


# Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri



**Kitap Adı** : Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri  
**İmtiyaz Sahibi** : Gece Kitaplığı  
**Genel Yayın Yönetmeni** : Doç. Dr. Atilla ATİK  
**Kapak&İç Tasarım** : Arzu ÇUHACIOĞLU  
**Sosyal Medya** : Arzu ÇUHACIOĞLU  
**Yayına Hazırlama** : Gece Akademi  Dizi Birimi  
**Yayıncı Sertifika No** : 15476  
**Matbaa Sertifika No** : 42539  
**Matbaa Adı** : GeceAkademi  
**ISBN** : 978-625-7958-40-0

**Editörler**

Dr. Öğretim Üyesi Abdurrahman GÜNDAY  
Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Recep Minaz

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 Akademi is a subsidiary of Gece Kitaplığı.

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

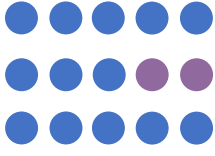
**Birinci Basım/First Edition ©ARALIK 2019/Ankara/TURKEY ©copyright**



**Gece Publishing**  
**ABD Adres/ USA Address:** 387 Park Avenue South, 5th Floor, New York, 10016, USA  
**Telefon/Phone:** +1 347 355 10 70

**Gece Akademi**  
**Türkiye Adres/Turkey Address:** Kocatepe Mah. Mithatpaşa Cad. 44/C Çankaya, Ankara, TR  
**Telefon/Phone:** +90 312 431 34 84 - +90 555 888 24 26

**web:** [www.gecekitapligi.com](http://www.gecekitapligi.com) —  
**e-mail:** [geceakademi@gmail.com](mailto:geceakademi@gmail.com)



# Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri



## İÇİNDEKİLER

<b>FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN OPTİMUM EĞİM AÇISI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR....</b>	<b>7</b>
Mustafa ARSLAN, Cemile ARSLAN, Abdullah Cem AĞAÇAYAK.....	7
<b>OTONOM ARAÇLARIN OTOYOL PARADİGMALARINA ETKİSİ.....</b>	<b>29</b>
Güven DEMİRTAŞ, Abdullah DEMİR.....	29
<b>LABVIEW YAZILIMI İLE ÖLÇME VE ANALİZ.....</b>	<b>49</b>
Ahmet ÖZMEN, Aykut COŞKUN, Mehmet ERTUĞRUL.....	49
<b>FARKLI GRADASYONA SAHİP AGREGALARIN BETON.....</b>	<b>61</b>
<b>SEGREGASYON DİRENCİNE ETKİSİ.....</b>	<b>61</b>
Bekir ÇOMAK, Alper BİDECI*.....	61
<b>SÜRDÜRÜLEBİLİR ENTEGRE ATIK YÖNETİMİ KAPSAMINDA BİTKİSEL ATIKLARIN YAPI MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI.....</b>	<b>79</b>
Esra TINMAZ KÖSE, Aylın AKYILDIZ.....	79
<b>UÇAK FREN SİSTEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>92</b>
Bekir GÜNEY .....	92
<b>LAKTOFERRİNİN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>113</b>
Gökçe KESER, Binnur KAPTAN.....	113
<b>ÇEVRESEL ETKİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN ALİŞVERİŞ MERKEZLERİ.....</b>	<b>131</b>
Kazım Onur DEMİRARSLAN, Deniz DEMİRARSLAN.....	131
<b>OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE TRIP ÇELİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE MİKROYAPI DÖNÜŞÜMLERİNİN İNCELENMESİ.....</b>	<b>156</b>
Özlem SEVİNÇ, Ege Anıl DİLER.....	156
<b>BOR ENDÜSTRİSİ ATIK ÇAMURU SÜZÜNTÜ SUYUNUN İNŞAAT SEKTÖRÜNDE DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>184</b>
Aylın AKYILDIZ, Esra TINMAZ KÖSE.....	184

<b>GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ .....</b>	<b>195</b>
Abdullah Cem AĞAÇAYAK, Gökhan YALÇIN, Süleyman NEŞELİ	195
<b>RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ.....</b>	<b>219</b>
Hakan TERZİOĞLU, Murat ARSLAN, Havvanur Dilşah DEMİROK	219
<b>YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNDE HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN EKONOMİK ANALİZİ VE PERFORMANSINA</b>	
<b>GENEL BİR BAKIŞ .....</b>	<b>243</b>
Hakan TERZİOĞLU, Murat ARSLAN, Havvanur Dilşah DEMİROK	243
<b>ÇİMENTODA BULUNAN ALKALİ DEĞERİNİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.....</b>	<b>275</b>
Korkmaz YILDIRIM .....	275
<b>AYDIN İLİNDE KULLANILAN HARÇ VE BETONLARDA.....</b>	<b>289</b>
<b>MİNERAL KATKILARIN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.....</b>	<b>289</b>
Korkmaz YILDIRIM .....	289
<b>BİYOPLASTİKLER: POLİHİDROKSİALKANOATLAR .....</b>	<b>307</b>
Mithat ÇELEBİ .....	307
<b>AGREGALARDA İNCE MALZEME MİKTARINI BELİRLEMEK AMACIYLA YAPILAN METİLEN MAVİSİ VE KUM EŞDEĞERİ DENEYLERİNİN BİRBİRLERİYLE OLAN İLİŞKİSİNİN İRDELENMESİ.....</b>	<b>323</b>
Murat SERT, Zeyni ARSOY <sup>2</sup> .....	323
<b>BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİNDE İNSAN HAREKETLERİ YAKALAMA SİSTEMLERİ .....</b>	<b>343</b>
Samet Çıklaçandır, Şenay Mihçin .....	343
<b>BEYİN BİLGİSAYAR ARAYÜZLERİ ve UYGULAMA ALANLARI.....</b>	<b>365</b>
Selma BÜYÜKGÖZE.....	365
<b>YOL YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE YOL GEOMETRİSİNİN SÜRÜCÜLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI ...</b>	<b>389</b>
Sercan SERİN.....	389



**FOTOVOLTAİK GÜNEŞ  
ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN  
OPTİMUM EĞİM AÇISI ÜZERİNE  
YAPILAN ÇALIŞMALAR**

**BÖLÜM  
1**

**Mustafa ARSLAN<sup>1</sup>,  
Cemile ARSLAN<sup>2</sup>,  
Abdullah Cem  
AĞAÇAYAK<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik, Konya, marslan@ktun.edu.tr

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon, Konya, carslan@ktun.edu.tr

<sup>3</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik, Konya, acagacayak@ktun.edu.tr







## GİRİŞ

Dünyadaki yaşamın kaynağı olan Güneş aynı zamanda insanoğlunun hayatını devam ettirebilmesi için ihtiyacı olan enerjinin de kaynağıdır. Güneş yeryüzünden yaklaşık 150 milyon km uzaklıktadır. Nükleer yakıtlar dışında, dünyada kullanılan tüm yakıtların ana kaynağıdır. İçinde, sürekli olarak Hidrojenin Helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmektedir ve oluşan kütle farkı, ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Güneş Enerjisi; güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışınım enerjisidir[1].

Güneş enerjisi çevreci olması, bakım gerektirmemesi gibi üstünlükleri sebebi ile tercih edilen bir enerji çeşididir. Ayrıca güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşan kısmının küresel ölçekte elektrik enerjisi potansiyeli yeryüzünde şimdiye kadar belirlenmiş fosil yakıt rezervlerinin 160 katı kadardır. Bir başka deyişle yeryüzünde fosil, nükleer ve hidroelektrik tesislerinin bir yılda üreteceğinden 15000 kat daha fazladır[2]. Dünya üzerinde yatay düzleme gelen yıllık ortalama güneş radyasyon değeri  $170\text{W/m}^2$  seviyesindedir[3]. Yeryüzüne 90 dakika da vuran güneş ışığı tüm dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak miktardadır[4]. Fosil yakıtlar dediğimiz petrol, kömür ve doğalgazın oluşma süreci de güneş sayesinde olmuştur. Bugün tükenmeye yüz tutan fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarının alternatifi olarak yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Hidroelektrik, Rüzgar, Biokütle gibi dolaylı olarak güneşe bağlı enerji kaynaklarının yanı sıra doğrudan güneş ışınlarından elektrik enerjisi üreten PV (Fotovoltaik) enerji santralleri başvurulan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığını verilerine göre dünya genelinde güneş enerjisi için yapılan yatırımlar önceki yıllara göre %25 civarında artarak 150 milyar dolar seviyelerini geçmiştir[5]. Dünyanın güneşten aldığı enerji toplamı bir yılda 1.5 katrilyon ( $1.5 \times 10^{15}$ ) MW/h'tir. Bu enerji miktarı, dünyada insanların 1 yılda tükettiği enerjinin tam 28 000 katına eşdeğerdir. Eğer dünya yüzeyine ulaşan bu enerjinin sadece %0,1'i, %10 verimle elektrik enerjisine çevrilebilirse, global elektrik kapasitesi olan 3.000 GW'ın 4 katı kadar bir güç elde edilebilir[6].

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi o kadar artmıştır ki bu enerjileri en verimli halde kullanarak elektrik enerjisine dönüştürme alanında oldukça fazla çalışmalar vardır[7-10]. Son çalışmalar bir bölgede sadece tek bir yenilenebilir enerji kaynağı kullanmak yerine

bölgenin potansiyeline göre güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji vs gibi farklı yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretmek hibrit sistemler oluşturma üzerine yapılmaktadır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde her yapılan bilimsel çalışma önem kazanmaktadır[11-16].

### **Türkiyede Güneş Enerjisi Potansiyeli**

Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından son derece zengindir. Yıllık 380 milyar kWh enerji potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Türkiye'nin yıllık ortalama güneş ışınımı 1.527 kWh/ m<sup>2</sup> yıl, ortalama yıllık güneşlenme süresi ise 2.741 saattir. Bu değerler günlük ortalama 4,18 kWh/ m<sup>2</sup> 'lik global radyasyon değerine ve günlük ortalama 7,5 saat güneşlenme süresine denk gelmektedir. 2018 Haziran ayı sonu itibarıyla ülkemizde lisanssız 4.703 MW, lisanslı 23 MW olmak üzere toplam PV güneş enerjisi santrali kurulu gücü 4.726 MW'tır[17]. Ülkemizde elektrik enerjisi kurulu gücü ( tüm santraller) 2016'da 78 bin 599 MW iken, 31 Ekim 2017 itibarıyla 82 bin 312 MW'a ulaştı. 2018 yılında ise Türkiye'de gündem yerli enerji hamleleri üzerinde yoğunlaşıyor[18]. Ülkemiz Avrupa'nın güneş potansiyeli en yüksek olan ülkeleri arasında yer alıyor.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) 2017 yılı Yenilenebilir Enerji İstatistikleri Raporu'na göre, fotovoltaik kurulu gücü bakımından 2016'da dünya ülkeleri arasında 844 MW ile 25. sırada yer alırken 2017 sonunda ulaştığı 3.422 MW'lık kapasite ile 13. sıraya yükseldi. Avrupa ülkeleri sıralamasında ise 2016'da 15. iken, 2017'de 7. sıraya tırmandı. 2017'de bu alandaki kurulu gücünü oransal olarak en fazla artıran ülke Türkiye olmuştur[19]. Yurdumuzun birçok coğrafi bölgesi güneş enerjisi bakımından oldukça zengindir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün internet sitesinde yayınladığı güneş enerjisi potansiyeli atlası incelendiğinde Konya ili en çok güneş ışınım değerine sahip yerlerin başında gelmektedir. Konya, coğrafi olarak 36.41' ve 39.16' kuzey enlemleri ile 31.14' ve 34.26' doğu boylamları arasında yer alır.

### **Bölgesel Güneş Enerjisi Potansiyeli**

Konya'nın güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir. Özellikle ilkbahar ve yaz aylarında yıl ortalamalarının üzerinde bulunan güneş radyasyonu değerleri bu aylarda en üst değerlere ulaşmaktadır. Konya-Karaman bölgesi Türkiye'nin güneş enerjisi yatırımları için en büyük

potansiyele sahip bölgelerindedir. Konya sahip olduğu yüksek miktarda düz, engebesiz ve tarıma elverişsiz saha kapasitesi ile güneşten elektrik üretim santrallerinin en yoğun bulunacağı bölge olarak önümüzdeki yıllarda yatırımcı ilgisini çekmeye devam edecek görünmektedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılan güneşten elektrik üretimi yatırımları için lisans verilebilecek bölgeler arasında yatırım izni verilen en büyük kapasiteli bölge Konya olarak belirlenmiştir. Bu sebeple 100 MW'lık GES kurulması için belirlenen yer Konya olmuştur.

### **Güneş Enerjisi ve Fotovoltaik (PV) Paneller**

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme uygulamalarında önemli bir yeri olan PV sistemler bakım gerektirmemeleri, uzun ömürlü olmaları, kurulumlarının kolay olması, maliyetlerinin düşük olması ve çevreye olumsuz etkilerinin fazla olmaması sebebi ile günümüzde tercih edilen enerji sistemleridir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için dolaylı (güneş enerjisi yoğunlaştırıcı sistemler) ve doğrudan (fotovoltaik) olmak üzere temelde iki yöntem mevcuttur. Dolaylı yöntemde güneş enerjisinin yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak enerjinin odaklanması sonucu elde edilen su buharından hareket enerjisi manyetik yolla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Doğrudan yöntemde ise fotovoltaik yöntem ile güneş enerjisi kimyasal yolla elektrik enerjisine dönüşür. Fotovoltaik sistemler, üzerine düşen güneş ışınımını doğrudan elektriğe çeviren yapılardır. Günümüzde güneş enerjisi fotovoltaik hücrenin yapısına bağlı olarak %25-43 civarında bir verimlilikle elektrik enerjisine dönüşmektedir[20].

PV panellerden elde edilecek elektrik gücünün değerini etkileyen, bulutluluk, kirlilik, yüksek sıcaklık, uygun olmayan yönlendirme ve eğim açısı gibi faktörler söz konusudur. Bu çalışmanın konusu PV modüllerin optimum yönlendirme ve eğim açılarının belirlenmesine yönelik olacaktır. PV hücrelerde güneş ışınları ile taşınan elektromanyetik dalga olarak adlandırılan foton enerjisi kimyasal yolla elektrik enerjisine dönüşmektedir[21]. PV hücreler, yarı iletken maddeler olup, güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürürler. Yarı iletken bir diyot olarak çalışan PV hücre, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik akımına dönüştürür[22]. Günümüzde PV hücre üretiminde hemen hemen sadece silisyum yarı iletken malzeme kullanılmaktadır. Bir PV tesisin temel bileşeni PV hücredir. Hücre standart koşullarda (25°C sıcaklık, 1000 W/m<sup>2</sup> radyasyon gücü) yaklaşık

4-5 Watt güç üretir[23]. Bir PV panelin güç çıkışına pik güç ( $W_p$ ) denir. Hücrelerin birbirlerine monte edilmesiyle PV modül ve modüllerin seri bağlanması ile de diziler elde edilir.

Dünya üzerindeki bir noktaya nazaran güneşin gökyüzündeki konumu, gün ve yıl boyunca süreklilik arz ederek değişmektedir. Gökteki yıldızların ve güneşin konumunu tayin etmek için, çok büyük yarıçaplı bir küre üzerinde noktalar seklinde buldukları kabul edilerek, Gök küre denilen bu küreden faydalanılmaktadır. Burada, güneşin yeryüzünde bir noktaya nazaran hareketini takip etmek için dünyanın merkez olduğu gök küre ekvator sistemi kullanılmaktadır[24]. Gök küre üzerinde güneşin yeri ve yeryüzündeki noktaya göre hareketi “güneş açıları” ile tayin edilmektedir. Güneşten gelen ışınlar ile dünya üzerindeki yüzeyler arasında belirli açılar oluşur. PV modüllerden elektrik enerjisi elde etme uygulamaları için yapılan hesaplamalarda bilinmesi gereken açılar vardır. Bunlar şöyledir: Yeryüzündeki herhangi bir noktayı dünya merkezine birleştiren doğrunun, dünyanın ekvator düzlemi ile yaptığı açıya Enlem açısı, güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açıya Deklinasyon açısı ve Eğimli yüzeyin normalinin, yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusundaki açı yada Azimut (yönlendirme) açısı denir.

## **GÜNEŞ IŞINLARININ DÜNYAYA GELİŞ AÇISI VE PV PANELLERİN GÜNEŞ IŞINIMLARINA GÖRE AÇISAL KONUMLANDIRILMASI İLE İLGİLİ BİLİMSEL ÇALIŞMALAR**

Becquerelin ilk kez 1839 yılında yaptığı Fotovoltaik hücre araştırmaları [25] yıllar içerisinde malzeme bilimindeki ilerlemeler ve gelişen üretim teknolojileri sayesinde yüksek verimlere ulaşmıştır.. Fotovoltaik hücrelerin ürettikleri enerji miktarı arttıkça, hesap makineleri, trafik sinyalizasyon uygulamaları, şebekeden uzak yerleşim yerlerindeki haberleşme tesisleri için elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında kullanılmıştır[26]. Günümüz dünyasında artık PV panellerden elektrik enerjisi elde etmenin en etkili yöntemleri araştırılmaktadır.

PV santralden yıllık maksimum enerji elde etmenin en etkili yöntemlerinden birisi, PV panellerin optimum eğim açılarının ve yönlendirme açılarının iyi belirlenmesi ile mümkündür. Aynı şekilde güneş enerjisi sistemlerinin tasarım ve kurulumunda o bölgeye ait güneş ışınım verilerinin çok iyi bilinmesi gereklidir[27-30]. Bir solar enerji sisteminin eğim açısı solar paneller üzerine düşen maksimum solar radyasyonu yakalamak

için en önemli parametrelerden biridir[31]. Solar panelin eğim açısı, güneşin günlük, aylık ve yıllık olarak yer değiştirmesine bağlı olduğu için bulunulan yere özgüdür[32]. Pv panellerin eğim ve yönlendirme açılarının hesaplanmasında genellikle yatay düzlem üzerine gelen günlük solar radyasyonun aylık ortalama değerleri kullanılır ve dünya genelinde birçok yer için bu veriler mevcuttur[33-35]. Fakat genellikle eğimli yüzeyler üzerine gelen radyasyon verileri mevcut değildir[36]. Bu yüzden eğimli yüzeylere gelen radyasyon verilerinin tahmini için matematiksel modeller geliştirilmiştir[37].

Literatürde en çok rastlanan modeller, isotropic ve anisotropic modellerdir. Bu yaklaşık bir model olup bulutlu bir gökyüzü ve dağınık solar ışınım yoğunluğu olan gökyüzü için geçerlidir[38]. Anisotropic modeller ise eğimli yüzeydeki aylık ortalama günlük dağınık radyasyonu hesaplamak için kullanılır[39]. PV sistemler, solar kollektörler, solar pişiriciler gibi güneş enerji sistemlerinin dünya genelindeki uygulamalarda eğim ve yönlendirme açılarını bulmak için birçok uygulama yapılmıştır[40-44]. Solar PV sistemler kurulurken kuzey yarım kürede paneller güneye ve ekvatora bakacak şekilde konumlandırılır, güney yarımkürede ise kuzeye bakacak şekilde konumlandırılır[45-46]. Çünkü amaç paneller üzerine maksimum seviyede güneş ışınımının düşmesini sağlamaktır. PV sistemler ve diğer güneş uygulamaları için yapılan optimum eğim açısı uygulamaları ve matematiksel modellerde bulunulan yerin enlem açısını göre optimum eğim açısı hesaplamaları yapılmıştır[47-50].

PV modüller için optimum eğim açısının belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalarda genellikle paneller kuzey yarım küre için güney yönlü olarak yerleştirilmiştir. Panellerin maksimum güneş ışınımına maruz kaldığı en uygun eğim açısını belirlemek için farklı eğimlerde paneller yerleştirilerek üzerine düşen ışınım değerleri karşılaştırılmış ve en uygun PV panel açısı belirlenmiştir[51-52]. Yapılan deneysel uygulamalarda elde edilen veriler ışığında hesaplanan açı değerleri aylık ve mevsimsel olarak değişiklik göstermiştir[53].

Bir güneş kollektörünün performansını etkileyen önemli parametrelerden biri yataya olan eğim açısıdır. Bunun nedeni, eğim açısının değişmesinin panel yüzeyine ulaşan güneş ışınımının miktarını değiştirmesidir. Dünyada yataya gelen ışınım değerlerini maksimize edebilmek için PV panellerin optimum eğim açısını belirlenmesine yönelik bir çok çalışma vardır. Bu çalışmalar şöyledir;

Yakup ve Malik (2001) eğimli bir yüzey üzerindeki güneş ışınımını tahmin etmek ve Brunei Darüssalam'daki güneş kollektörünün optimum eğim açısını ve yönünü (yüzey azimut açısı) belirlemek için bir matematik modeli kullanmıştır. Optimum açı, toplayıcı yüzeyindeki toplam radyasyonun belirli bir gün veya belirli bir süre için maksimum olduğu değerler aranarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, eğim açısının yılda 12 kez (yani, aylık ortalama optimum eğim açısını kullanarak) değiştirmenin, eğim açısını günlük olarak optimum değerine değiştirerek bulunan maksimum değere yakın olarak toplam güneş ışınımı miktarını yaklaşık olarak koruduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, yatay bir yüzeye sabitlenmiş bir güneş kollektöründen %5 daha fazla güneş ışınımında yıllık bir kazanç elde eder[54]. Bu çalışmada teorik hesaplamalar yapılarak bu değişimler tespit edilmiştir. Panellerin ışınımına bağlı olarak üretilen güç ve enerji değerleri konusunda herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Lubitz(2011) Amerika Birleşik Devletleri'nde farklı coğrafi konumlarda yer alan beş şehir için PV panellerini sabit, azimut izleme ve iki eksenli izleme yaparak eğimli yüzeylere gelen güneş ışınımını Perez radyasyon modeli ile simüle etmiştir. Optimum eğim açısında güneşe bakan sabit bir panel yerine tek eksen azimut izleme yapıldığında daha yüksek ışınım değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Azimut eksenine ilave olarak eğim izleme amacıyla ikinci bir izleme eksenini eklemek, ışınlanmada azimut izlemeye göre %5 daha artışa neden olduğu tespit etmişlerdir. 12 ay boyunca aylık el ile eğim değiştirilerek gerçekleştirilen sistemde ise sabit optimum eğim açısında yerleştirilen sisteme göre %5'lik bir ışınım artışı görülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda azimut izleme sisteminin ışınım artışı %29 bir katkı sağladığı görülmüştür. Böylece ışınım değerleri üzerinde azimut açısının önemi görülmüştür[55]. Ancak panellerin ışınımına bağlı olarak üretilen güç ve enerji değerleri konusunda herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışma deneysel olmayıp simülasyon olarak gerçekleştirilmiştir.

Benghanem (2011) yaptığı çalışmada Suudi Arabistan'ın Medine şehri için PV panellerin optimum eğim açısını belirlemek için global radyasyon ve yayınık radyasyon değerlerini ölçerek matematiksel model aracılığıyla eğimli yüzeye gelen ışınım değerlerini hesaplamıştır. Aylık, mevsimsel ve yıllık optimum panel eğim açısı için önerilerde bulun-

muştur[42]. Bu çalışmada azimut açısı ile herhangi bir çalışma yapılmamış olup panelin azimut açısı ekvatora 00 derece sabit ayarlanmıştır.

Aınah ve Afa (2013) yaptıkları çalışmada güneş ışınları için mümkün olan en iyi eğim açısını tahmin etmek için Duffie ve Beckhman yöntemini kullanmışlar. Yenagoa (Nijerja) şehrinde fotovoltaiik ve güneş enerjisi sistemleri uygulaması için sapma, enlem ve açık indeks gibi bazı iklim verilerinden faydalanmışlar. Bu araştırma 150° ila 650° arasında değişen farklı eğim açısı ile gerçekleştirilmiştir ve Yenagoa için güneş enerjisi sistemi uygulaması için en iyi eğim açısının 150° ila 450° eğim aralığında olduğunu göstermişlerdir[56]. Burada azimut açısını sabit almışlar ve bu konuda azimut açısının değiştirilerek sistem üzerine etkilerini ele alan herhangi bir çalışma yapmamışlardır.

Yıl boyunca optimum eğim açısının belirlenmesine yönelik çalışmaların çokluğu nedeniyle Kaldellis ve Zafirakis (2012) çalışmasında, Atina bölgesinde PV panelleri için özellikle yaz dönemi optimum eğim açısını belirlemeyi amaçlamışlardır. İncelenen konunun deneysel araştırması tüm yaz dönemi için yapılmıştır. Bu bağlamda, panel eğim açısının beklenen optimum değerden farklı olması halinde etkisinin incelenmesi üzerinde durulmuş, buna bağlı olarak, teorik doğrulama yoluyla elde edilen sonuçların belirlenen güneş geometrisi denklemleri temelinde yorumlanması yapılmıştır[51]. Bu çalışmada PV panellerin optimum eğimi üzerine yoğunlaşmış olup azimut açısını güneye sabit (0 derece) alarak çalışma yürütülmüştür.

Kirlenme, toz birikmesi gibi çevresel parametrelerin optimum eğim açısını etkilediği düşünülmektedir. Rouholamini ve diğ. (2013) eğimli bir yüzey üzerindeki global güneş ışınımını tahmin etmek ve PV panellerinin çıkış enerjisini hesaplamak için bir matematiksel model kullanmışlardır. Deneysel düzenek aracılığıyla Fotovoltaiik panellerin eğim açıları 0 °, 10 °, 20 °, 30 °, 40 ° ve 50 ° ye ve azimut açısı 0 ° 'ye ayarlanmıştır. Daha sonra, matematiksel modelin ve kaydedilen verilerin karşılaştırılması yapılmış ve 10 dereceden daha büyük eğim açıları için matematiksel model ve kaydedilen veriler arasında uyum olduğu ve ancak 10 dereceden daha küçük açılar için biraz farklı sonuçlar ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Toz etkisi nedeniyle, deney düzeneğinden ölçülen çıkış enerjisi, tahmin edilen enerji modelinden daha az olduğu kanaatine varılmıştır[52]. Bu çalışmada azimut açısı sabit 0 dereceye ayarlandığı için bunun etkisi dikkate alınmadığı anlaşılmaktadır. Panellerin ışınım



bağlı olarak üretilen güç ve enerji değerleri konusunda herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Dünya çapında farklı lokasyonlarda eğim açısı belirlemek için bir dizi metot kullanılmaktadır. Maksimum enerji kazancı için her bir lokasyonun optimum eğim açısının doğru belirlenmesi önemlidir. Yadav (2013) enerji üretimini ve solar sistemlerin maliyetinin azaltılmasını göz önünde bulundurarak solar panel eğim açısını belirlemek için çeşitli metotların uygulamalarını ve durumlarını araştıran bir literatür incelemesi yapmıştır[31].

Türkiye’de eğimli yüzeye gelen ışınımın tahmini ve buna bağlı olarak optimum panel açısının belirlenmesine yönelik bir çok çalışma vardır. Bu çalışmalar şöyledir;

Bu konuda ilk çalışmalardan birisi Tırıs ve Tırıs (1996) yaptığı araştırmadır. Yazarlar, optimum kolektör eğimini belirlemek için, maksimum güneş enerjisi mevcudiyetine dayanan ve toplam güneş enerjisinin en doğru tahminini sağlayan bir izotropik model kullanmış eğimli bir yüzey üzerinde ışınım tahmin edilmesi için çeşitli modellerle karşılaştırmıştır. Gebze için bir yıl boyunca eğimli, güneye bakan yüzeylerin optimum eğimlerini tahmin etmek için kullanılacak teorik denklemleri türetmiştir. Geliştirilen genel korelasyonlar Gebze’de geçerlidir ve pratikte hem doğru hem de kullanışlıdır. Çalışmada Gebze için 1984-1992 yılları arasında ölçülen aylık ortalama günlük global ve yayınlık ışınım değerleri kullanılmıştır. Sonuç olarak solar kolektörler için optimum eğim açısı yaz ayları için 6,30 , kış ayları için 58 ve genel yıllık ortalama 33 derece olarak hesaplanmıştır. Çalışmalarında Lui ve Jordan’ın geliştirdiği günlük ortalama radyasyon tahmin modelinden faydalanmışlardır[29]. Bu çalışma kolektörlerin optimum eğiminin belirlenmesine yönelik olduğu için PV panellerle ilgili değildir. Her ne kadar maksimum ışınım değeri elde etmek için eğimin belirlenmesinde kolektörlerle ve PV panellerde benzer yöntemler kullanıyor olsa da PV panellerin güç ve enerji ölçümlerine göre de bir değerlendirme yapmak daha doğru olacaktır.

Ülgen ve Hepbaşı (2002) İzmir için yatay bir yüzey üzerine gelen aylık ortalama günlük global ışınımı tahmin etmek için emprical modeller geliştirilmiştir. Deneysel veriler Ege Üniversitesi Solar Enerji Enstitüsü Meteoroloji İstasyonunda yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Literatürde yer alan 25 model ile mevcut modeller, yüzde hatası, kök ortalama hatası

ve korelasyon gibi istatistiksel metotlarla karşılaştırılmıştır[57]. Bu çalışmada da güneş kolektörlerinin maksimum ışınım alabilmesi için optimum eğimin belirlenmesine yöneliktir. PV paneller dikkate alınmamıştır.

Kacira ve ark.( 2004) PV panelinin kurulumu için optimum eğim açısını tahmin etmek ve eğimli PV yüzey üzerindeki toplam solar radyasyonu tahmin etmek için bir matematik model kullandı. Optimum eğim açıları PV yüzey üzerindeki toplam radyasyon değerlerini araştırarak tahmin ettiler. Çalışmada aynı zamanda sabit bir PV sistem ile iki eksenli hareketli bir sistemin enerji kazancını karşılaştırdılar. Şanlıurfa için optimum eğim açılarını belirlediler[29]. Ancak bu çalışmada özellikle PV panelin optimum eğiminin belirlenmesine yöneliktir. Azimut konusunda herhangi bir incelemeye rastlanmamıştır.

Bakırcı (2008) açık gökyüzü atmosferleri için yatay yüzeyler üzerinde güneş ışınımının değişimi tahmin etmiş ve Erzurum da yapılan ölçümlerle karşılaştırmıştır. Yatay yüzeylerde güneş radyasyonu hesaplamalarında Hottel'in açık gökyüzü modelini kullanmıştır. Ayrıca, yatay yüzeylerde açık gökyüzü ve global güneş radyasyonu aylık ortalamaları veren korelasyon denklemleri geliştirmiştir. Korelasyon denklemlerinin performansını göstermek için istatistiksel yöntemler kullanmıştır[58]. Bakırcı (2009) başka bir çalışmasında Türkiye'nin farklı illeri için yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük global ışınımı tahmin etmek için yedi farklı deneysel eşitlikler geliştirmiştir. Bu amaçla yerel meteoroloji istasyonlarından günlük solar radyasyon ve günışığı ölçüm verileri kullanmıştır. Geliştirilen eşitliklerin performansını belirlemek amacı ile istatistiksel test metotlarını kullanmıştır[30]. Bu çalışmalarda da güneş kolektörlerinin maksimum ışınım alabilmesi için optimum eğimin belirlenmesine yöneliktir. PV paneller dikkate alınmamıştır.

Sonmete ve Diğ. (2011) literatürde mevcut olan 147 güneş radyasyonu modelini, Ankara'da (Türkiye) aylık güneş radyasyonu tahminine yönelik olarak incelemişler ve istatistiksel ölçümlere dayanarak ve karşılaştırmışlardır. Ankara da yatay bir yüzey üzerine gelen solar radyasyonu tahmin etmek için en iyi modelleri tespit etmişlerdir[59].

Kaya (2012) literatürdeki yatay yüzey üzerindeki küresel güneş ışınımı modellerini araştırmış ve Erzincan, için güneş saat verilerini temel alan yeni ampirik modeller geliştirmiştir[60]. Ayaz ve diğ. (2017) üç farklı PV teknolojisini (monokristal, polikristal ve ince film) dikkate

olarak optimum fotovoltaiik (PV) eğim açısını hesaplamak için bir yaklaşım sunmaktadırlar. Bu yaklaşım, mevsimsel ve yıllık güneş radyasyonu ( $Wh / m^2$ ) ve PV'lerin mevsimsel ve yıllık enerji üretimi ( $Wh$ ) dikkate alınarak optimum eğim açısının belirlenmesine dayanmaktadır. Toplam radyasyon ve toplam enerji çıktısıyla elde edilen optimum eğim açıları mevsimsel ve yıllık baz dikkate alındığında birbirinden farklı olduğu bulmuşlardır[61]. Ancak bu çalışmada azimut açısı sabit kabul edilerek optimum eğim açısı belirlenmiştir.

Yayınık ışınım birçok yerde her zaman mevcut değildir. Yayınık ışınım verileri genellikle ölçülmediği için bu verilere ulaşmak zordur. Yayınık ışınım tahmini ile ilgili çalışmalar şöyledir;

Tank ve Wu (2004) yataya gelen global radyasyonu kullanarak yayınık ışınımın tahmini için basit bir matematiksel prosedür sunmuşlardır. Tahmin edilen aylık yayınık radyasyondan elde edilen sonuç ile gerçek aylık yayınık radyasyondan elde edilen sonuç kullanılarak kolektörlerin optimal eğim açıları karşılaştırmışlar[62]. Yao ve ark.(2014) yaptığı çalışmada global ışınımı tahmin etmek için güneşlenme süreleri gibi bazı parametrelere bağlı global ışınım tahmin modeli geliştirmişler. Daha sonra global ışınımı direk ışınım ve yayınık ışınım bileşenlerine ayırarak yayınık ışınım elde etmişlerdir[63]. Yayınık ışınım değerlerinin tahmini üzerine yapılan bir çalışmada Jamila and Akhtar (2017), Hindistan'ın Nemli Suptropikal İklim Bölgesi için uzun vadeli ölçülen güneş ışınımı verilerini kullanmışlardır. Geliştirilen altı adet modelin performansını değerlendirmek için istatistiksel analiz kullanmışlardır[64]. Bu çalışmalar özellikle belirlenen konuma yönelik diffuse (yayınık) ışınım hesabı için teorik model geliştirmeden ibarettir.

Optimum eğim açısının belirlenmesi ve global güneş ışınımın tahmini ile ilgili değişik bakış açıları da vardır. Bunlardan Yuexia ve diğ. (2018) etkin güneş ısı toplama kavramını, mevcut enerjiye dönüştürülemeyen etkisiz güneş ışınımını yerine önermişlerdir. Buna göre, ısıtma mevsimi boyunca Lhasa'da kurulu güneş kolektörlerinin optimum eğim açısını ve yönelimini belirlemek için optimize edilmiş bir matematiksel model geliştirmişler ve kullanmışlardır. Bu çalışmada yazarlar solar sitemlerde etkin güneş enerjisi kavramını ilk defa ortaya atarak yeni bir bakış açısı ile model geliştirmişlerdir[65]. Senkal ve Kuleli (2009) güneş radyasyonu tahmini için yapay sinir ağları (YSA) kullanmışlardır. Sinir ağını eğitmek için, Ağustos 1997'den Aralık 1997'ye kadar 12 şehrin (Antalya, Artvin,

Edirne, Kayseri, Kütahya, Van, Adana, Ankara, İstanbul, Samsun, İzmir, Diyarbakır) meteorolojik verileri kullanılmıştır. Ağın giriş katmanında meteorolojik ve coğrafi veriler (enlem, boylam, yükseklik, ay, ortalama yayınlık ışınması) kullanılmışlardır[66].

İzgi ve ark (2012) Yapay Sinir Ağları (YSA) metodolojisi, 750 W'lık bir güneş enerjisi panelinden elde edilen verilere uygulanmaktadır. 5 dakikalık zaman diliminin kısa vadede en iyi güneş enerjisi tahminini sağladığı ve Nisan ayında orta vadede 35 dakika kullanılabilceği görülmektedir. Ayrıca, Ağustos ayındaki sırasıyla çok kısa ve orta zaman tahminleri için 3 ve 40 dakikaya yükseldi. Nisan ve Ağustos aylarında Kök Ortalama Kare Hataları (RMSE'ler) ölçülen ve test değerleri arasındaki fark sırasıyla 33–55 W ve 37–63 W aralığında değişmiştir. Özellikle, Ağustos boyunca güneş ışınması için, durağan koşullar gözlemlenir ve bu durumlar, YSA'nın 30 - 300 dakika ileride kolayca üretilen elektriği tahmin etmesini sağlar[67].

Yadav ve Chandel (2014)'in yaptığı bu çalışmanın amacı, literatürde güneş ışınımı tahmini için uygun yöntemleri belirlemek ve araştırma boşluklarını tanımlamak için Yapay Sinir Ağı (YSA) bazlı teknikleri gözden geçirmektir. Çalışma gösterir ki yapay sinir ağı teknikleri, solar radyasyonu geleneksel metotlara göre daha kesin olarak tahmin eder[68].

Ramli ve Boucekara(2018) Suudi Arabistan'daki Dharan şehri için maksimum güneş ışınımını toplamak amacıyla FV panelleri için optimum eğim açısını tahmin etmektir. Vorteks arama algoritması adı verilen yeni geliştirilen bir optimizasyon algoritması, eğik yüzeydeki güneş ışınımını tahmin etmek için kullanılır. Dahası, önerilen yaklaşımda bir yıl farklı dönemlere ayrılabilir ve bu dönemlerin her biri için ayrı ayrı en uygun açı elde edilebilir. Yatay eğim verileri (yani doğrudan, dağınık ve küresel güneş radyasyonu) optimum eğim açısını tahmin etmek için kullanılır. Sonuçlar, optimum eğim açısı kullanılarak tahmin edilen güneş ışınımının yatay bir yüzeyde tahmin edilene kıyasla en üst düzeye çıkarıldığını göstermektedir[69].

## ARAŞTIRMA GÜNDEMİNİN ÖNEMİ

Enerji, insanların hayat kalitesini iyileştiren, ülkelerin ise ekonomik ve sosyal alanlarda ilerlemesini sağlayan en önemli faktörlerden biridir. Enerji türlerinin en başında ise elektrik enerjisi gelmektedir. Özellikle gelişmekte ve nüfusu artan ülkelerin enerji ihtiyacı her geçen gün artmak-

tadır. Buna bağlı olarak elektrik enerjisi üretmek için kullandığımız fosil yakıtlarında hem çevreye zarar vermesi hem de yakın gelecekte tükenmesi beklenmektedir. Bu durum bu enerji türlerine karşı yeni enerji türlerine arayışı zorunlu kılmaktadır. Fosil yakıtlara karşı günümüzde alternatif enerji kaynakları olarak yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biokütle oldukça ön plandadır. Bu kaynaklara karşı bilimsel araştırmaların ilgisi oldukça artmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, teknolojinin gelişmesiyle oldukça verimli elektrik enerjisi üretebilmektedir. Ayrıca sonsuz enerji kaynağı olması çevreye verdiği hiçbir zararın olmaması diğer enerji kaynakları arasından sıyrılarak parlamasına neden olmaktadır. Teknolojinin ilerlemesine rağmen günümüzde hala güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren PV panellerin kurulum maliyetleri yüksek olması en büyük dezavantajdır.

Enerjinin bu kadar önemli olduğu bir dünyada kullandığımız enerji türü ne kadar sonsuz ve çevreci de olsa ondan en verimli şekilde yararlanmamız gerekmektedir. PV panellerin yüzeylerine gelen güneş ışınların açısına göre ürettikleri enerji miktarı da değişmektedir. Güneş ışınlarının geliş açıları bölgelere ve bölgelerin mevsimine ve gün içinde saat dilimlerine göre değişmektedir. Bu sorun iki şekilde aşılabılır. Bunun ilki güneş ışınlarının geliş açısını bölgeye, mevsime ve günün saat dilimine göre takip eden güneş takip sistemi kurmaktır. Bu çözümde sistemin kurulum maliyeti artmakta ve az da olsa sistemde bir enerji tüketimi olmaktadır. Bir diğer çözüm yöntemi ise, bölgenin yıllık olarak optimum eğim açısı hesaplanarak güneş panellerinin sabit açıda konumlandırılmasıdır. Böylece güneş ışığından elde edilen enerji miktarı maksimize edilir. Bu sabit konumlandırılan sistemlerin kurulum maliyeti güneş takip sistemlerine göre çok daha düşüktür.

Literatürde panellerin optimum eğim açısının bir çok matematiksel modellemesi yapılmıştır. Bu modellemelerde eğim açısını belirlemede etken olarak sadece güneş radyasyonu baz alınmıştır. Fakat kirlenme, toz birikmesi gibi çevresel parametrelerin optimum eğim açısını etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca ışınım değerleri üzerinde azimut açısının önemi de göz önünde bulundurulmalıdır.

Farklı illerdeki optimum eğim değerleri mevsimlik ve yıllık olarak incelendiğinde kış ile yaz mevsimi arasında optimum eğim hesabı çok farklı çıkmaktadır. Bu durum sistemin optimum eğim açısının

yıllıktan ziyade mevsimlere göre değiştirilebilecek şekilde ayarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anadolu'nun Akdeniz bölgesinden yedi ilin güneş ışınım parametrelerini tahmin etmek için yapay bir sinir ağı (YSA) modeli kullanılmıştır. Güneş radyasyonu tahmininde bulunmak için, Türk Devleti ve Meteoroloji Hizmetlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. 2006 yılı verileri test için kullanılmış ve 2005, 2007 ve 2008 yılı verileri tahmin edilmiştir. Giriş parametresi sayısının etkileri, çıkış katmanı olan güneş ışınımı üzerinde test edildi. Elde edilen sonuçlar, yöntemin araştırmacılar veya bilim adamları tarafından yüksek verimli güneş cihazları tasarlamak için kullanılabileceğini gösterdi. Ayrıca, güneş ışınımına ilişkin gelecekteki verilerin tahmininde girdi parametrelerinin en etkili parametre olduğu tespit edildi[70].

## KAYNAKÇA

- [1] Öztürk,H.H,2012, “Güneş Enerjisi ve Uygulamaları”,Adana, Birsen Yayınevi
- [2] Kamil B. Varınca, Gamze Varank, “Rüzgar Kaynaklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerileri”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları / Enerji Yönetimi Sempozyumu, pp. 367-376, 2005
- [3] 2010 Survey of Energy Resources World Energy Council [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/09/ser\\_2010\\_report\\_1.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/09/ser_2010_report_1.pdf)
- [4] Çanka Kılıç, F. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu Ve Üretim Teknolojileri. Engineer & The Machinery Magazine, (671).
- [5] Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2015. Milges, Milhes, Milkanat Ve (Ygda) Sistemi Geliştirilmesi Projeleri, 7.5.2015.
- [6] Güney Marmara Kalkınma Ajansı,2009 <https://www.gmka.gov.tr/>
- [7] Ağaçaayak, A.C., Terzioğlu, H., (2018). ”Analysis of Thermoelectric Cooler Used to Produce Electrical Energy in terms of Efficiency,” Acad. Studies in Eng., Gece Publishing, pp. 111-120.
- [8] Ağaçaayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). “Small Power Wind Turbine Design,” Acad. Studies in Eng., Gece Publishing, pp. 121-130.
- [9] Ağaçaayak, A.C., Terzioğlu, H., Çimen, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). "The Effects of Speed and Flow Rate on Power in Thermoelectric Generators", International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, Vol.6, pp.65-71.
- [10] Ağaçaayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). “Mathematical Modelling of Thermoelectric Generator by Regression Analysis ,” International Conference on Engineering Technologies (ICENTE’18). Selçuk University, Vol:3, pp.523-527.
- [11] Ağaçaayak, A.C., Çimen, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2017). "Termoelektrik Jeneratör ile Elektrik Üretimi", In UMYOS 6th International Vocational School Symp., Vol:2, pp.541-49. Saray Bosna.
- [12] Ağaçaayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2017). "The Impact of Different Electric Connection Types in Thermoelectric Generator Modules on Power", International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), Vol.3, pp.2395-6992.

- [13] Çimen, H., Ağaçyaka, A. C., Neşeli, S., Yalçın, G., (2017). "Comparison of Two Different Peltiers Running as Thermoelectric Generator at Different Temperatures", In 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). pp. 1-6. IEEE.
- [14] Kazan Fatih Alpaslan, Sungur Cemil, Terzioğlu Hakan (2015), "The Extension of Battery Lives Used in a Solar Irrigation System with Regards to Charge Discharge Numbers", Applied Mechanics and Materials, 752753, 988-994.
- [15] Neşeli, S., Terzioğlu, H., Ağaçyaka, A.C., Yalçın, G., (2017). "Electrical Power Generation by Thermoelectric Generator Using Geothermal energy and The Low-Power Dc-Dc Buck\_Boost Converter Application", In Grad. Sch. of Natur. and App. Scien., Selçuk University.
- [16] Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). "Termoelektrik Jeneratörler ve Kullanım Alanlarına Genel Bir Bakış", Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar, Gece Kitaplığı, pp. 149-160.
- [17] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii kaynaklar Bakanlığı <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>, 20 Ekim 2018
- [18] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, <https://www.dunyaenerji.org.tr/yenilenebilir-enerjiler-2018-kuresel-durum-raporu/>, 18 Aralık 2018
- [19] Uluslararası yenilenebilir enerji ajansı (The International Renewable Energy Agency (IRENA)) <https://www.irena.org/>
- [20] The National Renewable Energy Laboratory <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf>
- [21] Masters, G.M., 2004, "Renewable and Efficient Electric Power Systems", United State of Amerika, Wiley Interscience
- [22] Mertens, K., 2014, "Fotovoltaics Fundamentals, Technology and Practice", United Kingdom, Wiley
- [23] Pv Panel Güçleri, [http://www.altungroup.com/Kataloglar/Bisol\\_mono\\_solar\\_paneller.pdf](http://www.altungroup.com/Kataloglar/Bisol_mono_solar_paneller.pdf), 20 Ekim 2018
- [24] Szokolay, S.V., "Solar Geometry", <http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-NOTE-1-SOLAR-GEOMETRY.pdf>, 25 Ekim 2018
- [25] Öztürk, H.H. 2008. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, BİRSEN Yayınevi, İSTANBUL, ISBN 978975-511-502-3.



- [26] Çolak, İ., Bayındır, R., Demirtaş, M., “Türkiye’nin Enerji Geleceği”, TUBAV Academic Press, Volume No:1, Issue:2, Page:36-44, (2008)
- [27] Tiris, M., & Tiris, C. (1997). Analysis of solar radiation data for Gebze, Turkey. *Energy conversion and management*, 38(2), 179-186.
- [28] Tiris, M., & Tiris, C. (1998). Optimum collector slope and model evaluation: case study for Gebze, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 39(3-4), 167-172.
- [29] Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable energy*, 29(8), 1265-1275.
- [30] BAKIRCI, K. (2009). Yatay Yüzeye Gelen Anlık Global Güneş Işımının Tahmini İçin Basit Bir Hesaplama Metodu. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29(2), 53-58.
- [31] Yadav, A. K., & Chandel, S. S. (2013). Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 503-513.
- [32] Bakirci, K. (2012). Correlations for optimum tilt angles of solar collectors: a case study in Erzurum, Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34(11), 983-993.
- [33] Sabbagh, J. A., Sayigh, A. A. M., & El-Salam, E. M. A. (1977). Estimation of the total solar radiation from meteorological data. *Sol. Energy*;(United States), 19(3).
- [34] Bakirci, K. (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34(4), 485-501.
- [35] Ulgen, K. (2006). Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(13), 1171-1180.
- [36] Tiris, M., Tiris, C., & Türe, I. E. (1996). Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 37(9), 1417-1421.
- [37] Chandel, S. S., Aggarwal, R. K., & Pandey, A. N. (2005). New correlation to estimate global solar radiation on horizontal surfaces using sunshine hour and temperature data for Indian sites. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(3), 417-420.

- [38] Liu, B. Y., & Jordan, R. C. (1963). The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the US, its outlying possessions and Canada. *Solar energy*, 7(2), 53-74.
- [39] Klucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar energy*, 23(2), 111-114.
- [40] Kaldellis, J., Kavadias, K., & Zafirakis, D. (2012). Experimental validation of the optimum photovoltaic panels' tilt angle for remote consumers. *Renewable energy*, 46, 179-191.
- [41] Jafarkazemi, F., & Saadabadi, S. A. (2013). Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi, UAE. *Renewable energy*, 56, 44-49.
- [42] Benghanem, M. (2011). Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, 88(4), 1427-1433.
- [43] Jamil Ahmad, M., & N Tiwari, G. (2009). Optimization of tilt angle for solar collector to receive maximum radiation. *The Open Renewable Energy Journal*, 2(1).
- [44] Saraf, G. R., & Hamad, F. A. W. (1988). Optimum tilt angle for a flat plate solar collector. *Energy Conversion and Management*, 28(2), 185-191.
- [45] Lewis, G. (1987). Optimum tilt of a solar collector. *Solar and Wind Technology*, 4(3), 407-410.
- [46] El-Kassaby, M. M. (1988). Monthly and daily optimum tilt angle for south facing solar collectors; theoretical model, experimental and empirical correlations. *Solar & wind technology*, 5(6), 589-596.
- [47] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- [48] Zhao, Q., Wang, P., & Goel, L. (2010, June). Optimal PV panel tilt angle based on solar radiation prediction. In *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2010 IEEE 11th International Conference on (pp. 425-430). IEEE.
- [49] Rowlands, I. H., Kemery, B. P., & Beausoleil-Morrison, I. (2011). Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, 39(3), 1397-1409.
- [50] Gunerhan, H., & Hepbasli, A. (2007). Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, 42(2), 779-783.

- [51] Kaldellis, J., & Zafirakis, D. (2012). Experimental investigation of the optimum photovoltaic panels' tilt angle during the summer period. *Energy*, 38(1), 305-314.
- [52] Rouholamini, A., Pourgharibshahi, H., Fadaeinedjad, R., & Moschopoulos, G. (2013, May). Optimal tilt angle determination of photovoltaic panels and comparing of their mathematical model predictions to experimental data in Kerman. In *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- [53] Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6149-6159.
- [54] Yakup, M. A. B. H. M., & Malik, A. Q. 2001, Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. *Renewable Energy*, 24(2), 223-234.
- [55] Lubitz, W. D. 2011, Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels. *Applied energy*, 88(5), 1710-1719.
- [56] AINAH, K. P., & AFA, J. T. 2013, Best possible tilt angle for optimal solar radiation on an inclined surface for photovoltaic and solar thermal application in Yenagoa, Nigeria. *Turkish Journal of Physics*, 37(2), 242-249.
- [57] Ulgen, K., & Hepbasli, A. 2002, Comparison of solar radiation correlations for Izmir, Turkey. *International Journal of Energy Research*, 26(5), 413-430
- [58] Bakirci, K. 2008, Correlations for estimation of solar radiation on horizontal surfaces. *Journal of Energy Engineering*, 134(4), 130-134.
- [59] Sonmete, M. H., Ertekin, C., Menges, H. O., Haciseferoğullari, H., & Evrendilek, F. 2011, Assessing monthly average solar radiation models: a comparative case study in Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 175(1-4), 251-277.
- [60] Mehmet, K. A. Y. A. (2012). Estimation of global solar radiation on horizontal surface in Erzincan, Turkey. *International Journal of Physical Sciences*, 7(33), 5273-5280.
- [61] Ayaz, R., Durusu, A., & Akca, H. (2017). Determination of Optimum Tilt Angle for Different Photovoltaic Technologies Considering Ambient Conditions: A Case Study for Burdur, Turkey. *Journal of Solar Energy Engineering*, 139(4), 041001.

- [62] Tang, R., & Wu, T. 2004, Optimal tilt-angles for solar collectors used in China. *Applied energy*, 79(3), 239-248.
- [63] Yao, W., Li, Z., Wang, Y., Jiang, F., & Hu, L. 2014, Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China. *Energy Conversion and Management*, 84, 597-612.
- [64] Jamil, B., & Akhtar, N. 2017, Empirical models for estimation of diffuse solar radiation based on measured data for humid-subtropical climatic region of India. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(3), 033702.
- [65] Lv, Yuexia., Si, P., Rong, X., Yan, J., Feng, Y., & Zhu, X. (2018). Determination of optimum tilt angle and orientation for solar collectors based on effective solar heat collection. *Applied Energy*, 219, 11-19.
- [66] Şenkal, O., & Kuleli, T. (2009). Estimation of solar radiation over Turkey using artificial neural network and satellite data. *Applied Energy*, 86(7-8), 1222-1228.
- [67] Izgi, E., Öztopal, A., Yerli, B., Kaymak, M. K., & Şahin, A. D. (2012). Short–mid-term solar power prediction by using artificial neural networks. *Solar Energy*, 86(2), 725-733.
- [68] Yadav, A. K., & Chandel, S. S. (2014). Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 772-781.
- [69] Ramli, M. A., & Boucekara, H. R. (2018). Estimation of solar radiation on PV panel surface with optimum tilt angle using vortex search algorithm. *IET Renewable Power Generation*, 12(10), 1138-1145.
- [70] Koca, A., Oztop, H. F., Varol, Y., & Koca, G. O. (2011). Estimation of solar radiation using artificial neural networks with different input parameters for Mediterranean region of Anatolia in Turkey. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8756-8762.

# OTONOM ARAÇLARIN OTOPARK PARADİGMALARINA ETKİSİ

BÖLÜM  
2

Güven DEMİRTAŞ<sup>1</sup>,  
Abdullah DEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bozok Üniversitesi, Akdağmadeni Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri, Yozgat, guven.demirtas@bozok.edu.tr

<sup>2</sup> Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, ademir@marmara.edu.tr



## 1. GİRİŞ

Sürücüsüz/Otonom araçlar; İngilizce literatürde “driverless car/vehicle”, “unmanned ground vehicle”, “autonomous car/vehicle”, “uncrewed vehicle”, “self-driving car/vehicle”, “automated car/vehicle”, “fully automated car/vehicle”, “robotic car” and “smart car/vehicle”<sup>3</sup> gibi isimlendirmelerle kullanılmaktadır. İnsan sürücüsüz araç teknolojilerinden hedeflenen, mevcut durumda kullanılan ve insanlar tarafından sevk ve idaresi yapılan araçlarla ilgili faaliyetlerin, insan unsurunun devre dışı bırakılması ile insan yerine bir kısım teknolojilerin ikame edilmesi, insanların araç idaresi sırasındaki algılama yeteneklerinin teknolojik uygulamalar vasıtası ile yapılması daha az risk taşıyacak şekilde araçların üretilmesi ve yaygınlaştırılmasıdır (Yetim, 2016). Bu süreçle birlikte daha optimize edilmiş sürüş ortamındaki yolculuklarda/sürüşlerde yakıt tüketiminde ve doğal olarak zararlı egzoz emisyonlarında azalma, sürüş ve yolculuk stresinde düşme, emniyetli sürüş, ulaşım zamanlarında kısalmayla birlikte verimli ve konforlu bir trafik ortamının oluşması ekonomiyi pozitif etkileyecektir (VDA Magazine, 2015). İleri sürücü destek sistemleri (ADAS) ve otonom sürüş fonksiyonlarının faydaları Tablo 1’de verilmiştir.

<sup>3</sup> İngilizce literatürde birçok ifadenin “car” ya da “vehicle” uzantılı kavramsallaştırmaları vardır. Türkçe literatürde ise “car” için araç, “vehicle” için taşıt isimlendirmesi yaygın olarak tercih edilmektedir.

**Tablo 1.** ADAS ve otonom sürüş fonksiyonlarının muhtemel faydaları (Willem ve ark., 2019)

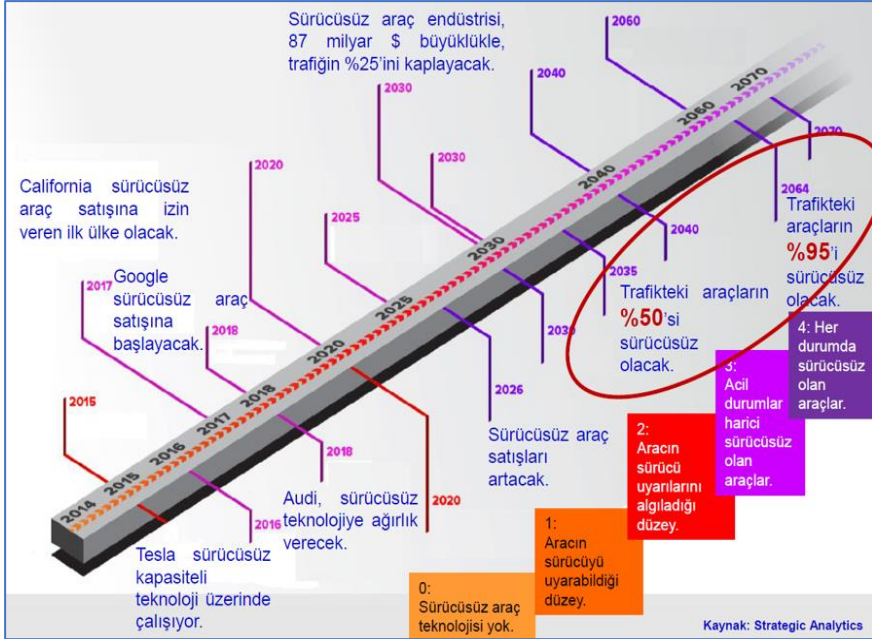
S. No	Temel Başlıklar	Faydaları
1	Trafik akışı	Artan işlem hacmi Daha az trafik sıkışıklığı Daha az yolculuk süreleri
2	Konfor	Sürücünün iş yükünde azalma Yolculuk stresinin azalması* Planlı durdurma (enerji, bakım ve park etme)
3	Emniyet <sup>4</sup>	Daha az kaza Daha az ölüm Daha az maddi kayıp*
4	Enerji güvenliği	Enerji tüketiminde azalma İşletme maliyetlerinde azalma
5	Lokal hava kalitesi	Havadaki kirlenici emisyonlarda azalma
6	Küresel ısınma	CO <sub>2</sub> emisyonlarda azalma

*Not: (\*) işaretli olanlar tarafımdan eklenmiştir.*

<sup>4</sup> Dünya da trafik kazalarından dolayı hayatını kaybedenlerin sayısı giderek artmış ve 2016 yılında 1,35 milyona ulaşmıştır. Bu bağlamda araç güvenlik düzeyinin artırılmasının, kazaların önlenmesinde giderek daha kritik hale geldiği ve karayolu trafik kazalarından kaynaklanan ölümlerin ve ciddi yaralanmaların önemli ölçüde azaltılmasına katkıda bulunduğu tespit edilmiştir (WHO, 2018). Ülkemizde ise yol ve yük taşımacılığının büyük bir bölümü karayolu ile yapılmaktadır. Bu yüzden karayolunun yoğun bir şekilde kullanımı **kaza riskini** arttırmaktadır. Karayolunda oluşan trafik kazaları çok çeşitli sebeplerin neticesinde ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen kazaların temel unsurlarını insan, araç ve yol oluşturmaktadır. Bu unsurlar arasında **insan faktörü** büyük bir paya ve öneme sahiptir. İnsan faktörü de kendi bünyesinde **sürücü, yaya ve yolcu** olarak üç farklı bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler içerisinde kazaya neden olanlardan en önemlisi **sürücüdür**. 2018 yılında ülkemiz karayolu ağında 1.229.364 adet trafik kazası meydana gelmiş, gerçekleşen bu kazalardan dolayı 6.675 kişi hayatını kaybetmiş ve 307.071 kişi de yaralanmıştır. Yine ölümlü ve yaralanmalı trafik kazasına neden olan toplam 217.898 kusurun %89,5'inin sürücülerden kaynaklandığı, %8,4'ünün yayalara ait olduğu, %0,6'sının yol kusurlarından dolayı gerçekleştiği ve %0,6'sının taşıt ve %0,9'unun da yolcu kaynaklı olduğu ifade edilmiştir (TÜİK, 2019). Sürücülerden kaynaklanan trafik kazalarının büyük çoğunluğu; araç hızını yol, hava ve trafiğin gerektirdiği şartlara uydurmamak, arkadan çarpmak, dönüş kurallarına uymamak, kavşaklarda geçiş önceliğine ve manevraları düzenleyen genel şartlara uymamak gibi nedenlerden oluştuğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra alkolü araç kullanmak, aşırı hızlı araç kullanmak, kırmızı ışık veya görevlinin dur işaretine uymamak gibi birçok kusur da bulunmaktadır.



