeri	p-değeri	
Model	42,63	3	14,21	29,61	0,0013	Anlamlı
A- Sıkıştırma kuvveti	0,4873	1	0,4873	1,02	0,3598	
B- Akım	37,95	1	37,95	79,08	0,0003	
C- Zaman	4,20	1	4,20	8,74	0,0316	
Artık	2,40	5	0,4799			
Cor Toplam	45,03	8				

Tablo 5. Maksimum Çekme Kuvveti için ANOVA Sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-değeri	p-değeri	
Model	51,04	3	17,01	21,36	0,0028	Anlamlı
A- Sıkıştırma kuvveti	0,0054	1	0,0054	0,0068	0,9376	
B- Akım	44,94	1	44,94	56,42	0,0007	
C- Zaman	6,10	1	6,10	7,66	0,0395	
Artık	3,98	5	0,7965			
Cor Toplam	55,02	8				

Sonuçlar incelendiğinde, kaynak parametrelerine dayanarak oluşturulan matematiksel modellerin kaynak çapı ($p=0,0013$) ve maksimum çekme kuvveti ($p=0,0028$) için anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Her bir bağımsız değişkenin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde ise Akım ve Zamanın oluşturulan modele anlamlı bir şekilde etki ettiği ancak sıkıştırma kuvvetinin sonuçlar üzerinde istatistiksel olarak anlamsız olduğu tespit edilmiştir. Kaynak çapı için bakıldığında p değeri Akım ve Zaman için sırasıyla 0,0003 ve 0,0316; Sıkıştırma kuvveti için 0,3598 olarak bulunmuştur. F değerleri incelendiğinde ise Akım için 79,08, Zaman için 8,74 bulunmuştur bu da Akımın Zamana kıyasla daha etkili parametre olduğunu göstermektedir. ANOVA sonuçları maksimum çekme kuvveti açısından incelendiğinde ise p değeri Akım ve Zaman için sırasıyla 0,0007 ve 0,0395; Sıkıştırma kuvveti için 0,9376 olarak bulunmuştur. F değerleri Akım için 56,42, Zaman için 7,66 olup maksimum çekme kuvveti için oluşturulan modelde de Akımın Zamana göre daha etkili parametre olduğu anlaşılmaktadır. ANOVA sonuçlarına göre sıkıştırma kuvvetinin hem kaynak çapı hem de maksimum çekme kuvveti üzerinde etkisinin anlamsız bulunması, o parametrenin p değerlerinin 0,05'ten büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Herhangi bir deneysel parametrenin sonuçlar üzerinde ne kadar etkili olduğu parametrenin F değerinin yüksekliği ile ilgilidir. ANOVA, deneysel çalışma yapan araştırmacıların hangi deneysel parametrenin sonuçlar üzerinde daha etkili olduğunu tespit etmek için başvurduğu güçlü bir mühendislik aracıdır (Gürbüz vd, 2018; Özlü vd, 2019).

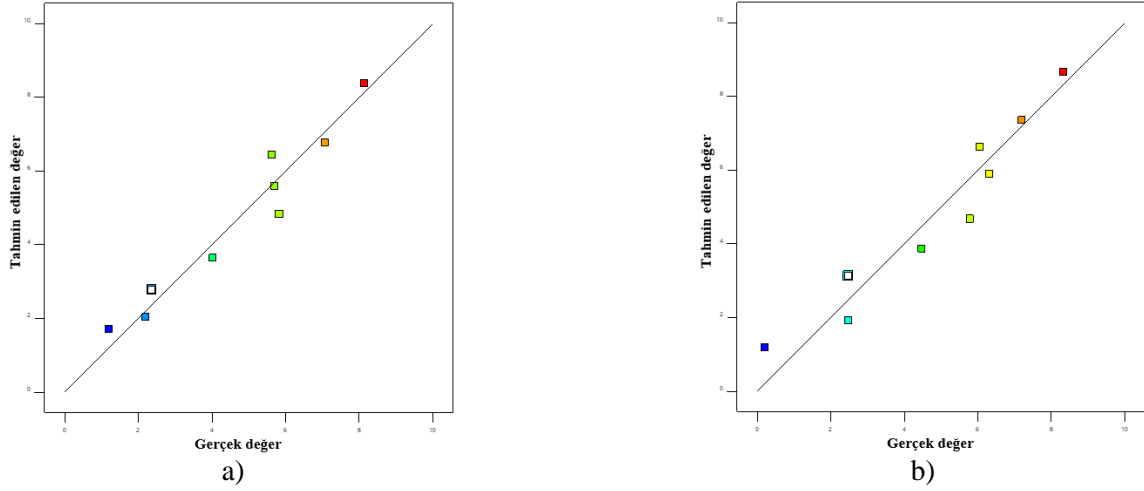
Merkezi Kompozit Tasarıma göre oluşturulan modellerin korelasyon katsayıları (R^2) da oldukça yüksek bulunmuştur. Kaynak çapı için R^2 değeri %94,67, maksimum çekme kuvveti için R^2 değeri %92,76'dır. Yüksek R^2 değerleri oluşturulan matematiksel modellerin elde edilen anlamlı değişiklikleri güçlü bir şekilde açıklayabildiğini ve bağımsız değişkenlere dayanarak kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti gibi yanıtları tahmin edebileceğini göstermektedir. Böylece regresyon analizleri neticesinde elde edilecek ampirik denklemler vasıtası ile kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti; akım, zaman ve sıkıştırma kuvvetinin bir fonksiyonu olarak minimum hata ile tespit edilmesi mümkündür. Eşitlik 1 ve 2'de bu denklemler verilmiştir.

$$D = -0,376905 - (0,57F_s) + (0,000629A) + (4,1381t) \quad (1)$$

$$F_{max}^c = -1,95378 - (0,06F_s) + (0,000684A) + (4,9898t) \quad (2)$$

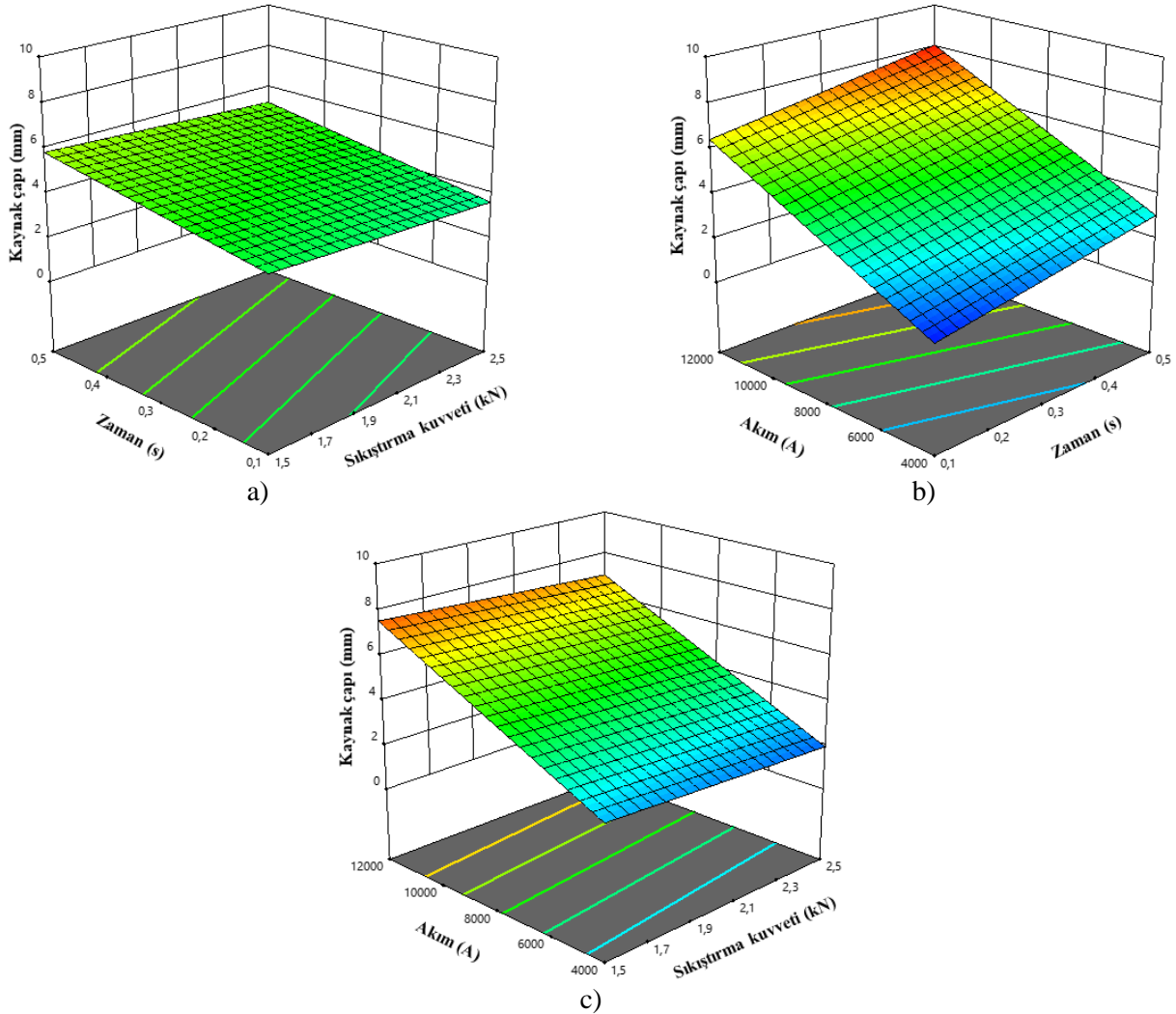
Yukarıdaki eşitliklerde D ve F_{max}^c sırası ile kaynak çapı (mm) ve maksimum çekme kuvveti (kN); F_s sıkıştırma kuvveti (kN), A amper (A) ve t zaman (s)'dir. Regresyon analizi sayesinde ortaya çıkan ampirik denklemleri birden fazla deneysel parametre içeren çalışmalarda minimum hata ile optimum sonuçlar elde etmek için kullanmak mümkündür. Örneğin, Tibet ve Çoruh (2017) da akü cürufları içerisindeki kurşun salımını sıcaklık, dozaj ve başvurulan standart yöntem türü bakımından incelemiş ve yüksek R^2 değeri ile regresyon analizi gerçekleştirerek bir verim denklemi sunmuştur.

Yüksek R^2 değerlerinin yanı sıra Şekil 11’de verilen gerçek değer-tahmin edilen değer grafikleri de regresyon analizinin minimum hata ile çalışır olduğunu ve verilerin birbiri ile oldukça uyum içinde olduğunu göstermektedir.



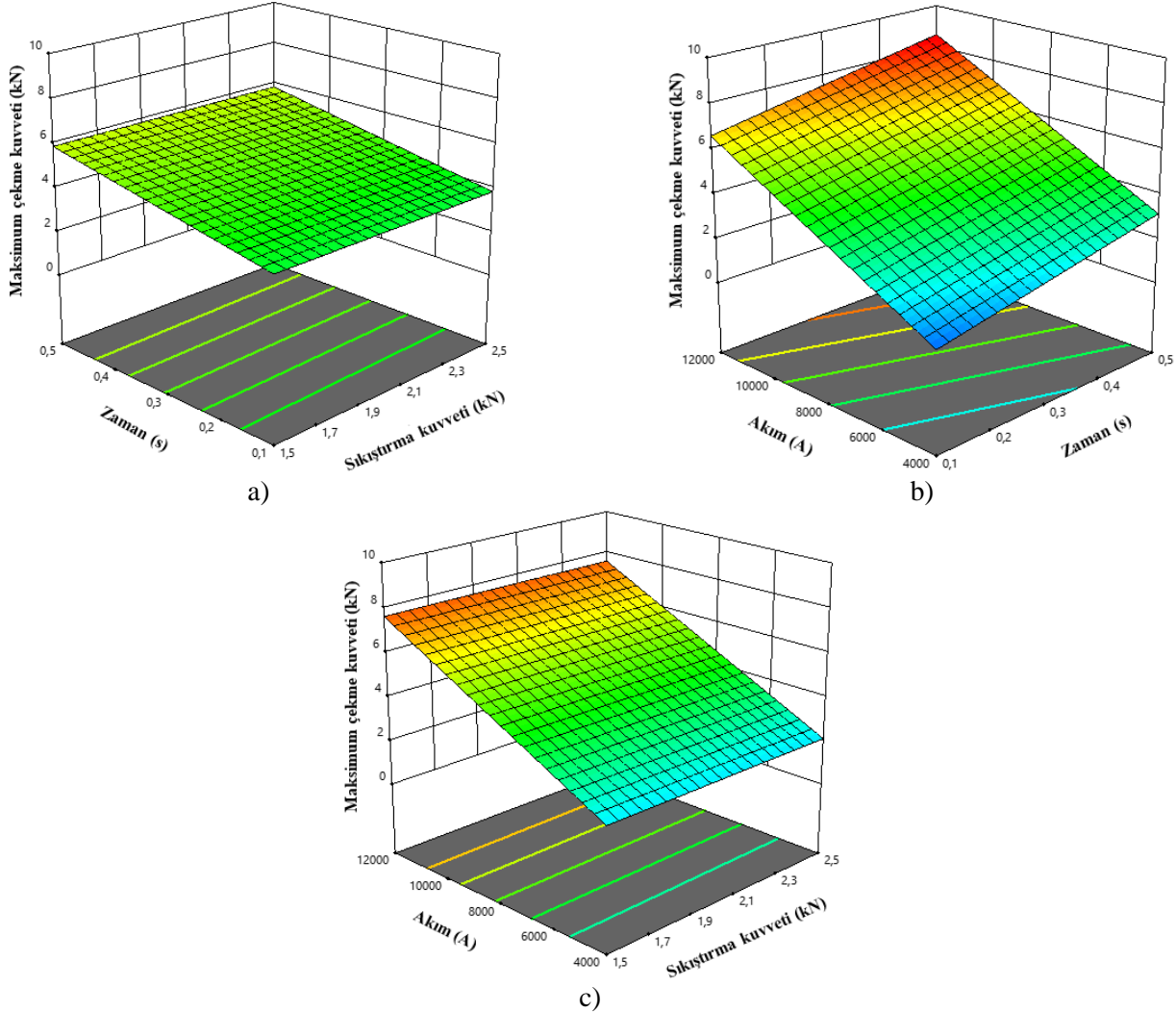
Şekil 11. Gerçek Değer – Tahmin Edilen Değer Grafikleri; a) Kaynak Çapı, b) Maksimum Çekme Kuvveti

Çalışmada ilaveten bağımsız değişken parametrelerin etkileşiminin etkisi de incelenmiş olup sonuçlar yüzey grafikleri ile sunulmuştur. İki veya daha fazla bağımsız değişken parametre içeren çalışmalarda sonuçları yüzey grafikleri ile sunmak hem her bir parametrenin etkisini hem de parametrelerin birbiri ile etkileşimlerini ortaya çıkarmayı sağlamaktadır (Bacak vd., 2021). Şekil 12 ve 13’te zaman-sıkıştırma kuvveti, akım-zaman ve akım-sıkıştırma kuvveti etkileşimlerinin kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti üzerine etkileri gösterilmektedir.



Şekil 12. Parametrelerin Etkileşiminin Kaynak Çapı Üzerine Etkisi; a) Zaman-Sıkıştırma Kuvveti, b) Akım – Zaman, C) Akım – Sıkıştırma Kuvveti

ANOVA sonuçları (Tablo 4 ve 5) göz önünde bulundurulduğunda en etkili parametre olan akım ve etkisinin istatistiksel olarak anlamsız bulunduğu sıkıştırma kuvvetinin etkileri etkileşim grafiklerinde açıkça görülmektedir. Zira Şekil 12 ve 13'te grafik eksenleri incelendiğinde akım değerindeki artışın çıktılarını fazlasıyla etkilediği; sıkıştırma kuvvetinin ise anlamlı bir fark ortaya koyamadığı anlaşılmaktadır. Yüksek akımda uzun süreli uygulanan kaynak işlemi ile büyük kaynak çapı oluşmakta ve kaynak malzemesinin daha yüksek çekme kuvvetlerini taşıdığı anlaşılmaktadır. Sıkıştırma kuvveti ise sonuçlar üzerinde tam tersi bir etki yapmaktadır. İlave olarak sıkıştırma kuvvetinin maksimum çekme kuvvetleri üzerindeki etkisi kaynak çapındaki sonuçlara kıyasla nispeten daha azdır. Yüzey grafikleri en etkili parametre kombinasyonlarının elde edilmesine de olanak sağlamaktadır (Basmacı vd., 2018).



Şekil 13. Parametrelerin Etkileşiminin Maksimum Çekme Kuvveti Üzerine Etkisi; a) Zaman-Sıkıştırma Kuvveti, b) Akım – Zaman, C) Akım – Sıkıştırma Kuvveti

SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrik direnç kaynağı proses parametrelerinin, kaynak çekme dayanımına olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Simufact Welding paket programı kullanılarak hem elektrik direnç kaynak analizleri hem de çekme analizleri tamamlanmıştır. Üç farklı kaynak akımı, sıkıştırma kuvveti ve kaynak süresi değişken parametre olarak incelenmiştir. Kaynak analizlerinden elde edilen nümerik sonuçlar, çekme analizinin girdisi olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen kaynak ve çekme analizleri sonucunda, kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen çıktılar varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilerek, kaynak proses parametrelerinin dayanım üzerine olan etkisi derinlemesine incelenmiştir. İncelenen sınır değerler arasında hem kaynak çapı, hem de çekme kuvveti için akım, zaman ve sıkıştırma kuvvetine

bağlı olarak fonksiyonlar oluşturulmuştur. Bu sayede incelenen sınırlar içerisinde herhangi bir değer için sonuç üretmek mümkün olacaktır. Gerçekleştirilen, kaynak ve çekme analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Kaynak çapı ve çekme kuvveti arasında benzer ilişki olduğu tespit edilmiştir. Kaynak çapının artması ile birlikte çekme kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Kaynak çapının artması ile birlikte bağlantı bölgesinin alanı arttığı için daha dayanıklı kaynaklar elde edilmiştir. Kaynak akımının ve süresinin artması ile birlikte, daha büyük çapta kaynak bölgesi ve dayanım elde edilmektedir. Sıkıştırma kuvvetinin artması ile birlikte kaynak çapının ve dayanımın azaldığı görülmektedir. İstatistiksel olarak en anlamlı ve etkili parametrenin akım olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde zaman parametresinin de anlamlı ve etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan model incelendiğinde, sıkıştırma kuvvetinin sonuçlar üzerinde istatistiksel olarak anlamsız olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın ardından elde edilen nümerik sonuçlar, deneysel çalışma ile desteklenecek olup oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğrulanması sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR

Simufact Welding paket programının bu çalışma için kullanılmasını sağlayan MSC Software ve BİAS Mühendislik firmalarına yazarlar olarak teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Antika, Y. E., Tatlı, Z., Çalışkan, F., & Tehçi, T. (2018). Effect of the Resistance Spot Welding Parameters in TRIP and DP Steels on Mechanical Properties. *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 13 (3), 217–228.
- Akkuş, H. (2021). AISI 1040 Çeliğinin İşlenebilirliği Sırasında Oluşan Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Farklı Tahmin Modelleri ile Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (2), 84-92.
- Bacak, S., Varol Özkavak, H., & Tatlı, M. (2021). FDM Yöntemi ile Üretilen PLA Numunelerin Çekme Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9 (1), 209-216.
- Basmacı, G., Kırbaş, İ., Ay, M., & Peker, M. (2018). Karma Taguchi ve Yüzey Yanıt Yöntemi Kullanılarak ASTM B574 (Hastelloy C-22)'in Tornalanması Esnasındaki İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi ve Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu. *Sakarya University Journal of Science*, 22, 761-771.
- Croarkin, C., & Tobias, P. (2015). Engineering Statistics e-Handbook. Erişim Adresi: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> Erişim Tarihi: 05.10.2015.
- Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ., Kumru, U.C. (2016). Resistance Spot Welding Applications in Automotive Industry, *Mühendis ve Makina*, 57 (673), 48 – 53.
- Ertek Emre, H. (2019). Strength Optimization of Resistance Spot Welded TWIP Steel by Taguchi Method. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 778–787.
- Gürbüz H., Baday Ş., & Hamarat, İ. (2019). CNC Tel Elektro Erozyon Tezgâhında Tel Elektrot Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16 (1), 20-29.
- Güler Özgül, H., & Arslan, S. (2018). Investigation of the Effects of Different Electrical Resistance Welding Parameters on Strength. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 673–679.
- Kekik, M., Aslanlar, S., & Apay, S. (2021). Optimization of Welding Parameters of AHSS Sheet Metals in Electric Resistance Spot Welding by Taguchi Method. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 702–711.
- Özçatalbaş, Y., Kuştutan, G., & Arabacı, U. (2018). Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties in Resistant Welding Joint of AISI 304 Stainless Steel. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2), 294–307.
- Özlu, B., Akgün, M., & Demir, H. (2019). AA 6061 Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Analizi ve Optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 151-158.

- Tibet, Y., & Çoruh, S. (2017). Akü Cüruflarının Killerle İmmobilizasyonu: Full Faktoriyel Dizayn Analiz. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (4) , 74-80 .
- Türk, T. (2017). Merkezi Kompozit Tasarımı Kullanılarak Bakır Cürufundan Arsenik Liçinin İncelenmesi. *Yerbilimleri*, 37, 193-202.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 09.09.2021
Kabul Tarihi : 08.11.2021

Received Date : 09.09.2021
Accepted Date : 08.11.2021

KOMPOZİT MALZEMELERİN CHARPY DARBE TESTİ SONRASI ULTRASONİK C-SCAN YÖNTEMİ İLE HASAR ANALİZİ

DAMAGE ANALYSIS OF COMPOSITE MATERIALS BY ULTRASONIC C- SCAN METHOD AFTER CHARPY IMPACT TEST

Burak ÖZTAŞ^{1*} (ORCID: 0000-0002-8789-155X)

Yasemin KORKMAZ¹ (ORCID: 0000-0000-0002-0030-6259)

H. İbrahim ÇELİK² (ORCID: 0000-0002-1145-6471)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

² Gaziantep Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Burak ÖZTAŞ, burakoztas46@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası absorblanan enerji ile oluşan iç hasar görüntüsü araştırılmıştır. 14 kat karbon ve 14 kat cam dokuma kumaştan oluşturulan kompozit yapılarda matris malzeme değişkeni sabit tutularak vakum infüzyon yöntemi ile numuneler aynı boyutlarda üretilmiştir. Üretilen bu numuneler Charpy darbe test cihazı ile darbeye maruz bırakılmıştır. Numunelere darbe öncesinde ve sonrasında doğrudan geçişli ultrasonik test (TTU) yöntemine göre muayene yapılmıştır. Elde edilen C-Tarama görüntülerinde görüntü işleme yöntemi kullanılarak, oluşan iç hasar alanı hesaplanmıştır. Sonuç olarak; Charpy test cihazından alınan enerji absorblama oranı ile hasar yayılımı ve hasarlı bölgenin kapladığı alan arasında doğru orantı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, charpy testi, hasar analizi, ultrasonik görüntüleme, görüntü işleme

ABSTRACT

In this study, the image of internal damage caused by the energy absorbed after impact in fiber reinforced composites was investigated. In composite structures made of 14 layers of carbon and 14 layers of glass fabric, the matrix material variable was kept constant and the samples were produced in the same dimensions by vacuum infusion method. These produced samples were subjected to impact with Charpy impact tester. The samples were examined according to through transmission ultrasonic test (TTU) method before and after the impact. The resulting internal damage area was calculated using image processing methods from the C-Scan images. As a result; It has been understood that there is a direct proportionality between the energy absorption rate from the Charpy test device and the damage spread and the area covered by the damaged area.

