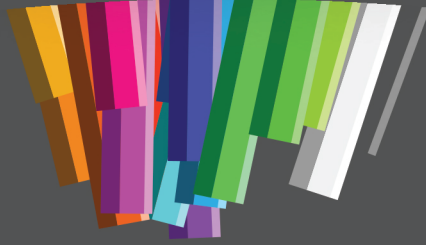




MÜHENDİSLİK ALANINDA ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

MAYIS, 2021

CİLT II



EDİTÖRLER

DOÇ.DR.BELMA HASDEMİR
DR. MAHMUT TURHAN
DR. CEREN KARAMAN

YAZARLAR

MUAMMER TÜRKÖĞLU
MEHMET KURT
HÜSEYİN ÜNAL
MÜNİR TAŞDEMİR
SÜLEYMAN ADAK
SELAHATTİN BARDAK
AHMET ÖZBEK
ÖMER YURDAKUL

İBRAHİM KALAYCI
SELÇUK ARSLAN
MURAT KARACASU
NAKİ KAYA
CEYDA BİLGİÇ
ŞAFAK BİLGİÇ
FEVZİ AKGÜL
REMZİ VAROL

İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız
Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel
Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı
Editörler / Editors • Doç. Dr.Belma Hasdemir
Dr. Mahmut Turhan
Dr. Ceren Karaman
Birinci Basım / First Edition • © Mayıs 2021
ISBN • 978-625-7411-72-1

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla
çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı.
Citation can not be shown without the source, reproduced in any way
without permission.

Gece Kitaplığı / Gece Publishing
Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak Ümit Apt.
No: 22/A Çankaya / Ankara / TR
Telefon / Phone: +90 312 384 80 40
web: www.gecekitapligi.com
e-mail: gecekitapligi@gmail.com



Baskı & Cilt / Printing & Volume
Sertifika / Certificate No: 47083

Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler

CİLT II

EDİTÖRLER

DOÇ. DR. BELMA HASDEMİR

DR. MAHMUT TURHAN

DR. CEREN KARAMAN

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

Bölüm 9

YEREL TANIMLAYICILAR VE DERİN ÖZELLİKLERE DAYALI
VİDEOTABANLI DÜŞME TESPİTİ

Muammer TÜRKÖĞLU 1

Bölüm 10

YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN KOMPOZİTLERİN
AŞINMA VE SÜRTÜNME PERFORMANSLARINA NANO-
ÇİNKO OKSİT KATKISI VE PROSES ŞARTLARININ
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet KURT & Hüseyin ÜNAL & Münir TAŞDEMİR 19

Bölüm 11

GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

Süleyman ADAK.....45

Bölüm 12

VERİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİYLE TÜKETİCİLERİN
TIŞÖRT TERCİHLERİNİN BELİRLENMESİ

Selahattin BARDAK & Ahmet ÖZBEK.....73

Bölüm 13

UYDU BAZLI KÜRESEL KONUM BELİRLEME
SİSTEMLERİNDE AĞ BAZLI RTK TEKNİKLERİ

Ömer YURDAKUL & İbrahim KALAYCI.....99

Bölüm 14

UÇUCU KÜLLERİN ASFALT BETONUNUN PERFORMANS
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Selçuk ARSLAN & Murat KARACASU 121

Bölüm 15

BEAN YÖNTEMİ İLE TABLET ŞEKLİNDEKİ SÜPERİLETKENLERİN KRİTİK AKIM YOĞUNLUĞUNUN HESAPLANMASI

Naki KAYA 135

Bölüm 16

KİL BAZLI (TABANLI) GEOPOLİMERLERİN YAPISAL VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ceyda BİLGİÇ & Şafak BİLGİÇ 151

Bölüm 17

BİRİNCİL GERİ DÖNÜŞÜM PLASTİK HAMMADDELERDE KALIP SICAKLIĞININ ÜRÜNLERİN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fevzi AKGÜL & Remzi VAROL 167

Bölüm 9

YEREL TANIMLAYICILAR VE DERİN ÖZELLİKLERE DAYALI VIDEO TABANLI DÜŞME TESPİTİ

Muammer TÜRKOĞLU¹

¹ Muammer TÜRKOĞLU, Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği, Samsun, Türkiye, ORCID ID: 0000-0002-2377-4979, muammer.turkoglu@samsun.edu.tr

1. GİRİŞ

Düşme, kişinin kendi kontrolü dışında bulunduğu, durduğu, tutunduğu yerden dengesini kaybederek yukarıdan aşağıya inmesi sonucu zemin ya da herhangi bir yere çarparak başka bir konumda beklemesidir (Pannurat ve ark., 2014). Düşme, her yaş döneminde karşılaşılabilecek bir durum olmakla beraber çocuk ve yaşlılarda daha çok görülmektedir (Tinetti ve ark., 1988). Fakat düşme yaşlıları daha çok etkilemektedir. Çünkü yaşlılıkla birlikte insan fizyolojisindeki değişimlere bağlı olarak fiziksel kapasite ve psikomotor becerilerde kayıplar görülmektedir. Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre 65 yaş ve üzeri kişilerin %28-35 ve 70 yaş üzeri kişilerin %32-42'sinin her yıl düştüğü belirtilmektedir. Ayrıca bu kişilerin en az %60'nın birden çok kez düştüğü ifade edilmektedir (Vellas ve ark., 1997).

Yaşlı düşmelerinde kemik kırılmaları, iç doku hasarları ve kafa travması gibi yaralanmalar ortaya çıkabilmektedir. Özellikle yalnız yaşayan yaşlıların düşmelerinde yaralanmalara müdahale edecek kimsenin olmaması durumlarını daha da kötüleştirmektedir. Ayrıca bazen düşmeler, daha ciddi yaralanma ve hatta ölümlere neden olabilmektedir (Aslan ve ark., 2015). ABD ve İngiltere gibi bazı gelişmiş ülkelerde her yıl ortalama 250,000 kişinin düştüğü ve hastane kayıtlarına göre en az 200,000 yaşlıda kalça kemiği kırığı olduğu belirtilmektedir (Friedman ve ark., 2002). Yaşlıların düşmeye bağlı yaralanmalarının tedavi sürecinin uzun olması ülkelerin sağlık harcamalarını da önemli oranda arttırmaktadır. ABD'de yaşlı düşmelerine bağlı yaralanmaların tedavisi için 2000 yılında 19 milyar dolar ve 2010 yılında 30 milyar dolar harcanmıştır (Stevens ve ark., 2006; Pannurat ve ark., 2014). Ayrıca düşme, 79 yaş üzeri yaşlılarda en önemli ölüm nedenleri sıralamasında birinci, 65 yaş ve üzere yaşlılarda en önemli ikinci ölüm nedeni olarak belirtilmektedir (Wang ve ark., 2015).

Düşme kaynaklı yaralanmalarda tedavi sürecinin uzun olması yaşlıların yaşam kalitesini de olumsuz etkilemektedir. Tedavi süreci ve sonrasında yaşamlarını devam ettirebilmek başkalarının bakımına ihtiyaçları olmaktadır. Bu olumsuzluklar yaşlıda düşme korkusu oluşturmaktadır (Lord et al., 2007). Düşme korkusu nedeni ile yaşlılar fiziksel aktivitelerden kaçınmakta ve sosyal ilişkilerini azaltmaktadırlar (Friedman et al., 2002). Tüm bunlar zor olan yaşlıların hayat kalitelerini hem zihinsel hem de fiziksel olarak daha da kötüleştirmektedir. Yaşlı düşmeleri sonucu ortaya çıkan sorunların çözümü ancak etkili bir düşme tespit sistemlerinin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır. Özellikle yaşlı nüfusun giderek arttığı Japonya, Almanya, İngiltere, Singapur gibi gelişmiş ülkelere düşme tespitine yönelik çalışmalar hükümetler tarafından finans edilmektedir.

Literatürde, araştırmacılar tarafından düşme tespitine yönelik yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar daha çok düşme tespitinde kullanılan sensörlere göre gruplandırılmıştır (Popoola and Wang, 2012). Bunlar giyilebilir, ortama duyarlı ve görüntü tabanlı yöntemlerdir. İlk iki yöntemde çok sayıda sensör kullanılması ve yaşlılardan alınan geri bildirimlerden ortaya çıkan dezavantajlarından ötürü pek tercih edilmemektedir (Popoola ve Wang, 2012; Stone ve Skubic, 2012). Görüntü tabanlı yöntemlerin bir kısmında kullanılan RGB kamera tabanlı yaklaşımlar yaşlıların mahremiyet endişelerinden dolayı pek fazla tercih edilmemektedir. Bu nedenle son yıllarda daha çok siluet görüntünün kullanıldığı derinlik kamera uygulamalar daha çok tercih edilmektedir.

Literatürde, günlük temel eylemlere dayalı düşme tespiti için genellikle RGB ve Kinect kameralar kullanılmıştır. RGB kameraya dayalı yapılan çalışmalardan Lee ve Mihailidis, (2005), düşme eylemini tespit etmek için siluetin merkezinin uzamsal yönü veya geometrik yönü gibi özellikleri kullanmışlardır. Daha sonra, bu özellikleri birleştirerek düşme tespiti yapmışlardır. Vishwakarma ve ark., (2007), nesne algılama ve düşme modeline dayalı bir sistem tasarlamışlardır. Bu çalışmada, hareketli bir nesneyi algılamak ve minimum sınırlayıcı kutusuyla işaretlemek için uyarlanabilir bir arka plan çıkarma yöntemi önermişlerdir. Düşme tespiti için ise bir dizi ayıklanmış özellik kullanmışlardır. Charfi ve ark., (2012), birinci ve ikinci türevler, Fourier ve Wavelet dönüşümü gibi yöntemler kullanılarak özellik çıkarma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra, sınıflandırıcı olarak Destek Vektör Makinesi (DVM) yöntemi kullanılmıştır. Zerrouki ve ark., (2016), düşme tespiti için vücudun ağırlık merkezi etrafındaki kullanım alanlarına dayalı bir yaklaşım sunmuşlardır. Sınıflandırma aşamasında, k-En Yakın Komşu (k-EYK), Naive Bayes (NB), Yapay sinir ağları (ANN), ve DVM yöntemleri kullanılmışlardır. Literatürde, bu çalışmalara benzer daha birçok çalışma mevcuttur (Rougier ve ark., 2011; Mubashir ve ark., 2013; Harrou ve ark., 2016). Ayrıca, Kinect kameraya dayalı yapılan çalışmalardan Dobis ve ark., (2013), düşme tespiti için RGB-D sensör tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Bu model, deneğin kütle merkezine dayalı olarak vücut şekli, vücut pozisyonu ve kütle merkezinin hızı dikkate alınarak düşme tespiti yapılmıştır. Aslan ve ark., (2015), Eğrilik Ölçek Uzayı özelliklerini Fisher Vektör ile kodlanmasına dayalı bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerilen modelde sınıflandırıcı olarak DVM yöntemi kullanılmıştır. Bian ve ark., (2012) ise düşme tespiti için iskelet eklemlerinin zemine olan uzaklığı ve eklem hızlarını kullanmışlardır. Ma ve ark., (2014) ise şekil tabanlı düşme tespiti için Eğrilik Ölçek Uzayı özellikleri ve Aşırı Öğrenme Makinası sınıflandırıcısına dayalı hibrid bir sistem geliştirmişlerdir. Aslan ve ark., (2017), iskelet eklem verilerine dayalı olarak düşme tespit sistemi

geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, sınıflandırma aşamasında k-EYK ve DVM yöntemleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, düşme eylemi ile birlikte diğer bazı günlük eylemlerin sınıflandırılması için yerel tanımlayıcılar ve derin özelliklerinin birleşimine dayalı bir yaklaşım önerilmiştir. Bu model, Yönlendirilmiş Gradyanların Histogramu (HOG-Histogram of Oriented Gradient) ve Yerel ikili örüntüler (LBP-Local Binary Pattern) gibi yerel tanımlayıcılardan elde edildiği özellikler ile Evrişimsel Sinir ağları (ESA) tabanlı derin özelliklerin birleştirilmesine dayalıdır. Sınıflandırma aşamasında, Linear Discriminant Analysis (LDA) yöntemi kullanılmıştır. Önerilen modeli test etmek için yürüme, eğilme, oturma, çömelme, uzanma ve düşme eylemlerine dayalı videoları içeren FUKinect-Fall veri seti (Aslan ve ark., 2017) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, önerilen model, önceki çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir.

2. ÖNERİLEN METHODOLOJİ

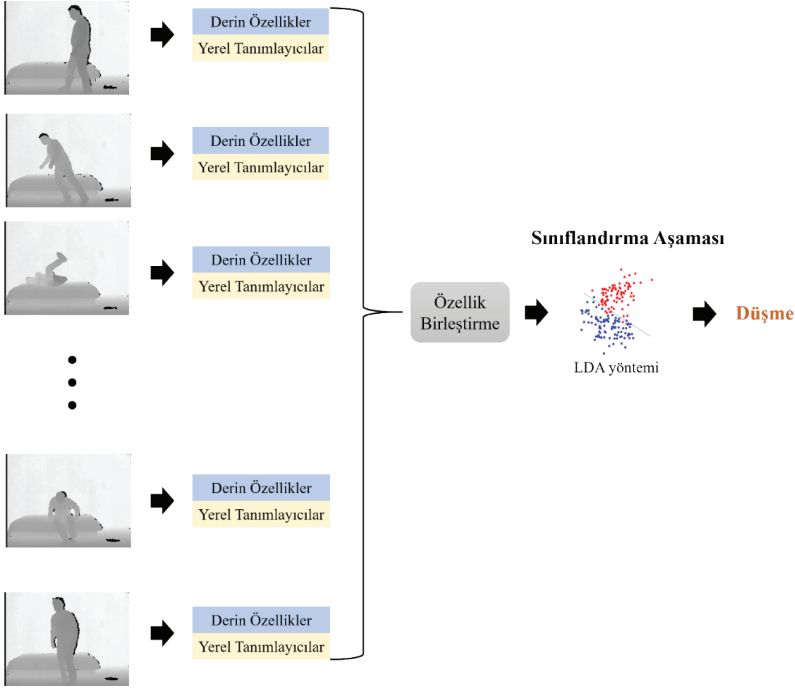
Bu çalışmada, derinlik video tabanlı düşme tespiti için yerel tanımlayıcılar ve derin özelliklerinin birleşimine dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen model, ön-işlem, özellik çıkarma, özellik birleştirme ve sınıflandırma olmak üzere 4 aşamadan oluşmaktadır. Ön-işlem aşamasında, derin videolardan n sayıda çerçeve (frame) elde edilmiştir. Daha sonra, bu frame görüntülerinden yerel tanımlayıcılar ve Evrişimsel Sinir Ağları kullanılarak özellikler çıkartılmış ve elde edilen bu yerel ve derin özellikler birleştirilmiştir. Son olarak, LDA yöntemi kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin genel yapısı Şekil 1’de verilmiştir.

Şekil 1’de, önerilen modelin genel uygulama adımları verilmiştir. Bu işlem adımları, alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

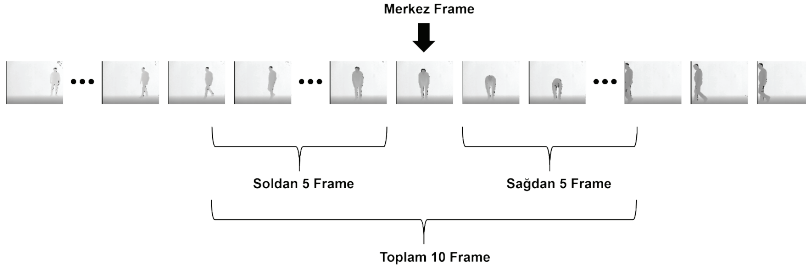
2.1. Ön-İşlem Aşaması

Bu çalışmada, derinlik sensörüne dayalı yürüme, eğilme, oturma, çömelme, uzanma ve düşme eylemlerini içeren videolar kullanılmıştır. Tüm videoların başı ve sonuna doğru sadece yürüme eylemleri bulunmaktadır. Bu videolar, m sayıda frame görüntüsü içermektedir. Deneysel çalışmalarda, tüm frame görüntülerini işlemek maliyet ve zaman açısından olumsuz bir durum içermektedir. Bu nedenle, m sayıda frame görüntüsüne sahip videolar, n sayıda frame görüntüsüne indirgenmiştir. Bu indirgeme işlemi, m sayıda frame görüntülerin Merkez görüntüsü ($m/2$) dikkate alınarak sağdan ve soldan 5’er adet frame görüntüsü elde edilmesine dayalıdır. Bu işleme dayalı örnek bir gösterim Şekil 2’de verilmiştir.

Ön-İşlem Aşaması Özellik Çıkarma Aşaması



Şekil 1. Önerilen modelin genel akış diyagramı



Şekil 2. Önerilen Ön-işlem aşaması

2.2. Evrimsel Sinir Ağı

ESA, 2012 yılında düzenlenen ImageNet yarışmasında elde ettiği başarılar neticesinde popüler bir konu haline gelmiştir. ESA, geleneksel yöntemlerde bulunan ön işlem ve öznelik çıkarma gibi aşamaları araştırmacıdan bağımsız bir şekilde gerçekleştirmektedir. Çok katmanlı bir ağ yapısına sahip olan ESA kullanılarak görüntüden yüksek seviyeli özellikler elde edilebilir. ESA, temel olarak giriş katmanı, ara katmanlar ve sınıflandırma katmanından oluşmaktadır. Görüntü özelliklerinin sağlandığı ara katman, kullanılacak olan sisteme göre belirlenmiş

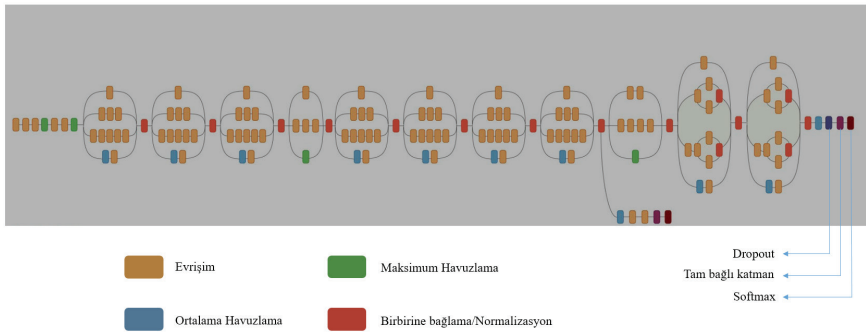
parametrelere dayalı olarak evrişim, havuzlama ve tam bağlı katmanlarına sahiptir. Denklem 1’de x_i girişi ve k_j evrişim çekirdeği için çıkışın transfer fonksiyonu verilmiştir (Chen ve ark., 2020a).

$$y_{i,j} = f(b_j + \sum_i k_j * x_i) \quad (1)$$

$$f(x) = \max(0, x), \quad x \geq 0 \quad (2)$$

Burada, (*) evrişim işlemini, b_j ise bias değerini temsil etmektedir. Evrişim işlemi bir sonraki aşamada $f(.)$ ile ifade edilen bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilmektedir. Genellikle literatürde Denklem 2’de ifade edilen ReLU fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu katmanlardan sonra, aşırı öğrenme riskini ve parametre sayısının azaltmak için havuzlama katmanı kullanılmaktadır. Bu katman maksimum, ortalama ve minimum gibi parametreler kullanılarak benzer bilgileri özetler ve bu yerel bölgedeki etkin değerleri vermektedir (Lee ve ark., 2016). Son olarak, ESA mimarisinin son katmanlarında ise tam bağlı katman ve softmax sınıflandırıcı katmanları bulunmaktadır (Chen ve ark., 2020b).

Bu çalışmada, transfer öğrenme yaklaşımına dayalı önceden eğitilmiş bir ESA mimarisi olan InceptionV3 modeli (Szegedy ve ark., 2016) kullanılmıştır. Bu mimari, 1000 sınıflı ve bir milyondan fazla görüntü içeren veri seti kullanılarak eğitilmiştir. Bu mimaride, çok sayıda evrişim ve havuzlama katmanları bulunmaktadır. Ayrıca, 23.9 milyon parametreye sahip olan bu mimari, 350 bağlantı ve 316 katman içermektedir (Turkoglu, 2019). InceptionV3 mimarisinin genel yapısı Şekil 3’te gösterilmiştir. Bu çalışmada, önceden eğitilmiş InceptionV3 modelinin tam bağlı katmanı (predictions) kullanılarak video tabanlı eylem görüntülerinden derin özellikler çıkartılmıştır.



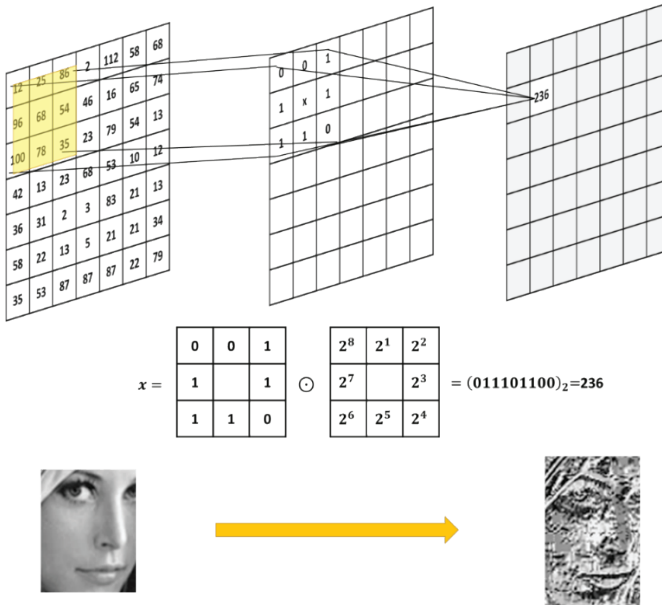
Şekil 3. Inceptionv3 modelinin genel yapısı (Turkoglu, 2019)

2.3. Yerel Tanımlayıcılar

Bu çalışmada, insan eylem görüntülerinden yerel/dokusal özellikler çıkarmak için HOG ve LBP yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler alt başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

2.3.1. LBP

Nesne sınıflandırma, nesne tanıma ve nesne takibi gibi birçok görüntü işleme problemlerinin çözümü için görüntüler arasında piksel geçişi hakkında bilgi veren doku öznitelikleri büyük bir önem taşımaktadır. Bu öznitelikleri çıkartmak için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en popüler yöntemlerden biri LBP'dir. Bu yöntem temel olarak merkez piksel ile komşu pikseller arasındaki ilişkiye dayanmaktadır (He ve Wang, 1990; Ahonen ve ark., 2004; Pietikäinen, 2010).



Şekil 4. LBP özniteliklerin elde edilmesi

Şekil 4'te verilen LBP yönteminde, \odot elaman bazlı çarpmayı ve x filtre merkezinin özniteliği temsil etmektedir. Şekil 4'ten de anlaşılacağı üzere, LBP işleminde tüm görüntü üzerinden bir filtreleme işlemi uygulanır. Bu filtreleme işlemi sırasında filtre merkezindeki piksel değerine göre komşu piksellere 0 ve 1 değerleri atanmaktadır. Diğer bir deyişle, komşu piksel değeri merkez piksel değerinden büyük ise 1 değilse 0 değeri almaktadır. Daha sonra, komşu pikseller belli bir düzene göre sırayla dizilir. Böylece, filtre merkezinin değerini veren ikili bir sayı elde edilir. Bu ikili sayı ondalık sayıya çevrilerek filtre merkezine denk gelen konuma yazılır. Bu işlem tüm görüntü boyunca uygulanarak görüntünün özellikleri çıkartılır (He ve Wang, 1990; Ahonen ve ark., 2004; Wang ve ark., 2010).

2.3.2. HOG

Görüntülerdeki kenar bilgisi ve pikseller arası geçiş ile açısı, nesne tanıma ve takibi için en önemli özniteliklerdendir. Bu özneteliği elde etmek için Shashua ve ark., (2004) tarafından HOG yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, birçok farklı alanda uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Dalal ve Triggs, 2005; Shu, ve ark., 2011).

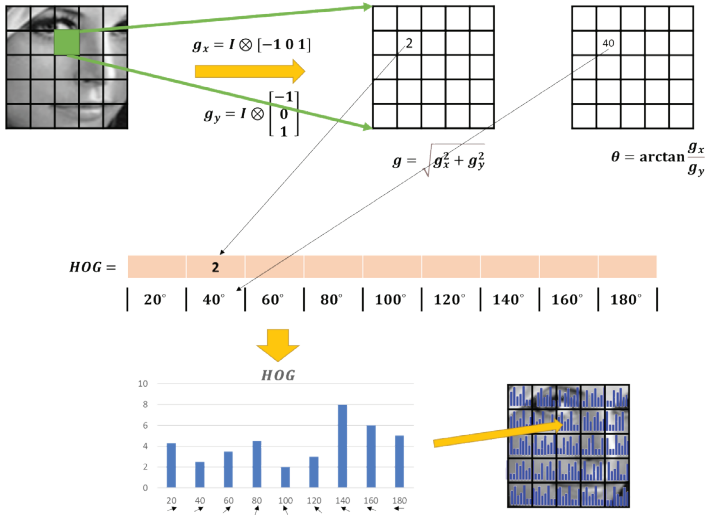
HOG özellik çıkarma yöntemi, bir görüntünün yatay $([-1,0,1])$ ve dikey $\begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ türevlerinin alınmasına dayalıdır. Görüntüye bu iki filtre

uygulandıktan sonra her piksel için sırasıyla yatay türev matrisi (g_x) ve dikey türev matrisi (g_y) değerleri elde edilir. Daha sonra, türevin açısı (θ) ve büyüklüğünü (g) bulmak için Denklem 3 uygulanır (Wang ve ark., 2010).

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{g_x}{g_y}$$

HOG yönteminin genel işlem adımları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görüleceği üzere, HOG yöntemi kullanılarak görüntüden özellik elde etmek için öncelikle görüntü küçük parçalara bölünür. Daha sonra her bir parçaya yukarıda verilen denklemler uygulanarak türev büyüklük matrisi (g) ve türev açısı (θ) matrisi elde edilir. Elde edilen iki matris kullanılarak görüntü parçasına ait HOG bilgisi çıkarılır. Daha sonra, ağırlık matrisinin i ve j konumundaki ($g^{i,j}$) değeri ($\theta^{i,j}$) açısına göre HOG dizisine eklenir. HOG dizisinin indeksleri $[0,20,40,60,80,100,120,140,160]$ şeklindedir. Sonuç olarak görüntü parçasını temsil eden 9 elemana sahip bir histogram elde edilir. Her bir görüntü parçası için bu işlem tekrarlanarak özellik matrisi elde edilmektedir (Wang ve ark., 2010; Shu ve ark., 2011).



Şekil 5. HOG yönteminin çalışma prensibi, (\otimes görüntü filtreleme işlemi)

2.4. Sınıflandırma

Diskriminant analizi, mevcut sınıfları birbirinden ayrılmasına dayalı en iyi özelliklerin bulunması için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Temel olarak LDA, sınıf içi varyansı kullanarak sınıflar arası varyansı maksimize eden doğrusal bir fonksiyonun tanımlanması amaçlanmaktadır. LDA sınıflandırıcı, az eğitim örneği ile iyi başarımlar elde edildiği için yaygın olarak kullanılan denetimli öğrenme yöntemidir (Saa ve ark., 2010). LDA sınıflandırma skoru ($S_{i,j}$) belirli bir k sayıda sınıf için kovaryans matrislerinin eşit kabul edildiğini varsayarsak:

$$S_{i,j} = (x_i - \bar{x}_k)^T \sum_{pooled}^{-1} (x_i - \bar{x}_k) - 2 \log g_e \pi_k \quad (4)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada, i boyutlu özellik vektörü x_i , k sınıfın ortalama boyutu, \bar{x}_k ve π_k sınıfının öncelikli olasılığını temsil etmektedir. Ayrıca, $\sum_{pooled} \dots$ yığın kovaryans matrisini ifade etmektedir (Siqueira ve ark., 2017).

3. DENEYSEL SONUÇLAR

DeneySEL çalışmalarda, MATLAB (R2020a) yazılım platformu kullanılmıştır. Ayrıca, NVIDIA Quadro P4000 GPU kartı, 32 GB Ram ve Intel Xeon Silver 2.19 GHz sahip bir bilgisayar kullanılarak deneySEL çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tüm deneySEL çalışmalarda, eğitim ve test kümelerinin ayrıştırılması için 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 1. *Karışıklık Matrisi*

	Tahmin Edilen Sınıf		
	Sınıf-1	Sınıf-2	
Gerçek Sınıf	Sınıf-1	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)
	Sınıf-2	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)

Önerilen modelin performansını değerlendirmek için karışıklık matrisi kullanılmıştır (Tablo 1). Bu karışık matrisine dayalı olarak doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-skor gibi ölçütler kullanılmıştır. Bu performans ölçütlerinin matematiksel ifadeleri Denklem 5-9'da verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = (DP + DN)/(DP + DN + YP + YN) \quad (5)$$

$$\text{Duyarlılık} = DP/(DP + YN) \quad (6)$$

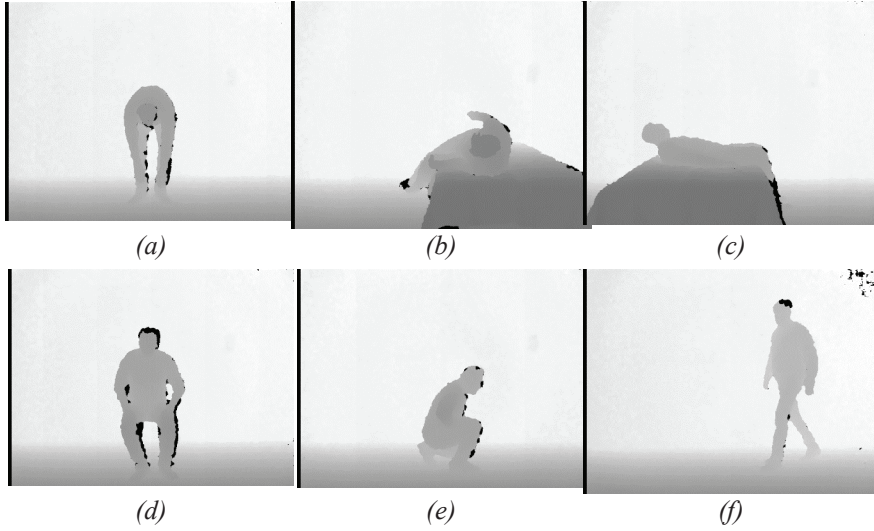
$$\text{Özgüllük} = DN/(DN + YP) \quad (7)$$

$$\text{Kesinlik} = DP/(DP + YP) \quad (8)$$

$$F1 - \text{Skor} = 2 * \frac{\text{Duyarlılık} * \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (9)$$

3.1. Veri Seti

Deneyel çalışmalarda kullanılan FUKniect-Fall veriseti, Aslan ve ark., (2017) tarafından ve Kinect V1 kamerası kullanılarak oluşturulmuştur. Bu veri seti, 19-72 yaş arasındaki 21 denek kullanılarak yürüme, eğilme, oturma, çömelme, uzanma ve düşme eylemlerine dayalı videoları içermektedir. Bu 6 eylem farklı açılar ile sekizer kez tekrar edilmiştir. Sonuç olarak, bu veri setinde, 6 eylem, 8 tekrar ve 21 denek olmak üzere toplamda 1008 video mevcuttur. Her bir video süresi eylem özelliğine bağlı olarak yaklaşık 3-5 saniye, 320×240 çözünürlükte ve saniyede 30 frame olarak kaydedildi. Bu çalışmada elde edilen yürüme, eğilme, oturma, çömelme, uzanma ve düşme eylemlerine ile ilgili örnek görüntüler Şekil 6'da verilmiştir. Veri setinde, yürüme dışında tekrar edilen eylemler düşme eylemi ile benzerlikler gösterildiği için seçilmiştir.



Şekil 6. FUKniect-Fall verisetine ait örnek eylem görüntüleri, a) Eğilme, b) Düşme, c) Uzanma, d) Oturma, e) Çömelme, f) Yürüme.

3.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, derinlik videolarında düşme eylemi tespiti için yerel tanımlayıcılar ve derin ESA'ya dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, yerel tanımlayıcılar için HOG ve LBP yöntemleri kullanılarak derinlik videolardaki frame görüntülerden 288 ve 59 özellik çıkartılmıştır. Derin özellikleri için ise transfer öğrenme yaklaşımına dayalı önceden eğitilmiş Inceptionv3 ağ mimarisinin tam bağlı katmanı kullanılarak 1000 özellik elde edilmiştir. Bu elde edilen özellikler, LDA sınıflandırıcısının girişine verilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen yerel ve derin yöntemlerin bireysel performans ölçütleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yerel ve derin özelliklerin performans ölçütleri (%)

	Doğruluk	Yanlış Pozitif Oran	Kesinlik	Özgüllük	F1-Skor
LBP	76.69	4.66	76.80	95.34	76.67
HOG	91.07	1.79	91.12	98.21	91.06
ESA	94.15	1.17	94.20	98.83	94.14

Tablo 2'den anlaşılacağı üzere, derin videoları kullanılarak yürüme, eğilme, oturma, çömelme, uzanma ve düşme olmak üzere 6 eylemin tespiti için en yüksek doğruluk ESA'ya dayalı derin özellikler ile %94.15 olarak elde edilmiştir. Buna ek olarak, en iyi ikinci doğruluk skoru, HOG yöntemi ile %91.07 olarak elde edilirken, LBP yönteminin doğruluk skoru %76.69'dur. Bu sonuçlara göre, derin özellikleri, yerel tanımlayıcılara göre daha iyi bir performansa sahip olduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirilen

bu çalışmalarda, yerel tanımlayıcılar ve derin özelliklerin karışıklık matrisleri Şekil 7’de verilmiştir.

Gerçek Sınıf	Eğilme	109			12	34	13
	Düşme		124	44			
	Uzanma		29	139			
	Oturma	6			146	16	
	Çömelme	29			15	116	8
	Yürüme	21			2	6	139
		Eğilme	Düşme	Uzanma	Oturma	Çömelme	Yürüme
Tahmin Edilen Sınıf							

(a)

Gerçek Sınıf	Eğilme	160				3	5
	Düşme		133	35			
	Uzanma		25	143			
	Oturma				165	3	
	Çömelme	10			2	154	2
	Yürüme	3				2	163
		Eğilme	Düşme	Uzanma	Oturma	Çömelme	Yürüme
Tahmin Edilen Sınıf							

(b)

Gerçek Sınıf	Eğilme	158				6	4
	Düşme		152	16			
	Uzanma		24	144			
	Oturma				168		
	Çömelme	1			2	161	4
	Yürüme	1				1	166
		Eğilme	Düşme	Uzanma	Oturma	Çömelme	Yürüme
Tahmin Edilen Sınıf							

(c)

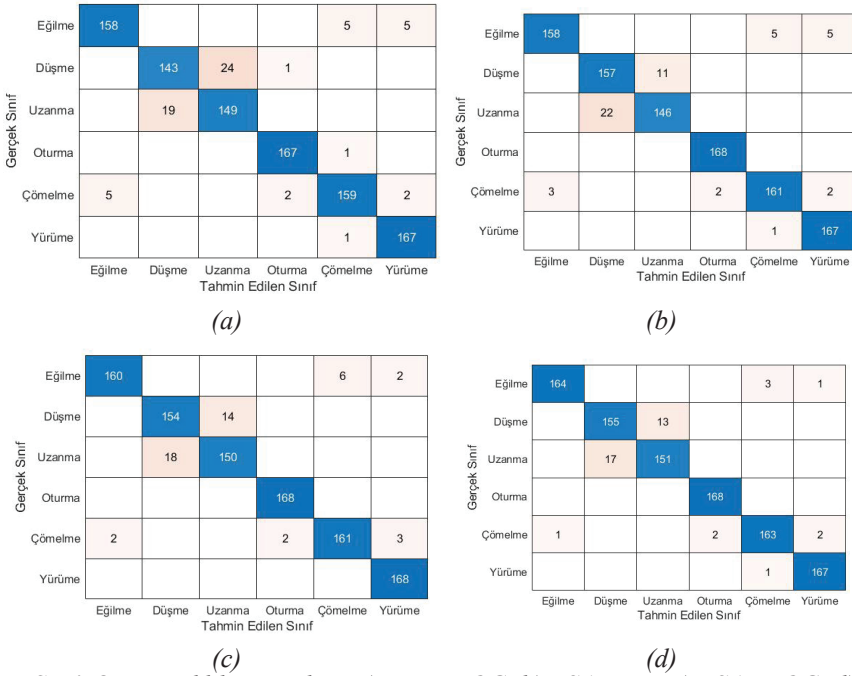
Şekil 7. Karışıklık matrisleri, a) LBP, b) HOG, c) ESA.

İkinci deneysel çalışmada, HOG ve LBP olarak yerel tanımlayıcıların ve ESA tabanlı derin özelliklerin çeşitli kombinasyonları kullanılarak sınıflandırma performansları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Yerel ve derin özelliklere dayalı kombinasyonların performans ölçütleri (%)

	Doğruluk	Yanlış Pozitif Oran	Kesinlik	Özgüllük	F1-Skor
LBP+HOG	93.55	1.29	93.55	98.71	93.54
ESA+LBP	94.94	1.01	95.01	98.99	94.93
ESA+HOG	95.34	0.93	95.35	99.07	95.33
Önerilen Model	96.03	0.79	96.04	99.21	96.03

Tablo 3’te görüleceği üzere, LBP, HOG ve Derin özelliklerin kombinasyonuna dayalı önerilen model kullanılarak %96.03 olarak en yüksek doğruluk skoru elde edilmiştir. Diğer yandan, derin özellikler ile HOG özelliklerin kombinasyonu, %95.34 ile en iyi ikinci doğruluk skoru iken, Derin özellikler ile LBP özelliklerin kombinasyonu kullanılarak ise %94.94 doğruluk skoru elde edilmiştir. Ayrıca, sadece yerel tanımlayıcılardan elde edilen özelliklerin birleştirilmesine dayalı yapılan deneysel çalışmada, %93.55 doğruluk skoru elde edilmiştir. Önerilen modelin ve Tablo 3’te verilen birleştirilmiş yöntemlerin karışıklık matrisleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Karışıklık matrisleri, a) LBP+HOG, b) ESA+LBP, c) ESA+HOG, d) Önerilen Model

Şekil 8(d)’den anlaşılacağı üzere, önerilen model kullanılarak düşme tespiti için %92.3 başarımla elde edilmiştir. Buna ek olarak, uzanma eylemi için %92.1 doğruluk elde edilirken, diğer eylemleri tanıma başarımları ortalama %98-100’dür.

Üçüncü deneysel çalışmada ise 6 eylemin sınıflandırılması ile ilgili çalışmaların yanı sıra, düşme ve düşme olmayan eylemler olmak üzere 2 sınıfın tespiti yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada, düşme ve düşme olmayan (eğilme, uzanma, oturma, çömelleme, yürüme) eylemlerin sınıflandırılması için LBP, HOG ve ESA tabanlı elde edilen özelliklerin kombinasyonuna dayalı önerilen model kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, önerilen model

kullanılarak elde edilen doğruluk, %99.01'dir. Buna ek olarak, LBP, HOG ve ESA yöntemlerinin bireysel doğruluk skorları sırasıyla %95.05, %96.04, ve %98.02'dir.

Önerilen yerel ve derin tabanlı hibrit modelin performans değerlendirmesi için bu çalışmada kullanılan veri setine dayalı yapılmış çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu performans karşılaştırılması Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Önerilen model ile diğer çalışmaların karşılaştırılması (%)

	Aslan vd. (2017)	Önerilen Model
2 sınıfı	97.92	99.01
6 sınıfı	87.18	96.03

Tablo 4'ten anlaşılacağı üzere, 2'li sınıf (düşme ve düşme olmayan) için önerilen model kullanılarak Aslan ve diğ. (2017) çalışmalarına göre yaklaşık %2 başarımlı artışı elde edilirken, 6'lı sınıf için ise yaklaşık %8 başarımlı artışı elde edilmiştir. Ayrıca, literatürde, farklı veri setlerine dayalı düşme eylemi tespiti ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, genellikle düşme ve düşme olmayan eylemler ile ilgili sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda yapılan deneysel çalışmalarda, ortalama olarak %88-98 aralığında doğruluk skorları elde edilmiştir (Aslan ve ark., 2005; Núñez-Marcos ve ark., 2017; Shiba ve ark., 2017; Chen ve ark., 2020c; Xu ve ark., 2020). Sonuç olarak, mevcut çalışmada önerilen model kullanılarak düşme tespitine yönelik yapılan çalışmalara göre daha iyi performans elde edildiği açıkça gözlenmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, derinlik görüntülerini içeren video verileri kullanılarak düşme dahil olmak üzere eğilme, uzanma, oturma, çömelme ve yürüme eylemlerinin sınıflandırılması için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen model, yerel tanımlayıcılar (LBP ve HOG) ve ESA tabanlı derin özelliklerinin kombinasyonuna dayalıdır. Bu hibrit özellikler, LDA yöntemi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Önerilen modeli test etmek için kamuya açık olan FUKinect-Fall veri seti kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, 6 eylemin sınıflandırılması için önerilen modelin doğruluk skoru, %96.03 olarak elde edilmiştir. Diğer yandan, sadece düşme eyleminin tespiti için %99.01 doğruluk elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen model kullanılarak aynı veri setine dayalı yapılan çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, düşme tespitine yönelik farklı veri setleri kullanılacak ve performans artışı için özellik seçme yöntemleri incelenecektir.

KAYNAKLAR

- Ahonen, T., Hadid, A., and Pietikäinen, M. (2004, May). Face recognition with local binary patterns. In European conference on computer vision, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 469-481.
- Aslan, M., Sengur, A., Xiao, Y., Wang, H., Ince, M. C., and Ma, X. (2015). Shape feature encoding via fisher vector for efficient fall detection in depth-videos. *Applied Soft Computing*, vol. 37, pp. 1023-1028.
- Aslan, M., Akbulut, Y., Şengür, A., and Ince, M. C. (2017). Skeleton based efficient fall detection. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 32, no. 4, pp 1025-1034.
- Bian Z.P., Chau L.P., Magnenat-Thalmann N. (2012). Fall detection based on skeleton extraction, *Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, Singapore, pp. 91-94.
- Charfi, I., Miteran, J., Dubois, J., Atri, M., and Tourki, R. (2012, November). Definition and performance evaluation of a robust SVM based fall detection solution, In 2012 Eighth International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems, pp. 218-224.
- Chen, H., Chen, A., Xu, L., Xie, H., Qiao, H., Lin, Q., and Cai, K. (2020a). A deep learning CNN architecture applied in smart near-infrared analysis of water pollution for agricultural irrigation resources. *Agricultural Water Management*, 240, 106303.
- Chen, Z., Mauricio, A., Li, W., and Gryllias, K. (2020b). A deep learning method for bearing fault diagnosis based on cyclic spectral coherence and convolutional neural networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 140, 106683.
- Chen, W., Jiang, Z., Guo, H., and Ni, X. (2020c). Fall detection based on key points of human-skeleton using openpose. *Symmetry*, 12(5), 744.
- Dalal, N., and Triggs, B. (2005, June). Histograms of oriented gradients for human detection. In 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05), vol. 1, pp. 886-893.
- Dubois A., Charpillet F. (2013). Automatic Fall Detection System with a RGB-D Camera using a Hidden Markov Model, 11th International Conference on Smart Homes and Health Telematics (ICOST 2013), Singapore, pp. 259-266.
- Friedman, S. M., Munoz, B., West, S. K., Rubin, G. S., and Fried, L. P. (2002). Falls and fear of falling: which comes first? A longitudinal prediction model suggests strategies for primary and secondary prevention. *Journal of the American Geriatrics Society*, vol. 50, no. 8, pp. 1329-1335.
- Harrou, F., Zerrouki, N., Sun, Y., and Houacine, A. (2016, July). A simple strategy for fall events detection. In 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 332-336.

- He, D. C., and Wang, L. (1990). Texture unit, texture spectrum, and texture analysis. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 509-512.
- Lee C-Y, Gallagher PW, Tu Z (2016) Generalizing pooling functions in convolutional neural networks: mixed, gated, and tree. In: *Artificial intelligence and statistics*, pp 464–472.
- Lee, T., and Mihailidis, A. (2005). An intelligent emergency response system: preliminary development and testing of automated fall detection. *Journal of telemedicine and telecare*, vol. 11, no. 4, pp. 194-198.
- Lord, S. R., Sherrington, C., Menz, H. B., and Close, J. C. (2007). *Falls in older people: risk factors and strategies for prevention*. Cambridge University Press.
- Ma X., Wang H., Xue B., Zhou M., Ji B., Li Y. (2014). Depthbased human fall detection via shape features and improved extreme learning machine, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 18, no. 6, pp. 1915-1922.
- Mubashir, M., Shao, L., and Seed, L. (2013). A survey on fall detection: Principles and approaches. *Neurocomputing*, vol. 100, pp. 144-152.
- Núñez-Marcos, A., Azkune, G., and Arganda-Carreras, I. (2017). *Vision-based fall detection with convolutional neural networks*, *Wireless communications and mobile computing*, 2017.
- Pannurat, N., Thiemjarus, S., and Nantajeewarawat, E. (2014). Automatic fall monitoring: a review. *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 12900-12936.
- Pietikäinen, M. (2010). Local binary patterns. *Scholarpedia*, vol. 5, no. 3, pp. 9775.
- Popoola, O. P., and Wang, K. (2012). Video-based abnormal human behavior recognition—A review. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, *IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 6, pp. 865-878.
- Rougier, C., Meunier, J., St-Arnaud, A., and Rousseau, J. (2011). Robust video surveillance for fall detection based on human shape deformation. *IEEE Transactions on circuits and systems for video Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 611-622.
- Saa, J. F. D., & Gutierrez, M. S. (2010, June). EEG signal classification using power spectral features and linear discriminant analysis: A brain computer interface application. In *Eighth Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, Arequipa: LACCEI, pp. 1-7.
- Shiba, K., Kaburagi, T., and Kurihara, Y. (2017). Fall detection utilizing frequency distribution trajectory by microwave Doppler sensor. *IEEE Sensors Journal*, 17(22), 7561-7568.
- Shu, C., Ding, X., and Fang, C. (2011). Histogram of the oriented gradient for face recognition. *Tsinghua Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 216-224.

- Shashua, A., Gdalyahu, Y., and Hayun, G. (2004, June). Pedestrian detection for driving assistance systems: Single-frame classification and system level performance. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1-6.
- Siqueira, L. F., Júnior, R. F. A., de Araújo, A. A., Morais, C. L., & Lima, K. M. (2017). LDA vs. QDA for FT-MIR prostate cancer tissue classification. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 162, 123-129.
- Stevens, J. A., Corso, P. S., Finkelstein, E. A., and Miller, T. R. (2006). The costs of fatal and non-fatal falls among older adults. *Injury prevention*, vol. 12, no. 5, pp. 290-295.
- Stone, E. E., and Skubic, M. (2012, May). Passive, in-home gait measurement using an inexpensive depth camera: Initial results. In *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth)*, 2012 6th International Conference on, pp. 183-186.
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., and Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2818-2826.
- Tinetti, M. E., Speechley, M., and Ginter, S. F. (1988). Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *New England journal of medicine*, vol. 319, no. 26, pp. 1701-1707.
- Turkoglu, M. (2019). Image processing based plant species and diseases recognition, Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Inonu University, Turkey.
- Vellas, B. J., Wayne, S. J., Romero, L. J., Baumgartner, R. N., and Garry, P. J. (1997). Fear of falling and restriction of mobility in elderly fallers. *Age and ageing*, vol. 26, no. 3, pp. 189-193.
- Vishwakarma, V., Mandal, C., and Sural, S. (2007, December). Automatic detection of human fall in video. In *International conference on pattern recognition and machine intelligence*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 616-623.
- Wang, R. D., Zhang, Y. L., Dong, L. P., Lu, J. W., Zhang, Z. Q., and He, X. (2015, October). Fall detection algorithm for the elderly based on human characteristic matrix and SVM. In *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2015 15th International Conference on, pp. 1190-1195.
- Wang, X., Han, T. X., and Yan, S. (2009, September). An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling. In *2009 IEEE 12th international conference on computer vision*, pp. 32-39.
- Xu, Q., Huang, G., Yu, M., and Guo, Y. (2020). Fall prediction based on key points of human bones. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 540, 123205.
- Zerrouki, N., Harrou, F., Houacine, A., and Sun, Y. (2016, November). Fall detection using supervised machine learning algorithms: A comparative study. In *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, pp. 665-670.