Bu araçlar, hareket kabiliyetini kullanırken insanların duyu organları yerine geçen, daha az hata yapan, daha kısa zamanda alternatifleri değerlendirebilen; radar (yakın mesafe), LIDAR (Lazerli Radar), ultrasonik sensörler, GPS, kamera, V2V, V2I ve V2x haberleşme, IMU ve ileri derecede gelişmiş kontrol sistemlerinin uygun adımlarla araçlarla birleştirilmesiyle trafik düzenine uyum sağlamaktadır (Yetim, 2016; Tuncay, 2017; Demir ve Öz, 2018/a-b). Bu konuda ilk denemeler 1920 ve 1930 yıllarda, daha ileri aşamadaki denemeler ise 1977 yılında Japon Tsukuba Mekanik Mühendislik laboratuvarlarında, 1984 yıllarında Carnegie Mellon Üniversitenin Navlab ve ALV projesi ile Mercedes-Benz firmasının Bundeswehr Üniversitesi ile ortaklaşa yürüttüğü 1987 tarihli EUREKA Prometheus Projesi ve yine Mercedes-Benz ve ABD Savunma Departmanı fonu ile 1987-1995 tarihleri arasında gerçekleştirilen DARPA Otonom Kara Araçları (Autonomous Land Vehicles - ALV) projesidir. Bu alandaki araştırma ve denemeler ise son yıllarda artarak devam etmektedir (Parent, 2015; Wikipedia, 2019).



**Şekil 1.** İnsan sürücüsüz araçların gelecek seyri (Yorgancılar, 2017)

Otonom araçlar için Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE) J3016 ve Motorlu Araç Üreticileri Uluslararası Organizasyonu (OICA), Almanya Federal Karayolu Araştırma Enstitüsü (BAST) ve ABD Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA) gibi kurumlar kendi

sınıflandırmalarını oluşturmuşlardır. Bu kurumlardan NHTSA 5 otomasyon seviyesi belirlemiş ancak “Federal Otonom Araçlar Politikası”nda kullanılmak üzere SAE J3016’da belirtilen 6 sınıflandırmayı kabul etmiştir. Belirtilen 6 kademedeki; **Seviye 0**’da sürücü, aracın emniyetli bir şekilde seyirinden ve trafiğin izlenmesinden sorumludur. Araç yalnızca otomatik uyarılar sağlamakta ancak araç kontrolü yapmamaktadır. Sürücü her zaman ve yalnızca kendi başına aracı kontrol etmektedir. **Seviye 1**’de bazı özel görevlerin kontrolünün sürücü ve otomatik sistem arasında paylaşılabilir olduğu aşamadır. Sürücünün direksiyonu kontrol ettiği ve otomatik sistemin aracın hızını kontrol ettiği adaptif hız kontrolü (ACC) ve hız sürücü tarafından kontrol edilirken direksiyonun otomatik olarak kontrolünü sağlanmaktadır. Günümüzde yoldaki birçok araç, seyir kontrollü ve otomatik frenleme gibi özelliklerle fonksiyona özel otomasyon ile donatılmıştır (Zanchin ve ark., 2017). **Seviye 2**’de direksiyon kullanma, hızlanma ve yavaşlama işlemlerinde kısmi otomasyon söz konusudur. Bu seviyede otoban senaryolarına, şerit koruma ve seyir kontrolü gibi işlemlere odaklanıldığından, sürücünün dikkatini yola vermesi ve müdahale etmesi gerekmektedir. Araçtaki sistemlerin çevreyi izlediği, aracın tam kontrolünü üstlendiği ve gerektiğinde sürücüdenden yardım istediği koşullu otomasyon sunan **Seviye 3** sistemlerini de bugünlerde yollarda görmek mümkün olmuştur (Dormon, 2018). Yüksek otomasyon sistemlerine sahip olan **Seviye 4**’de, aracın çoğu işlevleri sistem tarafından sağlanmaktadır. **Seviye 5**’de ise tam otonom araçlar; içerisinde bulundurdukları otomatik kontrol sistemleri vasıtasıyla yolu, trafik akışını ve taşıtın çevresini yani sürüş ortamını algılayarak şoförün müdahalesine gerek duymaksızın seyir halinde gidebilen taşıtlardır (Demir ve Öz, 2018/b). Genel olarak otonom araçları 3 gruba ayırmak mümkündür. Birincisi sadece sürücü ile hareket eden, teknolojinin sürücüye yardımcı olduğu sistem, ikincisi yarı otomatik olan, ihtiyaç olduğunda sürücünün müdahale ettiği sistem, üçüncüsü ise yüksek otomasyonla ayrıca bir sürücü izleme ve kontrolüne ihtiyaç olmadan kendiliğinden hareket edebilen, tamamen sürücüsüz olan, hız limitini ve her türlü riski hesaplayarak otomatize eden sistemdir (Parent, 2015). Bir başka yaklaşımla; 0 ila 2 seviyelerine sahip araçlar, “**geleneksel**” olarak isimlendirilebilir. Çünkü çevre hala sürücü tarafından takip edilmektedir. 3. seviyeden itibaren bu görev araç tarafından gerçekleştirilir (Favaro ve ark., 2018). Bu önemli bir sınırdır, çünkü aracın çevreden gerekli tüm verileri toplaması ve yorumlaması gerekir. Ayrıca araç, sürüş görevinin belirli bir sınırına kadar sorumluluk

alabilir. Otomasyonun zirve noktasına 5. seviyede ulaşılmaktadır. Çünkü araçlar tüm sürüş görevini özerk bir şekilde, her türlü yolda, tüm hız aralıklarında ve her türlü hava koşullarında gerçekleştirmektedir (Martínez-Díaz and Soriguera, 2018). Tablo 2’de SAE J3016’ya göre araçlarda otomasyon düzeyleri ayrıntılı şekilde belirtilmiştir.

**Tablo 2.** SAE J3016’ya göre araçlarda otomasyon düzeyleri (Shladover ve Bishop, 2015; Tuncay, 2017; Demir ve Öz, 2018/b)

Seviye	Otomasyon düzeyi	Ayrıntılı açıklama	Sürüş yapan	Dinamik sürüş sorumlusu	Ani durumda karar veren	Sistemin yetkinlik düzeyi
0	Hiçbir otomasyon yok	Tüm sürüş, şoför tarafından yapılmaktadır	Sürücü (İnsan)	Sürücü (İnsan)	Sürücü (İnsan)	Yok
1	Sürüş destek sistemi var	Direksiyon, gaz ve fren kontrolünden birini iletir sürücü destek sistemi (ADAS) yapmaktadır	Sürücü ve sistem birlikte	Sürücü (İnsan)	Sürücü (İnsan)	Bazı işlevleri sistem sağlamaktadır
2	Kısmi otomasyon var	Direksiyon, gaz ve fren işlevlerinden birkaçının kontrolü ADAS tarafından yapılmaktadır	Sistem	Sürücü (İnsan)	Sürücü (İnsan)	Bazı işlevleri sistem sağlamaktadır
3	Koşullu Otomasyon	Sistem, sürücüdün yardım talep edinceye kadar tüm dinamik sürüşü yapmaktadır	Sistem	Sistem	Sürücü (İnsan)	Çoğu işlevleri sistem sağlamaktadır
4	Yüksek Otomasyon	Sistem, sürücüden yardım talebine cevap vermese bile tüm dinamik sürüşü yapmaktadır	Sistem	Sistem	Sistem	Çoğu işlevleri sistem sağlamaktadır
5	Tam Otomasyon	Sistem, insana ihtiyaç olmadan tüm dinamik sürüş işlevlerini yapabilmektedir	Sistem	Sistem	Sistem	Tüm işlevleri sistem sağlamaktadır

Otonom araçların otonomluk düzeylerine göre yol kenarı ve yol dışı otoparkların kullanımı, işletilmesi ve denetlenmesinde; 0. seviyede ön ve arka park mesafe kontrolü (park distance control), 1. seviyede park direksiyon desteği (parking steering assistant), 2. seviyede park yardımı/asistanı (park assist, key parking), 4. seviyede kapalı kampüs servis aracı (closed campus shuttle - driverless) ve otoparklarda insan sürücüsüz park etme (driverless valet parking in garage) (Automation, 2015) ve 5. seviyede ise tam otomasyon ile köklü şekilde değişiklikler meydana gelecektir.

## 2. OTONOM ARAÇLARIN GELİŞİM EVRELERİ

1926 yılında “Linrican Wonder” olarak adlandırılan radyo kontrollü araç, otonom araçların ilk adımı olmuştur ve otonom araçların en ilkel biçimi olarak kabul edilmektedir. Değiştirilmiş bir formu “**Phantom Auto**” adı ile kullanılmış ve Aralık 1926’da Milwaukee’de Achen Motors tarafından gösterilmiştir. Norman Bel Geddes’in 1939’da bulunan ve dünyanın dört bir yanındaki gömülü devre ile çalışan elektrikli

otomobilleri bir dünya fuarında gösterime çıkarılmıştır. Devreler karayoluna yerleştirilmiş ve daha önce sürücüsüz otomobillerin geliştirilmesi için yapılan girişimler gibi radyo tarafından kontrol edilmiştir. Bu nedenle, RCA Labs otonom otomobiller için oldukça gelişmiş bir model sunmuştur. 1980'lere kadar belirli aşamalar kaydedilmiştir. Ancak önemli adımlar bu tarihten sonra atılmıştır. Çünkü otonom araçların odağında LIDAR (Light Detection and Ranging), radar, küresel konum sistemi (Global Positioning System - GPS) ve bilgisayar vardır. Bu tarihte Mercedes-Benz kamera görüntüsü ile kendinden sürümlü robotik araç üretmiştir. Temel araştırma yaklaşık 1980'den 2003'e kadar, bazen ulaşım kuruluşları ve otomotiv şirketleri ile ortaklaşa yürütülen üniversite araştırma merkezleri, özerk taşımacılığın temel çalışmalarını üstlenmiştir. 1997 yılında Gelişmiş Ulaşım Teknolojileri California Ortakları (PATH) tarafından yönetilen “**DEMO 97**” programı, karayolu içine yerleştirilmiş ve araçtan araca V2V iletişimi ile koordine edilen mknatsızların yönlendirdiği sekiz otonom aracın kontrolünü sağladığını göstermiştir. Başka bir araştırmada ise hem karayolunda hem de otonom araçlarda karayolu altyapısına bağlılık düzeyi yüksek bir araç geliştirmek hedeflenmiştir. 1980'lerin başlarında, Almanya'daki Bundeswehr Üniversitesi Münih'teki Ernst Dickmanns liderliğindeki bir ekip, trafik olmadan saatte 100 kilometre hızla ilerleyen vizyon rehberli bir araç geliştirmiştir. Carnegie Mellon Üniversitesi'nin NavLab'ı, 1980'lerin ortasından 2000'lerin başlarına kadar NavLab 1 - NavLab 11 adında bir dizi araç geliştirmiştir (Anderson ve ark. 2016).

Otonom araçların sürüş yetenekleri son zamanlarda hızlı bir şekilde geliştirilmiştir (Nothdurft ve ark, 2011). 2003'ten 2007'ye kadar ABD Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı (The Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA), otonom araç teknolojisindeki gelişmeleri belirgin şekilde hızlandırmıştır. 2004'te düzenlenen bir off-road yarışmasında rekabet için tamamen otonom araçlar geliştirilmiştir. Ancak başarılı bir sonuç alınamamıştır. 2005'te tekrar düzenlenen yarışmada beş takım başarılı olmuştur. 2007'de DARPA tekrar bir yarışmaya dahil olmuştur. “**Kentsel Mücadele**” olarak adlandırılan bu yarışmada otonom araçlar 60 kilometrelik bir şehir parkuru boyunca seyahat ettirilmiş, trafik yasalarına uymak ve diğer otonom ve insan odaklı araçların yanına gitmişlerdir. Bu yarışma, diğer araçların davranışlarını tespit etmek ve bunlara tepki vermek, işaretli yollarda gezinmek, trafik kurallarına ve sinyallerine uymak için sensör

sistemlerinde ve bilgisayar algoritmalarında gelişmelere öncülük etmiştir (Anderson ve ark. 2016).

DARPA Challenges, otomobil üreticileri ve eğitim sektörü arasında sağlamlaştırılmış ortaklıklar kurmuş ve otomotiv sektöründeki otonom araçları daha ileri aşamaya taşımak için birtakım girişimlerde bulunmuştur. Bunlar arasında Özerk Sürüş İşbirliği Araştırma Laboratuvarı, GM ile Carnegie Mellon Üniversitesi ve Volkswagen ile Stanford Üniversitesi arasında ortaklıklar yer almaktadır. Google'ın sürücüsüz otomobil inisiyatifi, otonom araçları ticari araştırmalar aşamasına taşımıştır. Program, DARPA kentsel yarışmasından kısa bir süre sonra başlamış ve bu yarışmaya katılan birkaç takımın mühendis ve araştırmacılarının yeteneklerini birleştirmiştir. O zamandan beri, Google, bir araç filosu geliştirmiş ve test etmiştir (Anderson ve ark. 2016).

Park yardımı, adaptif seyir kontrol sistemi ve otomatik frenleme sistemleri gibi otonomluk unsurları bugün piyasadaki orta üst segmentteki araçlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Sparrow and Howard, 2017; Kendi, 2017). Şerit takibi ve engellerden kaçınma gibi diğer sistemler ise daha üst segmentlerdeki otomobillerde standart olarak sunulmaktadır (Sundbeck, 2016). Bununla birlikte mevcut araçların çoğunda bulunan, seyir kontrolü, tehlike uyarısı, otomatik paralel park etme, acil durum frenlemesi, kör nokta algılama ve şerit takibi gibi sistemlere sahip olan araçlar seviye 1 ve 2 otonomluk düzeyine karşılık gelmektedir (Brummelen ve ark, 2018). 2015 yılında Tesla bir yazılım güncellemesiyle ABD'de son yıl içinde satılan araçları yarı özerk/otonom duruma getirmiştir (Schwab, 2016). Ayrıca birkaç şirket ise şu anda 4. seviye pilot projelerini hayata geçirmekte, bu da araçların belirli koşullar altında kendilerini sürebilecekleri anlamına gelmektedir. Örneğin, Waymo ve Uber, sürücüsüz taksi hizmetlerini kısa süre içerisinde test etmeyi planlamaktadır. Mevcut ilerlemeye rağmen, araçların normal şartlar altında insan sürücüsüz gidebilmeleri için önemli teknik ilerlemeler ve altyapı gereksinimlerine ihtiyaç vardır. Çünkü otonom araçların şiddetli yağmur ve karda, asfaltsız yollarda veya GPS servisinin veya özel haritaların kullanılmadığı mahallerde güvenilir bir şekilde kullanılması birtakım güçlükleri barındırmaktadır (Litman, 2019).

2012 yılında ilk defa ABD'de Nevada eyaleti sürücüsüz özerk otomobillere izin veren yasayı kabul etmiştir (Schwab, 2016). Ayrıca Google Waymo, US eyaletlerinde 3 milyon mili aşan bir testten geçmiştir

(Waymo, 2016). İlave olarak Google 2020 yılında özerk araçlarını piyasaya sürmeyi planlamaktadır (Schwab, 2016). Otonom araç teknolojilerindeki hızlı gelişmeyle eşzamanlı olarak; bu araçların 2025’li yıllarda alıcısına sunulacağı öngörülmektedir (Fagnant ve Kockelman, 2015). Güncel otonom araç araştırmalarında; trafik akışı (Levin ve Boyles, 2016; de Almeida Correia ve van Arem, 2016; Mahmassani, 2016; Talebpour ve Mahmassani, 2016; de Oliveira, 2017), trafik güvenliği (Katrakazas ve ark., 2015; Kalra ve Paddock, 2016), kesişim kontrolü (Le Vine ve ark., 2015; Yang ve Monterola, 2016), emisyonlar (Greenblatt ve Saxena, 2015; Mersky ve Samaras, 2016), ve çoklu kullanıcılar arasında bu tür araçların paylaşımı (Fagnant ve Kockelman, 2014; Chen ve ark., 2016a, 2016b; Krueger ve ark., 2016) konuları üzerinde durulmuştur.

Ayrıca otonom araçların kendi kendine park etmesine izin verilmesiyle park davranışında kayda değer bir değişim de yaşanacaktır. Dünya Ekonomik formu tarafından 10 ülkede 5600 kişi üzerinden yapılan bir araştırmada katılımcıların %43’ü otonom araç teknolojilerinin en büyük avantajının kendi kendine park yeteneği olduğu belirtilmiştir (Mitchell, 2015). Ayrıca 2017 yılında ABD’de 1500 kişi üzerinde yapılan bir tüketici anketinin sonuçlarına göre katılımcıların yarısı beş yıl içinde sürücü destekli yarı otonom bir araca sahip olmak istediğini belirtirken, %44’ü de tam otonom sürücüsüz bir araç almak istediğini belirtmişlerdir (STM, 2017).

### 3. OTONOM ARAÇLARIN SÜRÜCÜ DAVRANIŞLARINA VE OTOPARK KULLANIMI, YAPIMI VE İŞLETMECİLİĞİNE ETKİLERİ

Gelecekte otonom araçların yolcu ve yük taşımacılığında önemli bir konumda olması beklenmektedir. Böylece taşımacılıkta önemli derecede değişimler de kaçınılmaz olacaktır. Bu değişimlerden önemli olanı aracın kalkış noktasından varış noktasına kadar ki seyahatinin yanısıra otonom araçların varış yerlerine ulaştığı mahallerde meydana gelecektir. Otonom araçlar yolcuları istenilen yere bırakarak kendi kendine park edebilecek ve sonrasında yolcuları tekrar almak için çağrıldıklarında ise otonom seviyesine göre kendi kendine park giriş bölgelerine ya da istenen noktaya gelebileceklerdir. Bu sayede başlangıç ve varış noktası arasında ki yolculuk süresi kısalacak, hassas manevra kabiliyeti sayesinde park alanlarının daha verimli kullanımı temin edilecek (Millard-Ball, 2019), ayrıca trafik sıkışıklığı ve park etme maliyetleri dolayısıyla da yakıt tasarrufu ile birlikte atmosfere salınan emisyonların düzeyinde azalma gibi önemli avantajlar sağlanabilecektir (Liu, 2018; Tian ve ark, 2019). Park alanlarının verimli kullanımı da büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda araç altyapı haberleşmeleriyle otopark park yeri bilgisayarı/kontrolörü araca, park yeri numarasını bildirerek bu park alanına ulaşması için tam rotayı belirtir ve park işlemi gerçekleşmiş olur (Ferreira ve ark. 2014). Nourinejad ve Roorda (2017) tarafından otonom araçların park etme davranışı modellenmiş; şehir planlamacılarının, şehir merkezinden uzak yerlerde bu araçlara park yeri tahsis edebildiklerini tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada otonom araçlara yönelik otopark şekil faktörünün değiştirilmesi ile birlikte katlı otopark hacim ihtiyacının ortalama %62 ve maksimum %87 oranında azaltılabildiği tespit edilmiştir (Nourinejad ve ark, 2018). (Nourinejad ve Roorda, 2017). Otonom araç düzeylerinin park davranışlarına ve otopark işletmeciliğine muhtemel etkileri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Otonom araç düzeylerinin park davranışlarına ve otopark işletmeciliğine muhtemel etkileri

Sistem	Otonomluk Düzeyi	Muhtemel Faydaları
Park mesafesi kontrolü (Park distance control)	Sıfır	<ul style="list-style-type: none"> <li>Park görevlisinin yardımı olmaksızın park edebilmesi,</li> <li>Sürücülerin parktaki kazalarında azalma ve doğal olarak otopark bakım masraflarında azalma</li> </ul>
Park direksiyon desteği (Parking steering assistant)	Bir	<p>Sıfır otonomluk seviyesine ilave olarak;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sürücülerin daha az stresli park etmesi</li> <li>Sürücünün daha hassas park edebilmesi</li> <li>Daha verimli park alanı kullanımı</li> </ul>
Park yardımı/asistanı (Park Assist, Key parking)	İki	<p>Birinci otonomluk seviyesine ilave olarak;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sürücüye ekstra zaman kazanımı sağlamaktadır</li> </ul>
Valesiz park (Valet parking, driverless parking)	Dört	<p>İkinci otonomluk seviyesine ilave olarak;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Valeye gerek kalmaması ve doğal olarak uzun vadede işletmeci açısından daha az personele ihtiyaç duyulması</li> <li>Park alanlarının daha verimli kullanılması</li> <li>İşletmeci, sürücü ve yolcular için daha efektif zaman kazanımı<sup>4</sup>,</li> <li>Otopark içerisindeki kazalarda belirgin azalma,</li> <li>Otoparkı araç sigorta bedellerinde düşme</li> </ul>

Ayrıca otonom araçlar; kısa, orta ve uzun vadede otopark müşteri altyapısını, şimdi ve gelecekte otopark yatırımları ve operasyonlarında köklü değişikliklere sebebiyet verecektir. Bu minvalde yapılmakta olan ve yapılması planlanan otopark yatırımlarında bu trend/gelişim dikkate alınmalıdır. Çünkü tasarlanmış bir otoparkın 30-50 yıl arasında kullanılacağı öngörüsü yapılmaktadır (Robertson, 2015). Bu bağlamda değişecek paradigmanın aşağıdaki şekilde olacağı öngörülebilir:

- Başlangıçta otonom araçlar için belli ayrılmış otopark alanı ayrılması,
- Daha az otopark alanı ihtiyacı,
- Park yapılarında daha gelişmiş teknolojik altyapının kullanılması,
- Otonom araçlar için sunulacak hizmetlerin öngörülmesi (Örneğin, PHEV ve daha üst elektrikli otonom araçlar için şarj altyapıları -konvansiyonel şarj üniteleri, indüktif şarj üniteleri gibi),
- Park yapılarının giriş-çıkışa en yakın kısımlarında ya da binanın etrafında yolcu indirme/bindirme alanlarının tasarlanması,



- Tamamen otonom araçlar için tasarlanan otopark garajlarında yolculara yönelik asansör ve yürüme kordonlarının elimine edilmesi. Doğal olarak otoparkların aydınlatılması, giriş ve çıkış noktaları dikkate alınarak tasarlanabilir.
- Otonom araçlar için daha düşük yükseklik ve daha az genişlik gereksinimli otopark tasarımları,
- Ödeme teknolojilerinde değişikliğin dikkate alınması,
- Varış noktasından daha uzakta yolcuların indirilmesiyle otoparkların şehir merkezlerinden daha uzak noktalara konuşlandırılma imkanı (Robertson, 2015). Yada başka bir yaklaşımla otonom araçların kendi kendine park edebilecekleri göz önüne alındığında, sürücülerine yakın olmaları gerekmediğinden daha az sıkışık park yerine gidebilmelerinin sağlanması (Fagnant ve Kockelman, 2015). Bu, insan sürücülerin bir nokta aramak zorunda kalmadan veya o noktadan son hedeflerine yürümek zorunda kalmadan doğrudan varış yerlerine bırakılabileceği anlamına da gelir (de Almeida Correia and van Arem, 2016; Fagnant and Kockelman, 2015).
- Otoparkların, sürücü/araçla iletişime geçerek park yerinin uygunluğunun iletilmesi (VDA Magazine, 2015),
- Tam otonom araçlar, kendilerine yönelik ayrılmış (connected parking lots) park alanlarına sürücüsüz ulaşabilir (VDA Magazine, 2015).

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hızla gelişen şehirlerde ulaşım odaklı olarak trafik sıkışıklığı ve talepten az olan otopark sunumu iki belirgin sorun olarak meydana çıkmaktadır. Bu durum trafikte yakıt tüketimine, doğal olarak zararlı egzoz emisyonlarının artmasına, zaman kaybına ve trafik odaklı strese sebebiyet vermektedir. Bunların yekünü olarak hem ticari hem de verimlilik kayıpları yaşanmakta tabii olarak ta ekonomik gidişat negatif etkilenmektedir. Otonom araç sürecinin gelişim hızı ve uçtan uca otopark sektörünün bu süreci desteklemesi; karmaşıklık/komplekslik, faydalılık, güvenlik ve emniyetlilik (complexity, utility, security, and reliability) unsurlarından etkilenecektir. Bu dört unsur otonom araçların pazar

penetrasyonunu belirleyecektir. Otopark planlamacıları ve işletmecileri de;

- daha gelişmiş teknolojik altyapının kullanılması/sunulması,
- verilecek hizmetlerin öngörülmesi,
- güvenli, hızlı ve konforlu yolcu indirme/bindirme alanlarının tespit edilmesi,
- katlı otoparklarda yolcu asansör ve yürüme kordonlarının durumu ve otoparkların aydınlatılması,
- otopark yükseklik ve genişliklerinin optimize edilmesi,
- ödeme teknolojilerinde değişikliğin dikkate alınması,
- otoparkların şehir merkezlerinden daha uzak noktalarda tasarlanması,
- sürücü/araç ve park yerinin karşılıklı iletişimi (otoparkların araçlara doluluk bilgisinin gönderebilmesi)

gibi hususların plan ve projelerinde dikkate almaları gerekmektedir.

## **KISALTMALAR**

ACC	Adaptif Hız Kontrolü
ADAS	İleri Sürücü Destek Sistemi - Advanced Driver Assistance Systems
ALV	Otonom Kara Araçları - Autonomous Land Vehicles
BASt	Almanya Federal Karayolu Araştırma Enstitüsü
DARPA	ABD Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı - The Defense Advanced Research Projects Agency
GPS	Küresel Konum Sistemi - Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
LIDAR	Lazerli Radar - Light Detection and Ranging
NHTSA	ABD Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi
OICA	Motorlu Araç Üreticileri Uluslararası Organizasyonu - The International Organization of Motor Vehicle Manufacturers

PATH Gelişmiş Ulaşım Teknolojileri California Ortakları

SAE ABD Otomotiv Mühendisler Birliği

V2I Taşıt Altyapı Haberleşmesi

V2V Taşıt-Taşıtl Haberleşmesi

V2x Taşıtl Diğer Haberleşme



## KAYNAKLAR

- Anderson, J.M., Kalra, N., Stanley, K.D., Sorensen, P., Samaras, C., Oluwatola, O.A., 2006. Autonomous vehicle technology a guide for policymakers. ISBN: 978-0-8330-8398 2.
- Arnott, R. ve Rowse, J., 2009. Downtown parking in auto-city. *Regional Science and Urban Economics*, 39(1), 1-14.
- Automation, 2015. From driver assistance systems to automated driving. *VDA, Magazine - Automation*.
- Autonomous Car, 2018. [https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous\\_car](https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_car), Erişim Tarihi: 05.03.2018.
- Belloche, S., 2015. On-street parking search time modelling and validation with survey-based data. *Transportation Research Procedia* 6, 313-324.
- Brummelen, J. V., O'Brien, M., Gruyer, D., Najjaran, H., 2018. Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C*, 89, 384-406.
- Chen, T.D. , Kockelman, K.M. , Hanna, J.P., 2016. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transp. Res. Part A* 94, 243-254.
- Chen, Z., He, F., Zhang, L., Yin, Y., 2016. Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration. *Transp. Res. Part C*. 72, 143-156.
- de Almeida Correia, G.H. , van Arem, B. , 2016. Solving the user optimum privately owned automated vehicles assignment problem (uo-poavap): a model to explore the impacts of self-driving vehicles on urban mobility. *Transp. Res. Part B* 87, 64–88.
- de Oliveira, Í.R., 2017. Analyzing the performance of distributed conflict resolution among autonomous vehicles. *Transp. Res. Part B* 96, 92-112.
- Demir, A. ve Öz, A., 2018/a Otonom araç süreciyle değişen taşıt teknolojilerinin incelenmesi. 8<sup>th</sup> International Conference of Strategic Research on Scientific Studies and Education 2018, Vienna University - Vienna/Austria.
- Demir, A. ve Öz, A., 2018/b. Otomotiv trendleri bağlamında “Türkiye’nin otomobili”. Editör: Ali Öz, *Teknik Bilimlerde Güncel Yaklaşımlar, Araştırma- İnceleme, Hiperayın: 237*, ISBN: 978-605-281-050-7, İstanbul.
- Dormon, B., 2018. Intel – Otonom sürüş. <https://www.intel.com.tr/content/www/tr/tr/it-managers/driverless-cars.html>.

- Evaluation Report, 2017. On-street car sharing pilot program. San Francisco Municipal Transportation Agency, Sustainable Streets Division-Parking.
- Fagnant, D.J., Kockelman, K., 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp. Res. Part A* 77, 167-181.
- Fagnant, D.J., Kockelman, K.M., 2014. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transp. Res. Part C* 40, 1-13.
- Favaro, F., Eurich, S., Nader, N., 2018. Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accident Analysis and Prevention* 110, 136-148.
- Ferreira, M., Damas, L., Conceição, H., d'Orey, P. M., Fernandes, R., Steenkiste, P., 2014. Self-automated parking lots for autonomous vehicles based on vehicular ad hoc networking. Conference Paper, DOI: 10.1109/IVS.2014.6856561.
- Gallivan, S., 2011. IBM global parking survey: drivers share worldwide parking woes. IBM, September 18.
- Greenblatt, J.B., Saxena, S., 2015. Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of us light-duty vehicles. *Nat. Clim. Change* 5 (9), 860-863.
- Kalra, N., Paddock, S.M., 2016. Driving to safety: how many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Transp. Res. Part A* 94, 182-193.
- Karlqvist, J. and Sundbeck, L.A., 2016. Challenges of using autonomous drive technology for autonomous transports in car manufacturing. Master's Thesis in Production Engineering, Department of Product and Production Development, Chalmers University of Technology Gothenburg.
- Katrakazas, C., Quddus, M., Chen, W.H., Deka, L., 2015. Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: state-of-the-art and future research directions. *Transp. Res. Part C* 60, 416-442.
- Kendi, A., 2017. Sürücüsüz araçlar ve Türkiye. Araştırma Raporu.
- Kozalı, B., 2014. Kentiçi otopark hizmetlerinde özel sektör katılımının sürücülerin park etme tercihleri ve tutumları üzerine etkisi. *Journal of Life Economics*, 1(2), 191-191.
- Krueger, R., Rashidi, T.H., Rose, J.M., 2016. Preferences for shared autonomous vehicles. *Transp. Res. Part C* 69, 343-355.

- Le Vine, S., Zolfaghari, A., Polak, J., 2015. Autonomous cars: the tension between occupant experience and intersection capacity. *Transp. Res. Part C* 52, 1-14.
- Levin, M.W., Boyles, S.D., 2016. A cell transmission model for dynamic lane reversal with autonomous vehicles. *Transp. Res. Part C* 68, 126-143.
- Litman, T., 2019. Autonomous vehicle implementation predictions. Implications for Transport Planning, Victoria Transport Policy Institute.
- Liu, W., 2018. An equilibrium analysis of commuter parking in the era of autonomous vehicles. *Transportation Research Part C*, 92, 191-207.
- Mahmassani, H.S., 2016. 50<sup>th</sup> anniversary invited article-autonomous vehicles and connected vehicle systems: flow and operations considerations. *Transp. Sci.* 50 (4), 1140-1162.
- Martínez-Díaz, M., Soriguera F., 2018. Autonomous vehicles: Theoretical and practical challenges. *Transportation Research Procedia* 33, 275-282, XIII Conference on Transport Engineering, CIT2018.
- Mersky, A.C., Samaras, C., 2016. Fuel economy testing of autonomous vehicles. *Transp. Res. Part C* 65, 31-48.
- Millard-Ball, A., 2019. The autonomous vehicle parking problem. *Transport Policy* 75, 99-108.
- Nothdurft, T., Hecker, P., Ohl, S., Saust, F., Maurer, M., Reschka, A., Böhmer, J. R., 2011. Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic 2011.
- Nourinejad, M., Bahrami, S., Roorda, M. J., 2018. Designing parking facilities for autonomous vehicles. *Transportation Research Part B* 109, 110-127.
- Parent, M., 2015. CityMobil2, Cities demonstrating automated road passenger transport, <http://www.citymobil2.eu/en/>.
- Robertson, M., 2015. Autonomous vehicles and parking. Consultants Corner, International Parking Institute, p.8.
- Schwab, K., Çevirmen: Zülfü Dicleli., 2016. Dördüncü Sanayi Devrimi. Optimist Yayinevi, I. Baskı, ISBN: 9786053222958.
- Shladover S.E. ve Bishop, R., 2015. Fundamental issues in road transport automation. ITS America Webinar, July 15.
- Shoup, D., 2005. *The High Cost of Free Parking*. Planners Press.
- Sparrow, R., Howard, M., 2017. When human beings are like drunk robots: Driverless vehicles, ethics, and the future of transport”, *Transportation Research Part, C*, 80, 206-215.

- STM, 2017. Sürücüsüz araçlar ve Türkiye. Araştırma Raporu, Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi.
- Talebpour, A., Mahmassani, H.S., 2016. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transp. Res. Part C* 71, 143-163.
- Tian, L. J., Sheu, J. B., Huang, H. J., 2019. The morning commute problem with endogenous shared autonomous vehicle penetration and parking space constraint. *Transportation Research Part B* 123, 258-278.
- Tuncay, R.N., 2017. Akıllı araçlarda gelişmeler ve ülkemizin sürücüsüz (otonom) araç yapma potansiyeli. Okan Üniversitesi - Ulaşım Teknolojileri ve Akıllı Otomotiv Sistemleri Uygulama ve Araştırma Merkezi.
- TÜİK, 2019. [http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_id=1051\\_](http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1051_)
- VDA Magazine, 2015. Automation - From Driver Assistance Systems to Automated Driving.
- Waymo, 2016. On the road, <https://waymo.com/ontheroad/>.
- WHO, 2018. Global status report on road safety. World Health Organization.
- Willems, F., Gompel, P., Seykens, X. and Wilkins, S. 2019. Robust Real-World Emissions by Integrated ADF and Powertrain Control Development, Harald Waschl, Ilya Kolmanovsky, Frank Willems, Control Strategies for Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Driving Functions - Development, Testing and Verification, Chapter 2, ISSN 0170-8643 ISSN 1610-7411 (electronic), <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91569-2>.
- Yang, B. and Monterola, C., 2016. Efficient intersection control for minimally guided vehicles: A self-organised and decentralised approach. *Transp. Res. Part C* 72, 283-305.
- Yetim, S., 2016. Sürücüsüz araçlar ve getirdiği/getireceği hukuki sorunlar. 2016/1 Ankara Barosu Dergisi.
- Yorgancılar, E. 2017. Sanayi 4.0: Uyum sağlayamayan kaybedecek, Sunum.
- Zanchin, B. C., Adamshuk, R., Santos, M. M., Collazos, 2017. On the instrumentation and classification of autonomous cars. 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Banff Center, Banff, Canada, October 5-8.



# LABVIEW YAZILIMI İLE ÖLÇME VE ANALİZ

BÖLÜM  
3

Ahmet ÖZMEN<sup>1</sup>,  
Aykut COŞKUN<sup>2</sup>,  
Mehmet ERTUĞRUL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Ağrı, Türkiye, ahmet25440@gmail.com

<sup>2</sup> Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye

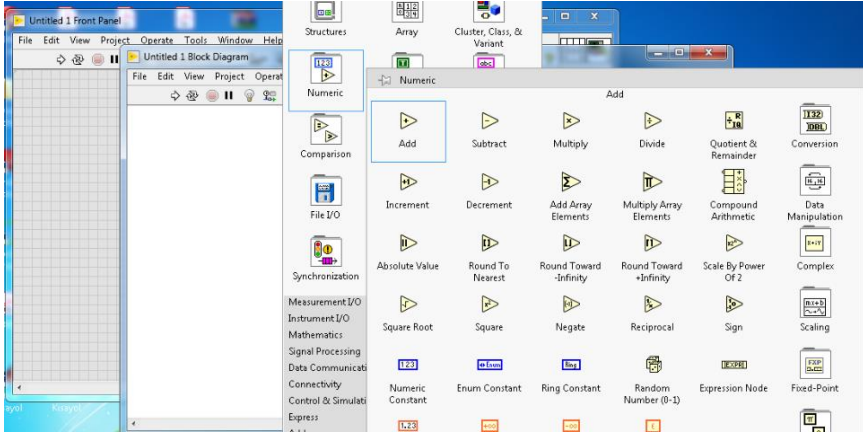
<sup>3</sup> Elektrik Elektronik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye



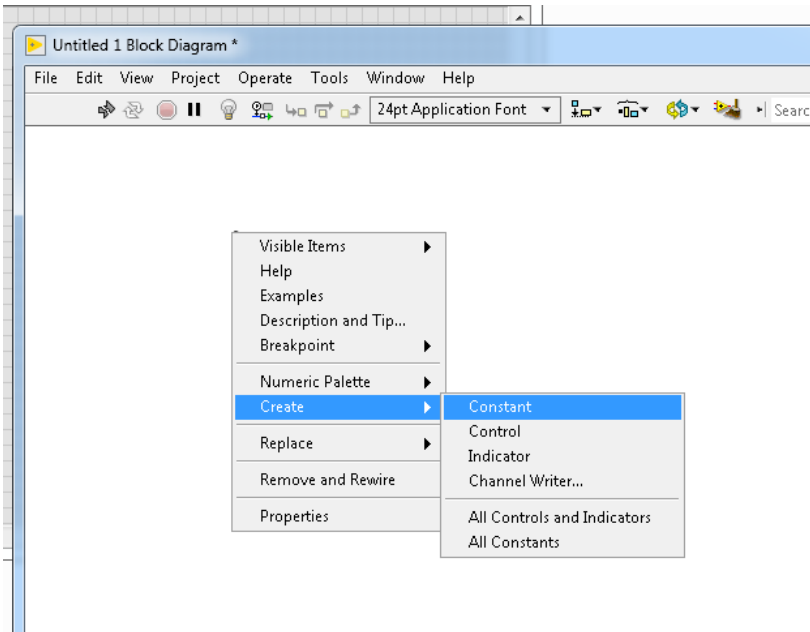
## LABVIEW PROGRAMINA GİRİŞ

LabVIEW programı iki ekrandan oluşmaktadır. Bu ekranlar **Blok Diagram ve Front Panelidir**. Bu kısımlardan blok diagram kısmı yazılımcının çalıştığı kısımdır ve algoritmasına bağlı olarak yapılacak işlemleri yaptığı kısımdır. **Front panel** ise algoritma çalıştığı esnada kullanıcıya görünecek ekrandır. Blok diagram kodlama kısmı olarak düşünülebilir. LabVIEW ile gelen bir kolaylık olarak kod yazmadan blokların birleştirilmesiyle programlama yapılmaktadır. Bu kısımda matematiksel işlemler, kontrol yapıları, metinsel işlemler, dosya okuma yazma ve kaydı, network işlemleri, database işlemleri, yüklenen cihazlara ait kütüphaneler gibi yazılımcının ihtiyacı olan içerikler bulunmaktadır. Front panelde ise blok diagramın kullanıcıya gösterilecek kısmıdır.

**Blok Diagramda** yapmak istediğimiz işleme karşılık gelen ikonlar bulunmaktadır. Bu ikonlar LabVIEW yazılımcıları tarafından kodlanmış ve ikon haline getirilip kullanımımıza sunulmuştur. Bu ikonlar temel olarak giriş ve çıkış olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımları kullanılarak algoritmamıza göre istenilen işlem yaptırılır. Buna bir örnek olarak dışarıdan girilen bir sayı sabit bir değer ile toplamını gösteren bir program oluşturalım. Bunun için blok diagramdan sağ tıklayıp Şekil 1’de gösterildiği gibi açılan ekrandan “**Numeric**” bölümünde bulunan toplama işlemini “**Add**” alalım. Toplama ikonunda görüldüğü üzere ikonun etrafında bağlantı noktaları bulunmaktadır. Bu noktalar algoritmamızı oluşturacak akış şemamızı belirlemek için kullanılacaktır. Bağlantı yapmak istediğimiz kısma farenin sağ tuşunu tıklayıp “**Create**” kısmına tıklayalım. Burada Şekil 2’de gösterildiği gibi 3 kısım karşımıza çıkacaktır. Bunlar “**Constant, Control, Indicator**” kısımlarıdır. **Constant** seçildiğinde Blok diagramda sabit bir değer girmemizi sağlar. **Control** seçildiğinde Front panelde bir ikon oluşturur ve kullanıcının bu kısma müdahil olmasını sağlar. Bu iki işlem ikonun giriş kısmına uygulanabilir. İkonun çıkış kısmına ise **Indicator** uygulanır. Bu sayede Front panelde ikonda yapılan işlemin sonucu görüntülenir. Bu 3 kısım LabVIEW’ de en çok kullanacağımız kısımlardır. Ayrıca bir ikonun çıkışı başka bir ikonun girişi olabilir. Bu işlem için bağlanacak kısımların birine sol tıklanır. Fare hareket ettirilip diğer ikonun bağlantı noktasına tekrar sağ tıklanarak işlem gerçekleştirilir.



*Şekil 1. LabVIEW Toplam İşlemi*

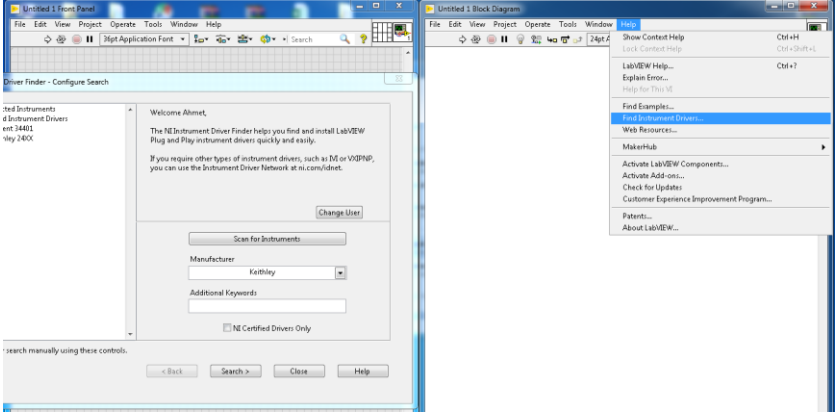


*Şekil 2. Create İşlemleri*

## LABVIEW İLE KEITHLEY CİHAZINI KONTROL ETME

LabVIEW ile birçok cihaz çok rahatlıkla haberleşmektedir (Ballesteros et al., 2004; Bohórquez et al., 2009; Boutana et al., 2017; Chouder et al., 2013; Forero et al., 2006; Kobayashi et al., 2006). Bunlardan özellikle laboratuvarlarda kullanılan KEITHLEY cihazı LabVIEW ile kontrol edilecektir. Diğer cihazlarda bu cihaza benzer şekilde kontrol edilmektedir. Bu işlemde öncelikli olarak cihazımızın LabVIEW

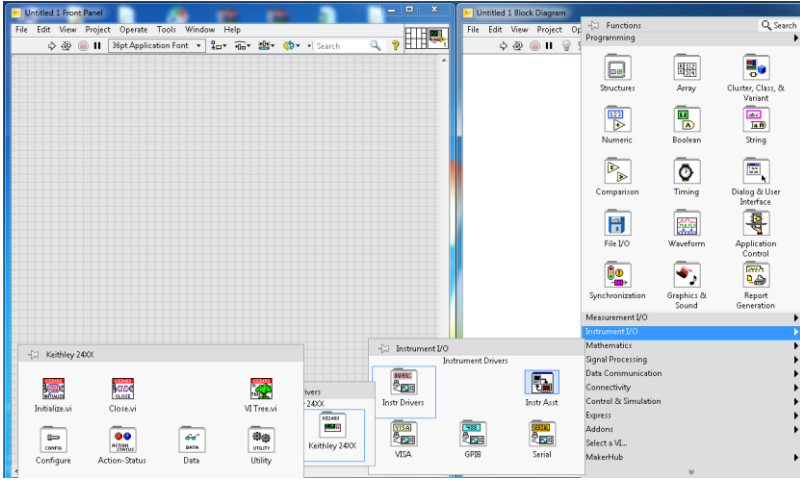
sürücülerini(driver) yüklememiz gerekmektedir. Bu işlem birkaç farklı yöntem ile yapılabilir. Öncelikle NI LabVIEW internet sayfasından cihaz ismi yazılıp aranarak eklenir. Benzere şekilde cihazın üretici firmasının internet sitesinden veya cihazla birlikte verilen CD ile yüklenir. Bir diğer yöntem ise LabVIEW yazılımının içerisinde “**Help/Find Instrument Drivers...**” seçilir.



*Şekil 3. Driver Ekleme*

Şekil 3’de gösterildiği gibi “**NI Instrument Driver Finder - Configure Search**” penceresi açılacaktır. Bu kısımda kullanıcı adı ve şifresi ister ise **NI Instrument** ’in ana sayfasından ücretsiz üye olabilirsiniz. Bu pencereden **Manufacturer** kısmından **Keithley** seçilir. Bu kısımdan benzer şekilde kullanmak istediğimiz cihazın ismi ya da firmasının ismi seçilir. **Additional Keywords** kısmından cihazın modeli seçilir. Daha sonra “**Search**” tıklanıp veri tabanından sürücüler bulunur. Bulunan sürücüler seçilip “**Install**” denilerek kurulur.

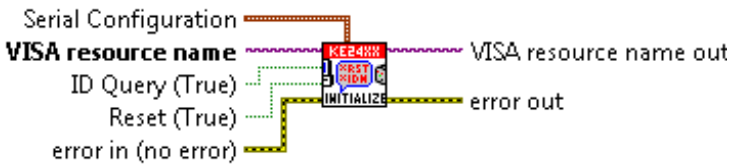
Kurulumu tamamlanan cihaz VI’ları Şekil 4’de verildiği gibi **Block Diagram**’a sağ tıklayıp açılan pencereden **Instrument I/O** kısmından **Instrument Drivers** kısmında bulunmaktadır. Bu kısımda yüklediğimiz bütün cihazlara ait VI’lar bulunmaktadır.



Şekil 4. Yüklenen Drivers

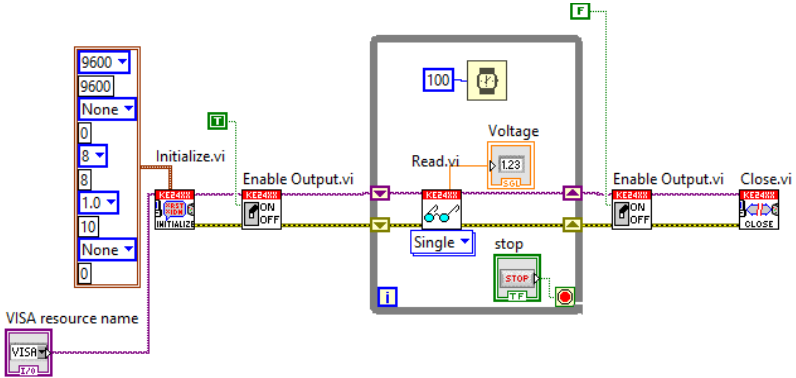
Bütün bu işlemler tamamlandığına göre artık uygulamamızı oluşturabiliriz. Bir cihazı kontrol etmek için en temelde bilgisayarımızın ve yazılımımızın bu cihazla aynı dili konuşması gerekmektedir. Kurduğumuz eklentilerle bunu sağladığımızı göre gelin şimdi ilk VI olan **Initialize.vi**' yi inceleyelim. Şekil 5'de gösterildiği gibi bu VI cihazların hangi yolla haberleşeceğini seçmemize ve bu haberleşme protokolünün ayarlarını yapmamıza olanak sağlayacaktır. Bu haberleşme yolları **VISA**, **GPIB** ve **Serial** gibi bir protokoldür ve sahip olduğumuz cihaza göre belirlenir. Bu protokole uygun bağlantı kablosu yardımı ile cihaz bilgisayarımıza bağlanır. Cihazı bilgisayar gördükten sonra Initialize.vi' nin **VISA** resource name kısmında gözükecektir. Öncelikle VISA resource name kısmına sağ tıklayıp **Create/Control** seçilirse bağlantıyı Front Panel 'de görebiliriz. Cihazımızın bağlı olduğu portu gördükten sonra diğer bağlantı ayarlarını cihazın bağlantı ayarlarıyla aynı olacak şekilde ayarlamamız gerekir. Bu ayarlar bilinmiyorsa cihaz kullanım kılavuzundan veya cihazın kendi menülerinden bağlantı bilgileri kısmından öğrenmemiz gerekecektir.

#### Keithley 24XX.lvlib:Initialize.vi

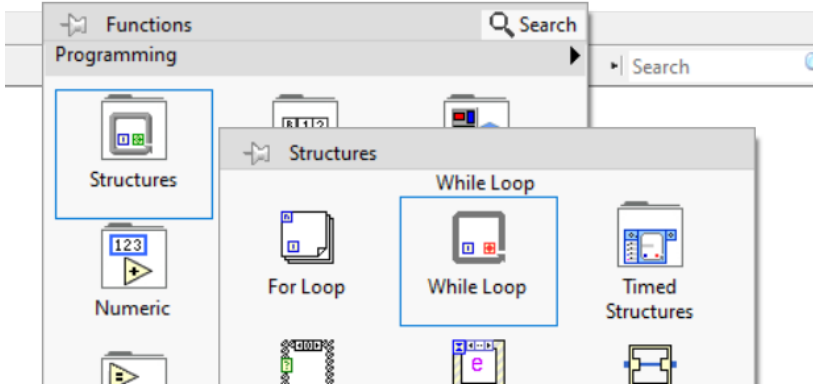


Şekil 5. Initialize.vi

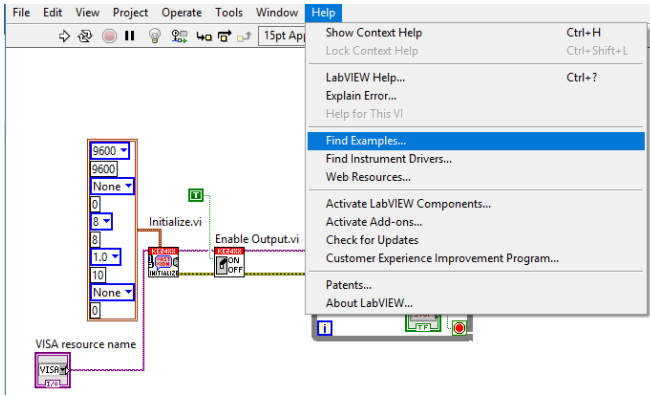
Unutmayalım ki bu yöntemle elimizdeki LabVIEW sürücüsü olan bütün cihazlarla iletişim kurabiliriz. Artık ölçüm yapabiliriz, cihaz parametrelerini değiştirebiliriz, cihazın giriş çıkış portlarını kontrol edebiliriz, matematiksel işlemler yapabiliriz, analiz yapabiliriz, grafik çizdirebiliriz, verilerimizi bilgisayarımıza kaydedebiliriz. Bu işlemlere benzer çok sayıda analize LabVIEW imkan tanımaktadır. Biz şimdi örnek olsun diye Keithley cihazımızdan gerilim ölçümü yapalım. Bu işlem için tekrar Şekil 4'deki ekranı açalım ve buradan **Data** kısmında bulunan **Read.vi** seçelim. Şekil 6'da görüldüğü üzere **Initialize.vi**'in sağ üst ve altında bulunan çıkışlar **Close.vi**'in sol üste ve altındaki girişlere kadar bütün VI'lara girip çıkarak **Close.vi**'de sonlandırılmıştır. Bu işlem temel olarak bu ve benzeri uygulamalarda bu şekilde yapılmaktadır. Genel olarak alt tarafta olan bağlantılar sistemde oluşan hataların belirlenip gösterilmesi için kullanılmaktadır. Üst tarafta bulunan bağlantılar ise genel olarak bilgilerin bir sonraki VI'ya aktarılması amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü üzere ek olarak birde **While Loop** kullanılmıştır. Bunun amacı ölçümün bir döngü boyunca tekrarlanması içindir. Şekil 7'da gösterildiği şekilde **While Loop** seçilip, farenin sol tuşuna basılı tutularak döngünün oluşturması istenen kısım seçilir ve bırakılır. Döngü tekrar süresi için bir gecikme eklenir ve en son olarak döngünün bitmesini sağlayacak olan sol alta bulunan kırmızı noktaya sağ tıklayıp bir buton eklenir.



Şekil 6. Voltaj Okuma



Şekil 7. While Loop



Şekil 8. Örnek Uygulamalar

Kullanacağımız birçok cihazın örnek uygulaması LabVIEW programında bulunmaktadır. Bu örnek uygulamaları kullanabileceğimiz gibi bunları inceleyerek kendi uygulamamızı geliştirebiliriz. Örnek uygulamalar Şekil 8’de görüldüğü üzere “**Help Menü**ü” içerisinde “**Find Examples...**” kısmından ulaşılabilmektedir.

## SONUÇ

Görüldüğü üzere herhangi bir kod bilgisine ihtiyaç duymadan LabVIEW yazılımı kullanıp çok kısa sürede bir cihaz kontrol edilebilmektedir. Bu sayede hem kendi sistemlerimizi çok rahatlıkla oluşturabiliriz hem de verilerimizi analiz edip bilgisayar ortamında kaydedebiliriz. Ayrıca birkaç cihaz ve sensörlerden oluşan karmaşık bir sistemde tek bir yazılım ortamında birbirleriyle senkron bir şekilde çalıştırabiliriz. Bu sayede bir cihazın çalışması örneğin diğer bir cihazın



ürettiği sonuca bağlıysa bunu tek bir yazılım ortamında çok kısa bir sürede gerçekleştirebiliriz.



## KAYNAKLAR

- Ballesteros, J., Fernández Palop, J. I., Hernández, M. A., Crespo, R. M., & del Pino, S. B. (2004). LabView virtual instrument for automatic plasma diagnostic. *Review of Scientific Instruments*, 75(1), 90–93. doi:10.1063/1.1634356
- Bohórquez, M. A. M., Enrique Gómez, J. M., & Andújar Márquez, J. M. (2009). A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities. *Solar Energy*, 83(6), 883–890. doi:10.1016/J.SOLENER.2008.12.007
- Boutana, N., Mellit, A., Haddad, S., Rabhi, A., & Pavan, A. M. (2017). An explicit I-V model for photovoltaic module technologies. *Energy Conversion and Management*, 138, 400–412. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2017.02.016
- Chouder, A., Silvestre, S., Taghezouit, B., & Karatepe, E. (2013). Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. *Solar Energy*, 91, 337–349. doi:10.1016/J.SOLENER.2012.09.016
- Forero, N., Hernández, J., & Gordillo, G. (2006). Development of a monitoring system for a PV solar plant. *Energy Conversion and Management*, 47(15–16), 2329–2336. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2005.11.012
- Kobayashi, K., Takano, I., & Sawada, Y. (2006). A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18–19), 2975–2988. doi:10.1016/J.SOLMAT.2006.06.050



**FARKLI GRADASYONA  
SAHİP AGREGALARIN BETON  
SEGREGASYON  
DİRENCİNE ETKİSİ**

**BÖLÜM  
4**

**Bekir ÇOMAK<sup>1</sup>,  
Alper BİDECI\*<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup> Sorumlu Yazar (Corresponding author) alperbideci@duzce.edu.tr Mimarlık Bölümü, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonun karıştırma işlemi bittikten sonra sahip olduğu işlenebilirliği, bir değişme olmadan koruyabildiği süre içindeki haline taze beton denilmektedir. Taze beton sadece geçici bir ilgi olmasına rağmen, taze betonun özellikleri, doğrudan sertleşmiş betonun özellikleri ile ilgilidir (Neville, 2012). Taze betondan beklenen özellikler yerine getirilemediği durumlarda, sertleşmiş betonda çok ciddi problemlere neden olmaktadır.

Agregalar, taze betonun performansı üzerinde en büyük etkiye sahip olan bileşendir. Şekil, yüzey dokusu ve gradasyonu gibi agrega özellikleri taze betonun işlenebilirliğini etkiler. Bu nedenle agregalar, betonun kolayca karılabilmesi, segregasyona uğramadan taşınabilmesi, pompalanabilirliği, kalıba yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin düzeltilebilmesinde hayati önem taşımaktadırlar (Alexander & Mindess, 2005; Okonkwo & Arinze Emmanuel, 2015; Oritola, Saleh, & Sam, 2014; Page & Page, 2007). Agregalar, karışım tasarımının amacı (yani karışım bileşenlerinin oranı) ile sertleştirilmiş haldeki betonun gerçekleştirilmesi arasındaki bağlantıyı oluşturur. Karışım formülasyonu veya bağlayıcılar ne kadar karmaşık olursa olsun, plastik karışım, yoğun bir homojen malzeme üretmek için segregasyon veya aşırı terleme olmaksızın iyice sıkıştırılmadıkça, beton başarılı bir şekilde elde edilemez (Alexander & Mindess, 2005).

Taze betondaki en büyük problemlerden biri olan segregasyon, kaba agreganın harçtan ayrılma eğilimi olarak tanımlanabilir. Taze betonun taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri uygun yöntemlerle uygun şekilde yapılmadığı takdirde, taze beton kolaylıkla segregasyon gösterebilmektedir. Segregasyonun yapıların dayanımı ve dayanıklılığına etkisi vardır (Ivan Navarrete & Lopez, 2016; Navarrete & Lopez, 2017).

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

Literatürde, segregasyon olgusu birçok kaynak kitapta ve makalelerde geçmektedir. Birçok kaynakta segregasyona karşı alınması gereken önlemlerle ilgili açıklamalar mevcuttur. Ancak geleneksel bir betonda segregasyonu belirleyebilmek için standart bir test yönteminin olmayışı, literatürde segregasyon ile yapılmış çalışmaların kısıtlı olmasına neden olmaktadır.