Keywords: Composite, charpy impact test, damage analysis, ultrasonic imaging, image processing

GİRİŞ

Kompozit malzemeler, yüksek maliyetlerine rağmen yüksek özgül mukavemet, spesifik sertliği ve korozyon direncinin sayesinde son yıllarda mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedirler. Geleneksel kaynakların tükenmesi ve çevre kirliliği gibi önemli faktörler her geçen gün bu alana olan ilgiyi arttırmaktadır. Özellikle elyaf takviyeli kompozitler yanı sıra metal malzemelere kıyasla performans/ağırlık oranları nedeniyle spor endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hoa, 2009; Mazumdar, 2014).

Küçük hataların istenmeyen sonuçlar doğurabileceği havacılık endüstrisi gibi kritik alanlarda kullanılan kompozit malzemelerdeki hasar davranışlarının tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde geleneksel malzemelere göre hasar analizinin yapılması, kırılma tokluğunun anlaşılması zordur. Çünkü elyaf takviyeli kompozitler lif kırılması, ara yüzden lif ayrılması ve delaminasyon gibi metal malzemelerde görülmeyen karmaşık bir hasar mekanizmasına sahiptir (Hayman et al., 2007; Lauderdale & Stewart, 2010; Richardson et al., 1996; Thollon & Hochard, 2009). Bu sebeple malzeme özelliklerini incelenmek ve darbe davranışlılarını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir.

Günümüzde kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla sarkaç testleri (Izod ve Charpy), balistik testler ve ağırlık düşürme testleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Ceyhun & Turan, 2003). Hufenbach vd. (2008) kompozit yapıların darbe hasar direncini etkileyen temel parametreleri belirlemek için Charpy testi uygulayarak, karbon takviyeli kompozitlerin darbe altında incelemiştir. Kahtoff (2004) Charpy darbe testi ile cam/epoksi kompozitin farklı sıcaklıklarda dinamik hasar karakteri üzerine çalışmıştır. Shokrieh vd. (2011) -30°C ila 23°C sıcaklık değerlerinde E-cam/epoksi kompozitlere Charpy testi kullanarak 10, 15 ve 30 J enerji seviyelerinde darbe uygulamış, düşük sıcaklık altında cam/epoksi kompozitlerin dinamik kırılma davranışını incelemiştir. Farsani vd. (2014) bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitlere mikro cam tozu ilavesinin Charpy darbe davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Charpy metodu gibi testler darbe ile malzeme üzerinde tahribat yaratan ölçüm yöntemleridir. Öte yandan kompozit malzemenin yapısal durumunu belirlemek için X-ışını, termografi, ultrasonik test gibi çeşitli tahribatsız test teknikleri kompozit malzemelerdeki farklı kusurları karakterize etmek için yaygın olarak kullanılır (Chakrapani et al., 2013; Munoz et al., 2016; Wu et al., 1995). Ultrasonik testler taşınabilirliği ve geniş bölgeleri nispeten kısa bir süre içinde inceleme yeteneği nedeniyle kompozit malzemelerin muayenesinde sık kullanılır hale gelmiş, kompozit malzemelerde görülen yaygın kusurların tespitinde etkinliğini kanıtlamıştır (Bull et al., 2013). Ultrasonik yöntem, ses dalgalarının malzemenin içinden geçerken parçacıklarla etkileşerek yüksek frekanslarda sönümlenmesi, saçılması ve yansması olgusuna dayanmaktadır. Kompozit yapı incelemesi için kullanılan başlıca test tekniklerinden biri ultrasonik "C-tarama" tekniğidir. Bu uygulama, yayılan/alınan dalga zayıflamasının ve bir uçuş haritasının zamanının düzlemsel görüntülerini verir (Adams & Cawley, 1988; Cawley et al., 1985; Hsu et al., 2000; Kroworz et al., 2018).

Literatürde, çeşitli hataların ve hasarların (düşük hızlı darbe testi, üretim hataları ve gömülü kusurlar) analizi için karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitler başta olmak üzere birçok kompozit malzemenin incelenmesinde ultrasonik C-tarama tekniğinin kullanıldığı görülmektedir (Abdullah, 2021; Arhamnamazi et al., 2019; Hasiotis et al., 2011; Iskandarani, 2019; Santos et al., 2021; Selver et al., 2021; Tabrej et al., 2021; Tuo et al., 2019; Yolacan, 2018). Bahsedilen yöntemlerin aksine Charpy testi sonrası çoğunlukla yapı bütünlüğünün korunamaması nedeniyle sayısal modelleme ve kırılan parçaların mikroskopik görüntüleri üzerinden hasar analizi yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan analizlerde kompozit malzemelerin karmaşık iç yapıları nedeniyle başarılı sonuçlar elde etmek zorlaşmaktadır (De Almeida et al., 2019; Hufenbach et al., 2008; Nascimento et al., 2018; Pereira et al., 2017).

Bu çalışmada, literatüre farklı bir bakış açısı geliştirmek amacı ile üretilen kompozitlere uygulanan Charpy darbe testi sonrası oluşan hasarın yapısı, yayılımı tahribatsız ultrasonik muayene yöntemi ile incelenmiştir. Alınan çıktılar geliştirilen görüntü işleme algoritmaları vasıtasıyla işlenmiş, darbe sonrası oluşan yapısal iç hasarın yönelimi ve alan hesabı gerçekleştirilmiştir.

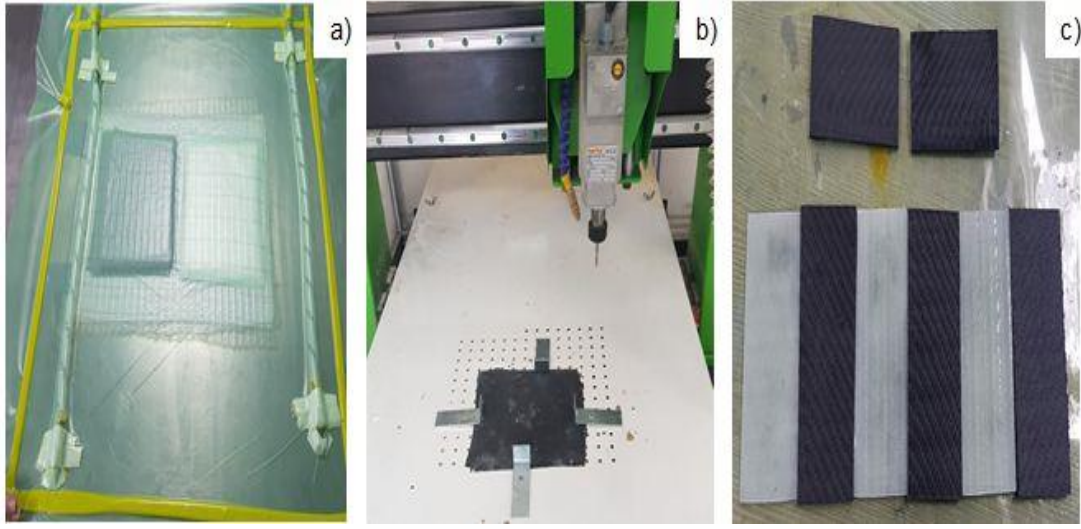
MATERYAL VE METOD

Üretim

Bu çalışmada, 2/2 dimi doku yapısına sahip, 245 g/m² gramajlı karbon kumaş ve 2/2 dimi doku yapısına sahip, 280 g/m² gramajlı cam kumaş kullanılarak iki farklı numune üretilmiştir. Bu kumaşlar 150 mm x 150 mm olacak şekilde 14 kat kesilmiştir. Kesilen cam ve karbon dokuma kumaşlar [0°/0°]₁₄ serim yönünde yerleştirilmiştir. Hazırlanan her iki numuneye matris malzeme olarak epoksi reçine (MGS LR160 Hexion Inc) ve epoksi ağırlığının %25'i kadar sertleştirici (MGS LR160 Hexion Inc) vakum infüzyon yöntemi kullanılarak emdirilmiştir (Şekil 1a). Reçine transferi sonrası 1 saat süreyle 80°C'de sıcaklıkta kürlenerek karbon dokuma kumaş/epoksi (CFRP) ve cam dokuma kumaş /epoksi (GFRP) kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler test boyutlarına göre CNC makinesinde kesilmiştir (Şekil 1b, Şekil 1c).

Tablo 1. Karbon ve Cam Dokuma Kumaş Özellikleri

Kumaş Tipi	İplik numarası (tex)		Sıklık (Tel/cm)		Gramaj (g/m ²)
	Çözü	Atkı	Çözü	Atkı	
Cam	200	200	6	6	280
Karbon	200	200	6	6	245

**Şekil 1.** (a) Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Numunelerin Üretimi (b) CNC ile Numunelerin Kesilmesi (c) Hazırlanmış Numuneler

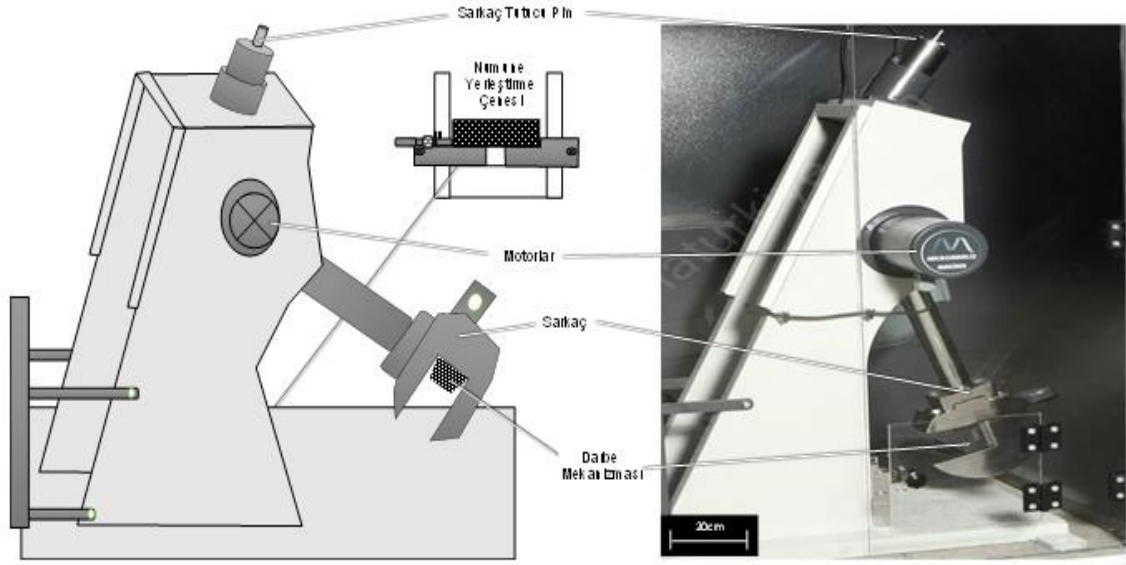
Üretilen kompozit malzemelerin kalınlık ölçer (kumpas) vasıtasıyla kalınlıkları ölçülmüş, ASTM D 792-91 standardına göre yoğunluk ve ASTM D 3171 standardına göre lif hacim oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ancak CFRP numunelerin hacim oranı ölçümü esnasında karbon liflerinin yanma probleminden dolayı, bu numunelerin lif hacim oranı ölçümü teorik denklem (Selver & Kaya, 2019) kullanılarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen testler 2 tekrarlı olarak yapılmış, sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Numune Adı	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Lif hacim oranı (%)
CFRP	4	1.393	47.63
GFRP	4	1.726	49.12

Charpy Darbe Testi

Malzememin performans davranışı ile ilgili bilgi sahibi olabilmek için Charpy test cihazında ISO 179-1:2010 standardına uygun olarak her bir kompozit seti için 3 tekrarlı test yapılmıştır. Charpy test cihazı metallerin yüksek gerinim oranlı üç noktalı bükülme testi için geliştirilmesine rağmen son dönemlerde kompozit malzemeler üzerindeki darbe çalışmalarının yaygın olarak kullanılmaktadır (Farsani, Khalili, & Daghigh, 2014). Test düzeneği, 85 mm x 40 mm x 4 mm boyutlarına sahip numune, numunenin yerleştirildiği çene ve makine gövdesine bağlı dönen bir kola sabitlenmiş belirli bir kütleye sahip sarkaçtan oluşmaktadır (Şekil 2). Cihazın çalışma prensibine göre dairesel bir yörüngeyi takip ederek salınan sarkaç kolu sahip olduğu kinetik enerjiyi test numunesine çarparak aktarır. Yapılan testlerde, sarkaç çekicinin kütlesi ve salınım kol uzunluğundan dolayı oluşan hız sayesinde darbe esnasında 50 J’luk depolanmış bir enerji oluşturulmuştur.



Şekil 2. Mikroanaliz Charpy Test Cihazı

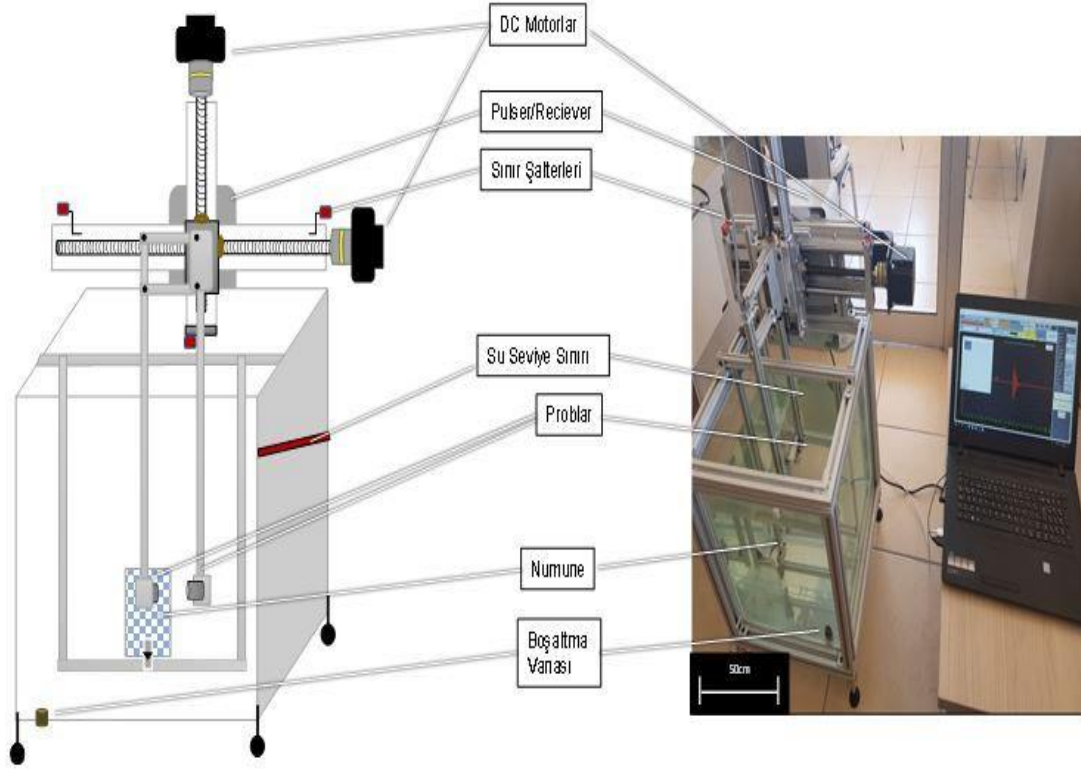
Ultrasonik Muayene

Çalışmanın ikinci kısmında, maruz kalınan darbe sonucunda numunelerde oluşan hasarın yönelimi ve hasarlı alan tespiti için ultrasonik C-tarama testi uygulanmıştır. Bunun için numunelerin ultrasonik muayenesi daldırma tipi US100 ultrasonik görüntüleme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daldırma tipi olarak adlandırılan sistemlerde malzeme ile prob arasında bir ara yüzey oluşturularak saçılımı azaltma amacıyla numune bir su tankı içerisinde muayene edilir. Ultrasonik muayene yapılan kompozit malzemelerin sahip oldukları karmaşık yapı itibariyle geri yansıyan ses sinyallerinin genliği malzeme içerisinden geçerek karşıya ulaşan sinyallerin genliğinden azdır. Bu sebeple sinyal saçılımının yüksek ve hataların büyük olduğu durumlarda doğrudan geçişli ultrasonik test (TTU) yöntemi tercih edilir. Bu yöntemde karşılıklı biri verici diğeri de alıcı olarak görev yapan iki prob kullanılır (Şekil 3). TTU ile gerçekleştirilen testler malzemenin içinden geçerken zayıflayarak alıcı proba ulaşan sinyaller de dahi süreksizlikleri tespit etmekte büyük başarı göstermektedir (Mix, 2005).



Şekil 3. TTU Çalışma Prensibi

Bu çalışmada kullanılan US100 cihazı bilgisayar kontrollü olup kademeli motor sürücülerini ile donatılmış otomatik bir daldırma sistemidir (Şekil 4). Burada karşılıklı iki probun senkronize hareketine ihtiyaç duyulduğundan dolayı, elle muayene gerçekleştirmek zordur ve bunun için otomatikleştirilmiş sistemlerde kullanılmaktadır. Şekilde 4'de görülüşü gibi su tankına yerleştirilen numunelerden, 1 MHz frekansa sahip daldırma tipi problemler ile sistemde ilk görüntüler elde edilmiştir.



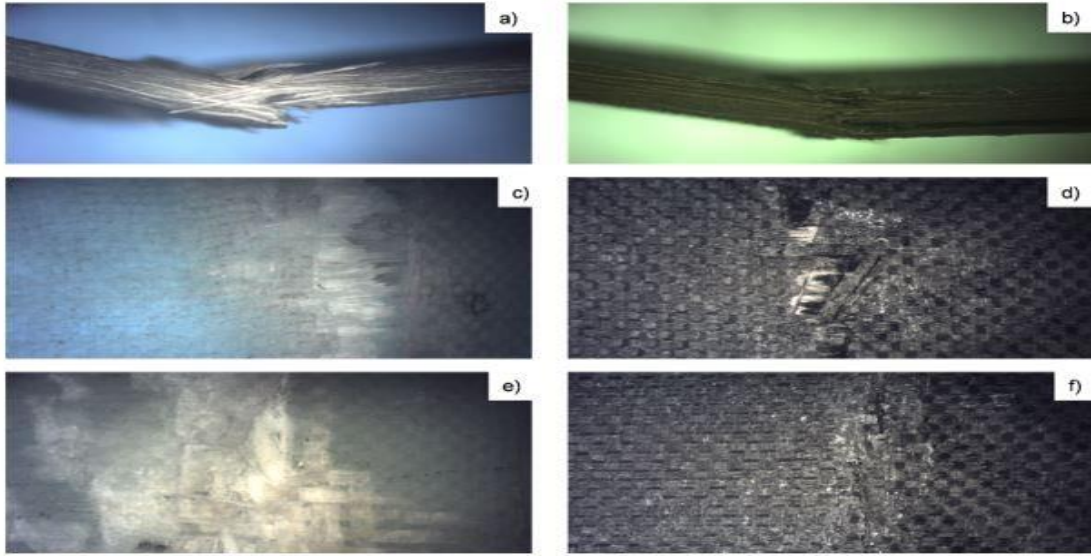
Şekil 4. US100 Ultrasonik Test Cihazı

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Kompozit malzemelerin son yıllarda kullanıldıkları alanlar itibariyle malzeme iç yüzeyi hakkında elde edilecek bilgiler büyük önem kazanmıştır. Genel olarak malzemelerde gerçekleştirilen darbe testleri sonrası elde edilen veriler malzeme tarafından absorbe edilen enerjiyi ve malzemenin dayanım sınırlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Darbe sonrası oluşacak hasar yönelimi ve hasarlı bölgenin kapladığı alan malzemenin kullanım yerleri açısından önemli bilgiler vermektedir. Örneğin bir uçağın kanat kısmında kullanılan kompozit malzemenin darbe ile karşılaştığında göstereceği hasar yöneliminin ve hasar boyutlarının önceden bilinmesi, o yön üzerine yapılacak kuvvetlendirme ile riski azaltacaktır. Bu nedenle gerçekleştirilen Charpy darbe testleri sonrası numunelere ultrasonik muayene yapılmıştır. Numune setine 50J enerji seviyesinde uygulanan Charpy darbe testi sonrası absorbe edilen enerji miktarı Tablo 3'de numunelerde oluşan hasarın mikroskopik görüntüleri Şekil 5'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Charpy Darbe Testi Sonrası Absorbe Edilen Enerji Miktarı

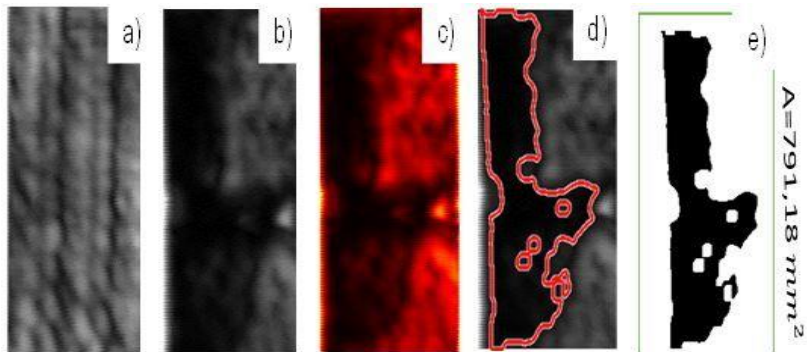
Numune Adı	Ortalama Absorbe edilen Enerji (J)	Standart Sapma	Hesaplanan Hasarlı Alan (mm ²)
CFRP	23.37	2.33	484.39
GFRP	31.08	2.23	791.18



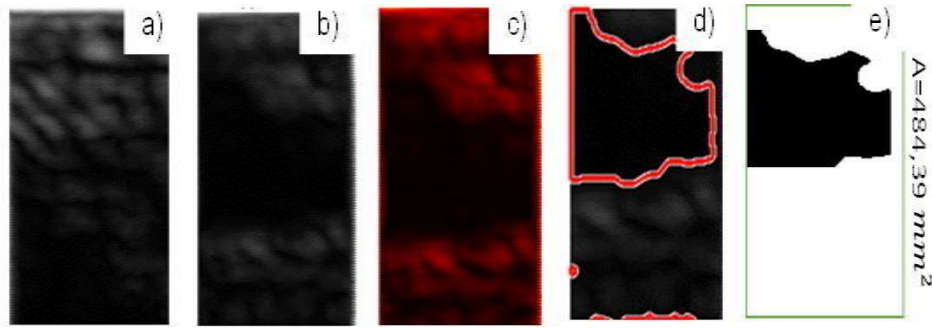
Şekil 5. Charpy Testi Sonrası (a) Cam Kompozit Numunenin Enine, (b) Karbon Kompozit Numunenin Enine, (c) Cam Kompozit Numunenin Arka Yüzeyi, (d) Karbon Kompozit Numunenin Arka Yüzeyi, (e) Cam Kompozit Numunenin Ön Yüzeyi, (f) Karbon Kompozit Numunenin Ön Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüleri

Bu çalışmada, karbon ve cam dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelerde Charpy darbe testi sonrası oluşan hasarları tespit etmek için Ultrasonik C-tarama yöntemi kullanılmıştır. US 100 test cihazı ara yüzünden alınan gri görüntü formatındaki ilk görüntüler görüntü işleme algoritmaları ile düzenlemiştir. İlk olarak üretimden kaynaklı hataların tespiti için darbe testi öncesi üretilen numunelere ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Charpy testi sonrası numune formunda ve yapısında meydana gelen kırılmalar dolayısıyla numune setlerinden ultrasonik muayeneye uygun olan birer adet CFRP, GFRP numune seçilmiştir.