Bölüm 10

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN
KOMPOZİTLERİN AŞINMA VE SÜRTÜNME
PERFORMANSLARINA NANO-ÇİNKO
OKSİT KATKISI VE PROSES
ŞARTLARININ ETKİSİNİN
BELİRLENMESİ**

*Mehmet KURT¹
Hüseyin ÜNAL²
Münir TAŞDEMİR³*

1 Mehmet KURT Sakarya University Institute for Natural and Applied Science, Sakarya, Turkey ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1215-1944>, mehmetkurt1980@windowslive.com

2 Prof.Dr. Hüseyin ÜNAL Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Esentepe kampusu, Sakarya, Turkey ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>, unal@subu.edu.tr

3 Prof.Dr. Münir TAŞDEMİR Marmara University, Faculty of Technology, Göztepe kampusu, İstanbul, Turkey ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8635-7251>,munir@marmara.edu.tr

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimer malzemeler günümüzde hafiflik, düşük maliyeti, kolay şekillendirilebilme ve elektriksel yalıtkanlık gibi birçok özelliklerinden dolayı çeşitli alanlarda oldukça fazla kullanılmaktadır. Fakat, mukavemet ve sertlik özelliklerinin düşük olması ve sıcaklık dayanımının az olmasından dolayı günlük hayatta ve endüstride kullanım alanları sınırlanmaktadır. Bu dezavantajları minimize etmek ve endüstride kullanım alanlarını genişletmek için katkısız polimerler malzemelere talk, kaolin, cam küre, grafit, molibden vb. gibi bazı katkıları, cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf gibi mukavemet artırıcılar ve kalsit gibi dolgular ilave edilmektedir. Buna ilaveten son yıllarda polimer malzemelere odun tozu/lifi, bambu lifi, pirinç kabuğu, fındık kabuğu, ceviz kabuğu, keten ve ağaç lifi gibi katkıları kullanılarak kompozit malzemeler üretilmekte olup endüstride polimer matrisli malzemelerin kullanım alanları genişletilmeye çalışılmaktadır. Bu konudaki literatürde birçok çalışmaya rastlanmaktadır [1,2,3,4,5,6,7,8]. Literatür incelendiğinde farklı amaçlar için birçok farklı polimer malzemeye elyaf [9,10,11,12], mineral katkıları [13,14], doğal lifler [15,16] ve katı yağlayıcılar [17,18,19,20] ilave edildiği gözlenmiştir. Aşınma ve sürtünmenin ön plana çıktığı endüstriyel alanlarda PTFE [21,22,23], POM[24,25], ÇYMAPE[26,27,28], poliamid (PA6, PA66) [29,30], ve YYPE [31,32,33] polimerlerinin oldukça yaygın kullanıldığı da görülmektedir. Bu polimerlerin aşınma ve sürtünme özelliklerini geliştirmek/iyileştirmek için ise grafit, PTFE, Molibden disülfid [34,35], wax[36,37], bakır oksit[38], çinko borat[39], ve çinko oksit [40,41,42,43,44,45,46] gibi katı yağlayıcıların kullanıldığı gözlenmektedir. Bu çalışmalardan birinde Taşdemir ve ark.; yüksek yoğunluklu polietilene (YYPE) ağırlıkça ve ayrı ayrı %5 ile %20 arasında değişen oranlarda talk, kalsit, cam fiber ve talk/kalsit katkıları birarada ilave ederek kompozit üretmişlerdir. Ürettikleri kompozit malzemelerin sertlik, darbe ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Sertlik deneyleri sonucunda, deneylerde kullanılan tüm katkı malzemeleri kompozitlerin sertliğini artırdığı gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri, 60 shore D olarak %20 oranında cam fiber takviyeli YYPE kompozitinde elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise kalsit/talk hibrit katkılı YYPE kompozitinde elde edilmiştir. Izod darbe sonuçlarına bakıldığında ise YYPE polimerine ilave edilen talk, kalsit, cam fiber ve talk/kalsit hibrit katkıların ilavesiyle birlikte darbe dayanımında düşüş gözlenmiştir. Aşınma deney sonuçlarına bakıldığında yine en yüksek aşınma direnci %20 cam fiber katkılı YYPE kompozitinde gözlenmiştir [47]. Cho ve ark.; yüksek yoğunluğu polietilen polimerine ve eksenel yönlendirilmiş polipropilen polimerine teflon, yüksek yoğunluklu polietilen, poliüretan ve polietilen kaplayarak aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Deneyleri, pin-disk aşınma cihazında 0.05-

0.5N yüklerde ve 0.2 ile 1.0m/s hızları arasında gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarında, uygulanan yükün ve hızın artmasıyla birlikte PTFE kaplanmış polipropilen polimer karışımında en düşük sürtünme katsayısı elde edilirken, aksel yönlendirilmiş yüksek yoğunluklu polietilen kaplanmış YYPE polimerinde en yüksek sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir [48]. Dong ve ark.; saf baz yağı ve baz yağına %1 oranında 20-50 nm boyutlarında çinko borat (ZnO) ilavesiyle birlikte pin-on disk aşınma cihazıyla önce 245N yük ve 10 dakika süren ve ardından 295N yükte ve 30 dakika süren aşınma testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda 20-50 nm boyutta çinko borat ilavesiyle birlikte sürtünme katsayısında düşüş saptanmıştır [49]. Simonsen ve ark.; ağırlıkça %10 ile %60 arasında değişen oranlarda ağaç tozu katkılı yüksek yoğunluk polietilen polimerine ağırlıkça yine %10'dan %60'a kadar değişik oranlarda çinko borat (ZnBr) ilave edilerek kompozit malzeme üretmişler ve kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Gerçekleştirilen testler sonucunda YYPE bünyesindeki çinko borat oranının artmasıyla birlikte kopma mukavemetinde azalma saptanırken, elastiklik modülünde ise hafif artış gözlenmiştir [50]. Başka bir çalışmada Tian ve ark.; kristal ve hidrofobik çinko oksit kaplı disk baz yağı kaplı disk, baz yağına ağırlığınca %1 oranında ZnO ile yine ağırlığınca %1 oranında nano boyutta ZnO ilavesiyle oluşan 3 farklı malzemeye pin-on disk aşınma cihazıyla 600 dev/dak hızda 600N yükte ve 30 dakika süre ile aşınma deneyi yapılmıştır. Deneysel sonucunda sürtünme katsayılarına bakıldığında en yüksek değer saf baz yağında görünürken, en düşük sürtünme katsayısı nano parça boyutunda ZnO ilaveli baz yağında saptanmıştır [51]. Hua Su ve ark.; cam fiber takviyeli teflon ve %4 oranında nano-çinko oksit katkılı cam fiber takviyeli teflon hibrit kompozit malzemesi üretmişler ve tribolojik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Pin-disk aşınma deneyleri 128N-224N yük aralıklarında 0.26 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda karşı disk olarak AISI1045 çeliği kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda uygulanan yükün artması ile birlikte her iki kompozit malzemedeki de aşınma oranında artış gözlenmiş ancak sürtünme katsayılarında ise düşme tespit edilmiştir [52]. Sanes ve ark.; iyonik sıvı (%1.5) ilaveli epoksi reçineye %0.5 oranında çinko oksit ilave ederek tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarda pin-on-disk aşınma cihazında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda, 4.9N yük ve 0.5 m/s kayma hızında AISI316L paslanmaz çelik diske karşı gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda en düşük sürtünme katsayısı iyonik sıvı katkılı epoksi reçinede elde edilmiştir [53]. Altan ve ark.; polipropilen kompozitlerin mekanik özelliklerine nano boyutlu titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) katkı oranlarının (ağırlıkça %1-5) kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarda titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) katkı oranlarına bağlı olarak kompozitlerin akma

mukavemeti çekme mukavemeti, elastiklik modülü değerlerinde hafif artış gözlenirken % uzama değerlerinde ise azalma olduğunu gözlemişlerdir[54]. Raju ve ark. [55], polyester malzemesine ağırlıkça %1, %2, %4 ve %6 oranlarında nano boyutta çinko oksit (ZnO) ilave ederek kompozit üretmişler ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Aşınma deneylerini pin-on disk aşınma cihazında gerçekleştirmişlerdir. Deneyler 5, 10 ve 15 dakika süre ile 5N, 10N, 15N ve 20N yüklerde yapılmıştır. Deneyler sonucunda polyester esaslı kompozit malzemelerde çinko oksit oranının artması, kompozitlerin aşınma oranında artışa sebep olmuştur. Ayrıca deney süresinin 5 dakikadan 15 dakikaya çıkarılmasıyla birlikte ZnO katkılı kompozitlerin aşınma oranında artış gözlenmiştir. En fazla aşınma oranı %6 çinko oksit katkılı polyester kompozit malzemesinde saptanmıştır Raju ve ark. [56], polietilen polimerine ağırlıkça %1, %2, %4 ve %6 oranlarında nano boyutta ZnO ilave ederek ürettikleri kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler, pin-on disk cihazında oda sıcaklığında yapılmış, karşı disk olarak çelik disk kullanılmıştır. Aşınma deneyleri 5N,10N,15N ve 20N gibi farklı yükler altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, polietilen esaslı kompozite ilave edilen nano ZnO katkısı ile birlikte aşınma oranında hafif artış tespit edilmiştir. En yüksek aşınma oranı %6 nano-ZnO katkılı polietilen kompozit malzemesinde tespit edilmiştir. Aynı zamanda yükün artmasıyla birlikte aşınma oranı değerlerinin yükseldiğini tespit etmişlerdir [56]. Sharma ve ark.; saf çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çinko oksit katkılı çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimer kompozit malzemelerine 9.81N yükte ve 6 Hertz frekans dönüş hızında aşınma testleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda çok yüksek molekül ağırlıklı polietilene ilave edilen çinko oksit oranının artmasıyla birlikte kompozitlerin aşınma oranında artış tespit edilmiştir [57]. Bu deneysel çalışmada ise katkısız yüksek yoğunluklu polietilen polimeri ile %5 çinko oksit (ZnO) katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompoziti (YYPE+%5ZnO), %10 çinko oksit katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompoziti (YYPE+%10ZnO) ve %15 çinko oksit tozu katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerinin (YYPE+%15ZnO) aşınma ve sürtünme özellikleri incelenmiştir. Pim-disk aşınma deneyleri 1.0m/s, 2.0m/s ve 3.0m/s kayma hızında 60N, 100N ve 140N yük altında ve 2000m kayma yolunda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, 23°C oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarında yapılmıştır. Karşı disk malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Saf yüksek yoğunluklu polietilen polimeri ile farklı oranlarda çinko oksit katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranlarına çinko oksit katkı oranı ile uygulanan yük ve kayma

hızının etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu deneysel çalışmada aşınma yüzey mikroyapı incelemeleri için ise optik mikroskop kullanılmıştır.

1. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORK)

Bu çalışmada, YY (I 668 UV) ticari kodlu yüksek yoğunluklu polietilen polimer matris malzemesi PETKİM Petrokimya Firmasından Türkiye, temin edilmiş olup teknik özellikleri Tablo 1.'de verilmiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan çinko oksit ise yaklaşık 50nm partikül boyutunda (MKN ZnO-050) MK-Nano Kanada, firmasından %99,9 saflıkta toz formunda temin edilmiştir. %5, %10 ve %15 oranında çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitleri önce çift vidalı ekstruder kullanılarak granül formunda üretilmiştir. Daha sonra ise özel olarak dizayn edilmiş bir kalıp kullanılarak Yonca marka geleneksel bir plastik enjeksiyon makinası kullanılarak test numuneleri ilgili standartlara uygun olarak üretilmiştir. Enjeksiyon ısıtıcı sıcaklıkları 180-220°C arasında, enjeksiyon basıncı ise 30 bar olarak ayarlanmıştır. Aşınma test numuneleri silindirik pim formunda 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda basılmıştır. Pim-disk cihazında karşı disk olarak AISI 316L paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Paslanmaz çelik disk 90 mm çapında ve 8 mm kalınlığında olacak şekilde geleneksel bir tornada hassas bir biçimde tornalanmıştır. Daha sonra ise disk yüzeylerinin iki yüzü de düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Çelik disk yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, yüzey profilometresi ile 0.30 µm Ra olarak ölçülmüştür. Her test öncesi ve sonrasında hem disk hem de pim yüzeyleri aseton kullanılarak temizlenmiştir.

Tribolojik deneylerde, katkısız yüksek yoğunluklu polietilen polimeri ile %5 çinko oksit, %10 çinko oksit ve %15 çinko oksit katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompozit pim malzemelerin AISI316L paslanmaz çelik diske karşı sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı değişimleri araştırılmıştır. Her testten önce polimer esaslı pim ve paslanmaz çelik disk yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Çalışmada kullanılan katkısız YYPE polimeri ile ZnO katkılı YYPE polimer kompozit malzemeler için triboloji deneylerinde uygulanan yük, kayma hızı ve çalışma ortam sıcaklığı gibi test şartları Tablo 2'de verilmiştir. Spesifik aşınma oranını belirlemek için her testten önce (m_1) ve sonra (m_2) polimer esaslı pim ağırlıkları hassas bir şekilde ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δm) değerleri tespit edilmiştir ve Eşitlik 1'de verilen formül ile spesifik aşınma oranları (K_0) hesaplanmıştır.

$$K_0 = \frac{\Delta m}{L\rho F} \quad (m^2/N)$$

Eşitlik 1

Formülde; Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), ρ : malzemelerin yoğunluğu (g/cm^3) ve F: uygulanan yük (N)'tür.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan YYPE polimerinin oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarındaki özellikleri [58]

Mekanik Özellikleri			
Özellikler	Test Metodu	Birim	Tipik Değer
Akma mukavemeti	ASTM D638	MPa	30
Kopma mukavemeti	ASTM D638	MPa	17
Kopmada % uzama	ASTM D638	%	1250
Sertlik	ASTM D2240	Shore D	66
Izod Darbe Dayanımı (çentikli)	ASTM D256	J/m	50
Termal Özellikler			
Ergime Noktası (DSC)	ASTM D3418	°C	134
Vicat Yumuşama sıcaklığı, 10 N	ASTM D1525	°C	124
Fiziksel Özellikler			
Yoğunluk	ASTM D1505	g/cm^3	0.965
Erime Akış indeksi (190°C/2.16 kg)	ASTM D1238	g/10 dak.	5.5
Proses Şartları			
Tipik kalıp sıcaklığı:		°C	10-40
Tipik eriyik sıcaklığı:		°C	200-260

Deneylerde kullanılan polimer ve polimer kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ise aşağıdaki gibi tespit edilmiştir. Elektrik motorunun tahriği ile dönen çelik bir diskin üzerine deneylerde kullanılan AISI316K paslanmaz çelik disk bir vida yardımıyla sabitlenmiştir. Şekil 1’de şematik fotoğrafı verilen pim-disk aşınma cihazındaki kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile 6 mm çapındaki polimer pim, yük oluşturan kola bağlanmıştır. Aşınma test cihazı çalıştırıldığında, pim numunesinin diske temasıyla birlikte pim numunesinin bağlı olduğu kol aparatı da diskin dönme yönüne doğru hareket etmek istemektedir. Bu ileriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Bu yanal kuvvet ise bir yük hücresi (Load-cell) kullanılarak ölçülmüştür. Deney süresince yaklaşık olarak 65.000 veri okunmuş ve bu veriler aynı zamanda direk bilgisayarda Excel programında depolanmıştır. Deneylerde deney süresince elde edilen yanal yük verileri uygulanan yüke bölünerek Excel programında sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmış ve grafik haline getirilmiştir. Bilindiği gibi sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, uygulanan normal kuvvete oranı olarak ifade edilir ve aşağıdaki Eşitlik 2’ de verilen formülle hesaplanır.

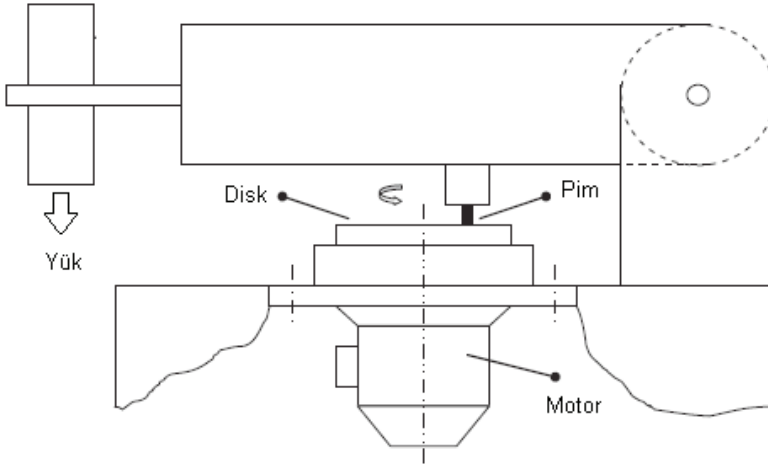
$$\mu = F_s / F_n$$

Eşitlik 2

Yukarıdaki formülde μ :sürtünme katsayısını, F_s :yanal sürtünme kuvveti (N) ve F_n ise normal kuvveti (N) ifade etmektedir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan polimer kompozit malzemeleri ve tribolojik test şartları

Malzeme	Kayma hızı, m/s	Yük, N	Kayma mesafesi, m	Ortam sıcaklığı, °C
YYPE	1.0	60	2000	23
YYPE+%5ZnO	2.0	100		
YYPE+%10ZnO	3.0	140		
YYPE+%15ZnO				



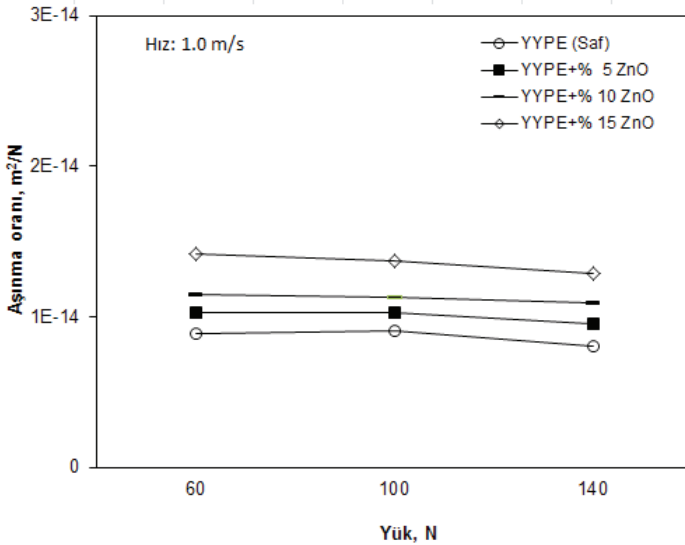
Şekil 1. Şematik pim-disk aşınma test cihazı

2. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

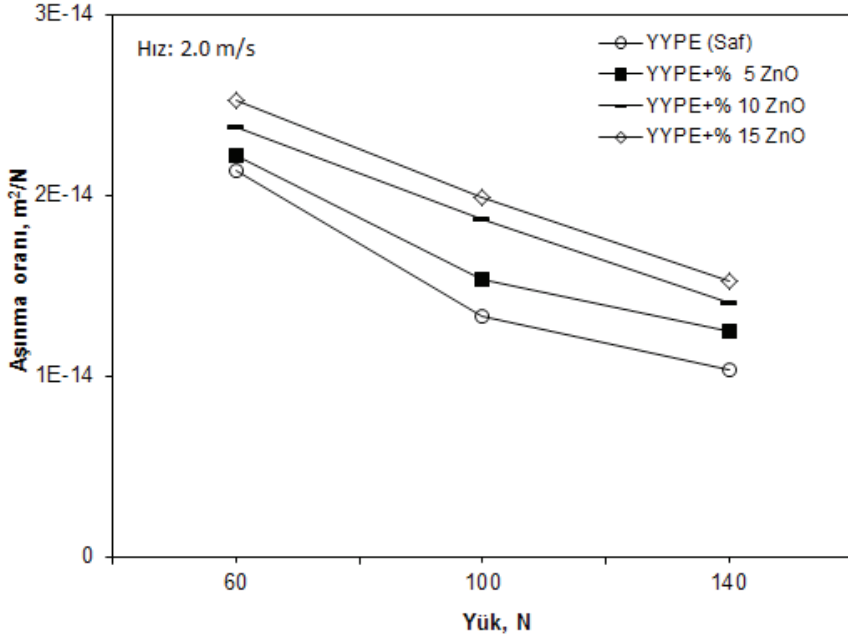
Şekil 2.'de saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin 1.0 m/s hız altındaki spesifik aşınma oranı ile yük ilişkisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi en düşük spesifik aşınma oranı katkısız YYPE polimerinde gözlenirken sırasıyla YYPE-%5ZnO, YYPE-%10ZnO ve YYPE-%15ZnO kompoziti olarak sıralanmıştır. Şekil dikkatli bir şekilde incelendiğinde uygulanan yükün (60 N'den 140N'a) %133 oranında artırılması ile saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 çinko oksit katkılı YYPE kompozit malzemelerin

aşınma oranı hafif düştüğü görülmüştür. Aşınma oranındaki bu düşüş saf YYPE polimeri için yaklaşık % 9.9 oranında tespit edilirken, %5, %10 ve %15 oranında çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerde ise %6.7, %5.2 ve % 9.1 oranında tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi YYPE kompozitindeki ZnO oranının artması ile kompozitlerin spesifik aşınma oranlarında YYPE polimerine göre önemli derecede artışlar olduğu tespit edilmiştir.

YYPE polimeri ile çinko oksit katkılı YYPE kompozit malzemelerin 60N, 100N ve 140N yükler altında ve 2.0m/s kayma hızındaki spesifik aşınma oranının değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Kayma hızının 2.0m/s olarak artırılmasıyla deneylerde kullanılan saf YYPE ve YYPE kompozit malzemelerin sürtünme katsayıları Şekil 2’de elde edilen verilere göre daha belirgin davranış göstermektedir. Yani uygulanan yükün artması ile deneylerde kullanılan tüm malzemelerin spesifik aşınma oranları belirgin olarak azalmıştır. Uygulanan yükün 60N’dan 140N’a çıkarılmasıyla yani uygulanan yükün %133 oranında artırılması ile saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin spesifik aşınma oranları sırasıyla %51.7, % 43, % 40.8 ve %39.7 oranında azalma gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi YYPE kompozitindeki ZnO oranının artması ile kompozitlerin spesifik aşınma oranlarında belirgin artışlar gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önce literatürde Raju ve arkadaşlarının [55,56] ve Sharma ve arkadaşlarının [57] yaptıkları çalışmalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir.



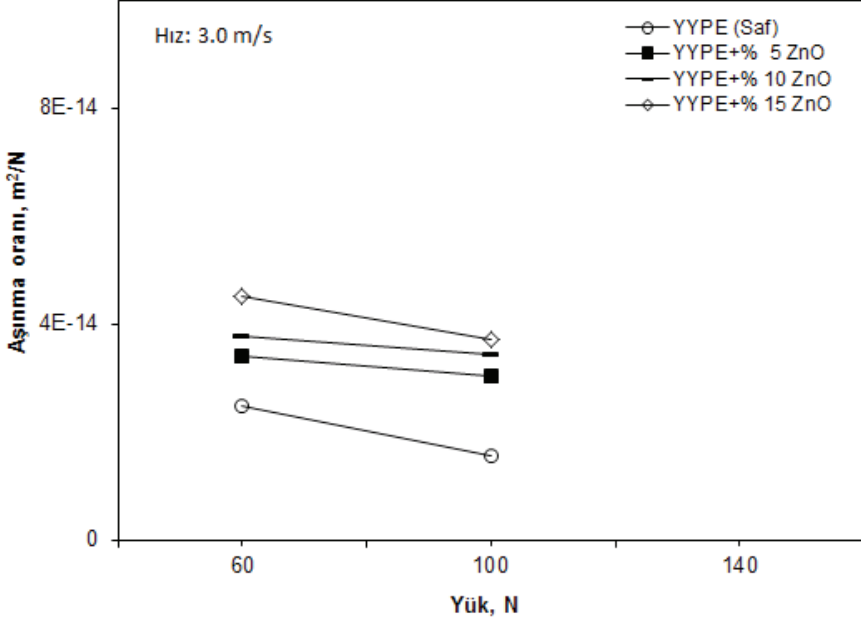
Şekil 2. Saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin aşınma oranı-uygulanan yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0m/s)



Şekil 3 Saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin aşınma oranı-uygulanan yük ilişkisi (Kayma hızı: 2.0m/s)

YYPE polimeri ile çinko oksit katkılı YYPE kompozit malzemelerin **3.0m/s** kayma hızındaki spesifik aşınma oranı-uygulanan yük ilişkisi Şekil 4’de verilmiştir. Gerçekleştirilen triboloji deneyleri sonucunda 3.0 m/s kayma hızında ve farklı test yükleri altında deneylerde kullanılan tüm malzemeler için hem pim ve disk sıcaklıkları yükselmiş bunun sonucunda pim malzemelerde yumuşama gözlenmiştir. Bazı deneyler tamamlanmış fakat malzemeler deforme olmuş bazı numuneler ise tamamlanamamıştır. Bu sebeple 3.0m/s kayma hızındaki ve 140N yük altındaki deney sonuçlarında hataya sebep olacağı düşüncesiyle elde edilen veriler kullanılmamıştır. Deneylerde kullanılan tüm malzemelerin maksimum çalışabileceği yük ve hız şartlarının 2m/s hız ve 100N yük olarak belirlenmiştir. Şekil 4’de görüldüğü gibi en düşük spesifik aşınma oranı saf YYPE polimerinde elde edilmiştir. Uygulanan yükün 60N’dan 100N’a artırılması ile spesifik aşınma oranı %37.85 oranında azalmıştır. Kompozit malzemedeki nano-ZnO oranının artması ile kompozitlerin spesifik aşınma oranlarında artış gözlenmiştir. Katkısız YYPE polimerinden sonra spesifik aşınma oranı artışı sırasıyla %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerde elde edilmiştir. Kompozitteki nano-ZnO oranının artması ile spesifik aşınma oranı değerlerinde azalma gözlenmiştir. En belirgin azalma %17.8 oranı ile uygulanan yük aralığında (60N-100N) %15 oranında nano-çinko

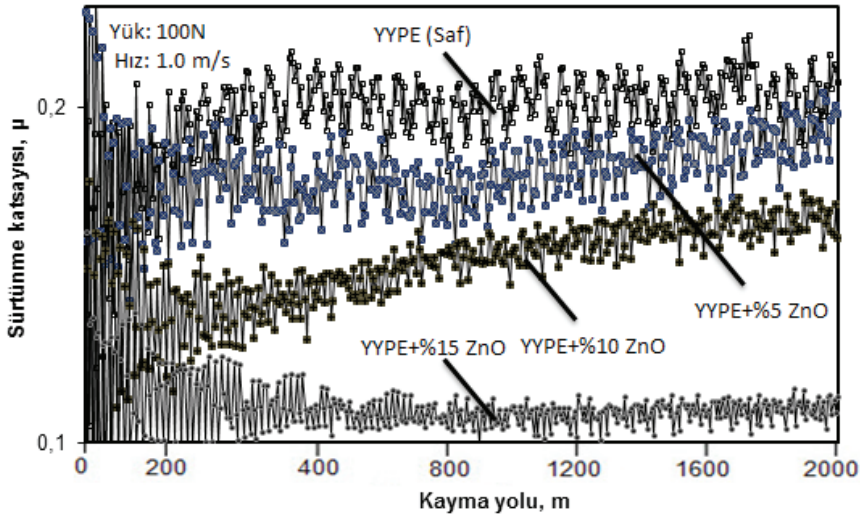
oksit katkılı YYPE kompozitte gözlenmiştir. Şekil 3’de görüldüğü gibi 3.0m/s kayma hızında ve uygulanan yükler altında YYPE kompozitindeki nano-ZnO oranının artması ile kompozitlerin spesifik aşınma oranlarında artışlar gözlenmiştir. Bu konuda elde edilen sonuçlar daha önce literatürde yapılan çalışmalarla [55, 56, 57] benzerlikler göstermektedir.



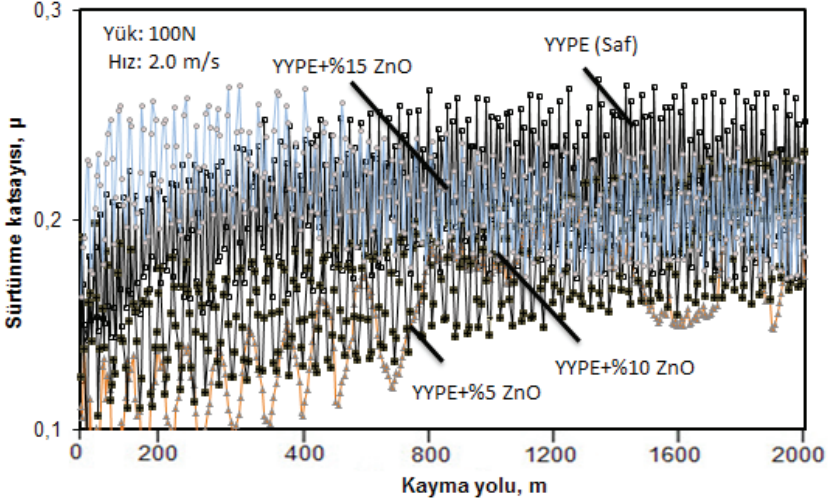
Şekil 4 Saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin aşınma oranı-uygulanan yük ilişkisi (Kayma hızı: 3.0m/s)

1.0m/s kayma hızında ve 100N yük altında yapılan aşınma ve sürtünme deneyleri sonucunda saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranlarında nano-çinko oksit katkılı YYPE esaslı kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi Şekil 5.’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katkısız YYPE polimeri ile %5 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitler yaklaşık 400 m yol aldıktan sonra stabilize olurken %10 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitin sürtünme katsayısının sürekli attığı gözlenmiştir. 100N yük altında ve 1.0 m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda saf YYPE polimeri ile %5 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayıları yaklaşık olarak 0.19 olarak tespit edilirken %5 ve %10 nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,12 ve 0.15 olarak tespit edilmiştir.

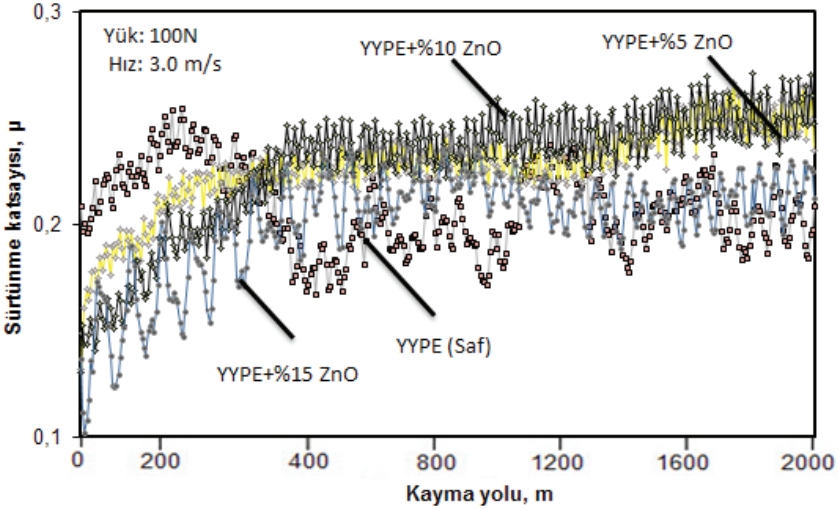
Şekil 6.'da 100N yük altında ve 2.0 m/s kayma hızında gerçekleştirilen tribolojik deneyler sonucunda saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranlarında nano-çinko oksit katkılı YYPE esaslı kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisini verilmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü üzere saf YYPE polimeri ile %5 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitlerin sürtünme katsayıları yaklaşık olarak 800m yol aldıktan sonra stabilize olurken %10 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitin sürtünme katsayısı ise yaklaşık olarak 1000m yol aldıktan sonra stabilize olmuştur. 2.0 m/s kayma hızında ve 100N yük altında YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0.22, 0.18, 0.19 ve 0.20 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Saf YYPE polimeri ile ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s, Uygulanan yük: 100N)



Şekil 6. Saf YYPE polimeri ile ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 2.0 m/s, Uygulanan yük: 100N)



Şekil 7. Saf YYPE polimeri ile ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 3.0 m/s, Uygulanan yük: 100N)

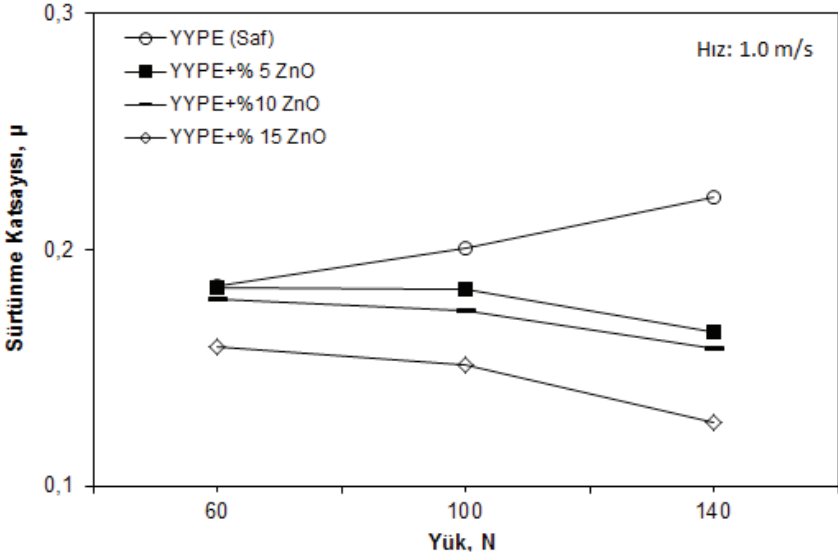
3.0 m/s kayma hızında ve 100N yük altında yapılan aşınma ve sürtünme deneyleri sonucunda katkısız YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranlarında nano-çinko oksit katkılı YYPE esaslı kompozit malzemelerin sürtünme katsayısının kayma yolu ile değişimi Şekil 7.'de verilmiştir.

Şekilden de anlaşılacağı gibi deneylerde kullanılan tüm malzemelerin sürtünme katsayısının değişimi 0.18-0.26 aralığında olduğu gözlenmiştir. %5 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitin sürtünme katsayısı 400m yol aldıktan sonra stabilize olurken saf YYPE polimeri ise yaklaşık olarak 650m yol aldıktan sonra stabilize olmuştur. %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitlerin sürtünme katsayıları ise yaklaşık olarak 500-600m aralığında yol aldıktan sonra dengeli duruma ulaşmıştır. 100N yük altında ve 3.0 m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda saf YYPE polimeri ile %5 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayıları yaklaşık olarak 0.26 olarak tespit edilirken %10 ve %15 nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları ise sırasıyla 0,23 ve 0.21 olarak tespit edilmiştir.

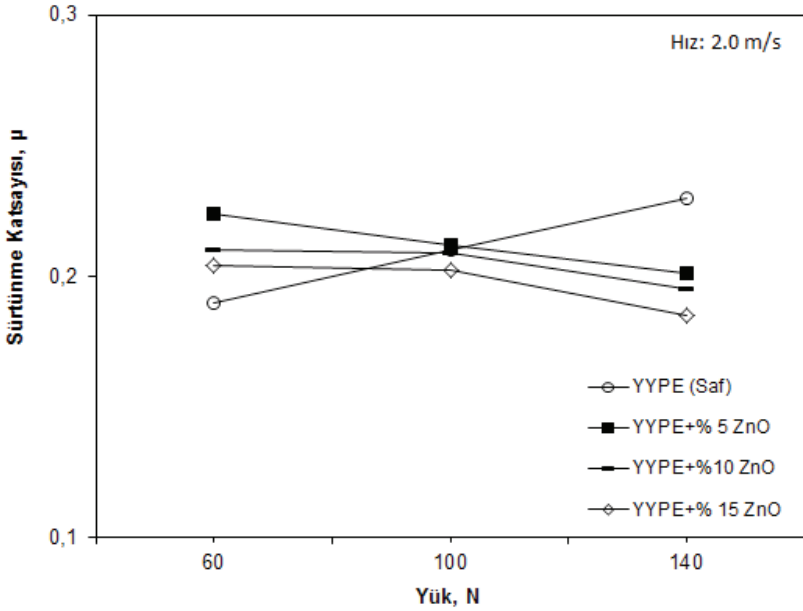
Şekil 8.'de saf YYPE polimeri ile nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozit malzemelerin 1.0m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi verilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi saf YYPE polimerinde uygulanan yükün artmasıyla birlikte sürtünme katsayısında artış gözlenirken bunun aksine %5, %10 ve %15 nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitlerinin sürtünme katsayılarında düşüş gözlenmiştir. Uygulanan yükün 60N 'dan 140N'a artırılması ile yani yükün %133 oranında artırılması durumunda saf YYPE polimerinin sürtünme katsayısında yaklaşık %20 oranında artış gözlenirken, %5, %10 ve %15 ZnO katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayılarında sırasıyla %10.3, %11.7 ve %20.1 oranında azalma tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısında en yüksek artış saf YYPE polimerinde elde edilirken, en büyük azalma ise %15 nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerde elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 1.0 m/s kayma hızında ve ve farklı yükler altında yapılan deneylerde YYPE kompoziti bünyesindeki ZnO oranının artması ile kompozitlerin sürtünme katsayısında önemli düşüşlerin olduğu gözlenmiştir.

YYPE polimeri ile nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozit malzemelerin 2.0m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı-uygulanan yük ilişkisi Şekil 9.'da verilmiştir. Hızın 2.0m/s olarak artırılmasıyla saf YYPE polimerinin sürtünme katsayısı değerleri uygulanan yükün artırılmasıyla artarken, %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayılarında azalma gözlenmiştir. Uygulanan yükün %133 oranında artırılması ile saf YYPE polimerinin sürtünme katsayısında %21 oranında artış gözlenmiş ancak, %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerinde ise sırasıyla %22, %10 ve %17 oranında azalma tespit edilmiştir. Bunlara ilaveten 2.0 m/s kayma hızında ve 60N ve 140N yük aralığında yapılan

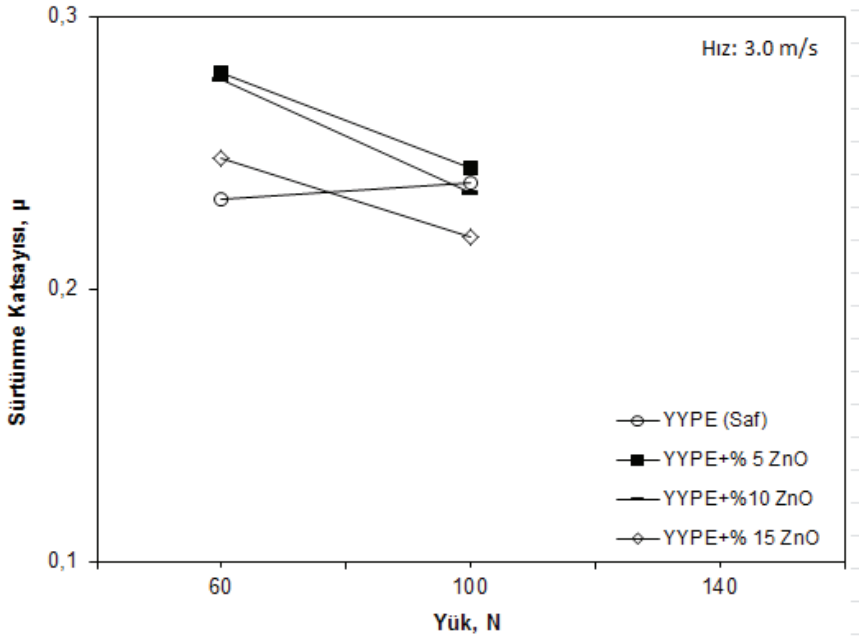
deneysel YYPE polimer kompoziti bünyesindeki ZnO oranının artması ile kompozitlerin sürtünme katsayısında önemli bir düşüş tespit edilmiştir.



Şekil 8. Saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s)



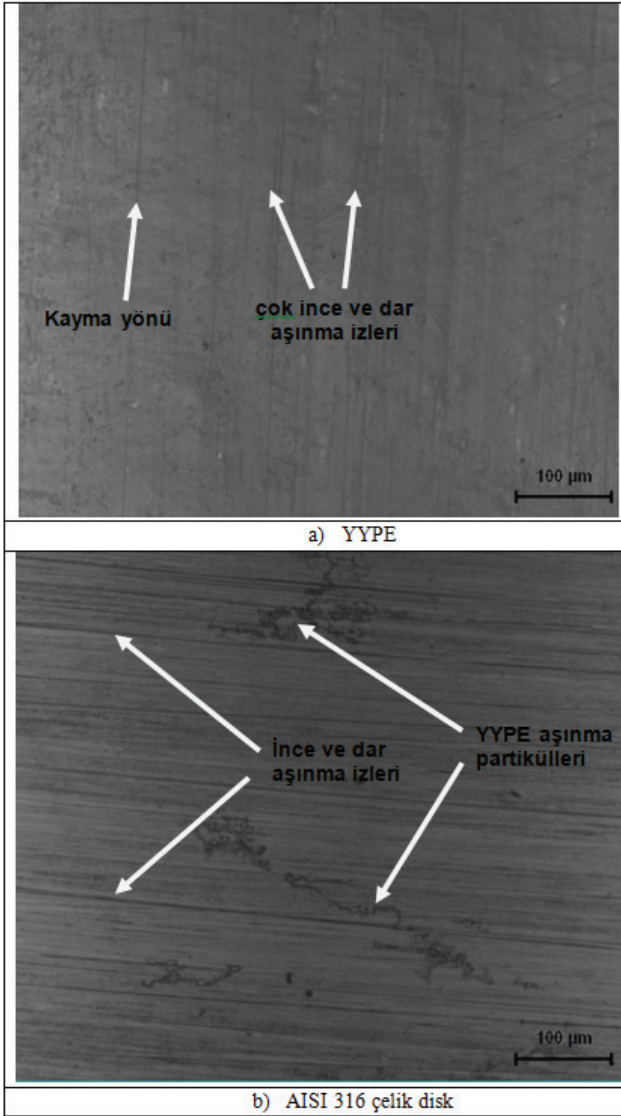
Şekil 9. Saf YYPE ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 2.0 m/s)



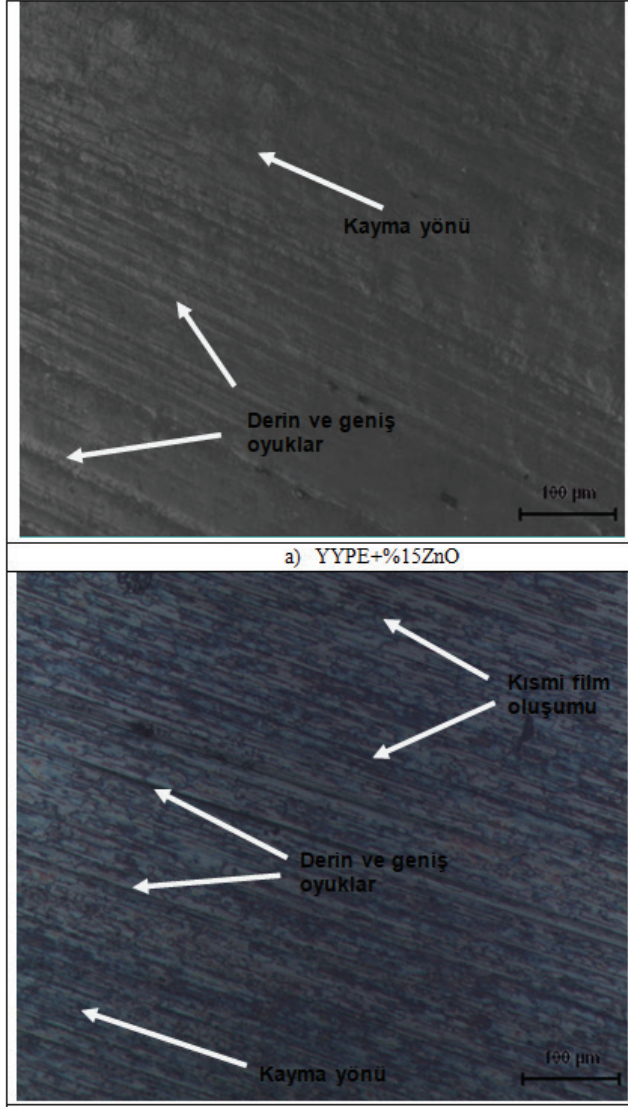
Şekil 10. Saf YYPE polimeri ile %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 3.0 m/s)

Şekil 10’da saf YYPE polimeri ile nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozit malzemelerin 3.0m/s kayma hızında 60N ve 100N yükler altındaki sürtünme katsayısının değişimi verilmiştir. Kayma hızı 3.0m/s’ ye çıkarılması ile 60N ve 100N yüklerde tribolojik deneyler gerçekleştirilmiştir. 140N yük ve 3.0m/s kayma hızı gibi proses şartları saf YYPE ve nano-çinko oksit katkılı kompozit malzemeler için yüksek gelmiştir. Bu nedenle 140N ve 3.0m/s kayma hızında deney verileri güvenli olmadığından kullanılmamıştır. Şekilde görüldüğü gibi uygulanan yük arttıkça katkısız YYPE polimerinin sürtünme katsayısı artarken, farklı oranlarda nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayılarında düşüş gözlenmiştir. Uygulanan yükün 60N’dan 100N’a çıkarılmasıyla yani yükün %66 oranında artırılması ile saf YYPE polimerinin sürtünme katsayısı yaklaşık olarak %7.1 oranında artış gösterirken, %5, %10 ve %15 oranında nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayıları ise sırasıyla %12.5, %15.1 ve %11.6 oranında azalma gözlenmiştir. Kompozitteki ZnO oranının artması ile sürtünme katsayısında azalma olduğu da tespit edilmiştir. Bu sonuçlar daha önce literatürde elde edilen sonuçlarla [49] uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 11 ve Şekil 12 (a-b)'de 3.0m/s kayma hızında ve 100N yük hızda gerçekleşen deneyler sonucunda saf YYPE polimeri ile YYPE+%15ZnO polimer kompoziti ile karşı çelik disklerin aşınma yüzeyleri optik mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi saf YYPE polimerinin aşınma yüzey görüntüsünde aşınma yüzeyinin düzgün ve derin aşınma izlerinin olmadığı tespit edilmiştir (Bakınız Şekil 11 (a)). Yine çelik disk yüzeyinde ince ve dar aşınma izleri gözlenirken genel olarak düzgün bir yüzey görüntüsü tespit edilmiştir. Aynı zamanda YYPE polimer yüzeyinden aşınma sonucunda ayrılan partiküllerin çelik disk yüzeyine yapıştığı da gözlenmiştir (Bakınız Şekil 11(b)). Şekil 12(a) da ise YYPE+%15ZnO polimer kompozitinin aşınma yüzey görüntüsü verilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda kompozit disk yüzeyinde derin ve geniş aşınma izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde karşı çelik disk yüzeyinde de benzer derin ve geniş izlerin oluştuğu gözlenmiştir (Bakınız Şekil 12(b)). Aynı zamanda çelik disk yüzeyinde kısmi polimer film tabakasının oluştuğu da görülmektedir. YYPE polimerine nano-çinko oksit ilavesinin artmasıyla birlikte aşınma izlerin arttığı sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 11. Deneylerde kullanılan malzemelerin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri a) Saf YYPE polimeri b) AISI316L paslanmaz karşı çelik disk (Kayma hızı: 3.0m/s, Uygulanan yük:100N)



Şekil 12. Deneylerde kullanılan malzemelerin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri a) YYPE+%15ZnO kompozit b) AISI316L paslanmaz çelik disk (Kayma hızı: 3.0m/s, Uygulanan yük: 100N)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Aşınma ve sürtünme deneylerinde, YYPE polimer kompozitlerin 1.0-3,0m/s kayma hız aralığı ile 60N-140N yük aralıklarında sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranına nano-çinko oksit katkı oranı ile uygulanan yük ve kayma hızının etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Uygulanan kayma hızının artması ile birlikte katkısız YYPE polimeri ile farklı oranlarda nano-çinko oksit tozu katkılı YYPE kompozitlerin tamamında spesifik aşınma oranında artış tespit edilmiştir.

2. Triboloji deneylerinde yükün artırılması ile hem saf YYPE polimerinin hem de farklı oranlarda nano-çinko oksit katkılı YYPE polimer kompozitlerin spesifik aşınma oranında azalma tespit edilmiştir.

3. Deneylerde kullanılan yük ve hız aralıklarında yükün ve hızın artırılması ile birlikte nano-çinko oksit katkı oranının da artması, YYPE kompozitlerin spesifik aşınma oranlarının artmasına sebep olduğu belirlenmiştir.

4. Saf YYPE polimerinin sürtünme katsayısı deneylerde kullanılan yükün artırılması ile artarken nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozit malzemelerin tamamında sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir.

5. YYPE polimerine ilave edilen nano-çinko oksit oranının artırılması ile kompozit malzemelerin sürtünme katsayılarında azalma olduğu belirlenmiştir.