Bilgil, Ozturk ve Bilgil (2005) yapmış oldukları çalışmalarında, taze betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında, segregasyon mekanizmasını

sayısal olarak incelemişlerdir. Kalıba taze betonun doldurulması sırasında viskozite ve segregasyon arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda, süper akışkanlaştırıcı kullanımı agregaya segregasyonunu azalttığını belirlemişlerdir.

Gülşahin (2006) çalışmasında, segregasyon oluşması ile basınç dayanımının azaldığını belirtmiştir. Bu azalmanın kesikli granülometri ile oluşturulan karışımlarda %32'ye, sürekli granülometri ile oluşturulan karışımlarda %26'ya kadar çıktığını göstermiştir. Benzer şekilde yarma-çekme mukavemetlerinin de segregasyon oluşması sonucu azaldığını görmüştür. Taze beton deney sonuçlarına göre sürekli granülometriye sahip betonların segregasyona karşı daha dirençli olduklarını saptamış, sertleşmiş beton deney sonuçlarına göre ise kesikli granülometriye sahip betonların mekanik davranışlarının daha iyi olduklarını belirtmiştir.

Navarrete ve Lopez (2016), yapmış oldukları çalışmalarında, taze betonun stabilitesinin, iri agregaların maksimum hacminin ve yoğunluğunun, harç viskozitesinin, titreşim sırasında maksimum ivmenin ve titreşim süresinin nasıl etkilendiğini değerlendirerek segregasyonu modellemeyi amaçlamışlardır. Bir beton karışımının segregasyona uğramaması veya sabit kalma eğilimi, çoğunlukla titreşim işleminden ziyade karışım tasarımı ile kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir.

Navarrete ve Lopez (2017), bir beton karışımının segregasyon eğilimini, kaba agreganın özgül yüzeyi ile agregaya ve harç fazı arasındaki yoğunluk farkı arasındaki etkileşimle açıklamışlardır.

Normal beton için, her ne kadar segregasyon için bir ölçüm testi bulunmasa da meydana geldiği anda gözle muayene sonucunda açık bir şekilde tespit edilebilir (Gülşahin, 2006). Normal betonda segregasyon için kullanılan bir ölçüm yöntemi olmamasına rağmen kendiliğinden yerleşen betonlar için çeşitli deney yöntemleri (column segregation test, penetration test for segregation, wet sieving stability test, electrical conductivity, sieve segregation resistance test, hardened visual stability index, image analysis of hardened cylinder) bulunmaktadır (ACI-ASCE Committee 238, 2008; P. J. M. Bartos, M. Sonebi, & A. K. Tamimi, 2002; Gökçe & Andiç-Çakır, 2018; Shen, Bahrami Jovein, Sun, Wang, & Li, 2015; Shen, Jovein, & Li, 2014).

Bu çalışmada, agregaya gradasyonunun segregasyona olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, 5 farklı agregaya gradasyonu hazırlanmış ve bu hazırlanan gradasyonlar ile betonlar üretilmiştir. Taze



haldeki betonlar üzerinde yoğunluk, çökme ve segregasyonu belirlemek üzere kolon segregasyon deneyi yapılmıştır. Ayrıca sertleşmiş haldeki betonların basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları ilgili standartlara göre yapılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonlar için yapılan statik kolon segregasyon deneyi, normal betonlar için denenerek, farklı gradasyona sahip agregaların segregasyon dirençlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

#### 3.1. Materyal (Material)

**Çimento:** Çalışmada, TS EN 197-1 Standardına uygun olarak üretilen CEM II/A-S 42.5R tipi Portland Cürüflü Çimento kullanılmıştır (TS EN 197-1, 2012).

**Akışkanlaştırıcı:** : Betonların taze haldeki işlenebilirliğini artırabilmek için karışıma çimento ağırlığının % 1 oranında, yoğunluğu 1.04 kg/l olan, kahverengi renkli, sıvı halde, polikarboksilat esaslı yüksek performanslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı ilave edilmiştir. Akışkanlaştırıcı karışım suyu ile karıştırılarak karışıma ilave edilmiştir.

**Su:** Karışım suyu olarak şehir şebekesinden alınan içme suyu kullanılmıştır.

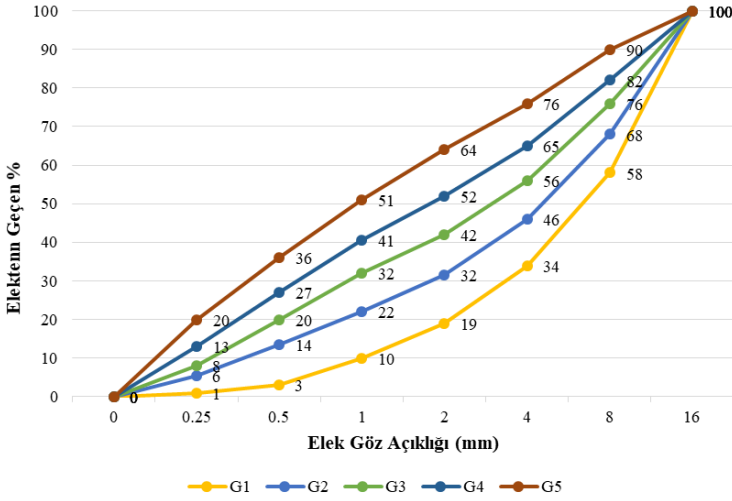
**Agrega:** Çalışmada kalker kökenli kırma taş agregası kullanılmıştır.

#### 3.2. Metot (Method)

##### 3.2.1. Agregada gradasyonlarının ayarlanması (Adjustment of aggregate gradation)

Çalışmada, agregalar elek serisinden elenerek, her elek üzerinde kalan agregalar ayrı kaplara alınmıştır. Daha sonra elde edilmek istenen agregada gradasyonuna göre, tartılarak agregada gradasyonları ayarlanmıştır.

Kalından inceye doğru olmak üzere 5 farklı (G1, G2, G3, G4 ve G5) incelik modoluna sahip gradasyonlar hazırlanmış ve çalışmada bu kodlama kullanılmıştır. Hazırlanan agregada gradasyonlarına ait tane dağılımları Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Agregaların granülometri eğrileri (Grain size curves of aggregates)

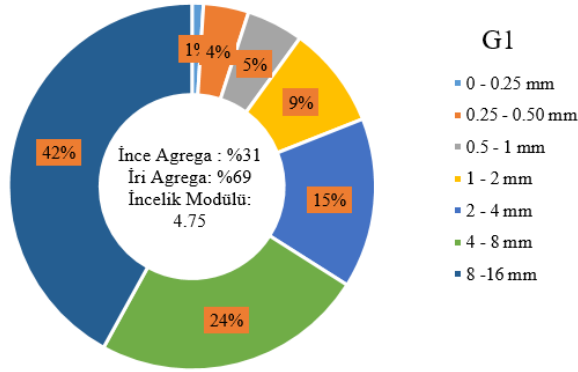
### 3.2.2. Karışım oranları (Proportions of mix)

Elde edilen gradasyonlardan beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımları için, teorik olarak hesaplanmış  $1 \text{ m}^3$  beton için karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir.

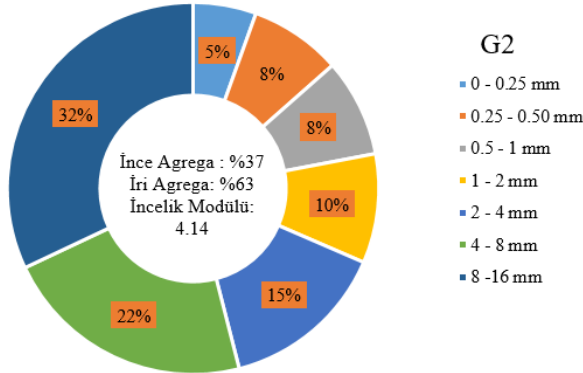
Tablo 1. Karışım oranları ( $1 \text{ m}^3$  beton için) (Proportions of mix for  $1 \text{ m}^3$  concrete)

S/C	Çimento (kg)	Su (l)	Akışkanlaştırıcı (kg)	Agrega (kg)
0.48	400	192	4,04	1741

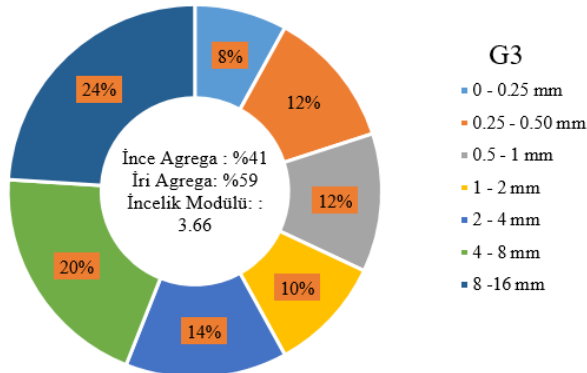
Her karışıma giren agrega oranları ve karışımlara ait incelik modülü değerleri aşağıda verilmiştir (Şekil 2-6).



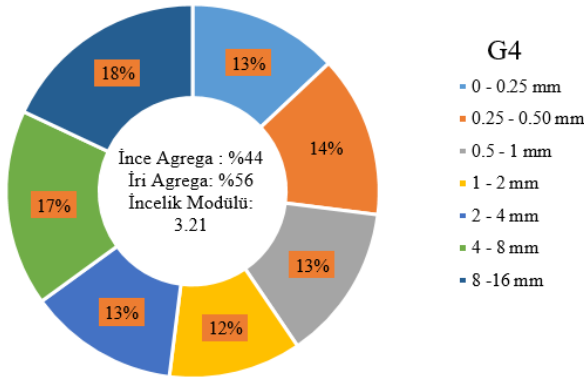
Şekil 2. G1 gradasyonuna ait agrega oranları (Aggregate ratios of G1 gradation)



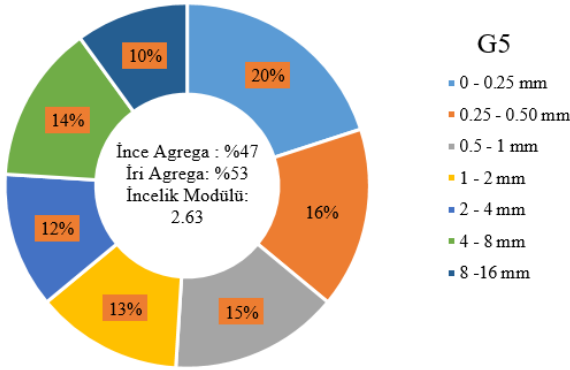
Şekil 3. G2 gradasyonuna ait agrega oranları (Aggregate ratios of G2 gradation)



Şekil 4. G3 gradasyonuna ait agrega oranları (Aggregate ratios of G3 gradation)



**Şekil 5.** G4 gradasyonuna ait agrega oranları (Aggregate ratios of G4 gradation)



**Şekil 6.** G5 gradasyonuna ait agrega oranları (Aggregate ratios of G5 gradation)

Hazırlanan taze beton karışımları 100×100×100 mm boyutlarındaki küp kalıplara yerleştirilmiş ve numuneler 24 saat sonunda kalıplarından çıkarılarak, sirkülasyonlu kür tankında,  $23\pm 2^0$  C kirece doymun suda 7 ve 28 gün süreyle kür edilmiştir.

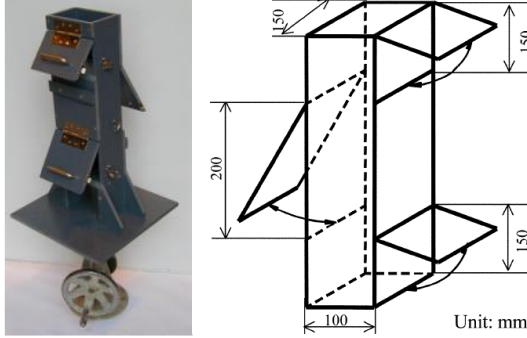
3.2.3. Betonlar üzerinde yapılan deneyler (Experiments performed on concrete samples)

Taze haldeki betonların sıkıştırılabilme derecesi (TS EN 12350-4, 2010), beton kıvamı (TS EN 12350-2, 2010) ve taze betonun segragasyon direnci ilgili standartlara göre tespit edilmiştir.

Sertleşmiş haldeki beton örnekleri üzerinde basınç dayanımı (TS EN 12390-3, 2010) ve yarmada çekme dayanımı (TS EN 12390-6, 2010) testleri gerçekleştirilmiştir.

### Statik kolon segregasyon testi

Statik kolon segregasyon deneyi, standart bir yerleşim süresine ve standart sarsıntıya maruz kalan bir betonda meydana gelen segregasyon direncini ölçmek için kullanılır. Temel olarak bu test yöntemi yüksek oranda akıcı kıvamdaki betonlar için tasarlanmıştır. Test cihazı standart bir çimento yayılma tablasına yerleştirilmiş dikdörtgen prizma şeklinde bir kutudan meydana gelmiştir (P. J. Bartos, M. Sonebi, & A. K. Tamimi, 2002).



**Şekil 7.** Statik kolon segregasyon test cihazı (Settlement column segregation test apparatus) (P. J. M. Bartosvd. , 2002)

Şekil 7’de gösterilen test cihazı, 500 mm yüksekliğinde, 100 x 150 mm kesitinde bir kutudan meydana gelmektedir. Test sonunda beton bölümlerini kaldırmak için 3 adet kapağı bulunmaktadır. Beton, kolon içerisine doldurulur ve 1 dakika bekletilir. Daha sonra çimento yayılma tablasının kolu döndürülerek betonla dolu kolon 1 dakika içinde 20 kere belirli bir yükseklikten düşülür ve 5 dakika bekletilir. Daha sonra üst kapak açılır ve buradaki beton numune alınarak saklanır. Orta kapak bölmesine denk gelen beton numunesi atılır. Alt kapaktaki beton numunesi alınarak ayrı bir kaptaki saklanır. Kolonun alt ve üst bölümünden alınan beton numuneleri, sadece kaba agrega kalacak şekilde, 5 mm’lik elekten yıkanarak ayrı ayrı elenir. Segregasyon oranı üst numunedeki kaba agrega kütlelerinin, alttaki numunedeki kaba agrega kütlelerine oranı olarak hesaplanır. Bu oran ne kadar düşükse, segregasyon duyarlılığı o kadar yüksek olacaktır (P. J. M. Bartosvd. , 2002).

Ayrıca beton sarsma işlemi tamamlandıktan 5 dakika sonra, deney aparatının 4 kenarından ve ortasından olmak üzere 5 noktadan ölçülerek betonun sıkıştırılabilirlik derecesi belirlenmiştir (TS EN 12350-4, 2010). Sıkıştırılabilirlik derecesi  $c$ , aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$c = \frac{h_1}{h_1 - s} \quad (1)$$

Burada:

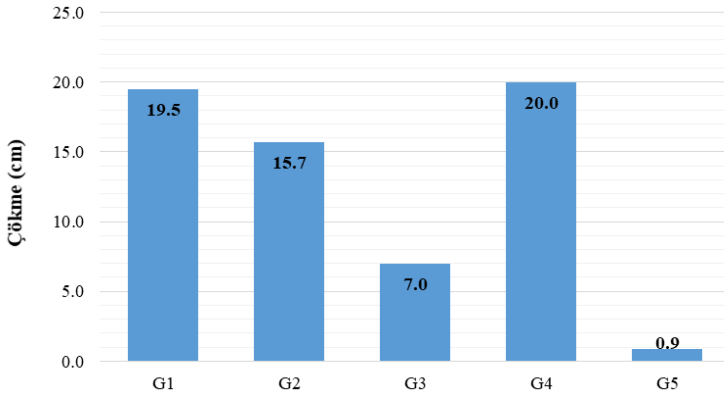
$h_1$ : Prizmatik kabın iç yüksekliği, mm

$s$ : Sıkıştırılmış beton yüzeyi ile kap üst yüzey kenarı arasında ölçülen mesafelerin ortalaması

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

4.1. Taze Betona Ait Deney Sonuçları (Test Results of Fresh Concrete)

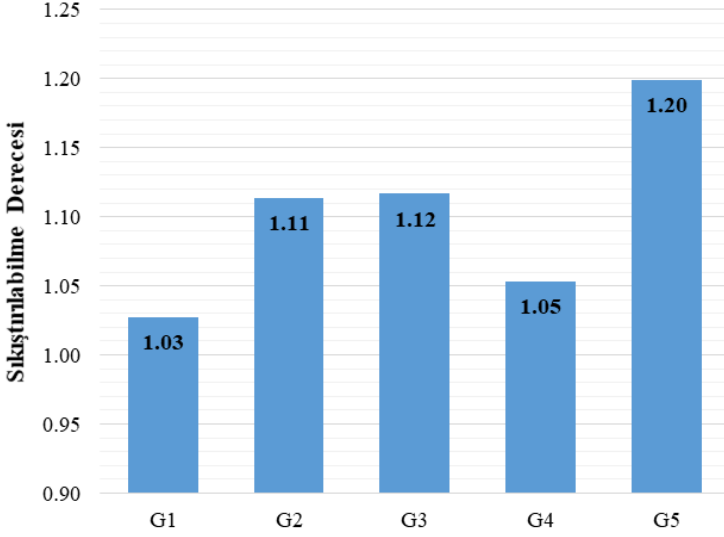
Taze haldeki betonların beton kıvamı (TS EN 12350-2, 2010), sıkıştırılabilirlik derecesi (TS EN 12350-4, 2010), ve taze betonun segragasyon direnci deney sonuçları Şekil 8, Şekil 10 ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Taze haldeki betonun kıvam (Slump) değerleri (Slump values of fresh concrete)

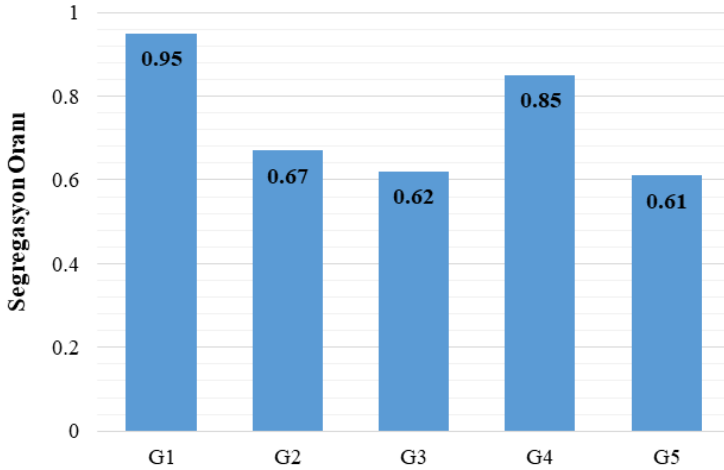
Şekil 8 incelendiğinde, TSE EN206' ya göre, G1 ve G4 serilerinin S4 (16-21 cm) kıvam sınıfındadır. G2 serisi de 15,7 cm çökme değeri ile S4 kıvam sınıfında olduğu kabul edilebilir. G3 serisi S2 (5-9 cm) kıvam sınıfında ve G5 serisinin de S1(1-4 cm) kıvam sınıfında olduğu tespit edilmiştir (TS EN 206:2013+A1, 2017). Serilerin çökme değerlerine göre, gradasyonların çökme değerlerini etkilediği görülmektedir. G5

serisinin inceliği arttığı için su ihtiyacı artmış ve bu sebeple çökme değeri, diğer serilere göre daha az değer almıştır.



**Şekil 9.** Taze haldeki betonun sıkıştırılabilme derecesi değerleri (Degree of compactability values of fresh concrete)

Şekil 9 incelediğinde, TSE EN 206'ya göre, G1 ve G4 serilerinin C3 (1,10-1,04) sıkıştırılabilme sınıfında, G2, G3 ve G5 serilerinin ise C2 (1,25-1,11) sıkıştırılabilme sınıfında olduğu tespit edilmiştir (TS EN 206:2013+A1, 2017).



**Şekil 10.** Taze haldeki betonun segregasyon direnci değerleri (Segregation resistance values of fresh concrete)

ACI komite 238 tarafından “Taze Betonun Reolojisinin ve İşlenebilirliğinin Ölçülmesine” üzerine hazırlanan raporda, dinamik segregasyon dört kategoriye ayrılmıştır (Sonebi, 2008).

**Tablo 2.** *Dinamik Segregasyon kategorileri (Dynamic Segregation categories) (Sonebi, 2008)*

<b>Dinamik Segregasyon Kategorisi</b>	<b>Segregasyon oranı</b>
Segregasyon Yok	0,96 ve üzeri
Hafif Segregasyon	0,95 -0,88
Kayda değer segregasyon	0,87 – 0,72
Şiddetli Segregasyon	0,71 ve altı

Şekil 10 incelendiğinde, G1 serisinin hafif segregasyon, G4 serisinde kayda değer segregasyon, G2, G3 ve G5 serilerinin de şiddetli segregasyon kategorisinde yer aldığı görülmüştür.

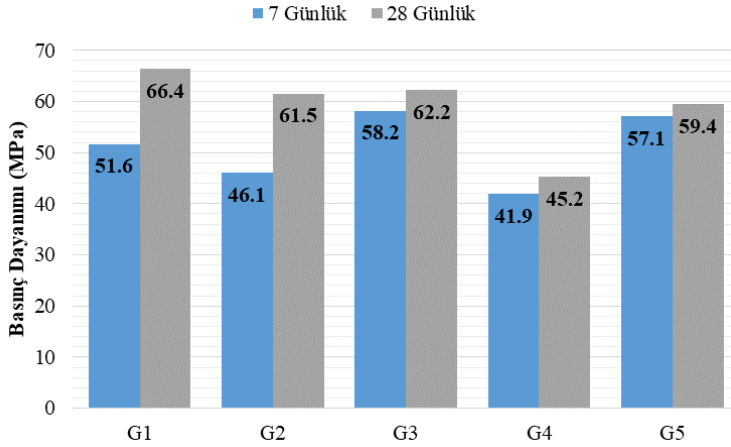
*Segregasyon oranı değerleri ile sıkıştırılabilirlik derecesi değerlerinin benzer olduğu görülmektedir. Sıkıştırılabilirlik derecesi az olan (G1 ve G4) serilerinde daha az segregasyon meydana gelmiştir. Çökme değerleri ile segregasyon oranı değerleri kıyaslandığında ise yukarıda bahsedilen benzerliğin olmadığı görülmektedir.*

*Yapılan kolon segregasyon deneyinin akışkanlığı yüksek betonlar için uygun olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte normal kıvamdaki betonlar da için uygun olduğu görülmüştür. Ancak dinamik segregasyon kategorileri yeniden tanımlanabilir. Ayrıca farklı deney yöntemleri kullanılarak kolon segregasyon deneyi ile ilişkilendirebilir.*

#### **4.2. Sertleşmiş Betona Ait Deney Sonuçları (Test Results of Hardened Concrete)**

Sertleşmiş haldeki beton örnekleri üzerinde basınç dayanımı (TS EN 12390-3, 2010) ve yarmada çekme dayanımı (TS EN 12390-6, 2010) test sonuçları Şekil 11 ve Şekil 12 verilmiştir.



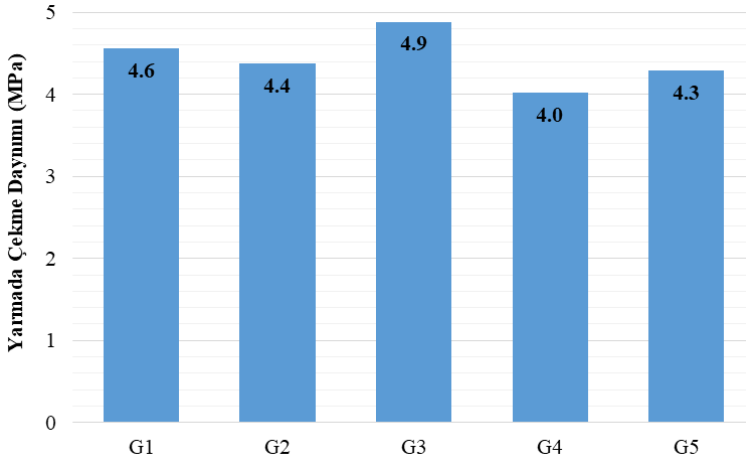


**Şekil 11.** Ortalama basınç dayanımları (Average compressive strengths)

7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek dayanım değerini G3 serisinin aldığı ve en düşük dayanım değerini ise G4 serisi almıştır. En düşük 7 günlük basınç dayanımını alan G4 serisine diğer seriler kıyaslandığında, G1, G2, G3 ve G5 serileri sırasıyla %23,3, %10, %38,9 ve %36,6 oranında dayanım artışı olmuştur.

28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek dayanım artışının G1 serisinde olduğu ve en düşük dayanım değerinin de G4 serisinde olduğu görülmektedir. G4 serisine göre diğer seriler kıyaslandığında, G1, G2, G3 ve G5 serileri sırasıyla %46,7, %35,9, %37,6 ve %31,4 oranında dayanım artışı olduğu görülmektedir.

Şekil 11 incelendiğinde, lineer bir ilişki olmamasına rağmen agrega gradasyonunun basınç dayanımı üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.



**Şekil 12.** Ortalama yarmada çekme dayanımları (Average splitting tensile strength)

28 günlük ortalama yarmada çekme dayanımları incelendiğinde, en düşük değere sahip olan G4 serisine göre diğer seriler de %6,7'den %21,5'e kadar daha iyi sonuçların alındığı görülmektedir. Agrega gradasyonunun yarmada çekme dayanımını üzerine de etkili olduğu anlaşılmaktadır.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Farklı agrega gradasyonlarının beton segregasyonuna olan etkisi deneysel sonuçlara dayanılarak değerlendirilmiş olup, yapılan deneysel araştırmanın analizlerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Kalından inceliye giden 5 farklı gradasyona sahip agregalardan elde edilen betonlarda, kullanılan agrega miktarı aynı olmasına rağmen agrega boyutlarındaki yüzdesel olarak değişmeden dolayı farklı çökme değerleri elde edilmiştir. S4, S2 ve S1 kıvam sınıfında çökme değerleri elde edilmiştir.
2. Agrega granülometrisi sayesinde, farklı çökme sınıfında olan beton karışımları, farklı sıkıştırılabilirlik derecelerine sahip olmuşlardır. G5 seri en düşük çökme değeri almasına rağmen, en iyi sıkıştırılabilen karışım olmuştur.
3. Kolon segregasyon deneyi akıcı ve akıcı olmayan beton karışımlarında kullanılabilmiştir. Ancak normal betonlar içinde, bir dinamik segregasyon kategorisinin düzenlemesi gerektiği düşünülmektedir.
4. Agrega gradasyonu, beton basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. 28 günlük

dayanımlarda sırasıyla %46,7 ve %21,5 oranında artışa neden olmuştur.

5. Agrega gradasyonlarındaki ince malzeme oranı arttıkça dayanımlarda düşüşler meydana gelmiştir.

Taze betonun segragasyon özelliklerinin belirlenmesinde yeni test yöntemleri geliştirilebilir ve sertleşmiş betonda meydana segragasyon oranı belirlenerek yeni geliştirilen test yöntemlerinin geçerliliği teyit edilebilir.



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- ACI-ASCE Committee 238. (2008). *Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete*: American Concrete Institute.
- Alexander, M., & Mindess, S. (2005). *Aggregates in Concrete (Modern Concrete Technology 13)*: Taylor & Francis.
- Bartos, P. J., Sonebi, M., & Tamimi, A. K. (2002). *Report 24: workability and rheology of fresh concrete: compendium of tests—report of RILEM Technical Committee TC 145-WSM (Vol. 24)*: RILEM publications.
- Bartos, P. J. M., Sonebi, M., & Tamimi, A. K. (2002). *Workability and rheology of fresh concrete: compendium of tests : report of RILEM Technical Committee 145-WSM*: RILEM.
- Bilgil, A., Ozturk, B., & Bilgil, H. (2005). A numerical approach to determine viscosity-dependent segregation in fresh concrete. *Applied Mathematics and Computation*, 162(1), 225-241. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300304000827>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.amc.2003.12.086>
- Gökçe, H. S., & Andiç-Çakır, Ö. (2018). A new method for determination of dynamic stability of self-consolidating concrete: 3-Compartment sieve test. *Construction and Building Materials*, 168, 305-312. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818303301>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.087>
- Gülşahin, S. (2006). *Quantification of Segregation in Fresh Concrete and Its Effect on Hardened Concrete Properties*. (M.Sc. M.Sc.), İstanbul Technical University,
- Ivan Navarrete, & Lopez, M. (2016). Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy. *Construction and Building Materials*, 122, 384-390. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816309941>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.066>
- Navarrete, I., & Lopez, M. (2016). Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy. *Construction and Building Materials*, 122, 384-390. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816309941>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.066>
- Navarrete, I., & Lopez, M. (2017). Understanding the relationship between the segregation of concrete and coarse aggregate density and size. *Construction and Building Materials*, 149, 741-748. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817310851>.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.185>

- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5 ed.): Pearson Education.
- Okonkwo, V., & Arinze Emmanuel, E. (2015). Effects of Aggregate Gradation on the Properties of Concrete Made From Granite Chippings. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 4(12), 17-20.
- Oritola, S., Saleh, A. L., & Sam, A. R. M. (2014). Comparison of different forms of gravel as aggregate in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 6(2), 135-144.
- Page, C. L., & Page, M. M. (2007). *Durability of Concrete and Cement Composites*: Elsevier Science.
- Shen, L., Bahrami Jovein, H., Sun, Z., Wang, Q., & Li, W. (2015). Testing dynamic segregation of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 75, 465-471. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814012227>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.010>
- Shen, L., Jovein, H. B., & Li, M. (2014). Measuring static stability and robustness of self-consolidating concrete using modified Segregation Probe. *Construction and Building Materials*, 70, 210-216. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814008769>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.112>
- Sonebi, M. (2008). *Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete*: American Concrete Institute.
- TS EN 197-1. (2012). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. In (pp. 1-40): Turkish Standards Institution.
- TS EN 206:2013+A1. (2017). Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. In (pp. 104). Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN 12350-2. (2010). Testing fresh concrete - Part 2: Slump test. In (pp. 1-9). Ankara: Turkish Standards Institution.
- TS EN 12350-4. (2010). Testing fresh concrete - Part 4: Degree of compactability. In (pp. 1-9). Ankara: Turkish Standards Institution.
- TS EN 12390-3. (2010). Testing hardened concrete - Part 3 : Compressive strength of test specimens. In (pp. 1-19). Ankara: Turkish Standards Institution.
- TS EN 12390-6. (2010). Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. In (pp. 1-10). Ankara: Turkish Standards Institution.

**SÜRDÜRÜLEBİLİR ENTEGRE  
ATIK YÖNETİMİ KAPSAMINDA  
BİTKİSEL ATIKLARIN  
YAPI MALZEMESİ  
OLARAK  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**BÖLÜM  
5**

**Esra TINMAZ KÖSE<sup>1</sup>,  
Aylin AKYILDIZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Doç. Dr., Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü; etinmaz@nku.edu.tr

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü; aakyildiz@nku.edu.tr







## 1. Giriş

"Sürdürülebilir Entegre Atık Yönetimi" kavramı, atıkların çevresel etkilerinin en aza indiren tekniklerin ve teknolojilerin seçimi ve uygulanması aşamalarını kapsayan bir yönetim şeklidir. Bu kapsamda, atıkların kaynağında azaltılması, geri dönüşümü, geri kazanımı, tekrar kullanımı esastır. Her geçen gün gerek miktar gerekse tür bakımından hızla artan atıkların uygun yönetim sistemleri gereği yönetilmeleri pek çok çevre sorununun çözümünde önemli bir adımdır Çelen ve diğ., 2016; Karabeyoğlu ve diğ., 2019). Bu bağlamda atıkların farklı sektörlerde ikincil hammadde olarak kullanımı önemli bir atık yönetim aşaması olarak değerlendirilirken aynı zamanda birincil hammaddeye duyulan ihtiyacın azalması anlamına da gelmektedir.

2005 yılında hazırlanan "Avrupa Birliği ile Uyumlu Entegre Atık Yönetimi" projesinde organik atık (biyobozunur) azaltımında, 2005 yılında düzenli depolama alanlarına gönderilen organik atık miktarı baz alınarak depolanacak organik atık miktarının 2015 yılında %25, 2018 yılında %50 ve 2025 yılında %65 oranında azaltılması öngörülmüştür (Samsunlu, 2015).

2019 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (BEPA, 2019) tarafından yapılan açıklamada ülkemizdeki kentsel atık miktarı 31.331.836 ton/yıl, hayvansal atık miktarı 163.297.308 ton/yıl ve bitkisel atık miktarı ise 96.451.594 ton/yıl olduğu belirtilmiştir. Sözkonusu atıklar organik içeriklerinden dolayı birer enerji kaynağı olarak kullanılabilirlerdir. Bu aynı zamanda bu atıklar için farklı bir kullanım alanıdır ki sürdürülebilir entegre atık yönetimi açısından atıklardan enerji eldesi uygun bir değerlendirme yöntemidir. Tablo 1'de Türkiye genelindeki atık türlerine göre atık miktarları ve enerji değerleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Türkiye Genelinde Atık Miktarları ve Enerji Değerleri

Nüfus	79.814.871
Toplam Hayvan Sayısı (adet)	389.405.328
Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	163.297.308
Hayvansal Atıkların Enerji Değeri (TEP/yıl)	1.176.198
Bitkisel Üretim Miktarı (ton/yıl)	176.313.301
Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	96.451.594
Bitkisel Atıkları Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	39.877.285

Kentsel Katı Atık Miktarı (ton/yıl)	31.331.836
Kentsel Organik Atıkların Enerji Değerleri (TEP/yıl)	2.315.414
Atıkların Toplam Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	44.228.795
Orman Atıklarının Enerji Değeri (TEP / yıl)	859.899

Atıkların enerji kaynağı dışında da kullanımı mümkündür. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda, atıkların inşaat sektöründe kullanılmasına dair ciddi bir eğilim sözkonusudur. Bu çalışma kapsamında, bitkisel atıkların inşaat yapı sektöründe kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

## 2. Bitkisel Atıklar

Bitkisel atıklar, meydana gelen diğer katı atıklara göre çevreye daha az zararı olan ve ekosistemde dönüşümleri daha kısa süreli olan atıklardır. Bitkisel atıklar insan sağlığı ve çevre sağlığında olumsuz etkiler yaratmadan uygun şekillerde toplanmalı ve farklı alanlarda hammadde olarak değerlendirilmelidir. Bitkisel atıkların değerlendirilmesi bilim ve teknik gelişmeler ışığında uzman kişilerin hazırlayacağı ulusal veya uluslararası çevre ve tarım politikalarına uygun olarak yapılmalıdır. Bitkisel atıkların uygun bir şekilde değerlendirilmesiyle oluşması muhtemel çevresel sorunlarını azaltacak, hammadde kaynakları korunacak ve ekonomik olarak da bir katkı sağlayacaktır. Bitkisel atıklar çeşit ve türüne göre farklılıklar göstermektedirler. Bundan dolayı bu atıkların değerlendirilmesi atıkların türüne göre farklılıklar gösterecektir (Akırmak 2010).

Bitkisel atıkların meydana gelme şekli ve miktarlarını etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar:

- Üretim yapılan ve yaşamsal faaliyetlerin sürdüğü bölge,
- Bitkisel ürünlerin sanayide hammadde olarak kullanılması,
- Toplumun ekonomik düzeyi,
- Sosyolojik ve kültürel yapısı,
- İnsanların eğitim düzeyi,
- Beslenme ve tüketim alışkanlıkları,
- İklim koşullarıdır (Çolakoğlu 2018).

Bitkisel atıklar, bir ürün elde etmek için toprağın işlenmeye başlanmasıyla başlayıp, ürünün yetiştirilmesi ve hasat edilmesi işlemi sonunda oluşan atıklardır. Sap, yaprak, koçan, kabuk, koçan vb. atıklar bu atıklara örnek verilebilir (Eskicioğlu 2013).

## 2.1 Bitkisel Atıkların Puzolanik Özellikleri ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı

Bitkiler büyüyüp gelişirken gövdelerine kökleri aracılığıyla topraktan çok çeşitli miktarlarda besin, mineral ve silikat alırlar. Yıllık bitkiler, ağaç türlerine göre bünyelerinde daha fazla silikat bulundurlar. Buğday, mısır ve ayçiçeği gibi yıllık tarım ürünlerinin sap ve yapraklarında kütikula tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka (kütikula) silis ve silikat yönünden oldukça zengindir (Biricik vd. 1996).

Bitkisel atıkların içeriğindeki organik maddelerin yanması, yeni kristal fazların oluşumu veya amorf maddelerin kristallenmesi olayları dışarıya ısıveren tepkimelerdir. Bu tepkimeler sonrasında organik madde ağırlığında büyük miktarda azalma olur ve sonrasında da kül elde edilir. Yakma işlemi sonrasında organik maddelerin yapılarında bozulmalar meydana gelir. Bu bozulmalara termalde kompozisyon denir (Biricik vd. 1996). Toz halde öğütülerek inceltelen küller kireçle karıştırılarak bağlayıcılık özelliği olan bir malzeme elde edilir. Bu malzemenin niteliği büyük oranda yakmanın yapıldığı sıcaklığa, yakma süresine, ani soğutmaya ve öğütme koşullarına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir (Biricik vd. 1996).

Bitkisel ürünlerin hasadı sonrası oluşan pirinç kabuğu ve buğday sapı yüksek oranda amorf silisyum dioksit içermektedir. Kül içinde yüksek oranlarda (% 81-95) silis ve (% 8-11) kül vardır. Bitkinin kabuğunun ve sapının esas yapısı selüloz, lignin ve küldür. Kabuk ve sap yakılmadan önce 1-5 mm. boyutuna getirilmelidir. Daha sonra bu hammadde üzerinde yanma işlemi uygulanır. Pirinç kabuğu ve buğday sapı, yaklaşık 575 + 25° C elektrik kül fırınlarında yakılması ile kül elde edilir. Elde edilen küller, bilyeli öğütme değirmenlerinde öğütülür ki puzolanik aktivitesi böylece artar. Kül içindeki silis oranı, yakma sıcaklığı, yakma süresi ve yakma hızına bağlı olarak değişmektedir (Şimşek, 2004).

Çalışmanın bu bölümünde, bitkisel atıkların, inşaat yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalar incelenmiştir. Söz konusu atıklara yönelik olarak yapılan çalışmalar Tablo 2’de özetlenmiştir.

**Tablo 2.** Bitkisel Atıkların İnşaat Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı

Materyal	Kullanım Alanı	Yöntem	Sonuç/Değerlendirme	Kaynak
Ayçiçeği sapı	Beton üretiminde agrega	Ayçiçeği sapsları agrega kuma makinesinde öğütüldükten sonra 8 mm'lik elekten elenmiştir. Elek altında kalan kısmın boşluk oranının ve su emme miktarının yüksek olması nedeniyle beton karışımındaki hesaplanan su miktarı yetersiz kalacağından ve betonun priz ve hidratasyonu tam olarak gerçekleşmeyecektir. Bu nedenle beton üretiminde kullanılacak ayçiçeği sapsları parçalanıp elendikten sonra yarım saat kadar suda bekletilerek satüre duruma getirilerek kullanılmıştır. Ayçiçeği sapsları, beton karışımında toplam agrega hacminin % 0, % 5, % 10, % 20, % 30 ve % 40'ı oranlarında kullanılmıştır.	Sonuç olarak ayçiçeği sapslarının beton üretiminde kullanılması ile dayanım ve dayanıklılığı yeterli, ısı iletkenliği ise düşük bir malzeme üretilmiştir. Optimum karışım oranının %20-40 arasında olduğu belirlenmiştir.	Alkaya, (2010)
Ayçiçek sapı ve tekstil atıkları	Yalıtım malzemesi	Bu çalışmada Ayçiçek Sapı ve Tekstil atıkların yalıtım malzemesinde katkı olarak kullanımı araştırılmıştır. Üretilen blok ve panel yalıtım elemanları üzerinde ısı iletim katsayısı tayini, ultrasonik ses geçirgenliği tayini, su emme ve birim hacim ağırlık deneylerini yapılmıştır. Üretilen numuneleri,	Araştırma sonuçları atıklardan üretilen ve tamamen yerli ürün olan yalıtım malzemesinin XPS ve gaz betondan daha iyi ısı yalıtımı olduğunu gösterdiğini belirlemişlerdir. Sonuçlar söz konusu atıkların yalıtım malzemesi üretiminde kullanılabilceğini ortaya koymuştur.	Binici ve ark (2012).
Mısır koçanı	Beton üretiminde agrega	XPS ve gaz beton örnekleriyle karşılaştırılmışlardır.	Elde edilen karışımların dayanımları düşük olduğundan yapısal amaçla yük taşıyan duvarlar yerine bölme duvarlarında ve dekoratif amaçlarla kullanılmalarının daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ısı iletim katsayısı değerleri oldukça küçük olduğundan ısı yalıtımında kullanılabilir. betonun, tuğla, kerpiç ve hafif betona alternatif olabileceği ortaya konulmuştur.	Polat, (1995)
Mısır koçanı, buğday samanı ve düz yaprak külü	Çimento ve agrega ikameli olarak	Bu çalışmada, mısır koçanı, buğday samanı ve düz yaprak külü kullanılmın mineral katkılar olarak beton dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mısır koçanından elde edilen külün ince agrega olarak %6 yer değiştirme oranı, betonun basınç dayanımı % 40'a kadar artmıştır (365.gün) 400 kg çimento içerikli üç seri halinde on adet beton karışımı üretilmiştir. Kontrol karışımları, ince agrega yerine % 2, 4 ve% 6 mısır koçanı, buğday samanı ve düz yaprak külü ile değiştirilmiştir. Betonun dayanıklılığını belirlemek için, basınç dayanımları 7, 28, 90, 180 gün ve 18 ay sonra sodyum sülfat çözeltisi altında ölçülmüştür.	Aşınma direnci ve su penetrasyonu incelenmiştir. Test sonuçları mısır koçanı, buğday samanı ve düz yaprak külü'nün geleneksel betona kıyasla iyi işlenebilirlik ve aşınma direnci sağladığını göstermiştir. Test sonuçları ayrıca minimum aşınma direncinin kontrol numunesinden elde edildiğini, azami aşınma direncinin % 6 numunelerden elde edildiğini göstermiştir. Sonuçlar kül içeriğindeki artışın, betonların sodyum sülfat direncinde önemli bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, dayanıklı beton üretimi için mısır koçanı, buğday samanı ve düz yaprak külü ilaveli beton önermişlerdir.	Binici ve ark., (2008)
Mısır koçanı külü	Çimento ile ikameli	Mısır koçanı külünün çimentoya % 0 ile % 25 oranlarında ilave edilmesinin	Mısır koçanı külünün beton içindeki katkı oranının artması ile işlenebilirliğini olumsuz	Raheem ve Adesanya,

	olarak	betonun işlenebilirlik ve basınç dayanımı üzerine olan etkileri araştırılmıştır.	etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca artan katkı oranlarının, erken yaşlarda, basınç dayanımını azalttığı gözlenmiştir. Mısır koçanı kütünün betondaki optimum ikame oranının %8 olduğu ortaya konulmuştur.	(2009)
Mısır, buğday ve ayçiçeği sapı kütü	Çimento ile ikameli olarak	Mısır, buğday ve ayçiçeği sapı kütü ile barit ve kolemanit içeren harçlar ile betonların dayanım ve dayanıklılığı araştırılmıştır. Betonda ince agrega yerine barit, kolemanit, çimento yerine mısır sapı kütü, buğday sapı kütü ve ayçiçeği sapı kütü farklı yüzdelerde kullanılmıştır. Harç numunelerin 180 ve 360 günlük sülfat dayanımları ve beton numunelerin 7, 28, 180 günlük basınç ve aşınma dayanımı ve donma- çözülme etkisi gibi özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca üretilen harçların radyasyon geçirgenlikleri incelenmiştir.	Küllerin kullanılması ile beton ve harçların birçok mühendislik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. Küllerin betonda dolgu etkisi yaptığı ve boşluk miktarını azalttığı, atık küller ile kolemanit ve baritin yüksek dayanıklılık özelliklere sahip harç ve beton üretiminde kullanılabileceğini belirlenmiştir. Ayrıca baritle birlikte buğday mısır ve ayçiçeği sapı küllerinin betonların radyasyon geçirgenliğini azalttığı tespit edilmiştir.	Örtlek (2015)
Mısır koçanı kütü	Çimento ile ikameli olarak	Çalışmada, çimentoda ağırlıkça% 5, % 7,5, % 10, % 15, % 20, % 25 ve % 30 adımlarla mısır koçanı kütü ile yer değiştirilerek beton üretilmiştir.	Elde edilen katkılı beton sonuçları, kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Dayanıklılık, sülfat testi yapılmıştır. Mısır koçanı kütü katkılı betonların agresif ortamlarda avantajlı olarak kullanılabileceği sülfat testini yaparak belirlenmiştir. Sonuçlar Mısır koçanı kütünün betonun sürdürülebilirliğini ve ekonomik yönünü artırabileceği gibi hem taze hem de sertleştirilmiş betonların özelliklerini iyileştirebilecek etkili bir puzolan olarak potansiyelini vurgulamışlardır.	Kamau ve ark, (2016)
Mısır koçanı	Beton	% 0, 5, 10, 15 ve 20 oranında ince	Mısır koçanı betonda ince agrega ile ikameli	Memon ve
	üretiminde agrega	agrega yerine kullanılmıştır.	olarak kullanımının puzolonik özelliği artırdığı belirlenmiştir.	ark, (2019)
Pirinç kabuğu	Hafif beton üretiminde agrega	Agrega ile ikameli olarak kullanıldığı hafif beton üretiminde kullanılmıştır.	Pirinç kabuğu katkısının su emme oranını artırdığı ve termal iletkenliği azalttığı belirlenmiştir. 28 günlük katkılı numunelerin basınç dayanımlarının 37,5 MPa' a kadar ulaştığı gözlenmiştir.	Şişman ve ark., (2011)
Çeltik kabuğu kütü	Çimento ile ikameli olarak	farklı zamanlarda betonun dayanıklılığının geliştirilmesi için Uruguay ve Amerika' da yetiştirilen çeltiklerden arta kalan çeltik kabuğu kütünü karşılaştırmışlardır.	Katkılı betonlara nazaran basınç dayanımının yüksek olduğunu belirlenmişlerdir. 91 gün kür süresinde, çeltik kabuğu kütü katkılı betonların basınç dayanımının katkısız betona göre daha yüksek olduğunu, en iyi değer veren miktarın % 10 çeltik kabuğu kütü katkılı (Amerika) beton numunelerin olduğunu ortaya koymuşlardır.	Sensale (2005),
Pirinç kabuğu kütü	Çimento ile ikameli olarak	Bu çalışmada; 600°C' de yakılmış pirinç kabuğu kütü çimentonun ağırlıkça %0, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında beton içerisine katılmıştır. Elde edilen pirinç kabuğu katkılı beton numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımları araştırılmıştır. Deneyler için biri kontrol numunesi olmak üzere toplam altı grup beton numunesi, belirlenen oranlarda pirinç kabuğu kütü ilave edilerek ve sabit işlenebilirliğe göre hazırlanmıştır. Beton numunelerin basınç ve eğilmede çekme dayanımları 7, 14, 28 ve 90. günler sonunda bulunmuştur.	Kullanılan pirinç kabuğu kütünün puzolonik aktivitesi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, pirinç kabuğu kütünün %10 katkı oranında basınç ve eğilme dayanımlarında artış olduğunu bulmuşlardır. %15, 20, 25 ve 30 katkı oranlarında yüksek su emme oranından dolayı, katkılı betonların dayanımlarında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir.	Yıldız ve ark., (2007)
Pirinç kabuğu kütü	Çimento ile ikameli	Yaptıkları çalışmada, pirinç kabuğunu 600°C' de kontrollü bir şekilde yakarak	Elde edilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca pirinç	Yıldız ve ark, (2007)

	olarak	kül elde etmişler ve elde edilen kül, çimento yerine ikame edilerek beton numuneler üretilmiştir.	kabuğu küllütün puzolanik aktivitesi de araştırılmıştır. Sonuç olarak, %10 pirinç kabuğu katkıli betonların hem basınç hem de eğilme dayanımlarının kontrol betonundan daha büyük olduğunu belirtmiştir.	
Pirinç kabuğu küllü	Çimento ile ikame olarak	Çalışmada, pirinç kabuğu küllü çimento ile ikame olarak 0%, 20%, 30% ve 40% oranlarında kullanılarak numuneler üretilmiştir.	Pirinç kabuğu küllü ile yapılan çalışma sonuçları, bu malzemenin kendiliğinden yerleşen betonların tüm taze durum özelliklerini karşılar nitelikte olduğunu ortaya koymuştur.	Rahman ve ark, (2014)
Pirinç kabuğu küllü	Çimento ile ikame olarak	yaptıkları çalışmada, pirinç kabuğu küllünü %10 ve %20 oranlarında ikame olarak yer değiştirerek ve iki farklı su/çimento oranı kullanarak (0.40 ve 0.35) kendiliğinden yerleşen beton üretmişlerdir.	Bu çalışmada, pirinç kabuğu küllünün, kendiliğinden yerleşen betonda çimento hamuru ve agrega arasındaki arayüz geçiş bölgesinin mikroyapısını iyileştirmek için oldukça aktif bir puzolanik malzeme olduğunu göstermişlerdir. 180. güne kadar mekanik özelliklerin incelendiği çalışmada, basınç, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerleri araştırılmıştır. Pirinç kabuğu küllünün, 60. gündeki mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.	Ahmadi ve ark, (2007)
Pirinç kabuğu küllü ve küspe küllü	Kaldırım taşı üretiminde çimento ile ikame olarak	Laboratuvarıda üç seri beton karışımı hazırlanmıştır. Seri I'de uçucu kül, çimentoya ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında; seri II'de, pirinç kabuğu küllü çimentoya ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında ve seri III'te küspe çimentoya ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında kullanılmıştır.	% 30 geri dönüştürülmüş beton agregaları ve % 15 uçucu kül, pirinç kabuğu küllü veya küspe küllü içeren bir beton karışımı, yalnızca geri dönüştürülmüş beton agregaları olan beton için olanlardan daha iyi özellikler sergilemektedir. Pozolanik özelliklere sahip endüstriyel ve/veya tarımsal atıkların betona karıştırılması, betonun dayanımını arttırdığı ortaya konulmuştur	Jindal ve Ransinchung, (2018)
Yer fıstığı kabuğunu	Hafif agrega olarak	Bağlayıcı madde olarak çimentoyu kullanmışlardır.	Yer fıstığı kabuğu katkıli olarak üretilen numunelerin kontrol numunelerine göre daha sünek bir yapıya sahip olduğunu görülmüştür.	Çelik ve Gürdal, (2005)

			Ayrıca, dış hava koşullarına dayanıklı ve uyumlu olması açısından, dış mekânlarda kaplama olarak kullanılmının uygun olabileceği belirlenmiştir.	
Fındık kabuğu	Agrega olarak	Çalışmada fındık kabuğu ve kırmızı çamur ilavesi ile tuğla kil içeren karışımlar mekanik bir karıştırıcıda hazırlanmıştır. Karışımlar preslenmiş, kurutulmuş, püskürtülmüş ve böylece gözenekli ve kullanılabılır dayanımda yapılar elde edilmiştir.	Ağırlıkça %10 fındık kabuğu ve %30 kırmızı çamur ilavesiyle hazırlanan karışımlardan oldukça yüksek gözenekli seramikler üretilmiştir. Örneklerin ısı iletkenlik katsayıları fındık kabuğu ve kırmızı çamur ilavesinin artmasıyla 0,78 W/mK (1,80 g/cm <sup>3</sup> )'den 0,45 W/mK (1,41 g/cm <sup>3</sup> )'e düşmüştür. En düşük basma dayanımı, 9,12 MPa bulunmuştur.	Çam (2017)
Atık çay	Tuğla üretimi	Çay atığı ham tuğla kiline ağırlıkça % 0, 2,5 ve 5 oranlarında ilave edilmiştir. Örnekler iki gruba ayrılmıştır. Bir grup numune 900 ° C'de yakuluken, diğer grup ise yakılmamıştır. Numuneler fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulmuş ve numunelerin büzülmesi ölçülmüştür. Yakılan numuneler su emme, yoğunluk, gözeneklilik ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Yakılmamış numunelerde yoğunluk ve basınç dayanımı test edilmiştir.	Test sonuçlarına göre, tuğla üretiminde % 5'e kadar çay atığının katkı maddesi olarak kullanımının fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirdiği bu nedenle sözkonusu atığın tuğla üretiminde kullanımının ekonomik bir katkı sağladığı ve aynı zamanda çevrenin korunmasına yardımcı olduğu belirlenmiştir.	Demir, 2006
Şeker kamışı küllü	Çimento ile ikame olarak	İçerdiği CaO miktarı nedeniyle çimento malzemesi olarak kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla yakılan şeker kamışı filtre kekinin küllü %10- 40 oranlarda kendiliğinden yerleşen betona	KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerini değerlendirmek için slump yayılma deneyi, V-hunisi akış zamanı ve J-Ring testleri yapılmıştır. Tüm karışımlar için bazı yayılma deneyi sonuçları dışında hedef aralıkta kalmıştır. Atık küllü miktarı arttıkça V-hunisinde elde edilen süreler uzamıştır.	Sua-Iam ve Makul, (2017)
		eklenmesi ile elde edilen betonun taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir.	Çimentoya eklenen kül miktarı arttıkça, KYB'nin basınç, eğilme dayanımı ve su emme gibi özellikleri olumsuz etkilendiğini ortaya koymuşlardır.	

#### **4. Sonuçlar ve neriler**

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, atık malzemelerin inşaat sektöründe çok büyük kullanım potansiyelinin bulunduğunu göstermektedir. Yapılan alışmalar, bazı bitkisel atıkların imento ve agrega yerine kullanılmaları durumunda basınç dayanımını arttırabildiğini göstermiştir. Ülkemizde ve Dünyada atıkların yapı malzemeleri sektöründe değerlendirilmesi ile, enerji tasarrufu daha ucuz malzeme üretilmesi, atık malzemenin geri dönüştürülmesi ile ülke ekonomisine katkı sağlanması mümkündür. Atıkların farklı sektörlerde kullanılması ekonomik kazançların yanı sıra maddelerin geri dönüştürülmesi ve/veya tekrar kullanılması çevresel açıdan önemli bir yere sahiptir. Böylelikle depolanması gereken atık miktarında ciddi bir azalma elde edilebilir. Atıkların inşaat sektörünce imento veya agrega yerine kullanılmaları bu maddelerin kullanımı azaltacağı için ekonomik bir kazanç sağlayabilmektedir.



## KAYNAKLAR

- BEPA, 2019. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, <http://bepa.yegm.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 13.11.2019)
- Samsunlu A., 2015. Türkiye'de Sürdürülebilir Katı Atık Yönetimi - İstanbul ve Çorum Örnekleri, Su ve Çevre Teknolojileri Dergisi, 84: 28-35.
- Alkaya, Ş., 2010. Hafif Beton Üretiminde Organik Atıkların (Ayçiçeği Sapı) Kullanılabilir Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Biricik, H., Berktaş, İ., Aköz, F. ve Tulgar, A. N., 1996. Buğday Sapı Külünün Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması. 4. Ulusal Beton Kongresi, 369-380.
- Çolakoğlu, B., 2018. Tarımsal Atıkların Alternatif Kullanım Alanları Konusunda Üretici Eğilimleri, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Eskicioğlu, A. V., 2013. Bitkisel Atıklardan Kompost Gübre Üretim Sisteminin Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Şimşek, O., 2004. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık, ISBN 9753478097, Ankara
- Alkaya Ş., 2010. Hafif Beton Üretiminde Organik Atıkların ( Ayçiçeği Sapı ) Kullanılabilir Olanakları, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Çam, A. S., 2017. Characterization Of Clay Brick Materials Produced With Red Mud And Nut Shell Wastes For Building Applications. MSci, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, İzmir.
- Çelik, Ç. ve Gürdal, E., 2005. Yerfıstığı Kabuğunun Agregası Olarak Kullanım Olanakları, İTÜ Dergisi/a mimarlık, planlama ve tasarım, 4(1): 37-46.
- Memon, S. A., Javed, U. ve Khushnood, R. A., 2019. Eco-Friendly Utilization of Corncob Ash as Partial Replacement of Sand in Concrete. Construction and Building Materials Volume 195: 165-177.
- Örtlek, E., 2015. Mısır, Buğday ve Ayçiçeği Sapı Külü İle Barit ve Kolemanit Katkılı Betonların Mühendislik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

- Polat, S., 1995. Mısır Koçanının Tarımsal Yapılarda Malzeme Olarak Kullanılabilme İmkânları Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Raheem, A. A. ve Adesanya, D. A., 2009. A Study of the Workability And Compressive Strength Characteristics of Corn Cob Ash Blended Cement Concrete, *Construction and Building Materials*, 23(1): 311-317.
- Şişman, C. B., Gezer, E. ve Kocaman, I., 2011. Effects of Organic Waste (Rice Husk) on the Concrete Properties for Farm Buildings, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 17(1): 40-48.
- Çelen, S., Aktaş, T., Karabeyoğlu, S.S., and Akyildiz, A., *Drying Behaviour of Prina (Crude Olive Cake) Using Different Type of Dryers, Drying Technology*, 34(7), 843-853, 2016.
- Karabeyoğlu, S.S., Aktaş, T., Çelen, S. and Akyildiz, A., *The Effects Of Olive Pomace Ash On The Color Change Of The Composite Material And Its Mechanical Properties*, *Hittite Journal Of Science & Engineering*, 5(4), 311-314, 2019.
- Jindal A., Ransinchung G.D., 2018. Behavioural Study of Pavement Quality Concrete Containing Construction, Industrial and Agricultural Wastes, *International Journal of Pavement Research and Technology.*, 11 (5): 488-501
- Demir I., 2006. An Investigation on the Production of Construction Brick with Processed Waste Tea, *Building and Environment*, 41: 1274-1278
- Sensale, G.R., 2005. Strength Development of Concrete With Rice Husk Ash. *Facultad de Ingenieria, Julio Herrera y Reaig*, 565p, Uruguay.
- Yıldız, S., Balaydın İ., Ulucan, Z.Ç., 2007. Pirinç Kabuğu Külünün Beton Dayanımına Etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (1), 85-91, Elazığ.
- Ahmadi M.A., Alidoust, O., Sadrinejad I., ve Nayeri M., 2007. Development of Mechanical Properties of Self Compacting Concrete Contain Rice Husk Ash, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 1(10).
- Rahman M.E., Muntohar, A.S., Pakrashi V., Nagaratnam B.H., Sujan D., 2014. Self Compacting Concrete from Uncontrolled Burning of Rice Husk and Blended Fine Aggregate, *Materials and Design*, 55, 410-415.
- Sua-Iam, G., Makul N., 2017. Effect of Incinerated Sugarcane Filter Cake on the Properties of Self-compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 130, 32-40.