Charpy darbe testi öncesi (Şekil 6a, Şekil 7a,) ve sonrası numuneler ultrasonik C-tarama yöntemi ile ölçülmüş gri seviye görüntüler elde edilmiştir. Gri seviye görüntülere uygulanan “Gaussian” görüntü işleme filtresi ile geçişler yumuşatılmış, görüntü iyileştirilmiştir (Şekil 6b, Şekil 7b). Elde edilen filtrelenmiş görüntüler “hot” renk haritası kullanılarak RGB renk uzayına dönüştürülmüş (Şekil 6c, Şekil 7c) hasar yöneliminin daha net görünmesi sağlanmıştır. Filtrelenmiş görüntüler üzerindeki hasarlı alanların yöneliminin daha iyi tespit edilebilmesi için bu alanlar işaretlenmiştir (Şekil 6d, Şekil 7d). Son olarak görüntüler “otsu” prensibi kullanılarak ikili görüntüye (binary) (Şekil 6e, Şekil 7e) dönüştürülmüş, hasarlı bölgenin siyah diğer bölgelerin beyaz olarak işaretlenmesi sağlanmıştır. Bu şekilde tüm toplam piksel değerinin hasarlı bölgede ki piksel oranına bölünmesiyle hasarlı alan mm^2 cinsinden hesaplanmıştır.



Şekil 6. Cam Kumaş Takviyeli Kompozit Numunenin (a) Hasar Almadan Önce, (b) Hasar Aldıktan Sonra, (c) RGB Formatına Çevrilmiş Renklendirilmiş, (d) Hasarlı Alan Seçilmiş, (e) İkili Görüntü (Binary) Formatına Çevrilmiş Görüntüleri



Şekil 7. Karbon Kumaş Takviyeli Kompozit Numunenin (a) Hasar Almadan Önce, (b) Hasar Aldıktan Sonra, (c) RGB Formatına Çevrilmiş Renklendirilmiş, (d) Hasarlı Alan Seçilmiş, (e) İkili Görüntü (Binary) Formatına Çevrilmiş Görüntüleri

Ortalama absorblanan enerji miktarı 31,08 J olan GFRP numunelerde hasar yönelimini numunenin bir köşesinden diğer köşesine kadar boyunca uzanmaktadır. Sarkaç çekici ile numunenin temas noktasında ise hasar boyutunun arttığı görülmüştür hasarlı alan yaklaşık 791,18 mm² olarak hesaplanmıştır. CFRP numunelerde ise ortalama 23,37 J enerji absorbe edilmiş olup hasarlı alan GFRP numuneler gibi boyuna yönelim göstermekten ziyade enine bir şerit şeklinde yönelmiştir. Hasar kümelenmesi sarkaç çekici ile numunenin temas noktasının biraz üst kısmında meydana gelmiştir. CFRP malzeme ile yapılan ultrasonik taramada hasarlı alan yaklaşık olarak 484,39 mm² olarak hesaplanmıştır. GFRP numuneler CFRP numunelere nazaran daha fazla enerji absorbe etmiş ve buna bağlı olarak hasarlı alan miktarı daha fazla hesaplanmıştır. CFRP numunelerde takviye malzemesi olarak kullanılan karbon lifinin karakteristik olarak cam liflerine göre daha kırılabilir olması nedeniyle, sarkaç çekici ile ilk temas noktasında yükün dağılımı gerçekleşmeden numune üzerinde bölgesel kırılmalar meydana gelmiştir. Böylelikle numunenin kuvvetle temas noktası ve etrafı haricinde hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. GFRP numunelerde ise hasar numune boyunca yayılmış ve numuneler daha fazla enerji absorbe etmişlerdir. Gerçekleştirilen darbe testi sonrası meydana gelen hasarlı alan ile absorbe edilen enerji miktarı arasında doğru bir orantı tespit edilmiştir.

SONUÇLAR

Üretilen numunelerin kırılırken ne kadar enerji absorbe edebileceği veya kırılma enerji miktarının önceden bilinmesi malzemenin kullanılacağı yerdeki performansını belirler. Gerçekleştirilen darbe testlerinde GFRP numuneler, CFRP numunelere göre daha fazla enerji absorbe etmiştir. GFRP numunelerin iç yapısında oluşan hasarlı bölge yönelimi ve hasarlı bölge boyutunun CFRP numunelere göre fazla olduğu tespit edilmiş, absorblanan enerjinin kompozit iç yapısında hasarlı bölgeyi artırdığı sonucuna varılmıştır. Ultrasonik C-tarama testi ve sonrasında geliştirilen görüntü işleme algoritmaları hasarı daha da belirginleştirmiş, hasar detaylarının incelenmesine fırsat sunmuş, hasar mekanizmaları yorumlanabilir hale gelmiştir. Sonuç olarak kullanılan ekipman ve uygulanan prosedürlerin, charpy darbe testi sonrası GFRP ve CFRP numunelerin incelenmesinde verimli olduğu ve hasar yöneliminin doğru bir şekilde tahminlenmesinin, yönelim bölgelerine yapılacak takviyeler ile malzeme ömrünün uzatılmasına ve malzeme veriminin artırılmasına yarar sağlayacağı anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2018/4-14 D nolu proje kapsamında KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ- BAP KOORDİNASYON BİRİMİ tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Abdullah, S. S. (2021). Low Velocity Impact Testing and Post-impact Analysis Through Compression After Impact (CAI) and C-Scan. In *Impact Studies of Composite Materials* (pp. 185-194): Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1323-4_12

Adams, R., & Cawley, P. J. N. i. (1988). A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. 21(4), 208-222. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90333-1](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90333-1).

- Arhamnamazi, S. A., Bani Mostafa Arab, N., Refahi Oskouei, A., Aymerich, F. J. J. o. A., & Mechanics, C. (2019). Accuracy assessment of ultrasonic C-scan and X-ray radiography methods for impact damage detection in glass fiber reinforced polyester composites. 5(2), 258-268. <https://doi.org/10.22055/JACM.2018.26297.1318>
- Bull, D., Helfen, L., Sinclair, I., Spearing, S., Baumbach, T. J. C. S., & Technology. (2013). A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage. 75, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.12.006>
- Cawley, P., Woolfrey, A., & Adams, R. J. C. (1985). Natural frequency measurements for production quality control of fibre composites. 16(1), 23-27. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90654-8](https://doi.org/10.1016/0010-4361(85)90654-8)
- Ceyhun, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. 44(516), 35-41.
- Chakrapani, S. K., Dayal, V., & Barnard, D. J. R. i. N. E. (2013). Detection and characterization of waviness in unidirectional GFRP using Rayleigh wave air coupled ultrasonic testing (RAC-UT). 24(4), 191-201. <https://doi.org/10.1080/09349847.2013.786158>
- De Almeida, O., Ferrero, J.-F., Escalé, L., & Bernhart, G. J. J. o. T. C. M. (2019). Charpy test investigation of the influence of fabric weave and fibre nature on impact properties of PEEK-reinforced composites. 32(6), 729-745. <https://doi.org/10.1177/0892705718778744>
- Farsani, R. E., Khalili, S., & Daghigh, V. J. I. J. o. D. M. (2014). Charpy impact response of basalt fiber reinforced epoxy and basalt fiber metal laminate composites: Experimental study. 23(6), 729-744. <https://doi.org/10.1177/1056789513511976>
- Hasiotis, T., Badogiannis, E., & Tsouvalis, N. G. J. S. v.-J. o. M. E. (2011). Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials. 57(3), 192-203. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.170>
- Hayman, B., Berggreen, C., & Tsouvalis, N. (2007). A review of the causes of production defects in marine composite structures and their influence on performance. Paper presented at the Proceedings of the 1st International Conference on Marine Structures.
- Hoa, S. V. (2009). Principles of the manufacturing of composite materials: DEStech Publications, Inc. Concordia University, Montreal, Canada ISSN 978-1-60595-421-9
- Hsu, D. K., Barnard, D. J., Peters, J. J., & Dayal, V. (2000). Physical basis of tap test as a quantitative imaging tool for composite structures on aircraft. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/1.1306256>
- Hufenbach, W., Ibraim, F. M., Langkamp, A., Böhm, R., Hornig, A. J. C. S., & Technology. (2008). Charpy impact tests on composite structures—an experimental and numerical investigation. 68(12), 2391-2400. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.008>
- Iskandarani, M. Z. (2019). Abnormalities in Ultrasonic (C-Scan) Images of Composite Structures: Impact Damaged Versus Hole Damaged. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2019.972.982>
- Kalthoff, J. J. C. P. B. E. (2004). Characterization of the dynamic failure behaviour of a glass-fiber/vinyl-ester at different temperatures by means of instrumented Charpy impact testing. 35(6-8), 657-663. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2003.11.008>
- Kroworz, A., Katunin, A. J. S. D., & Monitoring, H. (2018). Non-destructive testing of structures using optical and other methods: A review. 12(1), 1. <https://doi.org/10.3970/sdhm.2018.012.001>
- Lauderdale, S. F., & Stewart, R. J. R. P. (2010). COMPOSITES 2011—looking to the US industry's future. 54(6), 40-44. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70216-2](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70216-2)
- Mazumdar, S. (2014). Strategic growth opportunity in composites industry. Paper presented at the Composites Executives Forum. Washington, DC April.
- Mix, P. E. (2005). Introduction to nondestructive testing: a training guide: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-42029-3

- Munoz, V., Valès, B., Perrin, M., Pastor, M.-L., Weleman, H., Cantarel, A., & Karama, M. J. C. P. B. E. (2016). Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography. 85, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.011>
- Nascimento, L. F. C., Monteiro, S. N., Louro, L. H. L., da Luz, F. S., dos Santos, J. L., de Oliveira Braga, F., & Marçal, R. L. S. B. (2018). Charpy impact test of epoxy composites reinforced with untreated and mercerized mallow fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.03.008>
- Pereira, A. C., Monteiro, S. N., de Assis, F. S., Margem, F. M., da Luz, F. S., de Oliveira Braga, F. J. J. o. M. R., & Technology. (2017). Charpy impact tenacity of epoxy matrix composites reinforced with aligned jute fibers. 6(4), 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.004>
- Richardson, M., Wisheart, M. J. C. P. A. A. S., & Manufacturing. (1996). Review of low-velocity impact properties of composite materials. 27(12), 1123-1131. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7)
- Santos, M., Santos, J., Reis, P., & Amaro, A. J. M. T. (2021). Ultrasonic C-scan techniques for the evaluation of impact damage in CFRP. 63(2), 131-137. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0020>
- Selver, E., Öztaş, B., Uçar, M., Ucar, N., Baydogan, M., Altay, P., & Geygel, B. (2021). Mechanical and thermal properties of glass/epoxy composites filled with silica aerogels. *Plastics, Rubber and Composites*, 50, 1-13. <https://doi.org/10.1080/14658011.2021.1903142>
- Selver, E., & Kaya, G. (2019). Flexural properties of sandwich composite laminates reinforced with glass and carbon Z-pins. 53(10), 1347-1359. <https://doi.org/10.1177/0021998318800146>
- Shokrieh, M. M., Torabizadeh, M. A., & Fereidoon, A. (2011). Dynamic failure behavior of glass/epoxy composites under low temperature using Charpy impact test method. ISSN: 0975-1017 (Online); 0971-4588 (Print) <http://hdl.handle.net/123456789/12468>
- Tabrej, K., Sultan, M., Jawaid, M., Shah, A., & Sani, S. (2021). Low Velocity Impact, Ultrasonic C-Scan and Compression After Impact of Kenaf/Jute Hybrid Composites. In *Impact Studies of Composite Materials* (pp. 73-85): Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1323-4_6
- Thollon, Y., & Hochard, C. J. M. o. M. (2009). A general damage model for woven fabric composite laminates up to first failure. 41(7), 820-827. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.02.009>
- Tuo, H., Lu, Z., Ma, X., Zhang, C., & Chen, S. J. C. P. B. E. (2019). An experimental and numerical investigation on low-velocity impact damage and compression-after-impact behavior of composite laminates. 167, 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.043>
- Wu, D., Steegmüller, R., Karpen, W., & Busse, G. (1995). Characterization of CFRP with lockin thermography. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (pp. 439-446): Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1987-4_52
- Yolacan, G. (2018). Comparison of the impact damage resistance of non-hybrid and intra-ply hybrid carbon/E-glass/polypropylene non-crimp thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. <https://doi.org/10.1177/0731684418805561>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.09.2021
Kabul Tarihi : 25.10.2021

Received Date : 18.09.2021
Accepted Date : 25.10.2021

3 BOYUTLU YAZICIDA ABS VE PLA FİLAMENLER İLE FARKLI TABLA VE NOZUL SICAKLIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇEKME TEST NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF TENSILE TEST SAMPLES PRODUCED WITH A 3D PRINTER USING DIFFERENT BED AND NOZZLE TEMPERATURES WITH ABS AND PLA FILAMENTS

Muhammed Safa KAMER^{1*} (ORCID: 0000-0003-3852-1031)

Şemsettin TEMİZ² (ORCID: 0000-0002-6737-3720)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye, msafakamer@ksu.edu.tr
² İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye, semsettin.temiz@inonu.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammed Safa KAMER, msafakamer@ksu.edu.tr

ÖZET

3B yazıcı ile üretilen ürünlerin çeşitli parametrelere göre mekanik özelliklerinin tespit edilmesi, bu ürünlerin kullanılacakları yerlere göre üretim parametrelerinin seçilebilmesi açısından önem kazanmaktadır. Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3B yazıcıda ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) ve PLA (Polilaktik Asit) malzeme ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Tabla ve nozul sıcaklıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üretilen numunelerin kütleleri, sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. 3B yazıcı ile üretilen çekme numunelerinin boyutlandırılmasında ASTM D638-14 standardı kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda ABS ve PLA malzemelerin her ikisinde de farklı tabla sıcaklıklarının kütle, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, çekme dayanımı ve uzama bakımından çok fazla bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca ABS ve PLA malzemelerle üretilen çekme numunelerinde nozul sıcaklığının düşmesiyle kütle, üst yüzey sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin azaldığı, aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin arttığı, alt yüzey sertlik ve uzama değerlerinde ise kayda değer bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3 boyutlu (3B) yazıcı, eriyik yığıma modelleme (EYM), çekme testi, sertlik ve pürüzlülük ölçümleri, yazdırma sıcaklığı.

ABSTRACT

It gains importance to determine, the mechanical properties of the products produced with 3D printer according to various parameters, in terms of choosing the production parameters according to the places where these products will be used. In this study; tensile test specimens have been produced on the Ultimaker 2 Extended 3D-printer with ABS and PLA material using different bed and nozzle temperatures. The effects of bed and nozzle temperatures on mechanical properties have been investigated. Masses, hardness, surface roughness of the produced samples have been measured and tensile test has been performed on the produced samples. The ASTM D638-14 standard has been used for sizing the tensile specimens produced with 3D-printer. As a result of the tests, it has been determined that different bed temperatures did not have much effect in terms of mass, hardness, surface roughness, tensile strength and elongation in both ABS and PLA materials. In addition, it has been determined that the mass, upper surface hardness and tensile strength values decreased, the arithmetic average roughness values increased, and there was no significant change in the lower surface hardness and elongation values with the decrease of nozzle temperature in the tensile samples produced with ABS and PLA materials.

ToCite: KAMER, M.S., & TEMİZ, Ş., (2021). 3 BOYUTLU YAZICIDA ABS VE PLA FİLAMENLER İLE FARKLI TABLA VE NOZUL SICAKLIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇEKME TEST NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 341-358.

Keywords: 3 dimensional (3D) printer, fused deposition modeling (FDM), tensile test, hardness and roughness measurements, printing temperature.

GİRİŞ

3B yazıcı ile çeşitli ürünlerin üretilmesi sırasında birçok parametre yer almaktadır. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile üretim maliyetleri ve üretim süresi azaltılabilirken, üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinde de değişimler yaşanmaktadır. Bu nedenle 3B yazıcı ile üretilen ürünlerin çeşitli parametrelere göre mekanik özelliklerinin tespit edilmesi, bu ürünlerin kullanılacakları yerlere göre üretim parametrelerinin seçilebilmesi açısından önem kazanmaktadır. 3B yazıcı ile üretilen ürünlerin çeşitli parametrelere göre mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma yer almakta olup, bunlardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Andó vd. (2021) EYM teknolojisi ile üretilen farklı renklerde PLA'dan yapılan parçaların, ara yüzey yapışma özelliklerini araştırmışlardır. Farklı temas yüzey türleri ile hazırladıkları test numunelerini önce yapıştırmışlar sonra da çekme testi uygulamışlardır. EYM numuneleri yapıştırmada dikey yapışma ve yatay yapışma olarak iki farklı yöntem kullanmışlardır. Dikey yapışmanın her zaman yatay yapışmadan daha zayıf olduğunu tespit etmişlerdir. Solmaz & Çelik (2018) 3B yazıcı kullanarak ürettikleri bal peteği sandviç kompozitlerin basma yükü altındaki davranışlarını araştırmışlardır. 3 farklı hücre boyutuna ve 3 farklı hücre yüksekliğine sahip bal peteği hücrelerin üretilmesinde ABS ve PLA filament kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda PLA malzemenin ABS malzemeye göre daha üstün özelliklere sahip olduğunu belirlemişlerdir. Uzun vd. (2018) 3B EYM yöntemiyle çalışan yazıcı kullanarak yeni tip eğrisel evolvent profilli dişli üretmişler ve üretilen dişliler üzerinde geometrik ölçümler yaparak bu üretim yönteminin doğruluk değerlerini belirlemişlerdir. 3B yazıcı ile ürettikleri dişlinin diş profilinde yaptıkları ölçümlerde diş dibine yakın bölgelerde küçük bir pozitif sapma görülürken, dişin üst kısmına yakın bölgelerde negatif sapma tespit etmişlerdir.

3B yazıcılarla üretilecek ürünlerin kalitesini artırmak amacıyla çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Aslan & Yıldız (2020) otomobillerde stabiliteyi sağlamak için bir süspansiyon kolu üzerinde topoloji optimizasyonu yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak geliştirdikleri modellerin statik analizini yapmışlardır. Sonuçları, modelin ilk tasarımı ile karşılaştırmışlardır. Topoloji ve kafes yapısı optimizasyonundan sonra, karmaşık modeller üretmek için eklemeli imalat (3B yazıcı) kullanmışlardır. Karşılaştırma sonucunda olumlu sonuçlar elde etmişler ve araç elemanlarının tasarımında topoloji optimizasyonu ve kafes yapısal optimizasyonun kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Yaman (2019), EYM ile üretim yapan 3B yazıcılarda üretilecek ürünlere topoloji optimizasyonu yaparak, ürünlerin doğrudan üretilebilmeleri için makine komutları üreten bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirdiği yöntemde öncelikli olarak verilen parçanın tanımlanan koşullara göre topoloji optimizasyonu yapılmakta ve sonrasında parçanın içyapısı kabuklardan oluşacak şekilde üretim komutları oluşturulmaktadır. Yöntemin geçerliliğini ortaya koymak için farklı yaklaşımlarla üretilmiş olan yalın, dayanıklı kirişleri belirli yükler altında test etmiştir. Sonuç olarak, önerdiği yöntemle üretilen kirişlerin ağırlık-mukavemet oranlarının diğerlerine göre oldukça iyi olduğunu belirlemiştir. Yaman vd. (2016) yapılandırılmış, homojen olmayan bir içyapıya sahip yapay ağların 3B baskıları hakkında rapor hazırlamışlardır. Hareket sayısı baskı süresini ve yazdırılan ürünün kalitesini doğrudan etkilediğinden, malzeme bırakmayan yazıcı kafası hareketlerinin ve hızlı seyahatlerin ortadan kaldırılması çalışmalarının amacı olmuştur. Böylece aynı zamanda G-kodu dosya boyutlarının da azalmasını hedeflemişlerdir.

3B yazıcılarla üretilen ürünlerdeki büzülme problemlerini önlemek ve boyutsal doğruluğu sağlamak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Dilberoglu vd. (2019) EYM yöntemiyle üretim yapılan 3B yazıcılarla üretilen parçaların büzülme sorunlarını çözmeyi ve boyutsal doğruluğu iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Deliklerin/yuvaların boyutsal doğruluğundaki bozulmayı önlemek için delik çevresinden ürünün dış sınırlarına kadar yer alan yardımcı hatlardan yararlanmışlardır. Ayrıca üretilen ürünler üzerinden gerekli ölçümler alınarak, yeni üretilecek numunelerin büzülme davranışlarını tahmin edebilmek için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yaman (2018) EYM süreci kullanarak masaüstü 3B yazıcılarla üretilen ürünlerin deliklerindeki büzülmeyi telafi edecek bir iç tasarım metodolojisi geliştirmiştir. Önerdiği yöntemle, ürünlerin geometrik özelliklerine göre deliklerdeki büzülmeyi telafi etmek için çeşitli içyapılar inşa edilmesini öngörmüştür. Sonuç olarak, deliğin boyutsal doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmiştir.

3B yazıcılarla üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin çeşitlendirilmesi amacıyla katkılı filamentler kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Roj vd. (2020) EYM ile üretilen, 16 malzemeden yapılmış, üç yönde basılmış çekme numunelerini basınçla kalıplanmış bileşenlerle karşılaştırmışlardır. Sıradan filamentlere ek olarak metal, karbon, ahşap ve taş katkılı kompozit malzemeleri de araştırmışlardır. Sonuç olarak, mekanik özelliklerin bileşenlerin yoğunluklarına bağlı olduğu hipotezini desteklediğini belirlemişlerdir. Uzun & Erdogdu (2020), 3B yazıcı ile takviyesiz, %20 bakır takviyeli ve %20 karbon fiber takviyeli PLA kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri çekme testi ve üç nokta eğme testine tabi tutarak mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. PLA malzemesine bakır ve karbon fiber takviyelerinin eklenmesinin çekme ve eğilme mukavemetlerini azalttığını belirlemişlerdir.

3B yazıcılarla üretilen ürünlerde çeşitli dolgu deseni çalışmaları yapılmıştır. Torun vd. (2021) gyroid desenli 3B yazdırılmış PLA numunelerinin kırılma tokluğuna çeşitli doluluk oranlarının etkilerini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. İki boyutlu sonlu eleman modellemesi oluşturmuşlar ve çeşitli doluluk oranlarında gyroid PLA numunelerinin gerilme yoğunluk katsayılarının iki boyutlu fonksiyonlarını çıkarmışlardır. Numunelerin çekme modundaki kırılma tokluğu miktarının, kesme modundaki değerlerden çok daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, numunelerdeki doluluk oranlarının yüzdeleri arttıkça hem çekme hem de kesme kırılma tokluğunun arttığını tespit etmişlerdir. Yaman vd. (2019), farklı eklemeli üretim yöntemlerinde desenli girintiler oluşturmak için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Mevcut yöntemlerle üretim yapan 3B yazıcılarda desenli üretimler yapabilmek için tasarımda oluşturulacak girintiler, tasarım dosyalarının boyutunu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmayla önerilen yöntemde basılı ürünün enine kesitlerini temsil eden bir dizi ikili görüntü üzerinde morfolojik işlemler kullanarak, dokulu nesnelere üretirken bu tür sorunların üstesinden gelmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca önerdikleri yöntemin, hemen hemen her 3B yazıcının mevcut donanımlarının kullanılarak uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

3B yazıcılarla üretilen ürünlerin mekanik mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli sıcaklık değerleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında nozul ve tabla sıcaklıkları değiştirilmiş, bir kısmında ise yazdırılan ürünlere farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Gupta vd. (2021) sabit 3B baskı parametreleri ve ortam koşulları ile EYM 3B baskılı PLA parçalarının mekanik mukavemeti üzerinde ısıl işlemin etkisini araştırmışlardır. Her numune setini belirli bir sıcaklıkta 1 saat boyunca ısıl işlemden geçirmişler ve fırının kendisinde soğutulurken, bir dizi numuneyi işlenmeden bırakmışlardır. Maksimum 110 °C ısıl işlemde ve 65 °C yeniden kristalleşme sıcaklığının altında mekanik özelliklerin %4,88 ila %10,26 oranında iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Schirmeister vd. (2019) 3B yazıcı ile HDPE (high density polyethylene – yüksek yoğunluklu polietilen) malzeme kullanılarak üretilen parçaların Young modülünü, çekme mukavemetini ve yüzey kalitesini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla nozul çapı, nozul sıcaklığı, yazdırma hızı, yazdırma tablası sıcaklığı ve yazdırma tablası malzemesi gibi 3B yazdırma parametrelerini değiştirerek test numuneleri üretmişlerdir. Nozul çapı ve yazdırma hızının yüzey kalitesini etkilediğini ancak mekanik özellikleri etkilemediğini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3B yazıcıda ABS ve PLA malzeme ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Tabla ve nozul sıcaklıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Sonuçlar sadece gerilme-şekil değiştirme grafikleriyle bırakılmamış olup, tabla ve nozul sıcaklıklarının değişimiyle malzemedeki kütle değişimleri, sertlik değişimleri ve yüzey pürüzlülüğü değişimleri ayrı ayrı incelenmiş ve üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. Belirtilen değişkenlerin birbiri arasındaki ilişkiler de detaylı bir biçimde ele alınmıştır.