6. Deneylerde kullanılan kayma hızının artması ile hem saf YYPE polimerinin hemde farklı oranlarda nano-çinko oksit katkılı YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Huang, R.; Kim, B.J.; Lee, S.Y.; Zhang, Y.; Wu, Q. Co-extruded wood plastic composites with talc filled shells: morphology, mechanical and thermal expansion performance. *BioResources* 2013, 8, 2283–2299
- [2] M.H. Chong, B.C. Chun, Y.C. Chung, B.G. Cho, Fire-retardant plastic material from oyster-shell powder and recycled polyethylene, *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 99, 1583
- [3] S.C. Nwanonyi, M.U. Obidiegwu, T.S. Onuchukwu, , I.C. Egbuna, Studies on the properties of linear low density polyethylene filled oyster shell powder, *The International Journal of Engineering and Science*, 2013, 27, 42
- [4] Yao, F.; Wu, Q.L. Coextruded polyethylene and wood-flour composite: Effect of shell thickness, wood loading, and core quality. *J. Appl. Polym. Sci.* 2010, 118, 3594–3601
- [5] He Q, Yuan T, Zhu J, Luo Z, Haldolaarachchige N, Sun L, Khasanov A, Li Y, ve diğerleri. Magnetic high density polyethylene nanocomposites reinforced with in-situ synthesized Fe-FeO core-shell nanoparticles. *Polymer* 2012; 53(16): 3642-3652.
- [6] Taşdemir, M., (2017). Polypropylene/olive pit & almond shell polymer composites: wear and friction, *5th International Conference on Nanomaterials and Materials Engineering*, Materials Science and Engineering 204, 012015
- [7] Mysiukiewicz, O., Sterzynski, T., (2017). Influence of Water on Tribological Properties of Wood-Polymer Composites, *Arch. Mech. Tech. Mater.* Vol. 37 (2017) 79-84.
- [8] Mariam A. AlMaadeed, Ramazan Kahraman, P. Noorunnisa Khanam, Nabil Madi, Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties, *Materials and Design*, 42: 289-294, 2012
- [9] Hufenbach, W., Stelmakh A., Kunze, K., Böhm, R., Kupfer, R., (2012). Tribomechanical properties of glass fibre reinforced polypropylene composites, *Tribology International* 49, 8–16
- [10] Sumer, M, Unal, H, Mimaroglu, A., Evaluation of Tribological Behaviour of PEEK and Glass Fibre Reinforced PEEK Composite Under Dry Sliding and Water Lubricated Conditions, *Wear*, Cilt 265, Sayfa1061-1065, 2008.
- [11] Taşdemir, M., Yerleşen, U., (2015) ‘‘Study On The Friction And Wear Behaviors Of Modified Hdpe/Glass Spheres Composites’ ‘Romanian Journal of Materials 2015, 45 (1), 59 – 66

- [12] Mimaroglu, A., Unal , H., Arda, T., Friction and Wear Performance of Pure and Glass Fibre Reinforced Poly-Ether-imide on Polymer and Steel Counterface Materials, *Wear*, Cilt 262, Sayfa1407- 1413, 2007.
- [13] Sahebian S, Zebarjad SM, Sajjadi SA, Sherafat Z, Lazzeri A. Effect of both uncoated and coated calcium carbonate on fracture toughness of HDPE/CaCO₃ nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science* 2007; 104(6): 3688-3694
- [14] Kuo, M.C.; Tsai, C.M.; Huang, J.C.; Chen, M.: “PEEK Composites Reinforced by Nano - Sized SiO₂ and Al₂O₃ Particulates” *Materials Chemistry and Physics*, 90 (2005) 185-195
- [15] Z. Dang, L. Fan, S. Zhao, C. Nan, Dielectric properties and morphologies of composites filled with whisker and nanosized zinc oxide, *Materials Research Bulletin*, 2003, 38, 499.
- [16] Sezgin, E., Münir, T., 2012. Zinc oxide (ZnO), magnesium hydroxide [Mg(OH)₂] and calcium carbonate (CaCO₃) filled HDPE polymer composites: Mechanical, thermal and morphological properties, *Fen Bilimleri Dergisi* 24, 04
- [17] Li, H. & Yin,Z. (2015). A study of the tribological behavior of transferfilms of PTFE composites formed under different loads, speeds and morphologies of the counterface, *Wear* (328-329), 17-27.
- [18] Jing Long Gao, L.J.; et al.: “Preparation and Properties of High-Density Polyethylene/Silica Composites”, *Advanced Materials Research*, 279 (2011) 115.
- [19] Elansezhian, R.; Saravanan, L.: “Effect of Nano Silica Fillers on Mechanical and Abrasive Wear Behaviour of Vinyl Ester Resin”, *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, 1 (2011) 105-108
- [20] Shailesh K. Dhoke, S.K.; Bhandari, R.; Khanna, A.S.: “Effect of Nano - ZnO Addition on The Silicone-Modified Alkyd-Based Waterborne Coatings on Its Mechanical and Heat-Resistance Properties”, *Progress in Organic Coatings* 64 (2009) 39-46
- [21] Hopmann, C. & Dering, J.P. (2012). Property modification of EPDM rubber compounds using PTFE micro powder, *Selected from International Polymer Science and Technology*, 39 (10), 648-652
- [22] Xiang, D., Gu, C., 2006. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with ultra-fine kaolin particulates. *Materials Letters* 60, 689-692
- [23] Unal, H., Şen, U., Mimaroglu, A., Study of Abrasive Wear Volume Map for PTFE and PTFE Composites, *Applied Composite Materials*, Cilt 4, Sayfa 287-306, 2007

- [24] Sun L.H., Yang Z.G.& Li X.H., Study of the friction and wear behaviour of POM/Al₂O₃ nano composites, *Wear* 264, pp. 693-700 (2008)
- [25] Mergler Y.J., Schaake R.P.& Huis in't Veld A.J., Material transfer of POM in sliding contact, *Wear* 256, pp.294–301 (2004).
- [26] J. Tong, Y. Ma, M. Jiang, Effects of the wollastonite fiber modification on the sliding wear behavior of the UHMWPE composites, *Wear* 255, 734–741, (2003)
- [27] G. Guofang, Y. Huayong, and F. Xin Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding, *Wear* 256, 88–94, (2004)
- [28] Chang, B.P., Akil, H.M., Nasir, R.B.M., 2013. Comparative study of micro- and nano-ZnO reinforced UHMWPE composites under dry sliding wear, *Wear* 297, 1120–1127
- [29] Unal, H., Mimaroglu, A., Friction and Wear Behaviour of Unfilled Engineering Thermoplastics, *Materials and Design*, Cilt 24, Sayfa 183-187, 2003.
- [30] Filippone, G., Dintcheva, N.Tz., La Mantia, F.P., Acierno, D. (2010). Using organoclay to promote morphology refinement and co-continuity in high-density polyethylene/polyamide 6 blends e Effect of filler content and polymer matrix composition, *Polymer* 51 (2010) 39-65.
- [31] Kijkobchai, P.; Wacharawichanant, S.: “Effect of Surface-Treated ZnO on Mechanical and Morphological Properties of High Density Polyethylene / ZnO Nanocomposites”; *The International Conference*, Hatyai, Songkhla Thailand, November (2011) 10 – 11.
- [32] Yuan, S., Li, Y., Zhang, Q., Wen, J., Zhu, Z., (2018). The Tribological Properties of PP/EPDM/CaCO₃ Composites Modified by HDPE, *Materials Science and Engineering* 381 (2018) 012098
- [33] Y. Wang, J. Shi, L. Han, F. Xiang, Crystallization and mechanical properties of T ZnOw/HDPE composites, *Mater Sci Eng A* 2009, 501, 220.
- [34] G. H. Xu, M. Zhu, J. Liu, Z. Zhou and H. Liang, “The effect of pre-treatment of substrate on fretting tribological behavior of MoS₂ coatings,” *Wear*, vol. 255, pp. 246–252, 2003
- [35] J. Jiang, R. D. Arnell and G. Dixit, “The influence of ball size on tribological behaviour of MoS₂ coating tested on a ball-on-disk wear rig,” *Wear*, vol. 243, pp. 1–5, 2000
- [36] Yetgin, S. H., Unal, H., Mimaroglu, A. ve Findik, F., “Influence of Process Parameters on the Mechanical and Foaming Properties of PP Polymer and PP/TALC/EPDM Composites” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52: 433-439, 2013

- [37] Unal, H., Mimaroglu, A., “Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions”, *Wear*, 289, 132–137, 2012
- [38] Palabiyik, M. and Bahadur, S., (2002). Tribological Studies of Polyamide 6 and High-Density Polyethylene Blends filled with PTFE and Copper Oxide and Reinforced with Short Glass fibers, *Wear*, Volume:253, pp:369–376
- [39] S.A.A. Ramazani, A. Rahimi, M. Frounchi, S. Radman, Investigation of flame retardancy and physical mechanical properties of zinc borate and aluminum hydroxide propylene composites, *Materials and design*, 2008, 29, 1051
- [40] Ponnamma D, Cabibihan JJ, Rajan M, Pethaiah SS, Deshmukh K, Gogoi JP, Pasha SK, Ahamed MB, ve diğerleri. optimization and applications of ZnO/polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: C* 2019; 98, 1210- 1240
- [41] Sudeepana, K Kumarb*, T K Barmanc, P Sahoo Study of Friction and Wear of ABS/Zno Polymer Composite Using Taguchi Technique Procedia *Materials Science* 6 (2014) 391 – 400
- [42] Zhao, H.X., Li, R.K.Y., 2006. A study on the photo-degradation of zinc oxide (ZnO) filled polypropylene nanocomposites. *Polymer* 47, 3207-3217
- [43] Devaraju A, Sivasamy P, Loganathan GB. Mechanical properties of polymer composites with ZnO nano-particle. *Materials Today: Proceedings*, 2019
- [44] Ersoy, S., Taşdemir, M., (2012). Zinc oxide (ZnO), magnesium hydroxide [Mg(OH)₂] and calcium carbonate (CaCO₃) filled HDPE polymer composites: Mechanical, *thermal and morphological properties*, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 24(4), 93-104.
- [45] S.C. Tjong, G. Liang, Electrical behavior of high density polyethylene/ZnO nanocomposites, *e-Polymers*, 2007,37, 1.
- [46] Li, S.C., Li, Y.N.: “Mechanical and Antibacterial Properties of Modified Nano - ZnO / High Density Polyethylene Composite Films with a Low Doped Content of Nano – ZnO”, *Journal of Applied Polymer Science*, 116 (2011) 2965-2969
- [47] Taşdemir, M., Yerleşen, U., Babat, V., Effect on Friction and Wear Parameters on Acrylonitrile Butadiene Styrene/Aluminium-boron Carbide-Glass Spheres Polymer Composites, *Mechanika.*, 20(4), 407–413, 2011
- [48] Dae-Hyun, C., Bhushan, B., Friction and Wear of Various Polymer Pairs Used for Label and Wiper in Labeling Machine, *Tribology International.*, 98, 10-19, 2016

- [49] Dong, J. X., Hu, Z. S., A Study of the Anti-wear and Friction-reducing Properties of the Lubricant Additive, Nanometer Zinc borate, *Tribology International.*, 31, (5), 219–223, 1998
- [50] Simonsen, J., Camille, M., Silva, A., Morrell, J.J., Wood/plastic Ratio: Effect on Performance of Borate Biocides Against a Brown Rot Fungus, *Holzforschung.*, 58, 205–208, 2004
- [51] Tian, Y.M., Guo, Y.P., Jiang, M., Hari, B., Zhu, Y., Wang, Z., Jiang, Z., Synthesis of Hydrophobic Zinc Borate Nanodiscs for Lubrication, *Materials Letters*, 60, (20), 2511–2515, 2006.
- [52] Wang, Q., Wang, Y., Wang, H., Fan, N., Yan, F., Experimental Investigation on Tribological Behavior of Several Polymer Materials Under Reciprocating Sliding and Fretting Wear Conditions, *Tribology International.*, 104, 73-82, 2016
- [53] Sanes, J., Carrión, F.C., Bermúdez, B.D., Effect of the Addition Room Temperature Ionic Liquid and ZnO Nanoparticles on the Wear and Scratch Resistance of Epoxy Resin, *Wear.*, 268, (11-12), 1295-1302, 2010
- [54] Altan, M.; Yıldırım H.; Uysal, A. Tensile Properties of Polypropylene Metal oxide Nano Composites, *The Online Journal of Science and Technology*, 1, 25-31, 2011
- [55] Maysa, A., Mohamed, N.A., Shaltout, A.A., El, M., The effect of gamma Naga R.B, Ramji K., Prasad, V. S. R. K., Studies on Tribological Properties of ZnO Filled Polymer Nanocomposites, *Journal of Engineering and Applied Sciences.*,6, (6), 1819-6608, 2011.
- [56] Naga, R.B., Ramji, K., Prasad, V. S. R. K., Studies on Tribological Properties Of ZnO Filled Polymer Nanocomposites, *Journal of Engineering and Applied Sciences.*, 6, (6), 2011.
- [57] Sharma, R.K., Nisar, A., Balani, K., Mechanics of ZnO Morphological Dependence on Wear Resistance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene, *European Journal of Mechanics.*, 65, 149-158, 2017
- [58] Petilen YY 1668(UV) Yüksek Yoğunluklu polietilen (YYPE) Teknik özellikleri. Erişim adresi http://b2bpolymers.com/TDS/Petkim_I668.pdf

Bölüm 11

GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

Süleyman ADAK¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi Süleyman Adak, suleymanadak@yahoo.com ORCID:0000-0003-1436-2830, Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyonunun azaltılması Danışman:Prof.Dr.Celal Kocatepe, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

1.GİRİŞ

Harmonik bileşenlerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntının lineer olmayışından dolayı harmonik bileşenler oluşmaktadır. Magnetik devrelerin aşırı doyması, elektrik arkları ve güç elektroniğindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve kıyılması lineer olmayan olaylardır. Elektrik güç sistemindeki non-linear yükler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta sinüzoidal dalgalar görülebilir. Elektrik şebekelerindeki harmonik kirlilik şu an için ölümcül problemler oluşturmamaktadır.

Non-linear yük ve devre elemanlarını günbegün artması ile yakın bir gelecekte karasız ve düşük kaliteli şebekelerin oluşmasına sebep olacaktır. Elektrik enerji sistemlerinde manyetik devre ve elektrik devre lineersizlikleri, harmoniklerin ortaya çıkmasında en önemli etkenlerdir (Arrillaga, 1985). Harmoniklerin meydana gelmesi ile de sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşılacak yani dalga şeklinde bir bozulma (distorsiyon) görülecektir. Akım ve gerilimde oluşan bu bozulma elektrik tesislerine ve bu tesislere bağlı güç sistemlerine zarar vermekte ve hatta bazen sistemleri çalışamaz hale getirmektedir.

Doğrultucular, inverterler, motor kontrol devreleri, statik VAR generetörleri, anahtarlama güç kaynakları gibi güç elektroniği elemanlı devreler, flüoresan lambalar, cıva arkı, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, akü ve fotovoltaiik sistemler ile elektrikli ulaşım sistemleri gibi sistemler non-linear yüklerdir. Non-sinüzoidal dalgaların analizi Fourier serileri yardımı ile yapılır. Bu analiz sonucunda bulunan seriye “Fourier Serisi”, bu serinin elemanlarına da “Fourier Bileşenleri” adı verilir.

1.1Harmonik Bileşenler

Harmonik bileşenlerin etkili olduğu güç sistemlerinde harmonik bileşenlerden en çok kondansatörler etkilenir. Elektrik şebekelerinde enerji kalitesinin yükselmesi için güç sistemlerinde non-linear bir yük olan bilgisayarların etkinliğinin azaltılması gerekir. Bu yüzden harmonik bileşenleri yok edecek filtre devrelerinin kurulmasına mutlak surette gerek vardır.

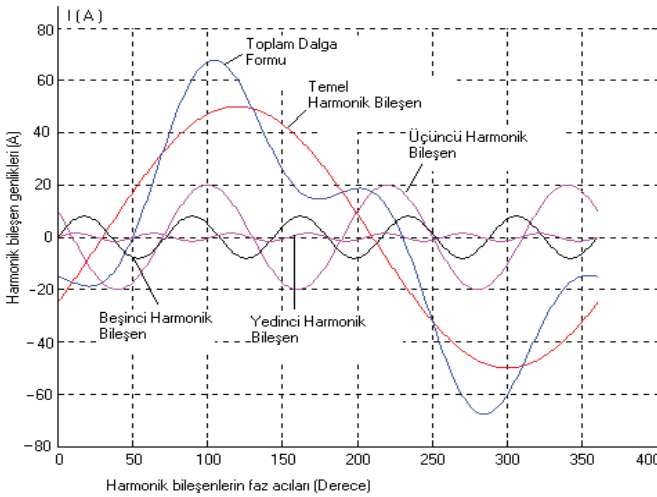
Eğer devrede non-linear elemanlar veya non-sinüzoidal kaynaklar bulunacak olursa veya bunların her ikisinin de olması durumunda harmonikler meydana gelir. Bu şekilde çeşitli elemanlar veya olaylar sonucunda enerji sistemindeki sinüzoidal dalga biçimi bozulur. Bu bozuk

dalgalar “non-sinüzoidal dalga” olarak adlandırılır. Güç sistemdeki harmonikler enerji iletim hatlarında ek ısı kayıplarına neden olmaktadır. Bu ek kayıp enerji maliyetini artırmaktadır. Ayrıca sistem üzerindeki temel harmonikten başka diğer harmoniklerde ek gerilim düşümlerine sebep olmaktadır.

Non-sinüsoidal dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “**harmonik bileşen**” adı verilir. Güç sistemindeki sinüsoidal dalganın simetrisinden dolayı 5., 7.,11,... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Harmonikli bir akım dalgası ile harmonik bileşenlerine ait analitik ifade,

$$i = 50.\sin(\alpha - 30) + 20.\sin(3.\alpha + 150) + 8.\sin(5\alpha+) + 1.5\sin(7\alpha) \quad (1)$$

Şeklinde olsun. Bu non-linear dalga formunun grafiksel gösterimi Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. Non-linear dalga formu ile harmonik bileşenleri

Harmonik bileşenleri süzerek filtre devrelerin mutlak surette enerji sistemine yerleştirilmesi gerekmektedir. Harmonikli terimler enerji sistemi kalitesi hakkında bize bir fikir verir. Non-linear elemanlara örnek olarak şunlar verilebilir:

- Doğrultucular,
- İnverterler (Eviriciler),
- Motor kontrol devreleri,
- Statik VAR generetörler,

- Anahtarlamalı güç kaynakları,
- Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları,
- Motor hız kontrol düzenleri (ASD),
- Doğru akım ile enerji nakli (HVDC),
- Kesintisiz güç kaynakları (UPS),
- Direkt frekans çevirici ile beslenen momenti büyük hızı küçük motorlar,
- Güç elektroniği elemanlı devreler, kompakt flüoresan lambalar, cıva arkı, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler ile elektrikli ulaşım sistemleri gibi sistemler sayılabilir.

Non-linear yüklerin güçleri düşük değerlerde de olsa gerilimin sinüsoidal dalga formunu bozarlar. Elektrik tesislerinde harmonik bileşenler ek ısı kayıplarına neden olmaktadır. Bu ek kayıp enerji maliyetini artırmaktadır. Ayrıca sistem üzerindeki temel harmonik dışındaki harmonik bileşenler ek gerilim düşümleri oluşturmaktadır.

Non-linear yükler düşük güçlü olsalar bile enerji sistemlerinde sinüsoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda non-linear yük göz önüne alınırsa bunların sonucunda ek kayıp ve THD değerlerinin yüksek değerlere varması kaçınılmazdır. Non-linear yüklerin etkinliğinin azaltılması, harmonik distorsiyonunun giderilmesi enerjinin kalitesi açısından çok önemlidir.

Elektrik enerjisine olan talep miktarının sürekli artması, daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji kavramını ve bunu gerçekleştirmek için bazı kriterlerin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu kriterlerin en önemlilerinden biri de sistemde dolaşan harmonik bileşenlerdir. Enerji tesislerindeki harmonikler konusunda bize bir ölçüt veren toplam harmonik distorsiyonun azaltılması gerekmektedir.

2. Harmonikli Güç Sistemlerinde Genel Tanımlamalar

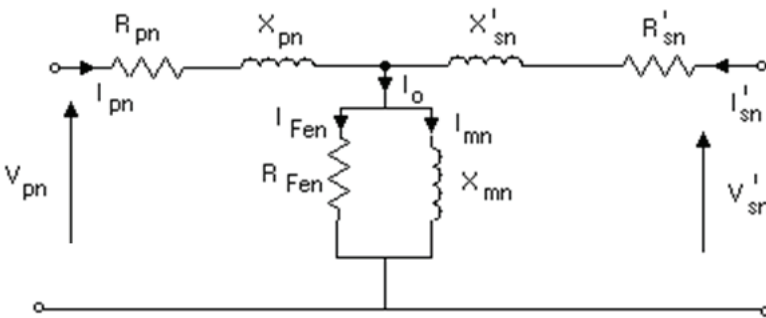
Güç elektroniği tabanlı cihazlar ile çeşitli non-linear karakteristikli elemanların kullanımının her geçen gün artış göstermesi enerji sisteminde dolaşan non-sinüsoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım yada gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde harmonik distorsiyon sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerdeki tüm sistemi

etkilemektedir. Harmonikler bileşenler güç sistemlerindeki kirliliktir. Statik dönüştürücülerin kullanımının artması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır.

Transformatörün bağlantı grubu nasıl olursa olsun, Primer yıldız noktası nötr'e bağlansın veya bağlanmasın, çekirdek tipi nasıl olursa olsun, transformatörler şebekeden 5., 7., 11., 13., gibi harmonikli mıknatıslanma akımlarını daima çekerler. Transformatörler anma gerilimlerinin üzerinde bir gerilimle beslendiklerinde çekirdek doyması sonucu, mıknatıslanma akımı harmonik bileşenler içerir.

Transformatörün boşa ve doyma bölgesinde çalışması sonucunda mıknatıslanma akımı oluşur. Bu akım non-linear özelliğindedir. Mıknatıslanma akımı sistemde bir harmonik kaynağı gibi davranır. Transformatörler birer harmonik kaynağı olmakla beraber şebekeden kaynaklanan harmoniklerden de etkilenmektedirler.

Günün erken saatlerinde transformatör mıknatıslanma akımına ilişkin harmonik bileşenler maksimum değerine ulaşır. Çünkü bu saatlerde sistem yükü az olup bunun sonucunda gerilim değeri yükselir buda transformatörde aşırı uyarma meydana getirir. Transformatörlerin eşdeğer devreleri boşa, kısa devre ve tam yükte çalışma deneyleri sonucunda belirlenen parametrelere göre belirlenir. n. harmonik için eşdeğer devre Şekil 2' de transformatörün bir fazına ilişkin harmonikli eşdeğer devre verilmiştir.



Şekil 2. Transformatörün harmonikli eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrede, R_{pn} , n. Harmonik için primer sargı direnci; R'_{sn} , n. harmonik için primere indirgenmiş sekonder direnci; X_{pn} , n.

harmonik için primer sargısı kaçak reaktansı; X'_{sn} , n. harmonik için primere indirgenmiş sekonder sargı kaçak reaktansını göstermektedir. X_{mn} , n. Harmonik için mıknatıslanma reaktansı; R_{Fen} , n. harmonik için demir kayıplarının sembolize eden direnç.

Kayıplar IEEE C57.1200-1987 standardı ile transformatör akımlarına sınırlamalar getirilmiştir. Akım distorsiyonu üst sınırı % 5 olarak ifade edilmiştir. Elektrik tesislerinde güç harmonik bileşenlerin etkinlikleri günbegün artmaktadır. Harmonik bileşenler ile genel tanım büyüklükleri aşağıda verildiği gibidir.

2.1 Akım ve Gerilimin Ani Değerleri

Güç sistemlerinde harmonik bileşen içeren akım ve gerilimin büyüklüklerinin ani değerleri,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (2)$$

gerilim değeri için,

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (3)$$

Olarak ifade edilir.

2.2 Akım ve Gerilimin Efektif Değerleri

Güç sisteminde akım ile gerilimin n.'inci harmonik bileşen için efektif değerleri sırayla,

$$I_n = \frac{I_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

gerilim için,

$$V_n = \frac{V_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

ile belirlenir. Akım ve gerilimin etkin değerleri sırayla,

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (6)$$

gerilim için,

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (7)$$

ifadelerinden tespit edilir. Bu eşitliklerde I_0 ve V_0 akım ve gerilimin doğru bileşeni, n değeri harmonik mertebesini, I_{mn} ve V_{mn} , n . harmonik akım ve gerilimin tepe değerini göstermektedir.

2.3 Güç İfadeleri

Harmonik içeren güç devrelerinde dört adet güçten sözedilebilir. ϕ_n 'n. harmonik akımının faz açısı, δ_n ' ise n. harmonik gerilimin faz açısını ifade etmek üzere, böyle büyüklüklerin bulunduğu devrede aktif güç ifadesi (Zanda vd., 1978).

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n \cdot \cos(\delta_n - \phi_n) \quad (8)$$

ile reaktif güç ise,

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n \cdot \sin(\delta_n - \phi_n) \quad (9)$$

denklemleri ile tanımlanır. Görünür güç,

$$S=V.I=\sqrt{\sum_{n=0}^N V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^N I_n^2} \quad (10)$$

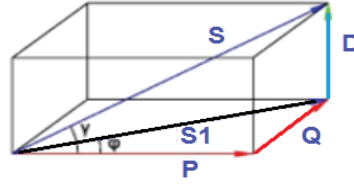
Eşitliği ile ifade edilir. Harmonikli güç sistemlerinde tanımlanan diğer büyüklük distorsiyon gücüdür. $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ ifadesinden distorsiyon gücü ,

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (11)$$

olarak belirtilir. Şekil 3'te sinüsoidal devrelerde distorsiyon gücü gösterilmiştir.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

PF: Güç Faktörü
S: Görünür Güç
P: Aktif Güç
Q: Reaktif Güç
D: Distorsiyon Gücü



Şekil 3. Distorsiyon gücünün geometrik gösterimi

(Shepherd vd., 1979). Farklı frekanslı akım ve gerilim bileşenlerin çarpımından oluşan bu gücün fiziksel anlamı ve reaktif güç ile ilişkisi halen tartışılmaktadır. Bu güç ifadesinde halen bir birliktelik mevcut değildir. Sinüsoidal devrelerde distorsiyon gücü, $D=0$ ' dır.

2.4 Güç faktörü,

Güç faktörü, sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan devrelerde aktif gücün görünür güce oranıdır. Harmonikli devrelerde güç faktörü,

$$GF = \frac{P}{S} \quad (12)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, P aktif gücü [W], S görünür gücü [VA] göstermektedir. Az bilinen diğer bir etkisi ise; akım ve gerilim ölçü aletleri 50 Hz. Üzerinden örnekleme yaparlar (true RMS ölçüm yapanlar hariç). Diğer bir deyişle 50 Hz.'den çekilen akım ve gerilimleri gösterirler. Ancak farklı frekans seviyelerinden çekilen akım ve gerilimler ölçülemez. Bu yüzden tüketilen akım ve gerilim hakkında sağlıklı bilgi sahibi olunamaz. Ayrıca temel frekans dışında diğer frekans seviyelerinden çekilen akım ve gerilimler gereksiz yere enerji tüketimini artırır.

3. Güç sistemlerinde Enerji Kalitesi İle İlgili Temel Büyüklükler

Bu büyüklükler enerji kalitesi ile ilgili büyüklüklerdir. Değerleri ne kadar küçük olursa enerji tesislerindeki akım ve gerilimin değeri sinüs eğrisine daha yakın olur. Saf sinüs eğrisi durumunda harmonik bulunmayacağından, har Lineer olmayan akım ve gerilimlerin devre elemanları üzerindeki etkilerinin analizi, güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile yoğunlaşmıştır.

Çalışma harmonik oluşturan kaynaklar, harmonik seviyeleri, harmoniklerin yok edilmeleri, harmonik analizine ilişkin sayısal çözümleme yöntem ve teknikleri gibi konular üzerinde yoğunlaşmıştır. Alternatif akımla çalışan redresörler, eviriciler, kıyıcılar, transformatörler, endüksiyon fırınları ve generetörlerin birer harmonik kaynağıdır. Harmonik bileşenlerin değeri matematiksel olarak sıfır olacağından bu büyüklüklerin değeri sıfır olur.

3.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüttür. Sinüzoidalden uzaklaşmayı, distorsiyonu diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Bu büyüklükler harmonikli dalganın sinüsten uzaklaşmasının bir ölçüsüdür. Non-linear yükler düşük güçlü olsalar bile enerji sistemlerinde sinüsoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar.

Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda non-linear yük göz önüne alınırsa bunların sonucunda ek kayıp ve THD (Toplam Harmonik Distorsiyonu) değerlerinin yüksek değerlere varması kaçınılmazdır. Hem gerilim, hem de akım için verilebilir. Gerilim için, toplam harmonik distorsiyonu (akım bozulma faktörü) THD_v ,

$$\text{THD}_V = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilir. Güç elektroniği elemanları ve çeşitli nonlineer elemanların her geçen gün artış göstermesi, enerji sisteminde dolaşan non-sinüsoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım yada gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Akım toplam harmonik distorsiyonu (akım bozulma faktörü) THD_I ,

$$\text{THD}_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

olarak ifade edilir. Harmonikli büyüklükleri tanımlamada etkin bir büyüklüktür. Nonlineer yüklerin etkinliğinin azaltılması, harmonik distorsiyonunun giderilmesi enerjinin kalitesi açısından çok önemlidir. Nonlineer elemanlar, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler.

Sonuç olarak diyebiliriz ki, tüm elektrik sistemlerindeki elemanlar, sinüzoidal ve 50Hz frekansta salınan akım ve gerilimler için üretilmiştir. Bu yüzden akım ve gerilimdeki bozulmalar şebekedeki tüm elemanların hatalı çalışmasına ve hatta zarar görmesine neden olmaktadır. Bu yüzden işletmenin sağlıklı bir şekilde çalışması için mutlaka harmoniklerin standartlarca belirtilen seviyelerin altında tutulmaları veya tamamen yok edilmeleri gerekmektedir..

3.2 Distorsiyon faktörü

Akım ve gerilim için distorsiyon faktörü,

$$\text{DF}_I = \frac{1}{I} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (15)$$

gerilim değeri için,

$$DF_V = \frac{1}{U} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (16)$$

olarak ifade edilir.

3.3 Form Faktörü

Form faktörü nonsinüsoidal bir dalga için,

$$k_f = \frac{\text{Efektif Deger}}{\text{Ortalama Deger}} \quad (17)$$

şeklinde tanımlanır. Sinüsoidal bir dalga için form faktörü, 1.11' dir.

3.4 Tepe (Crest Factor) Faktörü

Sinüzoidal olmayan dalgalar için tepe faktörü ,

$$CF = \frac{\text{Dalganın tepe değeri}}{\text{Dalganın efektif değeri}} \quad (18)$$

ifadesi ile belirtilir (Dugan vd., 1996). Bu büyüklük harmonik bileşenlerin varlığının ortaya konmasını sağlar.

3.5 K – Faktörü

Kuru tip transformatörlerin K faktörü, nonlinear yüklenen ve genellikle 500KVA'nın altındaki transformatörlerde yüklenme kapasitesinin bir ölçütüdür. Bu faktör imalatçılar tarafından ifade edilen bir büyüklük olup,

$$K_{\text{Faktörü}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (19)$$

olarak ifade edilir (Linden, 1996). Burada I_n per-unit olarak transformatörün akım bileşeninin per-unit değeri, I_1 temel bileşen akımını, n harmonik derecesini göstermektedir.

3.6 Telefon Etkileşim Faktörü

Haberleşme tesislerinde harmoniklerden dolayı oluşan gürültü miktarını tespit için kullanılır. İnsan kulağının gürültüye olan duyarlılığına göre ayarlanır. Akım için,

$$TEF_I = \frac{\left(\sum_{n=1}^{\infty} (\omega_n \cdot I_n)^2 \right)^{1/2}}{I_{eff}} \quad (20)$$

Gerilim için,

$$TEF_V = \frac{\left(\sum_{n=1}^{\infty} (\omega_n \cdot V_n)^2 \right)^{1/2}}{V_{eff}} \quad (21)$$

şeklinde tanımlanmıştır. ω_n n'ninci mertebeden harmonik frekansını, I_n n' ninci mertebeden akımın değerini, V_n n' ninci mertebeden gerilimin değerini göstermektedir.

3.7 Harmonik faktörü

Her bir harmonik bileşenin seviyesini belirlemede kullanılır. Örneğin gerilim için,

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (22)$$

V_n n' ci harmonik gerilimine ait efektif değeri, V_1 gerilimin temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

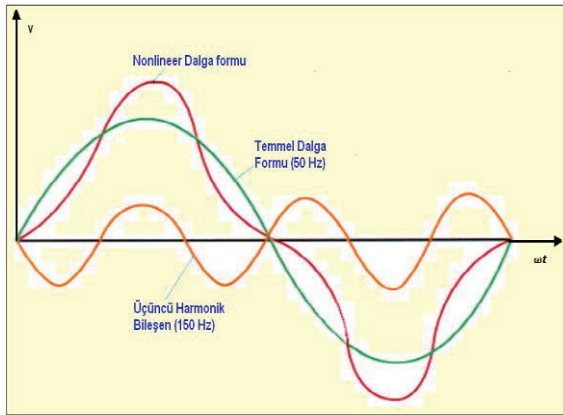
3.8 Toplam talep distorsiyonu

Çekilen yük akımına ait distorsiyonu belirlemede kullanılır. Toplam talep distorsiyonu (TTD),

$$TDD = \frac{\left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}}{I_L} \quad (23)$$

Formülü ile belirtilir. Burada, I_n harmonik akımını, I_L ise 12 ay boyunca talep edilen maksimum akımların matematiksel ortalamasını göstermektedir. TDD ifadesi IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) standard 519' da özellikle ifade edilmiştir.

Ofislerde kullanılan bilgisayarlar, printer, plotter vb cihazlar önemli oranda üç ve üçün katı harmonikler üretilmektedir. Ayrıca aydınlatmada kullanılan elektronik balastlı aydınlatma sistemleri ve deşarj tüpleri de önemli bir üçüncü harmonik kaynağıdır. Şekil 4'te üçüncü harmonik bileşen içeren non-linear dalga formu verilmiştir.



Şekil 4 Non-linear dalga formu ile üçüncü harmonik bileşen

Güç sistemine bağlanan, motor hız kontrol düzenleri, statik VAR kompanzatorleri, kesintisiz güç kaynakları, akü şarj devreleri, bilgisayarlar, elektronik balastlı flüoresan lambalar gibi bazı lineer olmayan elemanlar sistemde harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Doğrultma işleminde elden geldiğince yüksek darbeli doğrultucular kullanılmalıdır. Darbe sayısı arttıkça toplam harmonik distorsiyonu oranı azalır.

Non-linear yüklerin sebep olduğu harmonik güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Rezonans şartları her harmonik bileşenler için ayrı, ayrı hesaplanmalıdır. Bir güç sistemine harmonik kaynaklardan enjekte edilen harmoniklerin olması durumunda, bunlar şebekeyi herhangi bir bileşeni yada bileşenler için rezonanslar oluşturacak şekilde etkiler. Yüksek dereceli harmonikler, tüm sistemi

etkileyebilir. Bu etkiler güç sistemi ve diğer ekipmanların da performansını azaltır.

Konverterlerde darbe sayısını 6'dan 12'ye veya 12'den 36'ya çıkartılması ile harmonik bozulmalarda önemli azalmalar sağlanır. Harmonikler nedeni ile oluşan rezonans olaylarında sistemdeki sigortaların sık, sık atmasına, koruma rölelerinin düzensiz çalışmasına ve tüm cihazların ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır. Kısacası sistemdeki tüm elemanları etkilediğinden, harmonikler enerji sistemlerinde istenmeyen niceliklerdir. Bu yüzden harmonikleri süzecek filtre devrelerinin kurulmasına mutlak süratte gerek vardır.

Özellikle büyük enerji tasarrufu sağladığı söylenen kompakt floresan lambalar, birere harmonik kaynağıdır. Bunun sebebi elektronik balastları tarafından üretilen harmoniklerdir. Harmonikler elektrik şebekelerindeki kirliliktir. THD (Toplam harmonik distorsiyonu) bu kirliliğin bir ölçüsüdür. Bir tüketici tarafından üretilip şebekeye verilen harmonikler şebekede dağılılarak başka bir tüketiciye ulaşırlar. Eğer harmoniklerin ulaştığı tüketicinin yükü lineer ise zararlı tüketicinin hesabı ikinci tüketicinin üzerine biner.

Senkron generetörler harmonik üreten kaynakların başında gelmektedirler. Senkrön generetörlerde hava aralığındaki alan sinüs formunda değildir. Hava aralığındaki akının şekli endüklenen emk'nın şeklinin aynısıdır. Dönen makineler makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler (Arrillaga vd., 1985). En tabii harmonik kaynakları senkron generetörlerdir.

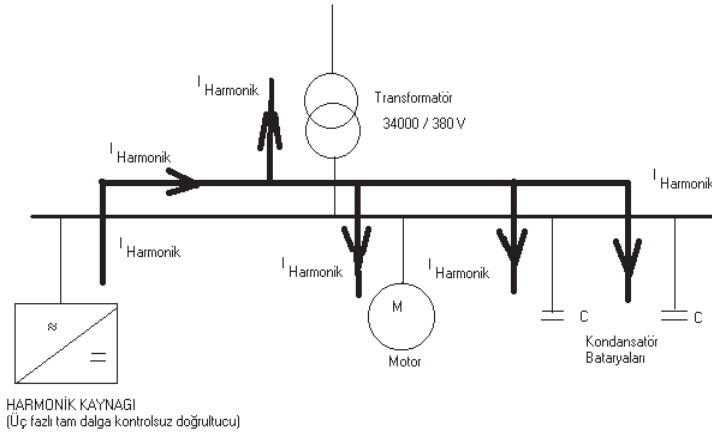
4. Harmonik Akımlarının Güç Siteminde Dağılımı

Enerji sistemlerindeki harmonik mertebelerinin tespiti mutlak surette gerekmektedir. Bunun için ya matematiksel yöntem olan toplam armonik distorsiyonu (THD) oranlarından veya harmonik analizitörler kullanarak harmonik mertebeleri tespit edilir. Harmonikli dalgaların analizinde harmonik akımların akış güzergahlarının bilinmesi gerekmektedir. Harmonik akımları genellikle harmonik kaynağından sistem kaynağına doğru akarlar.

Gerilim ve akımı dalga formunun 50 Hz. temel frekansta ve sinüsoidal dalga şeklinde olması idealdir. Ancak işletmelerdeki bazı yükler sahip oldukları çalışma karakteristiklerinden dolayı çeşitli frekans seviyelerinde akım ve gerilimler oluştururlar. Bu yüklerle örnek olarak; kesintisiz güç kaynakları, DC motorlar AC sürücüler, soft starter'lar, ark

ocakları, elektronik balastlı armatürler, çeşitli ofis ekipmanları (PC'ler, yazıcılar v.b.) verilebilir.

Harmoniklerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntısının lineer olmayışından dolayı harmonikler oluşmaktadır. Mağnetik devrelerin aşırı doyması elektrik arkları ve güç elektroniğindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve kıyılması lineer olmayan olaylardır. Şekil 5' te harmonik akımlarının akış durumları verilmiştir.



Şekil 5. Harmonikli akımların güç sisteminde dağılımı

Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının bileşkesidir. Genelde sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yük empedanslarının paralel eşdeğerinin %5'i kadardır. Bu yüzden normal olarak harmonik akımlarının %(90-95) kadarı sistem kaynağına doğru akar. Harmonikler enerji sistemlerindeki kirliliktir mutlak surette harmonik bileşenlerin filtre devreleri ile süzülmesi gerekmektedir.

Non-linear elemanların akım-gerilim karakteristiği lineer değildir. Bu eleman tam sinüs biçimli bir gerilim kaynağına bağlandığında elemanın akımı, harmonik bileşenler içerecektir. Yani, doğrusal olmayan bir elemanın akım veya geriliminden herhangi birisi veya her ikisi birden harmonik bileşenler içerebilir, fakat her ikisi birden tam sinüs biçimli olamaz. Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga

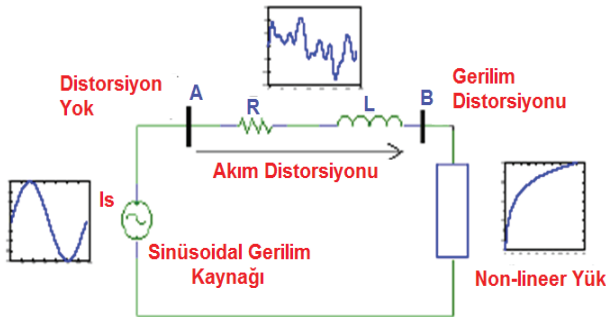
şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir:

- Şebeke geriliminin bozulması sonucunda harmonik distorsiyonunun artması,
- Gerilim düşümünün artması ve bunun sonucunda cihazlarda arızaların baş göstermesi,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle kondansatörlerin delinmesi,
- Harmonikler nedeniyle akımdaki artış sonucunda enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması,
- Asenkron motorlarda ek momentlerin oluşması ve aşırı ısınmanın oluşması,
- Harmonik yük akışının empedansın az olduğu tarafa akmasından dolayı endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Harmonik bileşenler şebekedeki kapasitif reaktanslarla rezonans oluşturabilir. Bunun sonucunda şebekede rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar dolaşır,
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları baş gösterir. Üçüncü harmonik bileşene karşı duyarlı olan mesafe koruma rölesinde zamansız amcalar görülür,
- Harmonikler sonucunda akımdaki artış neticesinde izolasyon malzemelerinde delinmeler oluşur,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazitlerin oluşması,
- Otomasyon cihazlarında hatalı çalışma oluşur,
- Elektromekanik cihazların ısınması,
- Kondansatör kademelerinin sigortalarının atması,
- Termik- manyetik şalter ve rölelerin anormal stop etmesi,
- Ateşleme devrelerinin anormal çalışması,
- Ölçme cihazlarının hatalı ölçmesi,
- Enerji taşıma hatlarında dalgalanmalar meydana getirmesi,
- Haberleşmede endüktif etkiler oluşturması,
- Röle sinyallerinin bozulması ve anormal çalışması,

- Kondansatörlerde kademe hatası,
- Rezonans oluşturarak şebekede aşırı voltaj ve akımların oluşması,
- Makinelerde mekanik titreşimler,
- CAD/CAM terminallerinin hafızasının silinmesi,
- Bilgisayarların beslemesindeki aşırı dalgalanmalardan dolayı kapasitelerin bunu dengeleyememesi,
- Küçük devir kontrollü cihazların anormal çalışması,
- Bilgisayar terminallerinde gürültü oluşması gibi arızalar oluşur.

Harmonikler enerji sistemlerine teknik ve ekonomik olmak üzere iki türlü etki yaparlar. Teknik problemler tüketiciye kaliteli elektrik sunmayı etkileyen problemlerdir. Ekonomik problemler ise optimal çalışmayı etkileyen problemlerdir. Ülkemizde sanayi kuruluşları, harmonikler bileşenler konusunda yeterli bilgi birikimine sahip değildirler. Üniversitelerce sanayi kuruluşlarının bilgilendirilmeleri gerekmektedir. Bu bilgilendirme yanında biran önce ülkemiz koşullarına uygun harmonik standartlarının oluşturulmasında büyük yararlılıklar vardır.

Non-linear yüklerin sebep olduğu harmoniklerin güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Rezonans şartları her harmonik bileşenler için ayrı, ayrı hesaplanmalıdır. Bir güç sistemine harmonik kaynaklarından enjekte edilen harmoniklerin olması durumunda, bunlar şebekeyi herhangi bir bileşeni ya da bileşenler için rezonanslar oluşturacak şekilde etkiler. Yüksek dereceli harmonikler, tüm sistemi etkileyebilir. Bu etkiler güç sistemi ve diğer ekipmanların da performansını azaltır. Şekil 6'da non-linear devre şeması verilmiştir.

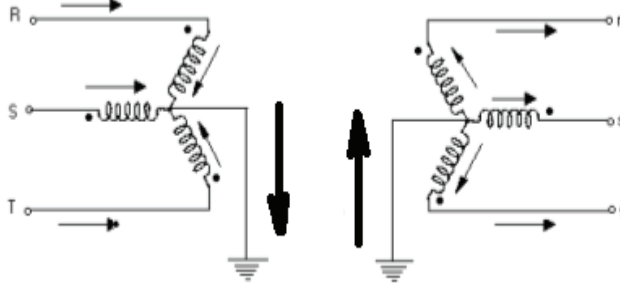


Şekil 5. Elektrik devresinde non-linear yükün oluşturduğu distorsiyonu

Elektrik şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmonik bileşenlerden olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmonik bileşenlerin standartlarca belirtilen seviyelerin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, non-linear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlardır ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Harmonik standartları, harmonik bileşenler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için non-linear yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadırlar.

Transformatör Yıldız-topraklı / Yıldız – topraklı bağlı olması durumunda üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçer (Dugan, 1996). Şekil 7’ de nötrü topraklı yıldız/yıldız bağlı bir transformatörün bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 7. Yıldız / Yıldız bağlamada üç ve üçün katı harmoniklerin akışı

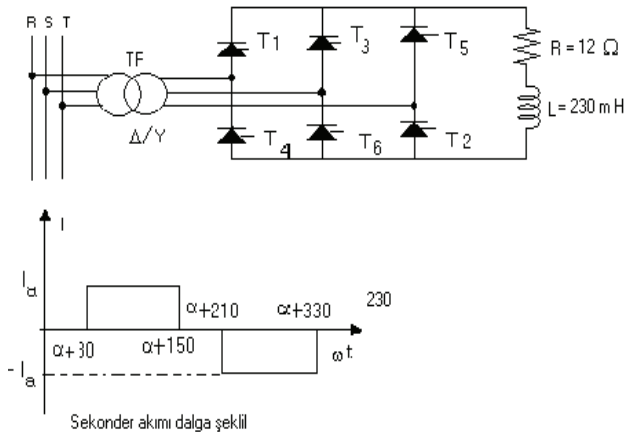
IEEE-519 ve VDE-0839’da endüstriyel kullanıcılarla birlikte elektrik üretim ve dağıtımıyla ilgili harmonik standartlar içermektedir. Bu standartlarda, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşene oranları verilmiştir. Harmonik analizi yapılacak tesisin ilk olarak tek hat şeması tespit edilir. Bu tesiste harmonik kaynağı durumundaki devre elemanı yerine bağımsız akım kaynağı konur. Harmonik bileşenlerin her biri için çevre denklemleri veya düğüm denklemleri yardımı ile çözüme gidilir. Örnek aldığımız tesiste harmonik kaynağı üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucudur.

Non-linear elemanlar, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler. Enerji tesisinin güvenilir ve kararlı bir biçimde çalışmasını sağlamak için, tasarım ve işletme aşamasında non-linear elemanların veya non-sinüsoidal kaynakların meydana getirdiği harmonik büyüklüklerinin hesaplanarak veya ölçülerek ortaya konması gerekir. Toplam harmonik distorsiyonu standartlarda verilen sınır değerleri aşmaktadır. Bu yüzden bu tür konverterlerin kullanıldığı endüstri iş kollarında mutlak surette filtre tesisinin kurulup toplam harmonik distorsiyonun düşürülmesi gerekmektedir.

5. Sayısal Uygulama

Doğrultucu devrelerinde kontrolü sağlayan eleman olarak tristör kullanılır. Böylece çıkıştaki büyüklükleri istediğimiz değere ayarlayabiliriz. Statik konverterlerde üç ve üçün katı harmonikler ile çift harmonikler sıfırdır. Eğri x eksenine göre simetrik olduğundan Fourier analizinde sadece sinüslü terimler bulunur.

Bundan dolayı harmonik eliminasyonun da hedef 5.,7.,11.,13 gibi harmonik bileşenleri elimine etmedir. Endüstriyel uygulamalarda en çok yaygın olarak kullanılan üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun harmonik analizini gerçekleyelim. Şekil 8'de üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu şeması verilmiştir.



Şekil 8. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu ile giriş akım dalga formu

Kontrollü doğrultucu devresinin akım için toplam harmonik distorsiyonunu (THD₁) bulunuz.

$$I = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \quad (24)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) d(\omega t) = 0 \quad (25)$$

Fourier serisinin A_n bileşeni,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_1(t) \cos n\omega t d(\omega t) = \frac{I_a}{\pi n} \left\{ \left[\sin \omega t \right]_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} - \left[\sin \omega t \right]_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} \right\}$$

$$A_n = \frac{4I_a}{\pi \cdot n} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n\alpha \quad (n = 1,3,5,\dots) \quad (26)$$

şeklinde bulunur. Fourier serisinin B_n bileşeni,

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) \sin n\omega t d(\omega t) =$$

$$\frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) - \int_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) \right]$$

$$B_n = \frac{4I_a}{\pi \cdot n} \sin \frac{n\pi}{3} \cos n\alpha \quad (n = 1,3,5,\dots) \quad (27)$$

şeklinde bulunur. Giriş akımının efektif değeri,

$$I_n = \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}I_a}{\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (28)$$

olarak elde edilir. Giriş akımının (konverterlerde üç ve üçün katı harmonikler sıfırdır.) toplam harmonik distorsiyonu,

$$\text{THD}_1 = \sqrt{\frac{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2}{I_1^2}} \quad (29)$$

ifadesi hesaplandığında,

$$\text{THD}_1 = \sqrt{\frac{I_a^2(0.15599^2 + 0.1114^2 + 0.0709^2 + 0.0599^2 + 0.0459^2 + 0.0410^2 + 0.0339^2)}{I_a^2 0.7797^2}}$$

$$\text{THD}_1 = 0.2876 = \% 28.76$$

şeklinde bulunur. Güç elektroniği elemanları birçok durumda bir harmonik kaynağı olmalarına rağmen harmonik bozulmalara karşı çok duyarlıdırlar. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilimin sıfır dan geçişinin iyi belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktası bir çok güç elektroniği devresi için kritik bir noktadır. Harmonik bozulmanın sıfır noktalarını kaydırması sonucu, bu durum güç elektroniği elemanlarının çalışmasını olumsuz etkiler. Tepe değerlerine göre çalışan diyot gibi elemanlarda sorunlar çoğalır.

Elektrik güç sistemlerinde harmonik distorsiyon sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Harmonikler güç sistemlerindeki kirliliktir. Statik dönüştürücülerin kullanılmasının arması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır. Güç elektroniği elemanları ve çeşitli non-linear elemanların her geçen gün artış göstermesi, enerji sisteminde dolaşan non-sinüsoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım yada gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Böylece çeşitli harmonik problemlerinin analizi için harmonik seviyesinin hesaplanması ve daha büyük problemler oluşmadan harmoniklerin giderilmesi gerekir.

Elektronik devre elemanlarından kaynaklanan harmonikler sinüsoidal dalganın anahtarlaması kısılması ve benzeri gibi olaylar sonucu oluşmaktadır. Özellikle güç elektroniği uygulamalarında kullanılan tristörler tarafından üretilmektedir. Güç elektroniği sistemlerinin ürettiği harmonikleri azaltmak için doğrultma evirme gerilim ve frekans kontrolü gibi uygulamalarda devrenin darbe sayısını 12, 36 gibi büyük değerlere çıkarılmalıdır.

6. Sonuç ve Öneriler

Güç elektroniği elemanları ve çeşitli non-lineer elemanların her geçen gün artış göstermesi enerji sisteminde dolaşan nonsinüoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım yada gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde harmonik distorsiyon sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Harmonikler güç sistemlerindeki kirliliktir. Statik dönüştürücülerin kullanımın artması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır (Rashid, 1994). Enerji kalitesi ile ilgili tanım ve büyüklüklerin incelendiği bu çalışmada, elde edilen sonuç ve öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Harmonikler elektrik tesislerindeki kirliliktir. Harmonik büyüklüklerin değeri mutlak surette Standardlarca belirlenen değerler altına çekilmelidirler. Önemli harmonik kaynağı durumundaki sanayi işletmeleri için ürettikleri harmonikler için yıllık tertiplenmiş yük çizelgeleri oluşturulmalıdır. Harmonik üreten bu işletmelere ürettikleri harmonik oranı ile orantılı bir ücretlendirmeye gidilmelidir.
- Elektrik enerjisine olan talep günbegün artmaktadır. Daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji için, güçlü nonlinear elemanlar içeren demir çelik tesisleri, ark ocakları gibi tesislerde yılda birkaç kez harmonik yük akışı ölçümü yapılmalıdır (Arrillaga, 1991). Bu tür tesislerin yıllık harmonik yük eğrileri çıkarılmalı ve bu tesislerde harmoniklerin düşük seviyede tutulmaları sağlanmalıdır. Bu tür tesislere filtre koyma zorunluluğu mutlak surette getirilmelidir. . Bunu tersi olarak enerji şebekesini kirliletme oranında tüketicilere ek bir maliyet getirilmelidir. Böylelikle daha kaliteli daha güvenli ve daha ekonomik bir enerjinin elde edilmesi mümkün olabilecektir.
- Harmonikler transformatörlerde bakır ve demir kayıpları ile kaçak akıların artmasına, döner makinelerde kayma ve momenti etkileyerek gürültülü ve vuruntulu çalışmalarına, verimlerinin düşmesine sebep olmaktadırlar. Sinüs dalgasının sıfırdan geçişine göre tetikleme yapan sinyallerin yanlış sinyaller vermesine, rezonans olaylarından dolayı sigortaların sık, sık atmasına sebep olmaktadır. Koruma rölelerinin yanlış sinyaller sonucunda ya erken yada geç açılmalarına sebebiyet vermesine, şebekede çalışmakta olan tüm cihazların normal ömürlerinin kılmasına neden olmaktadır.

- Son yıllarda nonlineer yüklerdeki artış dikkate alındığında, harmoniklerin yakın gelecekte enerji sistemimizi büyük oranda etkileyecekleri gözükmektedir. Ülkemizdeki sanayi kuruluşlarının harmonikler ve meydana getirdiği olumsuzlukları hakkında yeterli bilgileri yoktur. Bu nedenle harmonikler konusunda tüketicilerin bilgilendirilmeleri gerekmektedir. Tanımları verilen THD, TDD, HD_v , HD_I gibi sınır değerler tespit edilmelidir. Harmonik üreten tesislerde bu faktörlerin değerleri standartlarca kabul edilen değerlerin altında tutulmalıdır.
- Enerji tesisinin güvenilir ve kararlı bir biçimde çalışmasını sağlamak için, tasarım ve işletme aşamasında nonlineer elemanların veya non-sinüsoidal kaynakların meydana getirdiği harmonik büyüklüklerinin hesaplanarak veya ölçülerek ortaya konması gerekir.
- Harmonikler sinüzoidal dalganın anahtarlanması kısılanması ve benzeri gibi olaylar sonucu oluşmaktadır. Özellikle güç elektroniği uygulamalarında kullanılan tristörler tarafından üretilmektedir. Güç elektroniği sistemlerinin ürettiği harmonikleri azaltmak için doğrultma evirme gerilim ve frekans kontrolü gibi uygulamalarda devrenin darbe sayısını 12, 36 gibi büyük değerlere çıkarmalıyız. Bu yolla dalga şekli sinüse daha benzemekte ve Distorsiyon değeri azalmaktadır.
- Yüksek mertebeli harmoniklerin frekansı da yüksek olduğundan (n.f) enerji iletim hataları ile (telefon) hatlarının yakın olduğu yerlerde telefonlarda parazit baş gösterir. Bu sebepten dolayı telefon hatlarını enerji iletim hatlarından uzak yerlerden geçirmek gerekir. Mümkün mertebe yer altı şebekeleri kullanılmalıdır.
- Elektrik sistemlerinin arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi, akım ve gerilim gibi büyüklüklerin 50 Hz frekansta ve sinüsoidal formda olmasına bağlıdır. Bununla birlikte bir çok nedenlerden dolayı bu temel büyüklükler sinüsoidal özelliklerini kaybederek sistemde istenmeyen harmonikler oluşmaktadır. Lineer olmayan yüklerin, elektrik dağıtım sistemlerinde, gerilim ve akım dalga biçiminde bozulma meydana getirdikleri uzun yıllardır bilinmektedir.
- Günümüzde; eskiden beri var olan lineer olmayan yüklerle ilaveten, güç elektroniği elemanlarının hızla yaygınlaşması ise dalga şeklindeki bozulmaya duyarlı elemanların sayısındaki artış, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini artırmıştır. Akım ve gerilim dalgalarında oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve bu tesislere

bağlı tüketicilere zarar vermekte veya tamamen işlemez hale getirmektedir.