- Binici,H., Yucegok, F., Aksogan, O., Kaplan, H., 2008. Effect of Corncob, Wheat Straw, and Plane Leaf Ashes as Mineral Admixtures on Concrete Durability, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20 (7): 478-483
- Balaydn Y., Ulucan İ., Çınar Z., 2007. Pirinç Kabuğu Külünün Beton Dayanımına Etkisi Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 19 (1): 85-91
- Binici H., Sevinç A. H., Eken M. 2012. Ayçiçek Sapı Ve Tekstil Atıkları İle Yalıtım Malzemesi Üretimi, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1).
- Kamau J., Ahmed A., Hirst P., Kangwa J., 2016. Suitability of Corncob Ash as a Supplementary Cementitious Material, *International Journal of Materials Science and Engineering*, 4: 215-228.

# UÇAK FREN SİSTEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ

BÖLÜM  
6

Bekir GÜNEY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Programı \*guneyb@kmu.edu.tr



## Giriş

Dünyada teknolojik ilerleme ve ekonomik seviyenin yükselmesi ile insanların yaşam beklentileri de yükselmektedir. İnsanların refah seviyesi arttıkça hayatı daha konforlu yaşama istekleri de aynı oranda yükselmektedir. İnsanların tatil ve seyahat gibi sosyal yaşantılarında daha hızlı ve pratik imkanları tercih etmesi havacılığa olan ilgiyi arttırmaktadır. Bundan dolayı uçaklar insan hayatında daha çok yer almaya başlamıştır. Daha kısa sürede ve hızlı seyahat imkanı sağlaması insanların büyük bir kısmının uçakları tercih etmesini beraberinde getirmektedir. Uçaklar başlangıçta yüksek savunma kabiliyetinden dolayı askeri alanda kullanılmaktaydı. İlerleyen teknoloji beraberinde farklı ve yeni imkanları da getirmiştir. Bu sayede hava taşımacılığına olan ilgi artmıştır. Üretilen son teknoloji uçaklar yüksek konfor ve daha fazla yolcu kapasitesine sahiptirler. Yolcu kapasitesi, ağırlık, boyut ve hızlarda meydana gelen artışlar daha güvenli sürüş konusunu ortaya çıkarmıştır. Devasa ölçülerdeki uçakların hareketini havada ve karada istenilen şekilde ve güvenli bir şekilde kontrol edebilmek önemli bir konu haline gelmiştir. Klasik kara araçlarında olduğu gibi uçaklarda da hareket kontrolü frenleme sistemleri ile sağlanmaktadır. Uçuş güvenliğinin en önemli unsurlarından biri olan fren sistemleri üzerine sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Uçak fren sistemlerinde başlangıçta fenolik fren balataları kullanılmakta iken günümüzde karbon fren balataları tercih edilmektedir. Yüksek aşınma ve termal özelliklerinden dolayı uçak fren sistemlerinde, karbon fren balata kullanımı birçok avantajı beraberinde getirmiştir.

Uçağın gök yüzünde seyahat edebilmesi ve devamında piste (taksi) iniş yaparak durdurulması fren sisteminin güvenlik açısından en önemli hayati fonksiyonudur.

Uçak fren sistemlerinin görevi, havadaki uçağın hareketinin yönetilmesi, yavaşlatılması ve piste tekerleğin temas etmesiyle hareketinin kontrolü ve güvenli bir şekilde durdurulmasıdır. Bu amaçla uçaklarda üç temel frenleme sistemi kullanılır. Bunlar: mekanik, hidrolik ve pnömatik frenleme sistemleridir. Mekanik frenlemede, diskler, balatalar, kaldıraçlar, bağlantı elemanları gibi elemanlar kullanılır. Hidrolik frenlemede, fren bileşenlerine basıncın aktarılması için sıvı basıncı kullanırken, pnömatik frenlemede fren gücünü iletmek için hava basıncı kullanılır. Bu sistemler, hava frenleri, spoiler, kanatlar, ters iticiler, sürgü olukları gibi sistemler yardımı ile çevredeki hava sürtünmesini

arttırır veya etkin frenleme için tutunma ve kızaklama ile zemin sürtünmesini arttırır (Nair, Nair, & Automation Engineering, 2013). Uçak fren sistemlerinin iki temel görevi vardır. Birincisi uçağı iniş, kalkış ve kalkıştan vazgeçme (RTO-Rejected Take Off) sırasında durdurma. İkincisi ise uçağı park pozisyonunda ve yer operasyonları sırasında sabit tutmaktır (Mechanic, 2019).

Son yıllarda araştırmacılar, hem çevre dostu hem de yüksek performans ihtiyacını karşılayan balatalara yönelmişlerdir. Bu eğilim, kompozitlerdeki lifli yapıların sürtünme katsayısını dengeleyerek yüksek sıcaklıkta aşınma oranını düşürdüğü düşüncesiyle hareket etmektedir (Akıncıoğlu G., 2019; Yun, Filip, & Lu, 2010). Termoset reçineden elde edilen camsı karbon fren balatalarının çok az aşınma değeri vardır. Ama bu malzemeler dayanımları ve ısıl iletimleri düşük olduğu için yeterli frenleme performansı gösterememektedir. Yeni nesil karbon/karbon (C/C) fren balataları sayesinde havacılık alanında zorlu şartlara uygun, yüksek dayanımlı, yüksek ısıl iletkenliğe ve termal şok dayanımına sahip, aynı zamanda da mükemmel sürtünme ve aşınma özellikleri sergileyen uçak fren diskli balataları üretilmeye başlamıştır (Çeliktaş, 2009).

Bu çalışma, uçakların fren sistemleri hakkında genel bilgiler verildikten sonra fren sistemlerinde kullanılan balata malzemeleri ve özelliklerinin açıklanması amacıyla yapılmıştır. Uçak fren sistemlerinde kullanılan metalik ve karbon fren balataları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

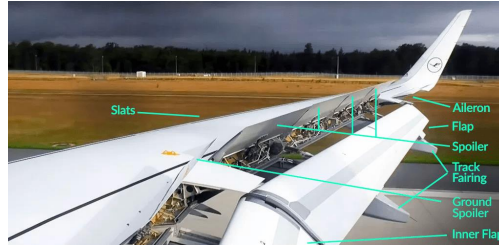
## 1. Uçak Fren Sistemleri

Uçaklarda frenlemeyi, kara taşıtlarındaki geleneksel fren sistemlerinden daha farklı bir çalışma yapısına sahip bir frenleme sistemi yapar. Örneğin; Ağır kütleli uçaklar, iniş sırasında yaklaşık 300 km/h hızla pist yüzeyine temas eder. Temas esnasında yüksek potansiyel enerjiye sahip uçak tekerleklerde toplam 1 milyarlık joule değerinde kinetik enerji oluşturur. Bu sayede her tekerleğe yaklaşık 125 mega joule enerji düşer. Fren sistemi kısa mesafede bu enerjiyi absorbe ederek uçağı güvenli şekilde durdurabilme kapasitesinde üretilmiştir. Bunun yanı sıra uçak üreticileri ve havayolu şirketleri, fren sistemlerinin, düşük maliyet, kolay bakım, güvenlik, frenleme etkinliği ve fren sırasında konfor gibi talepleri karşılayacak şekilde imal edilmesini talep ederler. Uçağın taksi

durumunda frenlemesini sağlayan veya destekleyen sistemleri aşağıda açıklanmıştır.

### 1. 1. Uçak kanat fren sistemleri

Uçağın kalkmasına, havada hareketine, inişine ve pistteki hareket kabiliyetine destek veren elemanlar (Spoiler) kanat fren sistemleridir. Şekil 1' de uçak kanat fren sistemi gösterilmiştir (Guy, 2019).



Şekil 1. Uçak kanat fren sistemi

Kanatların üstünde, altında veya gövdenin yakınına menteşe ile monte edilen mekanizmalardır. Yüzeylerinin havaya sürtünmesi yoluyla fonksiyonunu yerine getirir. Tekerlek freni için kolaylık sağlar ve kayma riskini azaltır. Havada ve taksi halinde uçağın manevra kabiliyetine destek verir (Mechanic, 2019).

### 1. 2. İtme ters çevirici sistemleri

Motorlar uçaklara uçuş yönünde itme kuvveti sağlayan elemanlardır. İtme ters çeviricileri, uçağın hareketine karşı bir sürtünme kuvveti oluşturmak için egzoz gazlarının yönünün tersine çevrilmesi veya pervane eğiminin değiştirilmesi prensibi ile çalışır. Normal frenlere ek olarak, itme ters çeviricileri (Thrust reversers), özellikle pistler karla kaplı ya da buzluysen, temastan sonra uçağın yavaşlamasını sağlamak için kullanılır. Şekil 2'de uçak itme ters çevirici sistemi gösterilmiştir (Airlines, 2019).





*Şekil 2. Uçak itme ters çevirici sistemi*

İtmenin tersine çevrilmesi, durma mesafesini azaltmak için kullanılır. Daha küçük pistlere iniş, tekerlek fren aşınması ve taksi mesafesinin azalmasını sağlar. Reddedilen kalkışlar durumunda da kullanılır. Islak veya buzlu pistlerde su tabakası, tekerlek yüzeyi ile pist (Yağlama) arasında kayganlaştırıcı bir film gibi davranır. Bunun sonucu olarak, sürtünme azalır. Yüzey sürtünmesinden bağımsız olan itme ters çeviricilerin etkisiyle, bu şartlarda daha iyi frenleme sağlanır (Smartcockpit, 2019).

### **1. 3. Uçak disk fren sistemleri**

Uçaklarda genellikle tek disk ve çok diskli frenler kullanılır. Esas olarak tekerlek grubuna takılı dönen disk ve sabit tutulan fren kaliperlerine bağlı asbest, seramik, karbon vb. malzemelerden yapılmış balata ikilisinden oluşur. Şekil 3' te uçak disk fren sistemleri gösterilmiştir (Airport, 2019).



*Şekil 3. Uçak disk fren sistemi*

Fren pedalına basıldığında basınç altındaki fren hidroliği, ana silindirden ikincil silindire borular vasıtasıyla iletilir. Yardımcı silindir, gelen sıvı basıncının kuvvetiyle harekete geçen pistondan oluşur. Piston, fren balatalarını dönen disk yüzeyine yaklaşık 200 bar basınçlı basınçla iter. Fren balatası ve disk yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti, döndürme kuvvetinden fazla olacağından yavaşlama veya durdurma sağlanmış olur. Günümüzde kullanılan disk frenler diferansiyel tip olduğundan sağ ve sol tekerlekler birbirinden bağımsızdır. Bu ayrıca daha fazla manevra kabiliyeti sağlar (Mechanic, 2019).

#### **1. 4. Uçak kayma önleyici fren sistemleri**

Otomobillerdeki ABS sistemine benzeyen kayma önleyici (Anti-skid) fren sistemidir. Uçağın ön iniş takımlarındaki sensörler yardımıyla ölçülen hıza göre ana iniş takımlarının fren hızları ile karşılaştırılır. Aralarındaki fark belli bir oranın altına düşer ise fren yapan tekerleklerdeki fren basıncı, tekerlek kilitlemesini önlemek için optimal olarak belirlenen fark katsayısına tekrar ulaşılacak şekilde azaltılır. Uçak lastikleri ile zemin arasında belirlenen ortalama sürtünme katsayısı 0,15'dir. En yüksek frenleme kuvveti bu oranda sağlanabilir. Sürtünme oranı 0,30'dan daha fazla olursa tekerleklerin kilitlemesine yol açar. Eğer frenleme sırasında tekerlekler kilitlenirse, tekerlekler sadece kinetik sürtünme katsayısının etkisinde kalacağından dolayı çok az fren kuvveti uygulanmış olur. Bu istenmeyen durum karşısında fren basıncı, tekerleklerin sürtünmesini düşürmek için kısa süreli düşebilir. Bu esnada anti-skid fren sistemi oluşabilecek kaymayı engellemek için devreye girmiş olur (Akçin, 2019).

#### **2. Uçak Fren Sistemlerinde Kullanılan Balatalar**

Fren balataları metalik ya da karbon esaslı olmak üzere iki tipte imal edilmektedir. Uçak fren balataları uçağın büyük kütlelerinin ve hızının oluşturduğu frenleme kuvvetine karşı uçağı en kısa sürede ve güvenli biçimde durdurmayı sağlamak için kullanılır. Kullanılan malzemenin yüksek termal iletkenliğe ve iyi aşınma direncine sahip olması gerekir. Sistemdeki kinetik enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürerek uçağı durdurabilecek yapıda olmalıdır. Geleneksel frenlerde, yüksek frenleme enerjisine cevap verebilmek amacıyla, fren sistemlerinin ısıl kapasitesini artırmak ve fren sıcaklığını düşürmek için frenlerin ölçüleri

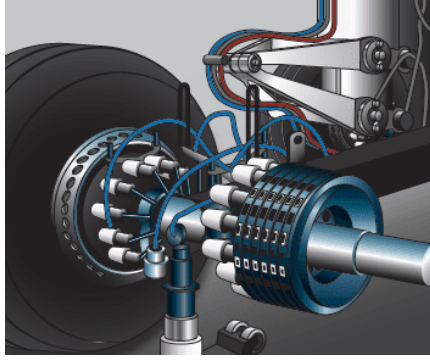
büyütülerek ağırlığı arttırıldı, bu da daha fazla yakıt tüketimi ve daha fazla taşıt emisyonları ile sonuçlandı.

Çok sayıda kaza, bir yokuşlu yolda inerken frenleri aşırı ısınan ve ardından durdurulamayan kamyonlardan kaynaklanmaktadır. Örneğin, saatteki hızı 60 km/h olan 20 tonluk bir kamyon yüzde 10'luk bir eğimden inerken durma mesafesi, döküm frenlerle yaklaşık 80 m'dir. Hesaplamalar, durma mesafesinin karbon frenlerle yalnızca 25 metreye kadar azaltılabileceğini göstermektedir. Karbon fren balatası kullanımı, uçakların pist üzerinde daha kısa mesafede durabilmesine imkan sağlamaktadır. Böylelikle karbon fren sistemlerinin pistin ömrünü uzatmada da önemli bir etkisi vardır (Mohanty, 2013). Ve en önemlisi ekstra malzeme ağırlığının yol açtığı yakıt sarfiyatının azalmasına yol açar.

İlerleyen teknoloji, taşıtların hız, büyüklük ve ağırlığında önemli artışlara sebep olmuştur. gelişen teknoloji sayesinde büyük bir artış. Ancak genel mantık olarak aynı cins taşıtların ağırlığının düşürülmesi düşüncesiyle fren sistemlerinin boyutlarında ise tam tersine küçülmeye gidilmiştir. Bu da frenleme esnasında birim alana düşen enerji miktarını arttırmıştır. Dolayısıyla gerçekleşen bu enerji artışına tolere edecek özellikte fren sistemi elemanı üretimi yoluna gidilmiştir (Österle & Urban, 2004).

Frenlerde kullanılan balatalar birçok maddenin bileşiminden yapılıdır. Bir fren balatası, standartlara uygun aşınma direnci, sürtünme katsayısı sergilemelidir. Frenleme sırasında sürtünme nedeniyle fren balataları yüksek termo-mekanik şartlara maruz kalmaktadır. Aşırı sıcaklık nedeniyle balataların frenleme performansı değişebilmekte veya balatalar mekanik deformasyona uğramaktadır (Mutlu, Oner, Cevik, Findik, & Tribology, 2007; Mutlu, Oner, Findik, & design, 2007; TİMUR & KILIÇ, 2013).

Uçağın gökyüzüne çıktığı ilk günlerde, genellikle askeri alanda ve büyük uçaklardaki fren sistemlerinde ilk başlarda fenolik, daha sonra bakır ve çelik esaslı fren diskli balatalar kullanılmıştır. Ancak zamanla, çeliğe oranla hem ağırlık, hem mekanik veriler ve performans açısından daha etkin karbon esaslı kompozit fren diskli balataların avantajı göze çarpmaya başlamıştır. İlk karbon kompozit fren sistemi 1972 yılında Concorde uçağında kullanılmıştır (Heritageconcorde, 2019). Şekil 4'te uçak disk fren sistemi gösterilmiştir (Aircraftsystemstech, 2019).



*Şekil 4. Uçak disk fren sistemi*

Bugün dünyada üretilen karbon karbon kompozitin % 63'ü uçak fren sistemlerinde kullanılmak üzere imal edilmektedir. Kullanılmaya başlamasından bugüne kadar gelişen teknoloji ve piyasa etkisiyle, karbon karbon malzemenin fiyatı yaklaşık altı kat düşmüştür. Bu sayede sivil havacılıkta da kullanımı artmıştır. Günümüzde, Boeing 747-400, 757, 767, 777 uçaklarında karbon karbon fren diskleri kullanılmaktadır. Çarpıcı bir örnek olarak Boeing 767 uçağında, çelik fren diskli balatadan karbon karbon fren diskli balatasına geçilmesiyle 400 kg ağırlıkta kazanç sağlanmıştır. Bunun yanı sıra çelik diskli balataların 600-1100 inişlik ömrü vardır. Karbon karbon fren diskli balatalarının ise 2 kat daha fazla iniş kapasitesi mevcuttur. Uçak balataları, organik malzemelerden (örneğin: asbest elyaf takviyeli reçine matriksli kompozitler, asbestsiz organik balata malzemeleri), toz metalurjisi malzemelerden (örneğin: bakır ve demir bazlı metalikler) ve karbon/karbon kompozit malzemelerden üretilmektedir. Havacılık bilimi ve teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte, boyut ve ağırlıkta kayda değer bir artışa sahip olan uçaklar, daha hızlı ve kısa iniş/kalkış mesafeleri talep etmektedir. İniş ve kalkış enerjileri arttığından fren sıcaklıkları geleneksel fren malzemelerinden (organik ve çelik fren malzemeleri) daha yüksek olmaktadır (Çelikaş, 2009).

## 2. 1. Metalik Balatalar

Metalik balataların kimyasal içeriği, metalik ve metalik olmayan tozların karışımına bağlıdır. Ana metal olarak bakır veya çelik malzemeler kullanılırken bunlara ilave doğal veya yapay olarak grafit, aşındırıcı olarak silisyum, yüksek sıcaklığa dayanıklı yağlayıcılar (molibden disülfat) kullanılabilir. Karışımı oluşturacak tozların boyut ve şekilleri ise üretimin son noktasını oluşturmaktadır ve istenildiği takdirde fren sırasında oluşabilecek vibrasyon ile aşınmayı kontrol etmek ve disklerin zarar görmesini önlemek amacıyla malzeme ilavesi yapılabilir. Yapı içersine katılan malzemeler temelde matris malzemeleri, aşındırıcılar ve ilave takviye malzemeleri olarak gruplandırılabilirler (Akdoğan, 2010).

Metalik fren balataları, genellikle çok ağır termo-mekanik şartlarda kararlı sürtünme dayanımına sahiptirler. Yüksek termal iletkenliği sayesinde sürtünme sırasında açığa çıkan ısı hızlıca dışarıya transfer edilir. Bu sayede frenleme basıncındaki artışın sürtünme katsayısına çok fazla bir etkisi olmaz. Hafif ağırlıklı uçaklarda frenleme sırasında yüksek sıcaklık dayanımına ihtiyaç olmadığından metalik balatalar kullanılır. Metalik balataların, gürültü ve vibrasyona eğilimli olması, disk yapısında deformasyona sebep olması büyük ağırlıklı uçaklarda tercih edilmeme sebebidir (Akçin, 2019).

Balata malzemesi, sinterlenmiş metal bir matrizen (temel olarak Fe bazlı veya Cu bazlı), karbür ve seramik gibi metalik olmayan bileşenlerden ve katı yağlayıcılardan oluşur. Metalik bileşenler dayanım sağlarken, metalik olmayan seramikler istenilen sürtünme katsayısı ve daha iyi frenleme performansı sağlar. Metalik sinterlenmiş sürtünme malzemeleri, frenleme sırasındaki sıcaklığın 1100 °C'ye kadar çıkabileceği durumlara daha uygundur. Bakır bazlı sinterlenmiş sürtünme malzemeleri ise sadece 600 °C'ye dayanır. Ayrıca, demir bazlı sinterlenmiş sürtünme malzemeleri, diğer ürünlere göre daha az maliyetlidir. Bu nedenle demir bazlı sürtünme malzemeleri, ticari savaş uçaklarında olduğu gibi ağır hizmet fren sistemlerinde kullanılır (Asif, Chandra, Misra, Characterization, & Engineering, 2011).

## 2. 2. Karbon balatalar

Fren disklerinden beklenen özellikleri ilk başlarda sadece çelik ve bakır esaslı malzemeler karşılamaktayken günümüzde teknolojik gelişmelerin ve maliyet planlarının ön plana çıkmasıyla farklı malzeme gruplarının kullanımı da artmaya başlamıştır. 1980' li yılların sonlarına doğru geliştirilen ve yeni nesil uçakların tamamına yakınında kullanılmaya başlanan en yaygın malzemenin başında C/C kompozitler gelmektedir. C/C diskler metalik disklere göre çok daha etkili ve yüksek performanslıdır. Sürtünmeye karşı yüksek aşınma dayanımına sahip bu kompozit balatalar, sıcak veya soğuk durumlarda ya da yüksek ve düşük hızlar gibi her türlü şartlarda sahip oldukları özellikleri korurlar. Isıyı absorbe etme kabiliyetleri kompozitin kimyasına göre çeliklerin 2 veya 3 katına kadar çıkabilmektedir. Ayrıca sürtünme dayanımı sayesinde malzeme kaybını en aza indirmektedir. Kompozit malzemeler doğaları gereği çeliğe oranla ortalama 4 kat daha hafiftir. Bir fren ünitesinde bu disklerden 8 ila 10 adet olduğu ve bir uçakta da 4 veya 8 adet fren ünitesi olduğu düşünülürse önemli bir ağırlık avantajı sağlanmış olur. Bu da uçağın menziline veya taşıdığı kargonun ve yolcu sayısının artmasına ve en önemlisi ekstra malzeme ağırlığının yol açtığı yakıt sarfiyatının azalmasına yol açar. Kompozit disklerin bir başka avantajı uzun ömürlü ve ekonomik olmalarıdır. Termal şok, yorulma ve darbelenme problemlerine C-C kompozitler, metaller kadar hassas değildir. Bu özelliklerde onları çok daha uzun ömürlü kılarak yenilenme sürelerini kısaltır. Unutulmamalıdır ki iniş kalkış sırasında meydana gelen malzeme kaybına bağlı maliyetler, havayolu şirketleri ve uçak üreticileri açısından büyük önem taşımaktadır (Akdoğan, 2010).

Ağır taşıt sektörlerinde, örneğin yarış arabaları, büyük otomotiv taşıyıcıları, yüksek hızlı tren, savaş uçakları ve askeri sistemler, daha fazla aşınma dayanımı sağlayan fren sistemleri gerektirir. Yüksek dayanımlı fren sistemi, ağır araçlar için performans artışı ve güvenlik anlamına gelir. Buna nedenle, bu frenleme sistemlerinde daha fazla aşınma dayanımı sağlayabilen ve çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen C/C kompozitler gibi ileri teknoloji ürünü malzemeler geliştirilmiştir. C/C kombinasyonları daha çok iniş hızlarının 250 Km/h'nin üzerinde olduğu uçak frenlerinde, iniş ağırlıklarının 100.000 Kg'dan fazla olduğu durumlarda kullanılır. Bu standartlarda fren enerjisi 10-50 milyon Jul değerindedir ve iniş takımlarının bu enerjiyi absorbe

edebilecek nitelikte olması gerekmektedir. Boeing 777-300ER uçağının azami iniş ağırlığı yaklaşık olarak 251.500 kg'dır. Uçak bu ağırlıktan daha fazla bir oranla iniş yapmak zorunda kaldığında, bu iniş fazla ağırlıkta iniş (overweight landing) olur. Fazla ağırlıkta iniş acil durumlar dışında uygulanmaz. Örneğin, Airbus 319, Boeing 767 ile Boeing 777 gibi ticari uçaklarda ve F-15 ile F-22 gibi askeri uçaklarda C/C diskli balatalar kullanılmaktadır (Akçin, 2019).

### 3. Uçak Balata Malzemelerin Özellikleri

Fren malzemelerinin performansını ve ömrünü; disk ve balata yapısı, uygulanan frenleme basıncı, kayma hızı, frenleme süre ve sayısı, temas alanı, absorbe edilen enerji, çevre şartları ve bakım-onarım gibi parametreler belirler.

Frenleme performansı fren sisteminin genellikle sıcaklıklı absorbe etme kabiliyetine bağlıdır. Bu durumda yüksek performanslı balata malzemesi, yüksek özgül ısıya, yüksek ergime sıcaklığına, yüksek ısı altında mekanik özelliklerini stabil koruyabilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Karşılaştırma yapılması bakımından aşağıda metalik ve karbon kompozit fren balatalarının sürtünme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Fitzer & Manocha, 1998).

**Tablo 1.** Metalik ve karbon esaslı fren balatalarının sürtünme özellikleri

Malzeme	Yoğunluk	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Kaybı
Metalik esaslı	5,6	0,22	1,7
Karbon esaslı	1,6	0,19	0,25

Sürtünmeyi etkileyen önemli faktörlerin başında yüzey pürüzlülüğü ve uygulanan kuvvet gelir. Uçağın fren sistemi, stator ve rotorların basınç etkisiyle sıkıştırılarak hareket enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesi esasına göre çalışmaktadır. Yapılan ısı işlemlerle rotor ve stator arasındaki yüzeyler pürüzlü hale getirilir. Bu değişiklik sürtünme katsayısının belirlenmesinde en önemli etkidir. Uçak fren sistemlerinde, frenleme esnasında oluşan film tabakası kimi sürtünme sistemlerinde tercih edilmez. Örneğin; debriyaj sistemlerinde ve çelik

bazlı diskli balatalarda film tabakası oluşumu istenmeyen bir durumdur. Çünkü çelik içerisindeki çelik haricindeki diğer elementler yüksek sıcaklık yüzünden çelik bileşiminden ayrılarak sürtünme yüzeylerinin üzerinde birikmektedir. Bu da sürtünme katsayısını ve sürtünme düzenleyici diğer malzemelerin durumunu etkilemektedir. Ancak C/C matris içinde % 99.9 karbon bulunduğundan film tabakası aşınma kaybını azaltan olumlu bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbon diskli balataların aşınmasına ve özelliğini yitirmesine sebep olan temel sebep sürtünmeden ziyade oksidasyondur. Fren sisteminde bu oksidasyonu önlemek için sürtünme esnasında, sürtünme yüzeyinde oluşan sıcaklık dışarıya atılmalıdır. Bu amaçla fiber yönlerinin sürtünme yüzeyine dik olarak üretim yapılması gerekmektedir. Bu sayede ısı iletiminin fiberin uçları boyunca daha hızlı olmaktadır. Uçak fren sistemlerinde kullanılan karbon diskli balatalarda bulunması gereken fiziksel özellikler Tablo 2.'de verilmiştir (Çelikaş, 2009).

**Tablo 2.** Karbon fren disklerin fiziksel özellikler

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,72-1,78
Gözeneklilik	% 10-6
Grafit hal	% 75-90
Eğme dayanımı	60-90 MPa
Basma dayanımı	120-140 MPa
Kesme dayanımı	7.5-11.5 MPa
Özgül ısı	1.2-1.5 J/Kg
Isıl iletkenlik	45-110 W/m

Karbonun yüksek özgül ısı ve ısıl iletkenlik özelliği fren sistemlerinde tercih edilmesinin başlıca sebebidir. Bunlardan yüksek özgül ısı kapasitesi sistem elemanının küçülmesine yüksek ısıl iletkenlik ise oluşan sıcaklığın hızlı bir şekilde atmosfere atılmasına imkan sağlamaktadır. Metalik ve karbon esaslı diskli balata malzemelerinin karşılaştırması Tablo 3.'de verilmiştir (Çelikaş, 2009).



**Tablo 3. Metalik ve Karbon Yapının Karşılaştırması**

Özellik	Metalik	Karbon	İstenilen
Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	7,2	2,26	Düşük
Özgül ısı 50 °C sıcaklıkta J/ kg °C	0,46	0,71	Yüksek
Isıl iletkenlik W/mK	100	30-600	Yüksek

Uçağı durduran sürtünme momentini, diskli balatalar sağlar. Balata ve sabit disk arasında sırasıyla 500 °C, 2000 °C gibi çok yüksek yüzey ve sürtünme sıcaklıkları meydana gelir. Bu sıcaklıklara dayanım gösterebilmesi için, yüksek ısı iletkenliği ve çok düşük ısıl genleşme katsayısı nedeniyle, C/C kompozit, seçilebilecek en ideal malzemedir. C/C kompozit frenlerin ısı kapasitesi çelikten 2,5 kat fazladır. C/C kompozit frenler çelikten 300 Kg daha hafiftir. Fren sistemlerinde kullanılan C/C) kompozitler; karbon kumaş laminatlar, yarı rastgele doğranmış karbon fiberler ve çapraz takviyeli lamine karbon fiber keçeleden yapılıdır (Arabab, 2015).

Kompozitlerde yük ilk önce matris fazına, daha sonra kompozitin toplam mukavemetinde bir artışa neden olacak şekilde takviye fazına aktarılarak dağılır. C/C kompozitlerinin fiziksel özellikleri, takviye edici liflerin hakimiyetindedir (Morgan, 2005).

Sürtünme malzemesi olarak kullanılan karbon karbon uçak frenlerinin teknik özelliklerini incelediğimizde gerçekten de bazı daha büyük uçaklar için, tam yüklü bir iniş ve kalkış, C/C fren balata kullanılmadan mümkün olmayabilir. C/C kompozitlerinin yüksek sıcaklık iletkenliği ve metallerde görülen yorgunluğun olmaması bazı avantajlarıdır. Uçaklarda ağırlığın önemi göz önüne alındığında, metalik fren sistemlerine göre oldukça hafiftirler. Düşük performanslı uçak frenlerinde kullanılan çelik ve bakır tabanlardan dört kat daha hafif olması en belirgin örneklerden gösterilebilir. Ayrıca yüksek ısıl kapasiteler (çeliğe oranla iki kat), sabit sürtünme katsayısı, çok çeşitli kayma şartlarında düşük aşınma oranı ve özellikle de 1000 °C sıcaklığın üzerinde dayanım göstermesi en önemli özellikleri arasındadır. Karbon-Karbon (C/C) kompozitler, 3000 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda tokluk ve yüksek mukavemet gibi mekanik özellik gösterir. Grafit 2,2 g/m<sup>3</sup>lük tahmini yoğunluğa sahiptir. Karbon malzemeler yaklaşık 50 GPa'ya kadar çok yüksek özgül güce sahiptir ve bu yüksek gücü 1500 °C'den yüksek sıcaklıklarda tutar. C/C kompozitler düşük ısıl genleşme katsayısı, düşük aşınma katsayısı ve

aşınma oranları nedeniyle deformasyon olmadan ısıyı emebilmektedir. Karbonun olağanüstü mekanik ve termal özellikleri, karbon malzemelerindeki atomlar arasındaki güçlü kovalent bağdan kaynaklanmaktadır. Karbonun bu özelliği, yapısı karbondan oluşan fren sistemlerini olumlu yönde etkilemektedir (Arabab, 2015).

Karbon fiber takviyeli C/C kompozit fren balataları, hafif, yüksek özgül dayanım, düşük ısıl genleşme katsayısı (CTE), mükemmel sürtünme ve aşınma gibi temel avantajlarından dolayı uçak fren sistemlerinde metalik fren balatalarının yerini kademeli olarak almaktadır (Morgan, 2005).

Tipik olarak, uçak fren sisteminin sıcaklığı normal iniş şartlarında 600 °C ile 800 °C arasında iken, uçak taksi konumunda iken aşırı yüke maruz kaldığında bazen 1200 °C' ye bile ulaşabilmektedir (Choi & Lee, 2004; Fan et al., 2007; C. Zhang et al., 2011; J. Zhang & Xia, 2013).

Ortalama olarak uçaktaki fren ünitesinden 0,0025 mm/face/stop oranında aşınma beklenmektedir. Buda 5 çift fren diskine (yaklaşık olarak birbirine eşdeğer) sahip bir uçağın 50 mm aşınma sınırına yaklaşık 1000 iniş yaparak varacağı anlamına gelmektedir (Handbook, 1992).

Aşınma oranı, oksidasyon önleyici kaplama ve çelik tutucu gibi kompozit faktörler, karbon fren malzemelerinin fren servis ömrünü etkiler. Karbon fren malzemelerinin aşınma hızı, yoğunluk, yüzey sertliği, sürtünme yüzeyinin mikro yapısı ve çalışma şartlarından ve ortamlardan etkilenir (Su et al., 2010).[24].

Karbon lifleri, genellikle reçine, metal veya seramik gibi bir matris ile birleştirilir. Karbon lifleri, Yapısal bir kompozit oluşturmak için, düşük yoğunluk, yüksek gerilme modülü ve mukavemeti, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek ısı iletkenliği gibi çekici özelliklere sahiptir (Chung, 2017; Krenkel, 2005).

Halen, elyaf takviyeli kompozitler birçok alanda yaygın olarak uygulanmaktadır. Karbon fiber takviyeli seramik matriks kompozitler ve karbon fiber takviyeli polimer matris kompozitler en yaygın kullanılanlardan biri haline gelmiştir (Che et al., 2014; Chung, 2017). Karbon fiber takviyeli polimer matris kompozitler, korozyon direnci ve mükemmel termodinamik özellikler, vb. gibi mükemmel özellikleri nedeniyle, havacılık endüstrisinde yapısal malzeme ve yüksek sıcaklığa dayanıklı etken malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Karbon

fiber takviyeli seramik matriks kompozitler, düşük ağırlık, kimyasal stabilite, korozyon direnci, aşınma direnci, özgül dayanıklılık ve yorulma direnci gibi birçok genel mükemmel özelliğe sahiptir ve havacılıkta (Padture, 2016), ileri yapısal enerji, fren sistemlerinde (Fan et al., 2010), spor ve savunma sanayi malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Schmidt et al., 2004; Sheikh-Ahmad, 2009).

Karbon özgül ısısının yüksek olmasından dolayı 2000 °C sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini devam ettirmektedir. Aynı açıdan çelik incelendiğinde bu yeteneğin 800 °C' lerde kaybedildiğini görmekteyiz. Aslında burada elde edilen net fayda, karbonun kullanımını sürdürdüğü sıcaklık seviyesinin, çeliğe oranla 2-3 kat fazla olmasıdır. Havacılık sektörü uçak fren sistemlerinde çoğu zaman en yüksek sıcaklıklara ulaşmamaktadır. Bunun sebebi, fren sistemini oluşturan lastik, hidrolik boru ve metalik jantların gibi elemanların karbonun dayanabildiği en yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanamamasıdır. Fren disk balataları 2000 °C sıcaklığa ulaştığında, fren sistemi ve çevresindeki daha düşük sıcaklıklara dayanabilen elemanların zarar görmesine sebep olacaktır. Ancak, RTO (Rejected Take Off) adı verilen kalkıştan vazgeçme halinde uçaktaki yüksek hareket enerjisi çok kısa sürede ısıya çevrilmesi gerekir. Fren sisteminin çalışma sıcaklığı, bu gibi ani durumlarda nadiren de olsa yüksek sıcaklık seviyelerine çıkabilmektedir. Sıcaklığın yükseldiği bu gibi durumlarda oksidasyonun da hız kazanacağı unutulmamalıdır. Bunun yanında karbon fren diskli balataların, frenleme kapasitelerini yüksek sıcaklıklarda dahi çeliğe oranla daha fazla muhafaza edebilmeleri, az işçilik gerektirmesi, ağırlığının düşük olması sebebiyle uçak toplam ağırlığına önemli etkisi ve daha uzun ömürlü olması sayesinde çelik fren diskli balataların yerini almaya başlamıştır. Karbon kompozit fren diskli balatalarda oksidasyona bağlı olarak performans düşmesi ve aynı miktar enerjiyi emmek için, daha büyük bir hacim gerektirmesi iki önemli dezavantajı olarak kabul edilmektedir (Jortner, 2000).

Karbon/Karbon yapının temel malzemesi olan karbon fiberler, fırınlama, filtreleme, yavaş ısıtma ve soğutma işlemi ile kalite güvence prosedürleri gibi bir takım özel işlem basamaklarından dolayı yüksek maliyetli malzemelerdir. Bu yüksek maliyet, C/C' nun daha uzun ömürlü olması, yedek malzeme döngüsünü azaltması, hafifliği, toplam uçak ağırlığında yakıt tasarrufu veya daha fazla yolcu ya da yük alınmasına imkan sağlaması gibi avantajlı yönlerle karlı hale getirilmektedir. Askeri, tıbbi ve sportif gibi önemli alanlarda eğer ihtiyaç duyulan malzeme

özelliğinin, başka alternatif bir çözüm üretilmediği durumlarda yüksek maliyet durumu göz önünde bulundurulmamaktadır (Çeliksaş, 2009).[5].

Karbon/karbon kompozitler ; düşük ısıl genleşme katsayısı, 2000 °C'ye kadar sıcaklığa dayanabilme, yüksek termal şok dayanımı, yüksek aşınma dayanımı, iyi şekil alma kabiliyeti, hafiflik, yüksek ısı iletkenliği, mükemmel elektrik iletkenliği, ani ısınma, ani soğuma ve yüksek kırılma tokluğu gibi üstün fiziksel özelliklere sahiptir. C/C kompozitin ısıl genleşme katsayısı kendisi ile aynı kategoride kullanımda olan diğer birtakım metallere kıyaslandığında 1/16 civarında daha düşük olduğu görülmektedir. Bu üstün fiziksel karakteristikliklerinden dolayı yüksek sıcaklığa maruz kalınan ortamlarda çalışan C/C kompozite tasarımda büyük esneklik sağlamaktadır. C/C kompozitin bir diğer önemli fiziksel özelliği ise ısıl iletkenlik açısından gösterdiği üstün niteliklerdir. Isıl iletkenlik katsayısı özel nitelikli birtakım karbon fiberlerin kullanımı ve ısıl işlemler sonrasında 30-600 W/mK değerlerine ulaşabilmektedir (Jortner, 2000).

Uçaklarda disk sıcaklığının düşük olduğu durumlarda aşınma oranı genel olarak yüksektir. Uçak taksi pozisyonuna geçtiğinde artış gösteren disk sıcaklığı ile birlikte aşınma oranı ciddi derecede artış göstermektedir. Fakat sıcaklık ortalama 1000 °C'lere kadar yükseldiği zamanlarda oksidasyon meydana gelebilir. Bu durumda disk yüzeyinde oluşan oksit tabakası malzemenin aşınmasını önler. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda karbon fren balata ve disklerin kullanımı tercih edilmektedir. Frenleme sayısı aşınma oranını arttırmaktadır. Özellikle uçuş trafiğinin yoğun olduğu havalimanlarında taksi pozisyonlarında bekleyen uçaklar, sık sık frenleme yapma gereği duyarlar. Bu sık frenleme ihtiyacı fren disklerinin ömrünü yaklaşık olarak %20-30 düşürmektedir. Çevresel şartların frenleme üzerinde etkisi nem, yağ ve kimyasallar olarak etki etmektedir. Yapı üzerinde uzun süreli bu etkiler, malzeme yapısını bozmaktadır. Bakım onarım programlarının sürekliliği ve takibi fren sistemleri açısından kritik öneme sahiptir. Zamanında bakım onarım sayesinde, fren balata ve disklerinde meydana gelmiş olan hasarların daha büyük hasarlara sebebiyet vermesi engellenmiş olur. Fren sistemlerine bulaşmış olan hidrolik yağları, kimyasal çözücüler ve kirler aşınma dayanımını düşürürler. Malzemelerin temizlenmesi ve hasar analizlerinin yapılması kullanım ömrü ve verimliliği uzatan etkiler yapmaktadır (Akçin, 2019).

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Geleneksel ve hafif uçaklarda metalik esaslı balatalar tercih edilmektedir. Ağır ve hızlı uçaklarda yüksek maliyetli ancak üstün özelliklere sahip karbon esaslı balatalar tercih edilmektedir. frenlerde, yüksek frenleme enerjisine cevap verebilmek amacıyla, fren sistemlerinin ısıl kapasitesini artırmak ve fren sıcaklığını düşürmek için frenlerin ölçüleri büyütülerek ağırlığı arttırıldı, bu da daha fazla yakıt tüketimi ve daha fazla taşıt emisyonları ile sonuçlandı. Askeri, tıbbi ve sportif gibi önemli alanlarda başka alternatif bir çözüm üretilmediği durumlarda yüksek maliyet durumu göz önünde bulundurulmadan yine karbon esaslı balatalar tercih edilmektedir.

Metalik esaslı balataların büyük kütle, çevreye yaydığı emisyonlar ve güvenlik şartları düşünüldüğünde karbon esaslı balataların tercih edilmesi önerilmektedir. Bunun içinde karbon esaslı balata üretim süreç ve maliyetlerini azaltacak çalışmalara ağırlık verilmelidir.

## Kaynaklar

- Aircraftsystemstech. (2019). Aircraft Brakes. Retrieved from <https://www.aircraftsystemstech.com/>
- Airlines, S. (2019). ENGINE THRUST REVERSERS. Retrieved from [https://www.hilmerby.com/md80/md\\_reverse.html](https://www.hilmerby.com/md80/md_reverse.html)
- Airport, H. (2019). UÇAKLARDAKİ FREN SİSTEMİ NASIL ÇALIŞIR? Retrieved from <https://www.airporthaber.com/havacilik-haberleri/ucak-frenlerinin-isinmasi-cok-riskli-bir-durum.html>
- Akçin, S. (2019). *Uçak Fren Balatalarında Karbon Fiber Boyut ve Şeklinin Tribolojik Özelliklere Etkisi*. (Master Master's Degree), Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Akdoğan, K. (2010). *Ticari Uçaklarda Kullanılan Fren Balata Malzemeleri*. (Master's Master's Degree), Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği,
- Akincioğlu G., A. S., Öktem H., Uygur İ., . (2019). Evaluation of the physical properties of hazelnut shell dust-added brake pad samples treated with cryogenic process. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 591-596.
- Arabab, S. J. O. S. (2015). Research in carbon-carbon composites.
- Asif, M., Chandra, K., Misra, P. J. J. o. M., Characterization, M., & Engineering. (2011). Development of iron based brake friction MMC used for military aircraft application by a new P/M route. *10(08)*, 693.
- Che, D., Saxena, I., Han, P., Guo, P., Ehmann, K. F. J. J. o. M. S., & Engineering. (2014). Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review. *136(3)*, 034001.
- Choi, J.-H., & Lee, I. J. W. (2004). Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes. *257(1-2)*, 47-58.
- Chung, D. J. C. C. (2017). Carbon Fibers, Nanofibers, and Nanotubes. 1-87.
- Çeliktaş, E. (2009). *Uçak fren balataları incelemesi*. (Master's Degree Master's Degree), Hava Harp Okulu, Ankara.
- Fan, S., Zhang, L., Cheng, L., Tian, G., Yang, S. J. C. S., & Technology. (2010). Effect of braking pressure and braking speed on the tribological properties of C/SiC aircraft brake materials. *70(6)*, 959-965.
- Fan, S., Zhang, L., Xu, Y., Cheng, L., Lou, J., Zhang, J., . . . Technology. (2007). Microstructure and properties of 3D needle-punched carbon/silicon carbide brake materials. *67(11-12)*, 2390-2398.

- Fitzer, E., & Manocha, L. J. C. C. (1998). Carbon Fiber Reinforcements and Carbon. 335.
- Guy, T. P. (2019). How Airplane Wings Work: Ailerons to Flaps and Everything In Between. Retrieved from <https://thepointsguy.com/news/how-airplane-wings-work/>
- Handbook, A. J. A. I., Materials Park, Ohio. (1992). Friction, lubrication and wear technology. 18, 127-160.
- Heritageconcorde. (2019). Concorde Landing Gear Braking Systems. Retrieved from <https://www.heritageconcorde.com/landing-gear-braking-systems>
- Jortner, J. (2000). Applications of Carbon/Carbon Composites.
- Krenkel, W. (2005). Carbon fibre reinforced silicon carbide composites (C/SiC, C/C-SiC). In *Handbook of ceramic composites* (pp. 117-148): Springer.
- Mechanic, F. (2019). Brake Anti-Skid Systems (Part One) in AIRCRAFT LANDING GEAR SYSTEMS. Retrieved from <http://www.flight-mechanic.com/brake-anti-skid-systems-part-one/>
- Mohanty, R. J. D. S. J. (2013). Climate based performance of carbon-carbon disc brake for high speed aircraft braking system. 63(5), 531-538.
- Morgan, P. (2005). *Carbon fibers and their composites*: CRC press.
- Mutlu, I., Oner, C., Cevik, I., Findik, F. J. I. L., & Tribology. (2007). Wear performance of some phenolic composites with boric acid. 59(1), 38-45.
- Mutlu, I., Oner, C., Findik, F. J. M., & design. (2007). Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings. 28(2), 480-487.
- Nair, S., Nair, S. J. D. o. M., & Automation Engineering, I. G. D. T. (2013). Aircraft Braking System.
- Österle, W., & Urban, I. J. W. (2004). Friction layers and friction films on PMC brake pads. 257(1-2), 215-226.
- Padture, N. P. J. N. m. (2016). Advanced structural ceramics in aerospace propulsion. 15(8), 804.
- Schmidt, S., Beyer, S., Knabe, H., Immich, H., Meistring, R., & Gessler, A. J. A. A. (2004). Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications. 55(3-9), 409-420.
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites* (Vol. 387355391): Springer.

- Smartcockpit. (2019). Embraer 190. Retrieved from [http://www.smartcockpit.com/docs/Embraer\\_190-Powerplant.pdf](http://www.smartcockpit.com/docs/Embraer_190-Powerplant.pdf)
- Su, J.-M., Xiao, Z.-C., Liu, Y.-Q., Meng, F.-C., Peng, Z.-G., Gu, L.-M., . . . Xing, R.-P. J. N. c. m. (2010). Preparation and characterization of carbon/carbon aircraft brake materials with long service life and good frictional properties. *25*(5), 329-334.
- TİMUR, M., & KILIÇ, H. J. P. U. J. o. E. S. (2013). MERMER ATIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN OTOMOTİV FREN BALATASININ SÜRTÜNME KATSAYISININ FARKLI FREN BALATALARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI MARBLE WASTE USING PRODUCED OF AUTOMOTIVE BRAKE PAD OF FRICTION COEFFICIENT DIFFERENT PAD BRAKE PADS WITH COMPRASSION. *19*(1).
- Yun, R., Filip, P., & Lu, Y. J. T. I. (2010). Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. *43*(11).
- Zhang, C., Zhang, L., Zeng, Q., Fan, S., Cheng, L. J. M., & Design. (2011). Simulated three-dimensional transient temperature field during aircraft braking for C/SiC composite brake disc. *32*(5), 2590-2595.
- Zhang, J., & Xia, C. G. (2013). *Research of the transient temperature field and friction properties on disc brakes*. Paper presented at the Advanced Materials Research.



# LAKTOFERRİNİN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

BÖLÜM  
7

Gökçe KESER<sup>1</sup>  
Binnur KAPTAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yük. Gıda. Müh., Namık Kemal Üniversitesi

Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, 59030, Türkiye, [gokcekeser5@gmail.com](mailto:gokcekeser5@gmail.com)

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Namık Kemal Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, 59030, Türkiye, [bkaptan@nku.edu.tr](mailto:bkaptan@nku.edu.tr)

\* Bu çalışma, Gökçe KESER tarafından Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Dr. Öğr. Üyesi Binnur KAPTAN danışmanlığında yürütülen NKÜBAP tarafından NKUBAP.03.YL.17.106 numaralı proje ile desteklenen "Farklı Zamanlarda Toplanmış Manda Sütünde Serum Proteinlerinden Laktoferrinin Belirlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.



## 1. Giriş

Laktoferrin (Lf), geniş bir fonksiyon yelpazesine sahip nutrasötik bir protein olarak kabul edilmektedir. Günümüzde, immünomodülatör (Siqueiros-Cendón ve ark. 2014), antimikrobiyal (Legrand ve Mazurier, 2010), antioksidan (Kruzel ve ark. 2013), antikanser (Tsuda ve ark. 2010) gibi çoklu aktivitelere atıfta bulunulmuştur. Lf son zamanlarda obezite, diyabet ve kardiyovasküler hastalıklar gibi metabolik bozukluklardaki rolü tanımlanmıştır (Mayeur ve ark. 2016).

Lf bağışıklık sistemi ile ilişkili olduğu bilinen (Soyeurt ve ark. 2012), sütte doğal olarak bulunan ve esas olarak meme epitel hücreleri tarafından salgılanan çok fonksiyonlu, demir bağlayıcı bir glikoproteindir (Shimazaki ve Kawai 2017).

Sığır sütünde laktasyon dönemine bağlı olarak 0,02 ila 0,35 mg.mL<sup>-1</sup> arasında bulunur (Madureira ve ark. 2007). Doğumdan sonra kolostrom sütünde, laktoferrin miktarı çok yüksektir ve daha sonra yavaş yavaş azalır (Shimazaki ve Kawai, 2017). Sütte yüksek Lf miktarı (2,3 g.L<sup>-1</sup> süt) klinik veya subklinik mastitise işaret edebilir (Kutila ve ark. 2004).

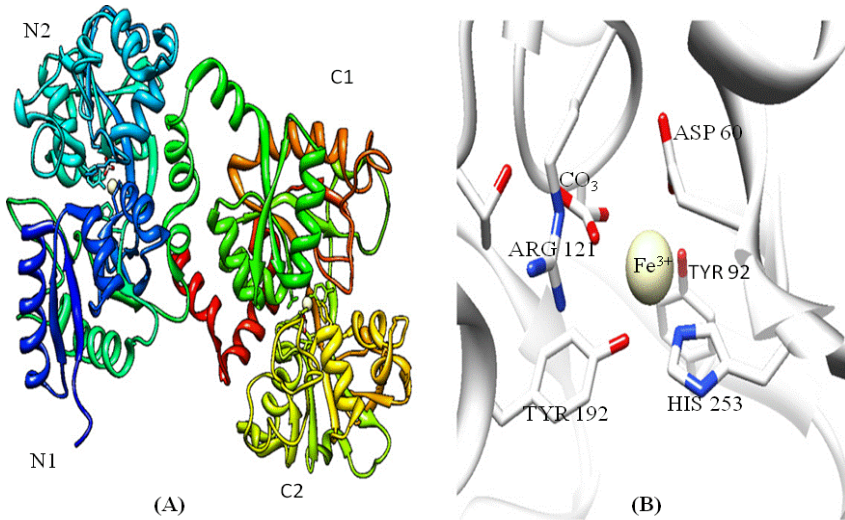
Lf, ilk olarak 1939 yılında sığır sütünden Sørensen ve Sørensen (1940) tarafından izole edilmiş ve 20 yıl sonra da Groves (1960) tarafından insan sütünün temel demir bağlayıcı proteini olduğu tespit edilmiştir. Laktoferrin inek, insan, kısırak, keçi, fare gibi birçok süt türünde bulunan bir glikoproteindir. İlk olarak inek sütünden izole edildiği için bu isimle anılan laktoferrin, sadece süte özgü bir protein değildir.

Lf, transferrin gen ailesinin bir üyesi olarak Fe<sup>+3</sup> bağlayan (Yılmaz ve Tosun 2012), gözyaşı, pankreas salgıları, eklem sıvısı, safra ve tükürük gibi ekzokrin sıvılarda da bulunmaktadır. Polimorf çekirdekli nötrofillerde depolanan Lf enfeksiyon, yangı ve tümör gelişimi durumlarında nötrofillerden açığa çıkar (Steijns ve Van Hooijdonk 2000). Sığır Lf ve insan Lf amino asit rezidüleri yaklaşık % 69 oranında benzerlik göstermektedir. İnsan sütü, en çok Lf miktarına sahiptir. Bu protein, insanların ve diğer memelilerin spesifik olmayan doğal bağışıklığının temel bir ögesidir (Billakanti 2009, Król 2011). Lf İnsanlarda, sığırlarda, ineklerde, keçilerde, atlarda, köpeklerde kemirgen ve çeşitli memeli türlerinde mukozal epitel hücrelerde ve nötrofiller tarafından üretilmektedir. Daha ileriki çalışmalar da ise González-Chávez ve ark. (2009) Lf'nin balıklarda da bulunduğunu tespit etmişlerdir.

## 2. Laktoferrinin Fiziko-Kimyasal Özellikleri

Lf, türler arasında yüksek homolojiye sahip olan yaklaşık 700 aminoasitten (aa) insan Lf (hLf) için 711 aa ve sığır Lf (bLf) için 689 aa oluşan 80 kDa molekül ağırlığına ve izoelektrik noktası 8,6 olan bazik, pozitif yüklü ve laktotransferrin ailesi olarak bilinen demir bağlayıcı bir glikoproteindir (Billakanti 2009, Giansanti ve ark. 2016).

Üç farklı Lf izoformu izole edilmiştir. Laktoferrin-a, demir bağlanma formudur, ancak ribonükleaz aktivitesine sahip değildir. Laktoferrin- $\beta$  ve laktoferrin-rib, ribonükleaz aktivitesi gösterirler fakat demir bağlama yeteneğine sahip değildir. Üç boyutlu yapısında, birbiriyle homolog olan iki simetrik lob (N ve C lobları) iç içe katlanmış tek bir polipeptit zincirinden oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu loblar ayrıca C (karboksil) ve N (amino) terminal bölgeleri olarak adlandırılmaktadır (Szwajkowska ve ark. 2011, Giansanti ve ark. 2016). Her lob, C1, C2, N1 ve N2 olarak bilinen iki bölgeden (Şekil 1) oluşur. Bölgeler her lobda bir demir bağlama yeri oluşturur ve Lf molekülleri (türler ve proteine göre), genelde molekülün yüzeyinde potansiyel glikozilasyon için farklı sayıda bölge içerir. Lf'nin demir bağlama kapasitesi, bazı durumlarda Lf için  $Fe^{+3}$  iyonları vericisi olarak kullanılabilen, transferrinden iki kat daha yüksektir (Rana ve ark. 2012, García-Montoya ve ark. 2012). Lf'nin, düşük pH'larda demiri bağlama yeteneği vardır.



Şekil 1. A: Laktoferrinin kimyasal yapısı B: Lf demir bağlama bölgesi (García-Montoya ve ark. 2012).

Bu sayede bakterilerin metabolik aktiviteleri nedeniyle pH 4,5'in altına düşen ortamlarda inflamasyon ve enfeksiyon bölgelerinde büyük önem taşır. Lf, tripsin ve benzeri enzimler ile beraber proteolitik degradasyona karşı önemli bir direnç gösterir. Direnç seviyesi, demir doygunluk derecesi ile orantılıdır (Vasavada ve Cousin 2005).

Lfnin içerdiği dört amino asit (histidin, tirozin ve aspartik asit) rezidüsü, demir bağlanması için önemliken, bir arjinin zinciri karbonat iyonunun bağlanmasından sorumludur. Lf demirin yanında, lipopolisakritler, heparin, glikozaminoglikanlar, DNA veya  $Al^{+3}$   $Ga^{+3}$ ,  $Mn^{+3}$ ,  $Co^{+3}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$  gibi metal iyonlar ile birçok bileşiği ve maddeleri bağlayabilme yeteneğine sahiptir (García-Montoya ve ark. 2012; Rana ve ark. 2012).

Doğumdan sonra ilk sağımda en yüksek laktoferrin konsantrasyonu ( $0,83 \text{ mg.mL}^{-1}$ ), ancak daha sonraki günlerinde keskin bir şekilde azaldığı bildirilmiştir. Sütteki laktoferrin konsantrasyonu, emzirme aşamasına ve memenin sağlık durumuna göre değişmektedir. Olgun sığır sütü nispeten düşük seviyelerde laktoferrin ( $0,02-0,35 \text{ mg.mL}^{-1}$ ) içerirken, bu konsantrasyon, invazyon (enfeksiyon durumu) periyodunda ( $20-100 \text{ mg.mL}^{-1}$ ) önemli ölçüde artmaktadır. Bu dönemde, meme bezi salgılanması, meme içi enfeksiyonlara direnciyle ilişkili olan fagositik hücreler, laktoferrin ve immünooglobülinler gibi doğal koruyucu faktörlerin konsantrasyonlarında büyük bir artışla değişikliklere uğrar (Galfi ve ark. 2016).

Laktoferrin miktarı aynı zamanda mastitis ile yakından ilişkili olduğu birçok çalışmada bildirilmiştir. Mastitis (meme iltihabı), mikroorganizmaların ve genellikle bakterilerin memeye girmesi ve burada çoğalarak meme dokusunu tahrip etmesiyle ortaya çıkan, modern süt endüstrisinde ağır ekonomik kayıplara neden olan bir meme iltihabıdır. Memelerdeki bu iltihaplanma süreçleri sütte laktoferrin içeriğini arttırmaktadır. İnflamasyon sırasında, meme bezlerindeki epitel hücreler uyarılması ile laktoferrin üretimi yoğunlaşır (Stelwagen ve ark. 2014). Ayrıca yapılan çalışmalar göstermiştir ki, laktoferrin konsantrasyonunun subklinik ve klinik mastitisli ineklerde, sütte önemli ölçüde artmıştır (Hagıwara ve ark. 2003, Chaneton ve ark. 2013). Laktasyon döneminde, Lf konsantrasyonu, kronik mastitli meme bezlerinde, sağlıklı emziren ineklere göre 7 kat daha fazla bulunmuştur. Akut mastitli ineklerden alınan süt örneklerinde laktoferrin

konsantrasyonları, sağlıklı ineklerinkinden 13 kat daha fazla olabilmektedir (Komine ve ark. 2005). Lf konsantrasyonundaki artış bu yüzden mastitis habercisi olabilmektedir (Galfi ve ark. 2016). Yapılan bir çalışmada mastitisli olan sütlerdeki Lf ve yanı sıra lizozim,  $\beta$ -defensin ve katilisidinler gibi antimikrobiyal peptitler ve proteinlerin konsantrasyonları hızla arttığını göstermiştir (Wheeler ve ark. 2007) Lf bağışıklık düzenleyici özelliği nedeniyle vücudun savunma mekanizmasında da büyük bir role sahiptir (Levay ve Viljoen 1995). Lf bunların dışında antifungal, antiviral, antikanser gibi birçok özelliğe de sahiptir.(Çizelge 1). Lf, ısı işlem ile denatüre olduğundan pastörize süt, sığır laktoferrininin saflaştırılması için uygun bir kaynak değildir. Bu nedenle, ısıya maruz kalmamış yağsız süt ve peynir altı suyu Lf'nin kaynağı olarak kullanılabilir (Famaud ve Evans 2003).

Tüm bunların yanı sıra Lf, saflaştırılmış sığır Lf'ni olarak, yeni doğan beslenmesi, yetişkinler için gıda takviye ürünleri, kozmetik ürünleri, fonksiyonel gıdalar, içecekler ve hayvan yemlerinde kullanılmaktadır. Diğer yandan çabuk bozulan gıdalarda doğal koruyucu olarak kullanılabilir (Billakanti 2009).