MATERYAL VE METOD

Çalışma kapsamında çekme test numunelerinin üretiminde “Ultimaker 2 Extended” (The Ultimaker 2 Extended specifications, 2020; The Ultimaker 2 Extended user manual, 2020) 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 1). Ultimaker 2 Extended 3B yazıcı teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

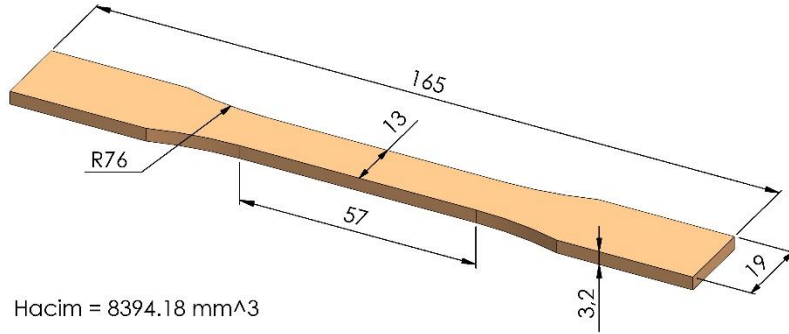


Şekil 1. Test Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Ultimaker 2 Extended 3B Yazıcı

Tablo 1. Ultimaker 2 Extended 3B Yazıcı Teknik Özellikleri

Baskı	
Baskı teknolojisi	- FFF / FDM (Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modeling) Erimiş Filament Üretimi / Erimiş Yığma Modellemesi
Baskı hacmi X/Y/Z	- Eksenler (X/Y/Z) Kartezyen koordinat sisteminde hareket etmektedir 223 mm / 223 mm / 305 mm
Katman çözünürlüğü	X/Y eksen hareketlerinde triger kayış-kasnak, Z eksen hareketinde vidalı mil kullanılmaktadır
Konumlandırma hassasiyeti X/Y/Z	200 mikron (0.2 mm) – 40 mikron (0.04 mm)
Filament çapı	12.5 mikron / 12.5 mikron / 5 mikron
Nozul çapı	2.85 mm
Yazdırma hızı	0.8 mm – 0.6 mm - 0.4 mm – 0.25 mm
Boşta gezme hızı	30 mm/s - 300 mm/s
Baskı yüzeyi	30 mm/s - 350 mm/s
Filament türleri	Cam tabla PLA / ABS / CPE
Bilgisayar yazılımı	
Birlikte verilen yazılım	Cura - Resmi Ultimaker Yazılımı
Dosya türleri	STL / OBJ / DAE / AMF
Desteklenen işletim sistemi	Windows / Mac / Linux
Dosya aktarımı	Bağımsız SD kart baskısı
Elektrik	
AC girişi	100 - 240 V, Yaklaşık 1.4 A, 50 - 60 Hz, Maks. 221 Watt
Bağlantı	Bağımsız SD kart baskısı
Fiziksel boyutlar	
Masaüstü alanı L/W/H	357 mm / 342 mm / 488 mm
Nakliye boyutları L/W/H	400 mm / 400 mm / 650 mm
Ağırlık	12.0 kg
Nakliye ağırlığı	21.0 kg
Sıcaklık	
Ortam çalışma sıcaklığı	15 - 32 °C
Depolama sıcaklığı	0 - 32 °C
Nozul çalışma sıcaklığı	180 - 260 °C
Isıtmalı tabla çalışma sıcaklığı	50 - 100 °C
Ses	
Ortalama işletme gürültüsü	49 dBA

Çekme test numunelerinin boyutlandırılmasında ASTM D638-14 standardı (ASTM D638-14, 2014) kullanılmıştır. Belirtilen standart ölçülerindeki çekme test numunesi 3B olarak bilgisayar ortamında SolidWorks CAD yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. ASTM D638-14 Standardı Tip I

Üretilen çekme numunelerinin kütleleri, sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve numunelere çekme testi yapılmıştır. Kütle ölçümleri KERN PLS 6200-2A (kapasite: 6200g, hassasiyet: 0,01g) hassas terazi ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri MITECH MH210 portatif sertlik ölçüm cihazıyla Shore D cinsinden yapılmıştır. Her numunenin üst yüzeyinde ve alt yüzeyinde 5 farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılarak ortalama değer hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, JENOPTIK Hommel-Etamic W5 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla Tablo 2’de verilen parametrelerde yapılmıştır. Her numunenin üst yüzeyinden ölçümler alınmıştır. Pürüzlülük cihazı üst yüzeyde yığıma yönüne 90° açılı (Şekil 3) olacak şekilde konumlandırılmış olup, 3 farklı noktadan ölçümler yapılarak ortalama değerler belirlenmiştir. Çekme testleri 100kN kapasiteli Zwick/Roell Z100 çekme test cihazıyla, 5mm/dk hızda ve ASTM D638 standardı kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Parametreleri

Ölçüm uzunluğu (lt)	4,8mm
Ölçüm hızı (vt)	0,5mm/s
Dalga boyu (lc)	0,8mm



Şekil 3. Yığıma Yönüne 90° Açılı Pürüzlülük Ölçüm Görüntüsü

Kullanılan filament (ABS filament ve PLA filament), yazdırma nozul ve tabla sıcaklıkları değiştirilerek ABS malzemede 5 farklı nozul sıcaklığı (80°C sabit tabla sıcaklığında; 260°C, 250°C, 240°C, 230°C, 220°C) ve 6 farklı tabla sıcaklığı (260°C sabit nozul sıcaklığında; 80°C, 70°C, 60°C, 50°C, 40°C, 30°C), PLA malzemede ise 6 farklı nozul sıcaklığı (60°C sabit tabla sıcaklığında; 240°C, 230°C, 220°C, 210°C, 200°C, 190°C) ve 4 farklı tabla sıcaklığı (240°C sabit nozul sıcaklığında; 60°C, 50°C, 40°C, 30°C) kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Her farklı parametre için üçer adet olacak şekilde, ABS malzeme ile 30 adet ve PLA malzeme ile 27 adet test numunesi üretilmiştir.

SolidWorks CAD yazılımı ile 3B olarak tasarımı yapılan çekme test numunesinin G-kodlarının oluşturulmasında Ultimaker markasının kendi yazılımı olan Cura CAM yazılımı kullanılmıştır. Tasarımın yazıcı tablası üzerindeki konumu, açısı vb. ayarlar yapıldıktan sonra Tablo 3’de belirtilen parametreler seçilerek tasarımın G-kodları oluşturulmuştur. Oluşturulan G-kodları SD kart yardımıyla 3B yazıcıya aktarılmıştır.

Tablo 3. Cura CAM Yazılımında Seçilen Parametreler

Yazıcı	Ultimaker 2 Extended with Olsson Block
Malzeme	Ultimaker ABS veya Ultimaker PLA
Nozul çapı	0,4mm
Katman kalınlığı	0,2mm
Duvar kalınlığı	0 mm
Üst/Alt kalınlığı	0 mm
Dolgu yoğunluğu	% 100
Dolgu deseni	Lines (+45°/-45° her katmanda değişmektedir)
Yazdırma hızı	60 mm/s
Boşta gezme hızı	120mm/s

ABS malzeme ile çekme test numunesi üretimi için 3B yazıcının yazdırma tablasının kalibrasyonu yapılmıştır. 3B yazıcıya Ultimaker marka ABS malzeme (Ultimaker ABS SDS, 2020; Ultimaker ABS TDS, 2020) takılmıştır. 3B yazıcının yazdırma tabla ve nozul sıcaklığı yukarıda belirtilen değerlere ayarlanmıştır.

PLA malzeme ile çekme test numunesi üretimi için 3B yazıcının yazdırma tablasının kalibrasyonu yapılmıştır. 3B yazıcıya Ultimaker marka PLA malzeme (Ultimaker PLA SDS, 2020; Ultimaker PLA TDS, 2020) takılmıştır. 3B yazıcının yazdırma tabla ve nozul sıcaklığı yukarıda belirtilen değerlere ayarlanmıştır.

Çekme test numunelerinin üretim işleminden önce, üretim sırasında numunenin ilk katmanının yazdırma tablasına yapışmasını sağlamak için yazdırma tablası üzerine stick yapıştırıcı (Uhu Stic Magic Blue) sürülmüştür.

ABS ve PLA filamentler 3B yazıcıda kullanıldıktan sonra tekrar paketlenmekte ve paketlerin içerisine nem alıcılar yerleştirilerek muhafaza edilmektedir. Ultimaker 2 Extended 3B yazıcıda filament ve üretilen ürün atmosfere açık ortamda olduğundan, filamentlerin ve üretilen numunelerin sadece 3B yazıcıda kullanılırken nem almaları söz konusu olabilecektir. Filamentlerin ve üretilen numunelerin tümü aynı şartlarda üretildiğinden, üretilen ürünlerin nem alma durumları bu çalışmada ihmal edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3B yazıcıda ABS ve PLA malzeme ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Tabla ve nozul sıcaklıklarındaki değişimin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak ABS malzeme ile üretilen çekme test numunelerine ait kütle, sertlik ve pürüzlülük değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Tabla sıcaklığının azalmasıyla üst yüzey sertlik değerlerinin ve aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin değişmediği, kütle ve alt yüzey sertlik değerlerinde ise 50~80 °C tabla sıcaklıkları arasında kayda değer bir değişimin olmadığı, 40 °C ve 30 °C tabla sıcaklıklarında ise kütle ve alt yüzey sertlik değerlerinin giderek azaldığı belirlenmiştir. ABS malzeme ile 40 °C ve 30 °C tabla sıcaklıkları ile yapılan üretimlerde, üretilen ürünün yazdırma işlemi sırasında yazdırma tablası üzerinden ayrılarak nozula doğru hareket eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4a, Şekil 4b). ABS malzemenin yazdırma işlemi sırasında nozula doğru olan hareketi, nozuldan çıkması gereken malzemeyi engellemeye yol açmakta olup, bu durum belirtilen tabla sıcaklıkları ile üretilen ürünlerin kütlelerinde ve alt yüzey sertlik değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

ABS malzeme ile üretilen ürünlerde nozul sıcaklığının azalmasıyla kütle ve üst yüzey sertlik değerleri azalırken, aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Alt yüzey sertlik değerlerinde ise 230~260 °C nozul sıcaklıkları arasında kayda değer bir değişimin olmadığı, 220 °C nozul sıcaklığında ise alt yüzey sertlik değerinin de azaldığı gözlenmiştir.

Tablo 4. ABS Filament İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numuneleri İçin Ölçümlerden Elde Edilen Veriler

Filament Türü	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Kütle (g)	Shore D Sertlik Değerleri		Aritmetik Ortalama Pürüzlülük Ra (µm)
				Üst Yüzey	Alt Yüzey	
ABS	260	80	8,78	56,9	71,0	5,607
ABS	260	70	8,81	58,2	70,9	5,873
ABS	260	60	8,75	54,4	73,2	5,587
ABS	260	50	8,65	54,4	71,4	5,122
ABS	260	40	8,57	56,1	67,2	5,272
ABS	260	30	8,02	58,8	59,6	5,769
ABS	260	80	8,78	56,9	71,0	5,607
ABS	250	80	8,71	54,3	73,3	7,014
ABS	240	80	8,58	51,8	72,3	9,705
ABS	230	80	8,38	50,2	73,7	10,361
ABS	220	80	8,03	46,3	63,1	12,428

Farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerine ait kütle, sertlik ve pürüzlülük değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Tabla sıcaklığının azalmasıyla kütle, sertlik ve aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinde kayda değer bir değişimin olmadığı belirlenmiştir.

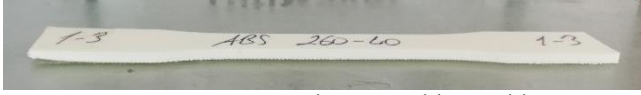
PLA malzeme ile üretilen ürünlerde nozul sıcaklığının azalmasıyla 210~240 °C nozul sıcaklıkları arasında kütle ve üst yüzey sertlik değerleri azalırken, aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. PLA malzeme ile 190 °C ve 200 °C nozul sıcaklıklarında üretilen ürünlerde çok fazla katman içi boşlukların oluştuğu, üretim sırasında PLA malzemenin nozuldan çıkmakta zorlandığı gözlenmiştir (Şekil 4c, Şekil 4d). Bu nedenle PLA malzeme ile 190 °C ve 200 °C nozul sıcaklıklarında üretilen ürünlerden elde edilen veriler değerlendirmeye alınmamıştır. Alt yüzey sertlik değerlerinde ise 220~240 °C nozul sıcaklıkları arasında kayda değer bir değişimin olmadığı, 210 °C nozul sıcaklığında ise alt yüzey sertlik değerinin de azaldığı gözlenmiştir.

Tablo 5. PLA Filament İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numuneleri İçin Ölçümlerden Elde Edilen Veriler

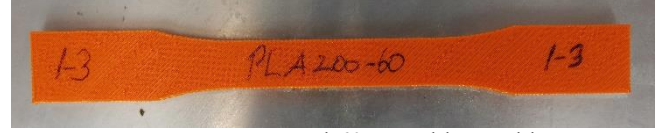
Filament Türü	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Kütle (g)	Shore D Sertlik Değerleri		Aritmetik Ortalama Pürüzlülük Ra (µm)
				Üst Yüzey	Alt Yüzey	
PLA	240	60	9,29	55,7	73,9	8,520
PLA	240	50	9,30	54,0	72,6	9,346
PLA	240	40	9,28	52,0	76,9	9,471
PLA	240	30	9,20	46,8	78,8	10,316
PLA	240	60	9,29	55,7	73,9	8,520
PLA	230	60	8,98	49,3	71,5	11,188
PLA	220	60	8,67	48,3	73,9	14,080
PLA	210	60	7,95	44,8	62,8	16,320
PLA	200	60	6,42	52,4	63,1	17,769
PLA	190	60	3,76	52,2	64,8	17,061

Tüm numunelerin üretiminde yazdırma hızı sabit tutulmuş olup, nozul sıcaklığının değiştiği durum göz önüne alındığında, her iki malzeme için de nozul sıcaklığının azalmasıyla malzemelerin ergime miktarı azalacağından, nozuldan çıkan malzeme miktarı da benzer şekilde azalmaktadır. Bu durum nozul sıcaklığının azalmasıyla üretilen test numunelerinin kütlelerindeki azalma olarak karşımıza çıkmaktadır.

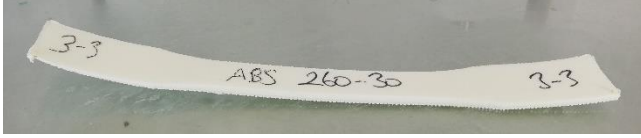
Farklı tabla ve nozul sıcaklıkları ile ABS ve PLA malzemeler kullanılarak üretilen çekme test numunelerinin tümünde alt yüzey sertlik değerlerinin üst yüzey sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Literatürde de benzer sonuçlara rastlanmıştır (Aydın vd., 2019). Tabla sıcaklığının ve alt yüzey üzerinde kalan yapıştırıcı kalıntılarının alt yüzey sertlik değerlerini artırdığı düşünülmektedir.



a. ABS 260 °C Nozul 40 °C Tabla Sıcaklığı



c. PLA 200 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



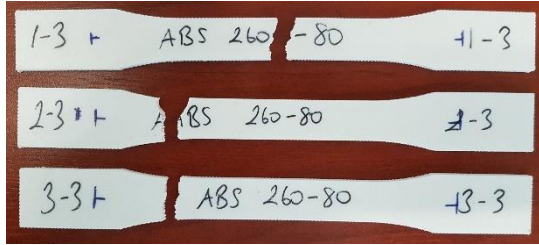
b. ABS 260 °C Nozul 30 °C Tabla Sıcaklığı



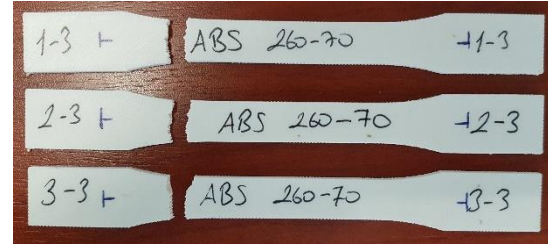
d. PLA 190 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı

Şekil 4. 3B Yazıcıda Ürün Yazdırılması Sonucunda Problem Oluştugu Gözlenen Numuneler

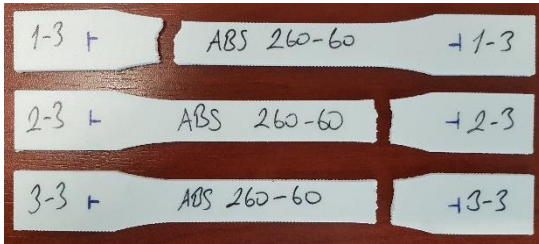
ABS malzeme kullanılarak farklı tabla ve nozul sıcaklıkları ile üretilen çekme test numunelerinin çekme testinden sonraki kopmuş görüntüleri Şekil 5 ve Şekil 6'de gösterilmiştir. Çekme test numunelerinin genel olarak en dar kesitte uç bölgelerden gevrek kırılma şeklinde kopmuş oldukları görülmektedir.



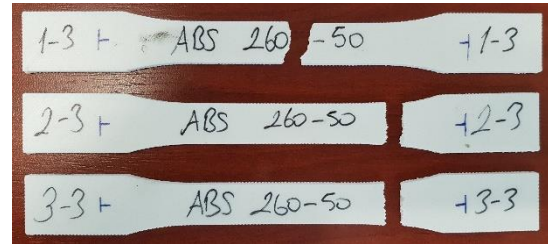
a. 260 °C Nozul 80 °C Tabla Sıcaklığı



b. 260 °C Nozul 70 °C Tabla Sıcaklığı



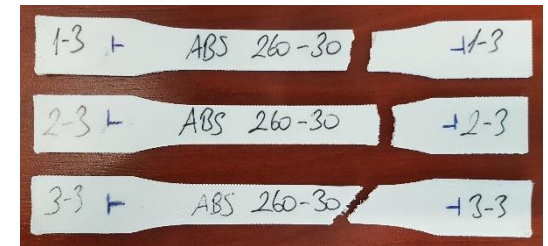
c. 260 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



d. 260 °C Nozul 50 °C Tabla Sıcaklığı



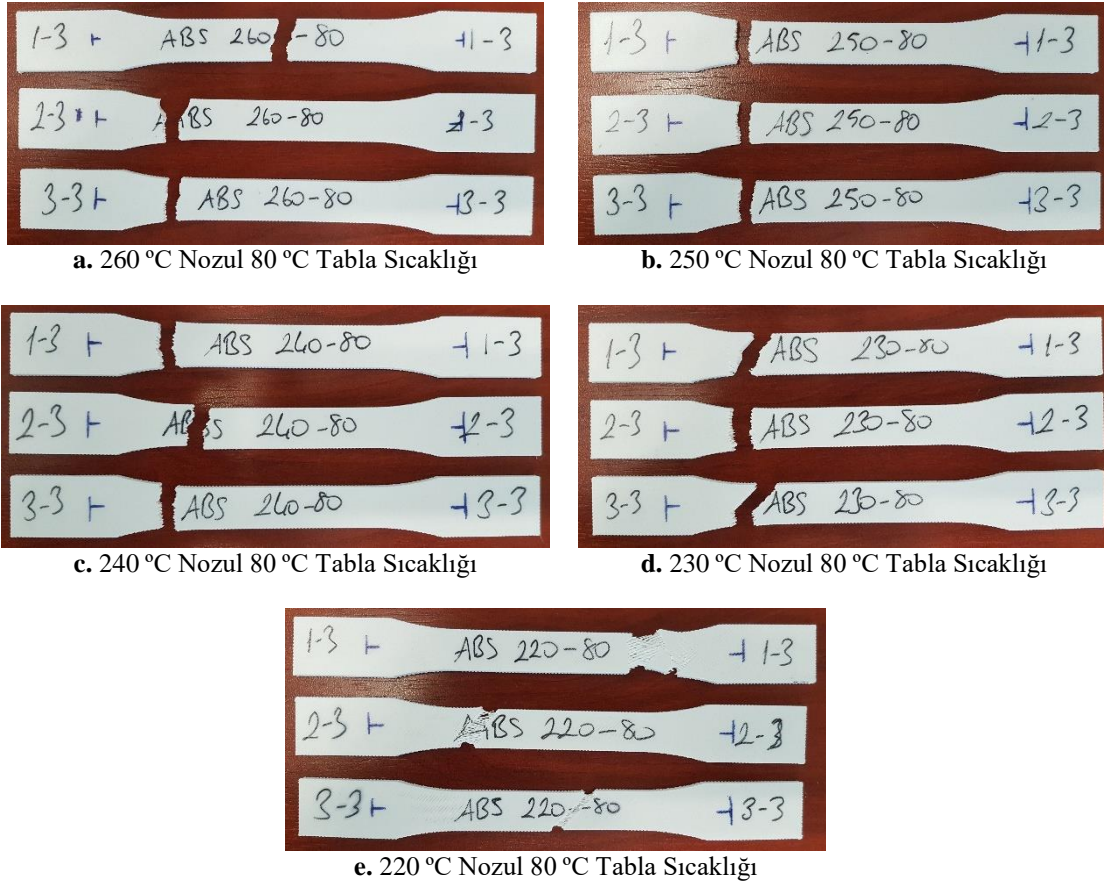
e. 260 °C Nozul 40 °C Tabla Sıcaklığı



f. 260 °C Nozul 30 °C Tabla Sıcaklığı

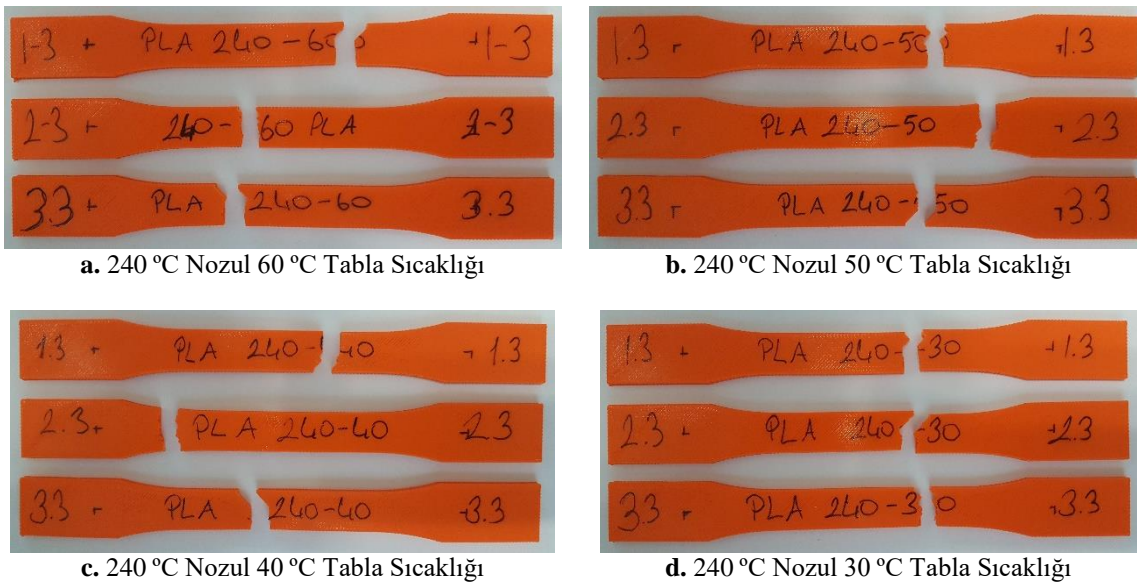
Şekil 5. ABS Filament İle Farklı Tabla Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numunelerinin Kopmuş Görüntüleri

220 °C nozul sıcaklığında üretilen ABS test numunelerinin katman içi bağlarının daha zayıf olduğu, bu nedenle bu numunelerin gevrek kırılma davranışı göstermeyip, sünek malzeme gibi davrandığı söylenebilir (Şekil 6e).