- Elektrik sistemlerinin arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi, akım ve gerilim gibi büyüklüklerin 50 Hz frekansta ve sinüsoidal formda olmasına bağlıdır. Bununla birlikte bir çok nedenlerden dolayı bu temel büyüklükler sinüsoidal özelliklerini kaybederek sistemde istenmeyen harmonikler oluşmaktadır. Lineer olmayan yüklerin, elektrik dağıtım sistemlerinde, gerilim ve akım dalga biçiminde bozulma meydana getirdikleri uzun yıllardır bilinmektedir. Ancak günümüzde; eskiden beri var olan lineer olmayan yüklerle ilaveten, güç elektroniği elemanlarının hızla yaygınlaşması ise dalga şeklindeki bozulmaya duyarlı elemanların sayısındaki artış, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini artırmıştır. Akım ve gerilim dalgalarında oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve bu tesislere bağlı tüketicilere zarar vermekte veya tamamen işlemez hale getirmektedir.
- Non-lineer yükler düşük güçlü olsalar bile enerji sistemlerinde sinüsoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda non-lineer yük göz önüne alınırsa bunların sonucunda oluşan distorsiyonunun giderilmesi enerjinin kalitesi açısından çok önemlidir.
- Non-lineer elemanlar, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler. Harmonik seviyesinin hesaplanması ve daha büyük problemler oluşmadan harmoniklerin giderilmesi gerekir.
- Elektrik enerjisine olan talep günbegün artmaktadır. Daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji için, güçlü non-lineer elemanlar içeren demir çelik tesisleri, ark ocakları gibi tesislerde yılda birkaç kez harmonik ölçümü yapılmalıdır. Bu tür tesislerin yıllık harmonik yük eğrileri çıkarılmalı ve bu tesislerde harmoniklerin düşük seviyede tutulmaları sağlanmalıdır. Bu tür tesislere filtre koyma zorunluluğu mutlak surette getirilmelidir. . Bunu tersi olarak enerji şebekesini kirlenme oranında tüketicilere ek bir maliyet getirilmelidir. Böylelikle daha kaliteli daha güvenli ve daha ekonomik bir enerjinin elde edilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Arrillaga, J. VE Efthymiadis, A.E.,(1968), ‘Simulation of convertor performance under unbalanced conditions’. Proc. IEE, 115, no.12, pp.1809-17.
2. Arifoğlu, U. ve Ayan, K., (2000), “Lineer Olmayan Devrelerin Kompanzasyonunda Optimum Kapasite Seçimi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 2001/1, İstanbul.
3. Bird, B.M., Marsh, J.F. ve McLellan, P.R., (1969), “Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Triple-frequency Current Injection”, Proc. IEE, 116:1730-1734
4. Erickson, W.R.,(1997), Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers Boston / Dordrecht / London.
5. Doggan, E. ve Morrison E.R., (1993), “Prediction of Harmonic Voltage Distortion When a Nonlinear Loads is Connected to an Already Distorted Supply”, IEE Proceedings-C, Vol 140 No.3
6. Pejoviç, P., (2002), “A Novel Low- Harmonic Three- Phase Rectifier”, IEEE Trans. On Circuit and System- Fundamental Theory and Applications. Vol 49, No.7.
7. Grady, W.M ve Heydt, G.T., (1985), “Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104: 554-561.
8. Adak, S. Cangi, H.,(2014), “Harmonik Bileşen İçeren Elektrik Tesislerinde Kondansatör Kayıpları”, *3eELECTROTECH*, sayı: 325,2014, Kasım, p:181-192. 2014.
9. Linden, W.P. (1996), “Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents”, IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 12, pp. 633-645.
10. IEEE Standard 519-1992. (1993), “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
11. Adak, S. Cangi, H. Yılmaz, A.S., (2019), “Doğrusal Olmayan Yüklerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi ve Harmonik Bileşenlerin Süzülmesi”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım Ve Teknoloji, GU J Sci, Part C,5(1).
12. Zanda, P., Shepherd, W. (1978), “Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits”, Cambridge University Press, London.
13. Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R. (1997), “Power System Harmonic Analysis”, John Wiley & Sons, New Delhi
14. Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
15. Kim, S., Enjeti, P., Packebush, P. ve Pitel, L., (1994), “A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 30, no. 6, pp. 1557–1564.
16. Lawrance, B.W. ve Mielczarski, W., (1992), “Harmonic current reduction in a three-phase diode bridge rectifier,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39, pp. 571–576.

17. Mohan, N., Undeland. ve Robbins, P.W., (1987), Power Electronics, Willey, Toronto Singapore.
 18. Michael Z. L. (1993), "Improving power factor in the presence of harmonics using low-voltage tuned filters", IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 3.pp.1339-1345.
 19. Kececioğlu O.F., Acikgoz H., Sekkeli M., (2016), "Advanced configuration of hybrid passive filter for reactive power and harmonic compensation", SpringerPlus, 5(1).
 20. Rashid, M. H. (1994), "Power Electronics - Circuits, Devices and Applications", Prentice -Hall of India Private Ltd. New Delhi, Second Edition.
 21. Dugan, C. R., McGranaghan, F. M. ve Beaty, W. H. (1996), "Electrical Power System" Quality, McGraw- Hill Companies, U.S.A, 1996.
 22. Prasad, A.R., Ziogas, P.D. ve Manias, S., (1989), "An Active Power Factor Correction Technique For Three-Phase Diode Rectifiers", IEEE, Rec. pp. 58-66.
 23. Rashid, M.H., (1993), Power Electronics, Prentice Hall, New Jersey.
 24. İzgi E. , İnan A. , Ay S. (2008), "The analysis and simulation of voltage distribution over string insulators using Matlab/Simulink", Electric Power Components And Systems, cilt.36, sa.2, ss.109-123.
 25. Adak, S., (2003), "Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyununun Azaltılması", Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
 26. Shipp, D.D., (1979), "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", IEEE Trans on industrial Application, Vol. IA-15, No 5: pp. 453-458.
- .
- .

Bölüm 12

VERİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİYLE TÜKETİCİLERİN TİŞÖRT TERCİHLERİNİN BELİRLENMESİ

Selahattin BARDAK¹
Ahmet ÖZBEK²

1 Doçent Doktor Selahattin BARDAK, Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-9724-4762

2 Doçent Doktor Ahmet ÖZBEK, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-5015-8082

*Sorumlu Yazar: e-mail: sbardak@sinop.edu.tr

GİRİŞ

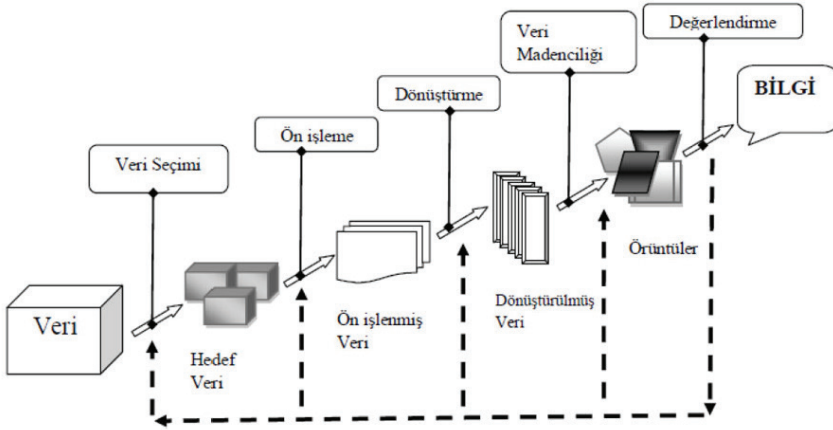
Giyim sektöründe küresel aşırı bir rekabet yaşanmasının yanı sıra tüketici tercihleri de sürekli değişmektedir (Dağcı Büyük vd., 2020), (Özbek, 2020). Değişen tüketici tercihleri, işletmelerin tüketiciler tarafından en çok tercih ettiği ürünleri yeteri miktarda üretememesine ve tüketiciler tarafından çok tercih edilmeyen ürünlerden ise gereğinden fazla üretmesine neden olmaktadır (Saiyin vd., 2015). Bu ve pek çok nedenden dolayı işletmelerin tüketicilerle kurmuş olduğu bağlar tüketici sadakatini artırması nedeniyle çok daha önemli hale gelmiştir (Bilik ve Yaman, 2020). Artık işletmeler için başarı tüketicilerin tam olarak neyi tercih ettiğini bilmelerinde saklıdır (Singh ve Jha, 2018). Tüketicinin tercih ettiği ürünleri üretmeyi başaran işletmeler başarılı olmakta, ayrıca bu işletmelerin müşterileri de memnun kalmaktadır (Sabijono, 2013). Bu öneminden dolayı tüketici tercihlerini belirlemeye yönelik araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şöyledir. Karunaratne vd., (2021) tüketicilerin denim pantolon satın alımını etkileyen faktörler ve bu faktörlerin denim giyim endüstrisinde hakim olan talebe etkisi, Zhao vd., (2020) yazlık gömlek kumaşlarına yönelik tüketici tercihleri, Atasağun vd., (2019) Türk tüketicilerin iç giyim tercihleri ve beklentileri, Fikry ve Ahmad (2019) genç tüketicilerin başörtüsü satın alma tercihleri ve karar verme tarzları, Anuşlu and Çılan (2019) hızlı moda sektöründe müşterilerinin ihtiyaç ve istekleri, Shibly vd., (2018) çeşitli sosyal statüdeki kişilerin giyim tercihleri ve yerel pazarındaki müşteri talebi, Song ve Kim (2018) tüketicilerin yeşil giysi satın alımına yol açan faktörleri, Saiyin vd, (2015) giysi satış miktarının tahmini, Shahzad ve Ijaz (2015) X ve Y kuşakları kadın tüketicilerin giyim tercihlerini, Sabijono (2013) batık giysilerin hangi özelliğinin tüketici tarafından en çok tercih edildiği ve batık giyim ürünlerinin ideal tüketici tercihlerinin en yüksek faydasını veren özelliklerin kombinasyonu, Gam (2011) moda ve alışveriş oryantasyonunun çevre dostu giysiler satın alma niyetinin belirleyicilerini, Ercan (2010) tüketicilerin sezonsal (kazak) ve sezonsal olmayan (kot pantolon) moda ürünlerini satın alma eğilimlerinin tahmini, Kokol vd., (2006) gençlerin giyim moda tercihlerini modelleyerek belirlemek için araştırmalar yapmışlardır.

Bu çalışmada ise yaz aylarında tüketiciler arasında çok yaygın kullanıma sahip giysiler olan tişörtlere yönelik tüketici tercihlerinin belirlenmesini amaçlanmaktadır. Bu amaca ulaşmak için ise öncelikle tüketicilerden soru formuyla veri elde edilmiştir. Daha sonra bu elde edilen verilerden RapidMiner yazılımı ve Karar ağacı ve rastgele orman algoritmaları kullanılarak tüketicilerin 2021 yılı yaz dönemi tişört tercihleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Veri Madenciliği

Ham verinin kendi başına bir değeri yok ilen, bilgisayar sistemleriyle belirli bir amaca yönelik işlenerek bilgiye dönüştürülebilmektedirler. Bilginin çok fazla miktarda artmasıyla birlikte kurum içi ve dışı bilgilerin yanı sıra önceden tahmin edilemeyen sorulara yönelik cevap bulan, ileriye dönük tahmin sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda veri madenciliği yöntemleri birçok alanda kullanılabildiği gibi pazarlama alanında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çok büyük ölçekli veriler, farklı alanlardaki büyük ölçekli veri tabanları içinde değerli verileri barındıran bir veri madeni gibi düşünülebilir. Veri madenciliği ise bahsi edilen bu verilerden önceden bilinmeyen anlamlı bilgileri üretme süreci olarak tanımlanmaktadır (Albayrak ve Yılmaz, 2009). Veri madenciliği birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle de eğitim, endüstri, pazarlama, tıp, bilim, mühendislik, bankacılık, sigortacılık ve lojistik gibi alanlarda uygulanabilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesi ve simülasyon odaklı tasarım ile ürün geliştirme maliyetleri düşürülmüş, pazarlanma süresi kısaltılmış ve ürün kalitesini iyileştirilmiştir (Yanlı vd., 2018; Bardak ve Bardak, 2019).

Veri madenciliği aşamaları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Veri madenciliği adımları (Yıldız ve Şeker, 2016)

Veri Madenciliğinde kullanılan modeller, tahmin edici (Predictive) ve tanımlayıcı (Descriptive) olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır (Bigus Joseph, 1996; Ayık vd., 2007). Tahmin edici modellerde, sonuçlar el edilen verilerden hareketle bir model geliştirilmesi ve kurulan bu modelden

faidalanılarak sonuçları bilinmeyen veri kümelerinin sonuç değerlerinin tahmin edilmesi hedeflenmektedir. Tanımlayıcı modellerde ise karar vermede kullanılacak mevcut verilerdeki örüntülerin tanımlanması sağlanmaktadır (Akınar Haldun, 2000; Ayık vd., 2007). Veri madenciliği modelleri fonksiyonlarına; sınıflama ve regresyon modelleri tahmin edici, Kümeleme, Birlikte Kuralları ve Ardışık Zamanlı Örüntüler ise tanımlayıcı modeller olarak ayrılmaktadır (Ayık vd., 2007).

Karar ağaçları, sınıflandırma ve tahmin için sıkça kullanılan bir veri madenciliği modelidir. Sinir ağları gibi diğer metodolojilerin de sınıflandırma için kullanılabilmesine rağmen, karar ağaçları, kolay yorumu ve anlaşılabilirliği açısından karar vericiler açısından büyük avantaj sağlamaktadır (Chien ve Chen, 2008; Çalış vd., 2014). Karar ağaçlarının anlaşılmasının, yorumlanmasının ve veri tabanları ile entegrasyonun kolay olması ve güvenilirliklerinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı en yaygın kullanılan sınıflandırma tekniklerindedir.

Rastgele orman algoritması da karar ağaçları gibi sınıflandırma ve tahmin için kullanılan modellerden biridir. Rastgele orman algoritması ağaç tipi sınıflandırıcılar topluluğu olarak tanımlanır. Rastgelelik özelliği eklenerek torbalama yönteminin geliştirilmiş bir versiyonu olmuştur (Breiman 2001; Akar ve Güngör, 2012). Rastgele orman algoritması, tüm değişkenler arasından en iyi olan dalı kullanarak her bir düğümü dallara ayırmaktansa her bir düğümde rastgele olarak seçilen değişkenler arasından en iyisini kullanmak suretiyle her bir düğümü dallara ayırma işlemi yapar. Her bir veri seti orijinal veri setinden yer değiştirmeli olarak elde edilir. Daha sonra rastgele özellik seçimi kullanılarak ağaçlar geliştirilir (Archer, 2008; Breiman, 2001: Akar ve Güngör, 2012). Rastgele orman algoritması çok hızlıdır, aşırı uyuma karşı dayanıklıdır ve ne kadar sayıda istenirse o kadar ağaçla çalışılabilir (Akar ve Güngör, 2012).

Veri madenciliği algoritmalarının kullanımı için çeşitli araçlar geliştirilmiştir. RapidMiner bu araçlar içerisinde anlaşılır ve kullanımı kolay olan yazılımlardan bir tanesidir. Rapidminer yazılımı bilimsel birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır (Bardak ve Bardak, 2018).

MATERYAL VE METOD

Verilerin Elde edilmesi

Araştırma kapsamında veri elde etmek amacıyla bir soru formu tasarlanmıştır. İlgili soru formu aşağıdaki sorulardan oluşmaktadır.

1. Cinsiyet
2. Eğitim (Son mezun olunan eğitim kurumu)

3. Yaş

4. Yaşanılan Bölge

5. Tahmini olarak bu yaz sadece tişört için kaç lira bütçe ayırmayı düşünüyorsunuz?

6. Bu yaz en fazla tercih etmeyi düşündüğünüz tişört yakasını seçiniz.

7. Bu yaz en fazla tercih etmeyi düşündüğünüz tişört kol boyunu seçiniz.

8. Bu yaz en fazla tercih etmeyi düşündüğünüz tişört kumaşını seçiniz.

9. Bu yaz tercih etmeyi düşündüğünüz tişört rengi hakkında aşağıdaki seçenekleri değerlendiriniz.

10. Bir önceki soruda tek renk işaretlediyseniz o rengi yazınız (örneğin; mavi, turuncu vb.) diğer seçenekleri işaretlediyseniz bu soruyu geçiniz.

11. Dokuzuncu soruda eğer iki renk işaretlediyseniz o renkleri yazınız (örneğin; yeşil ve beyaz gibi) diğer seçenekleri işaretlediyseniz bu soruyu geçiniz.

12. Dokuzuncu soruda üç renk ve daha fazlasını işaretlediyseniz o renkleri yazınız. (Örneğin; bordo, beyaz ve mavi gibi) diğer seçenekleri işaretlediyseniz bu soruyu geçiniz.

13. Bu yaz tercih edeceğiniz tişörtle ilgili aşağıdaki seçenekleri değerlendiriniz.

13.1. Üzerinde yazı bulunan tişört tercih edeceğim.

13.2. Üzerinde resim bulunan tişört tercih edeceğim.

13.3. Üzerinde cep bulunan tişört tercih edeceğim.

13.4. Üzerinde arma bulunan tişört tercih edeceğim.

13.5. Üzerinde rakam bulunan tişört tercih edeceğim.

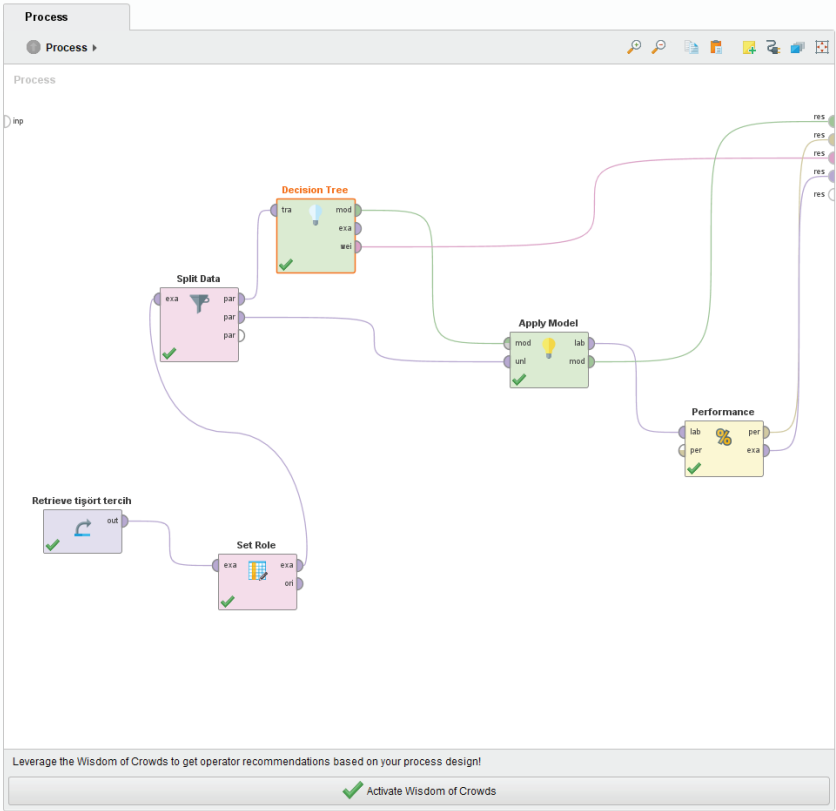
13.6. Üzerinde her hangi bir şey bulunmayan (yazı, resim, arma, cep, rakam vb. gibi) düz tişört tercih edeceğim.

14. Bu yaz tercih etmeyi düşündüğünüz tişört için ödemeye istekli olduğunuz ücret kaç TL dir?

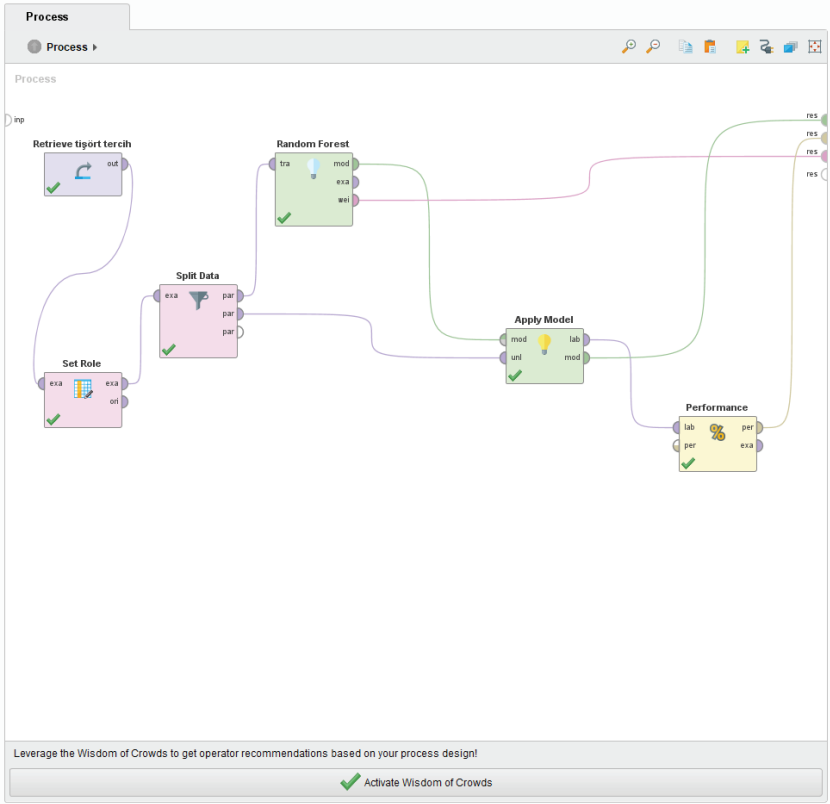
Tasarlanan soru formu online ortamda oluşturulmuş olup sosyal medyadan kolayca örneklem yöntemiyle Nisan 2021 de uygulanmıştır.

Modelin Kurulması

Uygulanan soru formunda ilk 9 soru (cinsiyet, eğitim, yaş, bölge, bütçe, tişört yakası, kol boyu, kumaşı ve rengi) kullanılmış ve elde edilen verilerin analizi için RapidMiner yazılımından faydalanılmıştır. Veri analizi için birçok özelliği sahip olan RapidMiner yazılımının kullanımı oldukça kolaydır. Bu yazılım operatörler ile kullanılmaktadır (Naik ve Samant 2016:665; Ristoski vd., 2015:147). Her operatörün bir görevi bulunmaktadır. RapidMiner programında ise karar ağacı ve rastgele orman modelleri kullanılmıştır. Şekil 2 ve Şekil 3’de karar ağacı ve rastgele orman modellerinde verilerin analizi için hazırlanan prosesler verilmiştir.



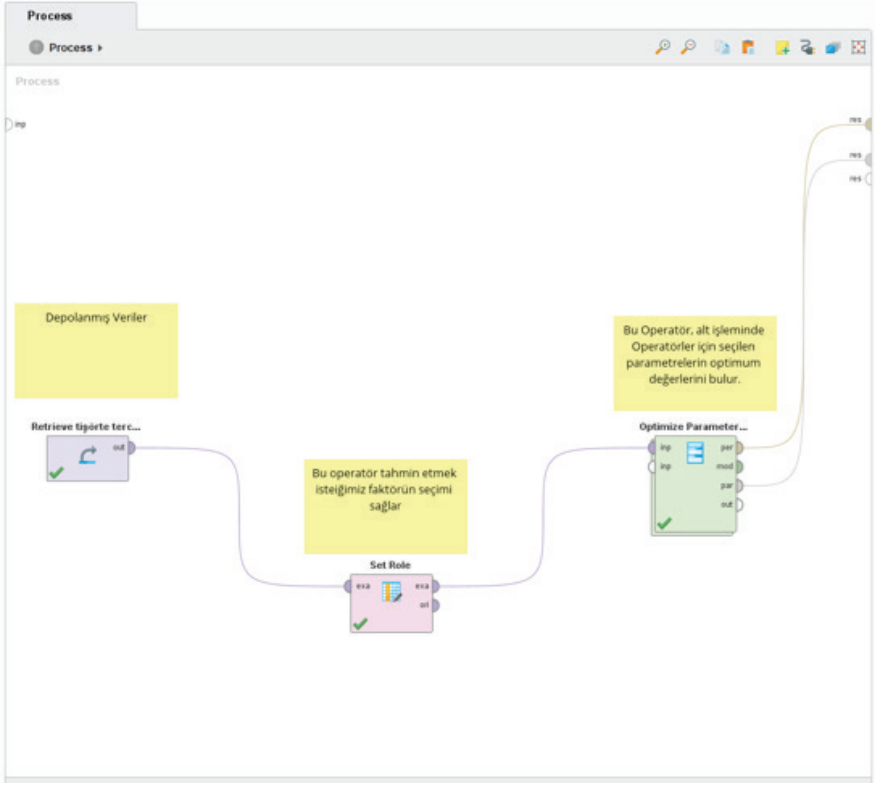
Şekil 2. Karar ağacı modelinde verilerin analizi için hazırlanan proses



Şekil 3. Rastgele orman modelinde verilerin analizi için hazırlanan proses

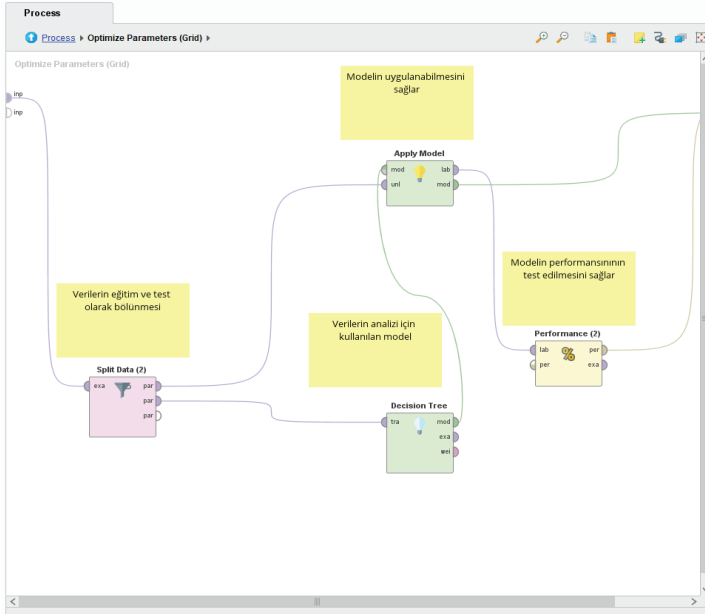
Şekil 2 ve şekil 3’de her operatörün görevlerine bakacak olursak Retrieve operatörü depolanmış olan bilgilere erişmemizi sağlar. Set Role operatörü tahmin etmek istediğimiz faktörün seçilmesini sağlar. Split Data operatörü verilerimizin eğitim ve test olarak ayrılmasına sağlar. Çalışmamızda verilerin %70 eğitim, %30 ise test verisi olarak kullanılmıştır. Decision Tree ve Random Forest operatörleri verilerimizin tahmin için sınıflandırma ve regresyon analizlerini yapar. Apply Model operatörü modelin uygulanabilmesini sağlar ve Performance operatörü ise modelin performans testlerinin yapılmasını sağlar.

Modellerin en iyi sonuçları verebilmesi için kullanılan faktörlerin optimizasyonu için karar ağacı ve rastgele orman modelleri için hazırlanan proses Şekil 4’de gösterilmiştir.

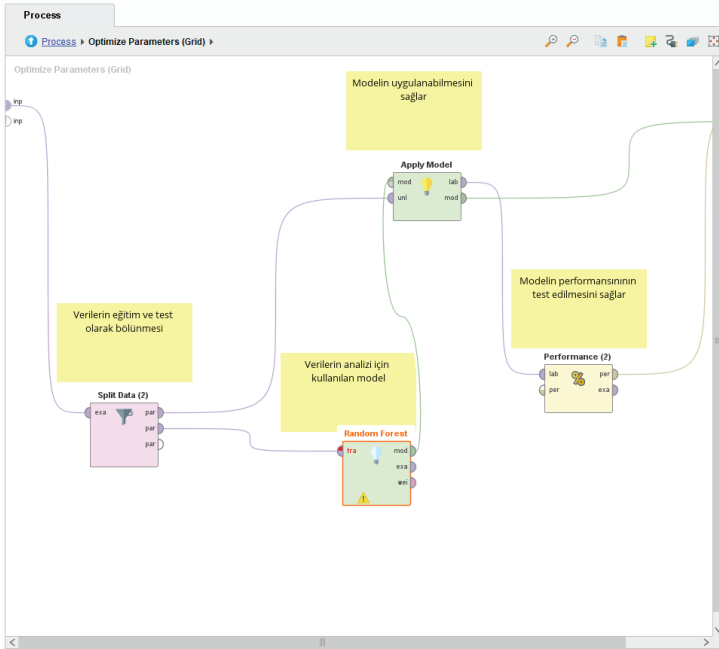


Şekil 4. Parametrelerin optimizasyonu için hazırlanan proses

Şekil 5 ve Şekil 6'da karar ağacı ve rastgele orman modellerinde parametrelerin optimizasyonu operatörü için hazırlanan prosesin içeriği verilmiştir.



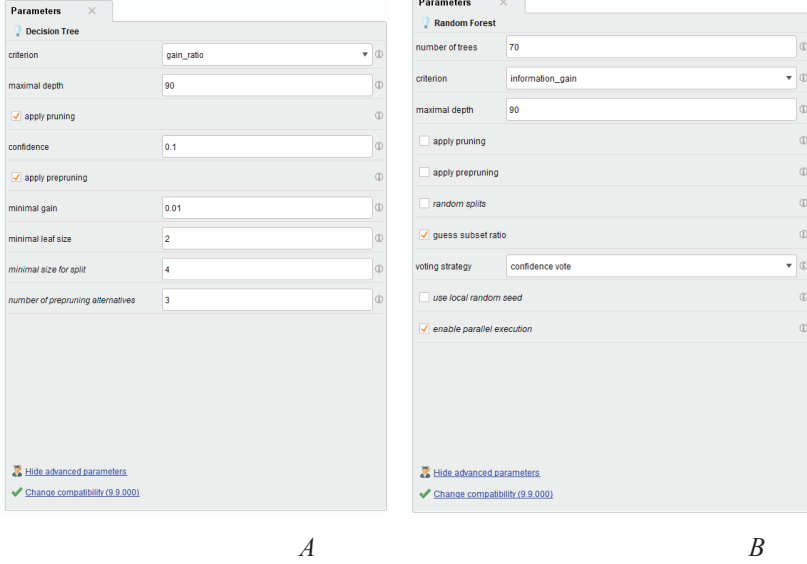
Şekil 5. Karar ağacı modelinde parametrelerin optimizasyonu operatörü için hazırlanan proses



Şekil 6. Rasgele modelinde parametrelerin optimizasyonu operatörü için hazırlanan proses

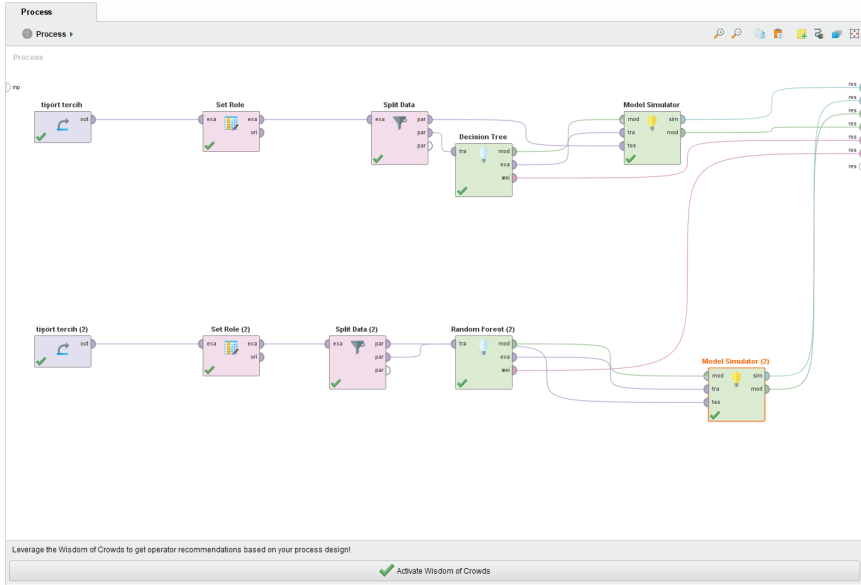
Karar ağacı ve rasgele orman modellerinde tişört yakası, tişört kumaşı, rengi ve kol boyu için hem parametrelerin optimizasyon analizi hem de verilerin analizinde dörder defa olmak üzere toplam 8 defa optimizasyon ve 8 defa da veri analizi için modeller çalıştırılmıştır.

Şekil 7’de karar ağacı ve rasgele orman modellerinde parametreleri gösteren örnek ekran görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7. Karar ağacı (A) ve rasgele orman modelleri (B) parametreleri

Simülasyon, bir sürecin temsili olarak tanımlanabilir (Bardak vd., 2021). Verilerin analiz işleminden sonra her iki model için simülasyon işlemi yapılmıştır. Simülasyon işlemi için hazırlanan proses iş akışı Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Modellerin simülasyonu için hazırlanan proses

Yukarıda verilen proseslerde açıklanan operatörlerden farklı olarak bu proste yer alan Model Simulator operatörü girdileri bir modele dönüştürerek çıktıyı görüntülemek için kolay, gerçek zamanlı bir yöntem sağlar.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada hazırlanan soru formunu toplam 402 kişi cevaplamıştır. Katılımcıların cinsiyet dağılımları %37,8'i (152 kişi) erkek ve %62,2'si (250 kişi) kadındır. Katılımcıların eğitim durumlarına göre dağılımları; %0,25'i (1 kişi) ilkökul, %2,74'ü (11 kişi) Ortaokul, %25,37'si (102 kişi) Lise ve %71,64'ü (288 kişi) üniversite mezunudur. Katılımcıların yaş gruplarına göre dağılımı; %39,1'i (157 kişi) 18-25 yaş, %17,7'si (71 kişi) 26-33 yaş, %19,9'u (80 kişi) 34-41 yaş, %15,9'u (64 kişi) 42-49 yaş ve %7,5'i (30 kişi) 50 ve üzeri yaş grubunda yer almaktadır. Katılımcıların yaşadığı bölgelere göre dağılımı; %58,2'i (234 kişi) Marmara, %2,5'i (10 kişi) Ege, %3,7'si (15 kişi) Akdeniz, %5,2'si (21 kişi) İç Anadolu, %23,6'sı Karadeniz ve %6,7'si (27 kişi) Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgesi şeklindedir.

Katılımcıların bu yaz tişört için ayırdıkları bütçe dağılımı Tablo 1'de verilmiştir. Tabloya göre %27,6'sı 201TL ve üzeri bütçe ayırırken yine yatırımcıların %16,2'si 1-50TL bütçe ayırmıştır.

Tablo 1. Katılımcıların bu yaz tişört için ayırdıkları bütçe

Bütçe Miktarı (TL)	Frekans	Yüzde (%)
1-50	65	16,2
51-100	88	21,9
101-150	55	13,7
151-200	83	20,6
201 ve üzeri	111	27,6
Toplam	402	100,0

Katılımcıların tişört yaka tercih dağılımları Tablo 2’de verilmiştir. Tabloya göre katılımcıların yaklaşık yarısı yuvarlak yaka tercih ederken, Y yaka katılımcılar tarafından en az tercih edilmektedir.

Tablo 2. Katılımcıların tişört yaka tercihleri

Yaka Tipi	Frekans	Yüzde (%)
Yuvarlak	192	47,8
Polo	71	17,7
V	103	25,6
Y	36	9,0
Toplam	402	100,0

Katılımcıların tişört kolu tercihleri Tablo 3’te verilmiştir. Tabloya göre katılımcıların yaklaşık yarısı normal kol tercih ederken, sadece %7,7’si kolsuz tişört tercih etmektedir.

Tablo 3. Katılımcıların tişört kolu tercihleri

Tişört Kolu Tipi	Frekans	Yüzde (%)
Kolsuz	31	7,7
Mini Kol	147	36,6
Normal Kol	186	46,3
Yarım Kol	38	9,5
Toplam	402	100,0

Katılımcıların tişört kumaşı tercihleri Tablo 4’te verilmiştir. Tabloya göre katılımcıların yaklaşık %70’i %100 pamuklu kumaş tercih ederken, sadece %1,5’i %100 Polyester tişört tercih etmektedir.

Tablo 4. *Katılımcıların tişört kumaşı tercihleri*

Kumaş Türü	Frekans	Yüzde (%)
%100 pamuk	279	69,4
%100 Polyester	6	1,5
Pamuk / Polyester Karışım	117	29,1
Toplam	402	100,0

Katılımcıların tişört renk tercihleri Tablo 5’te verilmiştir. Tabloya göre katılımcıların yaklaşık %62’si tek renk tişört tercih ederken, sadece %17,9’u üç ve daha fazla renkli tişört tercih etmektedir.

Tablo 5. *Katılımcıların tişört renk tercihleri*

Tişört Renk Tercihi	Frekans	Yüzde (%)
Tek Renk	249	61,9
İki Renk	81	20,1
Üç renk ve daha fazla	72	17,9
Toplam	402	100,0

Katılımcılardan tek renk tişört tercih edenlerin renk tercihleri Tablo 6’da verilmiştir. Tabloya göre tek renk tişört tercih eden katılımcılar sırasıyla en fazla; beyaz, siyah ve mavi tişört tercih etmektedir.

Tablo 6. *Tek renk tişört tercih eden katılımcıların renk tercihleri*

No	Renk	Frekans
1	Beyaz	78
2	Siyah	72
3	Mavi	35
4	Lacivert	11
5	Kırmızı	8
6	Yeşil	8
7	Gir	6
8	Bej	4
9	Turuncu	3
10	Mor	2

Katılımcılardan çift renk tişört tercih edenlerin renk tercihleri Tablo 7’de verilmiştir. Tabloya göre çift renk tişört tercih eden katılımcılar sırasıyla en fazla; Mavi-Beyaz, Siyah-Beyaz ve Beyaz-Kırmızı tişört tercih etmektedir.

Tablo 7. Çift renk tişört tercih eden katılımcıların renk tercihleri

No	Renk	Frekans
1	Mavi-Beyaz	17
2	Siyah-Beyaz	10
3	Beyaz-Kırmızı	4
4	Pembe-Beyaz	4
5	Mavi-Gri	3
6	Beyaz-Siyah	3
7	Beyaz-Yeşil	3
8	Mor-Beyaz	3
9	Siyah-Kırmızı	3
10	Yeşil-Beyaz	2

Katılımcıların bu yaz bir tişört için ödemeye istekli oldukları ücret dağılımı Tablo 8’de verilmiştir. Tabloya göre katılımcıların %41,8’i bir tişört için 31-60TL ödemeye istekli iken, bir tişört için 91 TL ve üzeri ücret ödemeye istekli katılımcılar %16,7’dir.

Tablo 8. Katılımcıların bir tişört için ödemeye istekli olduğu ücret

Ücret (TL)	Frekans	Yüzde (%)
1-30TL	101	25,1
31-60TL	168	41,8
61-90TL	66	16,4
91 TL ve üzeri	67	16,7
Toplam	402	100,0

Tişört yakası, tişört kumaşı, tişört rengi ve kol boyu için hazırlanan karar ağacı ve rasgele orman modellerindeki parametrelerin optimizasyon sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Karar ağacı ve rasgele orman modellerinin optimizasyon sonuçları

Tişört Tercihleri	Parametreler	Karar ağacı	Parametreler	Rasgele Orman
Yaka	Criterion	gain_ratio	Criterion	Information_gain
	Maximal depth	39	Number of trees	21
			Maximal depth	60
Kumaş	Criterion	gain_ratio	Criterion	Information_gain
	Maximal depth	90	Number of trees	60
			Maximal depth	29
Renk	Criterion	gain_ratio	Criterion	Information_gain
	Maximal depth	90	Number of trees	31
			Maximal depth	100
Kol Boyu	Criterion	gain_ratio	Criterion	Information_gain
	Maximal depth	50	Number of trees	70
			Maximal depth	90

Karar ağacı ve rasgele orman modellerinde tişört tercihleri için yapılan tahmin analizleri sonucu test verileri için elde edilen doğruluk oranları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Karar ağacı ve rasgele orman modellerinin tahmin doğruluk oranları

Tişört Tercihleri	Model Çeşidi	Doğruluk Oranları (%)
Yaka	Karar Ağacı	62.93
	Rasgele Orman	66.67
Kumaş	Karar Ağacı	84.42
	Rasgele Orman	91.67
Renk	Karar Ağacı	72.5
	Rasgele Orman	70.93
Kol Boyu	Karar Ağacı	61.67
	Rasgele Orman	73.33

Karar ağacı ve rasgele orman modelleriyle her bir tişört tercihi için yapılan analizler sonucu test verilerinde elde edilen doğruluk oranlarına bakıldığında renk hariç diğer bütün tişört tercih etmenlerinde (yaka, kumaş ve kol boyu) rasgele orman modeli daha iyi sonuçlar vermiştir. Her iki modelde de en iyi tahmin doğruluk oranları kumaş tercihinde

(karar ağacı: %84.42 ve rasgele orman: %91.67) elde edilmiştir. En kötü tahmin doğruluk oranları ise karar ağacında %61.67 ile kol boyu tahmininde bulunmuştur. Rasgele orman modelinde ise en kötü tahmin sonucu %66.67 ile yaka tercihinde bulunmuştur.

Örnek olması amacıyla rasgele orman modelinde kumaş tercihinde elde edilen karar ağaçlarından bir tanesinin metin hali aşağıda verilmiştir.

Tişört yakası= Polo Yaka

| bütçe = 1-50 TL: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=3, %100 Polyester=0}

| bütçe = 101-150TL: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=8, %100 Polyester=0}

| bütçe = 151-200TL

| | Tişört rengi = Tek renk: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | Tişört rengi = Tek renk

| | | yaşıınız = 26-33: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | yaşıınız = 50 ve üzeri: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | Tişört rengi = Üç renk ve fazla: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | Tişört rengi = İki renk

| | | yazılı/yazısız = yazılı: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=3, %100 Polyester=0}

| | | yazılı/yazısız = yazısız: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| bütçe = 201 ve üzeri: %100 pamuk {%100 pamuk=5, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| bütçe = 201 ve üzeri: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| bütçe = 51-100TL: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

Tişört yakası = V Yaka

| Cinsiyetiniz = Erkek: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=4, %100 Polyester=0}

| Cinsiyetiniz = Kadın

| | bölge = Akdeniz: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, % 100 Polyester=0}

| | bölge = Karadeniz: %100 pamuk {%100 pamuk=12, Pamuk / polyester Karışımı=0, % 100 Polyester=0}

| | bölge = Marmara

| | | Tişört rengi = Tek renk

| | | | bütçe = 1-50 TL: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=3, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 151-200TL: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 201 ve üzeri

| | | | | yaşıınız = 26-33: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=1, %100 Polyester=0}

| | | | | yaşıınız = 42-49: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 51-100TL: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | Tişört rengi = Üç renk ve fazla

| | | | Eğitiminiz = Lise: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | | | Eğitiminiz = Üniversite: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, % 100 Polyester=0}

| | | Tişört rengi = İki renk

| | | | yaşıınız = 34-41: %100 pamuk {%100 pamuk=3, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | yaşıınız = 50 ve üzeri: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | bölge = İç Anadolu: %100 pamuk {%100 pamuk=5, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

Tişört yakası = Y Yaka

| yaşıınız = 18-25

| | tişört kol boyu = Mini Kol: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=3, %100 Polyester=0}

| | tişört kol boyu = Normal Kol

| | | Cinsiyetiniz = Erkek: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | Cinsiyetiniz = Kadın

| | | | bölge = Ege: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=1, %100 Polyester=0}

| | | | bölge = Marmara: %100 Polyester {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=1}

| yaşıınız = 26-33: %100 pamuk {%100 pamuk=5, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| yaşıınız = 42-49: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

Tişört yakası = Yuvarlak yaka

| tişört kol boyu = Kolsuz: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| tişört kol boyu = Mini Kol

| | bütçe = 1-50 TL

| | | yaşıınız = 18-25: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, % 100 Polyester=0}

| | | yaşıınız = 42-49: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=1, %100 Polyester=0}

| | bütçe = 101-150TL

| | | bölge = Karadeniz: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | | bölge = İç Anadolu: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, % 100 Polyester=0}

| | bütçe = 151-200TL: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | bütçe = 201 ve üzeri: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | bütçe = 201 ve üzeri: %100 pamuk {%100 pamuk=3, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | bütçe = 51-100TL

| | | yaşıınız = 34-41

| | | | Cinsiyetiniz = Erkek: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | | | Cinsiyetiniz = Kadın: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | yaşınız = 42-49: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| tişört kol boyu = Normal Kol

| | bölge = Karadeniz: %100 pamuk {%100 pamuk=10, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | bölge = Marmara

| | | yaşınız = 18-25

| | | | bütçe = 101-150TL: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 151-200TL: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 201 ve üzeri

| | | | | Tişört rengi = Tek renk: % 100 pamuk {% 100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, % 100 Polyester=0}

| | | | | Tişört rengi = Üç renk ve fazla: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | | Tişört rengi = İki renk: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=1, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 201 ve üzeri

| | | | | Eğitiminiz = Lise: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | | | Eğitiminiz = Üniversite: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | | | bütçe = 51-100TL

| | | | | Cinsiyetiniz = Erkek: Pamuk / polyester Karışımı {%100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| | | | | Cinsiyetiniz = Kadın: %100 pamuk {%100 pamuk=2, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | yaşınız = 26-33: %100 pamuk {%100 pamuk=1, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | yaşıınız = 34-41: %100 pamuk { %100 pamuk=5, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

| | | yaşıınız = 42-49: Pamuk / polyester Karışımı { %100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=1, %100 Polyester=0}

| | bölge = İç Anadolu: Pamuk / polyester Karışımı { %100 pamuk=0, Pamuk / polyester Karışımı=2, %100 Polyester=0}

| tişört kol boyu = Yarım Kol: %100 pamuk { %100 pamuk=7, Pamuk / polyester Karışımı=0, %100 Polyester=0}

Yukarıdaki ağaçtan elde edilen verilerin bazılarını açıklayacak olursak;

1- Tişört yakasını polo yaka, tişört için 1-50 TL para veren kişiler pamuk/polyester karışı tişört tercih etmektedirler.

2- Tişört yakası polo yaka, tişört için 151-200 TL para veren ve tek renk alan kişiler %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

3- Tişört yakası polo yaka, tişört için 151-200 TL ödeyen, tişört rengi iki olan ve yazılı tişört alan kişiler pamuk/polyester karışımı tişört tercih etmektedirler.

4- Tişört yakası Y yaka, yaşı 18-25 arası olan, tişört kol boyu mini kol alan kişiler pamuk/polyester karışımı tercih etmektedirler.

5- Tişört yakası yuvarlak, tişört kol boyu kolsuz alan kişiler %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

6- Tişört yakası yuvarlak yaka, Tişört kol boyu normal kol ve Karadeniz bölgesinde yaşayan kişiler %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

7- Tişört yakası yuvarlak yaka, Tişört kol boyu mini kol, bütçe 51-100 TL ve yaşı 34-41 ve cinsiyeti erkek olan kişiler pamuk/polyester karışımı tişört tercih etmekte iken cinsiyeti kadın olanlar %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

8- Tişört yakası yuvarlak yaka, tişört kol boyu norma kol, Marmara bölgesinde yaşayan, yaşı 18-25 arası tişört için 201 ve üzeri para veren ve eğitim düzeyi lise olan kişiler %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

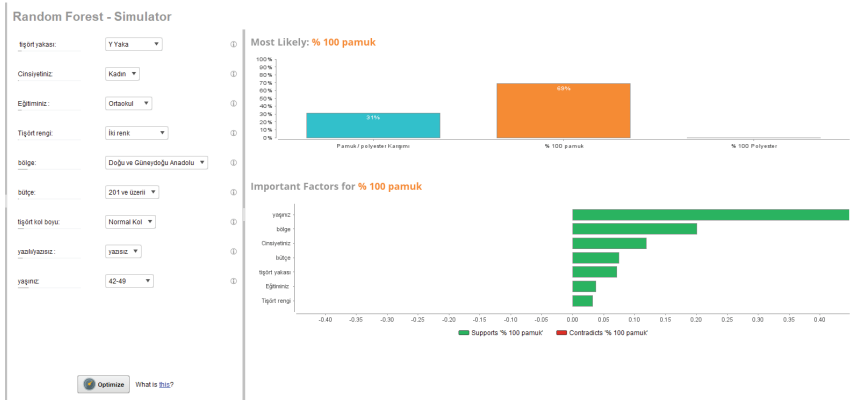
9- Tişört yakası V yaka, cinsiyeti kadın ve Akdeniz bölgesinde yaşayan kişiler %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

10- Tişört yakası V yaka, Marmara bölgesinde yaşayan, tişört rengi üç renk ve daha fazla olan ve eğitimi üniversite olan kişiler %100 pamuk tişört tercih etmektedirler.

Verilerin analiz işleminin ardından yapılan simülasyon en güvenilir sonuçları alabilmemiz için giriş verilerimizin optimize edilmesini sağlar. Ayrıca giriş verilerini değiştirmek suretiyle istediğimiz çıkış verilerini ulaşmamızı sağlar. Karar ağacı ve rasgele orman modellerinde elde edilen örnek simülasyon ekran görüntüleri Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 9. Karar ağacı modeli örnek simülasyon ekranı



Şekil 10. Rasgele orman modeli örnek simülasyon ekranı

Model simülasyonlarında tişört kumaşında %100 pamuk da en güvenilir sonuç alabilmek için giriş verilerimizi optimize ettiğimizde Şekil 9 ve Şekil 10’da görüleceği üzere karar ağacı modelinde; tişört yakası polo yaka, cinsiyet erkek, eğitim lise, tişört rengi iki renk, bölge Ege, bütçe 51-100 TL, tişört kol boyu normal kol, yazısız ve yaş 18-25

olduğunda bulunmuştur. Rasgele orman modelinde ise; tişört yakası Y yaka, cinsiyet kadın, eğitim ortaokul, tişört rengi iki renk, bölge Doğu ve Güneydoğu Anadolu, bütçe 201 TL ve üzeri, tişört kol boyu normal kol, yazısız ve yaş 42-49 olduğunda bulunmuştur.