*Çizelge 1. Laktoferrinin bazı özellikleri (Brock 2002)*

<b>Laktoferrinin Bazı Özellikleri</b>	
Antitümör	Demir absorpsiyonu
Antiviral	Antimikrobiyal
Antiinflamatuvar	Antiparazitik
İmmun düzenleyici	Antifungal
Proteaz inhibitörü	Ribonükleaz
Otoantikör	Promikrobiyal

### 3. Laktoferrinin Fizyolojik Özellikleri

#### *Antimikrobiyal özellikleri*

Lf mukozal yüzey üzerindeki konumu sebebi ile, organizmayı çoğunlukla mukoza dokuları yoluyla istila eden mikrobiyal ajanlara karşı ilk savunma sistemlerinden birini temsil eder. Lf, hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakteriler, virüsler, protozoalar ve mantarlara kadar geniş bir yelpazede enfeksiyöz ajanların büyümesini ve çoğalmasını olumsuz yönde etkilediği birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. Lf *in vitro* deneylerde ortamdaki demiri kendisine bağlayarak, enfeksiyon bölgesindeki bakteriler tarafından kullanımını sınırlar ve böylece mikroorganizma üremesini ve gelişmesini engellemiş olur. Bu özelliği ile, patojen bakterilerin uzaklaştırılması ve bakteriyel büyümeyi engelleme yeteneği ile ilk tespit edilen özelliklerinden olmuştur (García-Montoya ve ark. 2012). Düşük pH değerlerinde dahi demirin tutulması, özellikle bakterilerin metabolik aktivitesine bağlı olarak pH'ın 4,5'in altına düşebileceği enfeksiyon ve inflamasyon bölgelerinde çok büyük bir öneme sahiptir (Rana ve ark. 2012). Son zamanlarda ise, demir bağlanma özelliğinden başka Lf'nin N-terminal (laktoferrisinler ve diğerleri; parçalanmamış proteinden daha güçlü) bölgesindeki reseptörler, bazı mikroorganizmaların yüzeyinde de keşfedilmiştir. Lf'nin bu reseptörlere bağlanması, hücre duvarındaki bozulmaya bağlı olarak, lipopolisakkaridin (LPS) salınımı ile bozulmuş permeabiliteye ortamdaki lizozim ve diğer antimikrobiyal ajanların etkisini artırarak daha yüksek bir duyarlılığa yol açar ve Gram-negatif bakterilerde hücre ölümüne neden olur. Bu Lf'nin ikinci bir antibakteriyel mekanizmanın varlığından bahsedilmiştir (Brock 2002, Ling ve Schryvers 2006).

Lf, 1977'de başlangıçta sadece *Streptococcus*'a karşı bakterisidal bir aktivite olarak tarif edilmiş olsa da daha sonra, laktoferrinin *Vibrio kolera*'nın, (Arnold ve ark. 1977) hücre zarını parçalayabildiğini ve hatta penetre ettiğini gösteren çalışmalarla bu durum daha da açığa kavuşturulmuştur. Antibakteriyel etkilerin *in vitro* şartlarda çok sayıda araştırmalar olmasına rağmen, *in vivo* çalışmalar ise halen tartışmalıdır. Diğer yandan Lf'nin oral yoldan verilmesinin, esas olarak mide de bakteriyel ve fungal enfeksiyonları azalttığı yönünde birçok deneysel gözlem vardır (Brock 2002). Bununla birlikte, yakın zamanda farelerde yapılan çalışmada, demir bağlama kabiliyetine dayalı olmamakla birlikte, *Helicobacter* enfeksiyonuna karşı koruyucu bir etki bildirilmiştir. *Helicobacter*'e karşı koruyucu etkisinden dolayı da, bu mikroorganizma

ile ilişkili olan mide kanserinin gelişiminin önlenmesinde önemli etkileri vardır (Dial ve Lichtenberger 2002; Sachdeva ve ark. 2014).

Ortamda ki demir eksikliği bakterileri hareket ettirmeye zorlar ve yüzeylere yapışamazlar. Böylece, *in vitro* ortamda Lf, *Pseudomonas aeruginosa*'nın biyofilm oluşumunu önleyebilir. Hedef hücre membran glikoaminoglikanı ve hedef hücrelere patojen yapışmasını önleyen bakteriyel istilaları bağlayarak, fakültatif hücre içi bakterilerin istilaya karşı savunmasına katkıda bulunabilir. Bu yetenek ilk olarak entero invaziv *E. coli* HB 101 ve daha sonra *Yersinia enterocolica*, *Yersinia pseudotüberküloz*, *Listeria monocytogenes*, *Streptococcus pyogenes* ve *Staphylococcus aureus*'a karşı bildirilmiştir. Lf'nin bakteriyostatik etkisi, *E. coli* gibi gelişebilmesi için demir gereksinimi olan bakterilerin gelişimini engeller (Rana ve ark. 2012, García-Montoya ve ark. 2012). Diğer yandan Lf demir verici olarak görev yapabilir. Bununla birlikte, bazı bakterilerin ortama uyum sağlaması için ve  $Fe^{+3}$  iyonları için laktoferrin ile rekabet eden sideroforları (bakteri kaynaklı demir şelatlama bileşikler) serbest bırakarak *Lactobacillus sp.* ve ya Bifido sp. bakteriler gibi düşük demir ihtiyacı olan bakterilerin de gelişmesini destekler (Rana ve ark. 2012, García-Montoya ve ark. 2012, Giansanti ve ark. 2016). Araştırmalar oral yoldan verilen laktoferrinin hem erişkinlerde hem de bebeklerde probiyotik aktivite gösterdiğini, aslında yararlı bağırsak bakterilerinin büyümesini desteklediğini göstermiştir (Nguyen ve ark., 2016). Lf antibiyotiklerle birlikte, sığır mastitinin tedavisinde de kullanılabileceğini belirtilmiştir (Komine ve ark. 2006, Petitelerc ve ark. 2007).

### **Antiviral özellikleri**

Laktoferrin, *in vitro* sistemlerde, birçok farklı virüsün enfektivitesini azaltabilir. Lf, hem DNA hem de RNA virüslerine karşı antiviral aktivite göstermektedir. Bununla birlikte, antiviral savunmaya katkısı, hücre zarına glikozaminoglikanlara bağlanmasıyla gerçekleşir. Bu şekilde, Lf virüslerin hücreye girmesini önler ve enfeksiyon erken bir aşamada durdurulmuş olur. Böyle bir mekanizmanın, sırasıyla Herpes simplex virüsü, sitomegalovirüsler ve insan immün yetmezlik virüsü'ne (HIV) karşı etkili olduğu gösterilmiştir (van de Strate 2001; Rana 2012).

Lf çeşitli yollarla parazitlere karşı hareket eder. *Toxoplasma gondii* ve *Eimeria stiedai* sporozoitlerinin enfektivitesi, laktoferrinin B'nin inkübasyonundan sonra azaldığı kanıtlanmıştır (Rana 2012). Kona-



kçı hücreler üzerindeki demir bağlama yeteneğinden ziyade, laktoferrinin asidik moleküllere bağlanma eğiliminin bir sonucu olarak hücre-virüs etkileşimlerinin bloke etmesiyle sağlamaktadır. Örneğin, hem laktoferrin hem de laktoferrisin, sitomegalovirüsün fibroblastlara girişini bloke ederken, parçalanmamış proteini, hepatit C'yi inhibe eder, bu da virüs nötralizasyonu ile elde edilir (Brock 2002). İnsanlarda HIV virüsü önemli bir tıbbi sorun olmakla birlikte kesinleşmiş tedavi yönteminin olmaması halen büyük bir sorundur. Çünkü, neden olduğu sendromun güncel tedavileri tamamen etkili değildir. *İn vitro* çalışmalar insan plazma ve süt proteinleri arasında Lfnin HIV'e karşı güçlü bir aktivite gösterdiğini kanıtlanmıştır. Bu etki, konak hücrede viral replikasyonun engellenmesinden kaynaklanmaktadır (García-Montoya ve ark. 2012).

### ***Antifungal etkisi***

*Candida*, bireylerde mukozal yüzeyleri kolonize edebilir ve aynı zamanda fırsatçı bir patojene dönüşebilen bir komünal organizmaya benzerlik gösterir. İlk defa 1971' de *Candida spp.* ile yapılan bir çalışmada, Lfnin antifungal etkisini keşfedilmiş ve bunun demir bağlama yeteneğinden dolayı olduğunu belirtmiştir (Kirkpatrick ve ark. 1971).

İnsan Lf, sığır Lfni ve sığır Lf'den üretilmiş laktoferrisin peptidi, *Candida albicans* ve diğer bazı *Candida* türlerine karşı *in vitro* çalışmalarla antifungal etkisi kanıtlanmıştır. Lfnin hem *C. albicans* hem de *C. krusei*'nin hücre yüzey geçirgenliğini değiştirerek bakterilerde olduğu gibi gelişimlerinin inhibe ettiği gözlemlenmiştir (Wakabayashi ve ark 1996; Giansanti ve ark. 2013). Ayrıca yapılan çalışmalar sığır Lfnin, *C. glabrata*'nın Lf'ye neredeyse dirençli olduğu gösterilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada, Lf demir bağlama özelliğinin *Aspergillus fumigatus*'a karşı konağın savunması için önemli olduğunu göstermiştir. Ayrıca Lf, *Trichophyton mentagrophytes*'in neden olduğu deri lezyonlarının klinik iyileşmesini kolaylaştıran bir antifungal etki göstermiştir (Zarembler ve ark. 2007).

### ***Antiparazit etkisi***

Lfnin antiparazit aktivitelerinin açıkça ortaya koymak, Lfnin etki mekanizması ve mikroorganizmaların ekolojik davranışlarının organizmalarda farklılıklar göstermesi nedeniyle kolay olmamıştır. Yapılan sayısız çalışmaya rağmen hala açıklanması gereken birçok durum mevcuttur. Lf antiparaziter aktivitesinin moleküler mekanizmaları

daha da karmaşıktır. Lf'nin antiparaziter aktivitesi bazı parazitlerde (*Pneumocystis carinii*) demir alımına müdahale ettiği (Cirioni ve ark. 2000), bazı parazitlerde (*Tritrichomonas fetus*) ise spesifik bir demir vericisi olarak görev yaptığı görülmüştür (Tachezy ve ark. 1996). Lf, doğrudan plazmodial circum sporozoit proteinine bağlanan *Plazmodyum berghe*'nin büyümesini inhibe edebildiği (Shakibaei ve Frevert 1996) bildirilmiştir. Yapılan çalışmada, 5 yaşından küçük çocuklarda ishalin önde gelen nedenlerinden biri olan Entamoeba histolytica'ya karşı, Apo-Lf, *in vitro* ortamda en büyük amibisidal etkiye sahip süt proteini olduğu bildirilmiştir. Apo-Lf trofozoit membranındaki lipidlere bağlanarak parazitin gelişmesini inhibe eder (León-Sicaivos ve ark. 2006).

Diğer *in vitro* çalışmalar, insan ve sığır Lf'nin yanı sıra serum transferrin'in de toksoplazmoza neden olan hem insanları hem de hayvanları etkileyen hücre içi parazit olan *Toxoplasma gondii*'yi bağlayarak hücre içi büyümesini engellediğini kanıtlamışlardır (García-Montoya ve ark. 2012).

### ***İnflamatuvar ve immün sistem üzerine etkisi***

Laktoferrinin bakteriyel enfeksiyonlarda enflamatuvar yanıtların ana araçlarından biri olan bakteriyel endotoksine (lipopolisakkarit, LPS) bağlanabildiği çalışmalarla bildirilmiştir. Bu durumda LPS'nin reseptörler ile etkileşimi bozulur ve inflamatuvar etkileri azalır. Laktoferrinin bir başka anti-enflamatuvar etkisi, romatoid eklemler gibi iltihaplı hastalıklarda serbest demirin ayrılmasıyla, zararlı serbest radikallerin üretimini engelleme mekanizmasıdır. Sistemik bağışıklığın indüklenmesine ek olarak, Lf cilt bağışıklığını artırabilir ve alerjik tepkileri önleyebilir. Böylece Lf, Langerhans (beyaz kan hücresi) hücrelerinin göçünü inhibe ederek deri inflamasyonunu azaltmış olur. Lf bu anti-enflamatuvar etkileri, nötrofillerden laktoferrinin salınmasını başlatığı içine, inflamasyondaki nötrofillerin rolünün neden önemli olduğunun kanıtı olabilir (Brock 2002, Baker ve Baker 2005). Lf'nin pozitif yükü, bağışıklık sisteminin çeşitli hücrelerinin yüzeyindeki negatif yüklü moleküllere bağlanmasını sağlar ve bu ilişkinin, aktivasyon, farklılaşma ve çoğalma gibi hücrel tepkilere yol açan sinyal yollarını tetikleyebileceği de öne sürülmüştür (Brock 2002, Baker ve Baker 2005). Laktoferrin seviyesi, artrit, inflamatuvar bağırsak hastalığı, ülseratif kolit ve periodontitis gibi enflamatuvar hastalıklarda sürekli olarak yükseldiği bildirilmiştir (Fine 2015).

Hayvan deneylerinde, laktoferrinin koruyucu bir moleküldür. Deney farelerindeki oral mikrobiyal patojenlerin sebep olduğu enflamasyonlu hastalığı Lf takviyesi ile iyileştirebildiğini göstermişlerdir (Velusamy ve ark. 2013). Ayrıca, laktoferrin, *S. aureus*'u öldürerek ve enflamatuvar etkilerini modüle ederek ve bundan kaynaklı eklem inflamasyonunu azaltabilmiştir (Guillen ve ark. 2000).

### ***Antitümör etkisi***

Lfnin anti-tümör özellikleri ilk olarak sığır laktoferrinin kemirgenlere oral yoldan verildiğinde kimyasal olarak indüklenen tümörjenezini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Hoedt ve ark. 2010). Bu durum Lf bir takviye olarak alındığında kanseri önleme düşüncesini akıllara getirmiştir. İnflamasyondaki rolüne benzer şekilde Lf, kanserde sitokin (antikarsinojenik etki) üretimini modüle etme yeteneğine sahiptir. Son zamanlarda, hayvan modellerinde kolorektal kanser sığır Lf tarafından inhibe edildiği ve bir klinik çalışma ile kolon kanser riskini azalttığı gösterilmiştir (Nakajima ve ark. 2011). Meme kanserinde Lfnin, kültür ortamına ekzojen eklenmesi ile tümör hücrelerinin büyümesini sınırlandırabilir ve G1/S geçişinde göğüs kanseri hücre dizilerinin (MDA-MB-231) hücre döngüsünün durdurduğu çalışmalarca kanıtlanmıştır (Damiens ve ark. 1999). Oral olarak uygulanan holo-bLf, doza bağımlı olarak, kemoterapi ile birlikte önemli ölçüde daha yüksek kanser hücresi ölümü (apoptoz) ve farelerde sitotoksositeye yol açan meme kanseri tedavisinde kullanılan ilaçların kemoterapötik etkilerini geliştirdiği deneylerle gösterilmiştir (Sun ve ark. 2012). Kanser tedavisinde bu proteinin kullanımını içeren klinik deneyler devam etmektedir ve bilinen antikanser ilaçlarla karşılaştırıldığında Lf ve türevlerinin nispeten düşük sitotoksitesi, etki mekanizmaları hakkında veri eksikliği ile birlikte muhtemelen kanser tedavisinde klinik kullanımın teşvik edilmesine yol açmaktadır (Giansanti ve ark. 2016).

### **4. Sonuç**

Laktoferrin başta süt olmak üzere, göz yaşı, safra ve tükürük gibi mukozal sekresyonda bulunan demir bağlayıcı bir glikoproteindir. Lfnin uzun zamandan beri yapılan *in vitro* ve *in vivo* çalışmalarında, çeşitli koruyucu aktivitelere sahip olduğu ortaya konmuştur. En yararlı aktivite, antimikrobiyal, antienflamatuvar ve antikanser özellikleri ile

ilgili aktiviteler olarak belirtilmiştir. Lf bir gıda bileşeni olduğundan, enfeksiyonları önlemek için ilaç taşıyıcısı olarak kullanımını mümkün kılar. Bebeklerde ve yetişkinlerde spesifik immün sistemi gelişiminde önem taşımaktadır. Lf'nin probiyotik etkisinin bulunması ve herhangi bir toksik etkisinin olmaması, Lf'nin fonksiyonel önemliliğini artırmaktadır. Bundan dolayı destekleyici besin takviyesi, fonksiyonel gıda katkısı ve gıda doğal biyokoruyucu olarak kullanılabilme olanağı oldukça yüksektir.

## 5. Kaynaklar

- Arnold, R. R., Cole, M. F. & McGhee, J. R. (1977). A bactericidal effect for human lactoferrin. *Science Washington, D.C.* 197:263–265.
- Baker, E. N. & Baker, H. M. (2005). Lactoferrin molecular structure, binding properties and dynamics of lactoferrin. *Cell Mol. Life Sci.* 62 2531–2539.
- Billakanti, J. (2009). Extraction Of High Value Minor Proteins From Milk. Doktora Tezi, Canterbury University, New Zealand.
- Brock, J. H. (2002). The physiology of lactoferrin. Mini review United Kingdom *Biochem. Cell Biol.* Vol. 80.
- Chaneton, L., Bontá, M., Pol, M., Tirante, L. & Bussmann, L. E. (2013). Milk lactoferrin in heifers: Influence of health status and stage of lactation. *J. Dairy Sci.* 96, 4977-4982.
- Cirioni, O., Giacometti, A., Barchiesi, F. & Scalise, G. (2000). Inhibition of growth of *Pneumocystis carinii* by lactoferrins alone and in combination with pyrimethamine, clarithromycin and minocycline. *J. Antimicrob. Chemother.* 46, 577–582.
- Damiens, E., Yazidi, I., Mazurier, J., Duthile, I., Spik, G. & Boilly-Marer, Y. (1999). Lactoferrin inhibits G1 cyclin-dependent kinases during growth arrest of human breast carcinoma cells, *J. Cell. Biochem.* 74 (3) 486–498.
- Dial, E. J. & Lichtenberger, L. M. (2002). Effect of lactoferrin on *Helicobacter felis* induced gastritis. *Biochem. Cell Biol.* 80:113–117.
- Farnaud, S. & Evans, R. (2003). Lactoferrin-A Multifunctional Protein with Antimicrobial Properties. *Molecular Immunology* 40: 395–405.
- Fine, D. H. (2015). Lactoferrin: A Roadmap to the Borderland between Caries and Periodontal Disease. *Journal of Dental Research*, Vol. 94(6) 768–776.
- Galfi, A. L., Radnović, M. Z., Boboš, S. M., Pajić, M. J., Savić, S. S. & Milanov, D. S. (2016). Lactoferrin concentrations in bovine milk during involution of the mammary glands with different bacteriological findings. *Vet. arhiv* 86, 487-497.
- García-Montoya, I. A., Cendón, T. S., Arévalo-Gallegos, S. & Rascón-Cruz, Q. (2012). Lactoferrin a multiple bioactive protein. *Biochimica et Biophysica Acta* 1820 226–236.
- Giansanti, F., Leboffe, L. & D’Elia, I. (2013). Antonini, G. An update on the antifungal activities of lactoferrin: New promising applications in diagnostic, therapeutics and biotechnology. *Anti-Infect. Agents II*, 155–158.

- Giansanti, F., Panella, G., Leboffe, L., & Antonini, G. (2016). Lactoferrin from Milk: Nutraceutical and Pharmacological Properties. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*, 9(4), 61.
- Gonzalez-Chavezi S., Arevalo-Gallegos, S. & Rascon-Cruz, Q. (2009). ‘Lactoferrin: Structure, Function and Applications’’, *International Journal of Antimicrobial Agents* 33(4) 301.e1–301.e8.
- Groves, M. L. (1960). The isolation of a red protein from milk. *J. Am. Chem. Soc.*82:3345–3350.
- Guillen, C., McInnes, I. B., Vaughan, D., Speekenbrink, A.B. & Brock, J. H. (2000). The effects of local administration of lactoferrin on inflammation in murine autoimmune and infectious arthritis. *Arthritis Rheum.* 43(9): 2073–2080.
- Hagiwara, S., Kawai, K., Anri, A. & Nagahata, H. (2003). Lactoferrin Concentration In Milk From Normal And Subclinical Mastitic Cows. *J. Vet. Med. Sci.* 65, 319-323.
- Hoedt, E., Hardivillé, S., Mariller, C., Ellass, E., Perraudin, J.P. & Pierce A.(2010). Discrimination and evaluation of lactoferrin and delta-lactoferrin gene expression levels in cancer cells and under inflammatory stimuli using TaqMan real-time PCR. *Biometals.* 2010;23:441–452.
- Kirkpatrick, C. H., Green, I., Rich, R. R. & Schadeet, L. A. (1971). Inhibition of growth of *Candida albicans* by iron-unsaturated lactoferrin: relation to host-defense mechanisms in chronic mucocutaneous candidiasis, *J. Infect. Dis.* 124 539–544.
- Komine, K., Komine, Y., Kuroishi, T., Kobayashi, J., Obara, Y. & Kumagai, K. (2005). Small molecule lactoferrin with an inflammatory effect but no apparent antibacterial activity in mastitic mammary gland secretion. *J. Vet. Med. Sci.* 67, 667-677.
- Komine, Y., Komine, K., Kenzou, K., Itagaki, M., Kuroishi, T., Aso, H., Obara, Y. & Kumagai, K. (2006). Effect of combination therapy with lactoferrin and antibiotics against staphylococcal mastitis on drying cows. *J. Vet. Med. Sci.* 68:205–211.
- Król, J., Brodziak, A., Litwińczuk, Z. & Barłowska, J. (2011). Selected Factors Determining the Content of Lactoferrin, Lysozyme and Immunoglobulins G in Bovine Milk. *University of Life Sciences in Lublin*,
- Kruzel, M. L., Actor, J. K., Zimecki, M., Wise, J., Płoszaj, P., Mirza, S., Kruzel, M., Hwang, S., Ba, X. & Boldogh, I. (2013). Novel recombinant human lactoferrin: Differential activation of oxidative stress related gene expression. *Journal of Biotechnology*,168,(4) 666-675.

- Kutila, T., Suojala, L., Lehtolainen, T., Saloniemi, H., Kaartinen, L., Tahti, M., Seppala, K. & Pyorala, S. (2004). The efficacy of bovine lactoferrin in the treatment of cows with experimentally induced *Escherichia coli* mastitis. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*. Vol. 27. P. 197–202.
- Legrand, D. & Mazurier, J. (2010). A critical review of the roles of host lactoferrin in immunity. *Biometals*, 23: 365-376.
- León-Sicairos, N., López Soto, L., Reyes-López, M., Godinez, D., Ordaz-Pichardo, C. & Garza, M. (2006). Amoebicidal Activity of Milk, Apolactoferrin, sIgA and Lysozyme. *Clinical medicine & research*. 4. 106-13. 10.3121/cm.4.2.106.
- Levy, P. & Viljoen, M. (1995). Lactoferrin: A General Review. *Haematological* 80: 252-267.
- Ling, J. M. & Schryvers, A. B. (2006). Perspectives on interactions between lactoferrin and bacteria. Department of Microbiology and Infectious Diseases, 274 Heritage Medical Research Building, Faculty of Medicine, University of Calgary, 3330 Hospital Dr. N.W, Calgary, AB T2N 4N1, Canada. *Biochem. Cell Biol.* 84: 275–281.
- Madureira, A. R., Pereira, C. I., Gomes, A. M. P., Pintado, M. E., & Xavier Malcata, F. (2007). Bovine whey proteins - Overview on their main biological properties. *Food Research International*. 40. 1197-1211.
- Mayeur, S., Spahis, S., Pouliot, Y. & Levy, E. (2016). Lactoferrin, a pleiotropic protein in health and disease Antioxidants and Redox Signaling, 24 (14) 813-836.
- Nakajima, K., Kanno, Y., Nakamura, M., Gao, X. D., Kawamura, A., Itoh, F. & Ishisaki, A. (2011). Bovine milk lactoferrin induces synthesis of the angiogenic factors VEGF and FGF2 in osteoblasts via the p44/p42 MAP kinase pathway. *BioMetals* 24 (5) 847-856.
- Nguyen, D. N., Jiang, P., Stensballe, A., Bendixen, E., Sangild, P. T. & Chatterton, D. E. W. (2016). Bovine lactoferrin regulates cell survival, apoptosis and inflammation in intestinal epithelial cells and preterm pig intestine. *Journal of Proteomics*, 139, 95–102.
- Petitclerc, D., Lauzon, K., Cochu, A., Ster, C., Diarra, M. S. & Lacasse, P. (2007). Efficacy of a lactoferrin-penicillin combination to treat  $\beta$ -lactam-resistant *Staphylococcus aureus* mastitis. *J. Dairy Sci.* 90 (6) 2778–2787.
- Rachman, A., B., Maheswari, R. R. & Bachroem, M. S. (2015). Composition and isolation of lactoferrin from colostrum and milk of various goat breeds. *Procedia Food Science*, 3:200-210.

- Rana, S., Sharma, S. & Singh, R. (2012). Iron binding and receptor: Lactoferrin and tonb receptors International Journal of Biomedical Research 3-07.
- Sachdeva, A., Rawat, S. & Nagpal, J. (2014). Efficacy of fermented milk and whey proteins in *Helicobacter pylori* eradication: a review. World J Gastroenterol, 20: 724–37.
- Shakibaei, M. & Frevert, U. (1996). Dual interaction of the malaria circumsporozoite protein with the low density lipoprotein receptor-related protein (LRP) and heparan sulfate proteoglycans. *J. Exp. Med.* 184, 1699–1711.
- Shimazaki, K. & Kawai, K. (2017). Advances in lactoferrin research concerning bovine mastitis. *Biochemistry and Cell Biology.* 95 (1): 69-75.
- Sørensen, M. & Sørensen, S. P. L. (1940). The proteins in whey. *Comptes Rendus des Travaux du Laboratoire Carlsberg, Ser. Chimique.* 23 (7) 55-99. 1938-41.
- Soyeurt, H., Bastin, C., Colinet, F. G., Arnould, V. M. R., Berry, D. P., Wall, E., Dehareng, F., Nguyen, H. N., Dardenne, P., Schefers, J., Vandenplas, J., Weigel, K., Coffey, M., Theron, L., Detilleux, J., Reding, E., Gengler, N. & McParland, S. (2012). Mid-infrared prediction of lactoferrin content in bovine milk: potential indicator of mastitis. *Animal*, 6(11) 1830–1838.
- Steijns, J. M. & van Hooijdonk, A. C. M. (2000). Occurrence, structure, biochemical properties and technological characteristics of lactoferrin. *British Journal of Nutrition*, 84, Spp. 1, S11-S17.
- Stelwagen, K., Carpenter, E., Haigh, B., Hodgkinson, A. & Wheeler, T. T. (2014). Immune components of bovine colostrum and milk. *American Society of Animal Science.* 1:3–9.
- Sun, X., Jiang, R., Przepiorski, A., Reddy, S., Palmano, K. P., & Krissansen, G. W. (2012). "Iron-saturated" bovine lactoferrin improves the chemotherapeutic effects of tamoxifen in the treatment of basal-like breast cancer in mice. *BMC cancer*, 12, 591.
- Szwajkowska, M., Wolanciuk, A., Barłowska, J., Król, J. & Litwinczuk, Z. (2011). Bovine milk proteins as the source of bioactive peptides influencing the consumers' immune system. *Anim. Sci. Pap. Rep.* 29, 269–280.
- Tachezy, J., Kulda, J., Bahnikova, I., Suchan, P., Razga, J. & Schrevel, J. (1996). *Tritrichomonas foetus*: Iron acquisition from lactoferrin and transferrin. *Exp. Parasitol.* 83, 216–228.
- Tsuda, H., Kozu, T., Iinuma, G., Ohashi, Y., Saito, Y., Saito, D., Akasu, T., Alexander, D. B., Futakuchi, M., Fukamachi, K., Xu, J., Kakizoe, T. & Iigo, M. (2010). Cancer prevention by bovine lactoferrin: From animal studies to human trial. *BioMetals*, 23 (3), 399-409.



- van de Strate, B. W., Beljaars, L., Molema, G., Harmsen, M. C. & Meijer, D. K. (2001). Antiviral activities of lactoferrin *Antiviral Res. Dec;52(3):225-39.*
- Vasavada, P. & Cousin, M. (2005). *Dairy Science and Technology Handbook*, Edited by: Hui YH, Volumes 13. John Wiley & Sons, 978-1-56081-078-0.
- Velusamy, S. K., Ganeshnarayan, K., Markowitz, K., Schreiner, H., Furgang, D., Fine, D. H. & Velliyagounder, K. (2013). Lactoferrin knockout mice demonstrates greater susceptibility to *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*-induced periodontal disease. *Journal of Periodontology*, 84: 1690-1701. 84(11):1690–1701.
- Wakabayashi, H., Abe, S., Okutomi, T., Tansho, S., Kawase, K. & Yamaguchi, H. (1996). Cooperative anti-candida effects of lactoferrin or its peptides in combination with azole antifungal agent. *Microbiol. Immunol.* 40 821–825.
- Wheeler, T. T., Hodgkinson, A. J., Prosser, C. G. & Davis, S. R. (2007). Immune components of colostrum and milk - A historical perspective. *J. Mammary Gland Biol. Neoplasia* 12:237–247.
- Yılmaz, B. & Tosun, H. (2012). Sütte bulunan doğal antimikrobiyal sistemler ve bunların gıda sanayinde kullanımı. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*;8(1):11-20.
- Zarembek, K. A., Sugui, J. A., Chang, Y. C., Kwon-Chung, K. J & Gallin, J. I. (2007). Human polymorphonuclear leukocytes inhibit *Aspergillus fumigatus* conidial growth by lactoferrin-mediated iron depletion. *J. Immunol.* 178 6367–6373.



**ÇEVRESEL  
ETKİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK  
AÇISINDAN  
ALİŞVERİŞ MERKEZLERİ**

**BÖLÜM  
8**

**Kazım Onur  
DEMİRARSLAN<sup>1</sup>  
Deniz DEMİRARSLAN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye, onurdemirarslan@artvin.edu.tr

<sup>2</sup> Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İç Mimarlık Bölümü, Kocaeli, Türkiye, denizd@kocaeli.edu.tr



## GİRİŞ

Tüketim olgusunun toplumlarda yaygınlaşması, küreselleşme, teknoloji, taşımacılık ve iletişim gibi alanlardaki gelişmeler ile birlikte ticaret günümüzdeki şeklini almıştır (Demirarslan, 2017:1). Toplumsal yaşamda, örgütlenmenin ve üretim araçlarının gelişmesi oranında ticaret de gelişim göstermektedir. Ticaret eyleminin gerçekleştirilebilmesi için tarih boyunca insanlar açık, yarı açık ya da kapalı çeşitli mekânlar oluşturmuşlardır. Tarih boyunca çeşitli kültürlerde farklılıklar arz eden alışveriş mekânları görülmekle birlikte bunların tipolojik açıdan sınıflandırıldığı da görülmektedir (Demirarslan, 2019: 83). Ticaret mekânları tipolojisi hakkında bir sınıflandırma yapıldığında;

- Çarşı Yapıları: Hanlar, arastalar, bedestenler, Kapalıçarşılar, pasajlar.
- Zaman İçinde Oluşan Çarşılar: Pazarlar, yaya yolları üzerinde gelişen alışveriş, taşıt yolu boyunca alışveriş (dükkanlı yollar).
- Modern Alışveriş Mekânları: Büyük mağazalar, süpermarketler, hipermarketler, alışveriş merkezleri şeklinde ticaret mekânlarının türlere ayrıldığını görmekteyiz (Şahin, 2012: 2880).



*Resim 1. Tarihsel süreçte alışveriş mekânları.*

Alışveriş yapılan bu mekânların hepsi şehir için önemli bir mekânsal öge ve kamusal alandır. Bu kamusal alanın kullanımı ise toplumun tüm kesimlerine açıktır. Bu mekân sadece ticaret eyleminin gerçekleştiği ekonominin ağırlıklı olduğu bir mekân değil; aynı zamanda sosyo-kültürel ve yaşamsal faaliyetlerin gerçekleştiği bir mekân oluşumudur.

Günümüzde modern alışveriş mekânlarının bir çatı altında ya da bir yerleşke halinde büyük yapı kompleksleri olarak yapıldığı ve hizmet verdiği görülmekte ve bu tip mekânlar ‘Alışveriş Merkezi’ olarak tanımlanmaktadır. Alışveriş merkezleri departmanlı mağazalar ve küçük, büyüklü perakendeciler ile birlikte kafeterya, restoran, eğlence merkezi, sinema, sergi salonu, banka, eczane vb. işletmeleri de bünyesinde bulunduran, satış alanı 5.000 m<sup>2</sup>’den başlayıp 80.000m<sup>2</sup>’ye kadar değişebilen ve tek bir merkezden yönetilen alışveriş mekânlarıdır (Alkibay, 1994: 22). Alışveriş merkezleri gibi yapılar, bünyelerinde mevcut olan en temel yaşamsal faaliyetlerden biri olan ticareti bünyelerinde bulundurdukları için yeni kamusal alanlar haline gelmişlerdir. Bu nedenle, yoğun trafikten ve gündelik hayatın tek düzeliğinden bunalan insanlar için bir alternatif mekân haline gelmişlerdir. Alışveriş merkezleri sadece ticari etkinliklere ev sahipliği yapmanın ötesinde kullanıcılara, kapalı ve güvenli bir yaya ortamı sunarak, ticari faaliyetlerin yanında sosyal ve kültürel faaliyetleri de içlerinde barındırmaktadır (Ögel, 2014: 13).

Özetle alışveriş merkezi; içerisinde otopark imkânı olan, tek bir mülk olarak planlanan, geliştirilen, sahiplenilen ve yönetilen bir grup perakendeci ve diğer ticari kuruluşlardan oluşmaktadır. Alışveriş merkezinin büyüklüğü ve yönelimi genellikle o çevredeki ticarî hayatın pazar karakteristikleri tarafından belirlenmektedir (Çakmak, 2012: 196). 1970’li yıllarda dönemin en önemli gelişmelerinden biri alışveriş merkezlerinin yalnız giysi satan yerler olmaktan çıkıp, çeşitli ürün grupları satan mağazaların yanında, sinema, yemek ve diğer eğlence faaliyetlerini de içeren bir yapıda gelişmesini sürdürmesi olmuştur (Demirarslan, 2019: 89). Gittikçe tüm dünyada yaygınlaşan alışveriş merkezi endüstrisi 1980’li yıllarda olgunluk dönemine erişmiştir (Cengiz ve Özden, 2002: 5). Günümüzde her geçen gün sayıları artan alışveriş merkezlerinin dünyada en fazla olduğu ülke %60’lık oran ile Çin’dir. Güney Kore, Malezya, Singapur ve Filipinler de çok sayıda alışveriş merkezlerine ev sahipliği yapmaktadır. En büyük alışveriş merkezi de 1986’dan bu yana faaliyette olan ve dünyanın en büyük alışveriş merkezi olarak Guinness Rekorlar Kitabı’na giren Kanada Edmonton, Alberta’daki West Edmonton Mall’dır (URL-1) (Resim-2). 2018 verilerine göre Türkiye’deki alışveriş merkezi sayısı da 396 olarak belirtilmiştir. Alışveriş merkezi yapımı ve kullanımı açısından dünyada önemli bir

konuma gelen Türkiye’de en fazla alışveriş merkezi İstanbul’da bulunmaktadır (URL-2).



*Resim 2. Kanada Edmonton, Alberta West Edmonton Mall (URL-3).*

Mimari ve ticari açıdan gelişen ve her biri başlı başına birer kompleks yapılar bütünü haline dönüşen alışveriş merkezleri küreselleşmenin de etkisiyle dünyanın hemen her yerinde bazı ortak özelliklere sahiptir. Alışveriş merkezleri, giyim, ayakkabı, kuru temizleme, yeme-içme, sigara, kozmetik, aksesuar, süpermarket, elektronik mağazaları gibi çeşitli perakende dükkânlarını ve büyük mağazaları bir arada barındırmaktadır. Bu perakende birimleri alışveriş merkezlerinin çeşitli katlarında, satış birimleri, rekreasyon alanları ve yeme-içme eylemleri şeklinde gruplandırılmaktadır. Büyük alışveriş merkezlerinde ofis katları ve hatta konut, otel gibi barınma-konaklama birimleri, hastane gibi sağlık birimleri de yer almaktadır.

Alışveriş merkezlerinin bu özellikleri tasarımı etkileyen ve tüketiciyi kendine çekme politikasının benimsendiği niteliktedir. Mimari yapı, zincir mağazalar, ulaşım kolaylığı, otopark imkânını sunmak, şık ve kullanışlı bir dekorasyon, tasarım ve satış kimliğinin oluşturulması, rekreasyon alanlarının düzenlenmesi, açık ve kapalı mekânların oluşturularak çeşitli eylemler için hizmete sunulması gibi olanaklar tüm dünyada görülen özelliklerdir. Uluslararası Alışveriş Merkezleri Konseyi tarafından küresel olarak bu özellikler belirlenmektedir (International Council of Shopping Centers (ICSC)) (URL-4).

Çok sayıda faaliyetin çoğunlukla kapalı mekânlarda gerçekleştirilmesi ve çok sayıda insana hizmet verilmesi ile birlikte çevre kirliliği açısından bazı sorunlar da ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlara ‘çevresel etki’ adı verilmektedir. Çevresel etkiler doğrudan veya dolaylı, olumlu veya

olumsuz olabilir. Bu etkiler kısa, orta, uzun vadede, sinerjistik, katalitik, kümülatif olarak ortaya çıkabilir. Çevresel Etki Değerlendirmesinde bu etkilerin derecesinin ölçülmesinde kullanılan kıstas, ‘önemli’ olup olmadıklarıdır. Etkinin ‘önemli’ olup olmadığı iki ögeye bağlıdır; bunlar, Çevresel Etki Değerlendirmesine konu faaliyetin ve çevrenin özellikleridir (Özer, 1996: 70). Alışveriş merkezlerinin çevre etkilerini sorgulayan bilimsel yayınlar giderek artmaktadır. Birçok gelişmiş ülke yeni açılan alışveriş merkezleri için Çevresel Etki Değerlendirmesini yasal olarak zorunlu hale getirmeye başlamıştır. Türkiye’de de alışveriş merkezlerinin çevresel etkilerinin tespiti konusunda resmi çalışmalar yapılmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017). Ancak, henüz alışveriş merkezlerinin çevre kirliliği açısından olumlu ve olumsuz yönlerini ortaya koyan çalışmalar sayıca azdır. Bu çalışmanın amacı kamusal bir mekân olan alışveriş merkezlerinin gerek iç mekânları gerekse de dış mekânları ve çevre ile olan ilişkileri dikkate alınarak çevre kirliliği açısından olumlu ve olumsuz yönlerinin belirlenmesi ve gelecekte yapılacak alışveriş mekânlarının tasarımı için bir kaynak teşkil etmesidir. Çalışma yöntemi olarak literatür çalışması yapılmış; alışveriş merkezlerinin çevresel etkileri ulusal ve uluslararası düzeyde araştırılmış, çalışmanın giriş bölümünde alışveriş mekânı ve alışveriş merkezi kavramları açıklanmış, alışveriş merkezlerindeki çevre etkilerini oluşturan ana başlıklar belirlenerek örnekler ile açıklanmış ve alışveriş merkezlerinin çevresel etki açısından olumlu ve olumsuz yönleri belirlenmiş, alışveriş merkezlerinde sürdürülebilirlik ve çevresel etki ilişkisine değinilmiştir.

## **1. ALIŞVERİŞ MERKEZLERİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ**

Temiz bir çevre insan sağlığı ve refahı için temel niteliktedir. Çeşitli kaynaklardan çıkan radyoaktif, katı, sıvı ve gaz halindeki kirletici maddelerin hava, su ve toprakta yüksek oranda birikmesi çevre kirliliği oluşmasına neden olmaktadır. Gelişen teknolojinin yaşamımıza getirdiği konfor yanında, bu gelişmenin doğaya ve çevreye verdiği kirliliğin boyutu her geçen gün hızla artmaktadır. Çevre kirliliğine neden olan yapıların başında sanayi yapıları gelmekle birlikte günümüzde alışveriş merkezleri de sessiz bir şekilde çevre kirliliğine neden olan yapılar arasında yer almaktadır. Ayrıca bu binalar olumsuz ve olumlu yönde çevresel etkiye neden olmaktadır. Alışveriş merkezleri Çevresel Etki



Değerlendirme Yönetmeliği'nin Ek-II Listesinin 39. Maddesine göre 10.000m<sup>2</sup> ve üzeri kapalı inşaat alanı olarak tanımlanmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017). Bir alışveriş merkezinde oluşan çevresel etkiler; İnşaat sürecindeki çevresel etkiler, Kullanım sürecindeki çevresel etkiler ve Kullanım dışı olma sürecindeki çevresel etkiler olarak üç ana başlık altında incelenebilir (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### **1.1. İnşaat sürecindeki çevresel etkiler**

İnşaat sürecinde ortaya çıkan çevresel etkiler bu grupta incelenmektedir: Gürültü ve titreşim, hava kirliliği, atık, atıksu, toprak, flora ve fauna, ekosistemler, korunan alanlar.

#### **1.1.1. İnşaat sürecinde ortaya çıkan gürültü ve titreşim**

Bina inşaatında ve toprak hafriyatı ile kazı faaliyetlerinde kullanılan makinelerden kaynaklı gürültü çevreyi etkilemektedir. İnşaat sürecinde özellikle nakliye araçlarının trafiğinden kaynaklı gürültü çevreyi olumsuz etkilemektedir. Binanın ve yakın çevresinin inşaatında kullanılan makinelerden kaynaklı titreşim çevreyi olumsuz etkilemektedir (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).



*Resim 3. Kocaeli Symbol Alışveriş Merkezi temel inşaatından görünüm (URL-4).*

### 1.1.2. İnşaat sürecinde ortaya çıkan hava kirliliği

Saha kazı çalışmaları ve tozlu yüzeylerin rüzgâra maruz kalması ve/veya trafikten kaynaklı toz emisyonu hava kirliliğine neden olmakta ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. İnşaat makineleri ve trafikten kaynaklı kirletici madde emisyonu ( $\text{NO}_x$ , PM10 ile benzen) hava kirliliğine neden olmakta ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### 1.1.3. İnşaat sürecinde ortaya çıkan atıklar

Proje sahasında mevcut bina ve/veya yapıların yıkımı yapıldığı takdirde ortaya çıkan yıkım atıkları, hafriyat atığı, inşaat faaliyetleri sırasında meydana gelen tehlikesiz katı atıklar, inşaattan kaynaklı tehlikeli atıklar (atık yağlar, inşaat makinelerinde kullanılmış hidrolik sıvılar, kullanılmış yağ filtreleri, kirlenmiş temizlik malzemeleri vb.) olarak çevreyi etkilemektedir (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017). İnşaatların yapımı esnasında ve yıkımdan sonra ortaya çıkan atıklar, en ağır ve hacimli atıklar arasında yer almaktadır. Tüm katı atıkların içinde beton, tuğla, alçı, ahşap, cam, metaller, plastikler, asbest ve kazılmış toprak–hafriyat gibi maddelerin önemli bir yüzdeye sahip olduğu görülmektedir. Ancak aslında bu atıkların büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir. Ayrıca bu tip atıkların durumu için Türkiye’de Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği ilkeleri uygulanmaktadır (URL- 6).

### 1.1.4. Toprak

Ekilebilir araziler üzerinde alışveriş merkezi yapımı toprakta olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır. Sahada önceki faaliyetler sonucunda kontamine olmuş hafriyat toprağı, kaza veya makine arızası sonucu toprak kirliliği, saha temizliği, toprak atma ve hafriyat faaliyetleri esnasında yağmur ve rüzgâr nedeniyle toprak yüzeyinin erozyona uğraması gibi hususlar çevresel etkilere neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017). Toprak; gıda, yem, elyaf ve yakıt üretiminin %90’ının temelini oluşturması ve bahçe tarımından inşaat sektörüne kadar birçok faaliyet için hammadde sağlaması açısından büyük önem arz etmektedir. Toprak aynı zamanda eko-sistem sağlığı için de gereklidir. Suyu arındırır ve düzenler, besin maddeleri döngüsünün motor gücüdür. Genler ve türler için biyolojik çeşitliliği destekleyen bir

rezervuardır. Bir insan yaşamı süresi ele alındığında, toprak bu süre içerisinde yenilenemez bir kaynak olarak kabul edilebilir. Toplum olarak, sunduğu imkanlardan faydalanmak için toprağı sürdürülebilir biçimde yönetilmesi gerekmektedir (URL-7). Oysaki inşaat materyallerinin (beton, jips, asbest vb.) önemli miktarları eninde sonunda toprak suyuna karışmakta ve toprak sularının kimyasında değişikliğe neden olabilmektedirler. Ayrıca yol inşaatı sırasında kullanılan kimyasallar da toprak kirliliğine neden olmaktadır (Bridges, 1991: 28-46). Toprağına bağılı olan pek çok faaliyet olmasına rağmen, toprağına ilişkin belirli bir AB mevzuatı bulunmamakla birlikte (URL-7) Türkiye’de Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğı ilkeleri doğrultusunda inşaat sürecindeki toprak kirliliğinin kontrolü sağlanmaktadır.

### **1.1.5. Atıksu**

Şantiye tesisinden kaynaklı evsel atık sular, temel çukurlarında biriken kirlı su ve bu suyun tahliyesi çevresel etkiye neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### **1.1.6. Flora ve fauna, ekosistemler, korunan alanlar**

Flora ve fauna üzerindeki potansiyel etki (yerel duruma bağılı olarak), ekosistemler üzerindeki potansiyel etki (yerel duruma bağılı olarak), korunan alanlar üzerindeki potansiyel etki (yerel duruma bağılı olarak) çevresel etkiye neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

Alışveriş merkezleri kuruluş amaçları gereğı genellikle şehir çeperlerinde konumlandırıldıklarından en büyük etki, inşaat alanındaki habitat yapısı ve topografyasının bozulması ve inşa alanlarındaki doğal habitatların tümüyle ortadan kalkması olacaktır. Bunun dışında, gürültü, toz ve araç trafiğı gibi dolaylı etkiler de görülecektir. İnşaat faaliyetlerine çiçeklenme ve hayvanların üreme döneminde başlanmaması, inşaat faaliyetlerine başlanmadan önce arazideki mevcut bitkisel toprağın sıyrılarak depolanması sağlanmalı ve inşaat sonrası peyzaj alanlarına bu bitkisel toprağın yayılarak doğal bitki türlerine ait tohumların çimlenmesinin sağlanması, inşaat faaliyetleri süresince, kullanım dışı alanlara, inşaat-makine teçhizatlarının ve işçilerin sokulmasının engellenmesi gibi önlemler alınarak çevresel etkinin azaltılması söz konusudur.

## 1.2. Kullanım sürecindeki çevresel etkiler

Alışveriş merkezlerinin kullanım sürecindeki çevresel etkileri ise hava kirliliği, atık su, atık, diğer etkiler, enerji, su ve hammadde tüketimi alt başlıkları altında incelenmektedir.

### 1.2.1. Hava kirliliği

Alışveriş merkezlerinde hava kirliliği konusu toz ve gaz emisyonları olarak karşımıza çıkmaktadır. Toz emisyonları olarak fosil yakıtların (kömür, kok, kalorifer yakıtı vb.) yanmasından kaynaklı tozlar, gaz emisyonları ise; fosil yakıt kullanımından kaynaklı SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO gibi konvansiyonel kirleticiler sayılabilir. Trafik kaynaklı kirleticiler de benzen ve benzo(a)piren emisyonlarıdır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017). Alışveriş merkezlerine genellikle arabalarla erişildiğinden çalışma saatlerinde alışveriş merkezi çevresinde yoğun bir trafik oluşmaktadır. Tamamen taşıtlarla dolu devasa otoparklar da çevre kirliliğine neden olan bir diğer unsurdur. Yalnızca alışveriş merkezlerinin yakınında trafik önemli ölçüde artmakla kalmamakta, aynı zamanda egzoz gazı üretmekle birlikte bu gazlar atmosfere girip seyrelmekte olsa da, çalışmalar, alışveriş merkezi ve çevresindeki hava kalitesinin etkilenebileceğini göstermiştir. Ek olarak, araçlardan kaynaklı gürültü kirliliği yakındaki konutlar ve diğer mekânlar için önemli bir kirletici faktör olabilir.

Alışveriş merkezlerinin %30'unda havadaki toz oranı sınır değerinin üzerindedir. Bunun ana nedeni çevredeki ağır trafik ve kontrol dışı içilen sigara olarak belirlenmiştir. Kullanım alanlarında toz oranı ile gaz ve uçucu madde konsantrasyonlarının belirli oranların üzerinde olması insan sağlığı açısından zararlı sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle standartlara göre alışveriş merkezlerinin satış ünitelerinin bulunduğu birimlerde de CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun 0.15 % (1500 ppm), PM10 konsantrasyonunun 0.150 mg/m<sup>3</sup> ve HCHO konsantrasyonunun 0.12 mg/m<sup>3</sup>'den az olması gerekmektedir (Wen, Zhiwei vd., 2011: 268- 280).

### 1.2.2. Atıksu

Alışveriş merkezlerinde ziyaretçilerden ve çalışanlardan kaynaklı evsel atıksu oluşumu söz konusudur. Tuvalet mekânları ile restoran ve fast food işletmelerinin mutfak bölümlerinde özellikle ziyaretçilerden ve çalışanlardan kaynaklı evsel atıksu oluşumu görülmektedir. Günümüz alışveriş merkezlerinde atıksuların arıtılarak çevreyi kirletmeyecek

şekilde bertarafı, ya da arıtılarak peyzaj sulama, temizlik işlerinde yeniden kullanımı çalışmaları yapılmaktadır.

### 1.2.3. Atık

Alışveriş merkezlerinde ortaya çıkan atıklar şu şekildedir: Paketleme malzemesi atığı, restoran ve yeme-içme alanlarından kaynaklı ve tehlikeli de olabilen atıklar, tehlikeli atıklar da dâhil, alışveriş merkezinin bakımından kaynaklı atıklar, evsel katı atıklar. Hindistan'da yapılan bir araştırmada, genellikle alışveriş merkezlerinde ve çevresinde biriken plastik torbaların önemli bir kirlilik nedeni olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yemek katında fast food yemeklerde kullanılan plastik bardak, pipet, tabak, çatal-kaşık vb. donatıların bir kısmının plastik olması ve bir kullanımdan sonra atık haline dönüşmeleri önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ortaya çıkan bir diğer önemli katı atık da kâğıt ve kartondur. Yine fast food yemeklerde kullanılan karton bardak, tabak, peçete vb. donatılar ile tuvaletlerde tuvalet kâğıdı, kâğıt havlu vb. sarf malzemeleri, kâğıt reklam broşürleri, tanıtım katalogları gibi reklam ve iletişim sınıfına giren her türlü kâğıt nesne, alışveriş fişleri vb. katı atık konusunda önemli kaynaklardır. Tüm dünyada alışveriş merkezlerinde atıkların toplanması ayrıştırılması ve bertarafı konusunda çalışmalar görülmektedir. Alışveriş merkezlerinin belirli noktalarına atık toplama kutularının yerleştirilmesi, pil, bitkisel yağ gibi tehlikeli atıklar için bir toplama merkezi oluşturulması, atık yönetimi uzmanlarının görevlendirilmesi, alışveriş merkezi çalışanlarının bilgilendirilmesi gibi çalışmalar başlıcalarıdır. Türkiye'de ise son yollarda gündeme gelen Sıfır Atık Projesi kapsamında kamu binaları, eğitim binaları, hastaneler ile birlikte alışveriş merkezlerinin de sıfır atık kapsamında uygulamalar yapması öngörülmüştür. Sıfır Atık Sistemi'nde kaynakların verimli kullanılmasının yanı sıra atık oluşumunun kaçınılmaz olması durumunda atıkların kaynağında ayrı biriktirilmesi, geçici depolama alanına taşınması ve geçici depolanması sırasında risk oluşturmayacak, çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek yöntemlerin kullanılması, alışveriş merkezlerinde atık getirme merkezlerinin kurulması gibi hususlar yer almaktadır.

### 1.2.4. Diğer etkiler (iç mekân hava kalitesi, koku, ses, titreşim, elektromanyetik alan vb.)

Sabit kaynaklardan kaynaklı gürültü (havalandırma ekipmanları, soğutucular, vb.), trafikten kaynaklı gürültü, kullanım alanlarında insan

kaynaklı gürültü ile ayrıca çeşitli kaynaklardan oluşan kokular diğer etkileri oluşturmaktadır. Tuvaletler, bodrum katlar, garaj, restoran mutfakları veya yeme-içme alanı havalandırması düzgün çalıştığı takdirde, kokunun önemli bir etkisinin olduğu düşünülmemektedir. Bunun yanı sıra alışveriş merkezlerinden kaynaklı titreşim ve elektromanyetik alanların da önemli bir etkisinin olduğu düşünülmemektedir. Özellikle büyük yansıtıcı yüzeyler, ısı çeken malzeme ve iklimlendirme cihazlarının yoğun kullanımına bağlı olarak alışveriş merkezlerinde iklim üzerinde olumsuz etkisi olabileceği konusu da düşünülmektedir (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017). Kuru temizleme faaliyetlerinden kaynaklanan kirlilik de önemli bir çevresel etki unsurudur. Kuru temizleme alışveriş merkezlerinde kirliliği oluşturan ana faaliyetlerden biridir. Birçok alışveriş merkezinde kuru temizleme dükkânı bulunur. Ve kuru temizleme firmaları, genel olarak insanlar için toksik olan klorlu veya diğer organik çözücüler kullanmaktadırlar. Böylece, alışveriş merkezlerini bu tür toksik kimyasallarla kirleterek çevre bölgeleri de etkileyebilirler (Tang ve diğ., 2005: 7375)

Kirliliğe neden olan perakendeciler de alışveriş merkezleri için birer çevresel etki unsurudur. Bir alışveriş merkezindeki bazı işlemler çevre kirliliğine neden olabilir. Bu işlemler kimyasalları depolayan ve satan gibi bir dizi perakendeci tarafından gerçekleştirilmektedir. Alışveriş merkezlerinde ev ürünleri mağazaları ve yapı- marketler (boyalar, yapıştırıcılar, yakıt vb.) veya deri ürünleri satan mağazalar bunlara örnektir. Kimyasalların, özellikle organik çözücülerini içerenlerin bu şekilde depolanması ve taşınması, havada uçucu organik bileşikler (UOB) üretebilir ve bu şekilde, iç havayı kirletebilir. Bu gerçek, hem iç hem de dış hava örneklerinin UOB'ler tarafından kirlendiği tespit edilen Çin'deki alışveriş merkezleri ile ünlü Guangzhou şehrinde bir alışveriş merkezinde kanıtlanmıştır (Tang ve diğerleri, 2005). Tang ve diğerlerinin eserine göre (2005: 7374-7383) en yüksek hava kirliliğinin fast food katında ve bir deri ürünleri mağazasında olduğu tespit edilmiştir. UOB'ler için diğer iç mekân emisyon kaynakları (depolanan ürünler hariç) pişirme fırınları ve inşaat malzemeleridir. Klorlu hidrokarbonlar (çözücüler) ayrıca temizlik maddesi veya koku giderici olarak kullanılan çeşitli malzemelerden de kaynaklanabilir.

Dolayısıyla iç mekân hava kalitesi alışveriş merkezlerinde önemli bir konudur. Alışveriş merkezlerinin büyük ölçüde kapalı alanlardan

oluşması nedeniyle iç hava kalitesi önem kazanmaktadır. Alışveriş merkezlerinde müşteri ve çalışan olmak üzere iki tür kullanıcının bulunması, müşterilerin en fazla 3-4 saat iç mekânda vakit geçirdiği, çalışanların ise 8-10 saatlerini iç mekânda geçirdikleri dikkate alındığında bu konu üzerinde durulması gereken bir husustur. İç hava kalitesinden en fazla memnun ya da şikâyetçi olanlar çalışanlar olmakla beraber müşteriler de fiziksel ve psikolojik açıdan iç hava kalitesine bağlı olarak etkilenmektedir. Alışveriş merkezlerinde açık alanlarda iç mekân hava kalitesi mükemmel yakınsa sorun kapalı mekânlarda ortaya çıkmaktadır. Bu binalar çok işlevli mekânlardan oluştuğundan her bir mekân da işlevine uygun hava kalitesi özelliğine sahip olması gerektiğinden garaj, kapalı dolaşım alanları, atriumlar, kat holleri, sergi alanları, mağazalar, sinema salonları, fast-food katı gibi mekânların hepsi için ayrı ayrı iç mekân hava kalitesi konforunu sağlamaya yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

Alışveriş merkezlerinde yapılan hesaplamalarda (genellikle) karışımli santrallerde minimum dış hava oranı %40 civarında çıkmaktadır. Ancak ara mevsimlerde free cooling yapabilmek amacı ile sistemin % 100 dış hava ile çalıştırılması mümkün olmalıdır. Ancak yazın aşırı sıcaklarda veya kışın ısıtma ihtiyacı olan dış zonlarda enerji tasarrufu amacı ile minimum %40 dış hava koşulu dikkate alınmayarak, dış hava kapatılmakta ve % 100 iç hava ile çalışılmaktadır. Bu durum özellikle alışveriş merkezi çalışanlarında baş ağrısına neden olmaktadır. Alışveriş merkezleri ilk işletmeye açıldıklarında ya da mağazalar dekorasyon sonrası işletmeye açıldıklarında ortamda çok fazla inşaat tozu olması nedeni ile iklimlendirme santrallerinin ilk altı ay içinde filtrelerinin değiştirilmesi gerekir. Sistem rejime girdiğinde filtre değişimi yaklaşık 1,5 yılda bir olmaktadır. Bu değişim yapılmadığı takdirde hem basınç kaybının artması (hava miktarının düşmesi) hem de uygun filtreleme yapılamaması nedeni ile iç hava kalitesi olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca yemek katının havalandırma şaftları ile ayrıca havalandırılması gerekmektedir. Yetersiz havalandırmayla birlikte aşırı ızgara kullanımı iç havadaki CO<sub>2</sub>, CO ve parçacık seviyelerini artıran önemli etkenlerdir. Ortak alanlarda farklı yükseklikte tavan, korkuluk tipleri olması nedeni ile üfleme ve emiş menfezlerinin yerleri değişebilmektedir. Yüksek tavanlarda havayı yere indirebilmek için yüksek hızlar seçildiğinde bazen sert hava akımları ve ses olmaktadır. Tersine düşük hızlarda

iklimlendirilmiş hava yere inememekte ve doğru hava sirkülasyonu sağlanamamaktadır (Oral ve Arısoy, 2015: 181-192).