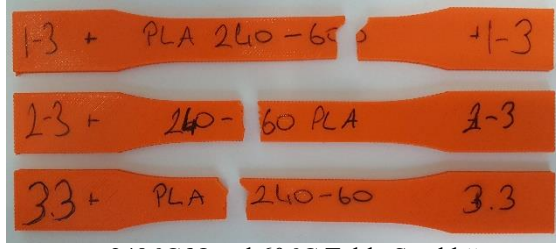
Şekil 6. ABS Filament İle Farklı Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numunelerinin Kopmuş Görüntüleri

PLA malzeme kullanılarak farklı tabla ve nozul sıcaklıkları ile üretilen çekme test numunelerinin çekme testinden sonraki kopmuş görüntüleri Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Çekme test numunelerinin genel olarak en dar kesitte orta bölgelerden gevrek kırılma şeklinde kopmuş oldukları görülmektedir.



Şekil 7. PLA Filament İle Farklı Tabla Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numunelerinin Kopmuş Görüntüleri

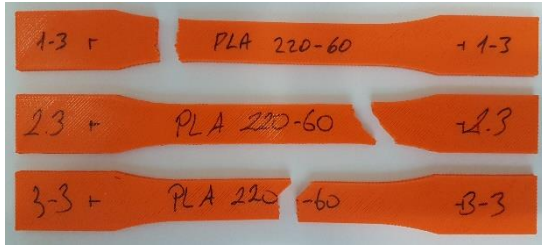
190 °C ve 200 °C nozul sıcaklıklarında üretilen PLA test numunelerinin katman içi bağlarının daha zayıf olduğu, bu nedenle bu numunelerin gevrek kırılma davranışı göstermeyip, sünek malzeme gibi davrandığı söylenebilir (Şekil 8e, Şekil 8f).



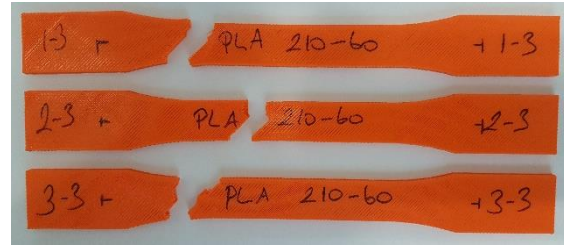
a. 240 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



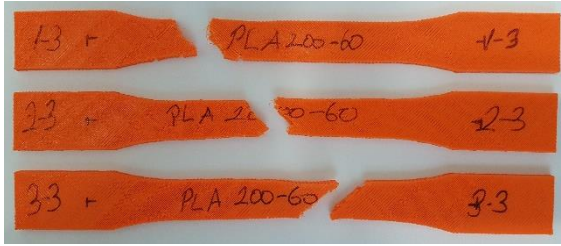
b. 230 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



c. 220 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



d. 210 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



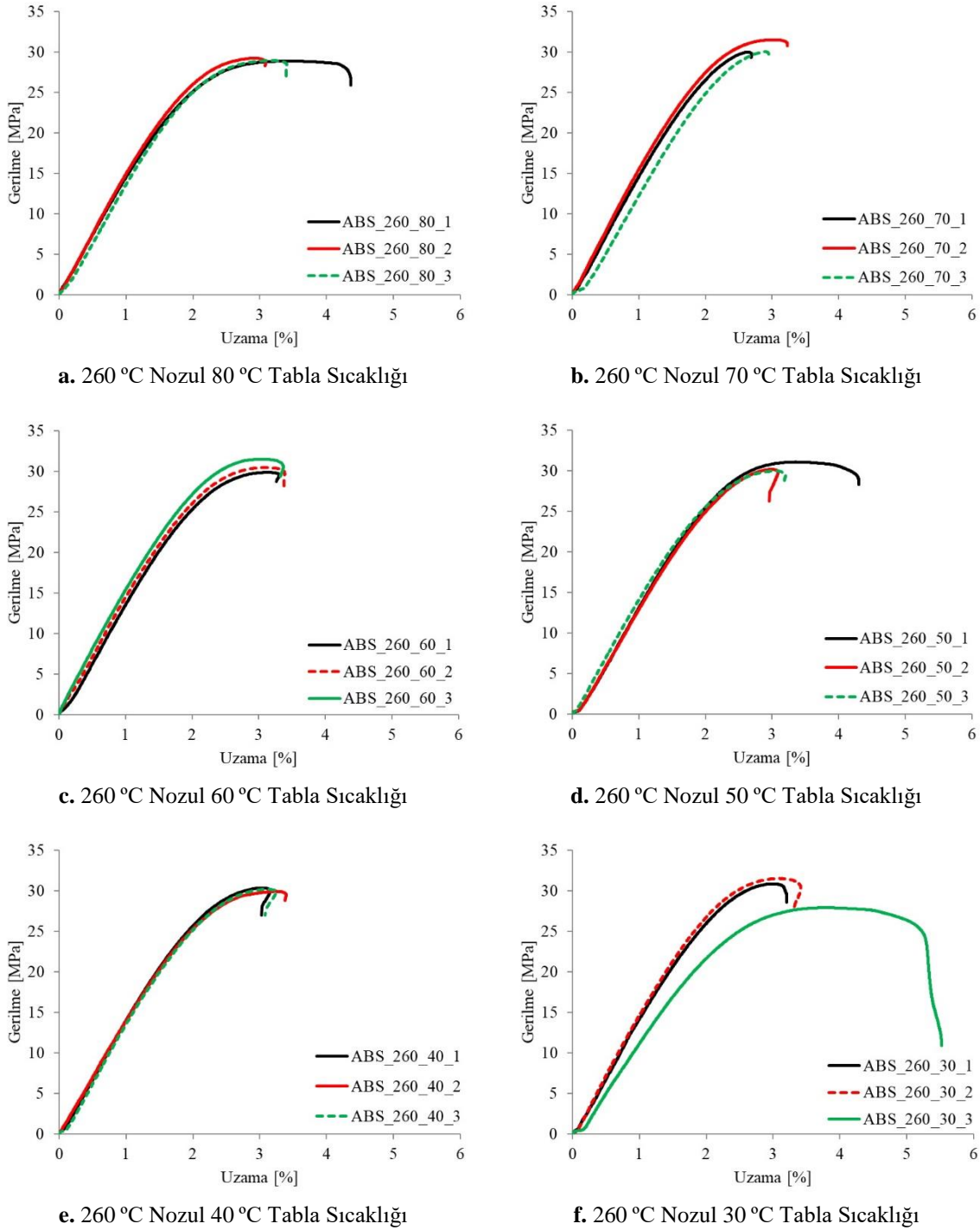
e. 200 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



f. 190 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı

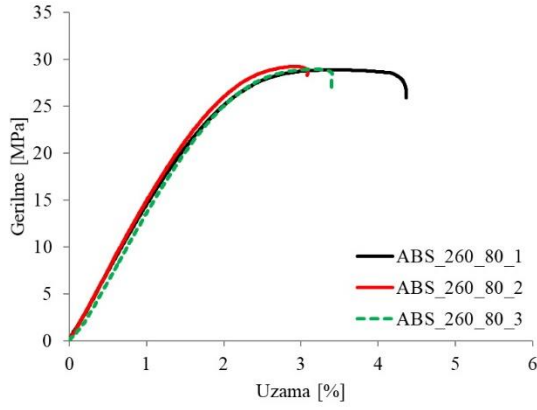
Şekil 8. PLA Filament İle Farklı Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numunelerinin Kopmuş Görüntüleri

ABS filament ile farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak üçer adet çekme test numunesi üretilmiş olup, bu numunelere çekme testi uygulanmış ve her farklı tabla sıcaklığına ait numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde her bir tabla sıcaklığına ait eğrilerin kendi aralarında birbirlerine çok yakın oldukları söylenebilir. Bu grafikler arasında sadece 260 °C nozul 30 °C tabla sıcaklığına ait numunelerin eğrilerinden birinde kendi içinde farklılık olduğu gözlenmiştir. Bu tabla sıcaklığındaki numunelerde üretim sırasında yazdırma tablasından ayrılma problemlerinin yaşandığı ile ilgili açıklamalar yukarıda verilmiştir (Şekil 4b). Şekil 9'da verilen her bir grafik içerisinde gerilme ve uzama bakımından ortalama sayılabilecek olan eğriler seçilmiş olup, bu eğriler grafikler içerisinde kesikli olarak gösterilmiştir. Burada seçilen eğriler ABS malzemede farklı tabla sıcaklıklarının karşılaştırılabilmesi için tek bir grafikte birleştirilmiştir (Şekil 13a).

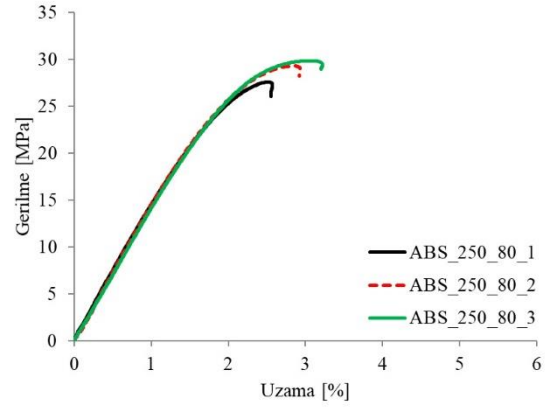


Şekil 9. ABS Filament İle Farklı Tabla Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri

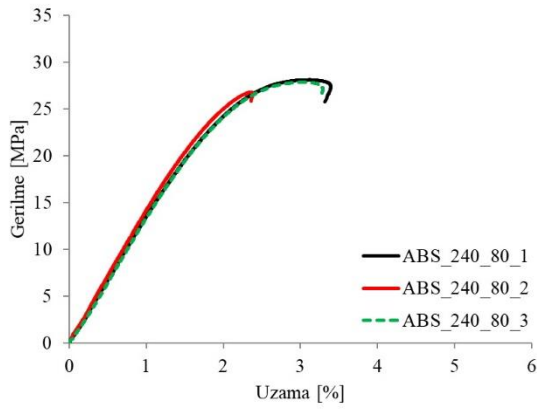
ABS filament ile farklı nozul sıcaklıkları kullanılarak üçer adet çekme test numunesi üretilmiş olup, bu numunelere çekme testi uygulanmış ve her farklı nozul sıcaklığına ait numunelerin gerilme-şekil değişirme eğrileri Şekil 10'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde her bir nozul sıcaklığına ait eğrilerin kendi aralarında birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir. Bu grafikler arasında sadece 220 °C nozul 80 °C tabla sıcaklığına ait numunelerin eğrilerinden birinde kendi içinde farklılık olduğu gözlenmiştir. Bu nozul sıcaklığındaki numunelerde katman için bağların daha zayıf olduğu ve bu numunelerin diğer numunelerden farklı olarak sünek malzeme gibi davrandığı ile ilgili açıklamalar yukarıda verilmiştir (Şekil 6e). Şekil 10'de verilen her bir grafik içerisinde gerilme ve uzama bakımından ortalama sayılabilecek olan eğriler seçilmiş olup, bu eğriler grafikler içerisinde kesikli olarak gösterilmiştir. Burada seçilen eğriler ABS malzemede farklı nozul sıcaklıklarının karşılaştırılabilmesi için tek bir grafikte birleştirilmiştir (Şekil 13b).



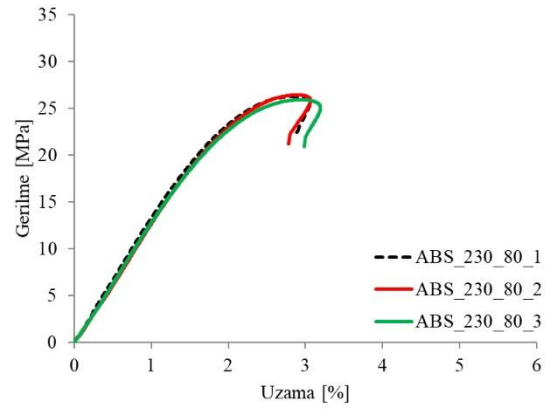
a. 260 °C Nozul 80 °C Tabla Sıcaklığı



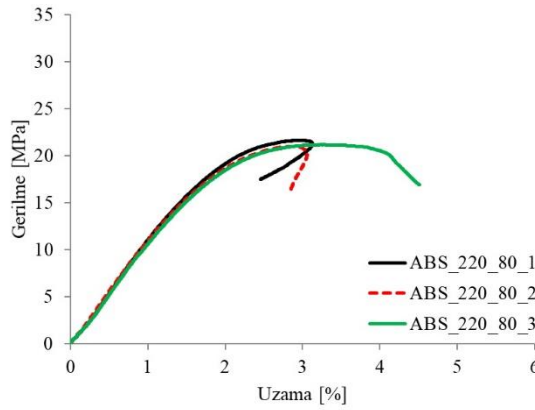
b. 250 °C Nozul 80 °C Tabla Sıcaklığı



c. 240 °C Nozul 80 °C Tabla Sıcaklığı



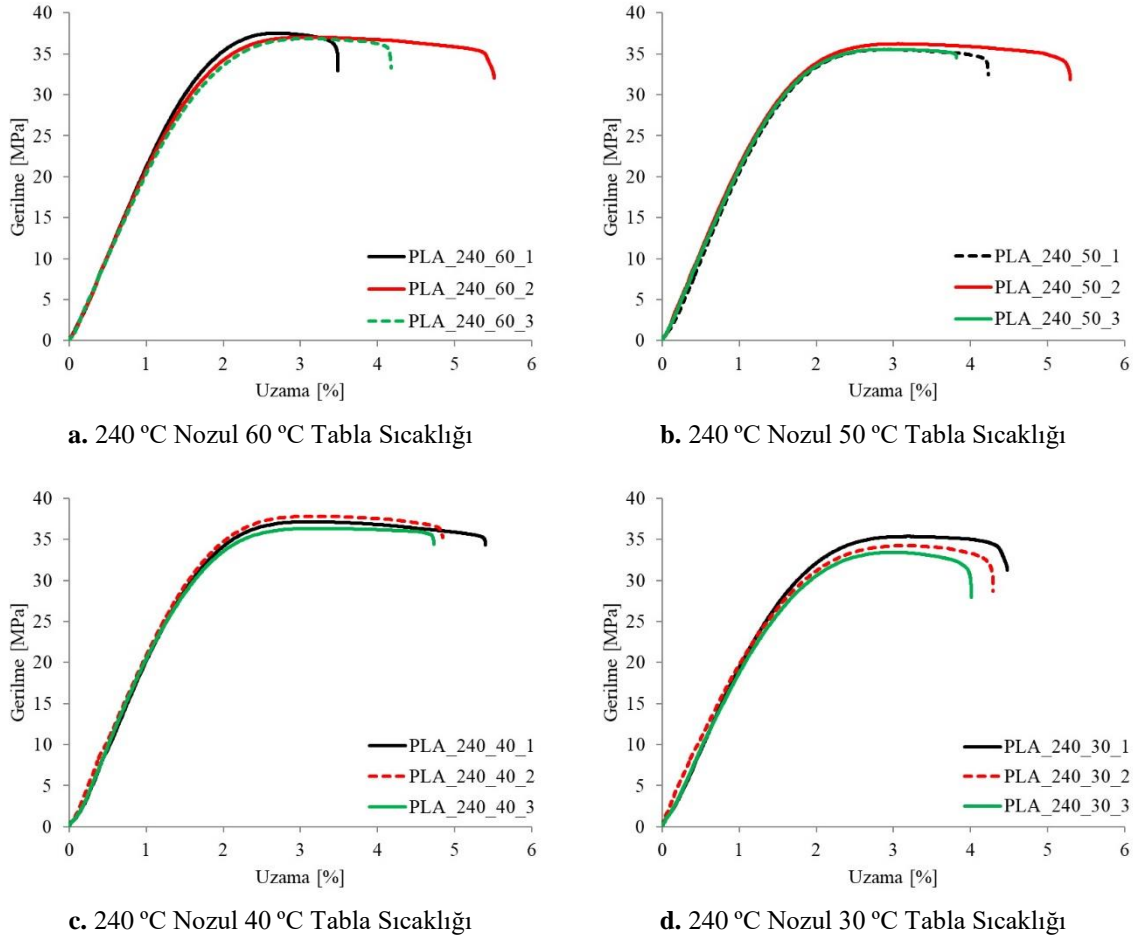
d. 230 °C Nozul 80 °C Tabla Sıcaklığı



e. 220 °C Nozul 80 °C Tabla Sıcaklığı

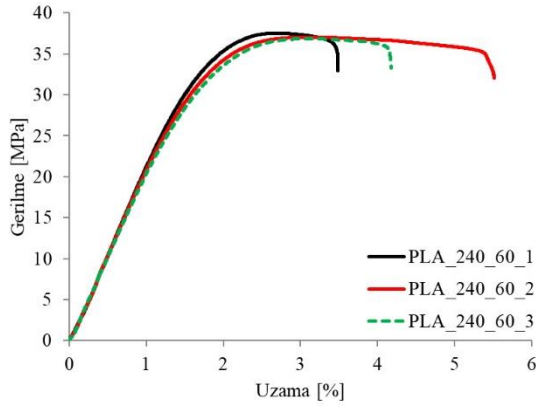
Şekil 10. ABS Filament İle Farklı Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri

PLA filament ile farklı tabla sıcaklıkları kullanılarak üçer adet çekme test numunesi üretilmiş olup, bu numunelere çekme testi uygulanmış ve her farklı tabla sıcaklığına ait numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 11'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde her bir tabla sıcaklığına ait eğrilerin kendi aralarında birbirlerine yakın oldukları söylenebilir. Şekil 11'de verilen her bir grafik içerisinde gerilme ve uzama bakımından ortalama sayılabilecek olan eğriler seçilmiş olup, bu eğriler grafikler içerisinde kesikli olarak gösterilmiştir. Burada seçilen eğriler PLA malzemede farklı tabla sıcaklıklarının karşılaştırılabilmesi için tek bir grafikte birleştirilmiştir (Şekil 13c).

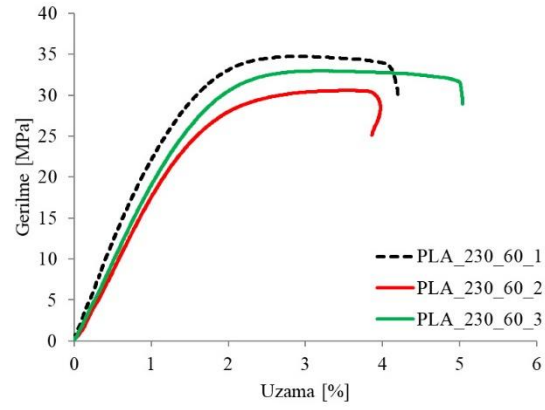


Şekil 11. PLA Filament İle Farklı Tabla Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri

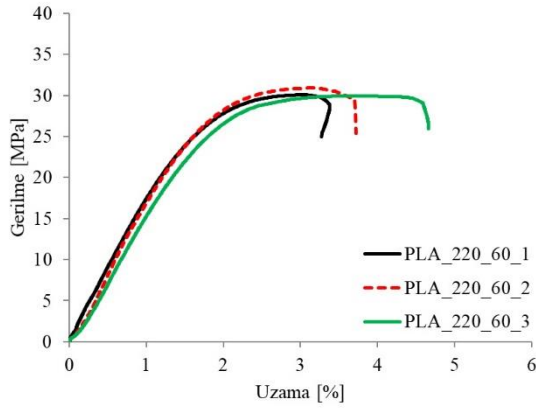
PLA filament ile farklı nozul sıcaklıkları kullanılarak üçer adet çekme test numunesi üretilmiş olup, bu numunelere çekme testi uygulanmış ve her farklı nozul sıcaklığına ait numunelerin gerilme-şekil değişirme eğrileri Şekil 12’de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde her bir nozul sıcaklığına ait eğrilerin kendi aralarında birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Bu grafikler arasında sadece 190 °C ve 200 °C nozul sıcaklıklarına ait eğrilerin kendi içinde farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Bu nozul sıcaklığındaki numunelerde çok fazla katman içi boşlukların olduğu, üretim sırasında PLA malzemenin nozuldan çıkmakta zorlandığı ile ilgili açıklamalar yukarıda verilmiştir (Şekil 4c, Şekil 4d). Şekil 12’de verilen her bir grafik içerisinde gerilme ve uzama bakımından ortalama sayılabilecek olan eğriler seçilmiş olup, bu eğriler grafikler içerisinde kesikli olarak gösterilmiştir. Burada seçilen eğriler PLA malzemede farklı nozul sıcaklıklarının karşılaştırılabilmesi için tek bir grafikte birleştirilmiştir (Şekil 13d). PLA malzeme ile 190 °C ve 200 °C nozul sıcaklıklarında üretilen ürünlere ait eğriler bu değerlendirmeye alınmamıştır.