SONUÇ

Yapılan bu çalışmada hazırlanan soru formundan yararlanılarak tüketicilerin tişört tercihleri belirlenmiş. Ayrıca Karar ağacı ve rasgele orman algoritmaları kullanılarak tişört tercihlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. İki modelle de tahmin gerçekleştirilmiştir. Modellerin tahmin doğruluk oranları incelendiğinde; tişört rengi hariç, tişört yakası, tişört kumaşı ve tişört kol boyu tahminlerinde rasgele orman algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca her iki modelde de en iyi tahminler tişört kumaşının belirlenmesinde bulunmuştur.

Günümüzde gelişmiş ülkelerin çoğunda veri bilimi ile ilgili çalışmalar artmaktadır. Ülkemizde veri bilimi ile ilgili çalışmalar sınırlı olup bu alanda çalışmaların yapılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Akar, Ö. ve Güngör, O. (2012). Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 1(2): 139-146.
- Akpınar, H. (2000). Veritabanlarında bilgi keşfi ve veri madenciliği, İ.Ü. İşletme Fakültesi Dergisi, 29: 1-22
- Albayrak, A.S. ve Koltan Yılmaz, Ş. (2009). Veri madenciliği: Karar ağacı algoritmaları ve İMKB verileri üzerine bir uygulama. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(1): 31-52.
- Anuşlu, M.D. ve Çılan, Ç.A. (2019). Determination of Customer Apparel Preferences By Using Latent Class Analysis: An Application for Koton Brand. International Journal of Management Economics & Business, 15(2): 542-560.
- Archer, K.J. (2008). Emprical characterization of random forest variable importance measure, computational statistical data analysis, Computational Statistics & Data Analysis, 52(4):2249-2260.
- Atasağun, H.G., Öner, E., Boyacı, B., ve Okur, A. (2019). Türk Tüketicilerin İç Giysi Satın Alma Davranışları ve Kalite Fonksiyon Göçerimi Uygulaması. Tekstil ve Mühendis, 26 (114): 168-175.
- Ayık, Y.Z., Özdemir, A. ve Yavuz, U. (2007). Lise türü ve lise mezuniyet başarısının, kazanılan fakülte ile ilişkisinin veri madenciliği tekniği ile analizi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 10(2): 441-454.
- Bardak, S ve Bardak, T (2018). Üniversite öğrencilerinin mobilya tasarımında geometrik form tercihlerinin veri analizi ile değerlendirilmesi: Sinop Üniversitesi örneği. 2th International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS 2018- Winter), Samsun, Turkey, 260-263.
- Bardak, S. ve Bardak, T. (2019). Mobilya ürününde üniversite öğrencilerini yaşadığı ergonomik problemlerin veri madenciliği ile değerlendirilmesi: Sinop Ünivertesini Örneği. 8th International Vocational Schools Symposium, Sinop, Turkey, 580-585.
- Bardak, S., Bardak, T., Peker, H., Sözen, E. ve Çabuk, Y. (2021). Predicting effects of selected impregnation processes on the observed bending strength of wood, with use of data mining models. BioResources, 16(3): 4891-4904.
- Bigus, J. (1996). Data Mining with neural networks: solving business problems from application development to decision support. McGrawHill Text.

- Bilik, N., ve Yaman, T.T. (2020). İlişkisel Pazarlamanın Müşteri Sadakatine Etkisi: Hazır Giyim Sektörü Örneği. *İktisadi ve İdari Yaklaşımlar Dergisi*, 2(1): 73-90.
- Breiman, L. (2001), *Random forests, machine learning*, 2001 Kluwer Academic Publishers, 45(1): 5-32.
- Çalış, A., Kayapınar, S. ve Çetinyokuş, T. (2014). Veri madenciliğinde karar ağacı algoritmaları ile bilgisayar ve internet güvenliği üzerine bir uygulama. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 25 (3-4): 2-19.
- Chien, C. F. ve Chen, L.F. (2008). Data Mining to improve personnel selection and enhance human capital: a case study in high-technology industry. *Expert Systems with Applications*, 34: 280-290.
- Dağcı Büyük, H, Ünal, S ve Erciş, A. (2020). Sürdürülebilir Giysi Satın Almada Etik Unsurların Değerlendirilmesi: Sosyal Ağ Kullanıcıları Üzerine Bir Araştırma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 15 (3): 1159-1184.
- Ercan, E. (2010). The Factors Affects Consumer's Decision When Buying An Apparel, *Electronic Journal of Social Sciences*, 9 (33): 1-17.
- Fikry, A., ve Ahmad, M.R. (2019). Malaysian's Young Consumer Preferences of Hijab. *Journal of Reviews on Global Economics*, 8, 916-924.
- Gam, H.J. (2011). Are fashion-conscious consumers more likely to adopt eco-friendly clothing?, *Journal of Fashion Marketing and Management*, 15 (2): 178-193.
- Karunaratne, P.V.M., Wijayakuruppu, M.B.M.W., Wijayapala, U.G.S. ve Ranathunga, G.M. (2021). A study on the factors influencing the preference of Sri Lankan consumers for the use of denim jeans. *Journal of Advanced Research in Social Sciences and Humanities*, 5(6), 217-232.
- Kokol, P., Verlic, M., ve Krizmaric, M. (2006). Modeling teens clothing fashion preferences using machine learning. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 3(10), 2054-2065.
- Naik, A., ve Samant, L. (2016). Correlation review of classification algorithm using data mining tool: weka, rapidminer, tanagra, orange and knime. *Procedia Computer Science*, 85: 662–668.
- Özbek, A. (2020). Online customized T-shirt design and evaluation of online websites for customization. *Industria Textila*, 71(4): 371-379.
- Ristoski, P., Bizer, C. ve Paulheim, H. (2015). Mining the web of linked data with rapidminer. *Journal of Web Semantics*, 35: 142–151.
- Sabijono, G. (2013). Analysis of Manado consumer preference in buying batik apparel product. *Jurnal EMBA: Jurnal Riset Ekonomi, Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 1(4): 414-421.

- Saiyin, X., Hu, C., Tan, D., ve Liu, Y. (2015, October). Research on Apparel Sales Forecast Based on ID3 Decision Tree Algorithm. In 2015 3rd International Conference on Mechatronics and Industrial Informatics (ICMII 2015) (pp. 704-709). Atlantis Press.
- Shahzad, S. K., ve Ijaz, H. (2015). Shopping with my mother'An investigation into clothing preferences of Generation X and Generation Y female consumers. DOI:10.13140/RG.2.1.4347.1521
- Shibly, M.M.H., Yasmin, Z., Ahmmed, M.S. ve Swati, S. S. (2018). Understanding Apparel Preference of Different Social Status People of Bangladesh Apparel Market. Global Journal of Research In Engineering, 18 (4).
- Singh, A. K., ve Jha, V.A. (2018). Study on Consumer preference towards Private Label Apparel in Delhi/NCR, International Research Journal of Management Science & Technology, 9(3): 299-308.
- Song, S. Y. ve Kim, Y. K. (2018). A human-centered approach to green apparel advertising: decision tree predictive modeling of consumer choice. Sustainability, 10 (10): 1-20.
- Yanli, S., Yusheng L., Xiaoping, Y., ve Shuting, Z. (2018). A machine learning based global simulation data mining approach for efficient design changes. Advances in Engineering Software, 124: 22–41.
- Yıldız, M. ve Şeker, Ş.E. (2016). Veri Madenciliği Araçları (Data Mining Tools). YBS Ansiklopedi, 3(4): 10-19.
- Zhao, Y., Yin, L., Ikiz, Y., Sato, T., Yu, Q., Zhang, Z. ve Li, Q. (2020). A study on customer's preference toward summer-shirt fabric. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 15, 1-7.

Bölüm 13

UYDU BAZLI KÜRESEL KONUM BELİRLEME SİSTEMLERİNDE AĞ BAZLI RTK TEKNİKLERİ¹

*Ömer YURDAKUL²
İbrahim KALAYCI³*

¹ Bu çalışma, ilk yazar olan Dr. Ömer YURDAKUL'un Prof. Dr. İbrahim KALAYCI'nın danışmanlığında yapılan "CORS-TR Ölçmelerinde GLONASS'ın Konum Doğruluğuna Etkisi: Konya Örneği" isimli doktora tezinden (Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 2021) üretilmiştir.

² Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, İç Denetim Birimi Başkanı, ORCID ID: 0000-0003-2591-9040

³ Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, ORCID ID: 0000-0003-1082-0005

1.GİRİŞ

1990'lı yıllarda RTK (Real Time Kinematic: Gerçek Zamanlı Kinematik) tekniğinin ortaya çıkması ve bu uygulamalardan elde edilen deneyimler sonrasında gerçek zamanlı GNSS (Global Navigation Satellite System: Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ağları ortaya çıkmıştır. Sabit ve sürekli ölçü yaptığı için Sürekli Çalışan Referans İstasyonları ismi verilmiştir. CORS (Continuously Operating Reference Stations: Sürekli Çalışan Referans İstasyonları) ağları, yüksek doğruluklu, çok amaçlı başta haritacılık olmak üzere askerî ve sivil birçok alanda (jeodezik, jeofizik ve mühendislik ölçmeleri, navigasyon uygulamaları, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) uygulamaları, meteorolojik çalışmalar vb.), uluslararası sistemler ve standartlara (IERS, IGS, ITRF vb.) uyumlu bir ağ olarak hizmet vermektedirler. Günümüzde CORS uygulamaları santimetre (cm) doğruluğunda anlık GNSS ölçümleri için, zaman, maliyet ve süreklilik faktörleri açısından kullanıcıların Ağ Bazlı RTK ölçü yöntemini genellikle diğer yöntemlere göre tercih ettiklerinden dolayı, temel bir ihtiyaç haline gelmiştir (Öğütçü, 2014; Gündüz, 2013).

Ağ Bazlı RTK ağlarının günümüzde en fazla uygulanan şekli sabit GNSS (CORS) ağlarıdır. En kapsamlı tanımıyla CORS ağları; ara mesafeleri yaklaşık 70 ila 100 km'li 7 gün 24 saat uydu gözlemlerini toplayan ve ülke çapında tesis edilmiş sabit istasyonlardan oluşan, cm doğruluğunda konum belirlenmesine olanak tanıyan, aynı zamanda ölçme sonrası büro hesaplamalarına imkân veren ve arşiv sistemine sahip ağlardır. CORS ağları; her kullanıcı için bir referans istasyonu kurmaya gerek olmadığından maliyet ve iş gücü azaltımı sağlaması, hesaplanan gezici konumlarının doğruluğunun homojen, tutarlı ve referans istasyonları ile gezici arasındaki daha büyük mesafelerde korunması, birden çok kullanıcıyı aynı anda desteklemesi ve bir referans istasyonunda arıza olması halinde, referans istasyonlarının geri kalanından düzeltme verileri elde edilebilmesi gibi nedenlerden dolayı Ülkemizde ve Dünyada birçok ülkede tesis edilmiştir (Jin, 2012; Kahveci, 2009).

CORS ağlarının kurulmasındaki temel amaç uzaklığa bağlı olarak farklılık gösteren hataların (iyonosfer, troposfer, yörünge vb.) giderilmesi ve böylece doğruluğu yüksek koordinatların gerçek zamanlı olarak elde edilmesidir. Gerçek zamanlı ve kontrollü hesaplamaların yapılabilmesi için ağdaki tüm istasyonlar birbirleriyle güvenilir bir iletişim vasıtasıyla bağlanmaktadır. Bir referans istasyonu en az bir alıcı, bir anten, iletişim vasıtası ve güç kaynağından oluşmaktadır. Sistemin son ucunda ise ağa herhangi bir iletişim vasıtasıyla (örneğin cep telefonu, internet

vb.) bu istasyonlara bağlanabilen kullanıcılar bulunmaktadır (Kahveci, 2017; Öğütçü, 2014).

Ağ içerisinde CORS istasyonlarından hesaplanan düzeltme verilerinin gezici GNSS alıcısının konumuna göre hesaplanması için çeşitli enterpolasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden bazıları lineer enterpolasyon, kovaryans fonksiyonları, en küçük karelerle kolokasyon, en küçük karelerle enterpolasyon ve mesafe ağırlıklı enterpolasyondur. Bu tekniklerin amacı gezici GNSS alıcısı ağda hangi konumda bulunursa bulunsun doğruluğunun bu konumdan etkilenmemesini sağlamaktadır. Ağ Bazlı RTK teknikleri olarak 3 adet ana yöntem belirlenmiştir. Bunlar VRS (Virtual Reference Station: Sanal Referans İstasyonu Tekniği), FKP (Flächen Korrektur Parameter: Alan Düzeltme Parametreleri Tekniği) ve MAC (Master Auxiliary Concept: Ana Yardımcı Referans İstasyon Tekniği) olarak adlandırılmıştır (Yılmaz, 2020; İnal vd., 2018; Öğütçü, 2017; Jin, 2015; Lin, 2006; Wübbena vd., 2001; Euler vd., 2001; Vollath vd., 2000).

2. AĞ BAZLI RTK TEKNİKLERİNİN GENEL MATEMATİKSEL EŞİTLİKLERİ

Ağ Bazlı RTK diferansiyel düzeltmelerinin; (A) referans istasyonu ve (j) uydusu için (t) zamanındaki kod (PRC) ve faz gözlemlerinin (CPC) genel matematiksel eşitlikleri sırasıyla şu şekilde yazılabilir (Jin, 2015; Jin, 2012);

$$PRC^j(t) = \rho_A^j(t) - R_A^j(t) - c\delta^j(t) - c\delta_A(t) - I_A^j(t) + T_A^j(t) + E_A^j(t) \quad (1)$$

$$CPC^j(t) = \rho_A^j(t) - \lambda\varphi_A^j(t) - \lambda N_A^j - c\delta^j(t) - c\delta_A(t) + I_A^j(t) + T_A^j(t) + E_A^j(t) \quad (2)$$

$$\rho_A^j(t) = \sqrt{(X_A - X^j)^2 + (Y_A - Y^j)^2 + (Z_A - Z^j)^2} \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

$\rho_A^j(t)$: (A) referans istasyonu ile (j) uydusu arasındaki (t) zamanında bilinen koordinatları ile hesaplanan geometrik mesafeyi,

λ : sinyalin dalga boyunu,

c : ışığın boşluktaki hızını,

$\varphi_A^j(t)$: taşıyıcı faz gözlemlerini,

N_A^j : faz başlangıç belirsizliğini,

$\delta^j(t)$: uydu saat hatasını,

$\delta_A(t)$: alıcı saat hatasını,

$I_A^j(t)$: iyonosferik hatayı,

$T_A^j(t)$: troposferik hatayı ve

$E_A^j(t)$: yörünge hatasını, ifade etmektedir.

Ağdaki, farklı düzeltmeleri aynı belirsizlik ve zaman seviyesine getirmek için, merkezi işlemci birimindeki yazılımın her şeyden önce her istasyondaki belirsizlikleri ve hataları hesaplaması gerekir. Merkezi işlemci birimindeki yazılımın temel işlevi, gezici GNSS alıcısının konumunu hesaplamak için bir hesaplama modeli oluşturmak üzere troposferik ve iyonosferik gecikmeleri tahmin etmede hataların ayırımını yapmaktır. Saat hatasının ve faz belirsizliğinin bilinen değerleri verildiğinde, önceki denklemler yardımıyla kod ve taşıyıcı faz için düzeltmeler (tekli farklar), sırasıyla (B) gezici GNSS alıcısı için aşağıdaki gibi türetilebilir (Jin,2015; Jin, 2012);

$$R_B^j(t)_{düz.} = R_B^j(t) + PRC(t) = \rho_B^j(t) - c\delta_{AB}(t) - \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{AB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t) \quad (4)$$

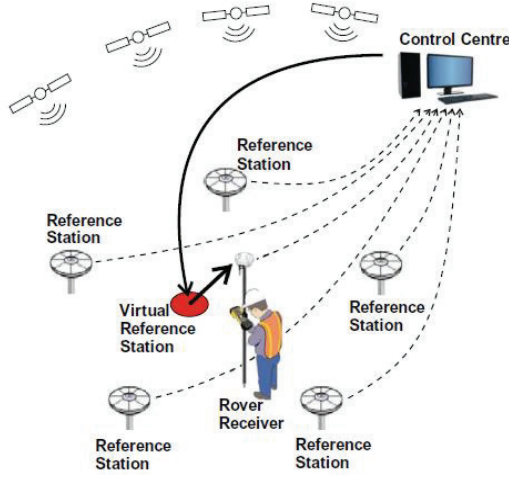
$$\lambda\varphi_B^j(t)_{düz.} = \rho_B^j(t) + CPC(t) = \rho_B^j(t) - c\delta_{AB}(t) - \lambda N_{AB}^j + \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{AB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t) \quad (5)$$

Ağda bulunan referans istasyonları arasındaki bazlarda ikili farklar sonucu belirlenen faz başlangıç belirsizliği çözümü için ise geniş aralık, dar aralık faz başlangıç belirsizliği kombinasyonu uygulanabilir (Öğütçü, 2017; Teunissen ve Montenbruck, 2017).

3. VRS TEKNİĞİ

Trimble firması tarafından ticari amaçlar için geliştirilen ve ilk olarak Vollath vd. (2000) tarafından önerilen, ilk Ağ Bazlı RTK tekniklerindedir. VRS tekniği, gezici GNSS alıcı cihazlarındaki mevcut yazılımlarla uyumlu olması ve yazılımlarda değişiklik gerektirmemesi nedeniyle kullanılan en yaygın yöntemdir ve buda yöntemin en büyük avantajıdır. Bununla birlikte, yöntemin temel bir dezavantajı, VRS gözlemlerinin her bir kullanıcı için özelleştirilmesi nedeniyle, merkezi işlemci biriminin kapasitesine göre kullanıcı sayısı üzerinde bir kısıtlamanın varlığıdır. VRS tekniğinin temel prensibi, gerçek fiziksel bir referans istasyonu yerine sanal gözlem verileri kullanan sanal bir referans istasyonu kullanmasıdır (Şekil 1). VRS tekniğinde, klasik RTK yöntemi (tek referans istasyonlu) kullanılarak sağlanan doğruluğun, tesis edilmeyen ve gözle görülmeyen bir sanal nokta oluşturularak sağlanmaktadır. Gezici GNSS alıcısı için geçerli düzeltme verileri, çalışma sahasındaki birden çok referans istasyonu verisinden enterpolasyon ile hesaplanmaktadır. Böylece gezici GNSS alıcısının ölçümlerindeki bazı sistematik hatalar (iyonosferik, troposferik, yörünge

vb.) en aza indirilmiş olmaktadır. VRS tekniğinin uygulanabilmesi için gezici GNSS alıcısı CORS ağı içerisinde en az 3 adet referans istasyonundan (CORS-TR (Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı) sistemi için en az 5 adet gerekli) veri alması gerekir ve gezici GNSS alıcısı iki yönlü iletişimi desteklemek zorundadır (Yılmaz, 2020; Öğütçü, 2017; Kahveci, 2017; Jin, 2012; Janssen, 2009; Hu vd., 2003; Landau vd., 2002; Vollath vd., 2000).



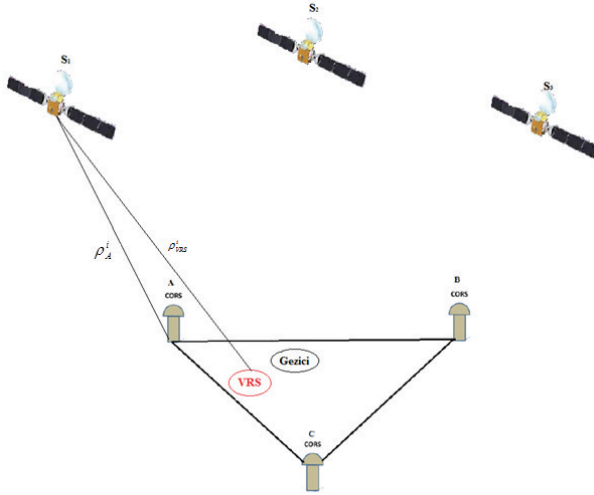
Şekil 1. VRS tekniği (İnal vd., 2018)

VRS tekniğinin çalışma yöntemi kısaca şu şekildedir. Referans istasyonlarındaki gözlem verileri, merkezi işlemci birimine gönderilir. Gezici GNSS alıcısı kendi konumunu belirlemek için kullandığı navigasyon koordinatlarını (kod ölçümü sonucu, metre doğruluğunda) merkezi işlemci birimine NMEA (National Marine Electronics Association) formatında GSM (Global System for Mobile Communications) veya GPRS (General Packet Radio Service) aracılığı ile gönderir. Merkezi işlemci birimi bu navigasyon koordinatları ile gezici GNSS alıcısının en yakın hangi referans istasyonları (3 adet) arasında kaldığını belirler ve sanal bir referans istasyonu oluşturur. Gezici GNSS alıcısının en yakınında bulunan referans istasyonu ana referans istasyonu olarak belirlenir. Referans istasyonları arasındaki bazlarda taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizleri çözülerek troposfer, iyonosfer ve yörünge hataları cm doğruluğunda belirlenir. Ana referans istasyonundaki pseudorange ve taşıyıcı dalga fazı gözlem verileri geometrik olarak sanal referans istasyon noktasına ötelenir ve ağdaki düzeltmeler (iyonosferik, troposferik ve yörünge) bu sanal istasyon noktasına göre enterpole edilerek ölçümlere ilave edilir. Oluşturulan sanal referans noktasındaki veriler kullanıcıya RTCM (Radio Technical Commission for Maritime

Services) protokolü aracılığıyla merkezi işlemci birimi tarafından gönderilir. Gezici GNSS alıcısı gelen düzeltme verilerini fiziksel bir referans istasyon noktasından geliyormuş gibi klasik RTK çözümlenmesinde kullandığı algoritmaları kullanarak bulunduğu noktanın konumunu hesaplar (Öğütçü, 2017; Jin, 2015; Öğütçü, 2014).

VRS tekniği için CORS-TR sisteminin Trimble Pivot Platform yazılımında enterpolasyon, ağırlıklandırılmış doğrusal yaklaşımla en küçük karelerle kolokasyon tekniği ile yapılmaktadır. Ayrıca GNSS düzeltme verileri fiziksel bir referans istasyonu yerine sanal bir referans istasyonuna göre modellendiği için bu verinin takip edilip analizi veya tekrarlanması da mümkün değildir. VRS tekniğinin performansını etkileyen önemli kriterlerden biri de ana referans istasyonu ve gezici GNSS alıcısı arasındaki baz uzunluğudur. Aynı zamanda ana referans istasyonu ile gezici GNSS alıcısı arasındaki baz uzunluğunu düşürerek korelasyonlu hataları gidermesi VRS tekniğinin temel amaçlarından biridir. VRS istasyonu ile gezici GNSS alıcısı arasındaki baza ait iyonosferik etki ile ana referans istasyonu ve gezici GNSS alıcısı arasındaki baza ait iyonosferik etki birbirinden farklı olduğu durumda VRS istasyonundaki iyonosferik etki tam olarak giderilemez. Bunun nedeni gezici GNSS alıcısı ile VRS istasyonu arasındaki baz mesafesinin VRS istasyonu ile referans istasyonu arasındaki baz mesafesine göre çok kısa olmasıdır (Öğütçü, 2017; Öğütçü, 2014; Euler vd., 2001).

3.1. VRS Tekniğinin Matematiksel Modeli



Şekil 2. VRS tekniğinde geometrik yer değiştirme (Öğütçü, 2017; Wei vd., 2006)

Şekil 2’de gezici GNSS alıcısına en yakın CORS istasyonunun A istasyonu olduğu varsayılmaktadır. A istasyonunun koordinatları kesin olarak bilinir, uyduların koordinatları ise efemeris (ultra, rapid, predicted veya efemeris ürünleri) bilgilerinden elde edilir. Böylece her bir uydu ile gezici GNSS alıcısı arasındaki geometrik mesafe de kesin olarak belirlenebilir. A istasyon noktasının her bir gözlenebilen uyduya olan mesafesi ρ_A^i ; uyduların ($\overline{x_S}$) ve A istasyon noktasının ($\overline{x_A}$) yer merkezli vektör bileşenleri kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir (Öğütçü, 2017; Jin, 2012; Wei vd., 2006);

$$\rho_A^i = \overline{x_S} - \overline{x_A} \quad (6)$$

Gezici GNSS alıcısının navigasyon (kod ölçümü) koordinatlarıyla üretilen VRS istasyonunun her bir gözlenebilen uyduya olan mesafesi VRS istasyonunun ve uyduların yer merkezli vektör bileşenleri kullanılarak şu şekilde yazılabilir;

$$\rho_{VRS}^i = \overline{x_S} - \overline{x_{VRS}} \quad (7)$$

Her bir uydu ile ana referans istasyonu ve uydu ile VRS istasyonu mesafeleri için geometrik yer değiştirme ise şu şekilde yazılabilir;

$$\Delta\rho_{A,VRS}^i = \rho_A^i - \rho_{VRS}^i \quad (8)$$

Böylece en yakın referans istasyonundaki geometrik mesafe ile VRS istasyonundaki geometrik mesafe arasındaki fark yardımıyla ötelenen pseudorange hesaplanmış olur. Bu sanal pseudorange yardımıyla uydu konumları VRS istasyonu için Kepler elemanları yardımıyla iterasyonlu bir algoritma kullanılarak bulunabilir. Güncellenen uydu pozisyon bilgileri ve gözlem verileri yardımıyla düzeltilmiş geometrik farklar VRS istasyonu için tekrar hesaplanır (Öğütçü, 2017).

Uydular arası tekli farklar (m, n uyduları için) ana referans istasyonu ve VRS istasyonu için aşağıdaki şekilde oluşturulur;

$$\Delta\varphi_A^{m,n} = \frac{1}{\lambda} * (\rho_A^{m,n} - \Delta I_A^{m,n} + \Delta T_A^{m,n}) - \Delta N_A^{m,n} \quad (9)$$

$$\Delta\varphi_{VRS}^{m,n} = \frac{1}{\lambda} * (\rho_{VRS}^{m,n} - \Delta I_{VRS}^{m,n} + \Delta T_{VRS}^{m,n}) - \Delta N_{VRS}^{m,n} \quad (10)$$

Uydular arası ikili farklar ise (m, n uyduları için) ana referans istasyonu ve VRS istasyonu için aşağıdaki şekilde oluşturulur;

$$\nabla\Delta\varphi_{A,VRS}^{m,n} = (\Delta\varphi_{VRS}^{m,n} - \Delta\varphi_A^{m,n}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \varphi_{A,VRS}^{m,n=1} \lambda \\ & * (\nabla\Delta\rho_{A,VRS}^{m,n} - \nabla\Delta I_{A,VRS}^{m,n} + \nabla\Delta T_{A,VRS}^{m,n}) - \nabla\Delta N_{A,VRS}^{m,n} \end{aligned} \quad (12)$$

Eşitlik 12’de $\nabla\Delta\rho_{A,VRS}^{m,n}$ ikili farklar sonucu ana referans istasyonu ve VRS istasyonu arasındaki geometrik ilişki yani geometrik yer değiştirmedir ve şu şekilde belirlenebilir;

$$\nabla\Delta\rho_{A,VRS}^{m,n} = (\rho_{VRS}^n - \rho_A^n) - (\rho_{VRS}^m - \rho_A^m) \quad (13)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

Δ : tekli farkları,

$\nabla\Delta$: ikili farkları,

$\Delta\varphi_A^{m,n}$: ana referans istasyonunda oluşturulan faz ölçümlerinin tekli farklarını,

$\Delta\varphi_{VRS}^{m,n}$: VRS istasyonunda oluşturulan faz ölçümlerinin tekli farklarını,

$\nabla\Delta\varphi_{A,VRS}^{m,n}$: ana referans istasyonu ve VRS istasyonu arasındaki faz ölçümleri ikili farkları,

$\nabla\Delta\rho_{A,VRS}^{m,n}$: ikili farklar sonucu ana referans istasyonu ve VRS istasyonu arasındaki uydu ve istasyonlar arasındaki geometrik mesafeyi,

$\nabla\Delta I_{A,VRS}^{m,n}$: ikili farklar sonucu iyonosferik gecikmeyi,

$\nabla\Delta T_{A,VRS}^{m,n}$: ikili farklar sonucu troposferik gecikmeyi ve

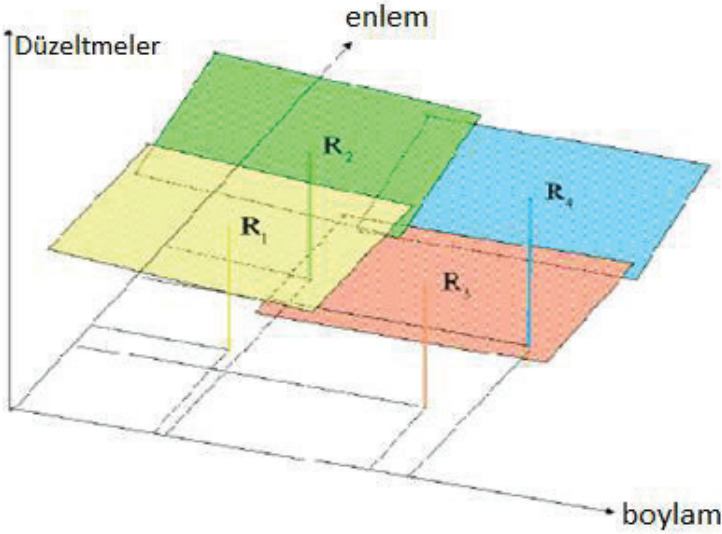
$\nabla\Delta N_{A,VRS}^{m,n}$: ikili farklar sonucu faz başlangıç belirsizliğini, ifade etmektedir (Öğütçü, 2017; Wei vd., 2006; Vollath vd., 2000).

Eşitlik 11’de tekli farklar faz gözlemleri ($\Delta\varphi_{VRS}^{m,n}$) bilinmeyendir. Fakat ikili farklar sonucu faz başlangıç belirsizliği ($\nabla\Delta N_{A,VRS}^{m,n}$) çözüldüğünde, tekli farklar faz gözlemleri ($\Delta\varphi_{VRS}^{m,n}$) de hesaplanabilir. İkili farklar sonucu iyonosferik gecikme ($\nabla\Delta I_{A,VRS}^{m,n}$) ve ikili farklar sonucu troposferik gecikme ($\nabla\Delta T_{A,VRS}^{m,n}$) enterpolasyon algoritmaları yardımıyla gezici GNSS alıcısı için hesaplanır (Yılmaz, 2020; Öğütçü, 2017; Wei vd., 2006; Hu vd., 2003).

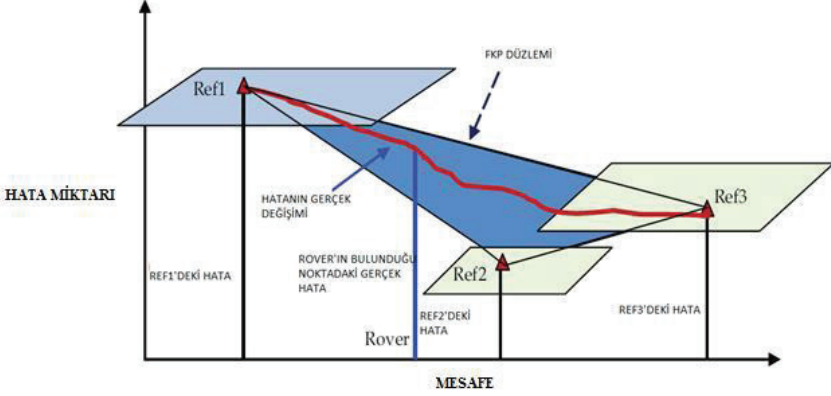
4. FKP TEKNİĞİ

SAPOS grubu (Almanya) tarafından 1990’lı yılların ortalarında geliştirilen ilk Ağ Bazlı RTK yöntemlerinden biri olan FKP tekniğinin temel prensibi, referans istasyonlarından hesaplanan alan düzeltme

parametre bilgilerinin gezici GNSS alıcılara aktarılmasıdır. FKP, düzlem düzeltme parametreleri ismi de buradan gelmektedir. Ağdaki (referans istasyonunda) bilgiler troposferik, iyonosferik ve yörünge hatalarını modelleyebilmek amacıyla lineer parametrelerle hesaplanarak bir polinomal yüzey aracılığıyla kullanıcı için entepole edilir. Bu tekniğin temelinde doğrusal entepolasyon vardır. Referans istasyonları ile gezici GNSS alıcısı arasındaki mesafe entepolasyon işleminde ağırlıklandırma için kullanılır. Modellenen alana göre gezici GNSS alıcısı için, kuzey-güney ve doğu-batı şeklinde düzlemsel düzeltme parametreleri oluşturulur (Şekil 3). Frekansa bağımlı ve frekanstan bağımsız oluşturulan düzeltme parametreleri her bir referans istasyonu için kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularındaki hataların doğrusal korelasyonunu ifade eder (Yüksel, 2015; Öğütçü, 2014; Wübbena ve Bagge, 2006; Higuchi vd., 2004).



Şekil 3. 4 adet referans istasyonunun oluşturduğu FKP düzlemleri (Öğütçü, 2014; Wübbena vd., 2001)



Şekil 4. FKP düzlemi (Öğütücü, 2017)

Şekil 4'de hataların değişimini gösteren üç adet referans istasyonundan oluşan FKP düzlemi görülmektedir. FKP düzleminin oluşturulabilmesi için gezici GNSS alıcısının en az 3 adet referans istasyonunun içinde kalması gerekmektedir. Bu teknikte referans istasyonlarının merkezinde her uyduya ait frekansa bağımlı ve frekanstan bağımsız hatalar için iki adet uzay gözlem düzlemi oluşturulur. Bunlar, her bir referans istasyonunda mesafeye bağlı hatalar için geometrik (troposferik ve yörünge) ve iyonosferik hatalar için olmak üzere iki farklı düzlemdir. Düzeltme verileri ise genellikle gezici GNSS alıcısına en yakın referans istasyonundan yayımlanır (Öğütücü, 2017; Öğütücü, 2014).

FKP tekniğinde, merkezi işlemci birimi ve gezici GNSS alıcısı hesaplama işlemlerinde görev almaktadır. Merkezi işlemci biriminde, referans istasyonlarının bulunduğu noktalarda ağ bazlı yüzey katsayıları hesaplanmaktadır. Gezici GNSS alıcısındaki yazılım ise hesaplanan katsayıları ve ana referans istasyonundaki ham verileri kullanarak hataları kendi konumuna göre enterpole eder. Gezici GNSS alıcısına yayımlanan düzeltme katsayıları, anlık olarak merkezi işlemci birimi tarafından troposferik, iyonosferik ve yörünge hatalarının değişim durumuna göre güncellenmektedir. FKP tekniği tek yönlü iletişim ile de kullanılabilir. Ancak tek yönlü iletişim kullanıldığı zaman gezici GNSS alıcısı tarafından ham düzeltmelerin yayınlanacağı ana referans istasyonu seçilmek zorundadır. Çünkü gezici GNSS alıcısı yaklaşık konumunu merkezi işlemci birimine tek yönlü iletişim olduğu için göndermemektedir. Dolayısıyla gezici GNSS alıcısının hangi referans istasyonuna (ana referans istasyonu olarak belirlemek amacıyla) en yakın olduğu bilinmemektedir. CORS-TR sisteminde FKP tekniği için çift yönlü iletişim kullanılmaktadır. GSM veya GPRS yayınının olmadığı

yerlerde radyo aracılığı ile düzeltme katsayıları ve ham veriler gezici GNSS alıcısına gönderilebilir. Gezici GNSS alıcısının çalışma alanının büyük olduğu durumlarda, gezici GNSS alıcısına en yakın olan referans istasyonu değişim gösterebilir dolayısıyla gezicinin hangi referans istasyonunu ana referans istasyonu olarak kullanacağına merkezi işlemci birimindeki yazılım aracılığı ile karar verilir. FKP tekniği ana referans istasyonun bulunduğu konumdan maksimum 100 km'lik yarıçaptaki bir alanda geçerlidir. Bu alanın dışına çıkıldığı zaman FKP parametreleri gezici GNSS alıcısının bulunduğu konuma göre sağlıklı bir şekilde hesaplanamayabilir. Bunun nedeni bu mesafeden sonra hataların doğrusal olmayan bir değişim göstermesinden kaynaklanır. Belirli bir zamanda bir referans istasyonunda hesaplanan FKP düzeltme parametreleri o alandaki bütün gezici GNSS alıcıları için aynı değerde yayımlanır. Ana referans istasyonundaki istasyon koordinatları, ham veriler ve düzeltme parametreleri gezici GNSS alıcılarına gönderilir. Gezici GNSS alıcıları, kendi yazılımları ile FKP düzeltmesini referans olarak gönderilen veriler ile kendi konumuna göre uzaklığa bağlı hataları enterpole ederek ve ana referans istasyonundaki ham verilere düzeltmeler getirerek konum çözümlemesini yapar. Burada gezici GNSS alıcısının konumunun navigasyon çözümlemesi ile bulunması enterpolasyon için yeterlidir. Bu yöntemde iki farklı uygulama yapılabilmektedir. Birincisi proje alanında en yakın sabit istasyona ait FKP düzeltmeleri yayımlanır. Bu durumda tek yönlü iletişim kullanılır. İkincisi ise gezici GNSS alıcısının durduğu her nokta için FKP düzeltmeleri hesaplanıp yayımlanır. Bu durumda iki yönlü iletişim kullanılır. FKP tekniğinde eş zamanlı kullanıcı sayısında kısıtlama yoktur (Kahveci, 2017; Öğütçü, 2017; Öğütçü, 2014; Jin, 2012).

4.1. FKP Tekniğinin Matematiksel Modeli

FKP tekniğinde konuma bağlı hataların gösterimi için bir doğrusal düzlem polinomu kullanılır. Bu düzlem, referans istasyonunun yüksekliğinde WGS-84 elipsoidine paralel olarak tanımlanan bir yüzeyi ifade eder. Bir gezici GNSS alıcısının faz gözlemleri için bu yüzeye atıfta bulunan koordinatlar (φ, λ) , mesafeye bağlı hataları (FKP düzlem parametreleri) aşağıdaki şekilde türetmek için kullanılır (Öğütçü, 2017; Öğütçü, 2014; Jin, 2012; Wübbena ve Bagge, 2006):

$$r_0 = 6.37 * (N_0 * \varphi - \varphi_R + E_0 * \lambda - \lambda_R * \cos \varphi_R) \quad (14)$$

$$r_1 = 6.37 * H * (N_1 * \varphi - \varphi_R + E_1 * \lambda - \lambda_R * \cos \varphi_R) \quad (15)$$

$$H = 1 + 16 * (0.53 - E/\pi)^3 \quad (16)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

N_0 : FKP düzleminde kuzey-güney doğrultusundaki geometrik sinyal değişimi (iyonosferden bağımsız, ppm),

E_0 : FKP düzleminde doğu-batı doğrultusundaki geometrik sinyal değişimi (iyonosferden bağımsız, ppm),

N_1 : FKP düzleminde kuzey-güney doğrultusundaki iyonosferik sinyal değişimi (kısa aralık kombinasyonu, ppm),

E_1 : FKP düzleminde doğu-batı doğrultusundaki iyonosferik sinyal değişimi (kısa aralık kombinasyonu, ppm),

$\varphi R, \lambda R$: WGS84 datumunda referans istasyonunun coğrafi koordinatları (radyan),

E : uydu yükseklik açısı (radyan),

δr_0 : geometrik sinyal kombinasyonunun uzaklığa bağlı hatası (iyonosferden bağımsız, m),

δr_1 : iyonosferik sinyal kombinasyonunun uzaklığa bağlı hatası (kısa aralık kombinasyonu, m)'dir.

L1 ve L2 frekansları için mesafeye bağlı hatalar (toplam düzeltmeler) şu şekilde hesaplanabilir:

$$\delta r_{L1} = \delta r_0 + \left(\frac{f_2}{f_1}\right) * \delta r_1 \quad (17)$$

$$\delta r_{L2} = \delta r_0 + \left(\frac{f_1}{f_2}\right) * \delta r_1 \quad (18)$$

Burada;

δr_{L1} : L1 frekansı için mesafeye bağlı hata (m),

δr_{L2} : L2 frekansı için mesafeye bağlı hata (m),

$f1$: L1 sinyalinin frekans değerini (154) ve

$f2$: L2 sinyalinin frekans değerini (120), ifade etmektedir.

Gezici GNSS alıcısı için düzeltilmiş taşıyıcı dalga faz gözlemleri aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\varphi 1_{düz.} = \varphi 1_{ham} - \delta r_{L1} \quad (19)$$

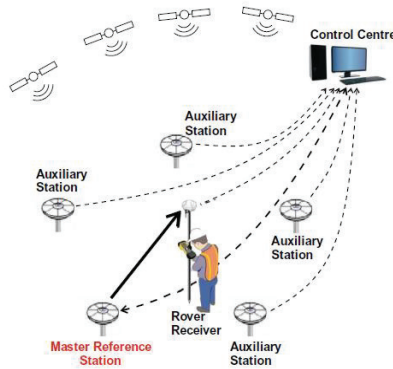
$$\varphi 2_{düz.} = \varphi 2_{ham} - \delta r_{L2} \quad (20)$$

Bu işlemlerden sonra gezici GNSS alıcısı ile ana referans istasyonu arasındaki faz başlangıç belirsizliği, klasik RTK algoritması uygulanarak ikili farklar sonucu tamsayı olarak çözülür. Hesaplanan parametreler RTCM veri formatı 59 mesajı ile kullanıcılara iletilir (Yılmaz, 2020; Öğütçü, 2017; Jin, 2015; Öğütçü, 2014; Wübbena ve Bagge, 2006).

5. MAC TEKNİĞİ

MAC tekniğinin temel prensibi, CORS ağına ve gözlemlere ilişkin hata bilgilerinin bir bütün olarak gezici GNSS alıcılara gönderilmesidir. Ağa ilişkin gezici GNSS alıcısına ne kadar çok bilgi gelirse gezici GNSS alıcısının kendi konumunu doğru olarak belirleme olasılığı o kadar artmaktadır. MAC yönteminde, bir ana referans istasyonu (master) ve onun “RTCM V3.1 Mesaj 1004” formatında tüm ham ölçü verileri ile diğer yardımcı (auxiliary, minimum 5 yardımcı referans istasyonu) referans istasyonlarının azaltılmış verileri birlikte kullanılmaktadır. MAC tekniğinde referans istasyonları ile uydular arasındaki faz uzaklıkları ortak bir belirsizlik seviyesine indirgenmektedir. Böylece ağın modellenmesinde faz bilinmeyenlerinin çözümü minimum seviyeye düşürülerek geriye kalan iyonosfer, troposfer ve uydu yörünge hataları yüksek doğruluklarla modellendirilmektedir (Öğütçü, 2017; Kahveci, 2017; Yüksel, 2015; Jin, 2015; Brown vd., 2006).

Ağ Bazlı RTK uygulamalarında karşılaşılan sorunlardan en önemlisi ortak bir formatın uygulamada kullanılamamasıdır. VRS ve FKP tekniklerinin düzeltme verileri modellendiği için RTCM standartlarında ortak bir formatta değildir ve üretici firmaya aittir. Euler ve diğerleri (2001) tarafından, bu sorunları ortadan kaldırabilmek için düzeltme verilerinin aktarılması ve kullanılması bakımından diğer Ağ Bazlı RTK tekniklerine göre farklı bir yaklaşım olan MAC tekniği geliştirilmiştir. MAC tekniğinin amacı büyük hacimli ağ verilerinden olabildiğince yoğun bir şekilde yararlanmaktır. Bu tekniği, diğer tekniklerinden ayıran en önemli özellik, merkezi işlemci birimi yazılımının gezici GNSS alıcısı için hata hesaplamaları, gezici GNSS alıcılara yüklü bir yazılım aracılığı ile yapılmasıdır (Şekil 5) (Öğütçü, 2017; Euler vd., 2001).



Şekil 5. MAC tekniği (İnal vd., 2018)

MAC tekniğinin çalışma yöntemi kısaca şu şekildedir. Referans istasyonlarından toplanan ham gözlem verileri (kod ve faz gözlemleri) merkezi işlemci birimine 1sn aralıklarla gönderilir. Gelen veriler merkezi işlemci birimi tarafından işlenerek referans istasyonları arasındaki faz başlangıç belirsizliği ortak bir seviyeye indirgenir. Faz uzaklıkları (uydu – gezici GNSS alıcı çiftleri için) ortak bir belirsizlik seviyesine indirgenir. Gezici GNSS alıcısının navigasyon ölçümü ile bulunduğu konum bilgileri NMEA formatında merkezi işlemci birimine gönderilir. Merkezi işlemci birimi tarafından gezici GNSS alıcısının konumuna en yakın referans istasyonu (en yakın referans istasyonunun kullanılamaması halinde en uygun referans istasyonu) ana referans istasyonu (master) olarak seçilir, gezici GNSS alıcısının yakınındaki, belirli sayıda referans istasyonları ise yardımcı referans istasyonları (auxiliary) olarak belirlenir. (CORS-TR sisteminde, yardımcı referans istasyon sayısı 6 olarak belirlenmiştir.) Böylece gezici GNSS alıcısının konumuna göre tüm ağın alt ağı belirlenmiş olur. Sonra ana referans istasyon noktasına ait koordinat bilgileri, ham gözlemler ve düzeltme verileri (geometrik ve iyonosferik) ve ana referans istasyon noktası ile yardımcı referans istasyon noktalarının koordinat farkları ve tekli farklar sonucu, her bir uydu ve gezici GNSS alıcı çifti için düzeltme farkları gezici GNSS alıcılara RTCM 3.1 mesaj formatında gönderilir. Gezici GNSS alıcısı yazılımına bağlı olarak gelen düzeltme verilerini konumuna göre enterpole edebilir (lineer enterpolasyon yöntemi, düşük dereceden yüzey modelleri veya en küçük karelerle kolokasyon modeli kullanılabilir) veya ağ bilgilerini kullanarak tekrar bir düzeltme verisi oluşturularak konumunu yüksek doğrulukta hesaplayabilir (Öğütçü, 2017; Kahveci, 2017; Brown vd., 2006).

MAC tekniğinde bazı durumlarda ana referans istasyonu, referans istasyonlarının geometrisi ve sayısı, ağın etkin çalışabilirliğine göre değişiklik gösterebilir ve her zaman gezici GNSS alıcılara en yakın istasyon, ana referans istasyonu olmayabilir. Önemli olan aynı uydulara gözlem yapılmış olmasıdır. Çünkü ana istasyon noktasının düzeltmelerin hesaplanmasında özel bir görevi olmayıp, temel olarak düzeltmelerin yayınlanmasında rolü vardır. Herhangi bir nedenle ana istasyondan veri alınamaması durumunda yardımcı referans istasyonlarından birisi bu görevi üstlenir. MAC yönteminde tüm hata kaynaklarına ilişkin düzeltmeler gezici GNSS alıcılara aktarılmaktadır. Bunun sonucunda sistem bütünlüğü sağlanmakta, uydulara bağlanma ve ölçüye başlama süresi azalmakta, faz belirsizliği çözümü daha doğru ve hızlı olmakta ve konum belirleme doğruluğu artmaktadır. Bu yöntemde düzeltme verileri tek yönlü iletişim yolu ile de (CORS-TR sisteminde çift yönlü iletişim kullanılır) gezici GNSS alıcılara gönderilebilir. Fakat bu durumda ana referans istasyonu ve ağın alt ağını oluşturan yardımcı referans

istasyonları önceden seçilmek zorundadır. Bu yöntem, ana referans istasyonundan 300 km'lik mesafelere kadar kullanılabilir (Kahveci, 2017; Öğütçü, 2017; Yüksel, 2015; Jin, 2015; Janssen, 2009; Euler vd., 2001).

5.1. MAC Tekniğinin Matematiksel Modeli

MAC yönteminde, taşıyıcı faz belirsizlikleri, sabit tekli fark belirsizlik değerlerine göre belirlenir. Ana referans istasyonu (A) ve yardımcı referans istasyonu (B) arasında (i) uydusu için tekli farklar aşağıdaki şekilde oluşturulur (Öğütçü, 2017; Yüksel, 2015; Jin, 2012; Euler, 2006; Lin, 2006);

$$\lambda * \Delta\varphi_{AB}^i = \Delta\rho_{AB}^i + c * \Delta\delta t_{AB} + \lambda * \Delta N_{AB}^i + \Delta T_{AB}^i - \Delta I_{AB}^i + \Delta Y_{AB}^i \quad (21)$$

Yukarıdaki eşitlikte;

$\Delta\varphi_{AB}^i$: ana referans istasyonu ile yardımcı referans istasyonu arasındaki faz ölçümlerinin tekli farklarını,

ρ_{AB}^i : iki istasyon arasındaki geometrik mesafe farkını,

δt_{AB} : uydu saat hatalarını,

N_{AB}^i : frekans bağımlı faz başlangıç belirsizliğini ve

$T_{AB}^i, I_{AB}^i, Y_{AB}^i$: sırasıyla troposferik, iyonosferik ve uydu yörünge hatalarını, ifade etmektedir.

Anten faz merkezi ofset değeri ve değişimi, merkezi işlemci birimindeki yazılım tarafından geometrik mesafeye ilave edilebilir. Bu durumda tekli farklar düzeltilmesi aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$V_{AB}^i = \rho_{AB}^i - \lambda * \varphi_{AB}^i + c * \delta t_{AB} + \lambda * N_{AB}^i - I_{AB}^i + T_{AB}^i + Y_{AB}^i \quad (22)$$

Troposferik ve iyonosferik etkiler için standart modeller kullanılabilir. Dolayısıyla eşitlik 3.24'de $I_{AB}^i + T_{AB}^i$ artık iyonosferik ve troposferik hataları göstermektedir. Tekli farklar sonucu oluşan toplam düzeltme miktarı (L1 ve L2 frekansları için) iyonosferik, troposferik ve uydu yörünge hatalarından oluşmaktadır. Referans istasyonlarının saat hataları, epok bazlı pseudorange gözlem verilerinin dengelenmesiyle bulunur. Ana referans istasyonu (A) ve yardımcı referans istasyonu (B) arasındaki (i) uydusu için ve (t) zamanında; iyonosferik, troposferik ve uydu yörünge düzeltme farkları her bir sinyal (L1 ve L2 frekansları) için aşağıdaki şekilde gösterilebilir (Öğütçü, 2017; Yüksel, 2015; Lin, 2006);

$$L1_{düz.farkları}_{AB}^i = \left(\frac{\Delta I_{AB}^i(t)}{f1^2} \right) - (\Delta T_{AB}^i(t) + \Delta Y_{AB}^i(t)) \quad (23)$$

$$L2_{düz.farkları}_{AB}^i = \left(\frac{\Delta I_{AB}^i(t)}{f2^2} \right) - (\Delta T_{AB}^i(t) + \Delta Y_{AB}^i(t)) \quad (24)$$

Tekli farklar kullanılarak belirlenen faz başlangıç belirsizliği, ikili farklar yaklaşımı ile daha güvenilir bir şekilde belirlenir. (i) uydusundaki faz başlangıç belirsizliği, başka bir (j) uydusunun kullanımı ile bunların ikili farkı aşağıdaki şekilde bulunabilir (Jin, 2012; Lin, 2006);

$$N_{AB}^i = N_{AB}^j + N_{AB}^{j,i} \quad (25)$$

Böylece, ikili farklar kullanılarak gerçek belirsizlik ile referans uydunun tahmini belirsizliği arasındaki fark olan ve genellikle belirsizlik seviyesi olarak bilinen belirsizlik hesaplanmış olur. Gezici GNSS alıcısında bulunan yazılım, MAC düzeltme verilerini aldıktan sonra da kendi konumunu hesaplamak için hangi enterpolasyon yöntemini kullanacağına karar verir ve konumunu hesaplar (Jin, 2012).