### 1.2.4 Enerji tüketimi

Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi için Teknik Yardım Projesi Kitapçık B70'e göre "alışveriş merkezlerinde enerji tüketiminin önemli bir etki olduğu düşünülmemektedir" şeklinde ifade edilmektedir. Ancak, dünyadaki araştırmalar alışveriş merkezlerinin büyük enerji tüketicileri ve dolayısıyla sera gazı jeneratörleri olarak kabul gördüğünü belirtmektedir. Bu sayede alışveriş merkezleri küresel ısınmaya katkıda bulunmakta ve dolaylı olarak gezegenimizi kirletmektedir. Alışveriş merkezlerinde müşteri memnuniyetini sağlamak ve ziyaretçi sayısını artırmak için ziyaretçilere mümkün olduğunca ferah, ideal iç ortam sıcaklığına sahip, iyi aydınlatılmış bir ortam sunmak gerekir. Bu şartları yerine getirmek için de ısıtma/soğutma, havalandırma, aydınlatma sistemlerinin enerji tüketmesi kaçınılmazdır. Alışveriş merkezlerinde enerji tüketim maliyetleri her zaman önemli gider kalemleri arasında yer almıştır. Bu nedenle enerji tüketim maliyetlerini düşürmek için çeşitli çalışmalar yapılmakta ve önlemler alınmaktadır.

Alışveriş merkezlerinde dört ana enerji tüketim unsuru bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; iklimlendirme-havalandırma sistemleri (HVAC), aydınlatma (dış aydınlatma, kat aydınlatmaları, mağaza aydınlatmaları), elektrikli aksamlar (asansör, yürüyen merdiven, hidroforlar, kiosklar, priz, ses sistemleri vb) ve doğal gaz, LPG, akaryakıt vb. şeklindedir. Özellikle iklimlendirme-havalandırma sistemleri (HVAC) bir alışveriş merkezindeki tüketilen enerjinin %40'dan sorumludur (URL-8). Ayrıca Yeşil Bina sertifikalarının alınabilmesinde başlıca koşullardan biri de enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Bu konuda birçok alışveriş merkezinin çalışması bulunmaktadır. Örneğin; Kayseri'de bir alışveriş merkezinde Breeam sertifikasının alım sürecinde alınan önlemler ve yapılan tasarruf çalışmaları ile 2016 yılında %8 tasarruf sağlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında orta ölçekli bir alışveriş merkezinin aylık elektrik giderinin 15000 hanenin tükettiği elektriğe eşit olduğu görülmüştür (URL-9). Alışveriş merkezlerinde mahallerde kayar kapı yerine normal açılan kapı yapılması, ya da kapı konulmaması enerji tasarrufunda %75



tasarruf yaparken; kayar kapı yerine döner kapı yapılması ise elde edilen enerji tasarrufuyla 5 evin yıllık ihtiyacını karşılamak mümkündür. Bu da yılda 15 ton karbon gazı salınımını engellemek anlamına gelmektedir (URL-15).

Tüm dünyada alışveriş merkezlerinde enerji verimliliğini artırmak amaçlı bazı yasal çalışmalar görülmekle beraber Türkiye’de alışveriş merkezlerinde enerji verimliliğini sağlamak amaçlı Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2007 yılında yayımlanan “Enerji Verimliliği Kanunu” ve bu kanuna bağlı yönetmeliklerle Enerji Verimliliği’ne yönelik bir takım çalışmaların yapılması zorunlu hale getirilmiştir. Alışveriş merkezlerinde yapılacak enerji verimliliği çalışmaları ile %5 ile %20 arasında tasarruf sağlanabilecek enerji verimliliği projelerinin ortalama geri dönüş süresi 3 yıl olarak belirtilmektedir (URL-10). Bu kapsamda 20.000 m<sup>2</sup> inşaat alanı üzeri tesisler; Enerji Yöneticisi bulundurmalı, 4 yılda bir Enerji Etüdü yaptırmalı, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi kurmalı, Enerji İzleme Sistemi kurmalıdır. Ayrıca tüm tesisler 2019 yılı sonuna kadar Enerji Kimlik Belgesi çıkarmalıdır.

Yukarıda açıklandığı üzere alışveriş merkezlerinin enerji tüketimi konusunda önemli veriler bulunmakla birlikte bazı çalışmalar online alışveriş ortamlarının alışveriş merkezlerine ve diğer alışveriş mekânlarına oranla daha az enerji tükettiğini göstermektedir. Örneğin; online alışveriş ile daha az CO<sub>2</sub> emisyonu açığa çıkarken, %30 daha az enerji tüketimi olmaktadır. Buna karşın bazı çalışmalar ise online alışveriş ortamının klasik alışveriş ortamlarına kıyasla daha fazla enerji tüketimi sağladığı yönündedir (URL-11). Online yapılan alışverişlerde alınan ürünler paketlenmektedir. Bu durumda kartonların geri dönüşümü söz konusudur. Ancak geri dönüşüm için de enerji tüketilmektedir. Ürünlerin nakliyesi sırasında ortaya çıkan trafikten kaynaklı % 65 oranındaki emisyon ise düşündürücüdür (URL-12).

#### **1.2.4. SU TÜKETİMİ**

Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi için Teknik Yardım Projesi Kitapçık B70’e göre “Alışveriş merkezlerinde su tüketiminin önemli bir etki olduğu düşünülmemektedir” denilmekle birlikte; günümüzde su tüketiminin yoğun olduğu ıslak hacimlerde inovatif vitrifiye

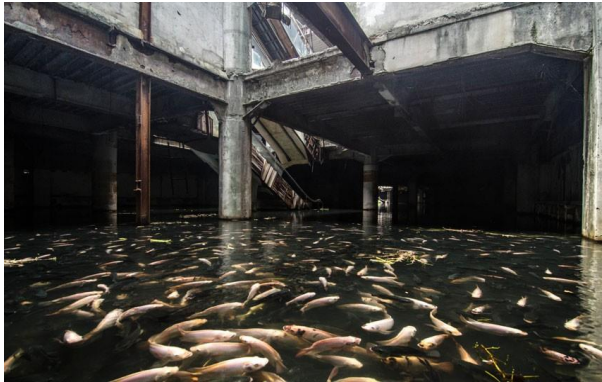
elemanlarının kullanımı ile su tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir. Bu amaçla fotoselli musluk ve rezervuarlar gibi donatıların kullanımına ağırlık verilmektedir. Islak hacimlerdeki armatürlerin sıklıkla kontrol edilmesi, arızalı olanların onarımı veya değiştirilmesi, atık suyun ve yağmur suyunun arıtılarak yeniden kullanımı da su tüketimini azaltan uygulamalardır. Bazı alışveriş merkezleri de çatıdaki yağmur suyunu arıtarak kullanım olanağını sunmaktadır. Özellikle Yeşil Bina sertifikası almak için su tasarrufunun alışveriş merkezlerinde sağlanması gerekmektedir. Örneğin; Kayseri’de bir alışveriş merkezinde Breeam sertifikası alım sürecinde alınan önlemler ile 2016 yılında %10 oranında su tasarrufu sağlanmıştır (URL-9).

### 1.2.5 Hammadde tüketimi

Alışveriş merkezlerinin işletilmesi aşamasında restoranlarda yiyecek-içecek tüketimi olmakta ve hammadde tüketimi olarak kabul görmektedir. İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemeleri, özel şirketler tarafından şantiye alanı dışında hazırlandığı veya üretildiği için hammadde olarak değerlendirilmemektedir.

### 1.3. Kullanım dışı olma sürecindeki çevresel etkiler

Her bina gibi alışveriş merkezlerinin de gerek işletme gerekse de konstrüksiyon açısından ömrünü tamamlaması söz konusudur. Böyle durumlarda bu binaların yıkımı ve gerekiyorsa yeniden yapımı durumu ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada ortaya çıkan çevresel etkiler de gürültü ve titreşim, hava kirliliği, atıklar, su kirliliği, toprak ve enerji tüketimi olarak belirtilebilir (Resim- 4).



*Resim 4. Kullanım ömrünü tamamlamış bir alışveriş merkezinde doğanın canlanması, Bangkok (URL-13).*

### **1.3.1. Gürültü ve titreşim**

Binaların yıkımında ve yeraltı yapılarının kazısında kullanılan makinelerden kaynaklı gürültü, Trafikten kaynaklı gürültü, Binaların yıkımında kullanılan makinelerin yaydığı titreşim çevresel etkiye neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### **1.3.2. Hava kirliliği**

Yeraltı yapıları hafriyat çalışmaları ve tozlu yüzeylerin rüzgâra maruz kalması ve/veya trafikten kaynaklı toz emisyonu, binaların yıkımında ve yeraltı yapıları kazısında kullanılan makinelerden kaynaklı kirleticilerin emisyonu (NO<sub>x</sub>, PM10 ile benzen) çevresel etkiye neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### **1.3.3. Atıklar**

Kullanım dışı olma sürecinde açığa çıkan tehlikesiz atıklar, hizmet dışı bırakılan binalardan ve sökülen makinelerden (kontamine bina molozu, kullanılmış yağ filtreleri, kontamine temizlik malzemeleri, atık yağlar ve kullanılmış hidrolik sıvılar vb.) kaynaklı tehlikeli atıklar çevresel etkiye neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### **1.3.4. Su kirliliği**

Şantiye tesisinden kaynaklı evsel atıksular çevresel etkiye neden olmaktadır.

### **1.3.5. Toprak**

Sahada önceki faaliyetler sonucunda kontamine olmuş hafriyat toprağı, Kaza veya makine arızası sonucu toprak kirliliği çevresel etkiye neden olmaktadır (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

### **1.3.6. Enerji Tüketimi**

Yukarıda belirtilen bu etkilerin dışında enerji tüketimi de kullanım dışı olma sürecinde ortaya çıkan önemli bir çevresel etkidir. Şantiye elektriği kullanımı, yakıt tüketimi gibi konularda enerji tüketimi bu süreçte söz konusudur (Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, 2017).

Görülmektedir ki; alışveriş merkezlerinin oluşturduğu çevresel etkilerin çoğu olumsuz etkilerdir. Bu olumsuz çevresel etkiler sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmelidir.

## 2. ALIŞVERİŞ MERKEZLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Sürdürülebilirlik; çeşitlilik ve üretkenliğin devamlılığı sağlanırken, daimi olabilme yeteneğini korumak olarak tanımlanır (Caradonna, 2016: 15). Her alanda sürdürülebilirlik söz konusudur. Sürdürülebilirliğin sağlanması gereken yerlerden biri de alışveriş merkezleridir. Yukarıda bahsedilen tüm çevresel etkilerin yanı sıra özellikle karbon emisyonları ve enerji tüketimi açısından alışveriş merkezleri çevreyi tehdit eden unsurlardır. Bu doğrultuda sürdürülebilir bir alışveriş merkezinin çevresel etkiler dikkate alındığında sahip olması gereken özellikler kısaca şöyle özetlenebilir:

**Yakınlık ve Kolay Erişim:** Alışveriş merkezleri, toplu taşıma araçlarına mükemmel bağlantıları olan kent merkezlerinde, insanlara yakın bir konumda bulunmalıdır. Banliyö treni, metro ve otobüslere erişim sorunsuz veya merkezin içine entegre edilmiş şekilde planlanmalıdır.

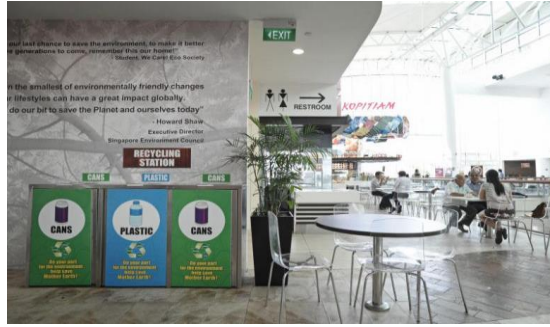
**Çevre Dostu ve Sağlıklı Ulaşım:** Bisiklet ya da yürüyerek ulaşım sağlanmalıdır. Elektrikli araçlar ve elektrikli bisikletler için belirlenmiş park yerleri ve şarj istasyonları çevre dostu taşıma yöntemlerini teşvik etmektedir.

**Enerji ve Su Verimli Çözümler:** Alışveriş merkezleri için enerji tüketimini en aza indiren çok sayıda büyük ve küçük teknik çözüm bulunmaktadır: Teknik sistem ve cihazlardan etkili ısı geri kazanımı, hem ortak alanlarda hem dükkânlarda LED aydınlatma, optimize havalandırma, düşük akışlı su armatürleri ve tuvaletler, ayrıca susuz pisuarlar hem su hem de enerji vb.

**Enerji Üretimi:** İhtiyaç duyulan enerjinin bir kısmı, alışveriş merkezlerinde fosil yakıtsız kaynaklar kullanılarak yerel olarak üretilir. Çatıda bulunan güneş panelleri elektrik üretmekte ve gölgelenmekte olup, yaz aylarında soğutma ihtiyacını da azaltmaktadır. Jeotermal ısıtma ve soğutma, harici ısı ve soğutma ihtiyacını azaltır.

**İç Ortam Çevre Kalitesi:** Gündüz ışığını en üst seviyeye çıkarmak, müşteri ve çalışanlar için sağlık, rahatlık ve üretkenliği arttırmak amacıyla uygun havalandırma ve nem kontrolü kullanmak suretiyle iç ortam çevre kalitesinin artırılması sürdürülebilir alışveriş merkezlerinin önemli özellikleridir.

**Atık Yönetimi:** İyi planlanmış ve yürütülen atık yönetimi hem kiracılara hem de ziyaretçilere atıkları sürdürülebilir bir şekilde azaltmanın, yeniden kullanmanın ve geri dönüştürmenin yanı sıra atma imkânı sunar.



Resim 5. Alışveriş merkezlerinde atık yönetimi (URL-15).

**Çevre Dostu ve Sağlıklı Malzemelerin Kullanımı:** Düşük karbonlu malzemeler ve geri dönüştürülmüş yapı elemanları binanın karbon ayak izini azaltır. Kullanılan yapı malzemelerine odaklanmak aynı zamanda iyi bir iç ortam iklimi sağlar. Yeşil bir çatının hem estetik hem de pratik yararları vardır: Kışın ısınma ve yaz aylarında soğutma ihtiyacını azaltan izolasyon sağlar. Yeşil çatılar yağmur suyunu korur ve şiddetli yağışlar sırasında yağmur suyu yönetimini kolaylaştırır. Zararlı gazları filtreleyerek hava kalitesini yükseltirler ve yerel biyolojik çeşitliliği desteklemeye yardımcı olabilirler.



Resim 6. Alışveriş merkezlerinde yeşil çatı uygulaması (URL-14).

**Yerel Katılım ve Hizmetler:** Alışveriş merkezi, sağlık merkezleri, kütüphaneler, tiyatrolar, oyun alanları ve ibadet yerleri gibi hizmetler sunan yerel toplumun bir parçasıdır. Yerel sakinler için bir buluşma noktasıdır ve yerel katılım için bir alan sağlar. Kısacası alışveriş yapmaktan daha fazlası için bir yerdir. Birçok ürünü ve hizmeti aynı gün içinde hatta aynı saat içinde almak mümkündür.

**Herkes İçin Erişilebilirlik ve Kullanılabilirlik:** Gençler, yaşlılar, çocuklar ve ailelerinin yanı sıra engelliler için de erişilebilirlik ve kullanılabilirlik dikkate alınmalıdır. Bu, yerel sakinler ve diğer paydaşlarla sürekli diyalog yoluyla yapılır. Her mekân her yaş, cinsiyet ve sağlık durumundaki insanlara sağlıklı bir ortam sunmalıdır. Aksi takdirde her insan grubu için ayrı mekân yapılması gerekeceğinden çevresel etkileri dikkate alındığında sürdürülebilir bir yaklaşım olmaz.

**Emniyet ve Güvenlik:** Güvenlik, merkezin tasarımında, inşaat malzemeleri ve teknolojisinde de göz önünde bulundurulur. Güvenliğin düşünüldüğü mekânlarda ilave uygulamalara gerek kalmayacağı için enerji tüketimi ve hammadde tüketimi azalır. Güvenlik prosedürleri planlanır ve test edilir ve alışveriş merkezi yönetimi güvenlik konularında eğitilir. Güvenlik görevlileri, önleyici ve azaltıcı bir yaklaşım benimsemek üzere eğitilmiştir.

**Operasyonel ve Bakım Uygulamalarını Optimize Etmek:** Temel olarak, bir binanın işletme ve bakım sorunlarını örneğin çalışma ortamlarını optimize etmek veya işletme ve bakım maliyetlerini düşürmek enerji verimliliğini sağlayacağı için sürdürülebilir alışveriş merkezleri için önem taşımaktadır (Manekuum, 2010: 57).

## SONUÇ

İnsanlık tarihi kadar eski bir geçmişe sahip alışveriş mekânlarının yanı sıra alışveriş merkezlerinin küresel bir yaygınlığa ulaşması yeni bir olgudur. Küreselleşen dünyada kapitalist ekonomi anlayışı, tüketim kültürü, bireysel taşıt odaklı ulaşımın bir yansıması olarak oluşan alışveriş mekânları da alışveriş merkezi adı altında birçok yenilik ve kolaylığa, hizmete imkân tanırken; diğer yandan da bazı çevresel etkilere neden olmaktadır. Başta Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi için Teknik Yardım Projesi Kitapçık B70 (Ek II –39) Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri Raporu başta olmak üzere birçok kaynakta bu çevresel

etkilerin olumsuz yönleri ele alınırken; alışveriş merkezlerinin olumlu yönlerinin de bulunduğu görülmektedir.

Alışveriş merkezlerinin oluşturduğu çevresel etkilerin inşaat sürecindeki etkiler, kullanım sürecindeki etkiler ve kullanım dışı süreçteki etkiler başlıkları altında genel olarak gürültü ve titreşim, hava kirliliği, toprak kirliliği, hafriyat atıkları, atıksu, atıklar, iç mekân hava kalitesi, enerji tüketimi, hammadde tüketimi vb. olduğu görülmektedir. Bu çevresel etkilerin olumsuz yönde çevreyi etkileyen unsurlar olduğu, yasal ve tasarımsal önlemler alındığı görülmektedir. Ancak çeşitli araştırmalara göre online alışverişe oranla daha çevreci özelliklere sahip olduğu belirtilen alışveriş merkezlerinin özellikle kullanım sürecinde olumlu yönleri de bulunmaktadır. Örneğin; atık yönetim sisteminin kurulması, halkı atık yönetimi konusunda bilinçlendirmekte; pil ve yağ atıkları gibi atıkların toplanması için atık toplama merkezlerini içerdiğinden çevre koruma bilincine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, değişik gereksinimlerin birkaç saat içinde tek bir alışveriş sırasında aynı çatı altında karşılanması, birçok aktivitenin bir arada gerçekleştirilme olanağının bulunması ekonomik açıdan olduğu kadar enerji tüketimini azaltması açısından da önemlidir. Alışveriş merkezlerinin oluşturduğu çevresel etkilere karşı gerçekleştirilen mühendislik ve tasarım uygulamaları ile alışveriş merkezlerinin yapımında ve kullanımında sürdürülebilirlik bilinci gelişmiş ve Sürdürülebilir Alışveriş Merkezlerinin ortaya çıkmasına olanak sağlanmıştır. Sürdürülebilir bir kalkınma ancak sürdürülebilir bir çevre ile mümkün olabilir. Alışveriş merkezlerinde tüm faaliyet ve işleyişinin çevresel boyutlarının belirlenmesi, etkilerinin minimum düzeye indirilmesine yönelik ve çevre ile ilgili olarak her alanda sürdürülebilir ve yenilikçi bir gelişim sağlamak amaçlanmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Alkibay, S., (1994). “Organize Alışveriş Merkezlerinin Yönetimi ve Türkiye’deki Örneklerinin İncelenmesi”, Pazarlama Dünyası, C. 8, No: 46, Temmuz- Ağustos, s.22–23.
- Bridges, E. M., (1991). Waste Materials in Urban Soils. In P. Bullock and P.J. Gregory (ads.) Soils in the Urban Environment. Oxford: Blackwell, s. 28 – 46.
- Caradonna, J.L. (2016). Sustainability: A History. Oxford University Press.
- Cengiz, E., Özden, B. (2002). “Perakendecilikte Büyük Alışveriş Merkezleri ve Tüketicilerin Büyük Alışveriş Merkezleri ile İlgili Tutumlarını Tespit Etmeye Yönelik Bir Araştırma”, Ege Akademik Bakış Dergisi, Cilt 2, Sayı 1, s.64-77.
- Çakmak, A.Ç. (2012). “Ziyaretçilerin Alışveriş Merkezlerini Tercih Etme Nedenlerinin Araştırılması: Karabük Şehir Merkezinde Bir Uygulama, Niğde Üniversitesi İİBF Dergisi, Cilt: 5, Sayı: 2, s.195-215.
- Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, (2017) Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi için Teknik Yardım Projesi Kitapçık B70 (Ek II – 39) Alışveriş Merkezlerinin Çevresel Etkileri, <https://ced.csb.gov.tr/kitapciklar-i-85877>
- Demirarslan, D. (2017). “Ticaret Mekânlarında Tarihsel Gelişim Ve Değişim İzmit Örneği”. Türkiye Cumhuriyeti’nin Ekonomik ve Sosyal Tarihi Uluslararası Sempozyumu Bildiri Kitabı, Ankara: Türk Tarih Kurumu Yayınları, 1, s.1-27.
- Demirarslan, D. (2019), “Agoradan Alışveriş Merkezine Bir Yolculuk: İzmit’te Alışveriş Ve Ticaret Mekânlarına Bir Bakış”, Sosyal Bilimler Dergisi / The Journal of Social Science Yıl: 6, Sayı: 33, Ocak 2019, s. 81-99.
- Manekuun, F. ( 2010). Green Shopping Centers A Survey of Stockholm’s Shopping Center Market and its Environmental Commitment. Dept of Real Estate & Construction Management Div of Building & Real Estate Economics, Master of Thesis no. 506, Stockholm.
- Oral, Z.A., Arısoy, A. (2015). “Alışveriş Merkezlerinde İç Mekan Hava Kalitesi”, TESKON 2015 / İç Çevre Kalitesi Seminerleri, 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi–8-11 Nisan 2015/İzmir, s. 181-192.
- Ögel, S.(2014). Alışveriş Merkezinde Gerçekleştirilen Etkinliklerin Tüketici Tutumları Üzerine Etkisi: Alışveriş Merkezi Ziyaretçileri Üzerine Bir Araştırma. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Y.Lisans Tezi.



- Özer, Ö. (1996). Çevresel Etki Değerlendirmesine Giriş. Ankara: TMMOB Şehir Plancıları Odası.
- Şahin, F. (2012). “Ticaret Yapılarında Tarihsel Gelişim Ve Tipolojiler: Trabzon Üzerine Yansıyış Şekilleri”, 38. İcanas, Atatürk Kültür, Dil Ve Tarih Yüksek Kurumu, Tarih Ve Medeniyetler Tarihi, V1. Cilt/Volume V1/Tom V1 Ankara-2012, s.2879-2894.
- Wen, Yuangao & Lian, Zhiwei & Lan, Li & Ye, Xiaojiang. (2011). “Investigation of Indoor/Outdoor Air Pollutants at The Shopping Malls in Wuhan”. Int. J. of Environment and Pollution. 45. 268 - 280. 10.1504/IJEP.2011.039101.
- Tang, J.,(2005).“Volatite Organic Compounds In a Multi-Storey Shopping Mall In Guangzhou , South China ”, Atmospheric Environment , Volume 39,Issue 38, December 2005,s. 7374-7383.
- URL-1: <https://www.bolgegundem.com/2018-turkiyede-kac-avm-var-iste-istanbul-ankara-ve-antalyadaki-avm-sayilari-395726h.htm>, 23.9.2019.
- URL-2: <https://www.dunya.com/ekonomi/avm-pazarinda-cin-ve-rusya-ile-yarisiyoruz-haberi-282590>, 23.9.2019.
- URL-3: [https://www.tripadvisor.com.tr/Attraction\\_Review-g154914-d155511-Reviews-West\\_Edmonton\\_Mall-Edmonton\\_Alberta.html](https://www.tripadvisor.com.tr/Attraction_Review-g154914-d155511-Reviews-West_Edmonton_Mall-Edmonton_Alberta.html), 24.9.2019.
- URL-4:<https://www.icsc.com/uploads/default/Envision-2020-Report.pdf>, 8.8.2019.
- URL-5: <http://www.engininsaat.com.tr/proje-ozel.php?id=65>, 01.7.2019.
- URL-6: <https://kms.kaysis.gov.tr/Home/Goster/62550?AspxAutoDetectCookieSupport=1>, 8.8.2019.
- URL-7: <https://www.eea.europa.eu/tr/themes/soil/intro>, 8.8.2019.
- URL-8: <http://bpie.eu/wp-content/uploads/2016/06/first-5-CE.pdf>, 8.8.2019.
- URL-9: <https://yoldanciktim.com/istanbulun-alisveris-merkezleri/>, 9.8.2019.
- URL-10: <https://www.onurenerji.com.tr/cozumlerimiz/avm/>, 9.8.2019.
- URL-11: <https://www.wsj.com/articles/whats-more-eco-friendly-going-to-the-mall-or-shopping-online-1458667153>, 10.10.2019.
- URL-12: <https://pollybarks.com/is-shopping-online-more-eco-friendly-than-shopping-local/>, 12.10.2019.
- URL-13: <https://www.telegraph.co.uk/news/picturegalleries/howaboutthat/1094330>

2/In-pictures-Abandoned-shopping-mall-becomes-urban-aquarium-in-Bangkok.html, 8.11.2019.

URL-14: <https://real-leaders.com/is-this-the-worlds-most-sustainable-shopping-mall/>, 9.8.2019.

URL-15: <https://www.perakende.org/avmlerde-enerji-tasarrufunun-puf-noktalari-1342807181h.html>, 8.11.2019.



**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE  
TRIP ÇELİK MATRİSLİ KOMPOZİT  
MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ  
VE MİKROYAPI DÖNÜŞÜMLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**BÖLÜM  
9**

**Özlem SEVİNÇ<sup>1</sup>,  
Ege Anıl DİLER<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Y. Müh., Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova-İzmir

<sup>2</sup> Dr. Öğretim Üyesi, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bornova-İzmir





## 1. Giriş

Petrol ve türevi yakıt kaynaklarının azalması, karbon emisyonu oranının dünya genelinde artması ve yolcu güvenliği konularında beklenen standartların daha fazla iyileştirilmesi gerekliliği, otomotiv üreticilerinin artan rekabetle birlikte daha dayanıklı ve daha hafif araçlar ve dolayısıyla otomotiv parçalarının yapıldığı malzemelerin iyileştirilmesini ve yeni malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Otomotiv sektöründe dayanıklılık, hafiflik ve yolcu güvenliği önemli olup, bu özelliklerin sağlanması amacıyla genellikle metal, plastik ve kompozit gibi malzemeler tercih edilmekte ve bu malzemeler sürekli olarak geliştirilmektedir (Hovorun vd., 2017; Jeong vd., 2019) (Todor ve Kiss, 2016). Yeterli mekanik özelliklerin yanında, özellikle petrol ve türevi yakıt kaynaklarının azalmaya başlamış olması ve karbon emisyonuna bağlı çevre kirliliği gibi konularda, üretilen araçlarda hafifliğin daha da önem kazanması, otomotiv parça imalatında alüminyum gibi hafif metallerle birlikte kompozit malzemelerin kullanım oranlarının her geçen yıl daha fazla artış göstermesine neden olmaktadır (Mavhungu vd., 2017; (Miklos ve Imre, 2018). Kompozit malzemeler, hafiflik bakımından metallere göre daha avantajlı olmalarına rağmen maliyetleri daha yüksektir (Das, 2001). Kompozitler gibi hafiflik avantajlarından dolayı plastik malzemelere olan ilgi artış gösterse de bu malzemelerin mekanik özelliklerinin zayıf olmasından dolayı mukavemetin önemli olduğu parça üretiminde plastik malzemeler yetersiz kalmaktadır (Katie vd. 2014). Otomotiv parçalarında hafiflik avantajı gibi özellikler bakımından plastikler ve kompozitlere olan talep artış gösterse de, plastiklerin mekanik özelliklerinin yetersiz kalması ve kompozit malzemelerin maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle yüksek mekanik özelliklerin (dayanıklılık, darbe direnci vb.) ve düşük maliyetli otomotiv parçalarının üretilmesine olanak veren metal esaslı malzemeler halen yüksek oranda tercih edilmektedirler (Fentahun ve Savaş, 2018).

Çelikler, diğer malzemelere kıyasla otomotiv endüstrisinde en yüksek paya sahiptirler (Broek vd., 2012). Otomotiv parçalarının üretiminde, düşük mekanik özelliklerden yüksek mekanik özelliklere kadar çok sayıda çelik türü kullanılmaktadır. Bu çelik türleri arasında, arayer atomsuz (IF), fırında sertleşebilen (BH), yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) ve C-Mn çelikleri göreceli olarak düşük mekanik

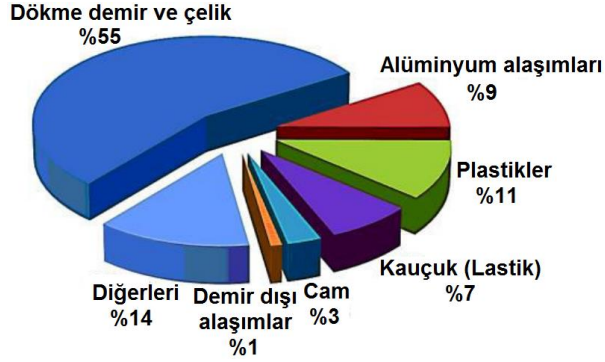
özellikler gösterirken, çift fazlı çelikler (DP), kompleks (çok) fazlı çelikler (CP), beynitik ve martenzitik çelikler ile plastisite etkili dönüşüm (TRIP) çelikleri ise yüksek çekme dayanımı ve/veya darbe direnci gibi yüksek mekanik özelliklere sahiptirler (Galán vd., 2012).

Mekanik özellikleri yüksek çelikler sahip oldukları yüksek mekanik özellikler sayesinde diğer malzeme türlerine göre ön plana çıkmalarına rağmen bir çelik türünde çeliğin mukavemetinin artması, o çeliğin şekil alabilirliğini zorlaştırmaktadır. Şekil alabilme kabiliyeti yüksek olan çelik türlerinin de mekanik özellikleri daha düşük olabilmektedir. Hem mekanik özellikleri hem de şekil alabilme kabiliyeti yüksek olan çelik türlerinin geliştirilmesi, otomotiv endüstrisinin en çok ihtiyaç duyduğu konulardan biridir. Çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin yeteri kadar yüksek olmasının yanında kolay şekillendirilebilmelerini de sağlamak amacıyla TRIP (TRansformation Induced Plasticity) (Dönüşüm etkili plastisite) çelikleri geliştirilmiştir (Wolfgang vd., 2017). TRIP çeliklerinin mikroyapısında bulunan yarı kararlı artık östenit fazı; çeliğin kimyasal içeriği, sıcaklık ve şekil değiştirme hızına göre plastik deformasyon sırasında martenzite dönüşmekte ve bu dönüşüm çelikte yüksek dayanım ve sünekliği bir arada sağlayabilmektedir (Bhargava vd., 2015). TRIP çeliklerinin dayanım, düşük ısıl iletkenlik, aşınma gibi özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla TRIP çelik matrisli seramik takviyeli kompozitler geliştirilmiştir (Kirschner vd., 2019; Martin vd., 2013; Sevinç, 2019). TRIP matrisli seramik takviyeli kompozitlerde seramik takviye olarak genellikle  $ZrO_2$  partikülleri tercih edilmektedir (Martin vd., 2013). TRIP matrisli  $ZrO_2$  takviyeli kompozitlerde yarı kararlı tetragonal  $ZrO_2$  yüksek derecede distorsiyona uğrayarak monoklinik  $ZrO_2$ 'ye dönüşürken, bu dönüşüm ve gerilme kaynaklı martenzit dönüşümü, matris malzemesinin çevresinde hacimsel genişlemeye neden olarak martenzit oluşumunu sağlamaktadır. Böylece, TRIP çelikleri sayesinde daha yüksek dayanım ve darbe direnci gibi yüksek mekanik özelliklerinin yanında yüksek şekil değiştirme kabiliyetine sahip otomotiv parçaları imal edilebilmektedir (Aslan vd., 2016; Weigelt vd., 2017). TRIP çelik matrisli kompozitlerde matris ve takviye elemanlarındaki mikroyapı dönüşümlerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, bu kompozit malzemelerinin mekanik özelliklerinin daha da geliştirilerek otomotiv sektöründe en yüksek payı elde etmesine katkıda bulunacaktır.

## 2. TRIP (Dönüşüm Etkili Plastisite) Çelikleri

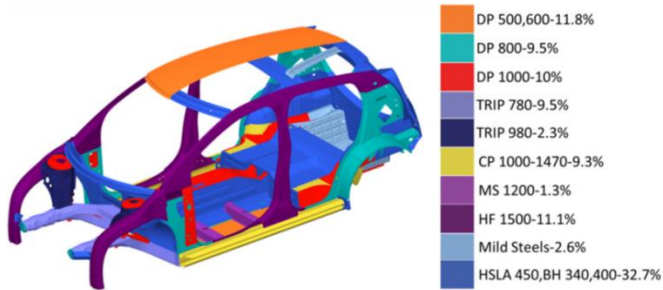


Otomotiv sektöründe, metallere kompozitlere kadar hemen hemen her malzeme türünden parça üretimi yapılabilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü gibi otomotiv parçalarının üretiminde en yüksek oranda çelikler tercih edilirken hafiflik gibi özelliklerinden dolayı plastik ve metal alaşımları da diğer tercih edilen malzemelerdir.



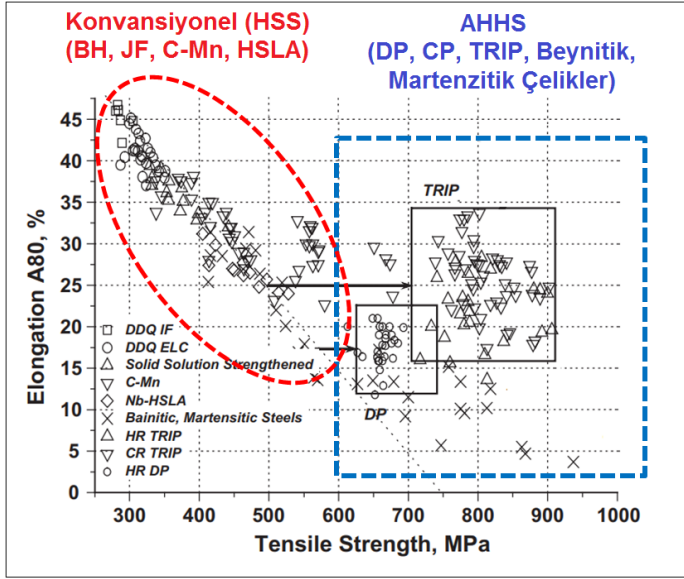
**Şekil 1.** Otomotiv sektöründe parça üretiminde kullanılan malzemeler (%) (Hovorun vd., 2017).

Otomotiv endüstrisinde, parça üretiminde kullanılan çelikler (Şekil 2), sahip oldukları yüksek mekanik özelliklere göre konvansiyonel (HSS) ve geliştirilmiş yüksek mukavemetli (AHSS) çelikler olmak üzere başlıca iki gruba ayrılabilirler (Şekil 3). Fırında sertleştirilebilen (BH), arayer atomsuz (IF), C-Mn ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çelikler konvansiyonel çelikler arasında yer alırken, çift fazlı (DP), kompleks fazlı (CP), beynitik ve martenzitik çelikler ile dönüşüm etkili plastisite (TRIP) çelikleri ise geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikleri oluşturmaktadır (Kuziak vd., 2008).



**Şekil 2.** Geleceğin elektrik ile çalışan aracında kullanılması beklenen çelik esash malzemeler. Bu malzemelerin %60'ını AHSS çeliklerini oluşturmaktadır (WorldAutoSteel'den aktaran Chaowei, 2016).

Otomotiv sektöründe araç gövdesi ve şasisindeki güvenlik bileşenleri ve yapısal parçalarda kullanıldığında, geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), diğer çeliklere göre daha fazla avantaja sahiptir. Örneğin, bir otomotiv parçasının imalatında, orta karbonlu bir çelik ile karşılaştırıldığında, aynı mukavemet değerleri, daha ince kesitli AHSS çelikleri ile sağlanabilmekte ve böylece daha hafif araç üretimi ile yakıt tüketimi düşürülebilmektedir. Otomotiv sektörünün ihtiyaçlarının karşılanmasında, geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerle karşılaştırıldığında, yüksek mukavemetin yanında, kolay şekillendirilebilen ve yüksek darbe direncine sahip olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Baluch vd., 2014). AHSS çelikleri arasında yer alan çift fazlı (DP) çelikler, otomotiv sektöründe en çok geliştirilen ve kullanılan çelik türüdür (Olivier vd., 2013). DP çelikleri, mikroyapılarında martenzit ve ferrit fazından oluşmaktadır. Bu iki fazdan, ferrit fazının düşük dayanımı ve yüksek sünekliği sayesinde yüksek şekillendirilebilirliğe ve martenzit fazının yüksek mukavemeti sayesinde de yüksek dayanıma sahip çelikler elde edilebilmektedir (Astrid vd., 2019). AHSS çeliklerinden olan kompleks fazlı (CP) çelikler, sert martenzit fazı ile ince taneli ferrit fazı içerisinde ince çökeltilerden oluşur. Bu ince çökeltiler, DP ve TRIP çeliklerinde kullanılan alaşım elementlerine ilaveten niobiyum, titanyum ve vanadyum elementleri ile sağlanmaktadır. CP çeliklerinin şekillenebilirlikleri TRIP çeliklerinin ki kadar kolay olmamasına rağmen daha düşük miktarda alaşım elementleri ile yüksek dayanım değerleri elde edilebilmekte ve bu da daha düşük maliyet ile birlikte kaynaklanabilirliği de iyileştirebilmektedir (Horvath vd., 2010). AHSS çelikleri arasında yer alan diğer bir çelik türü de martenzitik çeliklerdir. Bu çeliklerin mikroyapılarında başlıca iğnemsiz martenzit olmak üzere düşük miktarda beyrit ve/veya ferrit fazları da yer almaktadır (Kuziak vd., 2008). Martenzitik çeliklerin sertlik ve dayanımları karbon oranının artmasıyla artış göstermekle birlikte, sünekliklerinin diğer AHSS çelik türlerine göre daha düşük olmasından dolayı otomotiv parçalarının üretimindeki kullanım oranı daha az olmasına rağmen, martenzitik çelikler araçlarda kapı kirişleri, tamponlar ve çapraz kirişlerin üretiminde tercih edilmektedir (Hardy, 2015). AHSS çelikleri arasında yüksek dayanım, kolay şekillenebilirlik ve yüksek darbe direnci gibi özelliklerin bir arada bulunabildiği çelik türü ise dönüşüm etkili plastisite (TRIP) ve ikizlenme etkili plastisite (TWIP) çelikleridir (Lin ve Hu, 2016; Pla-Ferrando vd., 2011).



Şekil 3. Otomotiv endüstrisinde çelik seçiminde kullanılan çelik türlerinin dayanım-süneklik ilişkisi (De Cooman, 2015).

Yüksek mukavemet ve iyi sünekliğin her ikisini de aynı malzemede geliştirmek, deformasyonu sınırlandırmayı amaçlayan geleneksel gerinim sertleştirme (pekleştirme) yöntemleriyle gerçekleştirilmesi zor bir işlemdir. Yarı kararlı östenitik çelikte deformasyonla gerçekleşen dönüşüm sayesinde mukavemet ve süneklikte aynı anda artış sağlanabilmektedir. Bu olay, TRIP (TRansformation Induced Plasticity) dönüşüm kaynaklı plastisite etkisi olarak tanımlanmaktadır. TRIP çeliklerinde Cr, Mn ve Ni elementleri sayesinde östenitik mikroyapı ve plastik deformasyonla martenzitik faz dönüşümü gerçekleşmektedir. Bu dönüşümü sağlayan başlıca etken, östenit ve martenzit arasındaki Gibbs enerji farklılığıdır. Çelik, plastik deformasyona maruz kaldığında, martenzitik faza dönüşüm için gerekli olan enerji mekanik yüklerle sağlanmakta ve yüzey merkezli kübik (YMK) östenit → hegzagonal sıkı paket (HSP)  $\epsilon$ -martenzite, sonrasında da hacim merkezli kübik (HMK) →  $\alpha'$ -martenzite dönüşmektedir. Martenzit oranının artmasıyla meydana gelen hacimsel artış şekil değişimine sebep olmakta ve martenzitler deformasyon sertleşmesinin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Böylece, TRIP çelikleri sahip oldukları yüksek süneklik özelliği sayesinde mükemmel şekillendirilebilir, çarpışma sırasında daha yüksek enerji absorpsiyonu ile daha iyi yolcu koruması sağlama, daha yüksek yakıt

tasarrufu sağlayacak şekilde araçlarda ağırlık azalmasını sağlama ve iyi kaynaklanabilirlik sayesinde kolay imalat sağlama gibi avantajlara sahip olmaktadır (Bhadeshia ve Honeycombe 2017); Eckner vd., 2016; Linderov vd., 2014; Martin vd., 2015). Bu nedenle TRIP çelikleri, otomotiv endüstrisinde parça üretiminde ciddi oranda tercih edilmeye başlamıştır (Altenbach, vd., 2015).

TRIP çelikleri yüksek dayanım, süneklik ve darbe direnci gibi özelliklerin aynı malzemede olmasına olanak sağladığı için otomotiv sektöründe kullanılan diğer çelik türlerine göre avantajlı olmasının yanında, TRIP çeliklerinin mekanik dayanımları ve darbe dirençleri mikroyapıdaki tanelerin boyutlarının daha küçük hale getirilmesiyle daha yüksek değerlere çıkarılabilmektedir. Bu da, TRIP çeliklerine seramik vb. takviye partiküllerin ilave edilmesiyle elde edilen TRIP çelik matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesiyle mümkün olabilmektedir (Kirschner vd., 2019; Sevinç, 2019). Bununla birlikte, geliştirilmiş mekanik özelliklerin yanında takviye partiküller, malzemenin ısıl ve aşınma direncinin de artmasını sağlayarak, çok sayıda yüksek mekanik ve diğer malzeme özellikleri, TRIP çelik matrisli kompozitler sayesinde, tek bir malzemede elde edilebilecektir. Bunun için, geliştirilen TRIP çeliklerinin mikroyapıları ile takviye elemanlarındaki dönüşüm ve değişikliklerin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir incelemeyle ortaya konulması gerekmektedir.

### 3. TRIP Çelik Matris Kompozitler

TRIP çelik matrisli kompozitlerde çelik matrisin yüksek dayanım ve darbe direnci gibi özellikleri yanında, kompozit malzemede kullanılan takviye partikülleri, matris tane yapısını küçülterek dayanım değerlerinin yükselmesini ve malzemenin ısıl ve aşınma dirençlerinin artmasını sağlayabilecekleri gibi takviye partiküllerin çelik matristen daha hafif olmasından dolayı, yüksek mekanik dayanım ve yüksek darbe, ısıl ve aşınma direncine sahip daha hafif parçaların üretim potansiyeli sayesinde, gelecekte TRIP çelik matrisli kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulunması beklenebilir.

Yeni geliştirilen TRIP çelik matrisli kompozitlerde, TRIP çelik matrisi olarak yüksek alaşımlı, yarı kararlı, östenitik CrMnNi çeliği ve takviye partikülleri olarak genellikle Mg ve  $Y_2O_3$  ile kısmen stabilize edilmiş  $ZrO_2$  seramik takviyeleri tercih edilmektedir. (Bokuchava vd., 2018; Martin vd., 2013). Plastik deformasyon işlemi, matris ve takviye fazlarını

dönüşüme uğratmaktadır. Böylece, TRIP matris kompozitler aynı anda yüksek mukavemet, yeterli yükseklikte süneklik ve enerji absorpsiyonu ve tokluğa sahip olabilmektedir (Biermann vd., 2010; Glage vd. 2013).

TRIP çelik matrisli kompozitlerin üretiminde genellikle toz metalurjisi ve döküm yöntemleri tercih edilmektedir. (Biermann vd., 2009; Martin vd., 2013). Döküm yöntemlerine kıyasla toz metalurjisi yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Toz metalurjisi ile üretimde, TRIP çelik matrisle  $ZrO_2$  takviye partikülleri eklenerek, presleme ve/veya sinterleme işlemleriyle kompozit malzemeler üretilmektedir. Presleme ve sinterleme işlemleriyle yüksek yoğunlukta (düşük gözenekli) kompozitler elde edilebileceği gibi presleme işlemi uygulanmadan mikro veya makro gözenekli bal peteği formunda kompozitler de üretilmektedir.

TRIP çelik matrisli ve partikül takviyeli kompozitlerde üretim sırasında meydana gelen mikroyapı dönüşüm ve değişiklikleri üretilen malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan belirlediği için matris ve takviye fazlarındaki dönüşümlerin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

### **3.1 TRIP çelik matrisli kompozit mikroyapısında matris ve takviye dönüşümleri**

TRIP çelik matrisli kompozitler, matris olarak yarı kararlı östenitik (CrMnNi) çelik ve genellikle Mg ve  $Y_2O_3$  ile kısmen stabilize edilmiş  $ZrO_2$  takviye partiküllerinden meydana gelmektedir.

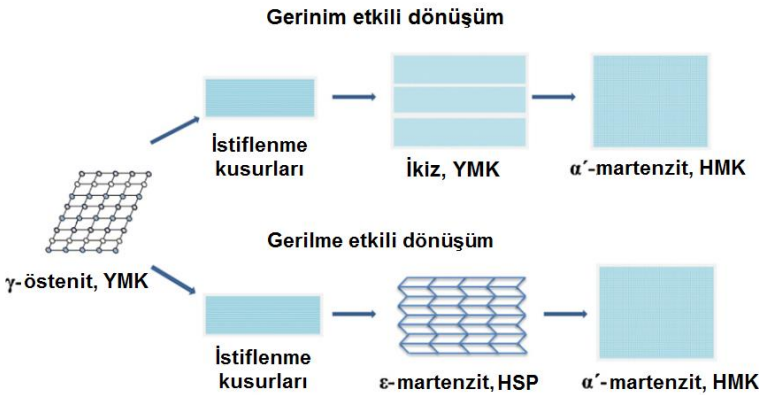
Östenitik CrMnNi çeliklerinde, farklı gerilme ve gerinime bağlı olarak bazı deformasyon mekanizmaları ve faz dönüşümleri meydana gelmektedir. Gerilme etkili dönüşümler, elastik deformasyon sırasında; bir başka ifadeyle, östenit fazının akma dayanımının altındaki gerilmelerde meydana gelmektedir. Gerinim etkili dönüşümler ise plastik deformasyon sırasında; diğer bir ifadeyle, akma dayanımının üzerindeki gerinimlerde gerçekleşmektedir (Kovalev vd., 2013).

TRIP çelik matris kompozitlerin plastik deformasyonu sırasında hem matris hem de takviye fazı dönüşüme uğramaktadır. TRIP matris kompozitteki çelik matrisde bulunan östenit ( $\gamma$ )  $\rightarrow$   $\alpha'$ -martenzite, takviye fazı olan  $ZrO_2$  ise tetragonaldan (t)  $\rightarrow$  monoklinik (m) faza dönüşmektedir. Matris ve takviyedeki bu dönüşümler, gerilme seviyesinin artmasına neden olsalar da, esas artış, östenitin  $\alpha'$ -martenzite dönüşümü ile sağlanmaktadır. Bu faz dönüşümleri sayesinde, TRIP çelik

matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri, TRIP çeliklerine göre daha yüksek değerlerde olabilmektedir. Plastik deformasyon işlemi,  $\alpha'$ -martenzit dönüşümünü sağlamakla birlikte, kısmi dislokasyon ve istiflenme kusurları, dislokasyon yığılması, ikizlenme ve kayma bantları gibi çok sayıda kusurun oluşumuna da katkıda bulunmaktadır (Borisova vd., 2013; Linderov vd., 2014; Prüger vd., 2013). Matris ve takviye partiküllerindeki bu dönüşümlerin ve/veya oluşumların malzemenin özellikleri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması amacıyla matris ve takviye partiküllerindeki dönüşümlerin ve/veya oluşumların etkileri ayrı ayrı ve daha detaylı bir şekilde incelenmelidir.

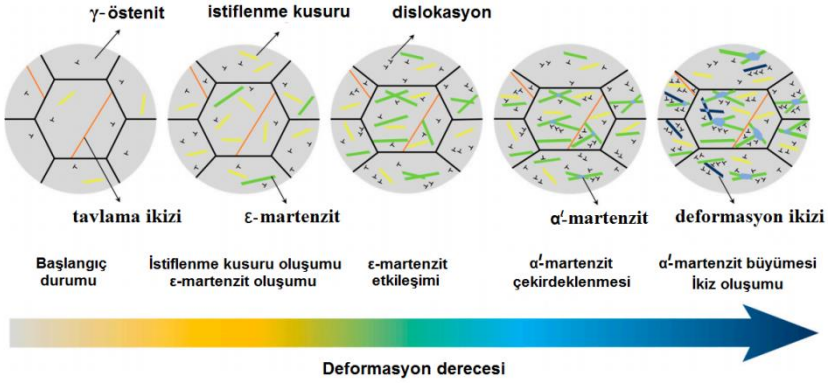
### 3.1.1. TRIP çelik matrisinde mikroyapı dönüşümleri

TRIP çelik matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini, plastik deformasyonla sağlanan deformasyon mekanizmaları belirlemektedir. Plastik deformasyonla birlikte, östenitte gerilmeye ve gerinime bağlı olarak martenzitik faz dönüşümleri gerçekleşmektedir. Gerilmeye bağlı olarak, YMK  $\gamma$  östenit  $\rightarrow$  HSP  $\epsilon$ -martenzite ve  $\epsilon$ -martenzit de  $\rightarrow$  HSP  $\alpha'$ -martenzite dönüşmektedir. Gerinime bağlı olarak da östenit fazında ikizlenmeler meydana gelmekte ve oluşan bu ikizler de  $\alpha'$ -martenzite dönüşmektedir (Şekil 4) (Glage vd., 2013; Shen vd., 2012).



**Şekil 4.** TRIP çelik matrisli kompozitlerde deformasyona bağlı olarak gerçekleşen martenzitik faz dönüşümleri (Shen vd., 2012).

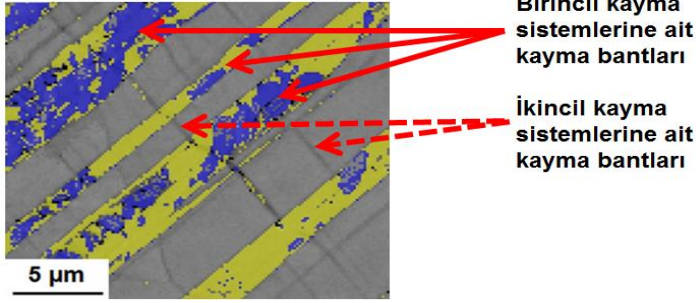
TRIP çeliğinin östenit fazında, plastik deformasyon öncesinde tavlama nedeniyle oluşan ikizlenmelerle birlikte kısmi dislokasyonlar ve istiflenme kusurları da bulunmaktadır (Şekil 5-8).



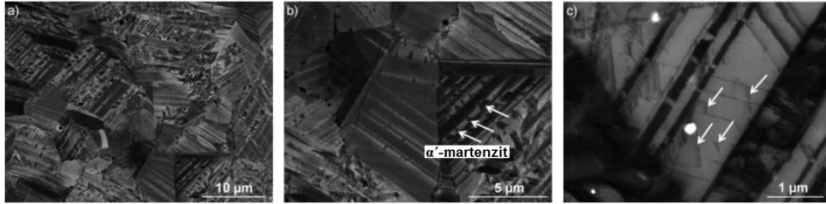
**Şekil 5.** TRIP/TWIN çeliklerinde plastik deformasyon boyunca meydana gelen mikroyapı değişimleri (Ma vd., 2017).

Plastik deformasyon işlemiyle birlikte, dislokasyonlar ve istiflenme kusurlarının miktarı artmakta ve  $\epsilon$ -martenzitler oluşmaktadır. İstiflenme kusurlarının düzenlenmesine bağlı olarak  $\epsilon$ -martenzitler ve mekanik ikizlenmeler meydana gelmektedir (Borisova vd., 2013; Linderov vd., 2014). Plastik deformasyonun artmasıyla,  $\epsilon$  martenzitler ve deformasyon (mekanik) ikizleri etkileşime girerek  $\alpha'$  martenzitleri oluşturmaktadır (Ma vd., 2017).  $\epsilon$ -martenzit ve ikizler, östenitin  $\alpha'$ -martenzite dönüşümünde oluşan ara fazlardır.  $\alpha'$ -martenzit tercihen  $\epsilon$ -martenzitlerin ya da ikizlerin kesişim noktalarında çekirdeklenmektedir. İkizler ile birlikte dislokasyon ve ikizlerin etkileşimleri, kayma sistemleri arasında oluşmakta ve mevcut kayma sistemleri arasındaki aktarımı kolaylaştırarak deformasyonu kolaylaştırmaktadırlar (Shen vd., 2012). Kayma bantları, büyük istiflenme kusurları sayesinde oluşmakta ve istiflenme kusur yoğunluğu, istiflenme kusurlarının çakışmasına yol açan deformasyonla artmaktadır (Weidner ve Biermann, 2015). Artan deformasyon, istiflenme kusur yoğunluğunu yükseltmektedir. İstiflenme kusur yoğunluğunun artmasıyla birlikte, kayma bantları içindeki istiflenme kusuru rastgele dağılmamakta ve genellikle östenit içindeki  $\{111\}$  kafes düzlemlerinde düzenlenmektedir (Borisova vd., 2013). Kayma bantlarındaki yüksek istiflenme kusur oranı nedeniyle, plastik deformasyon sırasında östenitteki  $[110]\{111\}$  dislokasyonları,  $[112]\{111\}$  Shockley kısmi dislokasyonlarına ayrılmakta ve her bir YMK  $\{111\}$  kafes düzlemindeki istiflenme kusurlarının düzenlenmesiyle  $\epsilon$  martenzitler oluşurken ardışık  $\{111\}$  düzlemlerdeki istiflenme kusurlarının düzenlenmesiyle de ikizlenmeler meydana gelmektedir (Martin vd., 2015). E-martenzit, yarı kararlı bir ara faz olup, YMK ve HSP arasındaki düşük Gibbs enerjisi

farkından dolayı oluştuğu varsayılmaktadır (Martin vd., 2015).  $\epsilon$ -martenzit ve ikizlenmelerin oluşumundaki tek fark, çakışan istiflenme kusur sayısındaki farklılıktır (Galindo-Nava ve Rivera-Díaz-del-Castillo, 2017). İkizlenmede, kafes yapısındaki istiflenme kusurları  $\epsilon$ -martenzitinkinden iki kat daha fazladır (Borisova vd., 2013).

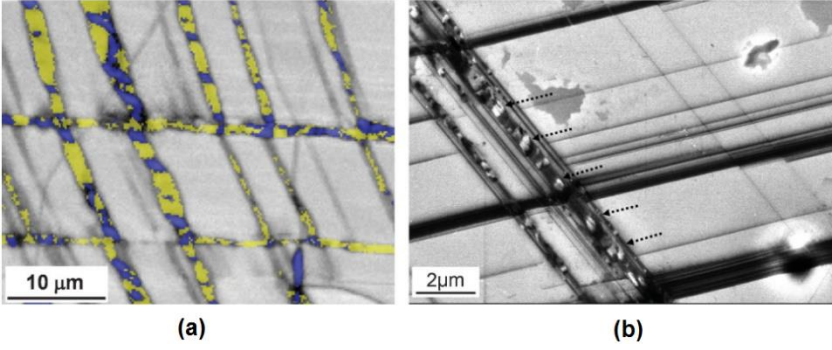


**Şekil 6.** Deformasyona uğrayan yarı kararlı CrMnSi TRIP çeliğine ait mikroyapıda oluşan faz ve faz dönüşümlerinin EBSD analizi (Gri renk östenit, sarı renk  $\epsilon$ -martenzit ve mavi renk  $\alpha'$ -martenzit fazlarını göstermektedir) (Weidner vd., 2015).



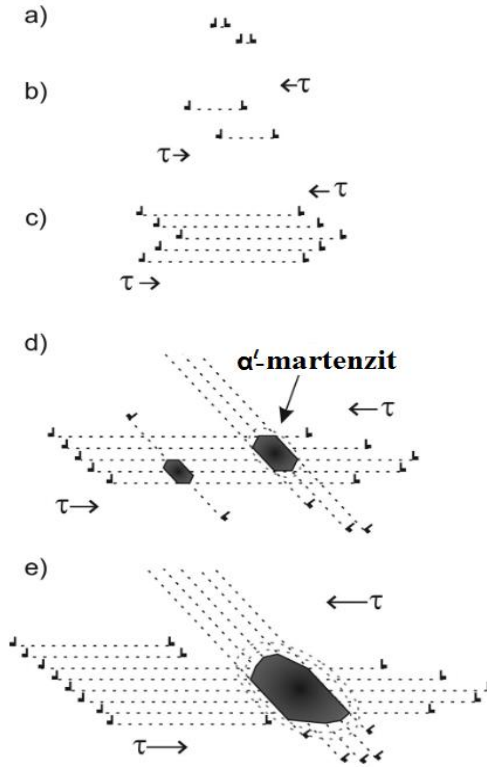
**Şekil 7.** (a) Deformasyona uğramış 16Cr-6Mn-3Ni çeliğinin mikroyapısına ve (b) deformasyon bantlarında oluşan ve ok işareti ile gösterilen  $\alpha'$ -martenzitine ait BSE görüntüleri, (c) istiflenme kusurlarının ok işareti ile gösterildiği ECC görüntüsü (Glage vd., 2013).





**Şekil 8.** %5 oranında plastik deformasyona uğramış TRIP 16-6-6 çeliğinin mikroyapısına ait (a) SEM görüntüsü ve EBSD analizi (gri renk östenit, sarı renk  $\epsilon$ -martenzit, mavi renk  $\alpha'$ -martenzit fazlarını göstermektedir.), (b) Kesikli ok işareti ile  $\alpha'$ -martenzit fazlarını gösteren ECCI görüntüsü (Borisova vd., 2013).