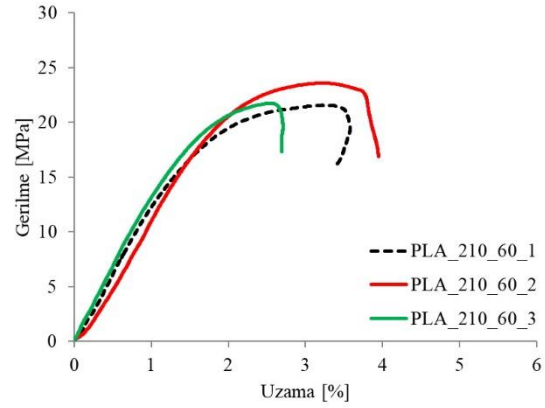
a. 240 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



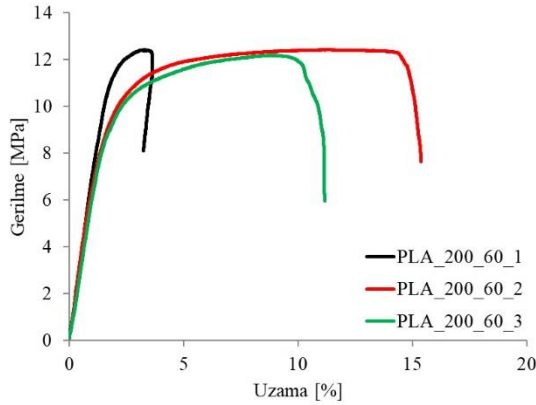
b. 230 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



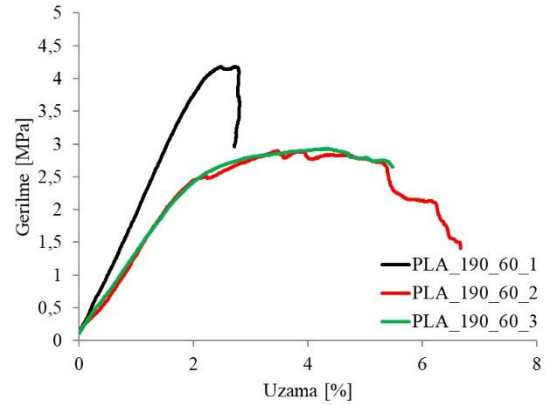
c. 220 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



d. 210 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



e. 200 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı



f. 190 °C Nozul 60 °C Tabla Sıcaklığı

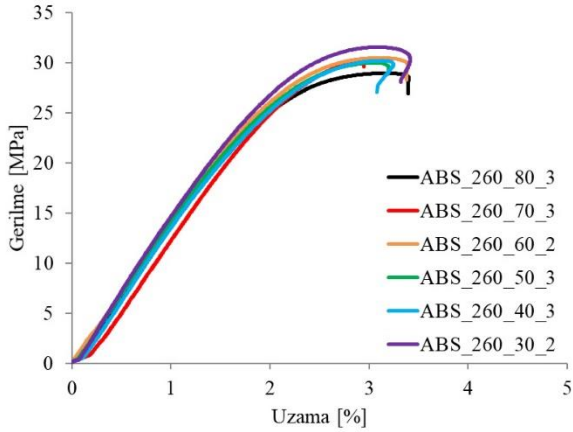
Şekil 12. PLA Filament İle Farklı Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri

ABS ve PLA filament ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak üretilen çekme test numunelerine ait gerilme-şekil değişirme eğrileri Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13a incelendiğinde ABS malzeme ile farklı tabla sıcaklıklarında üretilen ürünlerin gerilme şekil değişirme eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Tabla sıcaklığındaki değişimin ABS malzeme ile üretilen çekme test numuneleri üzerinde gerilme ve uzama açısından bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Şekil 13b incelendiğinde ABS malzeme ile farklı nozul sıcaklıklarında üretilen ürünlerin gerilme şekil değişirme eğrilerinde genel olarak uzamanın değişmediği, fakat nozul sıcaklığının düşmesiyle çekme dayanımının da azaldığı tespit edilmiştir.

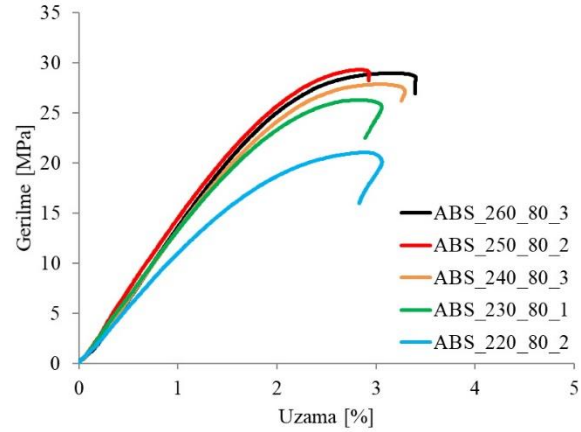
Şekil 13c incelendiğinde PLA malzeme ile farklı tabla sıcaklıklarında üretilen ürünlerin gerilme şekil değişirme eğrilerinin neredeyse birbirleriyle çakışık olduğu görülmektedir. Tabla sıcaklığındaki değişimin PLA malzeme ile üretilen çekme test numuneleri üzerinde gerilme ve uzama açısından çok fazla bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Şekil 13d incelendiğinde PLA malzeme ile farklı nozul sıcaklıklarında üretilen ürünlerin gerilme şekil değiştirme eğrilerinde uzama bakımından çok az bir farklılık görülürken, nozul sıcaklığının düşmesiyle çekme dayanımında gözle görülür bir azalma olduğu belirlenmiştir.

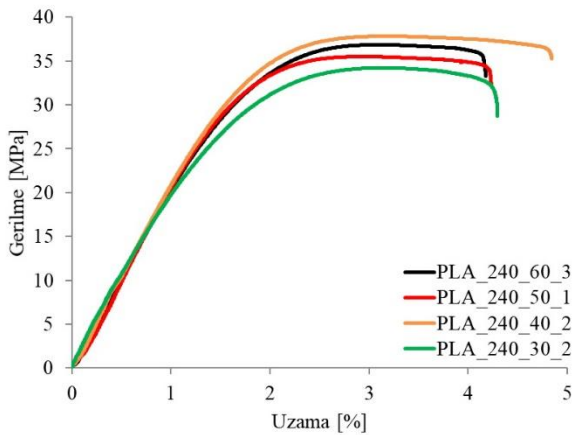
Sonuç olarak ABS ve PLA malzemelerin her ikisinde de farklı tabla sıcaklıklarının çekme numunesi gerilme şekil değiştirme eğrileri üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. ABS ve PLA malzemelerle üretilen çekme numunelerinde nozul sıcaklığının düşmesiyle çekme dayanımının da azaldığı, uzamada ise kayda değer bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. Literatürde nozul sıcaklığının düşmesiyle çekme dayanımının azaldığını gösteren benzer çalışmalar yer almaktadır (Aydın vd., 2019). PLA malzeme ile üretilen ürünlerin çekme dayanımı değerlerinin ABS malzeme ile üretilen ürünlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



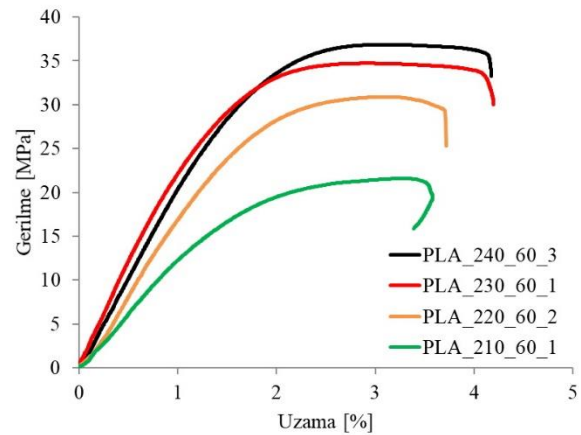
a. ABS Malzeme Farklı Tabla Sıcaklığı



b. ABS Malzeme Farklı Nozul Sıcaklığı



c. PLA Malzeme Farklı Tabla Sıcaklığı



d. PLA Malzeme Farklı Nozul Sıcaklığı

Şekil 13. ABS ve PLA filament ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak üretilen çekme test numunelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasından seçilen ortalama eğriler

Şekil 13'de nozul sıcaklığının düşmesiyle her iki malzeme tipinde de Hook Doğrusu eğiminin ve maksimum çekme dayanımının azaldığı görülmekte olup, kopma uzamalarında çok fazla bir değişim gözlenmemektedir. Hook doğrusu eğiminin azalmasıyla birlikte, elastisite modüllerinin de azaldığı görülmektedir (Tablo 6 ve Tablo 7). Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, nozul sıcaklığının düşmesiyle her iki malzemede de rijitliğin ve tokluğun azaldığı söylenebilir.

Farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak ABS malzeme ile üretilen çekme test numuneleri arasından seçilen numunelere ait çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 6'de verilmiştir. Nozul sıcaklığının azalmasıyla numunelerin çekme dayanımı ve elastisite modüllerinin azaldığı gözlenirken, tabla sıcaklığının değişiminin bu özellikler üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Tabloda belirtilen maksimum ve minimum

nozul sıcaklıkları arasında çekme dayanımı bakımından %27, elastisite modülü bakımından %32'lik bir azalma tespit edilmiştir.

Tablo 6. ABS Filament İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numuneleri Arasından Seçilen Numunelere Ait Çekme Dayanımı ve Elastisite Modülü Değerleri

Numune Kodu	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
ABS_260_80_3	260	80	28,925	1,417
ABS_260_70_3	260	70	29,995	1,468
ABS_260_60_2	260	60	30,448	1,479
ABS_260_50_3	260	50	29,962	1,426
ABS_260_40_3	260	40	30,187	1,341
ABS_260_30_2	260	30	31,536	1,468
ABS_260_80_3	260	80	28,925	1,417
ABS_250_80_2	250	80	29,268	1,403
ABS_240_80_3	240	80	27,815	1,262
ABS_230_80_1	230	80	26,427	1,253
ABS_220_80_2	220	80	21,011	0,958

Farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak PLA malzeme ile üretilen çekme test numuneleri arasından seçilen numunelere ait çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 7'da verilmiştir. Nozul sıcaklığının azalmasıyla numunelerin çekme dayanımı ve elastisite modüllerinin azaldığı gözlenirken, tabla sıcaklığının değişiminin bu özellikler üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Tabloda belirtilen maksimum ve minimum nozul sıcaklıkları arasında çekme dayanımı bakımından %41, elastisite modülü bakımından %42'lik bir azalma tespit edilmiştir.

Tablo 7. PLA Filament İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Test Numuneleri Arasından Seçilen Numunelere Ait Çekme Dayanımı ve Elastisite Modülü Değerleri

Numune Kodu	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
PLA_240_60_3	240	60	36,850	2,246
PLA_240_50_1	240	50	35,506	2,323
PLA_240_40_2	240	40	37,829	2,221
PLA_240_30_2	240	30	34,219	2,293
PLA_240_60_3	240	60	36,850	2,246
PLA_230_60_1	230	60	34,714	2,356
PLA_220_60_2	220	60	23,125	1,994
PLA_210_60_1	210	60	21,576	1,304

SONUÇLAR

Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3B yazıcıda ABS ve PLA malzeme ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Tabla ve nozul sıcaklıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üretilen numunelerin kütleleri, sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. 3B yazıcı ile üretilen çekme numunelerinin boyutlandırılmasında ASTM D638-14 standardı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) ABS ve PLA malzemelerin her ikisinde de farklı tabla sıcaklıklarının kütle, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, çekme dayanımı ve uzama bakımından çok fazla bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. ABS malzemedeki 30 °C ve 40 °C tabla sıcaklığı ile üretilen numuneler bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur.

2) ABS malzeme ile 30 °C ve 40 °C tabla sıcaklığı ile üretilen numunelerde üretim sırasında malzemelerin yazdırma tablası üzerinden ayrılarak, nozuldan malzeme çıkışını bir miktar engellediği gözlenmiştir.

3) ABS ve PLA malzemelerle üretilen çekme numunelerinde nozul sıcaklığının düşmesiyle kütle, üst yüzey sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin azaldığı, aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin arttığı, alt yüzey sertlik ve

uzama değerlerinde ise kayda değer bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. ABS malzemede 220 °C ve PLA malzemede 190 °C ve 200 °C nozul sıcaklığı ile üretilen numuneler bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur.

4) ABS malzemede 220 °C ve PLA malzemede 190 °C ve 200 °C nozul sıcaklığı ile üretilen numunelerde katman içi boşlukların olduğu, üretim sırasında malzemenin nozuldaki çıkarmakta zorlandığı gözlenmiştir.

5) PLA malzeme ile üretilen ürünlerin çekme dayanımı değerlerinin genel olarak ABS malzeme ile üretilen ürünlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

6) ABS malzeme ile maksimum ve minimum nozul sıcaklıklarında üretilen numuneler arasında çekme dayanımı bakımından %27, elastisite modülü bakımından %32'lik bir azalma tespit edilmiştir.

7) PLA malzeme ile maksimum ve minimum nozul sıcaklıklarında üretilen numuneler arasında çekme dayanımı bakımından %41, elastisite modülü bakımından %42'lik bir azalma tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-2351 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Andó, M., Biroş, M., & Jeganmohan, S. (2021). Surface bonding of additive manufactured parts from multi-colored PLA materials. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 169, 108583. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108583>

Aslan, B., & Yıldız, A.R. (2020). Optimum design of automobile components using lattice structures for additive manufacturing. *Materials Testing*, 62(6), 633-639. <https://doi.org/10.3139/120.111527>

ASTM D638-14. (2014). Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International. West Conshohocken. PA. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

Aydin, M., Yildirim, F., & Canti, E. (2019). Investigation of the processing performance of PLA filament in different printing parameters. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(2), 102-115.

Dilberoglu, U. M., Simsek, S., & Yaman, U. (2019). Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM process. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(9), 993-998. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1594252>

Gupta, P., Kumari, S., Gupta, A., Sinha, A.K., & Jindal, P. (2021). Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed polylactic acid parts, *Materials Testing*, 63(1), 73-78. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0010>

Roj, R., Nurnberg, J., Theiss, R., & Dultgen, P. (2020). Comparison of FDM-printed and compression molded tensile samples, *Materials Testing*, 62(10), 985-992. <https://doi.org/10.3139/120.111575>

Schirmeister, C. G., Hees, T., Licht, E. H., & Mülhaupt, R. (2019). 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28(April), 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003>

Solmaz, M. Y., & Çelik, E. (2018). Investigation of Compression Test Performances of Honeycomb Sandwich Composites Produced by 3D Printing Method. *Science and Engineering Journal of Firat University*, 30(1), 277-286.

The Ultimaker 2 Extended specifications. (2020). <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011987939-The-Ultimaker-2-Extended-specifications/> Accessed 06.02.2021.

The Ultimaker 2 Extended user manual. (2020). <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011987819-The-Ultimaker-2-Extended-user-manual/> Accessed 06.02.2021.

Torun, A.R., Dike, A.S., Yıldız, E.C., Sağlam, İ., & Choupani, N. (2021). Fracture characterization and modeling of Gyroid filled 3D printed PLA structures, *Materials Testing*, 63(5), 397-401. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0068>

Ultimaker ABS SDS. (2020). <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962900-Ultimaker-ABS-SDS/> Accessed 15.02.2021.

Ultimaker ABS TDS. (2020). <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS/> Accessed 15.02.2021.

Ultimaker PLA SDS. (2020). <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759359-Ultimaker-PLA-SDS/> Accessed 15.02.2021.

Ultimaker PLA TDS. (2020). <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS/> Accessed 15.02.2021.

Uzun, M., & Erdogdu, Y. E. (2020). Investigation of the Effect of Using Unreinforced and Reinforced PLA in Production by Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties. *Iğdir University Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2800–2808. <https://doi.org/10.21597/jist.799230>

Uzun, M., Gür, Y., & Usca, Ü. A. (2018). Manufacturing of new type curvilinear tooth profiled involute gears using 3D printing. *Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.398462>

Yaman, U. (2018). Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5–8), 2187–2197. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1018-2>

Yaman, U. (2019). Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Parçaların 3B Yazıcılar ile Doğrudan Üretilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 236–244. <https://doi.org/10.29109/gujsc.491244>

Yaman, U., Butt, N., Sacks, E., & Hoffmann, C. (2016). Slice coherence in a query-based architecture for 3D heterogeneous printing. *CAD Computer Aided Design*, 75–76, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.02.005>

Yaman, U., Dolen, M., & Hoffmann, C. (2019). Generation of patterned indentations for additive manufacturing technologies. *IISE Transactions*, 51(2), 209–217. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1491076>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.10.2021
Kabul Tarihi : 02.11.2021

Received Date : 25.10.2021
Accepted Date : 02.11.2021

ÇEVİRİMSSEL ÖN YÜKLEMENİN POLİPROPİLEN'İN GEVŞEME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

THE EFFECT OF CYCLIC PRE-LOADING ON RELAXATION BEHAVIOR OF POLYPROPYLENE

Necmi DÜŞÜNCELİ^{1} (ORCID: 0000-0002-2841-7882)*
Önder Çağdaş ÖZENSOY² (ORCID: 0000-0002-2072-9697)

¹ Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye
² PETLAS A.Ş. Kırşehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Necmi DÜŞÜNCELİ, ndusunceli@aksaray.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, oda sıcaklığında izotaktik polipropilen üzerinde yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme sonrası yapılan gevşeme testlerine dair gözlemler rapor edilmiştir. Deneysel veriler, gevşeme testinin başlangıcında maksimum gerilme ve başlangıç gerilmesi arasındaki farkın artmasıyla birlikte gevşeme eğrilerinin şekillerinde belirgin değişiklikler olduğunu göstermiştir. Testin başlangıcında gerilme geleneksel gevşemeden farklı olarak önce artıp sonra monoton olarak azalmaktadır. Basit gevşemeden karma gevşemeye geçişte ön yüklemenin etkisini araştırmak için farklı çevrim sayısı ve gerilme seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Izotaktik polipropilen, hasar birikimi, çevrimsel deformasyon, gevşeme.

ABSTRACT

In this study, some relaxation tests were undertaken on isotactic polypropylene after loading unloading and reloading at ambient temperature. Experimental data demonstrated pronounced variations in evolution of relaxation curves with difference between maximum stress and stress at the beginning of relaxation test. At the beginning of the relaxation test, the stress increases and then diminishes. To investigate effects of pre-loading on mixed relaxation of polypropylene, comprehensive experimental study was conducted both different range of cycle and stress level.

Keywords: Isotactic polypropylene, damage accumulation, cyclic deformation, relaxation.

GİRİŞ

Polimerik malzemeler birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanıldığı için yarı kristal polimer malzemelerin mekanik davranışı önemli araştırma konularındadır. Düşük maliyet, korozyona karşı direnç, ılımlı yük taşıma yeteneği ve kolay işlenebilirlik gibi özellikler polimerik malzemelerin kullanımını cazip kılmaktadır (Baral vd., 2019; Brusselle-Dupend & Cangémi, 2008; Caelers vd., 2016; N. Dusunceli vd., 2021; Mourad vd., 2009; Zrida vd., 2009).

Son altmış yılda, polimerik malzemelerin davranışını araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, gerinim hızı bağımlılığı, yükleme eğrisi üzerindeki gerilme/gerilme noktalarında başlatılan basit sünme ve gevşeme ve bunların modellenmesine odaklanmıştır.

ToCite: DÜŞÜNCELİ, N., & ÖZENSOY, Ö.Ç., (2021). ÇEVİRİMSSEL ÖN YÜKLEMENİN POLİPROPİLEN'İN GEVŞEME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 359-370.

(Ariyama, 1993; Ayoub vd., 2010; Necmi Dusunceli & Colak, 2006; Gordeyev & Ward, 1999; Jourdan vd., 1989; M. I. Okereke vd., 2012; Michael I. Okereke & Akpoyomare, 2019). Bir kısım çalışmalar ise boşaltma eğrisi üzerindeki gerilme/gerinim noktalarında basit sünme ve gevşeme davranışlarına dairdir. Yükleme eğrisi üzerindeki noktalarda başlatılan sünme ve gevşeme testleri geleneksel sünme ve gevşeme davranışı cevaplarını içerir. Boşaltma eğrisi üzerinde başlatılan sünme ve gevşeme testleri ise geleneksel sünme ve gevşeme davranışından farklı olarak gerilme ya da gerinim seviyesinde artma-azalma, sadece azalma ve artma şeklinde olabilir(Necmi Dusunceli, 2012; Necmi Dusunceli & Aydemir, 2011; Heymans & Kitagawa, 2004; Kitagawa vd., 1995, 1999).

Polimerik malzemelerin viskoelastik doğasından dolayı herhangi bir hasar sonrasında hasara bağlı oluşacak sünme ya da gevşeme davranışlarının sonuçları kullanım yerlerindeki güvenilirliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Sünme ya da gevşeme öncesi polimerik malzemenin içyapısından meydana gelecek birikmiş hasarın etkisinin belirlenmesi son yıllarda çalışılan güncel konulardandır. Bu tip yükleme geçmişine bağlı deformasyon davranışları daha önce (Hiss vd., 1999)'de polietilen ve etilen-(vinil asetat) kopolimerleri için, (Ayoub vd., 2010; Hong vd., 2004)'de polietilen için, (Detrez vd., 2011)'de polibüten, polikaprolakton ve poliamid için, (Lipinski vd., 2020)'de Nafion membranlar için ve (Kästner vd., 2012)'da PP için çalışılmıştır. Deneysel veriler, deformasyon geçmişine bağlı malzeme hafızasının yok olduğunu göstermektedir: N çevrimsel yükleme sayısını göstermek üzere, ilk N-1'inci çevrim boyunca farklılık gösteren ve daha sonra özdeş hale gelen yükleme programlarına tabi tutulan iki numunenin gerilme-gerinim diyagramları, N'inci çevrimden başlayarak çakışmaktadır. Başka bir deyişle, bir polimer maksimum gerinim seviyesi $\epsilon_{max}(N)$ 'ye ulaştığında, önceki deformasyon hafızasını kaybeder (Caelters vd., 2016; Tauheed & Sarangi, 2014). Deformasyon hafızası solma fenomeni Mullins etkisine benzer sabit bir maksimum uzama oranı ϵ_{max} ile çevrimsel yüklemeye maruz kalan bir numune bu değer ötesine gerildiğinde, gerilme-gerinim eğrisi hızlı bir şekilde ham numunenin (çevrimsel yüklemeye tabi olmayan) mekanik cevabına ulaşır (Ghoreishy & Abbassi Sourki, 2018; Tauheed & Sarangi, 2014; Wang & Weiss, 2018).

Bu çalışmanın temel amacı, polimerik malzemelerin deformasyon mekanizmalarını anlamak ve birikimli hasarın gevşeme davranışı üzerindeki etkisini gözlemlemektir. Bu amaca yönelik olarak yaygın kullanılan bir ticari polimerik malzeme olan Polipropilen (PP)'nin tek eksenli çevrimsel çekme yükü altındaki mekanik davranışı araştırılmıştır. Deneysel temelli bir yaklaşım üzerine kurulu çalışmada tek eksenli çekme koşullar altında yapılan servo kontrollü testler, hasar birikimin etkilerini dair malzeme cevapları belirlenmiştir. Bu çalışmada yükleme geçmişi davranışı, hem farklı çevrim sayılarına (n) hem de farklı gerilme seviyelerine (σ_{maks}) bağlı olarak gevşeme davranışı açısından bir arada incelenmiştir.

MALZEME ve TESTLER

Malzeme ve Test Programları

İzotaktik polipropilen Moplen HP 400R (yoğunluk 0.90 g/cm³, eriyik akış hızı 25 g/10 dakika, erime sıcaklığı 161 °C) Lyondell Basell'den (Rotterdam, Hollanda) temin edildi. Mekanik testler için (ASTM standardı D-638) 10.1 mmx4.2 mm kesit alanına sahip çekme numuneleri Arburg 320C enjeksiyon kalıplama makinesi kullanılarak kalıplanmıştır (D638-14, 2014).

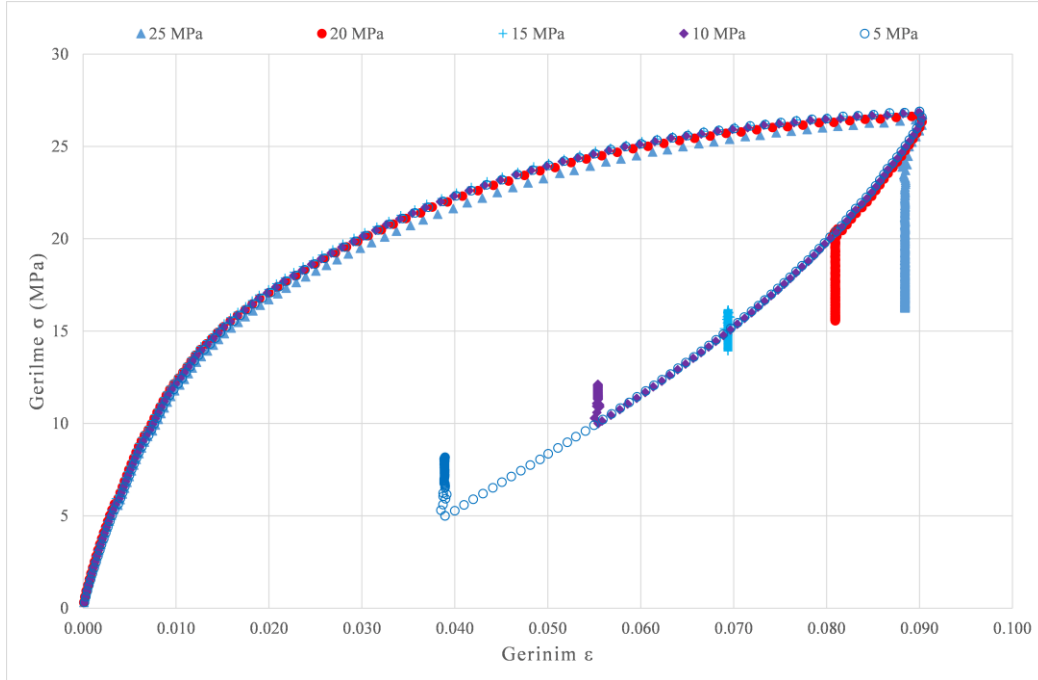
Tek eksenli çekme testleri, boyuna gerilmelerin kontrolü için bir elektro-mekanik sensörle donatılmış evrensel test makinesi olan Instron-5569 aracılığıyla oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme kuvveti 5 kN yük hücresi ile ölçülmüştür. Mühendislik gerilmesi (σ), eksenel kuvvetin deforme olmamış numunelerin kesit alanına oranı olarak belirlendi. Deneysel program, altı grup çevrimsel yükleme ve müteakibinde beş farklı gerilme seviyesinde gevşeme testi içerir. Her bir test yeni bir numune üzerinde gerçekleştirildi ve en üç kez tekrarlandı. Test sonuçlarına dair gözlemler, ölçümlerin iyi bir şekilde tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir: farklı numuneler üzerinde ölçülen gerilimler arasındaki sapmalar %3'ü geçmemiştir.