6. AĞ BAZLI RTK TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ağ Bazlı RTK tekniklerinin özellikleri ve matematiksel modelleri yukarıda açıklanmıştır. Tekniklerin birbirlerine göre farklı ve ortak yönleri ise Tablo 1’de gösterilmektedir. Teknikler arası farklar genellikle gezici GNSS alıcısı ve merkezi işlemci biriminde bulunan yazılımların farklılıkları ile ağ bazlı düzeltme verilerini hesaplama yöntemlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır.

Tablo 1. Ağ Bazlı RTK tekniklerinin karşılaştırılması (Öğütçü, 2017; Kahveci, 2017; Öğütçü, 2014; Brown vd., 2006; Euler vd., 2001)

TEKNİKLER & STANDARTLAR	VRS	FKP	MAC
Düzeltilme verilerinin hacmi	Düzeltilme verileri, sanal referans istasyonundan klasik RTK tekniğinde olduğu gibi ikili farklar uygulanarak gönderildiği için veri hacmi düşüktür.	Düzeltilme verilerinin hesaplanması doğrusal enterpolasyon ile yapıldığı için veri hacmi düşüktür.	Gezici GNSS alıcılarına gönderilen veri seti yoğun olduğu için veri hacmi yüksektir.
Düzeltilme verilerinin standardı	RTCM 3.0, 2.3, CMR+ Üretici firmaya (Trimble) özgüdür.	RTCM 2.3 Üretici firmaya (SAPOS) özgüdür.	RTCM V3.1 Uluslararası standart.
CORS-TR sisteminde yayımlanan düzeltme verilerinin standardı	RTCM 3.1 VRS, CMR+ 3.1 VRS	RTCM 2.3	RTCM 3.1 NET
Kullanılan matematiksel model	En küçük karelerle kolokasyon (Klasik RTK algoritması).	Doğrusal (lineer) enterpolasyon.	Alt ağ modellemesi (lineer enterpolasyon yöntemi, düşük dereceden yüzey modelleri veya en küçük karelerle kolokasyon modeli kullanılabilir).
İletişim alt yapısı	Çift yönlü iletişim zorunludur.	Çift yönlü iletişimin olmadığı durumlarda tek yönlü iletişim alt yapısında da kullanılabilir.	Çift yönlü iletişimin olmadığı durumlarda tek yönlü iletişim alt yapısında da kullanılabilir.
RTCM standardına uygunluğu	Modellenen veri içerdiği için RTCM standardına uygun değildir.	Modellenen veri içerdiği için RTCM standardına uygun değildir.	Gezici GNSS alıcısı fiziksel referans istasyonlarının ham verilerini direk kullanabildiği için RTCM standardına uygundur.
Merkezi işlemci birimindeki yazılımın görevi	Sanal referans istasyonunu oluşturarak gezici GNSS alıcısı için düzeltme verilerinin hesabını yapmak.	Düzeltilme parametrelerinin hesabını ve bunların gezici GNSS alıcılarına aktarılmasını yapmak.	Ana ve yardımcı referans istasyonlarının (alt ağın) belirlenmesi ve ham gözlemlerin gezici GNSS alıcılarına aktarılmasını yapmak.
Gezici GNSS alıcısındaki yazılımın görevi	Ana referans istasyonu ve sanal referans istasyonu arasında klasik RTK algoritmasını uygulamak.	Düzeltilme parametrelerini kendi konumuna eklemek ve düzeltme verilerinin enterpolasyonunu yapmak.	Ana ve yardımcı referans istasyonlarının ham verilerini ve tekli farklarını kullanarak konumuna göre düzeltme verilerini hesaplamak.
Eş zamanlı kullanıcı kısıtlaması	Her bir kullanıcının konumuna bağlı olarak düzeltmelerin hesabı merkezi işlemci birimi tarafından yapıldığı için belirli bir sayının üstünde eş zamanlı kullanıcı, sistemin kilitlenmesine neden olur. Bu nedenle eş zamanlı kullanıcı kısıtlaması vardır.	Belli bir bölge için hesaplanan düzeltme parametreleri o bölgede bulunan tüm gezici GNSS alıcıları için geçerli olduğundan eş zamanlı kullanıcı kısıtlaması yoktur.	Düzeltilme verilerinin modellenmesi gezici GNSS alıcısındaki yazılım tarafından yapıldığı için merkezi işlemci birimindeki iş yükü azaldığından eş zamanlı kullanıcı kısıtlaması yoktur.
Gerekli olan minimum referans istasyon sayısı	3 referans istasyonu (CORS-TR'de 5).	3 referans istasyonu (CORS-TR'de 5).	1 ana 5 yardımcı referans istasyonu (CORS-TR'de 1 ana 6 yardımcı).
Ağa bağlanma süresi	Kısadır.	Uzundur.	Kısadır.

7. SONUÇ

CORS sistemlerinin Dünya’da yaygınlaşması ile birlikte Ağ Bazlı RTK tekniklerinin kullanımı önem kazanmıştır. Teknikler ve matematiksel modellerinin benzer ve farklı yönleri yukarıda açıklanmıştır. Kullanıcılar, kullanım amaç ve gereksinimlerine göre klasik haritacılık çalışmaları, CBS ve navigasyon uygulamaları gibi veya bilimsel ve akademik çalışmalar gibi hangi amaçla kullanacaksa bu tekniklerden birine karar verebilir.

KAYNAKLAR

- Brown, N., Geisler, I. ve Troyer, L. (2006). RTK Rover Performance using the Master-Auxiliary Concept, *Journal of Global Positioning Systems*, Vol: 5, No: 1-2, Springer Open, 135-144.
- Euler, H. J., Keenan, C. R., Zebhauser, B. E. ve Wübbena, G. (2001). Study of a Simplified Approach in Utilizing Information From Permanent Reference Station Arrays, ION GPS 2001, Salt Lake City, USA.
- Euler, H. J. (2006). Real-time RTK messages for permanent reference station applications standardized by RTCM, Symposium of the IAG, 9 – 10 October 2006, Munich, Germany.
- Gündüz, A. M. (2013). Klasik RTK ve Ağ-RTK Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Higuchi, H., Saito, M., Iwahashi, T. ve Usui, S. (2004). Network based high accuracy realtime GPS positioning for GCP correction of high resolution satellite imagery, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 20-24 Sept. 2004, Anchorage, AK, USA.
- Hu, G., R., Khoo, H., S., Goh, P., C. ve Law, C., L. (2003). Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning, *Journal of Geodesy*, Vol: 77, Springer Link, İsviçre, 292–302.
- İnal, C., Bülbül, S. ve Bilgen, B. (2018). Statistical analysis of accuracy and precision of GNSS receivers used in network RTK, *Arabian Journal of Geosciences*, Vol: 11, No: 227, Springer Link, İsviçre.
- Janssen, V. (2009). A comparison of the VRS and MAC principles for network, International Global Navigation Satellite Systems Society IGSS Symposium 2009, 1 – 3 December 2009, Qld, Australia.
- Jin, S. (2012). Global Navigation Satellite Systems Signal, Theory and Applications, 1. Basım, InTech Yayınları, Hırvatistan.
- Jin, S. (2015). Satellite Positioning Methods, Models and Applications, Published by AVE4EVA.
- Kahveci, M. (2009). Gerçek Zamanlı Ulusal Sabit GNSS (CORS) Ağları ve Düşündürdükleri, HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 2009/1, Sayı 100.
- Kahveci, M. (2017). Kinematik GNSS ve RTK CORS Ağları, 2. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., No:1813, Ankara.
- Landau, H., Vollath, U. ve Chen, X. (2002). Virtual Reference Station Systems, *Journal of Global Positioning Systems*, Vol: 1, No: 2, Springer Open, 137-143.
- Lin, M. (2006). RTCM 3.0 Implementation in Network RTK and Performance Analysis, Degree Of Master Of Science, University Of Calgary, Department Of Geomatics Engineering.
- Öğütçü, S., S. (2014). Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) Uygulamalarında Ağ Bazlı Tekniklerin Doğruluk Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Öğütçü, S., S. (2017). Ağ Bazlı RTK Tekniklerinin (VRS, FKP, MAC) Baz Uzunluğu ve Epok Sayısına Bağlı Doğruluk ve Duyarlık Modellerinin

- Oluşturulması Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Teunissen, P., J., G. ve Montenbruck, O. (2017). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer International Publishing, İsviçre.
- Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., Pagels, C. ve Wagner, B. (2000). Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations, Proceedings of 13th International Technical Meeting of the Satellite of the ION, Salt Lake City, USA, 123-131.
- Wei, E., Chai, H., An, Z. ve Liu, J. (2006). VRS Virtual Observations Generation Algorithm, Journal of Global Positioning Systems, Vol: 5, No: 1-2, 76-81.
- Wübbena, G., Bagge, A. ve Schmitz, M. (2001). Network-Based Techniques for RTK Applications, GPS Society, Japan Institute of Navigation, 14 – 16 November 2001, Tokyo, Japan.
- Wübbena, G. ve Bagge, A. (2006). RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP, Geo++ White Paper, Nr: 2006.01, Garbsen, Germany.
- Yılmaz, M. (2020). Farklı Uydu Yükseklik Açılarında Ağ-RTK Düzeltme Tekniklerinin Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Yüksel, H. (2015). Gerçek Zamanlı Sabit GNSS Referans Ağlarının (CORS) Baz Uzunluğuna Bağlı Doğruluk Analizi: TUSAGA-Aktif Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bölüm 14

UÇUCU KÜLLERİN ASFALT BETONUNUN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Selçuk ARSLAN¹
Murat KARACASU²

1 Öğr. Gör. Selçuk ARSLAN, Amasya Üniversitesi Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Ulaştırma ve Trafik Hizmetleri Programı, Amasya, Türkiye, selcuk.arslan@amasya.edu.tr ORCID: 0000-0002-7254-2971

2 Prof. Dr. Murat KARACASU, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye, muratk@ogu.edu.tr ORCID: 0000-0001-9721-0984

1.GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi, araç sayısının artması, yolcu ve yük taşımacılığında en çok tercih edilen ulaşım türlerinden birinin karayolu olmasından dolayı yollarda oluşan trafik yükü giderek artmaktadır. Artan trafik yükü, yol yapımında kullanılan asfalt betonun çabuk bozulmasına, dayanımının düşmesine ve servis ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Bu tür olumsuz durumlar asfalt betonun performansının geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda yapılacak çalışmalardan birisi de atık malzeme kullanarak asfalt betonun performansını geliştirmeye çalışmaktır. Atık malzeme kullanımı, sürdürülebilir bir çevre için önem arz etmektedir. Gün geçtikçe inşaat alanında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Asfalt betonu modifiyesinde inşaat, maden, endüstri vb. alanlarda doğrudan veya bir üretim sonucu oluşmuş birçok atık malzeme kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde asfalt betonu için agrega modifiye edildiğinde; atık lastiklerin esneklik kazandırdığı [1], atık tuğla tozunun mekanik özellikleri iyileştirdiği [2], atık demir tozunun çekme dayanımını artırdığı ve yorulma ömrünü uzattığı [3], atık kirecin kalıcı deformasyon ve yorulma direncini artırdığı [4], atık seramik ve mermerin agrega yerine kullanılabilmesi [5-6] görülmektedir. Ayrıca çalışmaya paralel olarak asfalt betonu için atık uçucu kül ile agrega modifiye edildiğinde; dayanımı artırdığı [7], boşluk oranını artırdığı ve akma miktarının sınır değerini altında kaldığı [8], düşük sıcaklık ve yorulma çatlaklarına karşı direncini artırdığını belirtmişlerdir [9]. Asfalt betonu için bitüm modifiye edildiğinde ise, atık lastik ve cam lifin dayanımı azalttığı fakat standart koşulları sağladığı [10], atık zeytin posasının (pirina) nem dayanımını artırdığı [11], atık lastikten oluşan yağın dayanımı düşürdüğü fakat plastik deformasyon direncini artırdığı görülmektedir [12]. Çalışmalara bakıldığında asfalt betonuna eklenen atık malzemelerin mekanik özelliklere olumlu ya da olumsuz etkileri olmuştur.

Bu çalışmada asfalt betonu içerisine agrega yerine belirli oranlarda atık uçucu kül eklenerek numuneler hazırlanmış ve deneye tabi tutularak performansı incelenmiştir.

2.MATERYAL VE METOT

2.1 Agregalar

Çalışmada, agrega olarak kireçtaşı kullanılmıştır. Kullanılan agregaların özellikleri çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Agregada özellikleri

Deney Adı		Değer	Standart
Özgül Ağırlık Deneyi (gr/cm ³)			
Kaba Agregada	Zahiri Özgül Ağırlık	2.709	ASTM C127
	Hacim Özgül Ağırlık	2.681	
	YKSD Özgül Ağırlık	2.691	
İnce Agregada	Zahiri Özgül Ağırlık	2.858	ASTM C128
	Hacim Özgül Ağırlık	2.596	
	YKSD Özgül Ağırlık	2.688	
Filler Agregada	Zahiri Özgül Ağırlık	2.783	

2.2 Bitüm

Deneylerde TÜPRAŞ (İzmit) rafineri tesisinden alınan 50-70 penetrasyona sahip bitüm kullanılmıştır. Bitümün bağlayıcı özellikleri çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Bitümün bağlayıcı özellikleri

Deney Adı	Değer	Standart
Penetrasyon (25°C)	50(50/70)	ASTM D5
Yumuşama Noktası(°C)	46	ASTM D36/ D36M
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.038	ASTM D70-09e1
Düktilite (25°C)	>100 cm	ASTM D113-07
Isıtma Kaybı(%)	0.43	ASTM D6-95
Parlama Noktası (°C)	314	ASTM D92-05a
Viskozite(at 135°C, cP)	430.23	ASTM D4402-06
Viskozite(at 165 °C, cP)	120.95	ASTM D4402-06

2.3 Uçucu kül

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık üründür. Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller çeşitli yöntemlerle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kapsadığı için sorun oluşturur [13]. Uçucu kül; beton, çimento, agregada, gazbeton,

tuğla üretimi, yol ve zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan bir malzemedir.

Çalışma kapsamında tunçbilek termik santralinde taş kömürünün yakılmasıyla atık duruma gelen uçucu kül temin edilmiştir. Elek analizi deneyi yapılmış ve %99'lık kısmı 0.3 mm'lik elekten geçtiği tespit edilmiştir. Uçucu kül, ince (0.3mm altı) ve filler agregası ile %10, 20, 30, 40 oranlarında yer değiştirilerek asfalt beton numuneleri hazırlanmıştır. Uçucu küle ait özellikler çizelge 3'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Uçucu kül numune örneği

Çizelge 3. Uçucu kül özellikleri

Deney Adı	Değer
Özgül Ağırlık Deneyi (gr/cm ³)	2.195
Nem Yüzdesi	0,10
Renk	Gri

2.4 Marshall Stabilite Deneyi

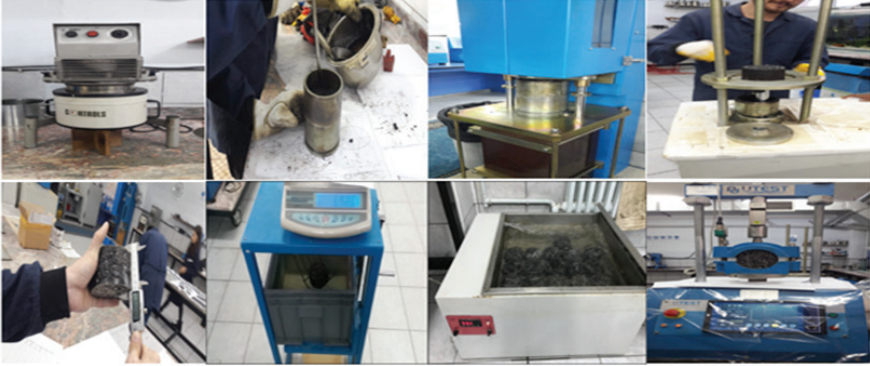
Marshall stabilite deneyi, asfalt betonu içinde kullanılacak optimum bitüm miktarını tayin etmek üzere yapılan deneydir. Deneyin yapılışı;

- Gradasyonu ayarlanmış 1150 gr agregası numunesi 160°C'lik ısıya ayarlanmış etüve bir gün önceden konulur. Bitümün 160°C'lik etüvede 2-3 saat beklemesi yeterlidir. Bitüm miktarı agregası ağırlığının %3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 tur. Her bitüm oranı için 3 adet numune hazırlanır. Toplamda 3*7=21 adet numune hazırlanır.

- Agregası ve bitüm mikserde karıştırıldıktan sonra, kürek ile kalıba şişlenerek yerleştirilir. Numune kalıbı; Marshall tokmağı aletine yerleştirilir ve her iki yüzüne 75 vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi tamamlanır.

- Tokmaktan çıkarılan kalıp içerisinde yer alan numunenin soğuması amacıyla uygun bir yüzey üzerine bırakılır. Bekleme süresi yaklaşık 3 saattir. Numuneler, soğuyan kalıptan bir krikoyla çıkarılır. Çıkarılan numuneler oda sıcaklığında bir gün bekletilir.

- Numune yükseklikleri ölçülür ve numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları tespit edilerek not alınır. Daha sonra bu numuneler 60°C sıcaklıktaki su banyosu içerisinde yaklaşık 30-40 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numuneler Marshall dayanım aletine yerleştirilir. Bu alette numune için dayanım ve akma değerleri elde edilir. Bunun için çeneler numuneye 51 mm/dak.'lık bir hızla yük uygular [14].



Şekil 2. Marshall stabilite deneyi yapılış aşamaları

Çalışma kapsamında kontrol numunesi ve agregası yerine %10-20-30-40 oranlarında atık uçucu kül eklenerek toplamda 21*5=105 adet numune dökümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Marshall stabilite deneyi numune örnekleri

2.5 Bulgular

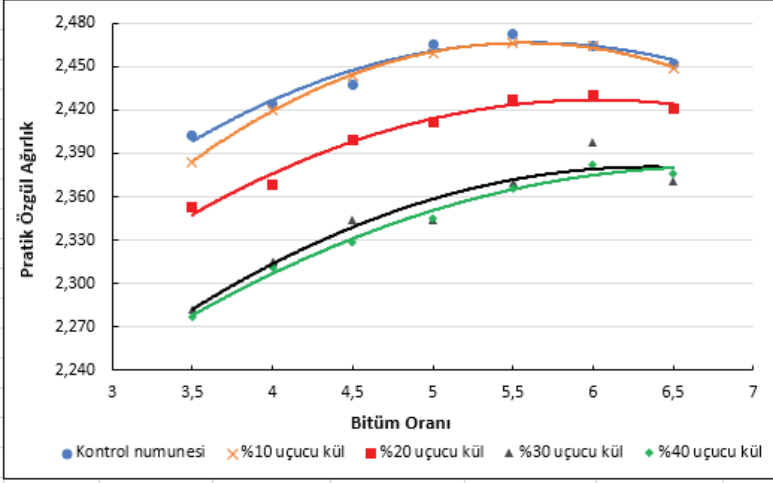
Numunelere ait deney sonuçları ile gerekli hesaplar yapıлып, grafikler çizildiğinde asfalt betonuna ait pratik özgül ağırlık, boşluk oranı, marshall dayanım, bitümlü dolu boşluk oranı, akma ve agregalar arası boşluk oranı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler ile ilgili tasarım kriterleri çizelge 4. te verilmiştir.

Çizelge 4. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) Marshall Tasarım Kriterleri [15]

Deney Adı	Bitüm Oranı (%)	
	Binder	Aşınma
Kaplama türü	Binder	Aşınma
Pratik Özgül Ağırlığı gr/cm ³	Max.	Max
Marshall dayanımı (kg)	Min.750	Min. 900
Boşluk oranı (%)	4-6	3-5
Bitümlü dolu boşluk oranı (%)	60-75	65-75
Agregalar arası boşluk oranı VMA (%)	Min.13	Min.14
Akma (mm)	2-4	2-4

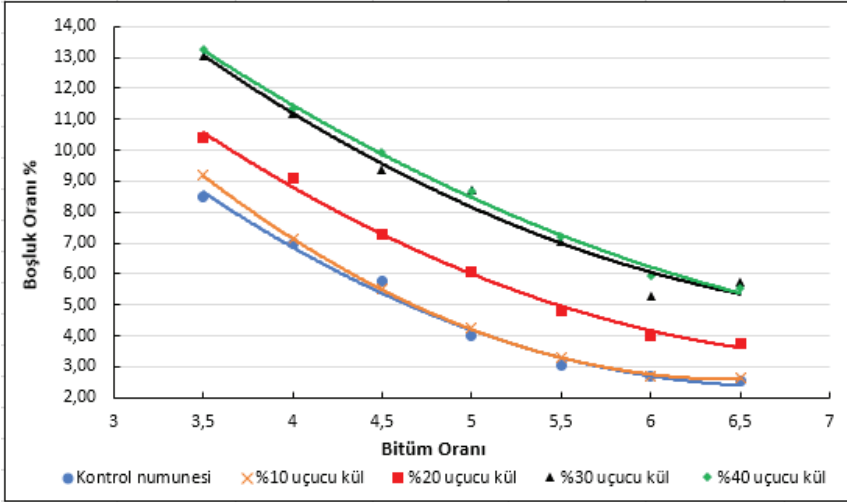
Pratik özgül ağırlık (PÖA), bitüm oranı arttıkça belirli bir değere kadar artmaktadır. Bu artışın nedeni, bitüm oranının artmasıyla agregalar arasındaki boşluğun azalmasıdır. Asfalt betonu içerisindeki atık uçucu kül

oranının artmasıyla PÖA'nın azaldığı görülmektedir. Grafikteki eğride PÖA'nın maksimum değerine karşılık gelen bitüm oranı, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 4).



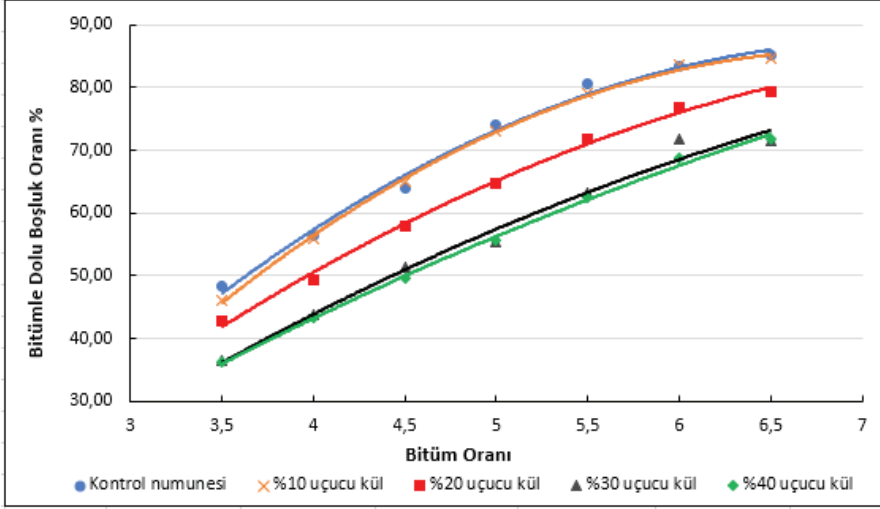
Şekil 4. Pratik Özgül Ağırlık – Bitüm Oranı

Boşluk oranı (BO), bitüm oranı arttıkça belirli bir değere kadar azalmaktadır. KTŞ'de aşınma Tip-2 kriterlerine göre BO'nun %3 ila %5 arasında olması gerekmektedir. Asfalt betonu içerisindeki atık uçucu kül oranının artmasıyla BO'nun arttığı görülmektedir. Grafikteki eğride BO'nun %4 değerine karşılık gelen bitüm oranı, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 5).



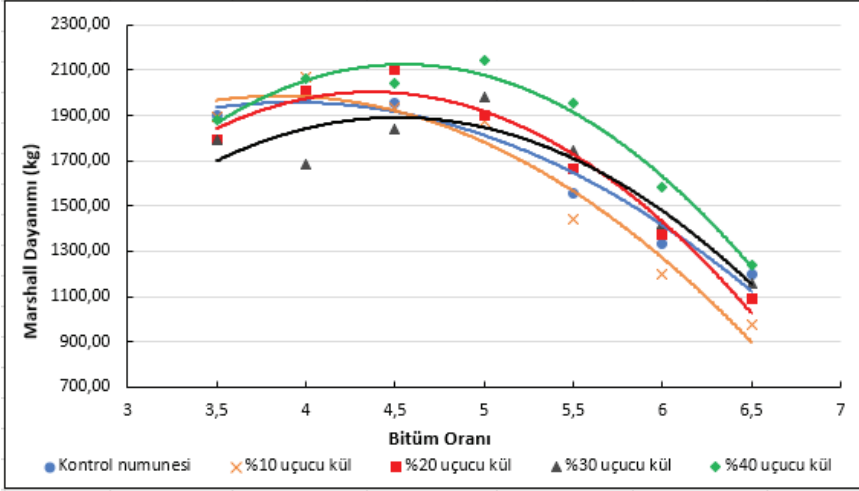
Şekil 5. Boşluk Oranı – Bitüm Oranı

Bitümlü dolu boşluk oranı (BDBO), bitüm oranı arttıkça belirli bir değere kadar artmaktadır. KTŞ’de aşınma Tip-2 kriterlerine göre BDBO’nun %65 ila %75 arasında olması gerekmektedir. Asfalt betonu içerisindeki atık uçucu kül oranının artmasıyla BDBO’nun azaldığı görülmektedir. Grafikteki eğride BDBO’nun %70 değerine karşılık gelen bitüm oranı, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 6).



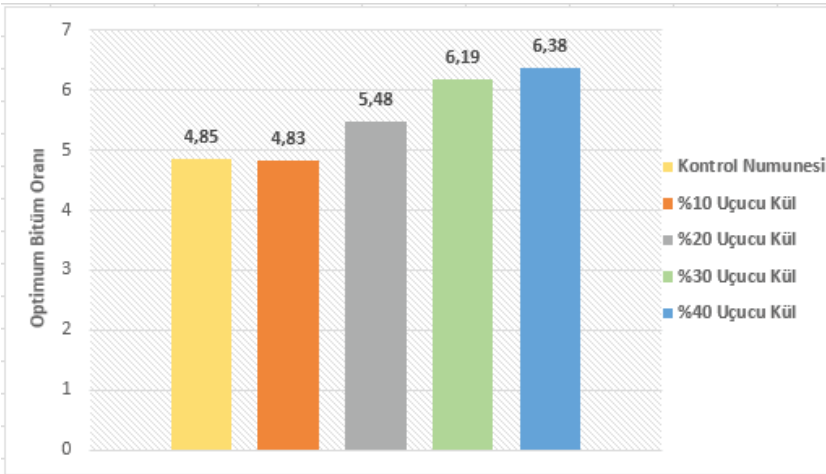
Şekil 6. Bitümlü Dolu Boşluk Oranı – Bitüm Oranı

Marshall dayanımı, bitüm oranı arttıkça belirli bir maksimum değere ulaşır tekrar azalmaktadır. Asfalt betonu içerisindeki atık uçucu kül oranının artmasıyla Marshall dayanımının arttığı ve aşınma tabakası için gerekli olan minimum dayanım değeri 900 kg şartını bütün uçucu kül oranlarında sağladığı görülmektedir. Grafikteki eğride Marshall dayanımının maksimum değerine karşılık gelen bitüm oranı, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 7).



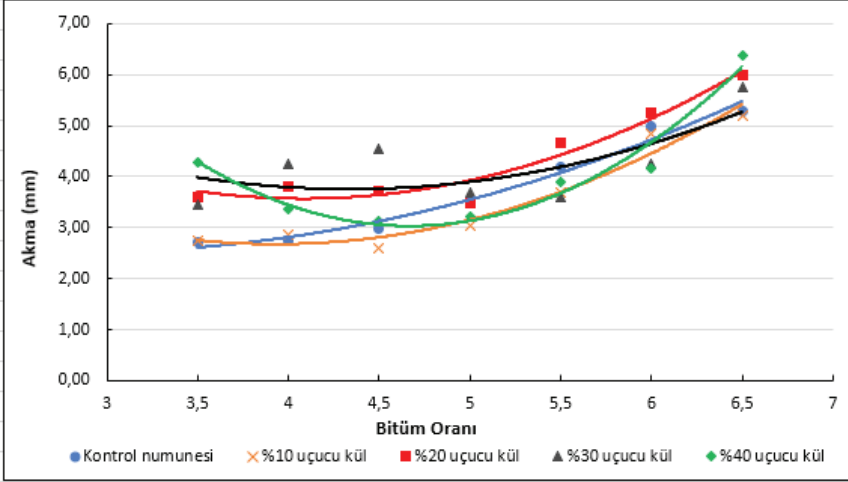
Şekil 7. Marshall Dayanımı – Bitüm Oranı

Optimum bitüm oranı bulunurken; pratik özgül ağırlık, boşluk oranı, bitümlü dolu boşluk oranı ve Marshall dayanım parametreleri dikkate alınır. Kontrol ve %10-20-30-40 oranlarında atık uçucu kül eklenerek hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda optimum bitüm oranı sırasıyla %4,85 - 4,83 - 5,48 - 6,19 - 6,38 bulunmuştur. Her ne kadar %10 uçucu kül eklenmesiyle az bir düşüş olsa da, uçucu kül oranının artması optimum bitüm miktarını artırmaktadır (Şekil 8).



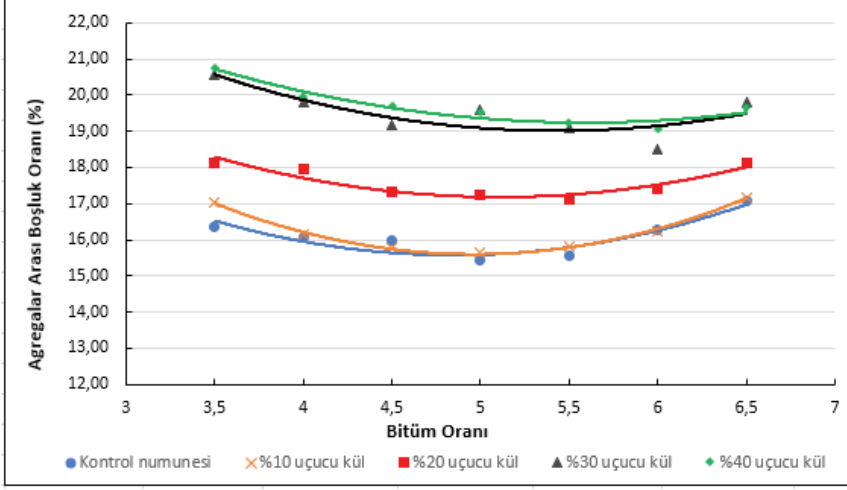
Şekil 8. Optimum Bitüm Oranı Sonuçları

Akma, bitüm oranı arttıkça belirli bir değere kadar artmaktadır. KTŞ'de aşınma Tip-2 kriterlerine göre akma değerinin 2-4 mm arasında olması gerekmektedir. Grafik incelendiğinde %5,5 bitüm oranına kadar 5 farklı asfalt numunesinde de akma değerlerinin şartname sınır değerlerinde kaldığı görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Akma – Bitüm Oranı

Agregalar arası boşluk oranı (VMA), KTŞ'de aşınma Tip-2 kriterlerine göre minimum %14 olması gerekmektedir. Kontrol numunesi ve modifiyeli asfalt betonu için VMA değerleri şartname sınırını sağlamaktadır. Asfalt betonu içerisindeki atık uçucu kül oranının artmasıyla VMA'nın arttığı görülmektedir (Şekil 10).



Şekil 10 Agregalar Arası Boşluk Oranı – Bitüm Oranı

3. Sonuçlar

1. Çalışma kapsamında asfalt betonu içerisinde kullanılan atık uçucu kül oranının artmasıyla kontrol numunesine kıyasla pratik özgül ağırlık ve bitümlü dolu boşluk oranı azalmakta, boşluk oranı artmaktadır. Elde edilen bu değerler aşınma tabakası için şartname sınır değerlerini sağlamaktadır.

2. Marshall dayanım değerlerine bakıldığında, atık uçucu kül oranının artmasıyla asfalt betonun performansını artırdığını ve agregaya yerine kullanılabileceği öngörülmüştür. Üretimde agregaya ayrılacak maliyeti düşürecektir. Ayrıca kontrol ve 4 farklı modifiye asfalt betonu numunelerinden elde edilen dayanım değerleri aşınma tabakası için minimum 900 kg şartını sağlamaktadır.

3. Atık uçucu kül oranının artması asfalt betonu içerisindeki optimum bitüm oranını artırmakta, bu da bitümün ithal bir ürün olmasından dolayı üretimde bitüme ayrılacak maliyeti artıracaktır.

4. Atık malzemelerin kullanımı çevre kirliliğinin ve atıklar için ayrılan depo alanlarının azalmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Karacasu, M., Okur, D. V., & Er, A. (2015). A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber Modified Asphalt Mixtures. *The Scientific World Journal*, 2015, 1–9.
- [2] Chen, M., Lin, J., Wu, S., & Liu, C. (2011). Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1532–1536. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005
- [3] Arabani, M. & Mirabdolazimi, S.M., (2011). Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder, *Materials Science and Engineering*, Volume 528, Issues 10–11, Pages 3866–3870.
- [4] Do, H.S., Mun, P.H. & Keun, R.S., (2008). A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime, *Waste Management*, 28, 191–199.
- [5] Akbulut, H., ve Gürer, C., (2006). Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregası Olarak Değerlendirilmesi. *Teknik Dergi*, 17(84), 3943-3960.
- [6] Öner, J. (2020). Seramik Atıklarıyla Hazırlanan Asfalt Karışımların Soyulmaya Karşı Dayanımının Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 498–505. DOI: 10.35414/akufemubid.665232
- [7] Çelik, Ö. (2008). Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 26(13), 1571–1582. doi:10.1080/10916460701287474
- [8] Üstünkol, F. N., & Turabi, A. (2010). Endüstriyel Atık Filler Malzemelerin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Baun Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 3–18
- [9] Kumar, P., Mehndiratta, H.C., and Singh, V., (2008). Use of Fly Ash In Bituminous Layer of Pavement, *Indian Highways*, New Delhi, India, 41-50
- [10] Yıldırım, Z. B., Karacasu, M., & Okur, D. V., (2018). Atık Lastik ve Cam Lif ile Modifiye Edilmiş Bitümün Asfalt Betonu Performansına Etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1019-1027,
- [11] Kıcı G.Ö. ve Saltan M., (2020). Pirinanın bitüm modifikasyonunda kullanımının araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(1), 1-9,
- [12] Taşcı, A., (2010). Piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125s, Konya.

- [13] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., (2003). *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*, TÇMB, Ankara, 114s.
- [14] Karacasu, M. (2016). *Yol Üstyapı Deneyleri*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 207s.
- [15] Karayolları Genel Müdürlüğü, (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*, Ankara.

Bölüm 15

**BEAN YÖNTEMİ İLE TABLET ŞEKLİNDEKİ
SÜPERİLETKENLERİN KRİTİK AKIM
YOĞUNLUĞUNUN HESAPLANMASI**

Naki KAYA¹

¹ Dr. Naki Kaya, İstanbul Arel Üniversitesi, MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Optisyenlik Programı, İstanbul, Türkiye, nakikaya06@gmail.com, Orcid: 0000-0003-2287-676X

GİRİŞ

Süperiletken malzemelerde önemli fiziksel parametrelerden birisi kritik akım yoğunluğudur. Kritik akım yoğunluğu süperiletkenin birim alanda taşıyabildiği maksimum akım miktarıdır ve J_c ile gösterilir. Süperiletken malzeme taşıyabileceği maksimum akım kapasitesinin üzerinde bir akıma maruz bırakılırsa, malzeme süperiletkenlik özelliğini kaybedecektir. Bu bağlamda kritik akım yoğunluğu değeri bir anlamda süperiletken malzemeler için bir eşik akım düzeyidir.

Kritik akım yoğunluğu değeri süperiletken malzemedan süperiletken malzemeye değişiklik gösterdiği gibi, aynı süperiletken malzemenin farklı üretim yöntemlerine göre de değişiklikler gösterebilmektedir. Kritik akım yoğunluğu değeri malzemenin safsızlığı, malzemeye katılan farklı malzemelerin varlığı, fırınlama sıcaklığı gibi daha birçok ölçüte göre değişmektedir.

Süperiletken malzemenin taşıdığı maksimum akım miktarının artırılması, teknolojik açıdan o malzemenin kullanılabilme sahasını da genişletebilmektedir. Bu sebeple birçok araştırmacı elde ettiği süperiletken malzemenin kritik akım yoğunluğu değerini hesaplamaktadır. Kritik akım yoğunluğu değeri deneysel yolla, bir ölçüm cihazı kullanılarak doğrudan hesaplanabildiği gibi Bean Yöntemi olarak bilinen yarı deneysel bir yolla da hesaplanabilmektedir (Bean, 1962:250). Bean Yöntemi'nde kullanılan denklemler Denklem 1 ve Denklem 2'de gösterildiği gibidir.

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a\left(1-\frac{a}{3b}\right)} \quad (1)$$

Bu denklemde ΔM ; manyetik alana karşı malzemenin göstermiş olduğu manyetik moment tepkisi grafiğinden elde edilen veriler ile hesaplanan $(M_r)-(M_i)$ değeridir. a ve b değerleri ise malzemenin boyutlarıdır. Denklem 1, $a < b$ şartında kullanılmaktadır. Ancak $b < a$ şartı söz konusu olursa kritik akım yoğunluğu hesabı Denklem 2 kullanılarak yapılmaktadır.

$$J_c = \frac{20\Delta M}{b\left(1-\frac{b}{3a}\right)} \quad (2)$$

Bu bölümün temel amacı süperiletken malzemelerin sahip olduğu kritik akım yoğunluğu değerlerinin Bean Yöntemi ile nasıl hesaplandığını anlatmaktır. Bu kapsamda daha önceden hazırlanmış tablet şeklinde bir süperiletken numune kullanılmıştır. Ölçüm basamakları ve ölçümler ile elde edilen veriler ham veri halinde excel formatında işlenmiş olup, Origin Pro 8 Programı ile de grafikler elde edilmiştir. İşlem basamakları

adımlar halinde anlatılıp her bir adıma ait tüm ölçüm verileri bölüm içerisinde verilmiştir.

Bu bölümden yararlanmak isteyen araştırmacılar üretmiş oldukları tablet şeklindeki süperiletkenlerin kritik akım yoğunluğu değerlerini bölüm içerisindeki basamakları takip ederek kolayca hesaplayabileceklerdir. Fakat unutulmamalıdır ki; herhangi bir yöntem çoğu zaman bir problemin çözümünde mutlak bir yöntem olmamaktadır ve söz konusu problem birden çok yöntem yardımı ile çözümlenebilmektedir. Bu bölümde anlatılan hesaplama basamakları ilgili problemin çözümünde kullanılan yöntemler içerisinde yalnızca bir tanesidir. Bu bölümde kullanılan excel verileri ölçüm cihazından alındığı şekli ile hiçbir değişim yapılmadan kullanılmıştır. Anlamlı bir matematiksel notasyon için bu verilerden elde edilen sayısal sonuçlar, virgülden sonraki kısımlarının ihmal edilebilir bandında yuvarlama işlemi yapılarak kullanılmalıdır.

1. İŞLEMSEL AKIŞ

Bean Yöntemi ile tablet şeklindeki süperiletkenin kritik akım yoğunluğu değerinin hesaplanması için şu sıralama takip edilmektedir;

- a) Tablet şeklinde süperiletken bir numune elde edilir.
- b) Elde edilen numune $M-H$ ölçümüne tabi tutulur.
- c) $M-H$ ölçümü ile elde edilen veriler yardımı ile kritik akım yoğunluğu değeri hesaplanır.
- d) İhtiyaca göre manyetik alan-kritik akım yoğunluğu grafiği çizilir.

1.1. Tablet Şeklinde Süperiletken Bir Numunenin Elde Edilmesi

Üretim yöntemleri değişiklik göstermiş olsa da toz halde elde edilen numune bir hidrolik pres yardımı ile sıkıştırılarak tablet haline dönüştürülebilir. Bu çalışma için Şekil 1'de görülen hidrolik pres kullanılmıştır.



Şekil 1. Hidrolik Pres

Şekil 1’de görülen tarzda bir hidrolik presleme cihazının kullanılması, elde edilecek tabletin geometrisinin oldukça düzgün olmasını sağlayacaktır. Bu durum hesaplamada kullanılacak olan numune boyutlarının doğru değerlerde kullanılmasına olanak verecektir ki bu da doğru bir hesaplamanın yapılabilmesi için bir zorunluluktur. Elde edilen toz numunenin karakteristik özelliği veya deneysel parametrelerin neler olarak belirlendiği gibi ölçütler ışığında presleme koşulları tayin edilmelidir. Bu durum her deney için farklılık gösterecektir. Bu çalışma için 0,5 gram toz numune hidrolik pres yardımı ile 200 MPa basınçta 10 dakika boyunca sıkıştırılarak 13 mm çapında silindirik formda tablete dönüştürülmüştür. Presleme sonrası elde edilen tablet numune Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Presleme Sonucu Elde Edilen Tablet Numune

Tabletleme basamağından sonra numune belli koşullar altında fırınlanarak süperiletken hale dönüştürülmüştür.

1.2. Elde Edilen Numunenin $M-H$ Ölçümüne Tabi Tutulması

Bu işlem basamağı VSM (vibrating sample magnetometer) olarak bilinen; titreşimli numune manyetometresi ölçüm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem kabaca tarif edilirse; malzemenin belli bir değişen manyetik alan altında göstermiş olduğu manyetik moment değişiminin tespitinin yapılmasıdır denilebilir.

Malzemenin göstermiş olduğu manyetik moment değişim tepkisi malzemenin manyetik karakteri hakkında ciddi bilgiler vermektedir. Örneğin malzeme süperiletken özellikte ise ölçüm verileri ile elde edilen grafik bir diyamanyetik histeresiz eğrisi çizecektir.

Ölçüm sonucu elde edilen manyetik alan-manyetik moment ($M-H$) verileri Tablo 1’de görülmektedir. İşlem basamağı takibinde herhangi bir karışıklık olmaması adına tüm veriler tabloda aktarılmıştır.

Tablo 1

$M-H$ Ölçümünden Elde Edilen Manyetik Alan- Manyetik Moment Verileri

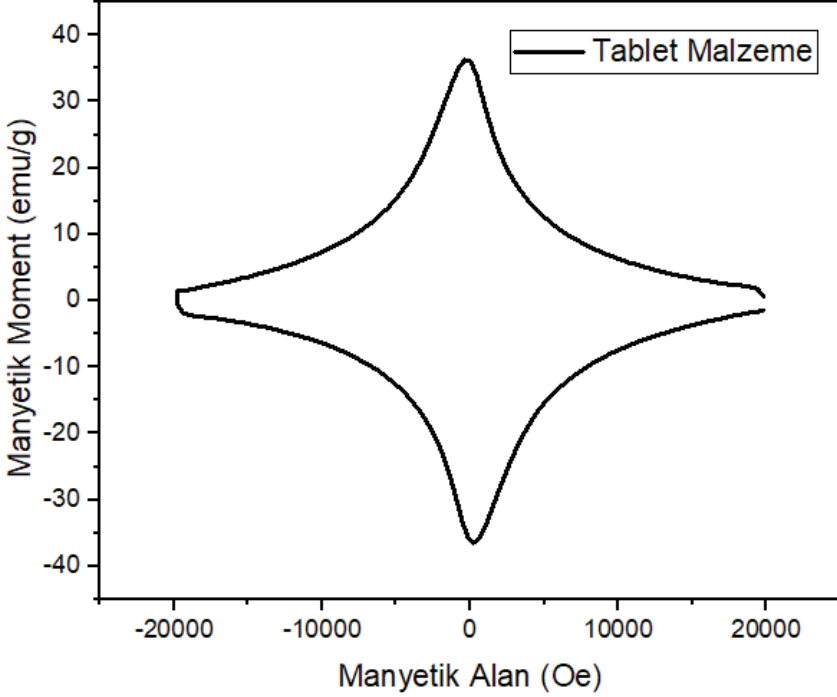
Manyetik Alan (Oe)	Manyetik Moment(emu)	Manyetik Alan (Oe)	Manyetik Moment(emu)	Manyetik Alan (Oe)	Manyetik Moment(emu)
19820,092	0,021483559	-6710,0536	0,42583483	-6583,4124	-0,36741318
19422,583	0,062225273	-7106,057	0,40422962	-6183,3975	-0,3867422
19024,855	0,073324113	-7502,032	0,38055368	-5783,4462	-0,41167997
18627,617	0,0795342	-7898,0626	0,35915954	-5383,3962	-0,43806549
18231,155	0,084045666	-8293,9937	0,33843636	-4983,406	-0,46444142
17835,148	0,086399495	-8689,9012	0,32060689	-4583,3743	-0,49434182

Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler

17439,324	0,089771059	-9085,8203	0,30524236	-4183,3678	-0,52941108
17043,616	0,094917011	-9481,6636	0,28775911	-3783,4021	-0,56869906
16648,028	0,09977226	-9877,5397	0,27129976	-3383,3524	-0,61099171
16252,304	0,10507162	-10273,419	0,25841858	-2983,3887	-0,65940734
15856,396	0,11023515	-10669,317	0,24450521	-2583,3633	-0,71498716
15460,504	0,11514007	-11065,195	0,2310606	-2183,3635	-0,7815924
15064,645	0,1209572	-11461,088	0,21881843	-1783,3727	-0,86346684
14668,796	0,12885941	-11856,947	0,20771333	-1383,3621	-0,96001751
14272,944	0,13591307	-12252,857	0,19572804	-983,37193	-1,07828
13877,175	0,1414168	-12648,726	0,18587797	-583,4142	-1,2038853
13481,344	0,14815589	-13044,592	0,17485018	-181,73098	-1,3004198
13085,584	0,15744627	-13440,445	0,16531509	220,62662	-1,3329875
12689,807	0,16367379	-13836,272	0,15703466	620,58567	-1,3082316
12294,073	0,17331069	-14232,005	0,14966626	1020,6182	-1,2404521
11898,357	0,18200276	-14627,841	0,13833396	1420,5992	-1,1554349
11502,637	0,19026318	-15023,605	0,12912271	1820,5802	-1,067562
11106,927	0,20147331	-15419,321	0,12447701	2220,6181	-0,98365052
10711,188	0,20931637	-15815,093	0,11358892	2620,5843	-0,90377261
10315,437	0,22006402	-16210,816	0,10698356	3020,5861	-0,83112408
9919,7632	0,23337218	-16606,383	0,10019343	3420,5594	-0,7628973
9524,0525	0,24550652	-17001,844	0,094147349	3820,5873	-0,70215022
9128,2834	0,25664393	-17397,229	0,087762502	4220,5396	-0,65066605
8732,6008	0,27181747	-17792,608	0,080932546	4620,5394	-0,60357049
8336,8735	0,28573351	-18187,795	0,073201031	5020,5177	-0,56100322
7941,0581	0,30026412	-18582,574	0,066003299	5420,5081	-0,52639028
7545,1086	0,31780669	-18976,916	0,060523123	5820,5343	-0,49454451
7149,1969	0,33581444	-19370,803	0,053270422	6220,5221	-0,46434985
6753,2998	0,3529204	-19764,53	0,053279239	6620,4794	-0,43653746
6357,3792	0,37298366	-19794,721	-0,019665591	7020,4806	-0,41223675
5961,4604	0,39581373	-19392,512	-0,066963576	7420,4453	-0,3892399
5565,578	0,42061369	-18990,024	-0,07873813	7820,4999	-0,36804906
5169,6761	0,44786964	-18588,113	-0,08578259	8220,4781	-0,3462855
4773,7677	0,47666162	-18186,924	-0,088615249	8620,4527	-0,32845465
4377,8552	0,50751022	-17786,267	-0,092720471	9020,4017	-0,31166251
3981,972	0,54229612	-17385,728	-0,095380064	9420,3968	-0,29377141
3585,9257	0,58445013	-16985,393	-0,09915594	9820,4083	-0,27869177
3189,9521	0,62852564	-16585,041	-0,10627631	10220,405	-0,26406665

2793,932	0,679769	-16184,83	-0,11053841	10620,41	-0,25031419
2397,9316	0,74001908	-15784,6	-0,11625667	11020,385	-0,23629024
2001,9491	0,81105045	-15384,407	-0,12127593	11420,361	-0,22374452
1605,9516	0,89873477	-14984,246	-0,1281586	11820,379	-0,21206385
1210,0234	1,0028954	-14584,128	-0,13592683	12220,324	-0,20139973
813,98225	1,1237192	-14183,999	-0,14081774	12620,311	-0,19081766
417,92467	1,2419372	-13783,85	-0,14668931	13020,305	-0,18176263
21,888405	1,3162345	-13383,778	-0,15380207	13420,241	-0,17130912
-374,13674	1,323935	-12983,725	-0,1627952	13820,113	-0,16063375
-770,15858	1,2816097	-12583,64	-0,1722658	14219,992	-0,15230546
-1166,2031	1,210243	-12183,64	-0,18055888	14619,93	-0,14341562
-1562,1922	1,1256326	-11783,639	-0,18953115	15019,801	-0,13576467
-1958,2015	1,0380426	-11383,606	-0,19833398	15419,598	-0,12626644
-2354,2293	0,95440594	-10983,597	-0,20804956	15819,515	-0,11757298
-2750,197	0,8756048	-10583,552	-0,21778956	16219,261	-0,11166251
-3146,1914	0,8027018	-10183,585	-0,22771357	16619,067	-0,10392771
-3542,212	0,73927178	-9783,5054	-0,23960531	17018,814	-0,098308519
-3938,1604	0,68140436	-9383,4851	-0,25257375	17418,495	-0,090473441
-4334,1601	0,63247481	-8983,4978	-0,26678988	17818,104	-0,083064975
-4730,1415	0,58823156	-8583,4837	-0,28102144	18217,533	-0,076636129
-5126,1236	0,55018404	-8183,4734	-0,29589912	18616,637	-0,071657781
-5522,1066	0,51429502	-7783,4974	-0,31128312	19015,117	-0,06399237
-5918,1077	0,48342991	-7383,4635	-0,32966041	19413,282	-0,062319977
-6314,0672	0,45310611	-6983,4411	-0,34791878	19810,863	-0,052319484

Tablo 1 incelendiğinde ölçüm neticesinde elde edilen manyetik moment değerlerinin birimi emu cinsinden verildiği görülmektedir. Fakat hesaplamalarda emu/g veya emu/cm³ cinsinden birimler kullanılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan numunenin ölçüme tabi tutulan kısmının kütlesi bilindiğinden ($m=0,0365g$) emu/g birimine dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için excel dosyasında manyetik moment sütunu kütle değerine bölünmelidir. Eğer ihtiyaç olursa bu basamakta x sütunu manyetik alan (O_e), y sütunu manyetik moment (emu/g) olacak şekilde bir grafik çizme programı yardımı ile Şekil 3'te gösterildiği gibi $M-H$ grafiği çizilebilir.