TRIP çeliklerinin deformasyonu sırasında meydana gelen kayma bantlarının oluşumu Şekil 9'da gösterilmektedir. Östenitteki  $\{111\}$  kafes düzlemindeki dislokasyonlar, düşük istiflenme kusur enerjisine (SFE) bağlı olarak Schokel kısmi dislokasyonlarına ayrılmaktadırlar (Şekil 9.(a)). Plastik deformasyon sırasında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau$ ), eğer uygun konumlanırlarsa farklı hızlara ulaşip ayrılmının genişliğini arttırmaktadırlar (Şekil 9(b)). Devam eden deformasyonla birlikte, dislokasyonlar çoğalmakta ve yüksek istiflenme kusur yoğunluğuna sahip daha geniş kayma bantları oluşmaktadır (Şekil 9(c)). İstiflenme kusurlarının düzenlenmesine bağlı olarak, kayma bantları  $\epsilon$ -martenzit ve/veya ikizlenmeleri oluşturmaktadır. Bu sürece kadar, östenitin gerinim sertleşmesi sadece dislokasyon etkileşimlerine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Dislokasyonlar ile birlikte istiflenme kusurlarının ve ikincil kayma sistemlerinden kayma bantlarının etkileşimleriyle  $\alpha'$ -martenzit çekirdeklenmeleri meydana gelmektedir (Şekil 9(d)). Oluşan  $\alpha'$ -martenzitin çevresindeki gerilme alanları, birincil kayma sistemlerinin daha sonraki hareketlerini engellemektedir (Şekil 9(d) ve (e)). Her bir  $\alpha'$ -martenzit çekirdeğinin arasındaki uzaklık, kayma bantlarındaki ortalama uzaklıktan daha küçüktür. Bu nedenle,  $\alpha'$ -martenzit çekirdeklerinin etkileşiminin deformasyon sertleşmesine olan katkısı, ikincil kayma sistemlerinde oluşan kayma bantlarının etkileşiminden daha fazla olmaktadır. Mikroyapıda meydana gelen bu olaylar, kayma bantları ve  $\alpha'$ -martenzitlerin büyümesine neden olmaktadır (Martin vd., 2015).



**Şekil 9.** Kayma bantlarının oluşumunu ve deformasyon sertleşmesinin etkile-ri; (a) dislokasyonlar Schokel kısmi dislokasyonlarına ayrılmakta, (b) dışarıdan uygulanan yük kayma gerilmesini arttırmakta; (c) dislokasyon çoğalması kayma bantlarındaki istiflenme kusurlarını arttırmakta, (d) ikincil kayma sistemlerindeki istiflenme kusurlarıyla kesişme,  $\alpha'$ -martenzit çekirdeklenmesini sağlamakta, (e) kayma bantları ve  $\alpha'$ -martenzitlerin büyümesi gerçekleşmektedir (Martin vd., 2015).

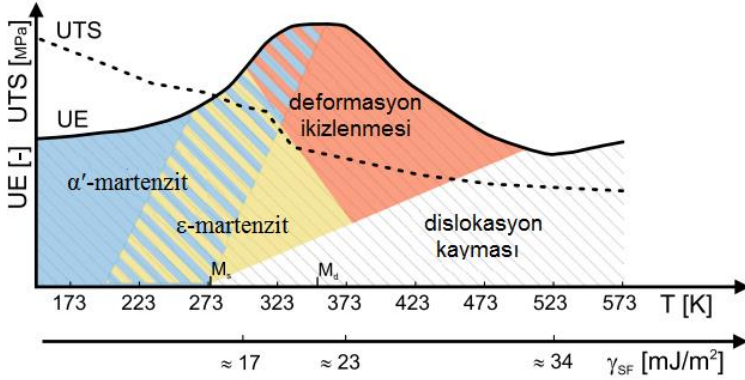
Matris fazındaki dönüşümün plastik deformasyona bağlı olarak gerçekleşmesi sırasında, dislokasyonların sürekli parçalanmasına neden olan  $\alpha'$ -martenzit çekirdekleri dislokasyon hareketini engelleyen ana engel olmaktadır.  $\alpha'$ -martenzitin çekirdeklenmesi kayma bantlarındaki HSP  $\varepsilon$ -martenzitlerin oranına bağlıdır.  $\alpha'$ -martenzitin çekirdeklenmesi birincil kayma sistemlerindeki dislokasyon hareketlerini de engellemektedir. Deformasyon mekanizmaları, kayma bantlarındaki kısmi dislokasyon hareketine karşı güçlü engeller olarak işlev görmekte, deformasyon sertleşmesine ve güçlü bir Hall-Petch etkisine yol açmakta ve böylece mukavemet artışı sağlanabilmektedir (Linderov vd. 2014;

Martin vd., 2015).  $\alpha'$ -martenzit dönüşümü sırasında hacimsel artış,  $\epsilon$ -dönüşümü sırasında ise az miktarda hacimsel düşüş meydana gelmektedir (Vinogradov vd., 2013). Plastik gerinim arttığında, dislokasyon yığılmaları dislokasyonların hareketini güçleştirerek adyabatik ısınmaya neden olmaktadır. Deformasyon sırasında açığa çıkan ısının tamamının dağıtılması zor olduğundan, yüksek gerinimlerde martenzit oluşumu adyabatik ısınmayla baskılanmaktadır (Shen vd., 2012).

Deformasyon mekanizmaları; kimyasal bileşime, deformasyon sıcaklığına ve gerilme oranına büyük ölçüde bağlıdır. Bununla birlikte, kimyasal bileşim ve sıcaklık, istiflenme kusur enerjisini (SFE) ve östenit stabilitesini etkilemekte, dolayısıyla, genel deformasyon davranışında değişikliklere neden olmaktadır (Linderov vd., 2014; Vinogradov, vd., 2013). SFE'nin artan sıcaklıkla yükselmesi, yüksek sıcaklıklarda mekanik ikizlenmeye geçişe neden olmaktadır. Bundan dolayı, yüksek sıcaklıklarda TRIP (dönüşüm kaynaklı plastisite) etkisinden TWIP (ikizlenme kaynaklı plastisite) etkisine geçiş gözlenmektedir (Martin vd., 2013). Mikroyapısal kararlılığın artmasıyla artan aktivasyon gerilmesi, yüksek sıcaklıklarda toplam  $\alpha'$ -martenzit miktarının azalmasına, ikizlenme ve dislokasyon kayması gibi diğer deformasyon mekanizmalarında ise artışa neden olmaktadır (Linderov vd., 2014).

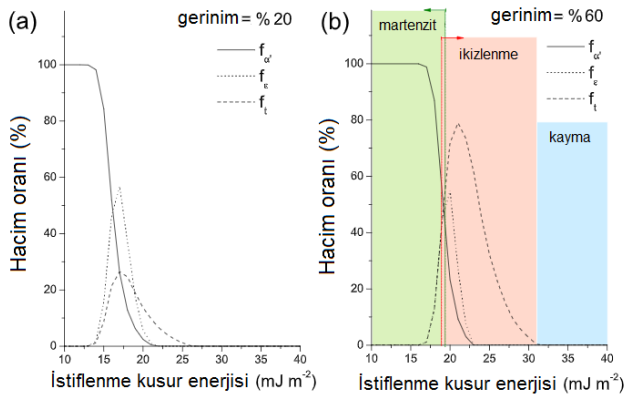
Martin vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada; yüksek alaşımlı, östenitik, CrMnNi TRIP/TWIP çeliklerinde ortaya çıkan deformasyon mekanizmalarının, sıcaklık, SFE ve mekanik özelliklere göre değişimi incelenmiş ve düşük sıcaklık değerlerinde  $\alpha'$ -martenzitlerin, daha yüksek sıcaklıklarda ise  $\epsilon$ -martenzit aracılığıyla ikizlenmelerin oluştuğu ve TRIP'ten TWIP'e sürekli bir geçişin meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 10). İstifleme kusuru enerjisi (SFE)'nin düşük olması durumunda, geniş istiflenme kusurları meydana gelmektedir. CrMnNi çelikleri içerisindeki alaşım elementleri, östenitin istiflenme kusuru enerjisini (SFE) düşürmektedir. Cr, Mn, Co, Si, C ve N elementleri, östenitin istiflenme kusur enerjisini düşürürken Ni ise östenitin istiflenme kusur enerjisinin yükselmesine neden olmaktadır (Bhadeshia ve Honeycombe, 2017) (Jahn vd., 2009). Genellikle istiflenme kusur enerjisi yaklaşık olarak 15–20 mJ/m<sup>2</sup> 'nin altındayken  $\epsilon$  ve  $\alpha'$ -martenzite dönüşüm gerçekleşmekte; daha yüksek istiflenme kusur enerjisi değerlerinde ise deformasyon kaynaklı ikizlenmeler (mekanik ikizlenmeler) oluşmaktadır. Daha yüksek istiflenme kusur enerjisindeyken bile, dislokasyon kayması ana

deformasyon mekanizmasıdır (Martin vd., 2013) (Bhadeshia ve Honeycombe, 2017) (Shen vd., 2012).



**Şekil 10.** CrMnNi TRIP/TWIP çeliklerinde ortaya çıkan deformasyon mekanizmalarının sıcaklık, SFE ve mekanik özelliklere göre değişimi (Martin vd., 2016).

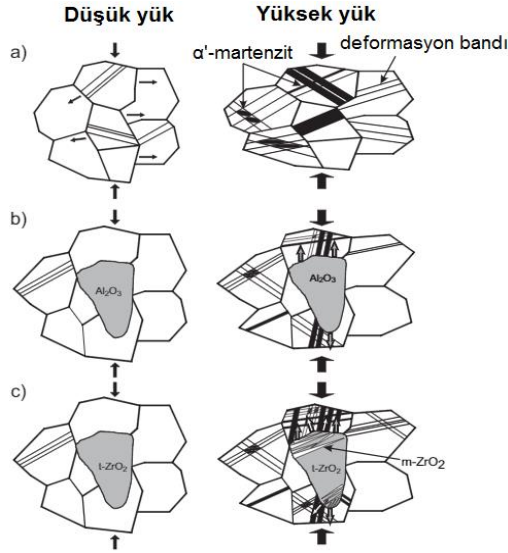
Galindo-Nava ve Rivera-Díaz-del-Castillo (2017), yaptıkları bir çalışmada %20 ve %60 gerinim değerlerinde  $\alpha'$  ve  $\epsilon$ -martenzit, kayma ve ikizlenme oranlarının farklı istiflenme kusur enerjilerine (SFE) göre değişimini incelemiştir (Şekil 11(a)). Beklenildiği gibi, düşük SFE değerlerinde martenzit, daha yüksek SFE değerlerinde ise ikizlenme ve kayma deformasyon mekanizmaları meydana geldiğini belirtmişlerdir.



**Şekil 11.** (a) %20 ve (b) %60 gerinim değerleri için farklı istiflenme kusur enerjilerine bağlı olarak oluşan  $\alpha'$  ve  $\epsilon$ -martenzit, kayma ve ikizlenmelerin hacim oranları (%) (Galindo-Nava ve Rivera-Díaz-del-Castillo, 2017).

TRIP ve TWIP mekanizmasının etkili olduğu çeliklerde, kimyasal bileşimin mikroyapı dönüşümleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan bir çalışmada (Hadji ve Badji, 2002), ağırlıkça %8 ve 10 oranında Ni elementinin olduğu 304 paslanmaz çelikte, mekanik ikizlenmeler,  $\epsilon$  ve  $\alpha'$ -martenzit oluşumu meydana gelirken; 316 paslanmaz çelikte ise  $\epsilon$  martenzit oluşumuna rastlanmamıştır. Bununla birlikte, 316L paslanmaz çeliklerinde, düşük sıcaklık ve çevrimsel deformasyon uygulanması durumunda çok az sayıda martenzit oluştuğunu gösteren çalışmalar da mevcuttur (Man vd., 2011; Weidner vd., 2011).

Takviye partikülleri içermeyen (takviyesiz) bir çeliğin östenit tane yapısı, düşük yüklerde, yükün yönüne ve belirli kayma düzlem ve doğrultulara bağlı olarak kolay bir şekilde deformasyona uğrarken (Şekil 12(a)),  $Al_2O_3$  ya da Mg ile stabilize edilmiş  $ZrO_2$  (Mg-PSZ) takviye partikülleri ile takviye edilmesi durumunda ise düşük yüklerde daha az östenit tanesinde deformasyon meydana gelmektedir (Şekil 12(b) ve (c)). Yüksek deformasyon yüklerinde ise takviyesiz çelik ile  $Al_2O_3$  ya da  $ZrO_2$  takviye partikülleri içeren çeliğin östenit tanelerinde daha çok sayıda kayma bantları oluşmakta ve bu kayma bantlarının birbirleriyle kesiştikleri bölgelerde deformasyon dönüşümüne bağlı olarak  $\alpha'$ -martenziti meydana gelmektedir. Bununla birlikte, deformasyon sırasında takviye fazı  $ZrO_2$ 'nin tetragonalardan monoklinik faza dönüşümü hacim artışına neden olmaktadır. Hacim artışı, gerinimi daha da arttırarak plastik deformasyonu, dolayısıyla da, östenit tanelerindeki faz dönüşümünün daha yüksek miktarlarda olmasını sağlamaktadır.



**Şekil 12.** (a) Takviyesiz, (b)  $Al_2O_3$  takviyeli ve (c)  $ZrO_2$  takviyeli TRIP matris kompozitlerde matris ve takviye partikülleri arasındaki etkileşime bağlı kayma bandı ve  $\alpha'$ -martenzit oluşumu (Martin, S. et al., 2011).

TRIP çeliklerinde, yarı kararlı östenit tanelerinin plastik deformasyonu sırasında, martenzit ve ikizlerin oluşmasıyla süneklikte önemli bir artış elde edilebilmektedir. Bu nedenle, gerilme ve gerinim etkili martenzit ve ikizlerin oluşabileceği sıcaklık ve gerilme değerlerini tanımlamak gerekmektedir.

TRIP ve TWIN çeliklerinde deformasyon sırasında oluşan mekanizmaların birden fazlası aynı anda meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, (i) plastik deformasyonun karmaşıklığı–dislokasyon kayması, ikizlenme ve martenzitik dönüşümün dahil olduğu birincil mekanizmalar arasındaki etkileşimin daha iyi anlaşılması; (ii) deformasyon işlemlerinin kinetiğinin araştırılması ve (iii) mekanizmaların her biri için başlangıç gerilmeleri ve/veya gerinimlerinin belirlenebilmesi, yeni malzemelerin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Vinogradov vd., 2013).

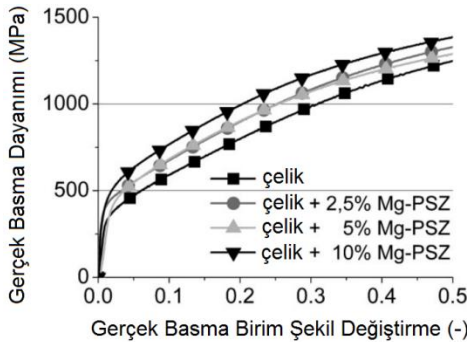
### 3.1.2. Takviye dönüşümü

TRIP çelik matrisli kompozitlerde takviye fazı olarak genellikle zirkonyum dioksit ( $ZrO_2$ ) partikülleri tercih edilmektedir. Kararlı olmayan (stabilize edilmemiş) bir zirkonyum dioksit ( $ZrO_2$ ), sıcaklığa bağlı olarak üç farklı faz halinde kararlı yapıya ulaşmaktadır. Sıcaklığa ve kimyasal bileşime bağlı olarak  $ZrO_2$  kübik fazdan tetragonal faza dönüşmektedir (Berek vd., 2011).  $ZrO_2$ 'nin faz dönüşümlerinde sırasıyla;

kübik fazdan → tetragonale, tetragonalardan → stabil monoklinik faza dönüşüm gerçekleşmektedir.  $ZrO_2$  genellikle  $MgO$ ,  $Y_2O_3$  veya  $CeO_2$  ile stabilize edilmektedir (Biermann vd., 2009; Bokuchava vd., 2018; Schärfl vd., 2011).

TRIP çelik matrisli kompozitlerde takviye elamanları, plastik deformasyonunun artmasını sağlayarak hem mukavemeti hem de  $\alpha'$ -martenit çekirdeklenmesini arttırmaktadır. Takviye fazı olarak stabilize edilmiş  $ZrO_2$  kullanıldığında, plastik deformasyonla oluşan gerilme sayesinde,  $ZrO_2$ 'nin kübik ve tetragonal fazları monoklinik faza dönüşmektedir. Ayrıca, kübik ve tetragonal fazlardan monoklinik faza dönüşüm, TRIP çelik matris ve takviye partikülleri arasında meydana gelebilecek arayüzey ayrılmasına karşı olumlu yönde etki etmektedir (Prüger vd., 2013). TRIP çelik matris kompozitlerdeki matris ve takviye fazları arasındaki arayüzeyin güçlü olması, daha homojen  $ZrO_2$  faz dönüşümü sağlamaktadır. Monoklinik yapıdaki  $ZrO_2$ 'nin kübik ve tetragonal fazlardan daha büyük bir özgül hacme sahip olması nedeniyle, bu faz dönüşümü TRIP çelik matris kompozitin mikroyapısında basma gerilmelerine neden olmaktadır. Bununla birlikte, kayma gerilmeleri de çelik matristen takviye partiküllere iletilmekte ve  $ZrO_2$  fazındaki dönüşüme katkıda bulunmaktadır.

$ZrO_2$  gibi takviye fazlarının dönüşüm mekanizmaları sayesinde, TRIP çelik matrisli takviye edilmiş kompozitler, takviyesiz TRIP çeliğine kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip olabilmektedir (Şekil 13) (Krüger vd., 2011).



**Şekil 13.** TRIP çeliği (takviyesiz) ve TRIP çeliği matrisli kompozitlerde Mg ile kısmen stabilize edilmiş  $ZrO_2$  (Mg-PSZ) partikül takviye oranının basma özellikleri üzerindeki etkisi (Krüger vd., 2011).

Bununla birlikte, literatürde TRIP çelik matrisli kompozitler ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda mikron boyutunda takviyeler kullanılmıştır (Eckner vd., 2016; Kirschner vd., 2019; Martin vd., 2013). Takviye partikül boyutunun mikrondan nanoya azaltılması durumunda, tane küçülmesi gibi mekanizmalar devreye sokularak TRIP çelik matrisli nano partikül takviyeli kompozitlerin basma dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikleri daha da fazla geliştirilebilmektedir (Sevinç, 2019).

#### **4. Sonuç**

TRIP çelikleri, yüksek mukavemetin yanında yüksek süneklik ve darbe direnci gibi özelliklerin aynı anda sağlanabildiği bir malzeme olduğundan, özellikle otomotiv endüstrisinde sürekli artmakta olan bir kullanım alanına ve payına sahiptir. Bununla birlikte, otomotiv sektöründe, üretilen bir parçada yüksek mukavemet, yüksek süneklik ve darbe direnci gibi özelliklerin yanında hafiflik ve yüksek ısıl ve aşınma direnci gibi özelliklerin de olmasının beklendiği durumların karşılanabilmesi için TRIP çeliklerinin daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bütün bu özelliklerin tek bir malzemede elde edilebilmesi amacıyla, TRIP çeliklerinin seramik partiküllerle takviyelendirilerek TRIP çelik matrisli takviyeli kompozitler malzemeler geliştirilebilir. Bu durumda, TRIP çeliklerinin yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerinin yanında, seramik takviye partiküllerinin yoğunlukları TRIP çeliklerinin yoğunluklarından daha düşük olduğu için daha hafif parçaların üretimi de sağlanabilir. Bununla birlikte, yüksek ısı ve aşınma direncine sahip seramik takviyeler sayesinde ısıl ve aşınma direnci TRIP çeliklerinden daha yüksek TRIP çelik matrisli kompozitler geliştirilebilir. TRIP çelik matrisli kompozitler, TRIP çeliklerinden daha iyi mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen mikron boyutunda takviye partikülleri yerine nano boyutta takviyelerin kullanılması halinde çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip olabilecekler ve böylece özellikle otomotiv endüstrisindeki parça üretiminde ciddi oranda kullanım payına sahip olacaklardır.





## KAYNAKLAR

1. Altenbach, H., Matsuda, T. and Okumura, D. (Eds.) (2015). *From Creep Damage Mechanics to Homogenization Methods*. Switzerland: Springer.
2. Aslan, M., Steffen, G., Lutz, K., Sergey K., and Nachum F. (2016). Bonding of TRIP-Steel/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(3Y)-TZP Composites and (3Y)-TZP Ceramic by a Spark Plasma Sintering (SPS) Apparatus. *Materials*, 9(558), 1-11.
3. Astrid, P., Annie, A., Rémy, B., Daniel, C., Michael C., Jonathan, E., Anne-Françoise, G., Philippe, M., Aurore, M., Ludovic, T., Quentin, T. and Jean-Hubert, S. (2019). Development of 3rd generation Medium Mn duplex steels for automotive applications. *Materials Science and Technology*, 35(2), 204-219.
4. Baluch, N., Udin, Z.M., Abdullah, C.S. (2014). Advanced High Strength Steel in Auto Industry: an Overview. *Engineering. Technology & Applied Science Research*, 4(4), 686-689.
5. Berek, H., Yanina, A., Weigelt, C., and Aneziris, C.G. (2011) Determination of the Phase Distribution in Sintered TRIP-Matrix / Mg-PSZ Composites using EBSD. *Steel Research International*, 82(9), 1094-1100.
6. Bhadeshia, H., Honeycombe R. (2017). *Steels: Microstructure and Properties*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
7. Bhargava, M., Shanta, C., Asim, T. and Sushil, M. (2015). Texture Developed During Deformation of Transformation Induced Plasticity (TRIP) Steels. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 82, 1-4.
8. Biermann, H., Aneziris, C.G. and Kuna, M. (2009) Collaborative Research Center TRIP-Matrix-Composite. *ESOMAT 2009*, 05002, 1-5.
9. Biermann, H., Aneziris, C.G., Kolbe, A., Martin, U., Müller and Schärfl, A. W., Herrmann M. (2010). Microstructure and compression strength of novel TRIPsteel/ Mg-PSZ composites. *15th International Conference on the Strength of Materials (ICSMA-15)*, IOP Publishing *Journal of Physics: Conference Series*, 240(012099), 1-4.
10. Bokuchava, G.D., Gorshkova, Y.E., Papushkin, I.V., Guk, S.V. and Kawalla, R. (2018). Investigation of Plastically Deformed TRIPComposites by Neutron Diffraction and Small-Angle Neutron Scattering Methods. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 12(2), 227-232.

11. Borisova, D., Klemm, V., Martin, S., Wolf, S. and Rafaja, D. (2013). Microstructure Defects Contributing to the Energy Absorption in CrMnNi TRIP Steels. *Advanced Engineering Materials*, 15(7), 571-581.
12. Broek, C.T., Singh, H., Hillebrecht, M. (2012). Lightweight Design for the Future Steel Vehicle. *ATZ worldwide*. 114(5), 4-11.
13. Chaowei, D. (2016). *Micro-plasticity Characterization of Martensite, Ferrite, and Dual-phase Steel*. (Doktora tezi). Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
14. Das, S. (2001). Technical Report: The Cost of Automotive Polymer Composites: A Review and Assessment of DOE's Lightweight Materials Composites Research. *U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information*, 1-37. DOI: 10.2172/777656.
15. De Cooman, B.C. (2004). Structure–Properties Relationship in TRIP Steels Containing Carbide-Free Bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8, 285–303.
16. Eckner, R., Krampf, M., Segel, C., Krüger, L. (2016). Strength and Fracture Behavior of a Particle-Reinforced Transformation-Toughened TRIP Steel/ZrO<sub>2</sub> Composite. *Mechanics of Composite Materials*, 51(6), 707-720.
17. Fentahun, M.A. and Savaş, M.A. (2018). Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts. *International Journal of Materials Engineering*, 8(3), 40-54.
18. Galán, J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K. and Houbaert, Y. (2012). Advanced high strength steels for automotive industry. *Revista de Metalurgia*, 48(2), 118-131.
19. Galindo-Nava, E.I., Rivera-Díaz-del-Castillo, P.E.J. (2017) Understanding Martensite and Twin Formation in Austenitic Steels: A Model Describing TRIP and TWIP Effects. *Acta Materialia*, 128, 120-134.
20. Glage, A., Weider, M., Hasterok, M., Weidner, A., Eigenfeld, K., Anziris, C.G. and Biermann, H. (2011). Mechanical Properties of Metal Matrix Composites Based on TRIP Steel and ZrO<sub>2</sub> Ceramic Foams. *Procedia Engineering*, 10, 548–555.
21. Glage, A., Weigelt, C., Rathel, J. and Biermann, H. (2013). Influence of Matrix Strength and Volume Fraction of Mg-PSZ on the Cyclic Deformation Behavior of Hot Pressed TRIP/TWIP-Matrix Composite Materials, *Advanced Engineering Materials*, 15(7), 550-557.

22. Hadji, M. and Badji, R. (2002) Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels After Cold Rolling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11(2), 145-151.
23. Hardy, M. (2015). Martensitic Automotive Steel Sheet - Fundamentals and Metallurgical Optimization Strategies. *Advanced Materials Research*, 1063, 130-142.
24. Horvath, C.D. (2010). Advanced Steels for Lightweight Automotive Structures. P.K. Mallick (Ed.), *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles* içinde (s. 35-78). New York: CRC Press.
25. Hovorun, T.P., Berladir, K.V., Pererva, V.I., Rudenko, S.G., Martynov, A.I. (2017). Modern Materials for Automotive Industry. *Journal of Engineering Sciences*, 4(2), F8-F18.
26. Jahn, A., Kovalev, A., Weiß, A., Scheller, P.R., Wolf, S., Krüger, L., Martin, S., Martin, U. (2009). Mechanical Properties of High Alloyed Cast and Rolled CrMnNi TRIP Steels with Varying Ni Contents. *ESOMAT 2009*, 05013, 1-7.
27. Jeong, M.L., Byeong, J.M., Joon, H.P., Dong, H.K., Byung, M.K. and Dae, C.K. (2019). Design of Lightweight CFRP Automotive Part as an Alternative for Steel Part by Thickness and Lay-Up Optimization. *Materials*, 12(14):(2309), 1-12.
28. Katie, S., Susan, S.B., Simon, T. and Edwin, T. (2014). Challenges and Alternatives to Plastics Recycling in the Automotive Sector Lindsay Miller. *Materials*, 7, 5883-5902.
29. Kirschner, M., Eckner, R., Gu, S., Krüger, L., Kawalla, R., Prahl, Ü. (2019). Deformation Behavior of Particle Reinforced TRIP Steel/MgPSZ Composite at Hot Working Temperatures. *Steel Research International*, 90(6): 1800334,1-6.
30. Kovalev, A., Wendler, M., Jahn, A., Weiß, A. and Biermann, H. (2013). Thermodynamic-Mechanical Modeling of Strain-Induced  $\alpha'$ -Martensite Formation in Austenitic Cr-Mn-Ni As-Cast Steel. *Advanced Engineering Materials*, 15(7), 609-617.
31. Krüger, L., Decker, S., Ohser-Wiedemann, R., Ehinger, D., Martin, S., Martin, U. and Seifert, H.J. (2011). Strength and Failure Behaviour of Spark Plasma Sintered Steel-Zirconia Composites Under Compressive Loading. *Steel Research International*, 82(9), 1017-1021.
32. Kuziak, R., Kawalla, R., Waengler, S. (2008). Advanced High Strength Steels for Automotive Industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2), 103-117.

33. Lin, L., Hu, J. (2016). Application of Thermodynamics in Designing of Advanced Automotive Steels. *Advances in Manufacturing*, 4(4), 340-347.
34. Linderov, M., Segel, C., Weidner, A., Biermann, H. and Vinogradov, A. (2014). Deformation Mechanisms in Austenitic TRIP/TWIP Steels at Room and Elevated Temperature Investigated by Acoustic Emission and Scanning Electronmicroscopy. *Materials Science & Engineering A*, 597, 183–193.
35. Ma, Y., Song, W. and Bleck, W. (2017). Investigation of the Microstructure Evolution in a Fe-17Mn-1.5Al-0.3C Steel via In Situ Synchrotron X-ray Diffraction during a Tensile Test. *Materials*, 10(1129), 1-16.
36. Man, J., Obrtlík, K., Petre nec, M., Beran, P., Smagac, M., Weidner, A., Dluhoš, J., Kruml, T., Biermann, H., Eifler, D., Polák J. (2011). Stability of Austenitic 316L Steel against Martensite Formation During Cyclic Straining. *Procedia Engineering*, 10, 1279–1284.
37. Martin, S., Richter, S., Decker, S., Martin, U., Krüger, L. and Rafaja D. (2011). Reinforcing Mechanism of Mg-PSZ Particles in Highly-Alloyed TRIP Steel. *Steel Research International*, 82(9), 1133-1140.
38. Martin, S., Decker, S., Krüger, L., Martin, U. and David, R.. (2013). Microstructure Changes in TRIP Steel/Mg-PSZ Composites Induced by Low Compressive Deformation. *Advanced Engineering Materials*, 15(7), 600-607.
39. Martin, S., Wolf, S., Decker, S., Krüger, L. and Martin, U. (2015). Deformation Bands in High-Alloy Austenitic 16Cr6Mn6Ni TRIP Steel: Phase Transformation and Its Consequences on Strain Hardening at Room Temperature, *Steel Research International*, 86(10), 1187-1196.
40. Martin, S., Wolf, S., Martin, U, Krüger, L., David, R. (2016). Deformation Mechanisms in Austenitic TRIP/TWIP Steel as a Function of Temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47A, 49-58.
41. Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A., Varachia, F.M. (2017). Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. *Procedia Manufacturing*, 7, 178-182.
42. Miklos, T., Imre, C. (2018). Comparative Study of the Application of Steels and Aluminium in Lightweight Production of Automotive Parts. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1, 229-238.

43. Olivier, B., Hatem, Z. and Mingxin, H. (2013). Driving Force and Logic of Development of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications. *Steel Research International*, 84(10), 937-947.
44. Pla-Ferrando, R., Sánchez-Caballero, S., Selles, M.A., Martínez-Sanz, A.V. TWIP/TRIP Steels. *Future Trends in Automotive Industries. Fascicle of Management and Technological Engineering*, NR3, 1.23-1.26.
45. Prüger, S., Mehlhorn, L., Mühlich, U. and Kuna, M. (2013). Study of Reinforcing Mechanisms in TRIP-Matrix Composites under Compressive Loading by Means of Micromechanical Simulations. *Advanced Engineering Materials*, 15(7), 542-549.
46. Schärfl, W., Berek H., Aneziris, C.G., Weider, M. and Yanina, A. (2011). Phase Composition of Mg-PSZ in Manganese Alloyed TRIP-Steel MMC Processed via Steel Casting and Conductive Sintering. *Advanced Engineering Materials*, 13(6), 480-486.
47. Sevinç, Ö. (2019). *Nano Partikül Takviyeli TRIP Matris Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilmesi ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir).
48. Shen, Y.F., Li, X.X., Sun, X., Wang, Y.D. and Zuo, L. (2012). Twinning and Martensite in a 304 Austenitic Stainless Steel. *Materials Science and Engineering A*, 552, 514–522.
49. Todor, M.P., Kiss, E. (2016). Systematic Approach on Materials Selection in the Automotive Industry for Making Vehicles Lighter, Safer and More Fuel-Efficient. *Applied Engineering Letters*, 1(4), 91-97.
50. Vinogradov, A., Lazarev, A., Linderov, M., Weidner, A., Biermann, H. (2013). Kinetics of Deformation Processes in High-Alloyed Cast Transformation-Induced Plasticity/Twinning-Induced Plasticity Steels Determined by Acoustic Emission and Scanning Electron Microscopy: Influence of Austenite Stability on Deformation Mechanisms. *Acta Materialia*, 61, 2434–2449.
51. Weidner, A., Glage, A., Martin, S., Man, J., Klemm, V., Martin, U., Polák, J., Rafaja, D., Biermann, H. (2011). Microstructure of Austenitic Stainless Steels of Various Phase Stabilities After Cyclic and Tensile Deformation. *International Journal of Materials Research*, 102(11), 1374-1377.
52. Weidner, A. and Biermann, H. (2015). Combination of Different In Situ Characterization Techniques and Scanning Electron Microscopy Investigations for a Comprehensive Description of the Tensile Deformation

Behavior of a CrMnNi TRIP/TWIP Steel. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 67(8), 1729-1747.

53. Weigelt, C., Schmidt, G., Aneziris, C.G., Eckner, R., Ehinger, D., Krüger, L., Ullrich, C., Rafaja, D. (2017). Compressive and Tensile Deformation Behaviour of TRIP Steel-Matrixcomposite Materials with Reinforcing Additions of Zirconia and/or Aluminium Titanat. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 9-20.
54. Wolfgang, B., Xiaofei, G., and Yan, Ma. (2017). The TRIP Effect and Its Application in Cold Formable Sheet Steels. *Steel Research International*, 87, 1-21.

**BOR ENDÜSTRİSİ ATIK ÇAMURU  
SÜZÜNTÜ SUYUNUN İNŞAAT  
SEKTÖRÜNDE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**BÖLÜM  
10**

**Aylin AKYILDIZ<sup>1</sup>,  
Esra TINMAZ KÖSE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi ; Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü; aakyildiz@nku.edu.tr

<sup>2</sup> Doç. Dr., Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü; etinmaz@nku.edu.tr





## 1. Giriş

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementlerden biridir. Doğal koşullarda serbest element olarak bulunmayan bor oksijenle bileşik yapmış halde (bor oksit olarak) bulunur ve en sık rastlanan bor mineralleri boratlardır. Doğada yaklaşık 230'dan fazla bor minerali mevcut olmakla birlikte bunların içinde ticari açıdan en önemlileri tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandermite, borasit, szaybelit ve hidroborasittir [1].

Dünya'daki bor yatakları içinde ekonomik değeri en yüksek olanları Türkiye'de ve Amerika Birleşik Devletleri'nde ve bu ülkelerin de özellikle kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu yerlerde dir. Ekonomik açıdan bakıldığında Türkiye'deki en önemli bor yataklarının bulunduğu yerler Kırka (Eskişehir), Bigadiç (Balıkesir), Kestelek (Bursa) ve Emet (Kütahya)'tir [2, 3, 4].

Dünya genelindeki bor ürünlerinin tüketimi incelendiğinde 2000 yılındaki tüketim 3,1 milyon ton iken, bu değer 2014'te 4,3 milyon tona, 2015'te 3,8 milyon tona, 2016'da 3,77 milyon tona ve 2017'de ise 3,87 milyon tona ulaşmıştır. Tüketim değerleri sektörler bazında incelendiğinde, bor tüketiminin en yüksek değere sahip sektörün %47 oranla cam sektörüne ait olduğu görülmektedir. Bunu %16 ile tarım (özellikle gübre üretimi), %15 ile seramik ve %2 ile temizlik ve deterjan sektörleri takip etmektedir [5].

Ülkemizde her yıl bor mineralleri üretimiyle 600.000 ton atık ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların değerlendirilmesiyle hem atık bertaraf maliyetleri azalabilir hem de atıkların hammadde olarak kullanılmasıyla üretilen yeni ürün ile ülke ekonomisine katkı sağlanır [6].

Bor atıklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların çoğunluğu mevcut yaş atıklarının değerlendirilmesi üzerinedir. Bor atıklarının seramik sektöründe (sır, çini hamuru, döküm çamuru yapımı, yer ve duvar karosu), yapı sektöründe (çimento, hazır beton, hafif yapı elemanı, tuğla ve kiremit üretiminde), ayrıca cam, emaye ve silika refrakterler için hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılabilir. [7].

Literatürdeki mevcut pek çok çalışmada bor atıklarının geri dönüşümü ve tekrar kullanımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, bor atıklarının katı atık düzenli depolama tesislerinde geomembran tabaka olarak kullanımı [7], ince agrega ve filler olarak asfalt betonlarında kullanılabilirliği [8],

geleneksel Kastamonu evlerinde kullanılan harman tuğlasında katkı malzemesi olarak kullanımı [9]; öğütülmüş kolemanit katkısının çimento harçlarına etkisi [10]; bor atıklarının halı atıkları ile birlikte ve izolasyon malzemesi üretiminde kullanımı [11]; bor içeren sentetik atıksuların portland çimentosu harcı üretiminde kullanımı [12] araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, bor endüstrisi atık çamurunun süzülmesi sonucu elde edilen sıvının harç karma suyu olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bu amaçla, söz konusu sıvı kısım musluk suyu yerine belirli oranlarda ikameli olarak kullanılmıştır. Böylelikle atık barajında depolanan ve bu nedenle çeşitli çevresel olumsuzluklara neden olabilen bir atığın farklı bir kullanım alanı ele alınarak farklı bir sektörde yeniden değerlendirilmesi incelenmiştir. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışma, atık yönetim sistemi içinde geri dönüşüm/tekrar kullanım faaliyetleri kapsamında önemli bir adım olarak ele alınabilir.

Türkiye’de daha önce bor endüstrisinden kaynaklanan atıksuların kullanıldığı tek çalışmada (Yılmaz, 2016) sentetik olarak hazırlanan atıksu kullanılmıştır. Bu çalışma ise gerçek atığın kullanıldığı tek çalışma olması nedeniyle özgün bir çalışmadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada, bor endüstrisi atık çamurunun süzülmesi sonucu elde edilen sıvı kısım materyal olarak kullanılmıştır. Atık çamur, Eti Holding Eti Bor A.Ş.’ye ait Kütahya-Hisarcık-Emet çamur depolama alanından temin edilmiştir. Harç üretiminde kullanılan bor çamuru suyu (BS), bor endüstrisi atık çamurunun 0,45 µm gözenek aralığına sahip filtreden süzülmesi yoluyla elde edilmiştir.

Harç üretiminde kullanılmak üzere, Akçansa çimento fabrikasından temin edilen ve TS EN 197-1 [13] standardına uygun olan CEM I 42.5 çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1** Çimentonun Özellikleri

Bileşim (%)	CEM I 42.5 R
CaO	62,62
SiO <sub>2</sub>	19,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,23

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,60
MgO		0,85
SO <sub>3</sub>		3,23
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O		0.58/0.74
Cl <sup>-</sup>		0.03
H <sub>2</sub> O		-
Kızdırma kaybı		2,45
Çözünmez kalıntı		0,96
Tayin edilemeyen kalıntı		0,79
S.CaO-Free Lime		1.20
<hr/>		
Fiziksel özellikler		
<hr/>		
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )		3 .16
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)		3 550
Priz süresi (min)	Başlangıç	1 19
	Bitiş	170
Hacim genişmesi (mm)		1
<hr/>		
Mekanik özellikler		
<hr/>		
Dayanım (MPa)	2 günlük	31,4
	7 günlük	43,8
	28 günlük	60,1
<hr/>		
Mineralojik bileşim		
<hr/>		
C <sub>3</sub> S		49,39
C <sub>2</sub> S		19,81
C <sub>3</sub> A		7,78
C <sub>4</sub> AF		10,96
<hr/>		

Harç üretiminde kullanılan standart rilem kumu, Limak A Ş'den temin edilmiş olup TS-EN 196-1[14] Standartlarına uygundur ve kumun dağılımı Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2. Kumun Dağılımı**

Elek aralığı (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Elekte kalan yığılımsı (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Harç katkı oranları TS EN 196-1 [14] standardı gereği kütlece bir birim çimento, üç birim kum ve 1/2 birim su oranları baz alınarak üretilmiştir. Üretilen harç, 40x40x160 mm'lik kalıplara döküldükten 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak 7 ve 28 gün kür edilmiştir.

Üretilen numunelerde kullanılan sıvı bor atığının karakterizasyonu amacıyla As, Cr, Ba, Cd, Ni, Hg, Mo, Sb, Pb, Zn, Se, B, Cu, Ca, Na parametrelerinin analizleri yapılmıştır. Söz konusu analizler, ICP-OES cihazı ile ölçülmüştür. Analizi yapılan parametrelerden Cr, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn, Se ve Cu sıvı bor atığında gözlenmemiştir. Diğer parametrelerin analiz sonuçları ise Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3 Sıvı Bor Atığı Analiz Sonuçları**

Parametre	As	Ba	Mo	Sb	B	Ca	Na
Birim	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppm	ppm
Değer	376,7 74	236,3 48	3682, 14	4,7 79	4764 15	214, 26	235,9 78

Su/çimento oranı 0.50 olacak şekilde üretilen harç numunelerinde BS, karışım suyu yerine %5, 10, 25, 50 ve 100 oranlarında yer değiştirmeli olarak kullanılmıştır. Karışım oranları Tablo 4'te verilmiştir.

**Table 4** Karışım oranları

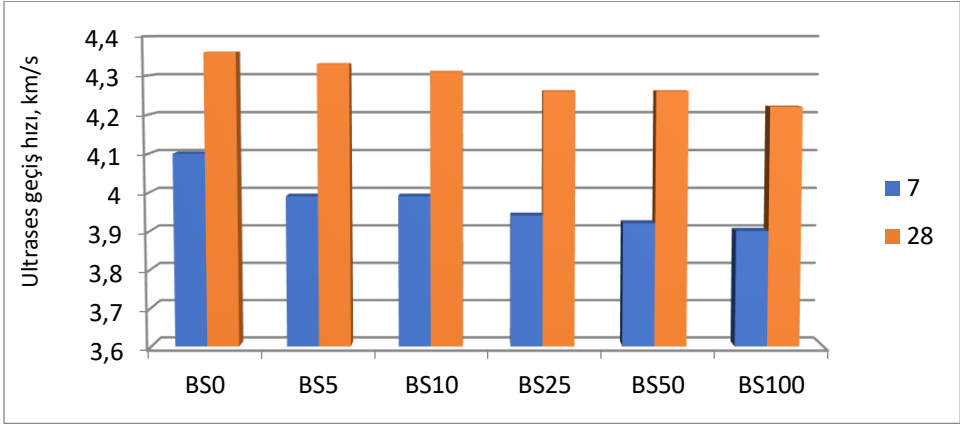
Karışım	Katkı oranı, %	Çimento, g	Su, g	BS, g	Kum, g
BS0	0	450	225	-	1350
BS5	5	450	213.75	11.25	1350
BS10	10	450	202.5	22.5	1350
BS25	25	450	168.75	56.25	1350
BS50	50	450	112.5	112.5	1350
BS100	100	450	0	225	1350

7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Söz konusu dayanım değerleri TS EN 196-1 [14] standartları gereğince Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. 7, 28 gün sonra numunelerin eğilme ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 196-1'e [14] göre yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyi TS EN 12504-4'ye [15] göre yapılmıştır.

### 3. Deney Sonuçları

#### 3.1. Ultrases geçiş hızı

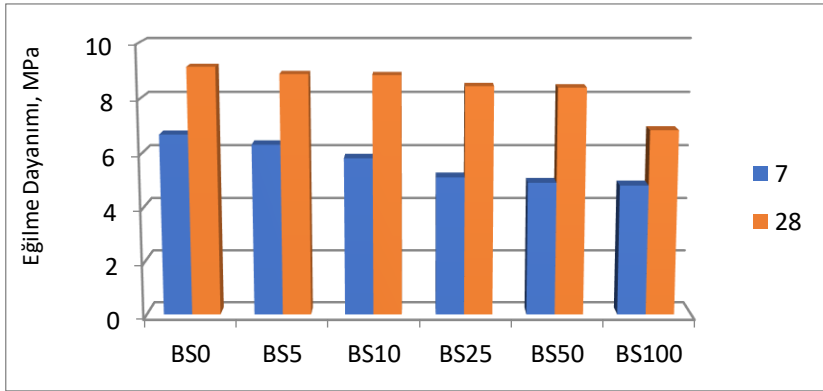
Ultra ses geçiş hızı, BS katkısız olarak üretilen 7 günlük şahit numunede 4,10 km/s olarak ölçülürken aynı değer 28 günlük numune 4,36 km/s olarak ölçülmüştür. Her iki kür süresi için hazırlanan numunelerde, BS katkı oranı arttıkça ultra ses geçiş hızı nispeten azalmıştır. %5 ve 10 katkı oranları ve %25, 50 ve 100 katkı oranları kendi aralarında değerlendirildiğinde her iki kür süresinde de birbirine oldukça yakın değerler tespit edilmiştir. Farklı katkı oranlarıyla üretilen harc numunelerinin şahit numuneye göre hesaplanan ultrases geçiş hızındaki azalma oranı 7 ve 28 günlük numuneler için sırasıyla %4,88 ve %3,21'dir. Ultra ses geçiş hızının katkı oranlarına göre değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



*Şekil 1. BS Katkı Oranına Bağlı Olarak Ultras ses Geçiş Hızı Değişimi*

### 3.2 Eğilme dayanımı

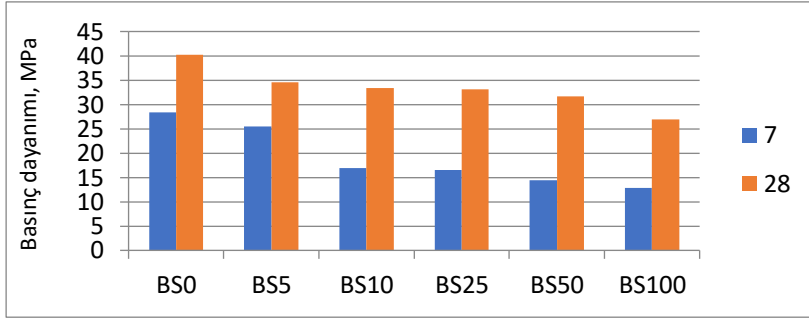
Katkı oranlarına bağlı olarak eğilme dayanımındaki değişimler Şekil 2’de verilmiştir. Katkı oranlarındaki artış eğilme dayanımındaki nispi azalış ile sonuçlanmış olmakla birlikte 28 günlük harç numunelerindeki azalma oranı %100 katlı oranında diğer oranlara göre daha fazla olmuştur. 7 günlük numunenin eğilme dayanımındaki azalma oranı şahit numuneye göre %28,04 olarak hesaplanırken 28 günlük numuneninki %25,19’dur.



*Şekil 2. BS Katkı Oranına Bağlı Olarak Eğilme Dayanımı Değişimi*

### 3.3 Basınç dayanımı

Katkı oranlarındaki artış basınç dayanımının düşmesine neden olmuştur. 7 ve 28 günlük şahit numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 28,43 ve 40-27 MPa olarak ölçülmüştür. %100 katkı oranı ile üretilen harç numunesinin basınç dayanımı şahit numunenin basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında %54,63'lük bir azalma gözlenirken aynı değer 28 günlük numune için %33.20 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. BS Katkı Oranına Bağlı Olarak Basınç Dayanımı Değişimi

### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada bor endüstrisi atık çamurunun süzülmesi sonucu elde edilen sıvı kısmın inşaat sektöründe karışım suyu olarak kullanılması araştırılmıştır. Karışım suyu yerine ikameli olarak katılan bor atık suyunun çimento harcının dayanım ve dayanıklılık açısından etkisi incelenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

7 ve 28 günlük numunelerde katkı oranı arttıkça basınç dayanımında azalma olduğu görülmüştür. Numunelerin basınç dayanımları kür süresi ile artış göstermiştir. Kür süresi 7 ve 28 günlük olan bor suyu katkılı numunelerde basınç dayanımları karşılaştırıldığında en iyi sonucu %5 katkılı harç ile elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları basınç dayanımı ile orantılı sonuçlar almıştır. Çimento harcı numunelerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri bor atık suyu katılmamış harç numunelerine yakın değerler almıştır. Kür süresi 28 günlük olan bor suyu katkılı numunelerde eğilme dayanımlarında en iyi sonucu %10 katkılı harç ile elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında atık bor çamuru süzüntü suyunun %5 katkı oranında kullanılması ile inşaat yapı malzemesinde katkı suyu olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



## Kaynaklar

- [1] Demirel B, Nasıroğlu S, 2017. Bor Mineralleri ve Atıklarının Çimentoda Kullanılma Stratejileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29 (1): 95-100
- [2] BOREN, 2018. <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>
- [3] BOREN, 2018. <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-mineralleri>
- [4] BOREN, 2018. <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-rezervleri>
- [5] Eti Maden, 2017. <http://www.etimaden.gov.tr/dunyada-bor>
- [6] Karaağaç, Anıl, 2015. Endüstriyel Bor Atıklarından Borun Geri Kazanımı ve Nanoboroksit Eldesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Derya Ulutaş, 2015. Bor Atıklarının Katı Atık Düzenli Depolama Tesislerinde Geomembran Tabaka Olarak Kullanımı, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Keskin M, Karacasu M., 2018. Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(2): 185-192.
- [9] Çağlar A., Çağlar H., Tezel H., (2019), Geleneksel Kastamonu Evleri'nin Ahşap Yapı Elemanlarında Bozulmalar, 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Ankara.
- [10] Sallı Bideci Ö., Bideci A., 2018. Öğütülmüş Kolemanit Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(1): 133-138.
- [11] Erdoğan Y., 2016. Halı Ve Bor Atıklarından İzolasyon Malzemesi Üretimi, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 152:201-206.
- [12] Yılmaz A., 2016. Bor İçeren Atık Suların Portland Çimentosu Harcı Üretiminde Kullanılması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 18(3): 481-490.
- [13] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 197-1: 2012, Türk Standardı, Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.
- [14] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-1: 2016, Türk Standardı, Çimento Deney Metotları
- [15] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12504-4: 2012, Türk Standardı, Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini



# GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

BÖLÜM  
11

Abdullah Cem  
AĞAÇAYAK<sup>1</sup>,  
Gökhan YALÇIN<sup>2</sup>,  
Süleyman NEŞELİ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik, Konya, acagacay-ak@ktun.edu.tr

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Tek., Konya, gyalcin@ktun.edu.tr

<sup>3</sup> Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konya, sneseli@selcuk.edu.tr



## GİRİŞ

Enerji ihtiyacı her geçen gün dünyada artmaktadır. Enerji dendiğinde ilk akla gelen, ise elektrik enerjisidir. Fosil kaynaklar ile üretilen elektrik enerjisinin çevreye zarar vermesi ve gün geçtikçe azalması, devletleri ve bilimsel araştırmacıları alternatif kaynakların araştırılması ve kullanılmasına itmektedir. Günümüzde fosil kaynaklara alternatif en ideal kaynaklar yenilenebilir enerji kaynakları olarak görülmektedir. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları Güneş enerjisi, Rüzgar enerjisi, Hidrolik (hidroelektrik) enerjisi, Jeotermal enerjisi, Biyokütle enerjisi (biyoyakıt enerjisi de dahil), Hidrojen enerjisi, Dalga enerjisi, Gelgit enerjisi, olarak sayılabilir. Bu kaynaklarda çeşitli şekillerde yararlanmak adına son günlerde oldukça fazla bilimsel çalışmalar yapılmaktadır[1,2]. Hatta jeotermal gibi bazı kaynakları farklı şekillerde değerlendirme ve kullanma üzerine de bir çok çalışmaya literatürde rastlanmaktadır[3-5]. Başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarından biride, fosil ve hidrolik enerjinin de asıl kaynağı olan ve dünyamızı ısıtan "Güneş Enerjisi"dir. Güneşin enerjisi, hidrojenin helyuma dönüşmesi sırasında ortaya çıkan enerjinin ışıyım biçiminde uzaya yayılmasıdır. Güneş daha milyonlarca yıl ışımasını sürdüreceğinden, dünyamız için sonsuz bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneş, dünyadaki tüm enerji kaynaklarına dolaylı ya da dolaysız olarak temel oluşturmaktadır. Güneş ışınları ile dünyaya 170 milyar MW güçte enerji gelmektedir. Bu değer, dünyada insanoğlunun bugün için kullandığı toplam enerjinin 15-16 bin katıdır. Günümüzde dünyaya ulaşan güneş enerjisinin değerlendirilmesinde iki yol izlenmektedir: Isıya dönüştürme ve Elektrik enerjisine dönüştürme olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürmede "toplaçlar"; doğrudan elektriğe dönüştürmede de "güneş hücreleri-güneş pilleri" kullanılmaktadır.

Güneş kullanıldığı üç temel alan karşımıza çıkmaktadır. Bunlar:

- Yapıların ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanılması,
- Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi
- Geleceğin yakıtı olan hidrojenin elektroliz yöntemi ile güneş enerjisinden hidrojen gazının sudan elde edilmesi ve elektrik üretilmesinde kullanılması.

## **Güneş Enerji ile Elektrik Enerjisi Üretimi**

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için fotovoltaik sistemler (güneş pili sistemi) kullanılır. Fotovoltaik hücreler (PV hücreler-güneş hücreleri) gürültüsüz, çevreyi kirletmeksizin, herhangi bir hareket eden mekanizmaya gereksinim duymadan güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir.

Bu sistemlerde güneş izleme düzeni ve elektronik güç dönüştürücüleri kullanılarak her an mümkün olan en yüksek güneş enerjisinden yararlanır. Güneş enerjisinin kullanıldığı güneş elektrik santralleri; güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş hücreleri (solar cells) giderek yaygın kazanmaktadır.

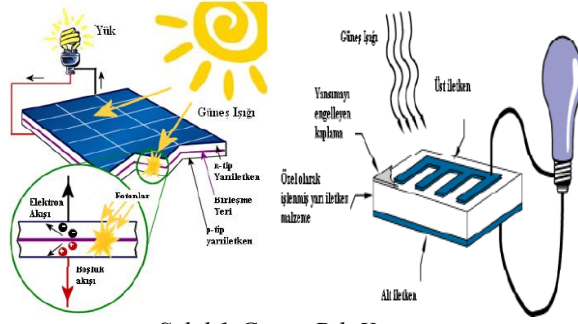
Fotovoltaik güç sistemleri diğer elektrik enerji üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında günümüzde çok pahalı olarak görülseler de, yakın gelecekte güç üretimine önemli katkısı olabilecek sistemler olarak değerlendirilmekte ve konu üzerinde tüm dünyada yoğun araştırma ve çalışmalar sürdürülmektedir.

### **Fotovoltaik Sistemler (PV- Güneş Pilleri)**

Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik olayına dayanır. Fotovoltaik etki ilkesine göre üzerine ışık düşen malzemelerde elektron hareketi olayı gözlemlenir. Güneş pilleri (fotovoltaikler) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken malzemelerden oluşan düzeneklerdir.[6]

Güneş pilleri (fotovoltaikler) ikili yarı iletken katmanlardan oluşurlar (p-n katmanları). Bu katmanların bir arada kullanılmaları ışık etkisiyle katmanlardan birinden elektron koparılmasını sağlar. Kopan elektron pozitif olan diğer katman tarafından çekilir. Elektronların bu şekilde hareket etmeleri bir elektrik akımını oluşturur. Oluşan elektrik akımı çeşitli iletkenler yardımıyla kullanılacağı bölgelere taşınır.

Güneş pilleri ile üretilen doğru akım elektrik enerjisi; şarj regülatörü kullanılarak, batarya veya akü'ye depolanır. İnverter sayesinde doğru akım, alternatif akıma çevrilerek elektrik enerjisi tüketim için hazır hale gelmektedir.



Şekil 1: Güneş Pili Yapısı

Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0.2-0.4 mm arasındadır.

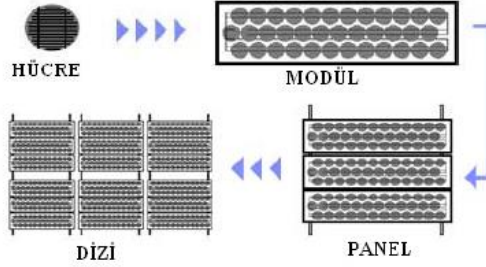
Fotovoltaik pillerin en önemli özellikleri ve avantajları; güneşin her durumunda elektrik üretebilmeleri, az bakım gerektirmeleri ve güvenli olmalarıdır.

Güneş enerjisi, %5 ile %20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güneş enerjisinin verimini fotovoltaik hücrenin yapısı belirler. Teknolojik gelişmeler kapsamında, güneş pilleri ile elektrik enerjisi üretiminin veriminin artırılması için yapılan çalışmalar hızla devam etmektedir. Örneğin çift yönlü güneş takip sistemi ile sabit sisteme göre %41.34 daha fazla elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Güneş pillerinin yüzeylerinin temiz tutulması, soğutma sistemlerinin kullanımı, gölgelenmenin önlenmesi gibi işlemlerle de güneş pillerinin verimleri iyi düzeyde artırılabilmektedir.

Güneş pillerinde oluşan elektrik akımının şiddeti yüzeyin soğurduğu güneş ışığı şiddetiyle doğru orantılıdır. Güneş pilleri tek tek kullanılabilir gibi birleştirilip panel halinde de kullanıma sunulabilmektedir.

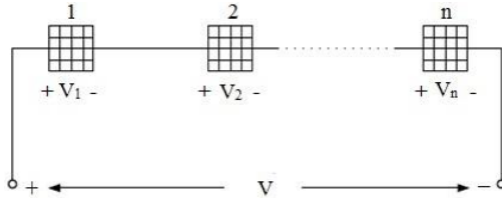
Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir.

Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan MegaWatt'lara kadar sistem oluşturulur.

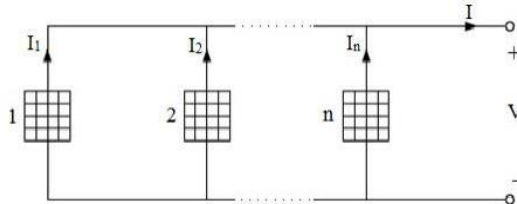


Şekil 2: Güneş Pillerinin Farklı Şekillerde Bağlanması ile Oluşan Yapılar[6]

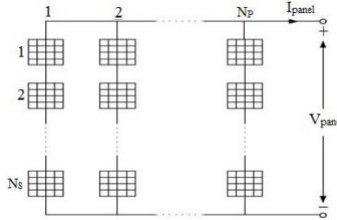
Fotovoltaik hücrelerin Seri Bağlanması Şekil 3'te, Fotovoltaik hücrelerin Paralel Bağlanması Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Fotovoltaik hücrelerin Seri Bağlanması [7]



Şekil 4: Fotovoltaik hücrelerin Paralel Bağlanması [7]



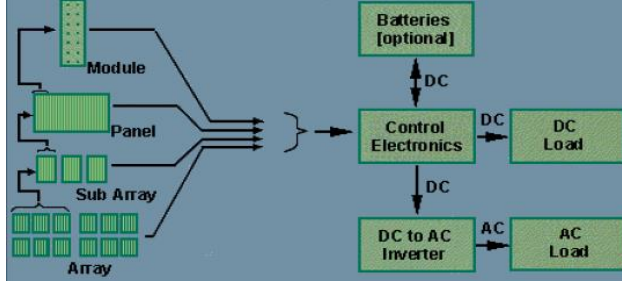
Şekil 5:  $N_p$  tane koldan ve her kolun da  $N_s$  tane modülden oluştuğu PV panel [7]

Güneş pili sistemi uygulamaya bağlı olarak, akümülatör, inverterler, akü şarj kontrol cihazları ve çeşitli elektronik destek devrelerinden oluşurlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Ayrıca başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür.