Tek Eksenli Çevrimsel Yükleme Testleri

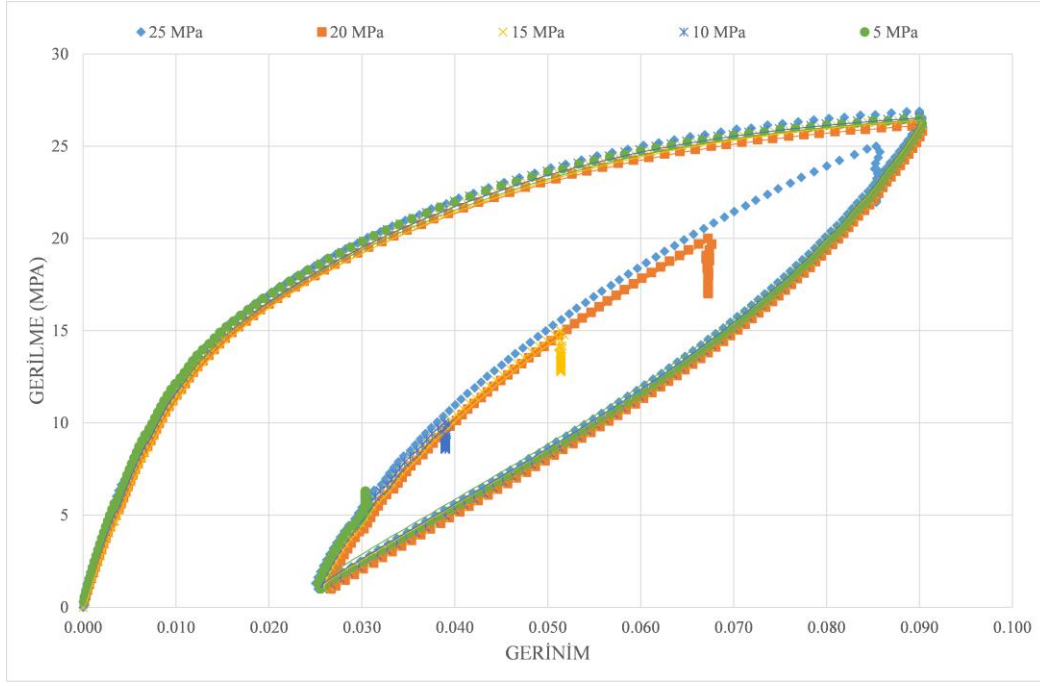
Çevrimsel testler hem gerinim seviyesi ϵ_{max} hem de gerilme seviyesi σ_{min} arasında sınırlandırılarak, 1 çevrim, 2 çevrim, 5 çevrim, 20 çevrim, 100 çevrim ve 200 çevrim salınımı içermektedir. Çekme test numunesi, çekme hızı 10 mm/dak (gerinim hızı = $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e karşılık gelir) ile maksimum gerinim $\epsilon_{max} = 0.09$ 'e kadar gerildikten sonra minimum gerilme $\sigma_{min} = 1 \text{ MPa}$ seviyesine kadar aynı gerinim hızında yükten boşaltılmıştır. Bu noktadan sonra numune aynı gerinim hızında ϵ_{maks} gerinim seviyesine kadar tekrar yüklenmiş daha sonra σ_{min} gerilme seviyesine kadar tekrar yükten boşaltılmıştır. Çevrimsel yükleme deneyleri farklı çevrim sayıları (n=1,2,5,20,100 ve 200 çevrim.) tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir.

Çevrim başına maksimum gerinim $\epsilon_{maks} = 0.09$ değeri, çekmedeki gerilme-gerinim eğrisinin altındaki alandan faydalanarak, akma noktasına yakın civarda seçildi Numunelerin yük boşaltması esnasında burkulmasını önlemek için $\sigma_{min} = 0$ MPa yerine çevrim başına minimum gerilme $\sigma_{min} = 1$ MPa seçilmiştir. Çevrim başına maksimum gerinim değerinin yüksek doğrulukla tekrar edilebilmesi için gerinim hızı $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ olarak seçildi, böylece Her bir çevrimin birbirleri arasındaki standart sapma değeri koşulundan seçildi %2 değerinin altında kaldı.

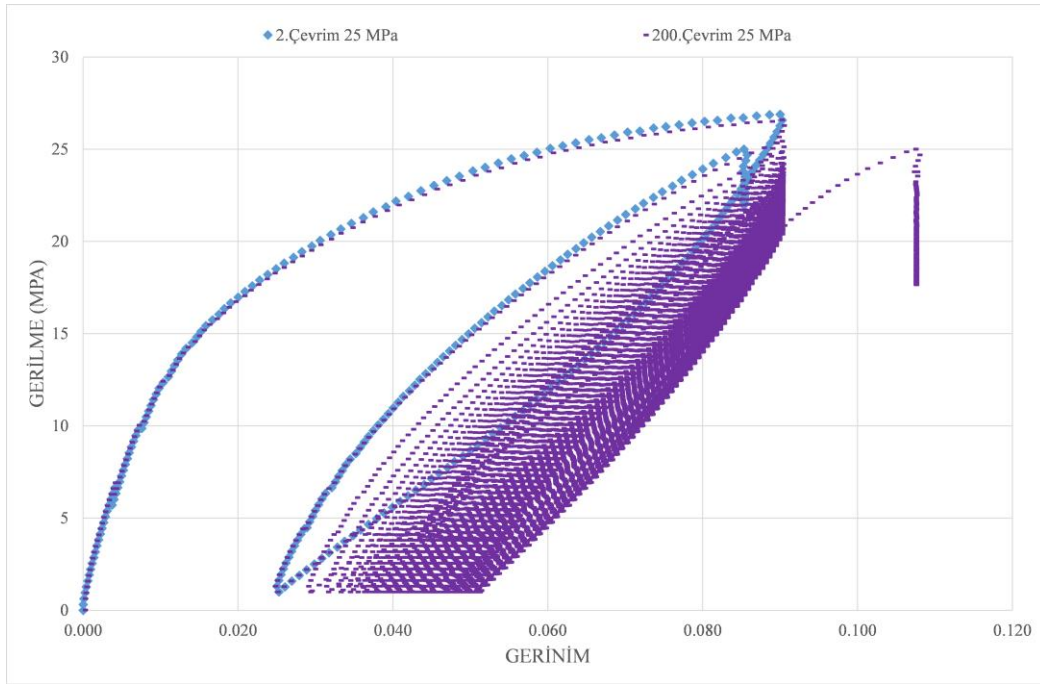
1 ve 2 çevrimli yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme gerilme-gerinim eğrileri sırasıyla Şekil 1 ve 2’de verilmiştir. Şekil 3’de görüleceği üzere diğer çevrim sayıları için gerilme-gerinim eğrilerinin yoğunluğundan doğacak karmaşadan kaçınmak için 5, 20, 100 ve 200 çevrimli testlere dair sadece son çevrimdeki boşaltma-yeniden yükleme eğirleri verilmiştir (Şekil 4, 5, 6 ve 7). PP’nin çevrimsel yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme grafiklerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır: (i) hem yükleme hem de boşaltma yüksek bir lineer olmayan özellik göstermektedir, (ii) maksimum gerilme σ_{maks} (Gerilme seviyesinin yükleme sınırı olduğu ϵ_{maks} ’a ulaşıldığında erişilen gerilme seviyesi.) artan çevrim sayısı ile azalmaktadır. Minimum gerinim ϵ_{min} (Gerilme seviyesinin yük boşaltma sınırı olduğu σ_{min} ’a ulaşıldığında erişilen gerinim seviyesi.) artan çevrim sayısı ile artmaktadır. (iii) histerezis enerjisi (Birbirini takip eden yükleme ve boşaltma eğirleri arasında kalan alanın ölçülmesi ile hesaplanan histerezis enerjisi artan çevrim sayısı (n) ile belirgin şekilde azalmaktadır (Şekil 8).



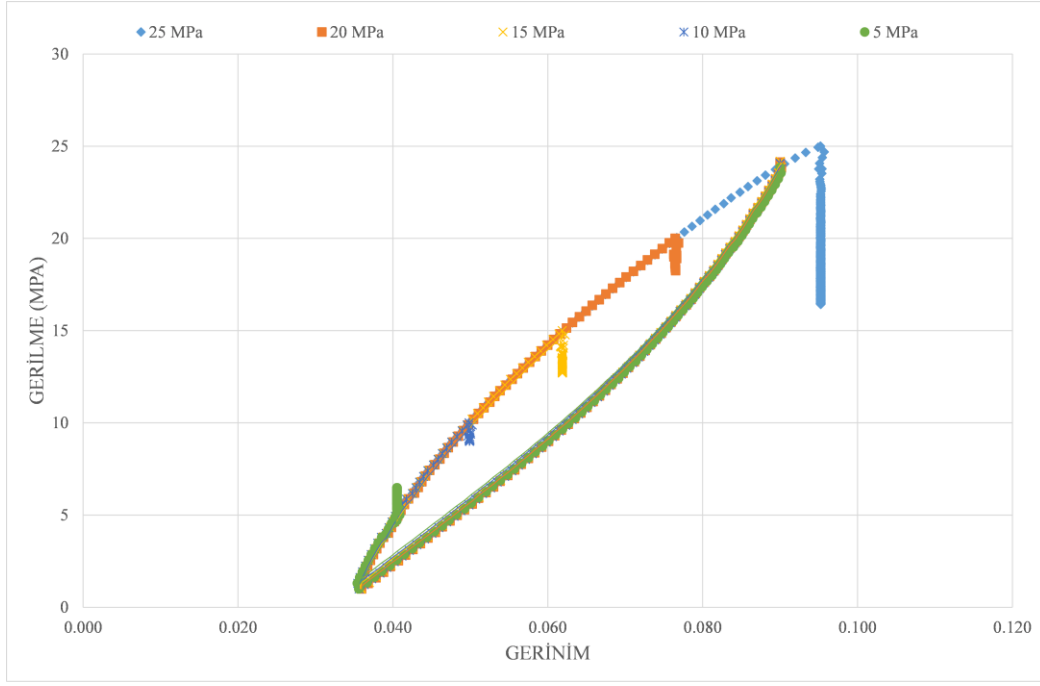
Şekil 1. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{maks} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=1 Yükleme-Boşaltma.



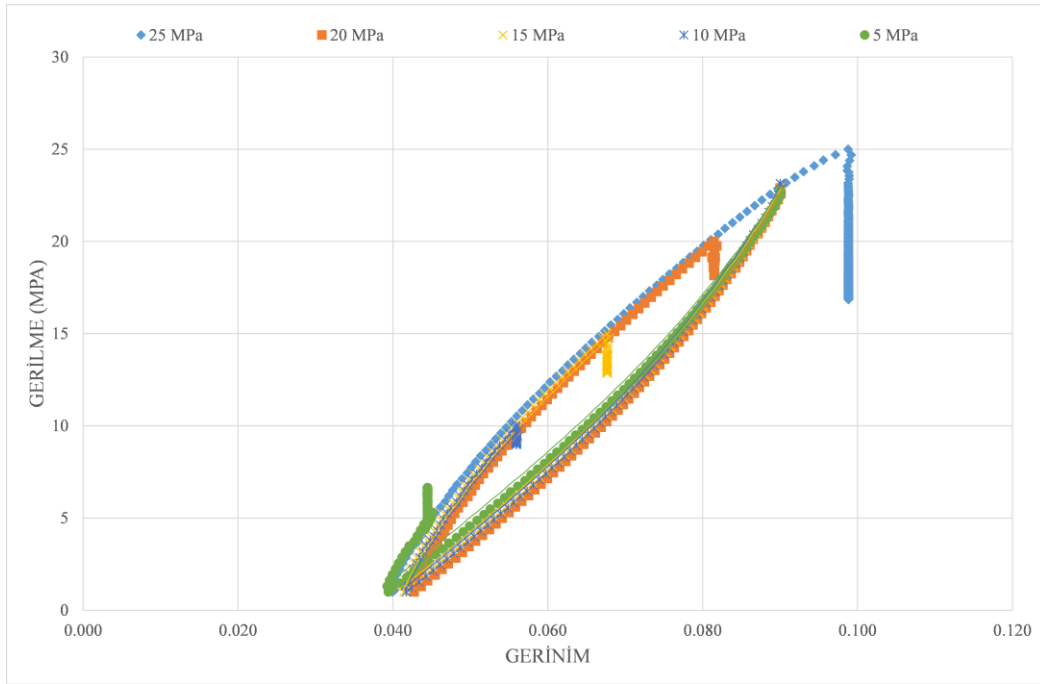
Şekil 2. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=2 Yükleme-Boşaltma.



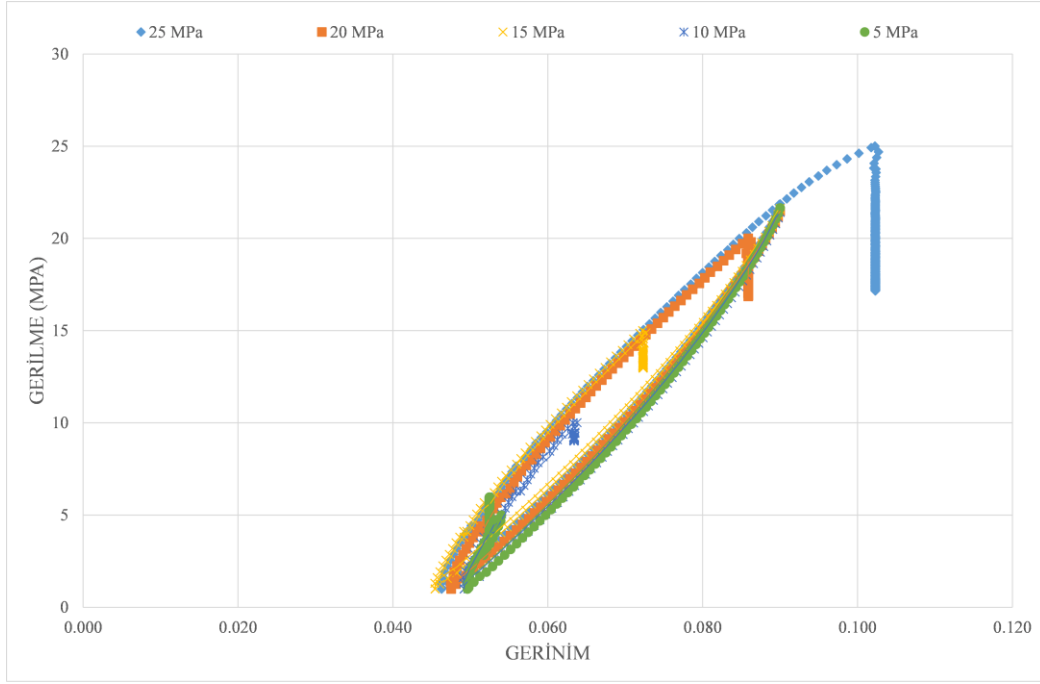
Şekil 3. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25$ MPa. N=2 ve 200 Yükleme-Boşaltma.



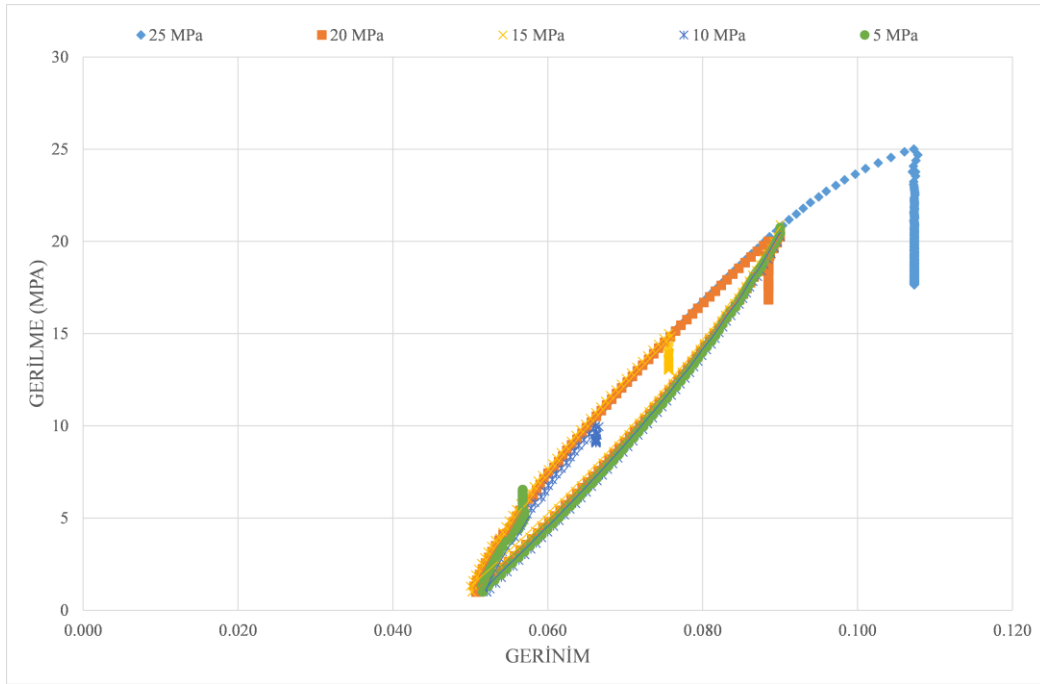
Şekil 4. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=5 Yükleme-Boşaltma.



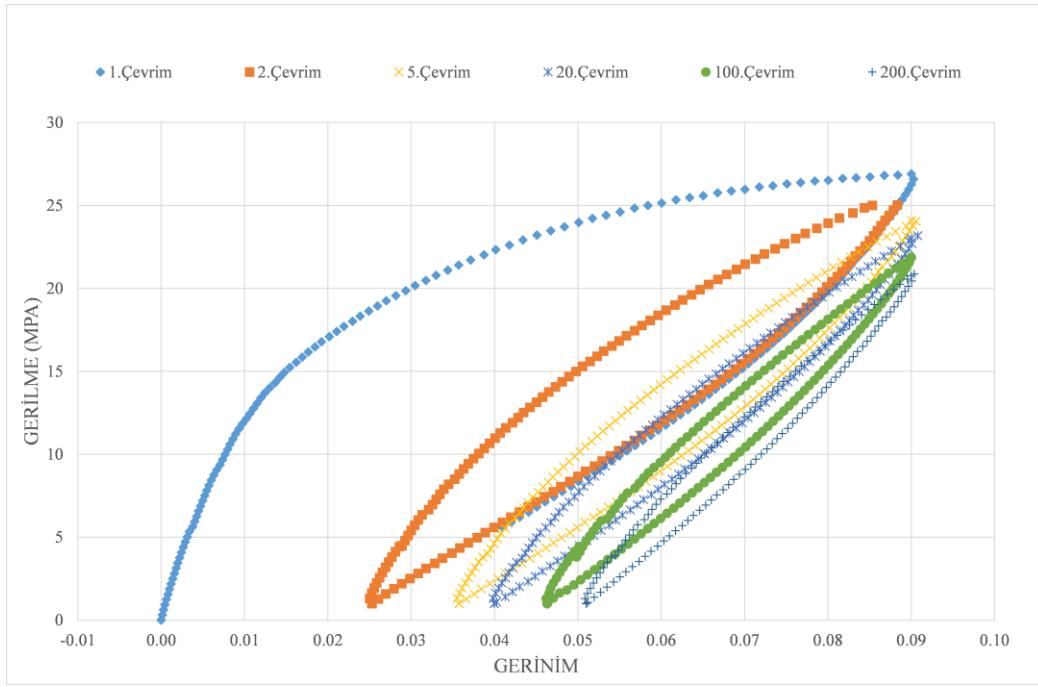
Şekil 5. Gerilim-Gerinim eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=20 Yükleme-Boşaltma.



Şekil 6. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=100 Yükleme-Boşaltma.

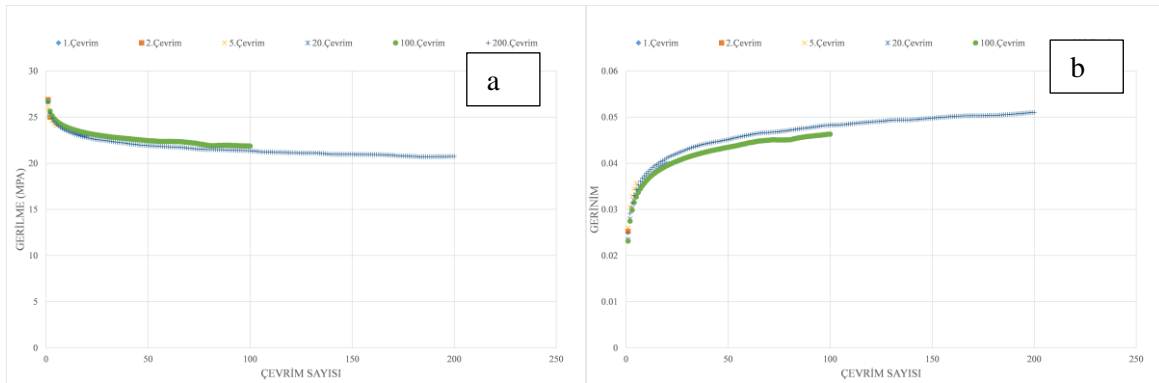


Şekil 7. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=200 Yükleme-Boşaltma.



Şekil 8. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa. N=1, 2, 5, 20, 100 ve 200 Histerisiz Miktarı

Çevrimsel yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme esnasında çevrim sayısına bağlı olarak maksimum gerilme σ_{\max} seviyesinde azalma ve minimum gerinim seviyesindeki ϵ_{\min} artış gelişimi, sırasıyla Şekil 9 a ve b'de verilmiştir. Grafikler Gerilme (MPa)-Çevrim sayısına ve Gerinim-Çevrim sayısına olacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 9 a'dan maksimum gerilme σ_{\max} seviyesinin artan çevrim sayısı (n) ile ilk başta belirgin bir şekilde azalmaktadır, 175 çevrim sayısından sonra göreceli olarak sabit bir değere erişmektedir. Minimum gerinim ϵ_{\min} seviyesinin ise artan çevrim sayısı (n) ile monotonik olarak artmaktadır.



Şekil 9. a. Çevrim Sayısı ile Maksimum Gerilim σ_{\max} Azalışı. $\epsilon_{\max} = 0.09$.

b. Çevrim Sayısı ile Minimum Gerinim ϵ_{\min} Artışı. $\sigma_{\min} = 1$ MPa.