Şekil 3. M-H Grafiği

1.3. M-H Ölçümü İle Elde Edilen Veriler Yardımı İle Kritik Akım Yoğunluğu Değerinin Hesaplanması

Bu basamakta M-H ölçümü ile elde edilen verilerin excel programı yardımı ile bir dizi düzenlemelere ihtiyacı vardır. Yapılacak düzenlemelerin temel mantığında, Şekil 3'te görüldüğü gibi histeresiz eğrisi üzerinden karşılıklı olarak pozitif ve negatif manyetik moment değerlerinin farkından yola çıkarak ΔM değerlerinin bulunabilmesi vardır. Bu işlem bir bilgisayar programı yardımı ile eğri üzerinde manyetik moment değerlerinin karşılıklı olan noktaları işaretlenmek ve bu noktaların farkları alınmak sureti ile de yapılabilir. Ancak eldeki verilerin çokluğu göz önünde bulundurulduğunda bu yöntemden daha pratik bir yöntem ihtiyacı duyulduğu aşikardır.

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a(1-\frac{a}{3b})} \quad \text{Şeklinde ifade edilen Bean Denklemi'nde } a \text{ ve } b$$

değerleri numune ölçüsünden bilinmektedir. Burada M-H verilerinden yararlanılarak ΔM değeri bulunacaktır ve Denklem 1'de yerine yazılarak kritik akım yoğunluğu hesaplaması tamamlanacaktır. ΔM hesabı için Tablo 1'de bulunan veriler kullanılacaktır.

a) Tablo 1’de manyetik alan değerlerinin olduğu sütunda en yüksek manyetik alan değerinden başlanılarak, bu değerlerin negatife döndüğü yere kadar olan kısmı excel programında kopyalanır ve excel dosyasının boş bir sütununa yapıştırılır. Ardından bu elde edilen sütun küçükten büyüğe sıralanır.

b) Tablo 1’de manyetik moment (emu/g) verilerinden a basamağından alınan değer sayısı kadar alınarak a basamağından elde edilen sütunun yanına yapıştırılır ve bu sütunda küçükten büyüğe doğru sıralanır.

c) Tablo 1’de manyetik alan değerlerinin olduğu sütunda, negatif değerlerin bittiği, pozitif değerlerin başladığı değer karşısında olan; manyetik moment değerleri kopyalanarak a ve b maddelerinde oluşturulan sütunların yanına yapıştırılır.

d) b basamağından elde edilen b) sütunundan, c basamağından elde edilen c) sütunu çıkarılarak ΔM bulunur ve Tablo 2 elde edilir.

Tablo 2
a, b, c ve d Basamakları İle Elde Edilen Veriler

a)	b)	c)	ΔM
21,88841	36,06122	-36,5202	72,58142466
417,9247	34,02568	-35,842	69,86763836
813,9823	30,78683	-33,985	64,77181644
1210,023	27,47659	-31,6558	59,13233699
1605,952	24,62287	-29,2483	53,87114438
2001,949	22,22056	-26,9493	49,16988959
2397,932	20,2745	-24,7609	45,03538877
2793,932	18,62381	-22,7705	41,39433096
3189,952	17,21988	-20,9013	38,12117644
3585,926	16,01233	-19,237	35,24932466
3981,972	14,85743	-17,8265	32,68389507
4377,855	13,90439	-16,5362	30,4405674
4773,768	13,05922	-15,37	28,4291737
5169,676	12,2704	-14,4217	26,6920526
5565,578	11,52366	-13,5492	25,0728274
5961,46	10,84421	-12,7219	23,56612548
6357,379	10,21873	-11,9599	22,17866082
6753,3	9,669052	-11,2942	20,96320959
7149,197	9,200396	-10,6641	19,86450247
7545,109	8,707033	-10,0835	18,79056849
7941,058	8,226414	-9,48727	17,71368822

8336,874	7,828315	-8,99876	16,82707288
8732,601	7,447054	-8,5387	15,98575288
9128,283	7,031341	-8,04853	15,07987233
9524,053	6,726206	-7,63539	14,36159699
9919,763	6,393758	-7,2347	13,6284611
10315,44	6,029151	-6,85792	12,88707425
10711,19	5,734695	-6,47371	12,20840027
11106,93	5,519817	-6,12999	11,64980356
11502,64	5,21269	-5,80997	11,02265836
11898,36	4,986377	-5,5178	10,50417781
12294,07	4,748238	-5,22788	9,976119178
12689,81	4,484213	-4,9798	9,464011507
13085,58	4,313596	-4,6934	9,006996986
13481,34	4,059065	-4,40092	8,459990137
13877,18	3,874433	-4,17275	8,047185205
14272,94	3,723646	-3,9292	7,652840822
14668,8	3,530395	-3,71958	7,249974795
15064,65	3,313896	-3,45935	6,773250411
15460,5	3,154522	-3,22118	6,3757
15856,4	3,020141	-3,05925	6,079387945
16252,3	2,878675	-2,84733	5,726009041
16648,03	2,733487	-2,69338	5,426870658
17043,62	2,600466	-2,47872	5,079190466
17439,32	2,459481	-2,27575	4,735233808
17835,15	2,367109	-2,09962	4,466729425
18231,16	2,302621	-1,96323	4,265847863
18627,62	2,179019	-1,75322	3,932234795
19024,86	2,00888	-1,7074	3,716276438
19422,58	1,704802	-1,43341	3,138212521

Bu işlemlerden sonra; a, b, c ve d basamakları ile bulunan ΔM değeri ve numune ölçüleri a , b kullanılarak Bean Denklemi yardımı ile kritik akım yoğunluğu değeri hesaplanacaktır. Bu çalışmada kullanılan numune boyutları; $a= 2,31$ ve $b= 2,01$ yani $a>b$ olduğundan Denklem 1'den yararlanılacaktır. Bu işlem excel programında basitçe Bean Denklemi oluşturularak gerçekleştirilebilir ve manyetik alana karşı numunenin sahip olduğu kritik akım yoğunluğu değeri Tablo 3'te gösterildiği gibi elde edilebilir.

Tablo 3

Manyetik Alana Karşı Numunenin Sahip Olduğu Kritik Akım Yoğunluğu Değerleri

Manyetik Alan(Oe)	Kritik Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	Manyetik Alan(Oe)	Kritik Akım Yoğunluğu (A/cm ²)
19820,092	10172,5	9524,053	1806,161
19422,583	9792,152	9128,283	1711,043
19024,855	9077,958	8732,601	1632,754
18627,617	8287,568	8336,874	1544,857
18231,155	7550,197	7941,058	1472,191
17835,148	6891,302	7545,109	1398,182
17439,324	6311,84	7149,197	1326,409
17043,616	5801,535	6753,3	1262,357
16648,028	5342,793	6357,379	1185,692
16252,304	4940,295	5961,46	1127,836
15856,396	4580,742	5565,578	1072,568
15460,504	4266,334	5169,676	1016,105
15064,645	3984,431	4773,768	949,2906
14668,796	3740,968	4377,855	893,5728
14272,944	3514,029	3981,972	852,0438
13877,175	3302,861	3585,926	802,5167
13481,344	3108,404	3189,952	760,5916
13085,584	2938,054	2793,932	711,8632
12689,807	2784,068	2397,932	663,6567
12294,073	2633,553	2001,949	626,0251
11898,357	2482,625	1605,952	597,8709
11502,637	2358,363	1210,023	551,1141
11106,927	2240,45	813,9823	520,8469
10711,188	2113,488	417,9247	439,8296
10315,437	2012,819	21,88841	82,49268
9919,7632	1910,068		

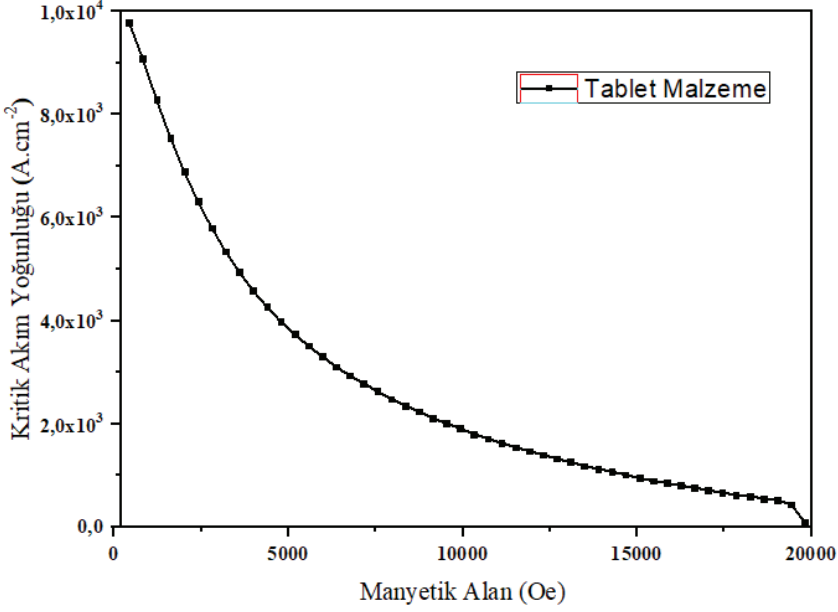
Son olarak anlamlı bir grafik elde edilebilmesi açısından Tablo 3'te gösterilen kritik akım yoğunluğu değerinin olduğu sütun küçükten büyüğe doğru sıralanır ve artık Tablo 4'te görüldüğü gibi manyetik alan ve kritik akım yoğunluğu değerleri grafik oluşturulabilecek şekilde elde edilir.

Tablo 4

Manyetik Alan ve Kritik Akım Yoğunluğu Değerlerinin Grafik Oluşturulabilecek Halleri

Manyetik Alan(Oe)	Kritik Akım Yoğunluğu (A/cm²)	Manyetik Alan(Oe)	Kritik Akım Yoğunluğu (A/cm²)
19820,092	82,49268	9919,7632	1910,06826
19422,583	439,82957	9524,0525	2012,81938
19024,855	520,8469	9128,2834	2113,48775
18627,617	551,11409	8732,6008	2240,44953
18231,155	597,87092	8336,8735	2358,36296
17835,148	626,02506	7941,0581	2482,62467
17439,324	663,65672	7545,1086	2633,55256
17043,616	711,86324	7149,1969	2784,06751
16648,028	760,59163	6753,2998	2938,05449
16252,304	802,51674	6357,3792	3108,4035
15856,396	852,04381	5961,4604	3302,86069
15460,504	893,57281	5565,578	3514,02932
15064,645	949,29065	5169,6761	3740,96842
14668,796	1016,10495	4773,7677	3984,43097
14272,944	1072,56779	4377,8552	4266,33362
13877,175	1127,8363	3981,972	4580,74248
13481,344	1185,6921	3585,9257	4940,29486
13085,584	1262,35669	3189,9521	5342,7932
12689,807	1326,4086	2793,932	5801,53528
12294,073	1398,18197	2397,9316	6311,84007
11898,357	1472,19092	2001,9491	6891,30233
11502,637	1544,85747	1605,9516	7550,19679
11106,927	1632,75368	1210,0234	8287,56816
10711,188	1711,04263	813,98225	9077,95753
10315,437	1806,16075	417,92467	9792,15172

Tablo 4 grafik oluşturulmak için kullanıldığında genelde x eksenini manyetik alan, y eksenini ise kritik akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Tablo 4 verileri kullanılarak oluşturulan grafik, Şekil 4’te olduğu gibidir. Genel olarak kritik akım yoğunluğu değerinin hesaplanmasının ardından bu değerinin manyetik alana bağlı olarak değişiminin grafikte gösterilmesi gerekmektedir.



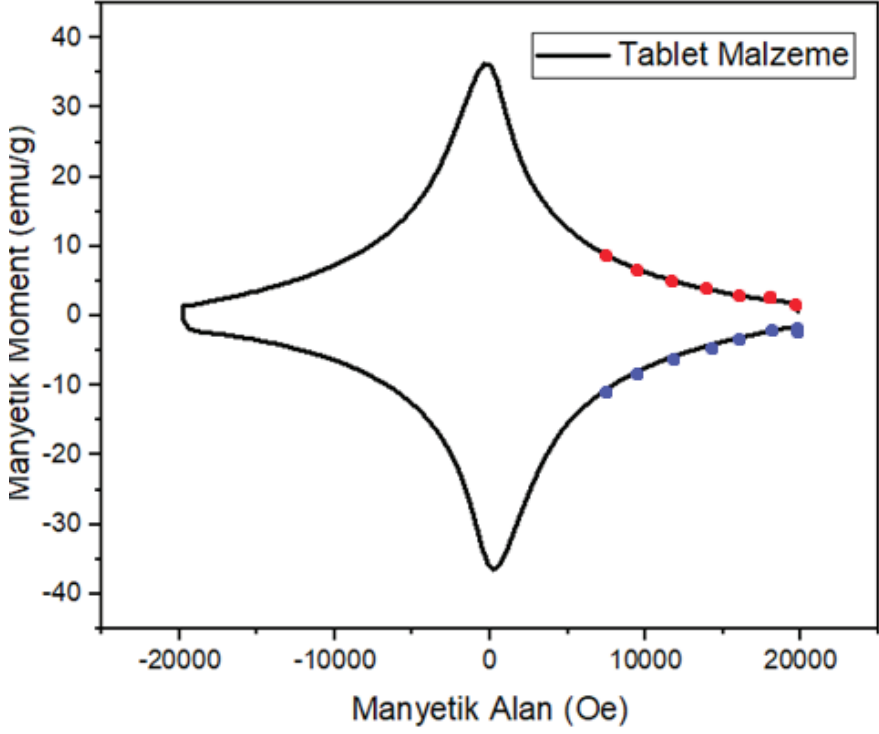
Şekil 4. Elde Edilen Numuneye Ait Manyetik Alan-Kritik Akım Yoğunluğu Grafiği

Her ne kadar uygulanma zorluğu nedeni ile kullanılma sıklığı çok olmasa da, kritik akım yoğunluğu hesaplamasında bir farklı yöntem daha vardır. Uygulanma adımlarından bahsedilecek olan bu yöntem, aslında bu çalışmada anlatılan excel programı ile verilerin uygunlaştırılmasının mantığını içermektedir. Aşağıda maddeler halinde sıralanan basamaklar yardımı ile kritik akım yoğunluğu Bean yöntemi ile hesaplanabilmektedir.

a) Elde edilen tablet şeklindeki süperiletken numune $M-H$ analizine tabi tutulur.

b) Analiz sonucu elde edilen veriler ile $M-H$ grafiği çizilir.

c) Şekil 5'te görüldüğü gibi $M-H$ grafiğinde eğri üzerinde dikeyde sabit kalınmak sureti ile yatayda karşılıklı negatif ve pozitif noktalar tespit edilir (Şekil 5'te karşılıklı kırmızı ve mavi noktalar gibi) ve bu noktaların farkları alınır. Bu esnada dikeyde sabit kalınan nokta manyetik alan değeri olduğundan ötürü bu noktada yapılan yatayda fark alma işlemi ile söz konusu manyetik alana karşılık gelen ΔM değeri bulunur. Bu işlem için oldukça farklı noktalar alınarak çok sayıda ΔM değeri bulunup, grafik çizilebilecek kadar veri elde edilmiş olunacaktır.



Şekil 5. M-H Grafiği Üzerindeki Eğriden ΔM Değerinin Tespitinin Gösterimi

d) Son olarak; elde edilen ΔM değeri, malzeme ölçüleri a , b kullanılarak, a ve b arasındaki büyüklük ilişkisine göre Denklem 1 ya da Denklem 2 kullanılarak kritik akım yoğunluğu hesaplanır.

KAYNAKLAR

Bean, C. P. (1962). Magnetization of hard superconductors. *Physical Review Letters*, 8(6):250.

Bölüm 16

KİL BAZLI (TABANLI) GEOPOLİMERLERİN YAPISAL VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ceyda BİLGİÇ¹
Şafak BİLGİÇ²

1 Doç.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye. Orcid No: 0000-0002-9572-3863

2 Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye. Orcid No: 0000-0002-9336-7762

1. GİRİŞ

Kil, esas olarak ince taneli minerallerden oluşan, doğal olarak oluşan bir alüminyum silikattır. Kil, kum ve silt parçacıklarından çok daha küçüktür. Pişirildiğinde veya kurutulduğunda plastiklik kazanır ve sertleşir. Kil, çevresel koşullara (ıslak ve kuru koşullar) bağlı olarak hidrasyona (sıvı alımı) veya dehidrasyona uğrar. Aynı zamanda, mineral yapısında polar (kutupsal) çekimle (suya büyük ilgisi) hapsolmuş değişen miktarlarda su ihtiva edebilir ve iyi bir bulamaç oluşturmak üzere suda kolayca dağılır. Aynı zamanda, suya büyük ilgisi olduğundan (polar çekim ile) mineral yapısına hapsolmuş değişen miktarlarda su ihtiva etmektedir. Bazıları kolayca şişer ve ıslandığında kalınlıkları iki katına çıkar. Çoğu, bir çözeltiden iyonları (elektrik yüklü atomlar ve moleküller) tutma (adsorplama) ve daha sonra koşullar değiştiğinde iyonları serbest bırakma yeteneğine sahiptir. Bu kil minerallerinin yüklü yüzeyinden kaynaklanmaktadır (Guggenheim ve Martin, 1995:255).

Kil, geopolimer yapımında başlangıç malzemesi olarak sıklıkla seçilir çünkü sonucun kolay yorumlanmasına izin verir. Uçucu kül ve cüruf gibi karmaşık hammaddelerin kullanılması, safsızlıkların varlığından dolayı sonuç analizini etkileyebilir. Kil, Al_2O_3 ve SiO_2 bakımından zengindir ve her ikisi de toplam bileşimin % 70-90' nını oluşturur. Kilin bileşimi, kaynağına ve konumun jeolojisine bağlı olarak büyük ölçüde farklılık gösterir.

Geçmiş yıllarda, metakaolin geopolimerleriyle ilgili çalışmalar, başlıca; Si/Al ve Na/Al mol oranları, kilin özgül yüzeyi ve bileşimi, alkali reaktan çözeltisinin alkali konsantrasyonu, alkali modülü, silikat çözeltisi, kütleme koşulu gibi çeşitli parametrelerin etkisi üzerinde yürütülmüştür (Ye ve ark., 2014:1652; Rowles ve ark., 2007:663; Granizo ve ark., 2007:2934).

Geopolimer sentezinde tek başına metakaolin kullanmanın yanı sıra, bazı araştırmacılar harmanlanmış geopolimerler üretmişlerdir. Kalsiyum hidroksit, cüruf ve kül gibi diğer kaynak malzemeler, başlangıç malzemesi olarak metakaolin ile karıştırılır. Bu kaynak malzemeler, geopolimer matris içinde bir bağlayıcı ve dolgu maddesi olarak işlev görür. Örneğin, Alonso ve Palomo (2001), metakaolin geopolimerlerine kalsiyum hidroksit eklediler ve kalsiyum hidroksitin nihai ürünler üzerinde bozulma etkisi olmadığını buldular (Alonso ve Palomo, 2001:25). Ayrıca Yunsheng ve arkadaşları, metakaolin geopolimerlerine % 30 cüruf eklenmesinin mukavemet gelişimine katkıda bulunduğunu bildirmiştir (Yunsheng ve ark., 2010:271). Cüruf % 50' den fazla eklendiğinde mukavemet azalmıştır. Büyük taneli cüruf eklenmiş ürünün mekanik özellikleri geliştirilmiştir (Lecomte ve ark., 2003:2571).

Hem kalsiyum hidroksit hem de cüruf yüksek kalsiyum içeriğine sahip olduğundan, kalsiyum silikat hidrat (CSH) fazları geopolimer matris ile birlikte oluşur. Mikro yapıli geopolimerler Yunsheng ve diğçerleri tarafından elde edilmiştir (Yunsheng ve ark., 2010:271). Saf metakaolin geopolimerinde yalnızca bir homojen geopolimer fazı ortaya çıkarken, cüruf-metakaolin geopolimerinde iki farklı faz gözlenmiştir (CSH ve geopolimer matris). Benzer bir gözlem Buchwald ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Buchwald ve ark., 2007:3024).

2. KAOLİN VE METAKAOLİN BAZLI GEOPOLİMERLER

Kaolinit, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ kimyasal formülü ile alüminyum ve silikon oksitlerden oluşan bir kil mineralidir; aynı zamanda hem oktahedral hem de tetrahedral tabakalarda izomorfik yer değıştirme veya ekstra kafes (çerçeve) fazları olarak bir miktar demir, titanyum veya manganef safsızlıkları içerir. Dünya rezervlerinin çoğunun Türkiye’de bulunduğı kaolin, önemli bir hammadde kaynadır. Kaolin rezervlerinin bol olması ve mevcudiyeti, nispeten düşük maliyetli oluşu gelecekte de kullanılmaya devam edilmesini garanti etmektedir.

Kaolinitin 1:1 tabakalı birim hücresi, bir alümina oktahedral levhalar ile bir silika tetrahedral levhaların oksijenlerini paylaşarak bağlanması yoluyla oluşur. Genişlemeyen (veya şişmeyen) özelliğe sahip kaolinit tabakaları ise, bu birim hücrelerin birbirlerine hidrojen bağı ile bağlanması yoluyla oluşur ki bu bağlar silika tetrahedralindeki oksijen ve alumina oktahedralindeki hidroksiller arasındadır. Tabakalı kaolinit minerali su veya (sıvı) içerisinde heterojen yüzey yüküne sahiptir. Tabakaların bazal düzlemleri, kristal yapı içerisindeki yüksek değerlikli katyonlar yerine düşük katyonların geçmesi sebebiyle bütün pH’larda daima negatif yük sergiler. Bir başka ifadeyle tabaka yüzeyi pH’dan bağımsızdır. Buna mukabil tabakanın kenar yüzeyleri ise içerdiği silanol ($\equiv Si-OH$) ve alüminol ($=Al-OH$) gruplarından dolayı pH’ya bağımlı bir yük davranışına sahip olup, düşük pH’larda pozitif, yüksek pH’larda negatif yük sergiler (Alkan ve ark., 2008:867).

Ham maddenin XRD deseninden, kaolinitin 12.34° civarında 001 düzlemine ait ($d=7.14 \text{ \AA}$) ve 24.64° ’de 002 düzlemine ait karakteristik piklere ($d=3.57 \text{ \AA}$) sahip olduğü görülmüştür (Zhao ve ark., 2004:1). Bununla birlikte, illit, muskovit ve halloysit gibi küçük safsızlıklar da mevcuttur. Kaolinit, yassı morfolojisi ve altıgen ana hatları ile tanınabilir, küçük, iyi oluşturulmuş altıgen plakalar gevşek bir şekilde istiflenmiştir. XRD desenleri, üç boyutlu düzensiz çerçeve yapısına sahip hidratlanmamış silikat camı olan obsidiyenin tamamen amorf karakterini gösterir. Metakaolin, amorf bir malzemedir ve en yüksek kırınım pikleri,

metakaolinde kristal faz olan kuvars (SiO_2), varlığına karşılık gelir. Geopolimerler, X-ışını kırınımına (XRD) göre tamamen amorfudur. Tipik olarak, yaklaşık $27-30^\circ 2\theta$ (derece) 'da bir dağınık halo pikine sahiptirler (Davidovits, 1991:1633; Lecomte ve ark., 2003:2571; Lizcano ve ark., 2012:2607; Zhang ve ark., 2005:23). Geniş dağınık pik, geopolimer matristeki birincil bağlayıcı fazı oluşturan ve geopolimerlerin kuvvetine katkıda bulunan amorf alüminosilikatlara karşılık gelir. Bu dağınık halo pikinin açısı Si/Al oranına bağlıdır. Si/Al oranını artırmak tümsek derecesini düşürür (Lizcano ve ark., 2012:2607). Ayrıca, reaksiyon ürünleri Wang ve arkadaşları tarafından metakaolin geopolimerleri için, 2θ 'da 18° ile 25° arasında halo dağınık piki şeklinde gözlenmiştir (Wang ve ark., 2005:1). Alkalinyondan sonra, kuvars fazının büyük ölçüde reaktif olmadığı (etkisiz olduğu) bulunmuştur. Bununla birlikte, kaolinde bulunan safsızlıkların yoğunluğu (kalsinasyonun tamamlanıp tamamlanmasına bağlı olarak) azalır (Yao ve ark., 2009:49). Geopolimerlerin XRD modelinde, kristallin fazların (özellikle zeolit) büyümesi, geopolimerlerin amorf fazıyla bağlantılı olarak, yaygın olarak görülebilmektedir (Davidovits, 2008:145; Zibouche ve ark., 2009:453).

Mikroyapısal analiz, zaman içinde geopolimer gelişiminin izlenmesine izin verir. Geopolimerlerin mukavemeti, yapının yoğunluğu ve gözenekliliği ile yakından ilgilidir. Genel olarak, düşük gözeneklilik, yüksek yoğunluk ve ince taneli mikroyapı, yüksek mukavemetli geopolimerlere katkıda bulunur.

Wang ve diğerleri tarafından elde edilen SEM görüntüleri; metakaolin geopolimerlerinin kompakt olmadığını ve geopolimerizasyon reaksiyonundan sonra katmanlı yapısını koruduğunu göstermektedir (Wang ve ark., 2005:1). Bu durum Davidovits'in, reaksiyonun geopolimerlerin yüzeyinde meydana geldiği ifadesini kabul eder ve kanıtlar (Davidovits ve ark., 2008:145).

Metakaolin geopolimerlerinin zaman içinde mikro yapı gelişiminde, gevşek istiflenmiş metakaolin parçacıklarının yüzeyinde sünger benzeri geopolimer küresel birimlerin çökmesi, yoğunlaşması ve boşlukların içinde ve dışında yoğun geopolimer matrisinin sürekli oluşumu gözlemlendi. Çeşitli numunelere ait olan SEM görüntüleri, metakaolin bazlı geopolimerin homojen ve yoğun mikroyapısının yerini mikro çatlaklara ve hatta reaksiyona girmemiş metakaolin partiküllerine sahip bir yapıya bıraktığını göstermiştir (Zhang ve ark., 2005:23; Sun ve ark., 2004:935).

Geopolimerlerin FTIR spektrumları, genel olarak düzensiz geopolimer yapısı için karakteristik olan $900-1300 \text{ cm}^{-1}$ bölgesinde geniş bir band ile karakterize edilmektedir. Metakaolin bazlı bir geopolimer

çalışmasında 1300-900 cm^{-1} bölgesinde gözlemlenen en yüksek absorpsiyon piki, Si–O–T bağlarının asimetrik gerilme titreşimine aittir. 1169 ve 1063 cm^{-1} 'deki bandlar, metakaolinin asimetrik gerilme modunu gösterir ve bu pikler tüm spektrumlarda mevcuttur. 995 cm^{-1} 'deki yüksek frekans bandı, geopolimer yapının tetrahedrası arasındaki oksijen bağlarının asimetrik titreşimine karşılık gelir (Rovnanik, 2010:1176).

Farklı katı/sıvı oranlarına sahip metakaolin bazlı geopolimerlerle ilgili başka bir çalışmada FTIR spektrumlarındaki ana bandlar 958 ile 967 cm^{-1} arasında gözlenmiştir. Tüm geopolimer örneklerinde bulunan 660 cm^{-1} 'de bulunan band, zeolit yapısı ile ilgilidir. 3300 cm^{-1} 'deki FTIR bandı, OH gerilme titreşimini temsil eder. 1645 cm^{-1} 'deki diğer absorpsiyon piki, geopolimer çerçevesinin (kafesinin) yüzeyinde adsorbe edilen zayıf H_2O bağları nedeniyle H_2O bükülmesine aittir (Liew ve ark., 2012:440). Kaolinit ve uçucu kül bazlı geopolimerin FTIR spektrumları, 539 cm^{-1} civarında konumlanan piklerin Si–O–Al bağları ile ilgili olduğunu gösterir (Van Jaarsveld ve ark., 2002:63; Stubican ve Roy, 1961:32). 1009 ve 1033 cm^{-1} 'de bulunan FTIR karakteristik titreşimleri, Al–O ve Si–O bağlarının asimetrik gerilmesinden kaynaklanmaktadır (Van Jaarsveld ve ark., 2002:63; Flanigan ve ark., 1971:201). 1087 cm^{-1} 'deki başka bir karakteristik pik, tetrahedral tabakalar arasındaki bağlantıların asimetrik gerilmesine karşılık gelir (Van Jaarsveld ve ark., 2002:63).

Sıcaklık değişimlerine karşı ağırlık kaybı, termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel termogravimetrik analiz (DTGA) ile ölçülür. Numunelerin ısıl kararlılığı hakkında bilgi alınır. TGA, termal analiz aletleri ile belli bir akış hızında azot kullanılarak yapılır. Geopolimerlerin ısıl davranışı, alkali ile aktive edilmiş atık katalizörü-metakaolin bazlı geopolimerler ile ilişkili çalışmaya göre dört ardışık aşamaya ayrılabilir (Cheng ve ark., 2015:710). Adımlar;

- (i) Serbest suyun uzaklaştırılması
- (ii) Geopolimer bileşenlerin ayrışması (atomizasyonu)
- (iii) Zeolitiklerin dehidroksilasyonu
- (iv) Ağırlık kaybının stabilizasyonu (sabitlenmesi)

Metakaolin ısıl işleminden sonra elde edildiğinden, serbest suyun uzaklaştırılması olan ilk aşamada ağırlık kaybının düşük miktarlarda kalması beklenir. Kaolinitin kalsinasyonu sırasında serbest suyun çoğu kaybolur. Kil bazlı geopolimer numunelerde yapılan TGA, artan Si/Al molar oranının daha yüksek ağırlık kayıplarına neden olduğunu ortaya koymuştur. Ağırlık kayıplarının çoğu, yapısal suyun buharlaşması ve karbonat malzemelerin ayrışması ile ilgilidir.

3. PERLİT BAZLI GEOPOLİMERLER

Perlit, riyolitik bir bileşime ve % 2 ila 5 birleşik suya sahip, genellikle açık gri olan camsı bir volkanik kayadır. Kimyasal olarak, perlit cevheri SiO_2 , Al_2O_3 , ve daha az miktarlarda birkaç metal oksitten (sodyum, potasyum, demir, kalsiyum ve magnezyum) oluşur. Birçok ortamda kimyasal olarak inert olan % 70-75 SiO_2 içerir ve bu nedenle çeşitli işlemlerde ve malzemelerde mükemmel filtre yardımcıları ve dolgulardır. Perlit temelde obsidyen mineralidir. Perlit maden yatakları dünyanın birçok ülkesinde mevcuttur, ancak geliştirilmiş ürün yalnızca ticari olarak geliştirilmiş tesislere sahip ülkelerde mevcuttur (Al-Mashaikie ve Al-Hawbanie, 2010:195).

Dünyadaki perlit üretimi azalan üretim sırasına göre sırasıyla, Türkiye, Yunanistan ve Amerika Birleşik Devletleri % 41, % 26, % 18 şeklindedir. Dünyaya bakıldığında en fazla perlit rezervi Türkiye'dedir. Perlit rezervi miktarı dünyadan oldukça fazladır; buda Türkiye ekonomisine önemli katkılar sağlayabileceğini bize göstermektedir. Dünya perlit rezervlerinin 8 milyar ton civarında olduğu tahmin edilmektedir ve bunun 5,7 milyar tonu dünya rezervlerinin yaklaşık %70'inden fazlasına tekabül eden miktarı Türkiye'de bulunmaktadır (Bolen, 2011).

Öğütülmüş ve geliştirilmiş perlit ile hazırlanan geopolimer harçtaki ve agreganın kaynağındaki oluşan reaksiyon ürünleri X-ışını kırınımı (XRD) ile belirlenmektedir. Harçtaki agreganın fazının kuvars olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, albit ve filipsit için özellikle 2θ da 20° ile 30° arasında görülen XRD pikleri, harçta sodyum alümino silikat hidrat (N-A-S-H) tipi jel oluşumlarının meydana geldiğini göstermiştir.

Perlit esaslı geopolimer harcın SEM mikro fotoğraflarından, harcın mikroyapısında mikro gözenekler ve mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Isıyla kür (sertleştirme) işlemi nedeniyle SEM görüntülerinde büzülme çatlakları görüldü. Buna ek olarak, geopolimerizasyon sürecinin sonucu oluşan jel oluşumları da farklı görünümde görülmüştür. Harçta kullanılan kum ile harç matrisi arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinde mikro çatlaklar görülmüştür.

Enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ile geopolimer harcın element analizi üç farklı alan seçilerek gerçekleştirilmiştir. İşaretlenen alanlarda farklı oranlarda Si, Al, Na, Ca ve O elementleri tespit edilmiştir. Bu elementlerin varlığı, harçtaki ham öğütülmüş perlitin geopolimerizasyonu ile N-A-S-H ve ayrıca kalsiyumca (Ca) zengin sodyum kalsiyum alümino silikat hidrat (N-C-A-S-H) tipi jel oluşumlarının oluştuğunu göstermiştir.

Genleştirilmiş perlit (EP) granülleri, 0-1 mm aralığında bulunan farklı boyutlardaki, kristal benzeri gözenekli ve camsı bir yapıya sahiptir.

Granüller esas olarak şiddetli genleşme süreci nedeniyle düzensiz küçük parçalara sahip parçalanmış yüzeyler ve izole hücreler olarak açık ve kapalı gözenekler, ince duvarlı kabarcıklar ve içi boş mikro küreler içeren oldukça gözenekli bir mikro yapı ile karakterize edilirler (Tsikouras ve ark., 2016:1). Geopolimer nano-çökelti oluşmuştur ve bunlar, EP'nin parçalarının ve ince duvarlı kabarcıklarının sodyum-silikat çözeltisi ile reaksiyonuna atfedilmiştir. Alkali bağlayıcının yanı sıra, nano çökelti de kısmen reaksiyona giren EP parçacıkları için bir bağlayıcı görevi görmüştür. Ayrıca reaksiyona girmemiş sodyum silikat, alkali karbonatlara ait çubuk/iğne benzeri fazlar oluşturmuştur (Medri ve ark., 2013:7657). Uzun süre suda beklemenin ardından, hem çubuklar hem de nano-çökelmiş perlit döküntüsü kaybolmuş, çünkü bunlar sodyum silikat içine gömülmüştür. EP granüllerinin yüzeyleri ise sodyum-silikat çözeltisiyle temas halinde yüzeysel bir reaksiyona (geopolimerizasyon) işaret ederek lekeli görünmüştür.

Alümino-silikat bağları, yani Si-O-Al, reaksiyona girmiş ve reaksiyona girmemiş ham perlitin FTIR spektrumları ile doğrulanır.

Yaklaşık 1065 cm^{-1} 'deki titreşim, Si-O ve Al-O bağının bir göstergesidir. Benzer şekilde 465 , 609 , 797 cm^{-1} dalga boyu sırasıyla Al-O ve Si-O, Si-O-Si ve Si-O-Si bağları ile ilgilidir, ayrıca 1424 cm^{-1} dalga boyu O-C-O/CO₃, yani CaCO₃ bağıdır (Cătănescu ve ark., 2012:3).

Spektrumda bulunan ana pikler, SiOH grubunda (3600 cm^{-1}) OH gerilmesi ve H-O-H moleküler su asimetrik ve simetrik gerilme titreşimleri (3650 'den 3650 'ye kadar) nedeniyle, 3750 ile 3300 cm^{-1} arasında geniş bir bant içerir. 1635 cm^{-1} 'daki keskin pik, kafes ve geçiş (doku arası su) suyunun H-O-H bükülmesi için tipik olarak geliştirilmiş perlitin FTIR spektrumunda gözlenmiştir (Abalos ve Erdmann, 2003:59). Asimetrik çapraz bağlı Si-O-Si, Al-O-Si ve çapraz bağlı olmayan Si-O gerilme titreşimlerini yansıtan ana band 1350 ile 850 cm^{-1} arasındadır (Lee ve Van Deventer, 2003:8726). 1050 - 1010 cm^{-1} 'deki bir ana band ve aynı alüminosilikat yapıdaki farklı yapısal birimlerin asimetrik gerilmesine atfedilen üç uydu bandı, numunelerin amorf doğası nedeniyle geniştir (SiO₄ tetrahedralarının yoğunlaşma derecesine göre) (Lee ve Van Deventer, 2003:8726; Zhang ve ark., 2008:522). Bandın genişlemesi, 4 köprülü oksijenle çevrelenmiş tetrahedral Si ile ilgili sinyalin katkısının artmasından kaynaklanmaktadır (Q4 yapısı, 1200 cm^{-1}), çünkü daha yüksek bağlanabilirlik değerlerine sahip türler daha yüksek enerjilerde absorblanır (Lee ve Van Deventer, 2003:8726).

TG, belirli bir oranda ısıtıldığında numunenin ağırlık değişiminin miktarını ve oranını ölçerken, Diferansiyel Termal Analiz (DTA), ısıtılırken numune ile termal olarak inert bir referans malzeme arasındaki

sıcaklık farkını ölçer. Ham öğütülmüş perlitteki ağırlık kayıpları her sıcaklık için birbirinden farklıdır. Bu nedenle, ham öğütülmüş perlitin (reaksiyona girmiş) geopolimerizasyonunun meydana geldiği belirlenebilir. Genleştirilmiş perlitin ısı davranışı, dilatometrik analizi (türevi) ile sıcaklığa bağlı olarak izlenmiştir. DTG/TGA eğrileri perlitin ekzotermik reaksiyon verdiğini ve faz değişiminin 500 ile 600 °C arasında başladığını göstermektedir. TGA eğrilerinde 100 ile 450 °C arasında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak perlitin kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu, perlitteki uçucuların (nem ve organik maddeler gibi) kaybına bağlanabilir. Bu aralıktan sonra perlitin izotermal olmayan bozunma davranışı gözlenmiştir.

Ham perlit ve geopolimerlerin TGA ve DTG analizi; reaksiyon ürünlerindeki fiziksel olarak bağlı su içeriği kütle oranından bağımsız görünmektedir; ayrıca aktivatör modülü çok sınırlı bir etki gösterir. 105 ve 180 °C arasında ihmal edilebilir bir kütle kaybından sonra, tüm numuneler, yaklaşık 600 °C'ye ısıtılmaya kadar kütlede kademeli bir azalma gösterir, ardından 600 ile 700 °C arasında oldukça düşük kütle kaybına sahip kararlı bir eğrinin izlediği gözlenmiştir. 180 °C'den sonra kütle kaybı, reaksiyon ürünlerinin (esas olarak C–A–S–H tipi jeller) kademeli bozunmasına bağlanır.

Perlit ve genleştirilmiş perlit örneklerinden elde edilen metakaolin bazlı geopolimerler literatürde bildirilenlere benzer modeller göstermiştir (Duxson ve ark., 2007:3044; Bell ve ark., 2009:607). Sıcaklık artışı ile dilatometrik profil, meydana gelen olayların bir fonksiyonu olarak kırılmış olabilir. 100-200 °C sıcaklık aralığında hızlı bir büzülme meydana gelmiştir (türevde negatif pik) ve bu dehidrasyonla, yani artık suyun buharlaşması ve gözeneklerde hapsolmuş suyun desorpsiyonuyla ilişkilidir. Daha sonra T–OH (T=Si,Al) grubunun dehidroksilasyonuna bağlı olarak termal büzülme yavaşlamış ve 600 °C 'de % 1,2 değerine ulaşmıştır. Genleştirilmiş perlit granülü, yaklaşık 580 °C'de bir camsı faz geçişine ve ardından alkali bağlayıcı nedeniyle viskoz akış üzerine büzülme maruz kalmıştır (Papa ve ark., 2014:409).

4. SEPIYOLİT BAZLI GEOPOLİMERLER

Sepiyolit, $(\text{Si}_{12}\text{O}_{30}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ birim hücre formülüne ve lif eksenine paralel yönde (c eksen) büyüyen kanal boşluklarına sahip, doğal hidratlanmış magnezyum silikat kil mineralidir (Ruiz-Hitzky, 2001:86). Yapısı smektitlerden oldukça farklıdır. Fiber yönünde büyüyen blokların ve boşlukların değişiminden oluşur. Bu minerallerin kristal yapıları 2:1 fillosilikat yapısını içeren şeritlerin birbirlerine bağlanmalarıyla meydana gelir. Her bir şerit diğerine ters-düz ardalanmalı (dizilmiş) SiO_4 tetrahedronları ile (Si–O–Si bağları) bağlanır. Tepe oksijenleri aynı yönde

olan tetrahedronlar, x-eksenine paralel şeritler oluştururken, zıt yönde olanları da oktahedral katyonlara bağlanarak lif doğrultusunda (x-ekseni boyunca) sürekli, dik doğrultuda (y-ekseni boyunca) sınırlı boyutta 2:1 katmanlı yapı oluştururlar. Şeritlerin sepiyolitte üç piroksen-tipi zincirin birbirine bağlanmasıyla oluşan genişlikleri vardır. Şeritlerin arasındaki dikdörtgen kanallarda Ca ve Mg iyonları ile değişen miktarlarda zeolitik su bulunur. Yapı formülünde $(OH)_2$ olarak gösterilen su molekülleri ise zincir kenarlarındaki oktahedral Mg'a koordine olurlar, ki bunlar adsorpsiyon için ana aktif merkezlerdir (Casal ve ark., 2001: 245).

Alüminosilikat inorganik polimerler, XRD desenlerinde yaklaşık 27-29° 2θ'da merkezlenmiş özelliksiz bir pik (hump piki) oluşturduklarında, X-ışını amorf olarak adlandırılırlar (Duxson ve ark., 2007:2917). Diğer yandan alüminosilikat geopolimerlerin FTIR spektrumları ise esas olarak 970-1090 cm^{-1} arasında bulunan Si-O-T (T:Si, Al) titreşimlerinin asimetrik gerilmesiyle karakterize edilir. Bu özellik, geopolimerizasyonun ana parmak izi (tanınma) bölgesidir (Panias, 2007:246). Si-O-Si titreşimlerinin simetrik gerilmesi 550-750 cm^{-1} bölgesinde yer alır. Si-O-Si ve O-Si-O bükülmesine atfedilen absorpsiyon bantları 460-510 cm^{-1} arasında tespit edilmiştir. Suyun gerilme (-OH) ve eğilme (H-O-H) titreşimleri sırasıyla 3500 ve 1600 cm^{-1} 'de tespit edilmiştir (Panias, 2007:246; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005:1984). Bu gerilme ve eğilme titreşimleri, polimerik kafesin geniş boşluklarında yüzeyde absorplanan veya hapsedilen bağlı su moleküllerine aittir.

Geleneksel alüminosilikat geopolimerlerin basınç dayanımı, 1,15'ten 2,15'e kadar, farklı Si/Al oranları ve sabit bir Al/Na = 1 oranıyla önceki bir çalışmada araştırılmıştır. Si/Al 1,90 olduğunda basınç dayanımının en yüksek değere sahip olduğu bildirilmiştir. Si/Al oranı arttıkça basınç dayanımı hızla artmış; ancak Si/Al = 2,15 olan örnekler Si/Al = 1,90'dan daha düşük basınç dayanımı ortaya koymuştur. Bu azalma, tepkimeye girmemiş malzemelerin bir sonucu olarak açıklanmıştır. Ayrıca, basınç dayanımı sonuçları da SEM görüntüleriyle ilişkilendirilmiştir. Si/Al ≤ 1,40 içeren numunenin mikroyapısının birbirine bağlı büyük gözeneklere, gevşek yapıli çökeltilere ve reaksiyona girmemiş malzemeye sahip olduğunu ve bu nedenle düşük mekanik mukavemete yol açtığını ortaya koymuştur. Aksine, Si/Al oranı ≥ 1,65 olan geopolimerler, daha küçük izole gözenekler içeren, büyük ölçüde homojen bağlayıcıdan oluşan bir mikro yapı sergiler. Geopolimerlerin basınç dayanımı sonuçları aydınlatılmış ve mikro yapılarıyla ilişkilendirilmiştir (Duxson ve ark., 2005:47).

Sepiyolit bazlı geopolimer çalışmalarında XRD sonuçları, sepiyolitın 750 °C'de 20 dakika dehidroksilasyondan sonra amorf bir materyale dönüştüğünü ortaya koymuştur. Isıl işlem görmüş sepiyolitın alkali aktivasyonu ile elde edilen geopolimerin XRD deseni amorf özelliklere

sahip olduklarını göstermiştir (MacKenzie ve ark., 2013:1787). Bu XRD deseni, bir alüminosilikat geopolimerin XRD desenine çok benzemektedir.

Ham sepiyolitın FTIR spektrumu, Si–O–Si için, düzlem içi titreşimlerinde yaklaşık 1023 cm^{-1} 'de konumlandırılmış bir ana bant gösterir. Ek olarak 1209 cm^{-1} 'de zayıf bir bant, Si–O–Si bağları ile korelasyonlu tetrahedral tabakaya sahip mineraller için karakteristiktir. Ayrıca, ham sepiyolit genellikle sırasıyla karbonat (dolomit) safsızlıklarına ve çeşitli su moleküllerine atfedilen yaklaşık 1449 cm^{-1} ve $3419\text{--}3689\text{ cm}^{-1}$ arasında bir band sergiler. Çeşitli su moleküllerinin varlığını gösteren hidroksil grupları, adsorbe edilmiş zeolitik su, oktahedral olarak koordine edilmiş OH ile Mg ve uç Mg-OH bağlarını ifade etmektedir (Perraki ve Orfanoudaki, 2008:589).

Ham sepiyolitın termogravimetrik analizi, $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de adsorbe edilmiş su kaybına atfedilen ilk dehidrasyon pikini gösterir, bu da literatürle tutarlıdır (Frost ve Ding, 2003:119). Diğer yandan, ısıl işlem görmüş sepiyolit, ısıl işlem sonucunda su içeriğinin çoğunu kaybettiği için önemli bir ağırlık kaybı göstermez.

Atık katalizör-metakaolin bazlı geopolimerler üzerine yapılan önceki bir çalışmaya göre, geopolimerlerin termogravimetrik analizi birbirini izleyen dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar (1) serbest suyun uzaklaştırılması; (2) geopolimer bileşenlerin ayrışması (atomizasyonu); (3) zeolitiklerin tamamen dehidroksilasyonu; ve (4) ağırlık kaybının stabilizasyonu (sabitlemesi) (Cheng ve ark., 2015:710).

Toplam alan, önceki çalışmalarda belirtildiği gibi üç sıcaklık aralığına bölünmüştür: $25\text{--}300$, $300\text{--}510$ ve $510\text{--}760\text{ }^{\circ}\text{C}$. DTGA spektrumlarında geopolimerler için üç spesifik endotermik pik belirir, ilki $61\text{--}93\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. İkinci farklı pik $354\text{--}426\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır ve üçüncüsü yaklaşık $605\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Önceki çalışmalara göre, ilk endotermik pik, geopolimer yüzeyden serbest suyun ve geniş gözeneklerden zayıf bir şekilde absorplanan suyun uzaklaştırılmasını temsil eden $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Sepiyolit bazlı geopolimerlerde de benzer şekilde $61\text{--}93\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında serbest suyun uzaklaşması görülmektedir. Ham sepiyolit $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bir dehidrasyon piki sergilerken, geopolimerler daha yüksek sıcaklıklarda dehidrasyon pikleri ($61\text{--}93\text{ }^{\circ}\text{C}$) sergilemişlerdir. Bu, sepiyolit ham maddesine kıyasla geopolimerlerin artan termal kararlılığının olası bir göstergesidir. $354\text{--}426\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında geopolimerler için ikinci endotermik pik, kimyasal olarak bağlı suyu ve yapı içindeki karbonatların ayrışmasını temsil eder. İlgili çalışmalarda karşılık gelen pik $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarındadır (Cheng ve ark., 2015:710; Cheng ve ark., 2015:74). $510\text{--}760\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığındaki üçüncü endotermik pikin, bağlayıcı içinde

bulunan zeolitlerin yaklaşık 620 °C’de dehidroksilasyonundan kaynaklandığı bildirilmektedir (Cheng ve ark., 2015:710).

5. SONUÇLAR

Geopolimerik malzemeler, çevresel iyileştirme sorunlarına değerli çözümler sunabilirler. (i) Erişilebilir ve oldukça bol miktarda bulunan hammaddelerden ve (ii) düşük veya sıfır sera gazı emisyonlu oda sıcaklığı yaklaşımlarını kullanarak sentezlenebilmeleri, geopolimerleri daha temiz üretim ve yeşil teknolojiler için uygun bir malzeme haline getirmiştir. Bu aynı zamanda inşaat, yüzey mühendisliği ve sağlık hizmetleri de dahil olmak üzere birçok endüstride “yeşil teknoloji” fırsatları sunar. Bu malzemenin kataliz uygulamaları ve enerji üretimi için gelişmiş kullanımı, özellikle atık arıtma ve su ıslahına odaklanan endüstrilerde fayda sağlayacaktır.

Bu çalışma, ham kil minerallerinin ve geopolimerlerinin karakterizasyonu için kullanılan çeşitli teknikleri açıklamaktadır. Geopolimerlerin yapısını anlamak, istenen özelliklere sahip geopolimerleri tasarlamak için çok önemlidir. Yapı ve fiziksel özellikler arasında kurulan ilişkiler, ürün özelliklerinin kontrol edilmesi açısından önemli olacaktır. Ham killer ve elde edilen geopolimerler farklı analiz (TGA-DTA) teknikleriyle karakterize edilebilir. Sentezlenen geopolimerlerin amorf veya kristal fazını araştırmak için X-Işını Kırınımı ölçümleri yapılır. Fourier Dönüşümü Kızılötesi spektroskopisi (FTIR) geopolimerlerin parmak izi bölgesini anlamak için kullanılır. Taramalı Elektron Mikroskopu görüntüleri ile sentezlenen geopolimerlerin yüzey mikro yapıları incelenir. Malzemelerin termal bozunması ve stabilitesi (kararlılığı), çeşitli ısıtma hızlarında termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel termogravimetrik analiz (DTG) aracılığıyla incelenir. TGA analizine göre, serbest su molekülünün buharlaşması numunede ağırlık kaybına neden olan ana faktördür.

Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenen projenin (2018-2233) bir parçasıdır.

Kaynaklar

- Abalos, R., Erdmann, E., Destefanis, H.A. (2003) Surface modifications of volcanic glasses (perlites) by water vapor, *Latin American Applied Research*, 33, 59-62.
- Alkan, M., Kalay, B., Doğan, M., Demirbaş, O. (2008) "Removal of copper ions from aqueous solutions by kaolinite and batch design", *Journal of Hazardous Materilas*, 153(1-2), 867-876.
- Al-Mashaikie, S.Z.A.K., Al-Hawbanie A.M. (2010) "Petrography and geochemical study of the perlite rocks from Bait Al-Qeyarie, Kawlan Area, Yemen". *JAKU: Earth Sci* 218(2), 195-217.
- Alonso S., Palomo A. (2001) "Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures", *Cement and Concrete Research*, 31(1), 25-30.
- Bell, J.L., Driemeyer, P.E., Kriven, W.M. (2009) "Formation of ceramics from metakaolinbased geopolymers. Part II: K-based geopolymer" *Journal of the American Ceramic Society*, 92, 607-615.
- Bolen P. W. (2011) USGS Mineral Commodity Summaries 2011 U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia-USA.
- Buchwald A., Hilbig H., Kaps C. (2007) "Alkali-activated metakaolin-slag blends-performance and structure in dependence of their composition" *Journal of Materials Science*, 42, 3024-3032.
- Cătănescu, I., Georgescu, M. and Melinescu, A. (2012), "Synthesis and characterization of geopolymer binders from Fly ash", *University POLITEHNICA of Bucharest The Scientific Bulletin Series B: Chemistry and Materials Science*, 74(1), 3-14.
- Casal, B., Merino, J., Serratos, J.M., Ruiz-Hitzky, E., (2001), "Sepiolite-based materials for the photo- and thermal-stabilization of pesticides", *Applied Clay Science*, 18, 245-254.
- Cheng, H., Lin, K.L., Cui, R., Hwang, C.L., Chang, Y.M., Cheng, T.W. (2015) "The effects of $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratio on the characteristics of alkali-activated waste catalyst-metakaolin based geopolymers", *Construction and Building Materials*, 95, 710-720.
- Cheng, H., Lin, K.L., Cui, R., Hwang, C.L., Cheng, T.W., Chang, Y.M. (2015) "Effect of Solid-to-Liquid Ratios on the Properties of Waste Catalyst–Metakaolin Based Geopolymers", *Construction and Building Materials*, 88, 74-83.
- Davidovits, J. (1991) "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.