Gevşeme Testleri

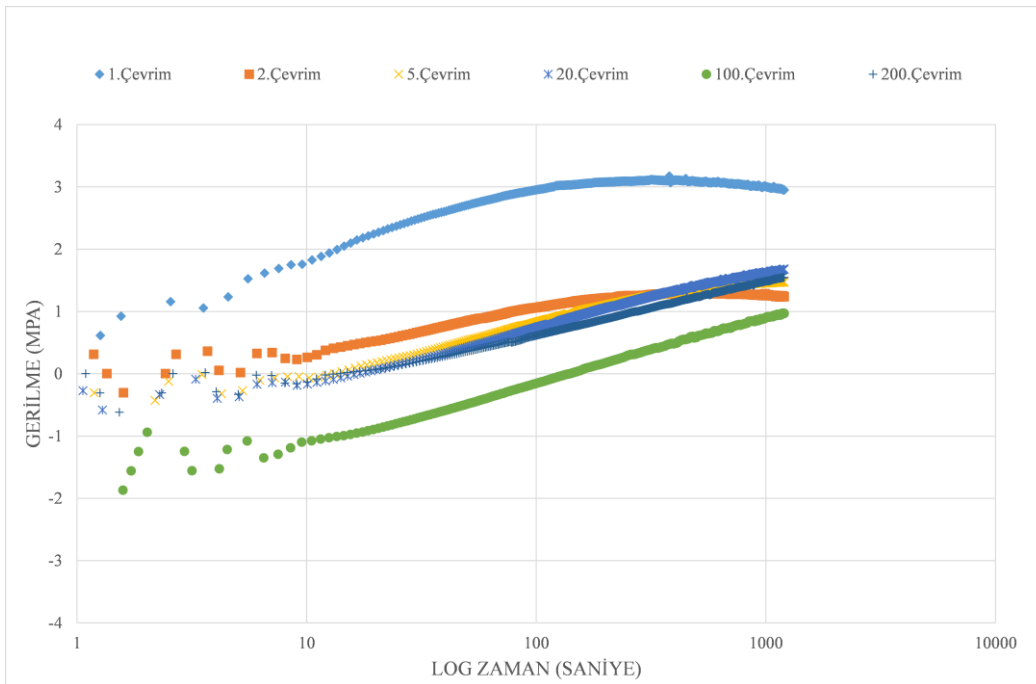
Polipropilen'in zamana bağlı cevaplarını değerlendirmek için yukarıda anlatıldığı gibi her bir numune birikimli hasara uğratılmak için farklı çevrim sayılarında bir maksimum gerinim ϵ_{\max} seviyesinden bir minimum gerilme σ_{\min} seviyesine kadar yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme işlemine tabi tutuldu. Bu tip bir yüklemenin müteakibinde boşaltma eğrisi ve yeniden yükleme eğrisi üzerinde farklı 5 gerilme seviyesinde ($\sigma_0=25$ MPa, 20 MPa, 15 MPa, 10 MPa ve 5 MPa) gevşeme testleri başlatıldı. İlk olarak numuneler çekme hızı 10 mm/dk ($1.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) ile yüklendi-boşaltıldı ve yeniden yüklendi test başlangıç noktasına gelindiğinde gerinim değeri sabitlendi, gerilmedeki σ azalma zamanının t bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Kısa süreli gevşeme test süresi, ASTM E-328 standardına istinaden $t_{\text{gevşeme}} = 20$ dakika olarak seçilmiştir (E328-02(08), 2013).

Her bir gevşeme testi seviyesi için sonuçlar sırasıyla Şekil 10, 11, 12, 13 ve 14’de verilmiştir. Gevşeme test süresi uzun dönem davranış hakkında bir öngörü yapabilmek amacı ile yaygın uygulanan yarı logaritmik şekilde zaman şeklinde verilmiştir. $\log = \log_{10}$ ’dur.

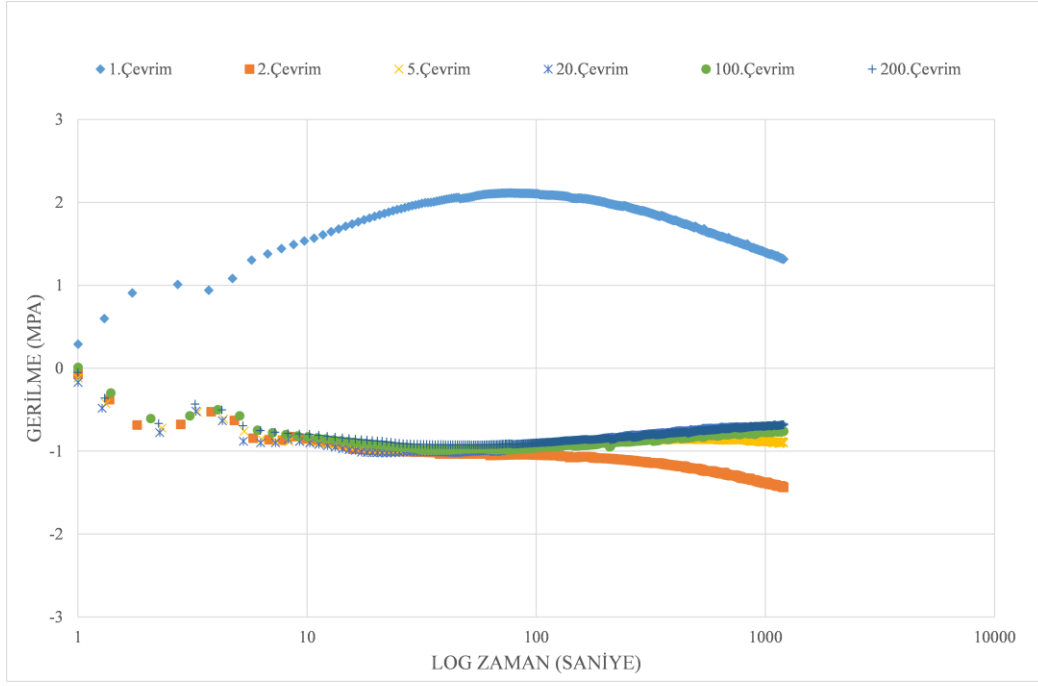
Yarı kristalli polimerler özellikle boşaltma eğrisi üzerinde gerçekleştirilen gevşeme testlerinde geleneksel gevşeme test sonuçlarından farklı özellikler sergilerler, bu olağandışı zamana bağlı tepki ilk olarak (Kitagawa vd., 1995, 1999)’de rapor edilmiştir. Bu tip davranışta gevşeme eğrilerinin şekillerinde gözle görülür değişiklikler mevcuttur. Bir maksimum gerinim ϵ_{\max} seviyesine kadar yüklenen ve çeşitli gerilme σ_0 seviyelerine kadar yük boşaltması yapıp başlatılan testler: (i) gerilme seviyesi farkı $\delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_0$ küçük ise çekme gerilme seviyesi σ zamanla monotonik olarak azalır. Burada σ_{\max} , gerilme altındaki maksimum gerilme seviyesini ve σ_0 ise testin başlatıldığı gerilme seviyesini işaret eder. (ii) $\delta\sigma$ fark edilir derecede büyük ise (σ_{\max} ’un 0.3 ila 0.7 katı arasında.) gerilme seviyesi önce maksimum bir değere kadar zamanla artar, sonra azalır. (iii) $\delta\sigma$ karşılaştırılabilir seviyede ise (σ_{\max} ’un 0.8 katını aşıyor ise.) gerilme değeri zaman ile monotonik olarak artar. Şekil 1’de boşaltma eğrisi üzerindeki gevşeme testleri: (i) $\delta\sigma = 3$ MPa’da, standart gevşeme gerçekleşti, (ii) $\delta\sigma = 8$ MPa’da standarttan karışık gevşemeye geçiş gözlemlendi ve bu geçişin yoğunluğu $\delta\sigma = 23$ MPa’da monoton olarak arttı.

Şekil 2, 4, 5, 6 ve 7’de gevşeme test sonuçları verilmiştir. Yeniden yükleme eğrisi üzerinde başlatılan gevşeme testlerinde geleneksel yükleme eğrisi üzerinde başlatılan gevşeme testi sonuçlarından farklı olarak $\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa gerilme seviyesinde başlatılan gevşeme testlerinde ($\delta\sigma = 23$ ve 18 MPa) gerilme değeri önce artıp daha sonra azalarak karışık gevşeme şeklinde vuku buldu. Şekil 2, 4, 5, 6 ve 7’nin karşılaştırılmasından:

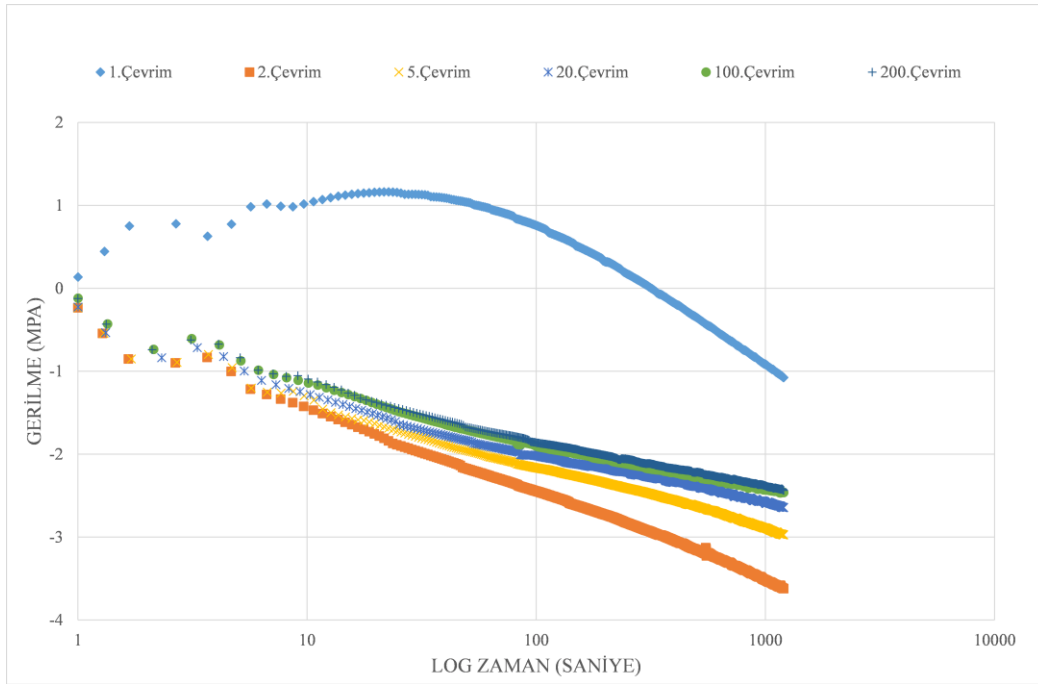
- Karışık gevşeme rejiminde, gevşeme diyagramlarındaki tepe noktasının yoğunluğu çevrim sayısı ile azalırken, daha sonraki aşamasında tepe noktası çevrim sayısından etkilenmez ($\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa’da gözlemlendi.).
- Çevrim sayısındaki (hasar birikimi) artış, tepe noktasının konumunun daha büyük sürelerle belirgin bir şekilde kaymasına neden olur.
- Nispeten küçük σ_0 ’da çevrim sayısının büyümesi karışık gevşemeden ters gevşemeye geçişi tetikler. Şekil 10 ve 11’de görüleceği gibi $\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa’da, gevşeme eğrilerindeki tepe noktaları $N = 20$ çevrimde kaybolmuştur.
- Çevrim sayısındaki artış, gevşeme eğrilerinin belirgin lineerleşmesine neden olmuştur. Doğrusal olmayan özellik gösteren pik noktasının varlığı $N > 20$ ’de kaybolmuştur.
- Gevşeme eğrilerinin eğiminden belirlenen görünür gevşeme oranı çevrim oranı ile azalır.



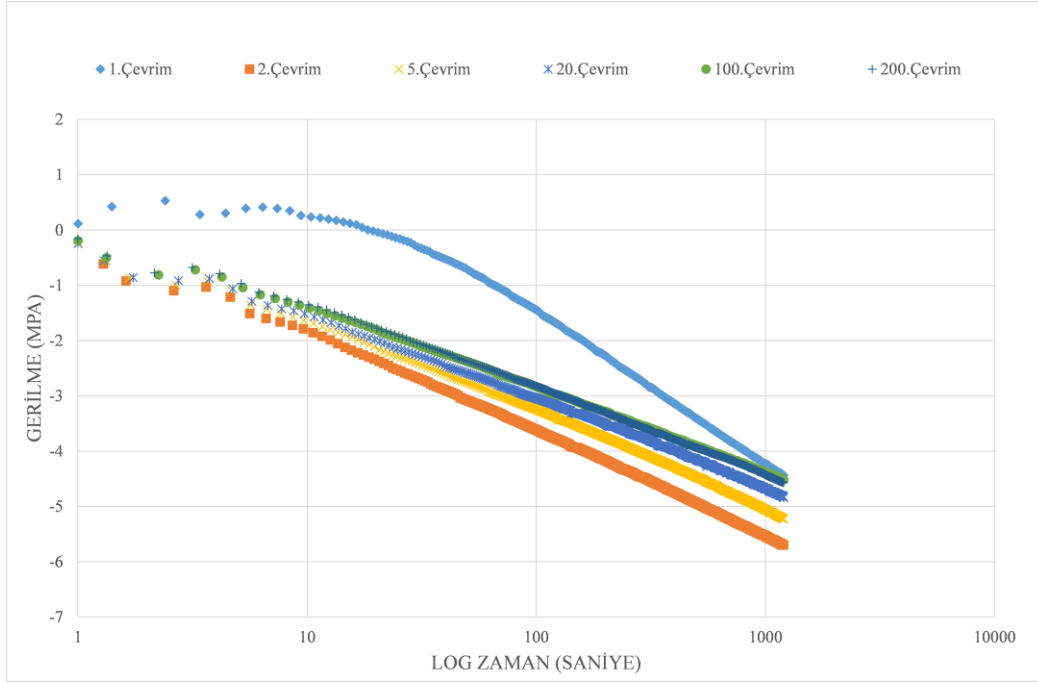
Şekil 10. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ ’a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa’ya boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 5$ MPa’ya kadar tekrar yüklendi.



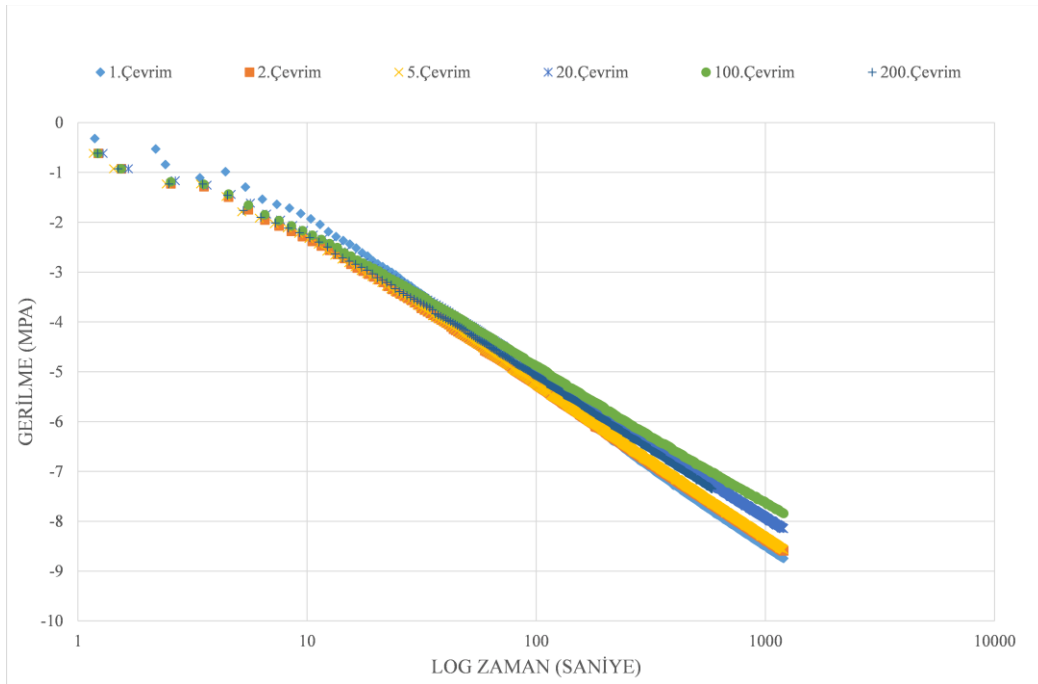
Şekil 11. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 10$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 12. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 15$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 13. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 20$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 14. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 25$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.

SONUÇLAR

Bu çalışmada oda sıcaklığında izotaktik polipropilen üzerinde yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme sonrası gerçekleştirilen gevşeme testlerine ait gözlemler rapor edilmiştir. Deneysel veriler, gevşeme sürecinin başlangıcında maksimum gerilme ve test başlangıç noktasındaki gerilme seviyesi arasındaki farkın artmasıyla basit gevşemeden karma gevşemeye geçişi olduğunu göstermiştir. Yükleme geçmişine bağlı deformasyon ve gevşeme davranışının hakkında kapsamlı bir araştırma yapılmıştır: (i) bir başlangıç gerilme seviyesinde σ_0 , karma gevşeme davranışının yoğunluğu maksimum gerilme σ_{\max} seviyesi ile farkın artması ile artmaktadır, (ii) çevrimsel ön yükleme programı yapıldığında, çevrim sayısının artmasıyla karışık gevşemenin yoğunluğu azalır.

KAYNAKLAR

- Ariyama, T. (1993). Stress relaxation behavior after cyclic preloading in polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 33(22), 1494–1501. <https://doi.org/10.1002/pen.760332209>
- ASTM D638 - 14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014*. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- Ayoub, G., Zaïri, F., Naït-Abdelaziz, M., & Gloaguen, J. M. (2010). Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene. *International Journal of Plasticity*, 26(3), 329–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.07.005>
- Baral, P., Guillonneau, G., Kermouche, G., Bergheau, J. M., Loubet, J. L., Bennin, T., Ricci, J., Ediger, M. D., Bouvard, J. L., Francis, D. K., Tschopp, M. A., Marin, E. B., Bammann, D. J., Horstemeyer, M. F., Chen, K., Schweizer, K. S., Cifuentes, S. C., Frutos, E., Benavente, R., ... Ullah, N. (2019). Effect of loading rate on the creep behaviour of epoxy resin insulators by nanoindentation. *Macromolecules*, 27(2), 11786–11797. <https://doi.org/10.1007/s11029-012-9266-6>
- Brusselle-Dupend, N., & Cangémi, L. (2008). A two-phase model for the mechanical behaviour of semicrystalline polymers. Part I: Large strains multiaxial validation on HDPE. *Mechanics of Materials*, 40(9), 743–760. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.03.011>
- Caelers, H. J. M., Govaert, L. E., & Peters, G. W. M. (2016). The prediction of mechanical performance of isotactic polypropylene on the basis of processing conditions. *Polymer*, 83, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.12.001>
- Detrez, F., Cantournet, S., & Seguela, R. (2011). Plasticity/damage coupling in semi-crystalline polymers prior to yielding: Micromechanisms and damage law identification. *Polymer*, 52(9). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.03.012>
- Dusunceli, N., Sanporean, C. G., Drozdov, A. D., de Claville Christiansen, J., & Comanici, F.-E. (2021). Mechanical and microstructural characterization of poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels and its nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. <https://doi.org/10.1177/1464420720988301>
- Dusunceli, Necmi. (2012). The unusual creep and relaxation behaviour of polypropylene. *Journal of Polymer Engineering*, 32(3), 167–176. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2011-0159>
- Dusunceli, Necmi, & Aydemir, B. (2011). The effects of loading history and manufacturing methods on the mechanical behavior of high-density polyethylene. *Journal of Elastomers and Plastics*, 43(5), 451–468. <https://doi.org/10.1177/0095244311404181>
- Dusunceli, Necmi, & Colak, O. U. (2006). High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11043-007-9026-5>
- E328-02(08). (2013). Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014*. <https://doi.org/10.1520/E328-02>.
- Ghoreishy, M. H. R., & Abbassi Sourki, F. (2018). Development of a new combined numerical/experimental approach for the modeling of the nonlinear hyper-viscoelastic behavior of highly carbon black filled rubber compound. *Polymer Testing*, 70(May), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.06.035>
- Gordeyev, S. A., & Ward, I. M. (1999). Time dependent recovery of oriented polyethylene. *Journal of Materials Science*, 34(19), 4767–4773. <https://doi.org/10.1023/A:1004691206113>
- Heymans, N., & Kitagawa, M. (2004). Modelling “unusual” behaviour after strain reversal with hierarchical fractional models. *Rheologica Acta*, 43(4), 383–389. <https://doi.org/10.1007/s00397-003-0354-3>
- Hiss, R., Hobeika, S., Lynn, C., & Strobl, G. (1999). Network stretching, slip processes, and fragmentation of crystallites during uniaxial drawing of polyethylene and related copolymers. A comparative study.

Macromolecules, 32(13). <https://doi.org/10.1021/ma981776b>

Hong, K., Rastogi, A., & Strobl, G. (2004). A model treating tensile deformation of semicrystalline polymers: Quasi-static stress-strain relationship and viscous stress determined for a sample of polyethylene. *Macromolecules*, 37(26). <https://doi.org/10.1021/ma049174h>

Jourdan, C., Cavaille, J. Y., & Perez, J. (1989). Mechanical relaxations in polypropylene: A new experimental and theoretical approach. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 27(11), 2361–2384. <https://doi.org/10.1002/polb.1989.090271115>

Kästner, M., Obst, M., Brummund, J., Thielsch, K., & Ulbricht, V. (2012). Inelastic material behavior of polymers - Experimental characterization, formulation and implementation of a material model. *Mechanics of Materials*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.04.011>

Kitagawa, M., Zhou, D., & Qui, J. (1995). Stress-Strain curves for solid polymers. *Polymer Engineering & Science*, 35(22), 1725–1732. <https://doi.org/10.1002/pen.760352202>

Kitagawa, M., Zhou, D., Shimada, K., & Umeoka, H. (1999). Anomalous behavior associated with unloading in polyethylene. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 48(6), 592–597. <https://doi.org/10.2472/jsms.48.592>

Lipinski, B. M., Morris, L. S., Silberstein, M. N., & Coates, G. W. (2020). Isotactic Poly(propylene oxide): A Photodegradable Polymer with Strain Hardening Properties. *Journal of the American Chemical Society*, 142(14). <https://doi.org/10.1021/jacs.0c01768>

Mourad, A. H. I., Fouad, H., & Elleithy, R. (2009). Impact of some environmental conditions on the tensile, creep-recovery, relaxation, melting and crystallinity behaviour of UHMWPE-GUR 410-medical grade. *Materials and Design*, 30(10), 4112–4119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.001>

Okereke, M. I., Buckley, C. P., & Siviour, C. R. (2012). Compression of polypropylene across a wide range of strain rates. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(4), 361–379. <https://doi.org/10.1007/s11043-012-9167-z>

Okereke, Michael I., & Akpoyomare, A. I. (2019). Two-process constitutive model for semicrystalline polymers across a wide range of strain rates. *Polymer*, 183, 121818. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121818>

Tauheed, F., & Sarangi, S. (2014). Damage-induced stress-softening and viscoelasticity of limited elastic materials. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 18(3), 493–525. <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9239-3>

Wang, F., & Weiss, R. A. (2018). Thermoresponsive Supramolecular Hydrogels with High Fracture Toughness. *Macromolecules*, 51(18), 7386–7395. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00490>

Zrida, M., Laurent, H., Rio, G., Pimbert, S., Grolleau, V., Masmoudi, N., & Bradai, C. (2009). Experimental and numerical study of polypropylene behavior using an hyper-visco-hysteresis constitutive law. *Computational Materials Science*, 45(2), 516–527. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.11.017>