- Davidovits, J. (2008) “Geopolymer Chemistry and Applications”, 2nd edition., Ch. 8, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 145-192 pp.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., Van Deventer, J.S.J. (2005) “Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J. S. J. (2007) “Geopolymer Technology: the Current State of the Art”, *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- Duxson, P., Lukey, G.C., Van Deventer, J.S.J. (2007) “Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 C”, *Journal of Materials Science*, 42, 3044-3054.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. (2005) “Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator”, *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1984-1992.
- Flanigan, E. M., Khatami, H., Szymanski, H.A. (1971) “Molecular Sieve Zeolites”, *Advances in Chemistry Series*, American Chemical Society, Washington, DC, 101, 201-229.
- Frost, R. L., Ding, Z. (2003) “Controlled Rate Thermal Analysis and Differential Scanning Calorimetry of Sepiolites and Palygorskites”, *Termochimica Acta*, 397 (1-2), 119-128.
- Granizo M.L., Blanco-Varela M.T., Martinez-Ramirez S. (2007) “Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties”, *Journal of Materials Science*, 42, 2934-2943.
- Guggenheim S., Martin, R.T. (1995) “Definition of clay and clay mineral: Journal report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees”, *Clays and Clay Minerals*, 43, 255-256.
- Lecomte I., Liegeois M., Rulmont A., Cloots R. (2003) “Synthesis and characterization of new inorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag”, *Journal of Materials Science*, 18(11), 2571-2579.
- Lee, W.K.W., Van Deventer, J.S.J. (2003) “Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates”, *Langmuir*, 19, 8726-8734.
- Liew, Y. M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M., Heah, C.Y. (2012) “Optimization of Solids-to-Liquid and Alkali Activator Ratios of Calcined Kaolin Geopolymeric Powder”, *Construction and Building Materials*, 37, 440-451.

- Lizcano M., Kim H.S., Basu S., Radovic M. (2012) Mechanical properties of sodium and potassium activated metakaolin-based geopolymers. , *Journal of Materials Science*, 47, 2607-2616.
- MacKenzie, K. J. D., Bradley, S., Hanna, J.V., Smith, M.E. (2013) “Magnesium Analogues of Aluminosilicate Inorganic Polymers (geopolymers) from Magnesium Minerals”, *Journal of Materials Science*, 48(4), 1787-179.
- Medri, V., Papa, E., Dedecek, J., Jirglova, H., Benito, P., Vaccari, A., Landi, E. (2013) “Effect of metallic Si addition on polymerization degree of in situ foamed alkalialuminosilicates” *Ceramics International* , 39, 7657-7668.
- Panias, D., Giannopoulou, I.P., Perraki, T. (2007) “Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301 (1-3), 246-254.
- Papa, E., Medri, V., Landi, E., Ballarin, B., Miccio, F. (2014) “Production and characterization of geopolymers based on mixed compositions of metakaolin and coal ashes”, *Materials Design*, 56, 409-415.
- Perraki, T., Orfanoudaki, A. (2008) “Study of Raw and Thermally Treated Sepiolite from the Mantoudi Area, Euboea, Greece. X-ray Diffraction, TG/DTG/DTA and FTIR Investigations”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91(2), 589- 593.
- Rovnanik P. (2010) “Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer”, *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183.
- Rowles M.R., Hanna J.V., Pike K.J., Smith M.E., O’Connor B.H. (2007), ²⁹Si, ²⁷Al, ¹H and ²³Na MAS NMR study of the bonding character in aluminosilicate inorganic polymers. *Applied Magnetic Resonance*, 32, 663-689.
- Ruiz-Hitzky, E. (2001) Molecular access to intracrystalline tunnels of sepiolite, *Journal of Materials Chemistry*, 11, 86-91.
- Stubican, V., Roy, R. (1961) “Isomorphous Substitution and Infrared Spectra of Lattice Layer Silicates”, *American Mineralogist*, 46, 32-51.
- Sun W., Zhang W., Lin W., Liu Z.Y. (2004) “In situ monitoring of the hydration process of K-PS geopolymer cement with ESEM”, *Cement and Concrete Research*, 34, 935-940.
- van Jaarsveld, J. G. S., van Deventer, J. S. J., Lukey, G.C. (2002) “The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash- and Kaolinite-Based Geopolymers”, *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.
- Wang H., Li H., Yan F. (2005) “Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268 (1-3), 1-6.
- Tsikouras, B., Passa, K.S., Iliopoulos, I., Katagas, C. (2016) “Microstructural control on Perlite expansibility and geochemical balance with a novel

application of Isocon analysis: an example from Milos Island Perlite (Greece)”, *Minerals*, 6,1-14.

Yao X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y. (2009) “Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry” *Thermochimica Acta*, 493, 49-54.

Ye N., Yang, J., Ke, X., Zhu, J., Li, Y., Xiang, C., Wang, H., Li L., Xiao B. (2014) “Synthesis and Characterization of Geopolymer from Bayer Red Mud with Thermal Pretreatment”, *Journal of American Ceramic Society*, 97(5), 1652-1660.

Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L. (2010) “Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement”, *Applied Clay Science*, 47 (3-4), 271-275.

Zhang, Y., Sun, W., Li, Z. (2008) “Infrared spectroscopy study of structural nature of geopolymeric products”, *Journal o Wuhan University of Technology Materials Science Edition*, 23(4), 522-527.

Zhang Y.S., Sun W., Li Z.J. (2005) “Hydration process of potassium polysialate (K-PSDS) geopolymer cement”, *Advances in Cement Research*, 17(1), 23-28.

Zibouche, F., Kerdjoudj, H., d’Espinoze de Lacailierie, J.B., Van Damme, H.L., (2009) “Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals”, *Applied Clay Science*, 43(3-4), 453-458.

Zhao, H., Deng, Y., Harsh, J.B., Flury, M., Boyle, J.S., (2004). “Alteration of kaolinite to cancrinite and sodalite by simulated Hanford tank waste and its impact on cesium retention” *Clays and Clay Minerals*, 52 (1), 1-13.

Bölüm 17

BİRİNCİL GERİ DÖNÜŞÜM PLASTİK HAMMADDELERDE KALIP SICAKLIĞININ ÜRÜNLERİN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fevzi AKGÜL¹
Remzi VAROL²

1 Süleyman Demirel Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği AB Dalı, Isparta, Türkiye, fevziakgul@hotmail.com

2 Süleyman Demirel Üni., Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

GİRİŞ

Plastik, yaygın ve gittikçe artan sayıda uygulamada kullanılan birçok yapay veya yarı yapay malzemeyi tanımlayan genel bir terimdir. Plastik terimi, Yunanca ‘da döküme elverişli manasındaki “plastikos” ve dökme manasındaki “platos” sözcüğünden elde edilmiştir. Malzemenin elde edilmiş esnasında dövülebilirliği veya yoğrulabilirliği sebebiyle dökülmesine, basılmasına veya film, şişe, tabak, tüp, lif, kutu ve daha oldukça fazla biçime sokulabilmesini esas alan bir isimlendirmedir (Pagev, 2019). İnsanoğlu, insanlık tarihinden beri, metal, seramik, ahşap gibi ürünler dışında, doğada bulunmayan malzemeler geliştirmeye uğraşmıştır. Plastikler 20. yüzyılın başlarından itibaren kullanılmaya başlamıştır. 20. yüzyılda Amerikalı bir iş insanı, kaliteli bir bilyardo topu yaptırabilmek için büyük bir ödül ortaya koymuş, Berkeley’de, sentezini yaptığı Fenol formaldehit reçinesini (Bakalit) üretmiştir. Bulunan plastik türleri ilk keşfedildiği gibi kullanılmamış olup, birçok modifikasyondan sonra kullanılabilmiştir (Esenlik, 2001). Bu tarihten itibaren, plastik kullanımı hız kazanmış olup, otomobil, beyaz eşya, tarım aletleri, mobilya parçaları, mutfak gereçleri vb. birçok sektörde kullanımı, maliyet ve diğer şartların da uygun olmasından dolayı ciddi şekilde artmıştır. Plastikler, aynı ahşap, kâğıt veya yün gibi doğaldır. Plastikler, günümüzün gereksinimleri ile çevreye ait endişeler arasındaki dengeyi sağladığı için bugünün ve geleceğin tercih edilen kullanışlı mühendislik malzemeleri arasındaki yerini almıştır (Akyüz, 1998).

Plastik enjeksiyon yöntemiyle imal edilecek ürünlerden beklenen özellikler çok değişiklik göstermesine rağmen temel özelliklerden biri olan mekanik özelliklerin belli değerlere sahip olması beklenir. Bunun yanı sıra diğer pek çok özellik kazandırılmış ürünlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bunlar gerçekleştirilirken imalat esnasında işlem parametrelerinin uygun seçilmesi, kaliteden ödün vermeden daha az enerji kullanımı ve birincil geri dönüşüm malzemelerin yaygın bir şekilde, belli bir oranın üzerinde kullanılması mühendislik açısından önemlidir. Bu açıdan bakıldığında imalat çevrimi için önemli bir parametre olan kalıp sıcaklığı orijinal hammaddeler için genel anlamda bilinmektedir. Ancak birincil geri dönüşüm hammaddeler için kalıp sıcaklığı konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada belli oranlarda birincil geri dönüşüm malzemesi ilave edilmiş PP ve ABS malzemelerin enjeksiyon kalıplamasında uygun kalıp sıcaklığının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Akrilonitril bütadien stiren (ABS)

Akrilonitril bütadien stiren hammaddesi akrilonitril ve stiren polibüdanle polimerizasyon yolu ile elde edilir. Bu monomerlerin farklı oranlarda eklenmesi ile çeşitli abs hammaddeleri elde edilir. Bütadiyen ürünü daha set yaparken stiren hammaddesi işlenebilirlik özelliği kazandırır. ABS nin çok geniş uygulama alanları vardır. Otomotiv, beyaz eşya ve elektronik, büro makineleri gibi birçok endüstride kullanılır (Resinex, 2020).

Polipropilen (PP)

Dünyada en yaygın kullanılan plastiktir. Otomotiv, tekstil, alt yapı ve inşaat sektörleri gibi birçok sektörde kullanılır. Kimyasal maddelere karşı dayanıklılık, yüksek elektriksel dayanımı, yüksek mukavemet, neme ve ısıya karşı dayanıklılıklarından dolayı tercih edilirler (Enerji Portalı, 2018).

Yöntem

Mühendislik plastiklerinden olan Polipropilen (PP) ve Akrilonitril bütadien stiren (ABS),'ın birincil geri dönüşümde kalıp sıcaklığının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi incelenecektir. Çekme, eğme ve sertlik numunelerini içeren kalıp tasarlanmıştır. Kalıp için gerekli analizler Autodesk Moldflow programı ile yapılmıştır. Kalıp imalatı BARBAROS MOTOR MAK. SAN. İÇ VE DIŞ. TİC.LTD. ŞTİ.' de yapılmıştır. Plastik enjeksiyon proses atıkları kırma makinelerinde kırılarak granül boyutlara indirilmiştir.

Literatürde Polipropilen için kalıp sıcaklık değeri 50 - 70°C aralığındadır. Biz bu çalışmada Polipropilen için kalıp sıcaklık değerlerini 50°C, 55°C, 60°C, 65°C ve 70°C olarak deneysel çalışmaları gerçekleştirdik. Literatürde Akrilonitril bütadien stiren için kalıp sıcaklık değeri 60-80°C aralığındadır. Biz bu çalışmada Akrilonitril bütadien stiren için kalıp sıcaklık değerlerini 60°C, 65°C, 70°C, 75°C ve 80°C olarak deneysel çalışmaları gerçekleştirdik.

Orijinal ve kırma hammaddeler hassas terazide tartılarak %80 orijinal %20 kırma oranda karıştırılmıştır. Deney şartlarına göre plastik enjeksiyon makinesinde beşer adet numuneler basılmıştır. PİMAR PLASTİK SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.'nin plastik laboratuvarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan Hammaddeler İçin Deney Setleri

Polipropilen için deney seti

PP hammaddenin Çizelge 1'deki şartlara göre plastik enjeksiyonda deney numuneleri üretilmiştir. PP için deney setleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1: PP için enjeksiyon şartları

Vida sıcaklığı (°C)	Meme	200
	1.bölge	195
	2.bölge	190
	3.bölge	185
	4.bölge	180
Enjeksiyon basıncı (MPa(bar))	70(700)	
Enjeksiyon hızı (%)	40-50	
Ütuleme basıncı (MPa(bar))	40(400)	
Ütuleme zamanı (s)	5	
Soğutma zamanı (s)	30	
Kalıp sıcaklığı (°C)	50-55-60-65-70	
Chiller soğutma sıcaklığı (°C)	15	
Hammadde kurutma sıcaklığı (°C)	40	
Kurutma zamanı(saat)	1	

Çizelge 2:PP deney setleri

Deney setleri	Deney setleri kısaltmaları
Kalıp sıcaklığı 50°C olan deney seti	PP50
Kalıp sıcaklığı 55°C olan deney seti	PP55
Kalıp sıcaklığı 60°C olan deney seti	PP60
Kalıp sıcaklığı 65°C olan deney seti	PP65
Kalıp sıcaklığı 70°C olan deney seti	PP70

Akrilonitril bütadien stiren için deney seti

PP hammaddenin Çizelge 3'deki şartlara göre plastik enjeksiyonda deney numuneleri üretilmiştir. PP için deney setleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 3: ABS için enjeksiyon şartları

Vida sıcaklığı (°C)	Meme	215
	1.bölge	210
	2.bölge	205
	3.bölge	200
	4.bölge	195
Enjeksiyon basıncı (MPa(bar))	70-80(700-800)	
Enjeksiyon hızı (%)	50-55	
Ütuleme basıncı (MPa(bar))	45(450)	
Ütuleme zamanı (s)	5	
Soğutma zamanı (s)	30	
Kalıp sıcaklığı (°C)	60-65-70-75-80	
Chiller soğutma sıcaklığı (°C)	15	
Hammadde kurutma sıcaklığı (°C)	80	
Kurutma zamanı(saatt)	2	

Çizelge 4:ABS Deney Setleri

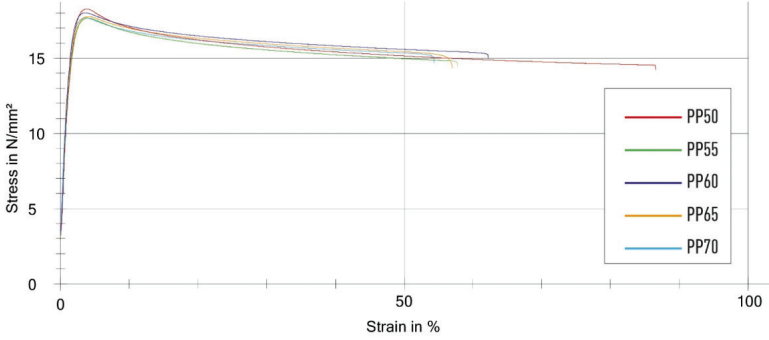
Deney setleri	Deney setleri kısaltmaları
Kalıp sıcaklığı 60°C olan deney seti	ABS60
Kalıp sıcaklığı 65°C olan deney seti	ABS65
Kalıp sıcaklığı 70°C olan deney seti	ABS70
Kalıp sıcaklığı 75°C olan deney seti	ABS75
Kalıp sıcaklığı 80°C olan deney seti	ABS80

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

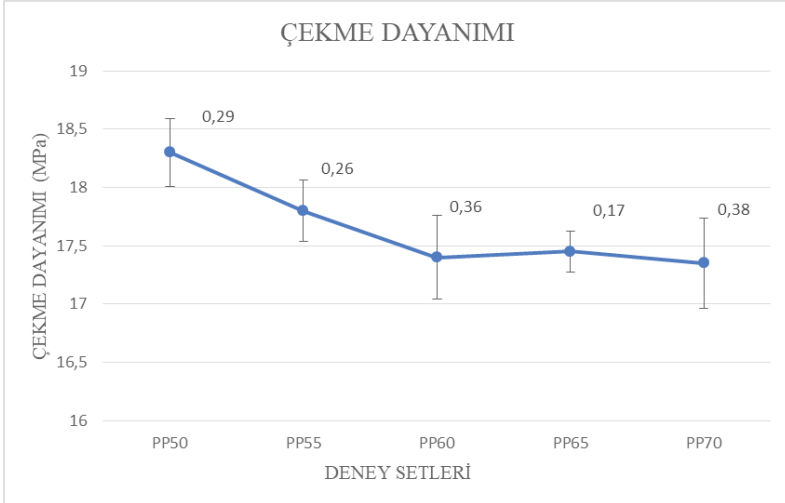
PP İçin Deney Sonuçları

PP için çekme deney sonuçları

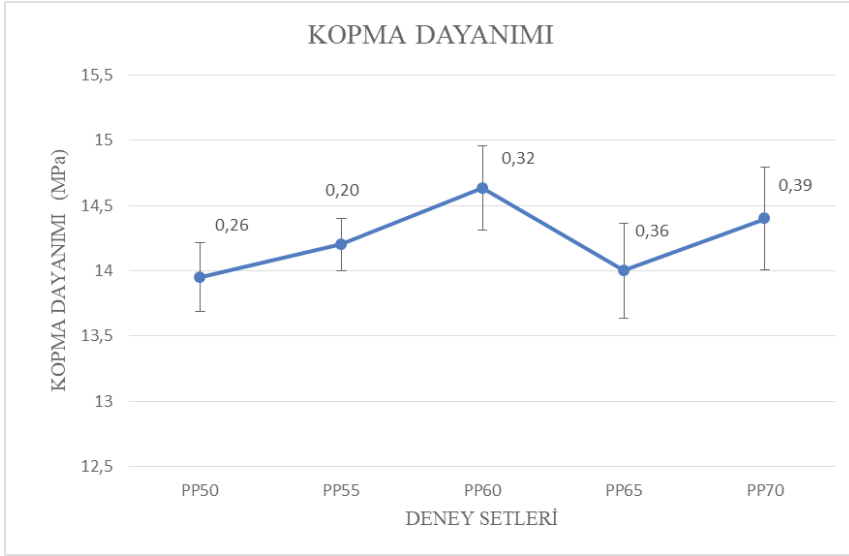
PP malzemeden numunelerin çekme deneyi çene hızı 5 mm/dak belirlenerek ZWICK/ROELL Z020 çekme cihazında ISO 527 (ASTM D638) standardına göre yapıldı. Gerilme-uzama eğrileri Şekil 1’de toplu halde verilmiştir. Farklı kalıp sıcaklığında imal edilen numunelerin karşılaştırmalı Çekme Dayanımı, Kopma Dayanımı ve Kopma Uzaması değerleri sırasıyla Şekil 2-Şekil 4’te verilmektedir.



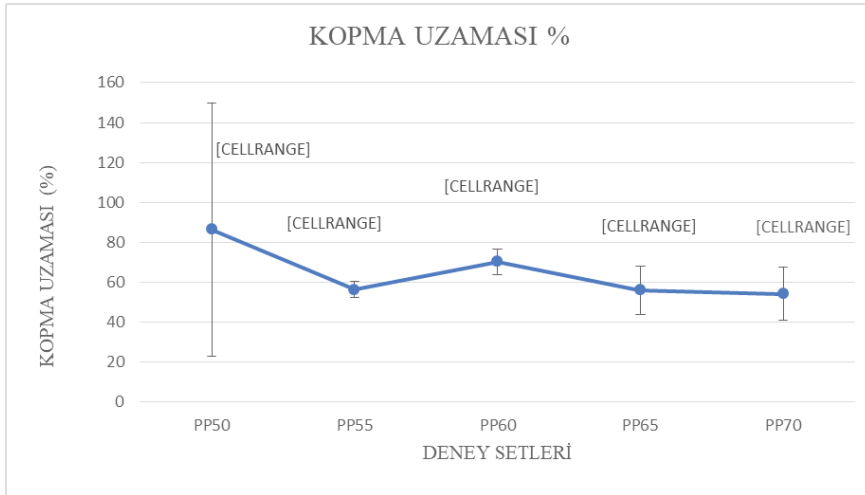
Şekil 1: PP için gerilme-uzama grafiği



Şekil 2: PP için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 3:PP için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin kopma dayanımlarının karşılaştırılması

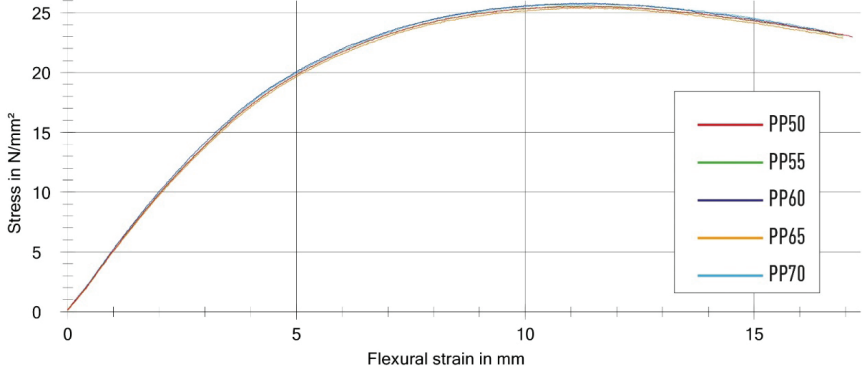


Şekil 4:PP için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin kopma uzamalarının karşılaştırılması

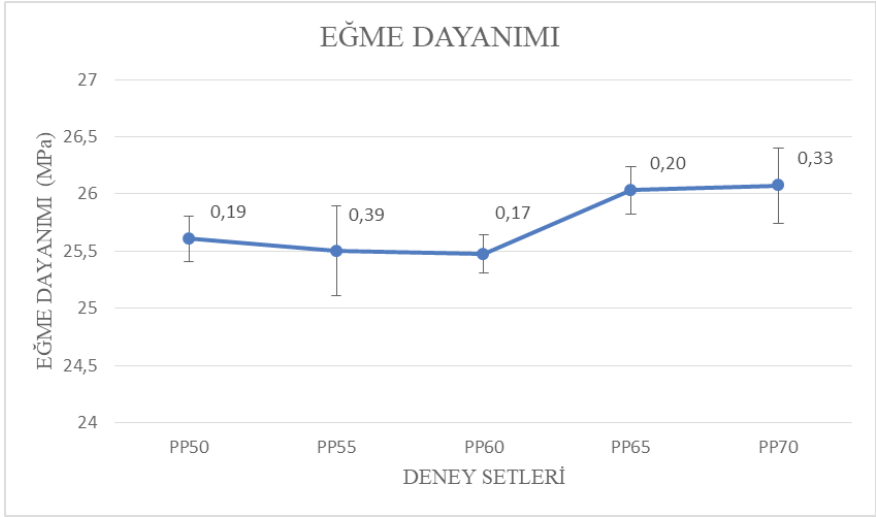
PP için eğme deneyi sonuçları

PP malzemeden numunelerin 3nokta eğme deneyi mandrel hızı 10 mm/dak belirlenerek ZWICK/ROELL Z020 çekme cihazında ISO178 (ASTM D790) standardına göre yapıldı. Gerilme-uzama eğrileri Şekil 5’de

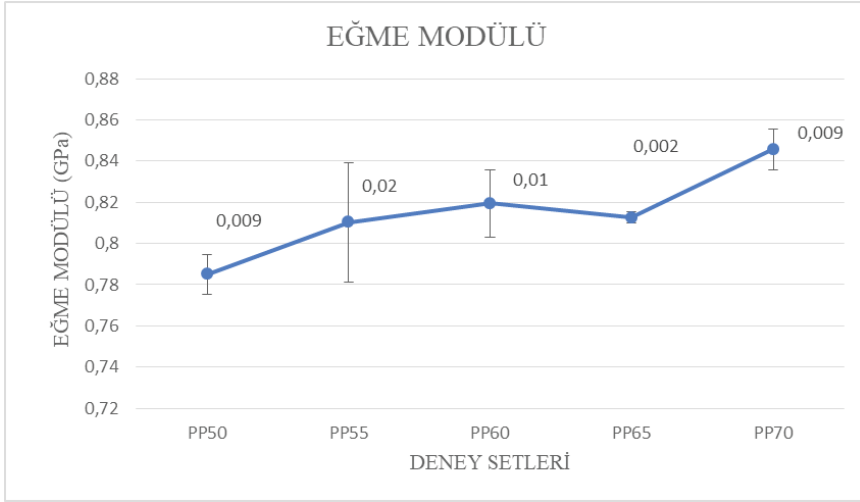
toplu halde verilmiştir. Farklı kalıp sıcaklığında imal edilen numunelerin karşılaştırmalı Eğme Dayanımı ve Eğme Modülü değerleri sırasıyla Şekil 6-Şekil 7’de verilmektedir.



Şekil 5:PP için eğme dayanımı grafiği



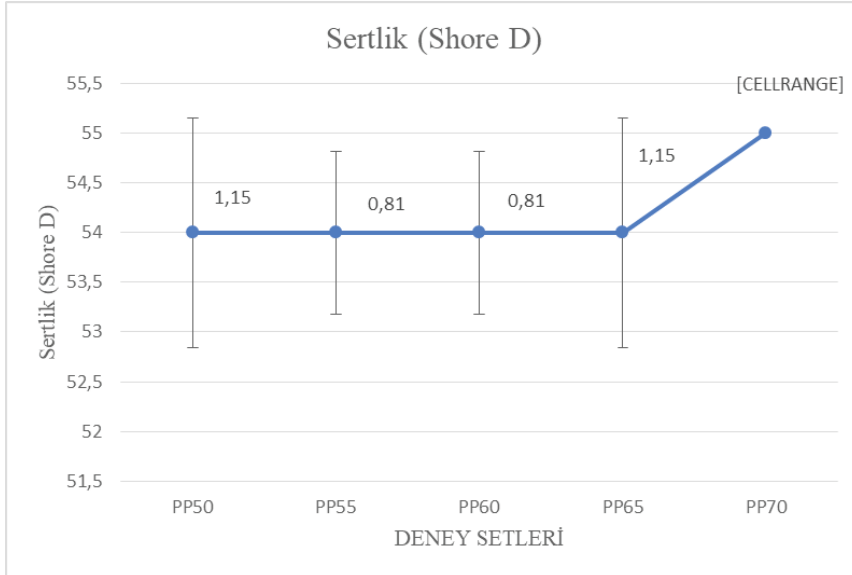
Şekil 6:PP için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin eğme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 7: PP için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin eğme modüllerinin karşılaştırılması

PP için sertlik deney sonuçları

PP hammaddesi için sertlik deneyi İSO 868 standardına göre ZWICK/ROELL Shore D sertlik cihazında yapıldı. Sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir.

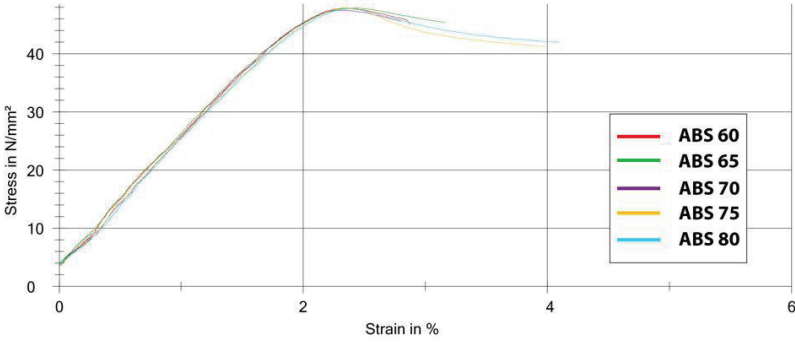


Şekil 8: PP için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin sertlik deney sonuçlarının karşılaştırılması

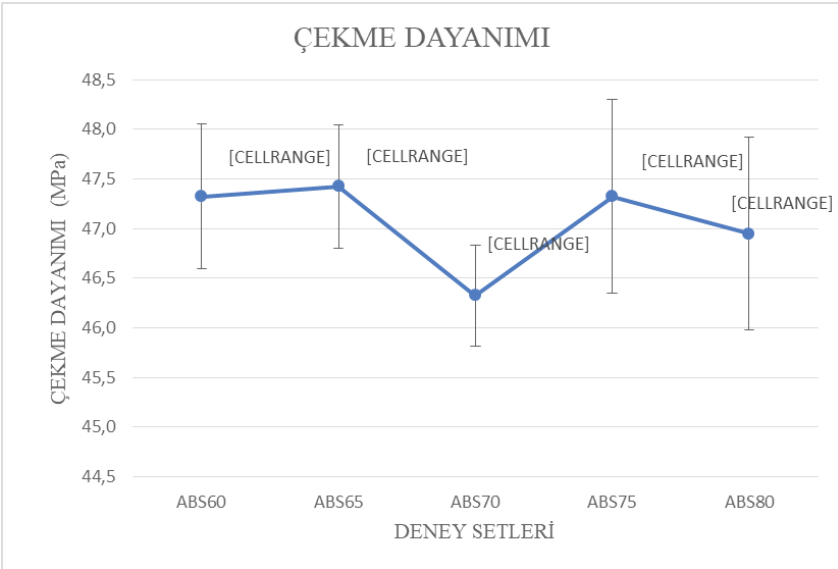
ABS İçin Deney Sonuçları

ABS için çekme deney sonuçları

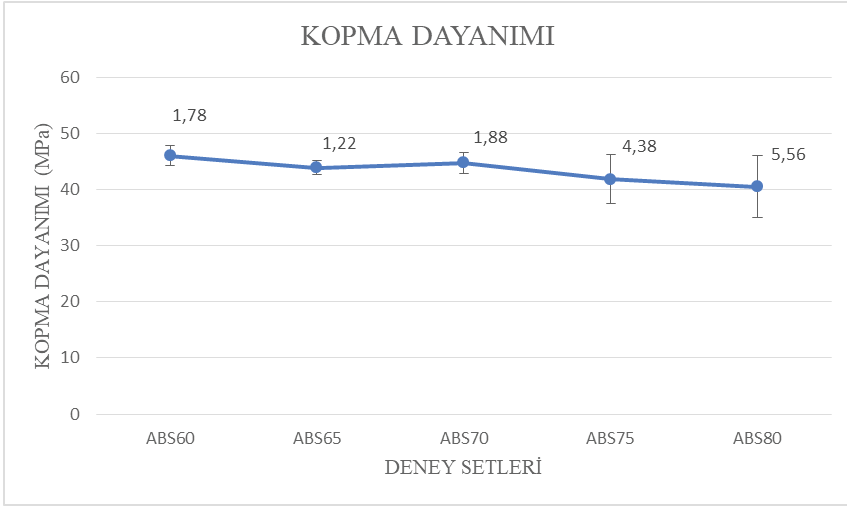
ABS malzemeden numunelerin çekme deneyi çene hızı 5 mm/dak belirlenerek ZWICK/ROELL Z020 çekme cihazında ISO 527 (ASTM D638) standardına göre yapıldı. Gerilme-uzama eğrileri Şekil 1’de toplu halde verilmiştir. Farklı kalıp sıcaklığında imal edilen numunelerin karşılaştırmalı Çekme Dayanımı, Kopma Dayanımı ve Kopma Uzaması değerleri sırasıyla Şekil 10-Şekil 12’te verilmektedir.



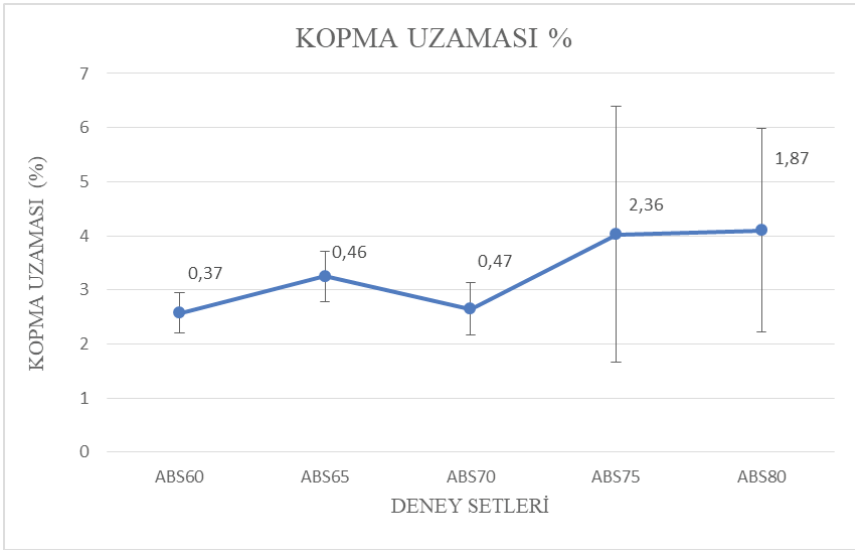
Şekil 9:ABS için gerilme-uzama grafiği



Şekil 10:ABS için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 11: ABS için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin kopma dayanımlarının karşılaştırılması

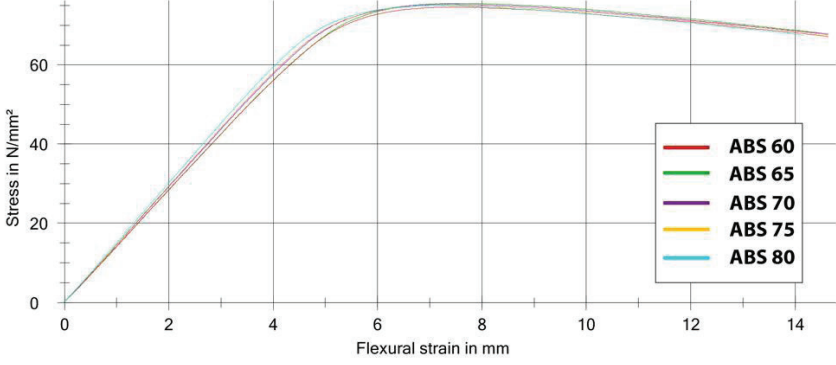


Şekil 12: ABS için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin kopma uzamalarının karşılaştırılması

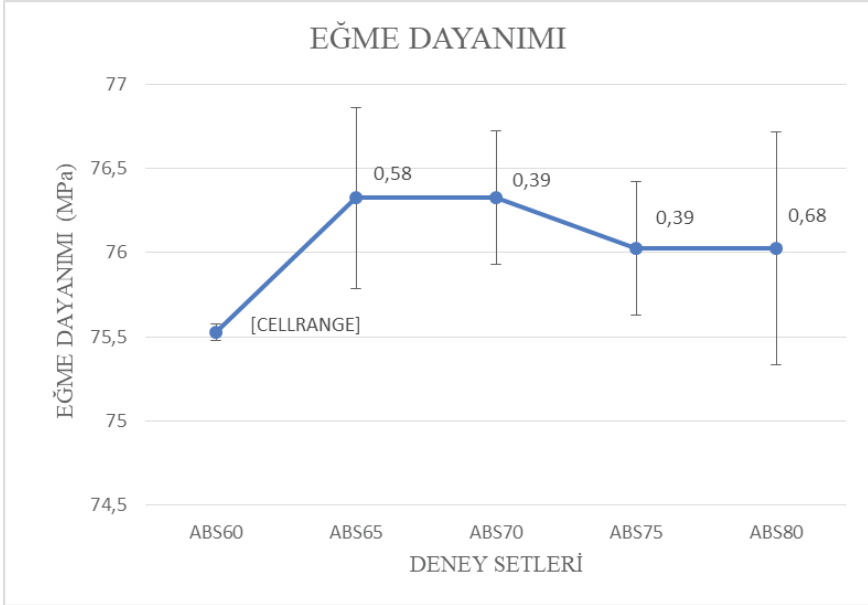
ABS için eğme deneyi sonuçları

ABS malzemeden numunelerin 3nokta eğme deneyi mandrel hızı 10 mm/dak belirlenerek ZWICK/ROELL Z020 çekme cihazında ISO178 (ASTM D790) standardına göre yapıldı. Gerilme-uzama eğrileri Şekil 13'de toplu halde verilmiştir. Farklı kalıp sıcaklığında imal edilen

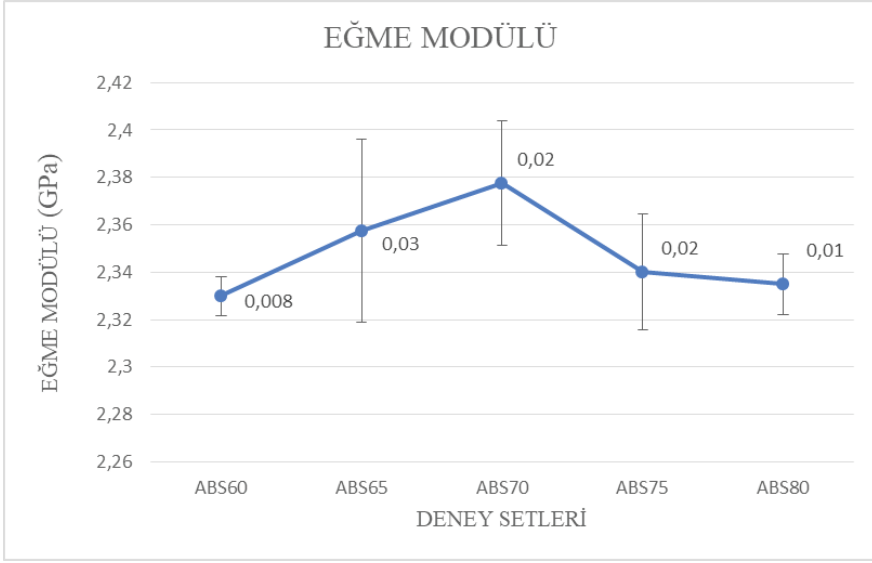
numunelerin karşılaştırmalı Eğme Dayanımı ve Eğme Modülü değerleri sırasıyla Şekil 14-Şekil 15'te verilmektedir.



Şekil 13: ABS için eğme dayanımı grafiği



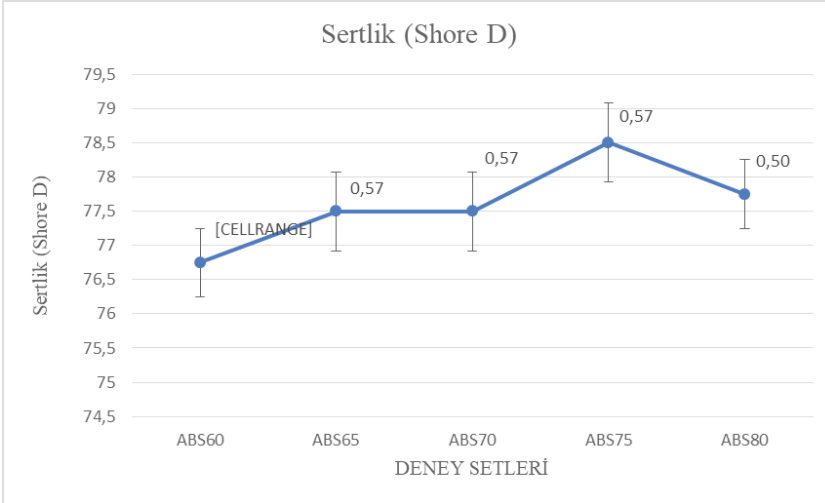
Şekil 14: ABS için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin eğme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 15: ABS için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin eğme modüllerinin karşılaştırılması

ABS için sertlik deney sonuçları

ABS hammaddesi için sertlik deneyi İSO 868 standardına göre ZWICK/ROELL Shore D sertlik cihazında yapıldı. Sonuçlar Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16: ABS için farklı işlem parametrelerine göre imal edilmiş numunelerin sertlik deney sonuçlarının karşılaştırılması

TARTIŞMA VE SONUÇ

Polipropilen malzemenin birincil geri dönüşüm karıştırılarak farklı kalıp sıcaklıklarında enjeksiyon kalıplama yöntemiyle imal edilen numuneler kullanılarak yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

Hazırlanan numunelerin çekme deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında çekme dayanımı değerleri arasında % 5'lik değer farkları ortaya çıkmıştır. Şekil 2'de kalıp sıcaklığının ürünün çekme dayanımına etkisi verilmektedir. Her kalıp sıcaklığı değeri uygulanarak imal edilen beş adet numunenin çekme deneyi sonuçlarından hesaplanan standart sapma değerleri de dikkate alındığında sonuçlarda dikkate değer farklılıkların ortaya çıkmadığı sonucuna varılmıştır. Kalıp sıcaklığının 50°C olması durumunda ürün numunelerin en yüksek çekme dayanımı değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak en düşük değerle arasındaki fark çok belirgin değildir ve anlamlı bir artış olmadığı sonucuna varılmıştır. Kopma dayanımı değerlerinde çok fazla bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Diğer yandan kopma dayanımının pratik anlamda çok fazla bir öneminin olmadığı da bir gerçektir. Çekme dayanımı ve Kopma uzaması değerleri daha anlamlı ve pratikte kullanılan malzeme özellikleridir. Kopma uzaması değerleri sünekliğin önemli bir göstergesidir. Bu çalışmada 50°C kalıp sıcaklığı uygulaması ile imal edilen numunenin kopma uzaması değeri en yüksek bulunmuştur (%87). En küçük kopma uzaması değeri ise %54 olarak belirlenmiştir. Aradaki fark %38 olmuştur. Bu sonuç anlamlıdır. Kalıp sıcaklığının 50 °C olması halinde ürünlerin daha sünek davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Polipropilen malzeme kullanılarak farklı kalıp sıcaklıklarında imal edilen ve hazırlanan eğme deneyi numunelerinin belirlenen eğme dayanımı değerlerinde %2'lik değer farkları görülmüştür. Şekil 6 'da verilen eğme dayanımı değerlerinde anlamlı bir farkın olmadığı gözlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında kalıp sıcaklığının eğme dayanımı değerlerini etkilememekle birlikte kalıbın doldurulması, eksik parça çıkmaması açısından önemi bilinmektedir.

Polipropilen malzemedeki farklı kalıp sıcaklığında imal edilen sertlik numuneler kullanılarak yapılan sertlik ölçümü sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Sertlik değerleri ve standart sapma değeri dikkate alındığında kalıp sıcaklığına bağlı anlamlı bir sonuç ortaya çıkmamıştır. Sertlik malzemenin önemli bir mekanik özelliğidir. Kalıp sıcaklığının malzeme yapısına etkisinin olmadığı ve aşınma direncini değiştirmediği sonucuna varılmıştır.

Polipropilen malzemelerin kalıp içinde ürüne dönüştürülmesi aşaması nümerik çalışmalarla incelenmiştir. Akış analizi için Autodesk

Moldflow sonlu hacimler programı kullanılmıştır. Kalıbın doldurulması aşamasında herhangi bir problemin olmadığı, tüm kalıp sıcaklıklarında ham malzemenin kalıbı tamamen doldurduğu belirlenmiştir. Ütuleme kuvvetlerinin uygulanması ile imal edilen ürünlerde herhangi bir hata ve hava boşluğunun olmadığı belirlenmiştir. Malzemenin zincir yapısı ve zincir diziliminde bir hata oluşmadığı, beklenen yönlendirmenin elde edildiği gözlenmiştir. Buradan hareketle PP malzemenin farklı kalıp sıcaklıklarında imalatında herhangi bir dolum hatası ve fiziksel özellik farkının ortaya çıkmamasının gözlemlenmesi önemli bir sonucu ortaya çıkarmaktadır. Malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli etken malzemenin zincir yapısı, zincir dizilimi olmaktadır. Kalıp sıcaklığının zincir yapıyı değiştirecek etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır. PP malzeme için kalıp sıcaklığının 50 °C olması durumunda elde edilen özelliklerin yeterli seviyede olduğu ve daha yüksek kalıp sıcaklıklarının uygulanmasına gerek olmadığı, böylece daha düşük kalıp sıcaklığı seçilerek daha ekonomik imalat sürecinin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. (Bociaga vd,2010; Kent ,2016 ; Akgül, 2020)

Akrilonitril bütadien stiren kullanılarak yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

Hazırlanan numunelerin çekme deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında çekme dayanımı değerleri arasında %3'lük değer farkları ortaya çıkmıştır. Şekil 10'da kalıp sıcaklığının ürünün çekme dayanımına etkisi verilmektedir. Her kalıp sıcaklığı değeri uygulanarak imal edilen beş adet numunenin çekme deneyi sonuçlarından hesaplanan standart sapma değerleri dikkate alındığında sonuçlarda dikkate değer farklılıkların ortaya çıkmadığı sonucuna varılmıştır. Kalıp sıcaklığının 65°C olması durumunda en yüksek çekme dayanımı verdiği gözlenmiştir. Ancak en düşük değerle arasındaki fark çok belirgin ve anlamlı bir artış olmadığı sonucuna varılmıştır. Kopma dayanımı değerlerinde çok fazla bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Bu çalışmada kalıp sıcaklığı 80 °C için belirlenen kopma uzaması en yüksek değer olarak bulunmuştur (%4,1).

Akrilonitril bütadien stiren malzeme kullanılarak farklı kalıp sıcaklıklarında imal edilen ve hazırlanan eğme deneyi numunelerinin belirlenen eğme dayanımı değerlerinde %1'lik değer farkları görülmüştür. Şekil 14'te verilen değerlerin değerlendirilmesi sonucunda eğme dayanımı değerlerinde anlamlı bir farkın olmadığı belirlenmiştir. Eğme modülünde bir değişim olması beklenmemekle birlikte deneylerden elde edilen sonuçlardaki küçük sapma değerleri deney hataları sınırı içinde olduğu belirlenmiştir.

Akrilonitril bütadien stiren malzemedeki farklı kalıp sıcaklığında imal edilen sertlik numuneleri kullanılarak yapılan sertlik ölçümü sonuçları

Şekil 16’da verilmiştir. Sertlik değerleri ve standart sapma değeri dikkate alındığında kalıp sıcaklığına bağlı anlamlı bir sonuç ortaya çıkmamıştır. Kalıp sıcaklığının malzeme yapısına etkisinin olmadığı ve aşınma direncini değiştirmediği sonucuna varılmıştır.

Akrilonitril bütadien stiren malzemelerin kalıp içinde ürüne dönüştürülmesi aşaması nümerik çalışmalarla incelenmiştir. Akış analizi için Autodesk Moldflow sonlu hacimler programı kullanılmıştır. Kalıbın doldurulması aşamasında herhangi bir problemin olmadığı, tüm kalıp sıcaklıklarında ham malzemenin kalıbı tamamen doldurduğu belirlenmiştir. Ütuleme kuvvetlerinin uygulanması ile herhangi bir hata ve hava boşluklarının olmadığı ortaya konulmuştur. Malzemenin zincir yapısı ve zincir diziliminde bir hata oluşmadığı, beklenen yönlenmenin elde edildiği gözlenmiştir. Buradan hareketle ABS malzemenin farklı kalıp sıcaklıklarında imalatında herhangi bir dolum hatası ve fiziksel özellik farkının ortaya çıkmamasının gözlemlenmesi önemli bir sonucu ortaya çıkarmaktadır. ABS malzeme için kalıp sıcaklığının 60 °C olması durumunda elde edilen özelliklerin yeterli seviyede olduğu ve daha yüksek kalıp sıcaklıklarının uygulanmasına gerek olmadığı, böylece daha düşük kalıp sıcaklığı seçilerek daha ekonomik imalat sürecinin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. (Bociaga vd,2010; Kent ,2016 ; Akgül, 2020)

KAYNAKÇA

- Akkurt, S., 1991. Plastik Malzeme Bilgisi, Sena matbaası, 12-13s, İstanbul.
- Akgül, F., 2020. Birincil Geri Dönüşüm Plastik Hammaddelerde Kalıp Sıcaklığının Ürünlerin Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74-81 s, Isparta.
- Akyüz, Ö. F., 1998. Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş, PAGEV Yayınları Kaptan Ofset, 28-35 s, İstanbul.
- Askeland, D. R., 1995. The Science and Engineering of Materials, PWS Publishing Company, 510-518 s, Boston.
- Bociaga, E., Jaruga, T., Lubczynska, K, Gnatowski, A., 2010. Warpage of injection moulded parts as the result of mould temperature difference. Arch Mater Sci Eng. 44(1):28–34.
- Enerji Portalı, 2018. Erişim tarihi: 13.07.2019. <http://www.enerjiportali.com/polipropilen-nedir-nerelerde-kullanilir/>
- Esenlik, M., 2001. Plastik Enjeksiyon Kalıpcılığında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 3-30 s, İstanbul.
- Exintasarım,2019.Erişimtarihi:16.07.2019. <http://www.exintasarim.com/blog/plastik-enjeksiyon-kalibi-nedir/>
- Hüner, Ü., 2008. Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Sıcak Birleştirme İşlemlerinin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 9-11, 16-17 s, Edirne.
- Katmer, Ş., Karataş, Ç., 2015. Effects of injection molding conditions on residual stress in HDPE and PP parts. J Fac Eng Arch Gazi Univ 30(3):319–327.
- Kent, R., 2016. Quality management in plastics processing, pp. 293-396, Elsevier.
- Kurt, M., Kaynak, Y., Kamber, ÖS., Mutlu, B., Bakır, B., Koklu, U., 2010. Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts. Int J Adv Manuf Technol 46:571–578.
- Menges, G., Michaeli, W. ve Mohren, P., 2001. How to Make Injection Molds, Hanser Publishers, 105-109 s, Munich.
- Michaeli, W., Greg, H., Kretschmar, G., ve Ehrig, F., 2001. Training in Injection Molding, Carl Hanser Verlag, 1-24 s, Munich.
- Özbek, İ., 2013. Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçiminde Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 5-6 s, İstanbul.
- Öztürk M., 2005. Plastikler ve Geri Kazanımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yayınları, 1. Baskı, İstanbul.
- Pagev, 2019. Erişim Tarihi: 15.03.2019. <https://www.pagev.org/plastik-nedir.>

- Pınar, E., 2010. Plastik Enjeksiyon Yöntemiyle İmalatta Hataların Tespiti Ve Proses Şartlarının Optimizasyon Uygulaması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 4 s, İstanbul.
- Resinex, 2019. Erişim Tarihi: 25.04.2019. <https://www.resinex.com.tr/polimer-turleri/abs.html>
- Saraç, L., 2014. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Metodu İle Üretilen Plastik Parçalarda Birleşme İzlerinin Mekanik ve Kozmetik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 27 s, Gebze.
- Tan, E., Tarakçılar, A.R. ve Yurtseven, R., 2007. Plastik Geri Kazanımları ve Plastik Atıklardan Plastik Üretim Teknolojileri, Metal Dünyası Dergisi, 1. Baskı, İstanbul.