Güneş pili sistemi uygulamaları iki ana gruba ayrılabilir:

- Şebeke bağlantılı sistemler
- Şebekeden bağımsız sistemler



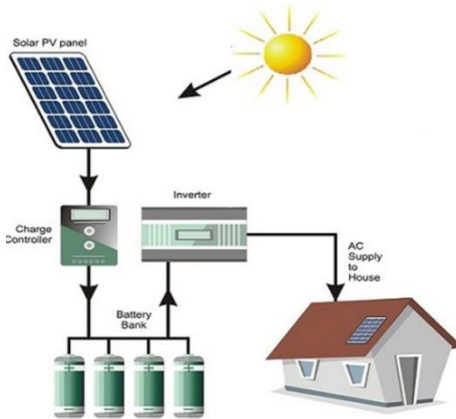
Şekil 6: PV Sistem Yapısı

### Şebekeden Bağımsız PV Sistemi

Güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi, şarj kontrol cihazı ile batarya ya depolanarak, güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılır.

Şarj Kontrol Cihazı, akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılır ve güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz.lik sinüs dalgasına dönüştürülür.

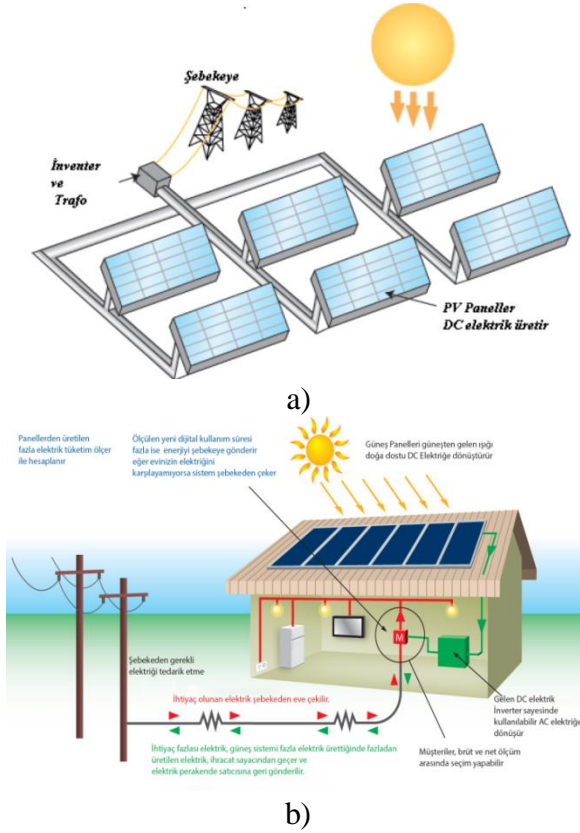
Benzer şekilde, uygulamanın şekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Bazı sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum noktada çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunur.



Şekil 7: Şebekeden Bağımsız PV Sistemi Akış Şeması

## Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistem

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri; yüksek güçte santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi daha çok görülen uygulaması binalarda küçük güçlü kullanım şeklindedir. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.



Şekil 8: a), b) Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistem

## Fotovoltaik Sistemler (PV- Güneş Pilleri) Kullanım Alanları

Güneş pili sistemlerinin şebekeden bağımsız (stand-alone) olarak kullanıldığı tipik bazı uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

- Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri

- Meteoroloji, deprem ve hava gözlem istasyonlarında
- Bina içi ya da dışı aydınlatma
- Dağevleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması
- Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompajı
- Orman gözetleme kuleleri
- Deniz fenerleri
- İlk yardım, alarm ve güvenlik sistemleri
- Küçük cihazlar için güç kaynağı

### **Güneş Enerjisi Avantajları**

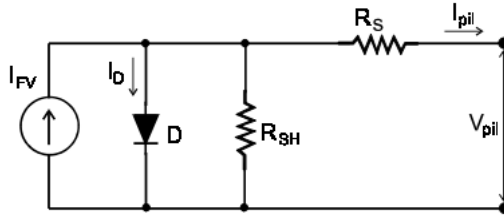
- Güneş enerjisi temiz, yenilenebilir ve sürekli bir enerji kaynağıdır.
- Güneş enerjisi ile çalışan sistemler kolaylıkla taşınır ve kurulabilir.
- Çevreyi kirletici atıkları olmayan, çevre dostu, gerektiğinde enerji ihtiyacına bağlı olarak kolayca değiştirilebilen sistemlerdir.
- Güneş enerjisinin, yakıt sorununun olmaması, işletme kolaylığı, mekanik yıpranma olmaması, modüler (değişebilir) olması, uzun yıllar sorunsuz olarak çalışması gibi üstünlükleri vardır.
- Güneş pili, dayanıklı, güvenilir ve uzun ömürlüdür.
- Elektrik şebeke hattı bulunmayan ya da şebeke hattının götürülmesinin pahalı olduğu kırsal yörelerde güneş pillerinin kullanımı daha ekonomik olabilmektedir.
- Her ev, kendi enerjisini çatısına kurduğu güneş pilleri ile karşılayabilir. Böylece iletim ve enerjiyi taşıma maliyetleri ve kayıpları ortadan kalkar.

### Güneş Enerjisi Dezavantajları

- Güneş Pillerinin verimleri düşüktür (%15 civarı),
- Fotovoltaik pillerin üretim kaynaklı başlangıç ve tüketim maliyeti yüksektir, ancak teknolojik gelişmeler ile enerji giderek yaygınlaşmakta ve maliyette düşmektedir.
- Kullanımın yaygınlaşması ile maliyetlerin daha da azalacağı beklenmektedir.
- Kesintili bir kaynak olan güneş enerjisinin depolanma imkanları sınırlıdır. Depolama ünitelerinin bakımı ve ömürleri gibi dezavantajlar sistemin verimini düşürmekte ve enerjinin maliyetini artırmaktadır.

### Güneş Enerji ile Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Elektriksel Hesaplamalar

Güneş Pili Eşdeğer Devresi



Şekil 9: FV güneş pilinin genel statik eşdeğer devresi[3]

$I_{pil}$  : FV pilin çıkış akımı (A)

$I_{FV}$  : Işık seviyesi ve P-N birleşim noktası sıcaklığının fonksiyonu,

Fotoakım (A)  $I_0$  : D diyodunun ters doyma akımı (A)

$V_{pil}$  : FV pilin çıkış gerilimi (V)

$R_S$  : Eşdeğer devrenin seri direnci (Ohm)

$R_{SH}$  : Eşdeğer devrenin paralel direnci (Ohm)

$e$  : Elektron yükü ( $1.6021917 \times 10^{-19}$  C)

$k$  : Boltzmann sabiti ( $1.380622 \times 10^{-23}$  J<sup>o</sup>K)

$T_{pil}$  : Referans çalışma sıcaklığı

Boltzman sabiti  $k$  ve referans çalışma sıcaklığı  $T_{pil}$  aynı sıcaklık birimine sahip olmalıdırlar. Yani her ikisi de ya Derece yada Kelvin olarak hesaba katılmalıdır. Boltzman sabiti  $k$  genelde Kelvin olarak verildiği için,  $T_{pil}$  sıcaklığını Kelvine dönüştürerek kullanmak daha uygun olur. [8]

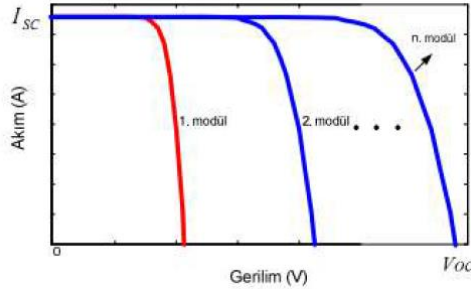
$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q(V_{pil} \oplus I_{pil} R_S)}{nkT_{pil}}} - 1 \right)$$

$$I_{pil} = I_{FV} - I_D - I_{SH} = I_{FV} - I_S \left( e^{\frac{q(V_{pil} \oplus I_{pil} R_S)}{nkT_{pil}}} - 1 \right) - \frac{V_{pil} + I_{pil} \cdot R_S}{R_{SH}}$$

### Akım-Gerilim Grafikleri

a) Seri Bağlı Fotovoltaik Hücrelerin I- V Eğrisi

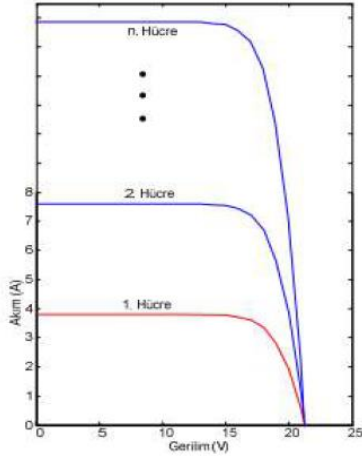
Akımın, dış terminallere ulaşana kadar gördüğü dirençtir. Modern güneş pillerinde, seri direnç  $< 0.3$  ohmdur.



Şekil 10: Seri Bağlı Fotovoltaik Hücrelerin I- V Eğrisi [9]

b) Paralel Bağlı Fotovoltaik Hücrelerin I- V Eğrisi

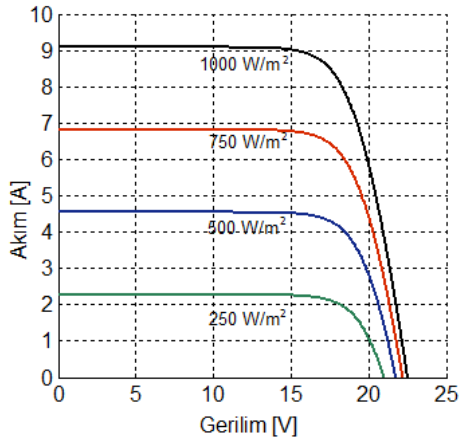
Modern güneş pillerinde, paralel direnç  $>300$  ohm dur. Yarıiletken malzemenin kayıplarını (rekombinasyon) temsil ediyor. Yarıiletkenin saflığıyla orantılıdır.



Şekil 11: Paralel Bağlı Fotovoltaik Hücrelerin I- V Eğrisi [9]

### c) Işınmaya Bağlı Panel I-V Karakteristiği

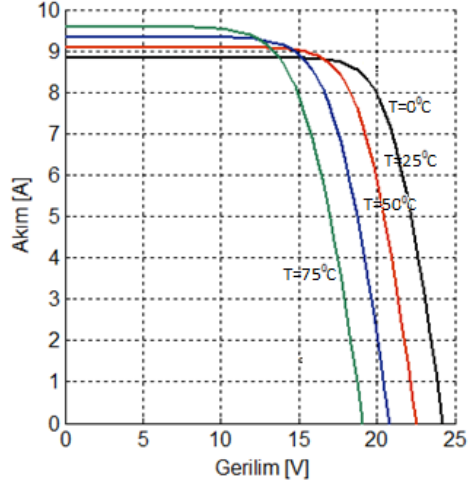
Fotovoltaik modüllerin elektriksel karakteristiğini etkileyen önemli parametrelerden biri güneş ışınımıdır. Şekil 12'de ışınımın I- V karakteristiğine etkisi görülmektedir. Kısa devre akımı ışınım şiddeti ile doğrusal olarak değişiyor. Açık devre gerilimi ise logaritmik olarak değişiyor.



Şekil 12: Işınmaya Bağlı Panel I-V Karakteristiği[11]

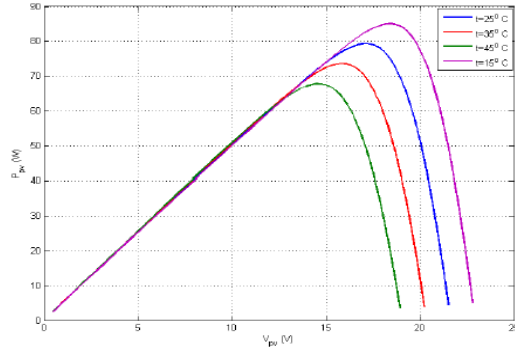
### d) Sıcaklığın I-V Eğrisine Etkisi

Sıcaklık artınca Kısa devre akımı çok az artıyor. Açık devre gerilimi ise sıcaklığa çok bağımlı ve doğrusal olarak değişiyor.



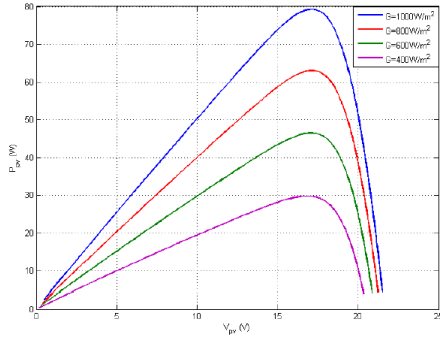
Şekil 13: Sıcaklığın I-V Eğrisine Etkisi [11]

e) Sıcaklığa Bağlı Panel P-V Karakteristiği



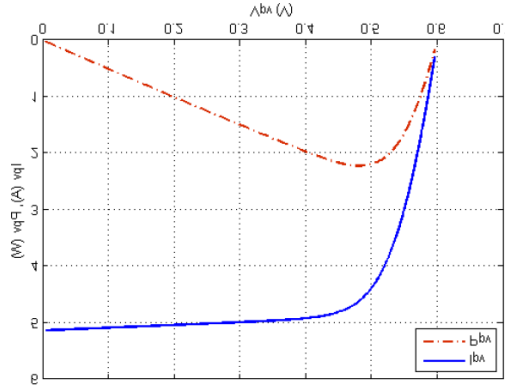
Şekil 14: Sıcaklığa Bağlı Panel P-V Karakteristiği [10]

f) Işıma Bağlı Panel P-V Karakteristiği



Şekil 15: Işıma Bağlı Panel P-V Karakteristiği [10]

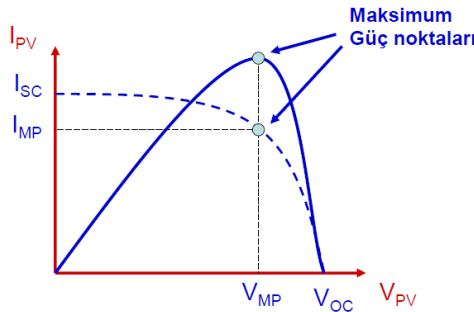
## g) Lineerleştirilmiş Duruma Ait Panel Karakteristiği



Şekil 16: Lineerleştirilmiş Duruma Ait Panel Karakteristiği[10]

**Maksimum Güç Noktası**

Güneş pilinin ürettiği enerji, hava koşullarına ve güneşle olan açısına göre değişir. Enerji aktarımının en yüksek olması için şekildeki I-V eğrileri kırılma noktalarının izlenmesi ve yükün maksimum güç sağlayacak şekilde ayarlanması gerekir.

Şekil 17: Güneş Piline Maksimum Güç Noktası Gösterimi  
Güç-Gerilim Grafiğinde Maksimum Güç;

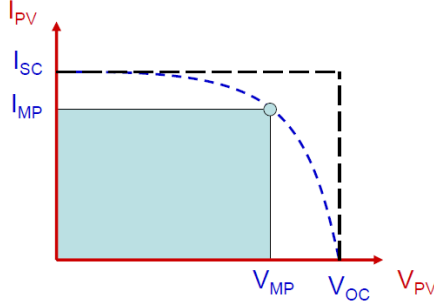
$$\frac{dP}{dV} = 0$$

$$P_{MP} = I_{PV} \cdot (V_{MP}) \quad V_{MP} = V_{MP} \cdot I_{MP}$$

**Dolgu Faktörü**

Dolgu faktörü modern güneş pillerinde 0.75 – 1 arasındadır.





Şekil 18: Dolgu Faktörü Gösterimi

$$\text{Dolgu Faktörü} = FF = \frac{(V_{MP} \cdot I_{MP})}{(V_{OC} \cdot I_{SC})}$$

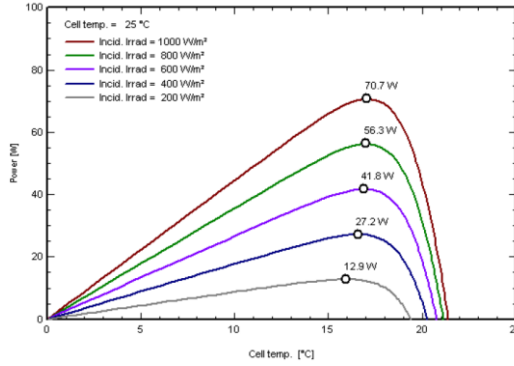
### Güneş Pili Modeli

Modern güneş pilleri için, çok hassas olmayan analizlerde,  $R_s$ 'nin etkileri ihmal edilebilir.

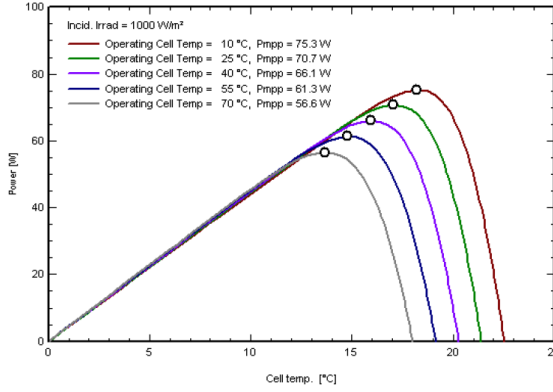
$$I_{pil} = I_{FV} - I_D - I_{SH} = I_{FV} - I_S \left( e^{\frac{q(V_{pil} \oplus I_{pil} R_s)}{nkT_{pil}}} - 1 \right) - \frac{V_{pil} + I_{pil} R_s}{R_{SH}}$$

$$I_{pil} = I_{FV} - I_S \left( e^{\frac{q(V_{pil})}{nkT_{pil}}} - 1 \right)$$

### Maksimum Güç Noktasının Işımm ve Sıcaklıkla İlişkisi



Şekil 19: Işımm-Maksimum Güç Noktası İlişkisi



Şekil 20: Sıcaklık-Maksimum Güç Noktası İlişkisi

### Verim Arttırma Yolları

Güneş pillerinden mümkün olan en büyük verimi almak için değişik yöntemler vardır. Bunlardan en temelleri; açı eğilimli güneş izleyici, maksimum güç noktası izleyici ve yoğunlaştırıcılarıdır.

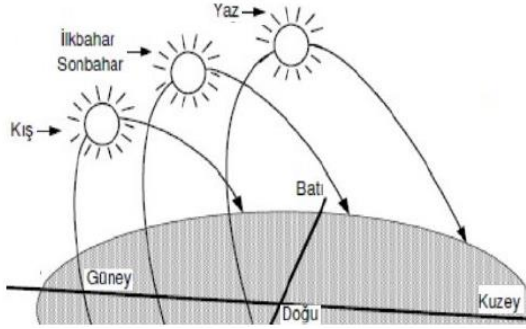
Güneş yaklaşık ekvator ekseninde bulunduğu için panel bu yöne yönlendirilmelidir. Güneş izleyiciler, güneş panelini güneşe otomatik olarak yönlendiren cihazlardır. Bir ve iki eksenli izleyiciler vardır. Güneş gün boyu hareketli olduğu için, güneş paneli ışık kaynağına doğru yönelmiş olmayabilir. Bunu sağlamak için panelin eğimini gelen ışığı maksimum yapmak için ayarlamak gerekir.

Maksimum güç noktası izleyiciler, yüke maksimum gücü sağlamak için panelin karakteristiklerini ayarlayan karmaşık sistem devresi içerir. Temel nokta bu cihazın, paneli tepe güç değerini sağlamaya zorlamasıdır.

Yoğunlaştırıcılar, panele gelen ışığı '500 kata kadar' güçlendirmekte kullanılırlar. Bunların, yansıtıcı ve refraktör olmak üzere iki tipi vardır. Yansıtıcılar normalde panel boyunca geçecek ışığı panel üzerine geri yansıtan ayna şeklinde yapılardır. Refraktörler de odaklama için mercek kullanılırlar. Bu çeşit cihazlar için ele alınması gereken faktörler panelin fazla ısınması ile mercek ve özel hücrelerin çok pahalı olması ve güneş izleyici kullanımının gerekliliğidir.

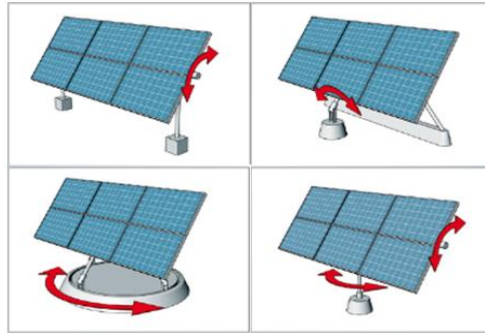
## **Güneş Takip Sistemi**

Güneşlenmenin günün her saatinde en yüksek seviyede tutulması ile üretilen elektrik enerjisinin verimi artmaktadır. Bunu sağlamak için FV panellerin güneşi takip etmesi gerekmektedir. Güneş ile panel yüzeyi arasındaki açı günün her saatinde dik olursa, verim en yüksek seviyelerde olur. FV panellerin güneşi dik açı ile görebilmesi için sabah gün doğumundan akşam gün batımına kadar güneşi takip etmeleri gerekir. Ancak gün boyu yapılan takip işlemi yılın her mevsimi için aynı kazancı sağlamaz. Çünkü dünyanın güneş eksenindeki hareketine bağlı olarak yıl içerisinde güneş her mevsim farklı yörüngeleri takip etmektedir. Güneşin mevsimlere göre izlediği yörüngeler Şekil 21’te verilmiştir [12].



Şekil 21: Güneşin Mevsimlere Göre İzlediği Yörüngeler

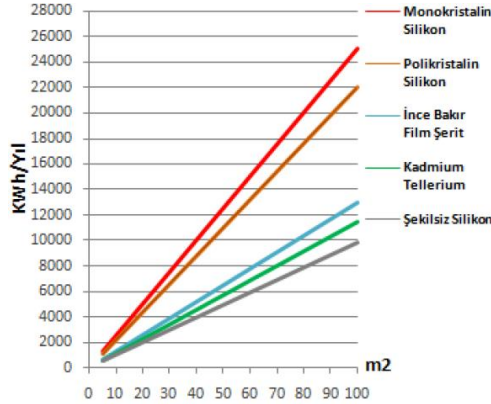
Güneş takip sistemleri, güneş ışınlarının FV panelin yüzeyine dik gelmesini sağlayarak elde edilen enerji kazanç miktarını arttırmaktadır. Bu sistemleri kullanarak FV panellerden elde edilen enerji kazancı yaklaşık olarak %35 oranında arttırılabilmektedir.



Şekil 22: Güneş Takip Sistemi

## Güneş Pili Çeşitleri

Bir yarı iletken maddenin ışığa,ışınımına karşı duyarlılık derecesi,o maddenin verimini ve modül performansını belirler[8]. Aşağıdaki şekilde çeşitli madde ve teknolojilerle üretilmiş bazı güneş pillerinin yıllık enerji sağlama eğrileri verilmiştir.



Şekil 23: PV Hücrelerin Kazanç Eğrileri [13]

## Güneş Açıları ve Işınımı Hesaplamaları

Güneş, dünyaya yaklaşık 150 milyon km uzaklıktadır. Çapı ise yaklaşık 1,39 milyon km'dir. Güneş erg/saniye hızıyla enerji üretir, ancak bu çok büyük enerjinin yalnızca 2 milyonda biri dünyamıza ulaşır. Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşması yaklaşık 8.44 dakikadır. Dünya'da bilinen bütün enerji kaynaklarından elde edilecek enerji Güneş'in sadece üç günde yaymış olduğu enerjiye eşittir.[14]

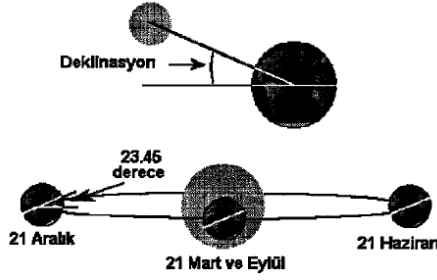
Güneş enerjisi uygulamalarında atmosfer dışına gelen güneş ışınımının hesaplanması son derece önemlidir. Yatay ve eğik düzleme gelen güneş ışınımını hesaplayabilmek için literatürde yer alan açı ve parametrelerden faydalanılır.

## Güneş Deklinasyon Açısı ( $\delta$ )

Dünyanın güneş etrafında döndüğü düzleme ekliptik düzlem denir. Dünyanın kendi eksenini, ekliptik düzleminin normaliyle yaklaşık 23.5° lik açı oluşturur. Dünyanın eksenini ile ekliptik düzlemin normali arasındaki açı değişmez. Fakat güneş ve dünyanın merkezini birleştiren hattın,

ekvator düzlemi ile yaptığı açı her gün değişir. Bu açığa güneşin deklinasyon açısı denir.[15]

21 Mart ilkbahar ekinoksu ve 23 Eylül sonbahar ekinoksu tarihlerinde deklinasyon açısı sıfır iken, 21 Aralık kış gündönümünde -23,45 derece ve 21 Haziran yaz gündönümünde 23,45 derece değerini alır. Buna göre diğer günlerde -23,45 ile 23,45 dereceleri arasında değerler alır.

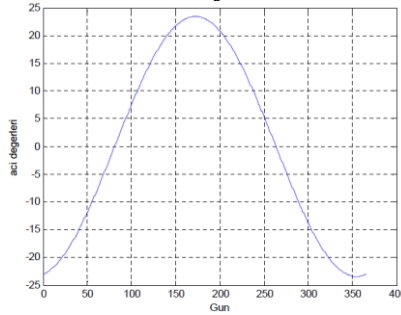


Şekil 24: Güneş Deklinasyon Açısı

$d_n$ , 1 Ocak 1 olmak üzere Şubat 28 sayılarak hesap yapılacak günün yılın kaçınıcı günü olduğu bu günün radyan cinsinden değeri olmak üzere deklinasyon açısı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\theta_0 = 2\pi(d_n - 1)/365$$

$$\delta = (0.006918 - 0.39991\cos\theta_0 - 0.070257\sin\theta_0 - 0.006759\cos2\theta_0 + 0.000907\sin2\theta_0 - 0.002697\cos3\theta_0 + 0.001480\sin3\theta_0) \times 180/\pi$$



Şekil 25: Deklinasyon Açısının Yıl İçerisindeki Değişimi

### Zenit Açısı ( $\theta_z$ )

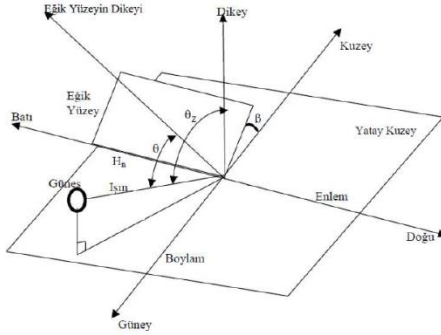
Güneş yer doğrultusunun yatay düzlemin normali ile yaptığı açıdır. Güneş doğarken ve batarken zenit açısı , güneş ışınları yatay düzleme dik

geldiğinde olur. Aşağıdaki denklem de zenit açısının eşitliğine, Şekil 26'da ise buna ait açılar görülmektedir [14].

$$\cos\theta_z = \cos\varphi \cos \delta \cos\omega + \sin\varphi \sin \delta$$

$\theta_z$ = Zenit Açısı

$\theta$ =Geliş Açısı

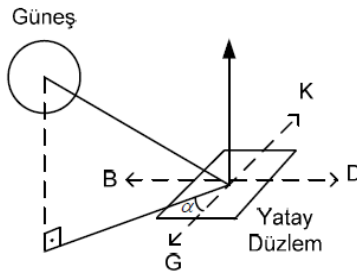


Şekil 26: Zenit Açısı

### Güneş Azimut Açısı ( $\alpha$ )

Güneşin azimut açısı, güneş meridyeni ile gözlemcinin güney noktası arasındaki açıdır [15]. Doğuya doğru ölçülürse pozitif, batıya doğru ölçülürse negatiftir ve  $0^\circ$ - $180^\circ$  arasında değişir. Örneğin saat 12.00 de  $180^\circ$  dir.

$$\alpha = \arccos(\sin\gamma \cdot \sin\varphi - \sin\delta) / \cos\gamma \cdot \cos\varphi$$

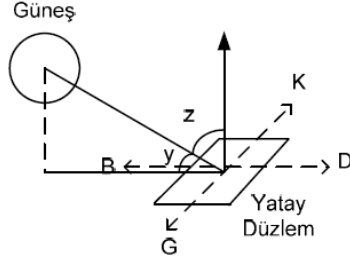


Şekil 27: Azimut Açısı

### Güneş Yükseklik Açısı

Güneş yüksekliği, güneşin gözlemcinin ufkundan açısal yüksekliğidir.

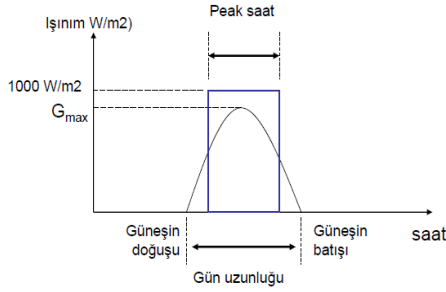
$$\gamma = \arcsin(\cos\omega \cdot \cos\varphi \cdot \cos\delta + \sin\varphi \cdot \sin\delta)$$



Şekil 28: Güneş Yükseklik Açısı

### Peak Saat (PS) Kavramı

1000 W/m<sup>2</sup> sabit ışınım şiddetinde, günlük toplam güneş radyasyonuna eşit bir enerjiyi elde edebilmek için gereken süreye denir.



Şekil 29: Peak Saat Kavramı

### Yük Hesabı

Ortalama Yük akımı

$$I_L = \frac{E_L}{24 \times V_{dc}}$$

$E_L$  = Ort.günlük enerji ihtiyacı

$V_{dc}$  = Sistem Voltajı

### Gerekli PV Akımı

PV panel en az yükün ihtiyacı kadar enerji üretmelidir.

PS=Peak saat  $E_L = \frac{W_h}{\text{gün}} = PS \cdot I_{PV} \cdot V_{dc}$

$$I_L = \frac{E_L}{24 \times V_{dc}}$$

Denklemleri birlikte çözülürse;

$$I_{PV} = \frac{24 \times I_L}{PS} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Modül Gücü Hesaplama

1.STC koşullarında  $I_{SC0}$ ,  $V_{oc0}$ ,  $P_{mp0}$ , NOCT katalogdan alınır.

2. $I_{sc} = x G / 1000$  (G: Işınım, sıcaklık etkisi ihmal)

3.NOCT ile  $T_c$  hesaplanır.

4. $V_{oc} = V_{oc0} - 0.0023 \times N_{cell} \times (T_{hava} - 25^\circ)$  ( $N_{cell}$ : hücre sayısı, ışınım etkisi ihmal, PV hücrenin gerilimi sıcaklıkla  $-2.3mV/^\circ C$ .)

5.Bütün çalışma koşullarında FF yaklaşık sabittir dolayısıyla STC koşulları için FF hesaplanır.

$$FF = \frac{P_{mp0}}{(I_{SC0} \times V_{oc0})}$$

6.  $P_{mp} = (I_{SC} \times V_{oc} \times FF)$



## KAYNAKÇA

- [1] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., (2018). "Analysis of Thermoelectric Cooler Used to Produce Electrical Energy in terms of Efficiency," Acad. Studies in Eng., Gece Publishing, pp. 111-120.
- [2] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H.,  imen, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). "The Effects of Speed and Flow Rate on Power in Thermoelectric Generators", International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, Vol.6, pp.65-71.
- [3] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). "Mathematical Modelling of Thermoelectric Generator by Regression Analysis ," International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18). Selçuk University, Vol:3, pp.523-527.
- [4] Ağaçayak, A.C.,  imen, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2017). "Termoelektrik Jeneratör ile Elektrik  retimi", In UMYOS 6th International Vocational School Symp., Vol:2, pp.541-49. Saray Bosna.
- [5] Neşeli, S., Terzioğlu, H., Ağaçayak, A.C., Yalçın, G., (2017). "Electrical Power Generation by Thermoelectric Generator Using Geothermal energy and The Low-Power Dc-Dc Buck\_Boost Converter Application", In Grad. Sch. of Natur. and App. Scien., Selçuk University.
- [6] Temiz Enerji Teknolojileri Kursu, 9-13 Şubat 2009, Doç. Dr. H sаметtin BULUT,Gaziantep
- [7] Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan Fotovoltaik Panelin Modellenmesi Ve Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Akif Akbulut,Mayıs 2018
- [8] Doc. Dr. İsmail H. ALTAŐ, Fotovoltaj Güneş Pilleri : EŞdeğer Devre Modelleri ve G niŐiŐi ile Sıcaklığın Etkileri, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Mart 1998, Sayı 46, Sayfalar:86-91, Bilesim yayıncılık A.Ő., İstanbul
- [9] Ali Ajder, Fotovoltaik Güneş Enerjisi Sistemleri İçin Optimum Eğim A ısınnın Hesaplanması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi,2011
- [10] Onur Kır oğlu, Ali Bekir Yıldız, Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu EŞdeğer Devresine Ait Büyük Sinyal Analizi
- [11] Hikmet ESEN, Fotovoltaik Paneller Kullanılarak Sisleme Sistemi ile Dış Ortamların Soğutulmasının Araştırılması, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, (Geliş/Received : 14.04.2016 ; Kabul/Accepted : 05.05.2016)

- [12] Mehmet Sait CENGİZ, Mehmet Salih MAMİŞ, Termal Güneş Enerjisi Kullanımı ve CSP Sistemlerin Verimlilik Analizi, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 5(1), 1-13, 2016
- [13] Elektrik Mühendisleri Odası,Eğitim ve Seminer Etkinlikleri,Fotovoltaik Sistemler ve Uygulamaları,2013
- [14] Ali Ajder, Fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri için optimum eğim açısının hesaplanması, elektrik mühendisliği, yüksek lisans tezi, istanbul, 2011
- [15] Erva AKSOYLU, Güneşlenme olasılığına bağlı olarak enerji tüketiminin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KASIM 2008.

# RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

BÖLÜM  
12

Hakan TERZİOĞLU<sup>1</sup>,  
Murat ARSLAN<sup>2</sup>,  
Havvanur Dilşah  
DEMİROK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik, Konya, hterzioglu@ktun.edu.tr

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh. Yüksek Lisans Öğrencisi, Konya, muratarslaneem@gmail.com

<sup>3</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh. Yüksek Lisans Öğrencisi, Konya,

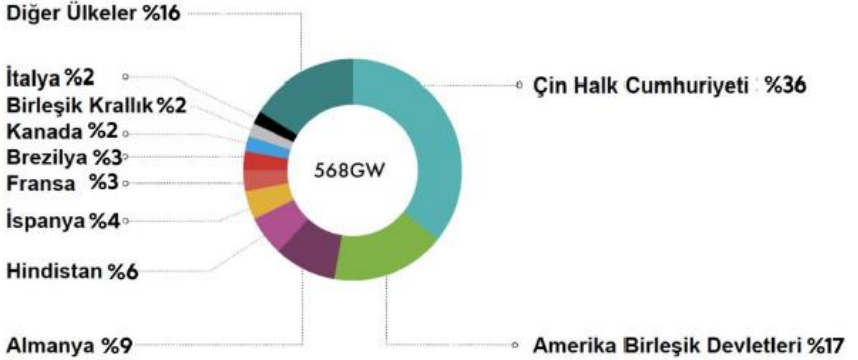


## GİRİŞ

Enerji alanındaki ilerleme bir ülkenin gelişmişlik göstergesidir. Günümüzde enerji insan hayatının yaşam standartlarını belirlemede en önemli etken konumuna gelmiştir. Enerji günümüzde çok önem kazanması enerji dönüşümlerindeki atık enerjiden bile faydalanmamız gerektiğini bize göstermektedir. Bu konuda literatürde çalışmalar yapılmaktadır[1-5]. Elektrik enerjisi üretiminde fosil kaynakların giderek azalması ve çevre kirliliklerinin fazla olması alternatif enerji kaynaklarına yönelmeyi zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil kaynaklara karşı en ideal alternatif enerji kaynaklarıdır. Teknolojinin ilerlemesiyle yenilenebilir enerji kaynakları artık çok daha verimli kaynaklara dönüşmüşlerdir. Başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarından biride, rüzgar enerjisidir.

### Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı

Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü, 2018 yılı itibarı ile toplam 568 GW’tır. Şekil 1’de, 2018 yılı itibarı ile dünya üzerindeki toplam kurulu rüzgar enerjisi santralleri kapasitesinin ülkelere göre dağılımı görülmektedir. Ülkelere ait rüzgar enerjisi santral kapasiteleri incelendiğinde Çin Halk Cumhuriyeti (%36) en yüksek kapasiteye sahip ülkedir. En yüksek kapasite bakımından Çin Halk Cumhuriyetini, sırasıyla; Amerika Birleşik Devletleri (%17), Almanya (%9), Hindistan (%6) ve İspanya(%4) takip etmektedir.



Şekil 1: 2018 Yılı İtibarı ile Dünya Üzerindeki Ülkelerin Toplam Kurulu Rüzgar Enerjisi Kapasitelerinin Dağılımı

Şekil 1’den de görüldüğü üzere Çin Halk Cumhuriyeti rüzgar enerjisi santrallerinde kurulu güç kapasitesi bakımından Dünya lideri ülke

konumundadır. 2018 yılı itibarı ile 204 GW kurulu güce sahip ülke, 2020 yılı sonunda şebekeye bağlı rüzgar enerjisi kapasitesini 210 GW üzerine çıkartmayı planlamaktadır. Ayrıca Çin, Yenilenebilir Enerji Ajansı tarafından oluşturulan ‘Küresel Enerji Raporu’nda, “Dünya’nın Yenilenebilir Enerjideki Süper Gücü” olarak tanımlanmıştır. 96,55 GW kurulu gücü ile ABD, rüzgar enerjisinde Dünya ikinciliği unvanına sahiptir.

### **Ülkemizin Rüzgâr Potansiyeli**

Rüzgar Enerjisi Devletlerin ve milletlerin ekonomik ve sosyal kalkınmasının en önemli girdilerinden biridir. Devletlerin nüfuslarındaki artış, sanayileşme, şehirleşme, ticaret ve üretim alanlarındaki artışlar doğru orantılı olarak doğal kaynaklara ve enerjiye olan talebi arttırmaktadır. Ülkemiz’de enerji kaynaklarına olan talebin yoğun olarak yaşandığı ülkelerdendir. Ülkemizin rüzgâr enerjisi potansiyeli 48000 MW rüzgâr potansiyeline sahip olup tüm Avrupa ülkelerinden daha yüksektir[8,14].

Türkiye 784.347 yüzölçümü ile geniş alana sahip olan bir ülkedir ve sahip olduğu iklim özellikleri nedeniyle önemli bir rüzgar potansiyeli barındırmaktadır. Türkiye’deki rüzgar enerjisi potansiyeli; rüzgar hızına ve rüzgarın sürekliliğine bağlı olarak bölgeler ölçeğinde farklılık göstermektedir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından Türkiye’nin rüzgar potansiyelini belirlemek amacıyla bir çalışma yapılmış ve bunun sonucu 2006 yılında Türkiye Rüzgar Potansiyeli Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Bu çalışmalar ışığında Türkiye’de elektrik üretilebilecek rüzgar enerjisi potansiyeli rüzgar hızı 7,0 m/sn üzeri değerlere göre hesaplandığında 10.463 MW deniz, 37.386 MW kara olmak üzere toplam 47.849 MW olarak belirlenmiştir[6].

Çizelge 1: Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar kaynak derecesi	Rüzgar sınıfı	50 m'de rüzgar gücü (W/m <sup>2</sup> )	50 m'de rüzgar hızı (m/s)	Toplam alan km <sup>2</sup>	Rüzgarlı arazi yüzdesi	Toplam kurulu güç potansiyeli
Orta	3	300-400	6,5-7,0	16.781,39	2,27	83.906,96
İyi	4	400-500	7,0-7,5	5.851,87	0,79	29.259,36
Harika	5	500-600	7,5-8,0	2.598,86	0,35	12.994,32
Mükemmel	6	600-700	8,0-9,0	1.079,98	0,15	5.399,92
Sıra dışı	7	>800	>9,0	39,17	0,01	195,84
Toplam						131.756,40

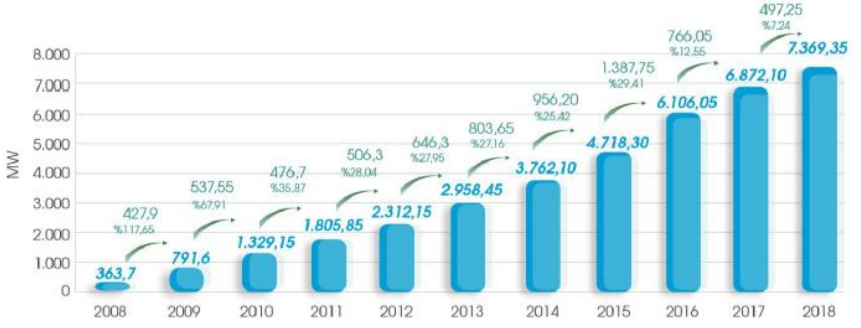
Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en iyi rüzgar potansiyeline sahip olan alandır[11]. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından yerden 30 m, 50 m, 70 m ve 100 m yükseklikteki rüzgar hızlarının gösterildiği haritalar hazırlanmıştır. Yerleşim alanları dışında yerden 50 m yükseklikteki rüzgar hızları Marmara, Batı Karadeniz, Doğu Akdeniz kıyılarında 6.0-7.0 m/sn, iç kesimlerde ise 5.5-6.5 m/sn civarındadır. Batı Akdeniz kıyılarında 5,0-6,0 m/sn iç kesimlerinde 4,5-5,5 m/sn, Kuzeybatı Ege kıyılarında 7,0-8,5 m/sn, iç kesimlerde ise 6,5-7,0 m/sn'dir.

*Çizelge 2: Türkiye'nin farklı bölgelerindeki rüzgar enerjisi potansiyeli[10]*

<b>Bölgeler</b>	<b>Yıllık ortalama rüzgar hızı (m/sn)</b>	<b>Yıllık ortalama rüzgar yoğunluğu (W/m<sup>2</sup>)</b>
Güneydoğu Andolu	2,69	29,33
Akdeniz	2,45	21,36
Ege	2,65	23,47
İç Anadolu	2,49	20,14
Doğu Anadolu	2,12	13,19
Marmara	3,29	51,91
Karadeniz	2,38	21,31
Türkiye'nin ortalaması	2,58	25,82

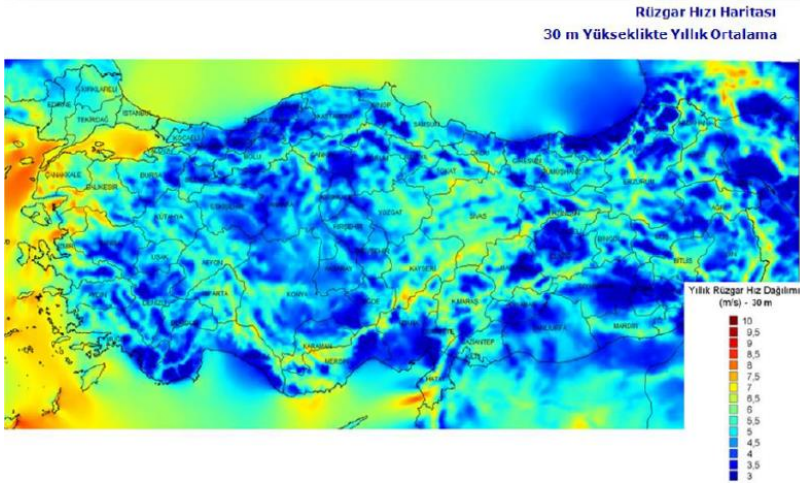
Türkiye'de Rüzgar Enerji Santrali'leri için son on yılda (2008-2018) toplam kurulu kapasite gelişimi Şekil 2'de verilmiştir. Türkiye'de toplam RES kurulu kapasitesi 2008 yılında 363.7 W seviyelerinde iken, her geçen yılda artarak 2018 yılında 7369.35 MW seviyesine ulaşmıştır. Oransal olarak en yüksek kapasite artışı 2008-2009 yıllarında yaşanmıştır. 2008 yılında 363.7 MW olan toplam Rüzgar Enerji Santrali kapasitesi, % 117.65 oranında artarak, 2009 yılında 791.6 MW değerine yükselmiştir. İkinci en yüksek kapasite artışı 2009-2010 yıllarında kaydedilmiş olup, (791.6'den 1329.15 MW) artış oranı % 67.91 olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'de 2010-2016 yılları arasında toplam RES kapasitesindeki ortalama artış oranı % 28.98 olarak gerçekleşmiştir. Toplam Rüzgar Enerji Santrali kapasitesindeki artış oranı 2016 yılından sonra azalmaya başlamıştır. Toplam Rüzgar Enerji Santrali kapasitesi 2016 yılında 61006.5 MW iken, % 12.55 oranında artarak, 2017 yılında 6877.10 MW seviyesine yükselmiştir. Toplam Rüzgar Enerji Santrali kapasitesindeki artış oranı en düşük 2017-2018 yıllarında yaşanmış olup, kapasite artışı 7.26 olarak gerçekleşmiştir. Toplam RES kapasitesi değer olarak en fazla 2015-2016 yıllarında artmıştır. Toplam RES kapasitesi 2015 yılında 4718.30 MW iken, 1387.75 MW artarak 2016 yılında 6106.05 MW seviyesine yükselmiştir[15]





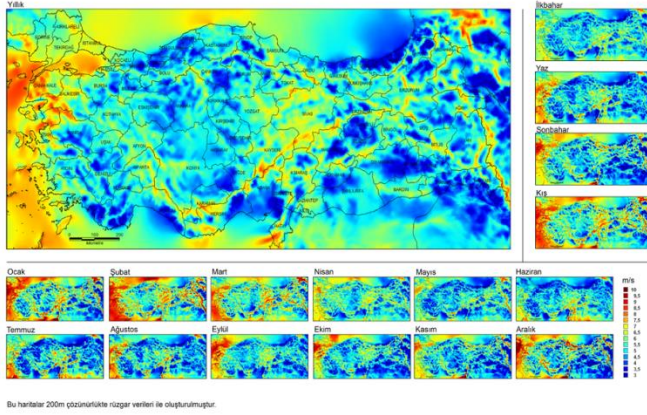
Şekil 2: Ülkemizin 2008-2018 Yılları Arasındaki Rüzgar Enerjisi Gelişimi

Türkiye’de 2023 yılında Rüzgar Enerji Santrali kurulu gücünün, toplam elektrik kurulu gücünün 20000 MW değerine ulaşması hedeflenmektedir. Rüzgar potansiyeli ve 2023 yılı hedefleri dikkate alındığında, her geçen yılda önemli gelişmeler sağlanmıştır. 2014 yılı sonunda 3762 MW olan Rüzgar Enerji Santrali kurulu gücü, 2015 yılının ilk yarısında 430 MW değerinde bir artışla 4192 MW düzeyine ulaşmıştır. Türkiye’de tüketilen elektriğin % 6’lık bir bölümü rüzgar enerjisinden üretilmektedir. Bu değer 2023 yılında % 20 düzeyine yükseltilmesi hedeflenmektedir[15].



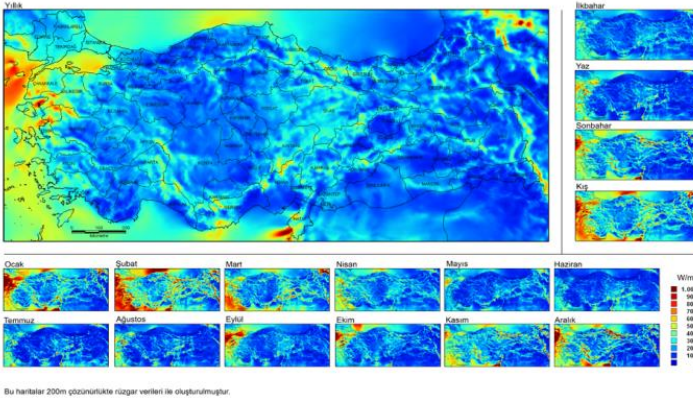
Şekil 3: Türkiye’de 30 m Yükseklikte Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası[6]

**TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI**  
Rüzgar Hızı Haritası  
50 m Yükseklik

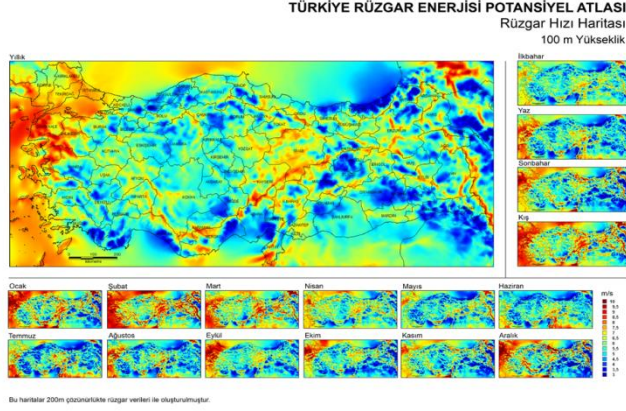


Şekil 4: Türkiye'de 50 m Yükseklikte Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası[6]

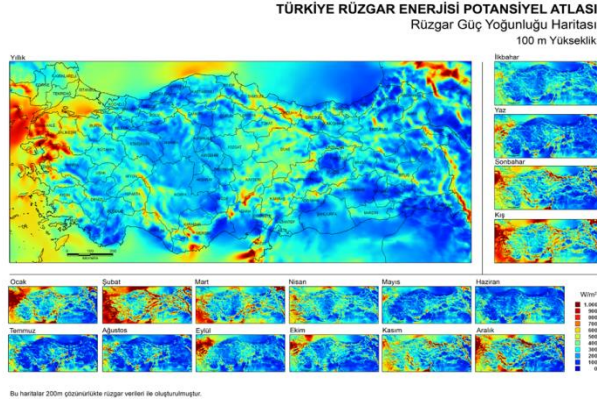
**TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI**  
Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası  
50 m Yükseklik



Şekil 5: Türkiye'de 50 m Yükseklikte Yıllık Ortalama Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası[6]



Şekil 6: Türkiye’de 100 m Yükseklikte Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Haritası[6]



Şekil 7: Türkiye’de 100 m Yükseklikte Yıllık Ortalama Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası[6]

## Rüzgâr Enerjisinin Oluşumu

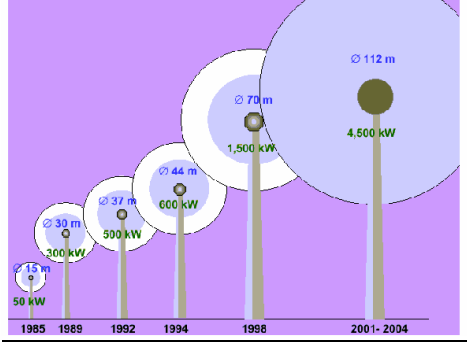
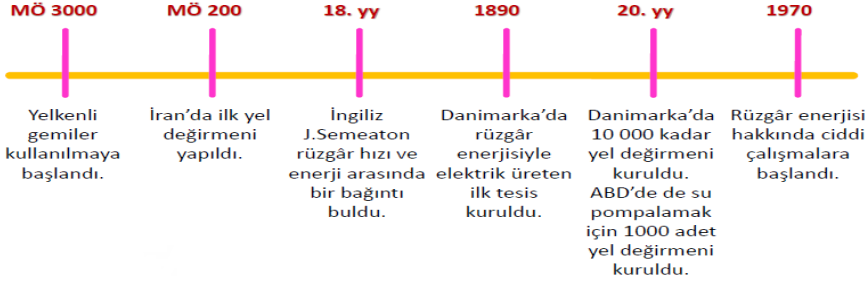
### Rüzgâr nasıl oluşur?

Güneş ışınları, yeryüzünde farklı sıcaklık, basınç ve nem oluşturur. Bu oluşumdan dolayı Rüzgâr Enerjisi meydana gelir. Güneş dünyaya saatte W enerji gönderir ve bu enerjinin %1-2’si Rüzgâr Enerjisi’ne dönüşür. Yani Güneş Enerjisi’nin dolaylı bir ürünüdür.

Rüzgarın oluşumunu sağlayan iki temel etken vardır;

- Dünyanın kendi etrafında dönüşü
- Dünya yüzeyindeki sıcaklık farklılıkları

## Tarihsel Gelişim



Şekil 8: Rüzgâr türbinleri kurulu güçlerinin yıllara göre değişim evresi[17]

## Rüzgâr Türbini Çeşitleri

### Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Bu türbinlerin rotorları yatay ekseninde çalışır ve diğer tiplere göre teknolojik ve ticari açıdan daha fazla tercih edilir. En yüksek verimle enerji temin edebilmek için rotor daima rüzgâr akış yönünde olmalıdır. Yatay eksenli türbinlerin çoğu rüzgârı önden alabilecek şekilde tasarlanır. En kötü tarafı, sürekli rüzgâra bakması için bir dümen sistemine ihtiyaç duymasındır.

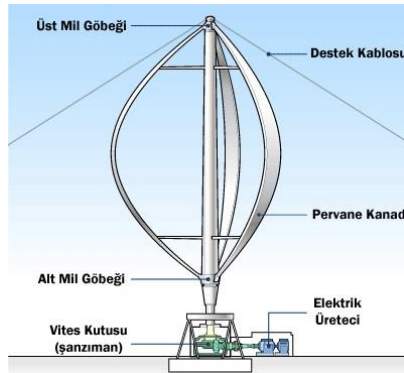


Şekil 9: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

### **Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri**

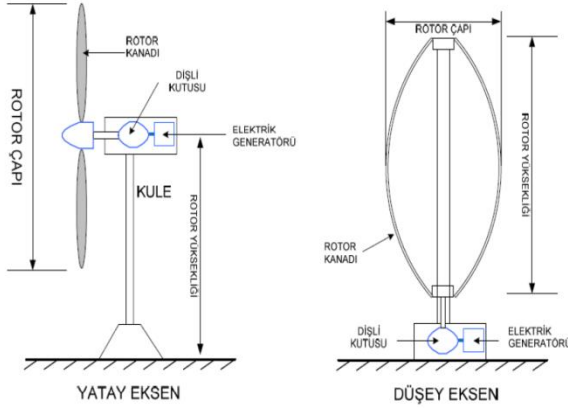
Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin kanatları yere yakın olduğundan dolayı düşük rüzgâr hızı düşüktür. Bundan dolayı dikey eksenli türbinlerin verimi, yatay eksenlilere göre daha azdır. Bu yüzden ticari alanda kullanımları oldukça azdır. Daha çok deneysel amaçlar için kullanılmaktadırlar.

Kanatları düşey eksende çalışır. En önemli avantajı rüzgârı her yönden alabilmesidir. Böylece dümen sistemine ihtiyacı olmaz. Dönme hızları düşük olduğu için daha az riske sahiptir. Ayrıca sessiz olmalarından dolayı kentsel alanlara daha uygundur. Rüzgâr türbinlerinin kentsel alanlara yakın konulmasının en önemli faydası, üretilen elektriğin taşınırken kayıpların olmaması ve hemen tüketilebilmesidir.



Şekil 10: Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

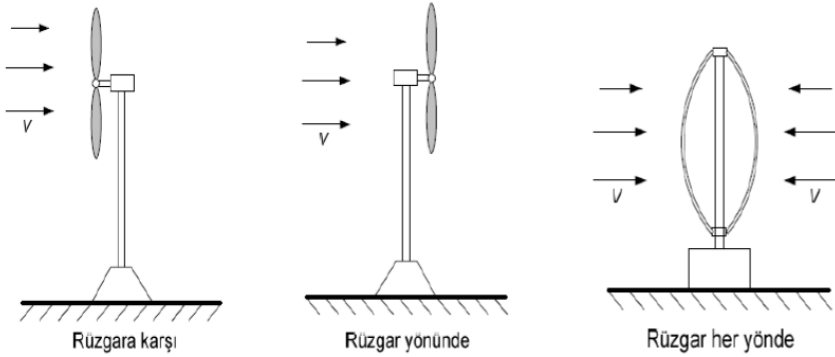
## Rüzgâr Türbin Konfigürasyonları



*Şekil 11: Rüzgâr Türbin Çeşitleri*

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri hem rüzgâr yönünde (downwind) hem de rüzgâra karşı (upwind) yönde çalışabilmektedir. Dikey eksenli türbinler ise rüzgârı her yönde kabul ederler.

Rötör haricindeki tüm bileşenler her iki rüzgâr türbinini dizaynında da aynıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri daha yüksek olduğundan dolayı günümüzdeki modern türbinlerin çoğu bu tiptedir.



*Şekil 12: Rüzgâr Türbinlerin Rüzgâr Yönüne Göre Çalışması*

## **Rüzgâr Türbinin Ayrıntılı Yapısı**

Bir Rüzgâr Enerji Santralinin Temel Bileşenleri:

1. Kule
2. 2 veya 3 kanatlı rüzgâr türbini

3.Rüzgâr yönüne göre kanatların/türbinin yönünü ayarlayan mekanizma

4.Mekanik dişli ünitesi

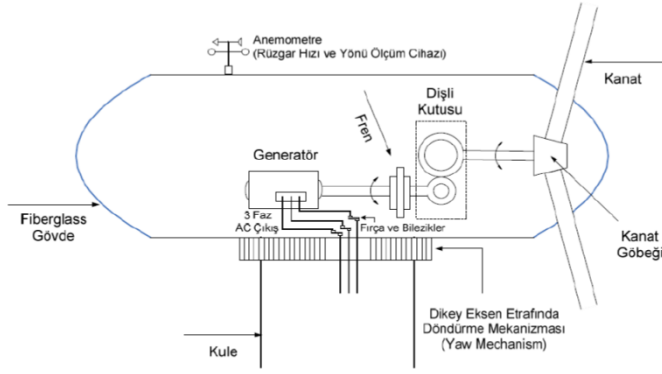
5.Elektrik generatörü

6.Hız sensörleri ve hız kontrol ünitesi

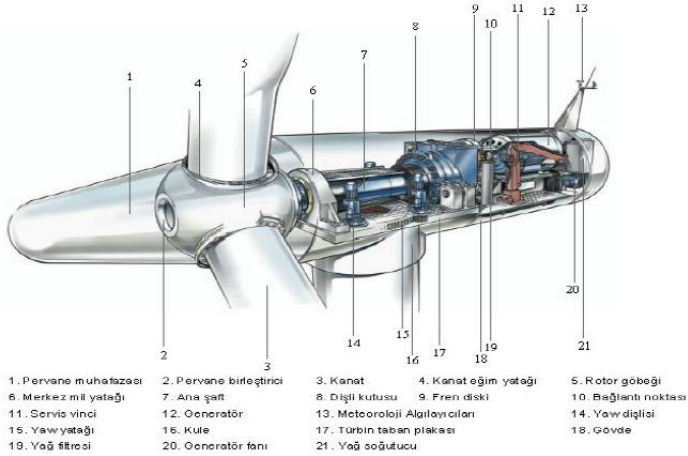
7.Güç-elektronik ünitesi ve kontrolü

8.Enerji depolama

9.Yerel elektrik şebekesine bağlantı için transformatör,iletim hattı ve kesici



a)

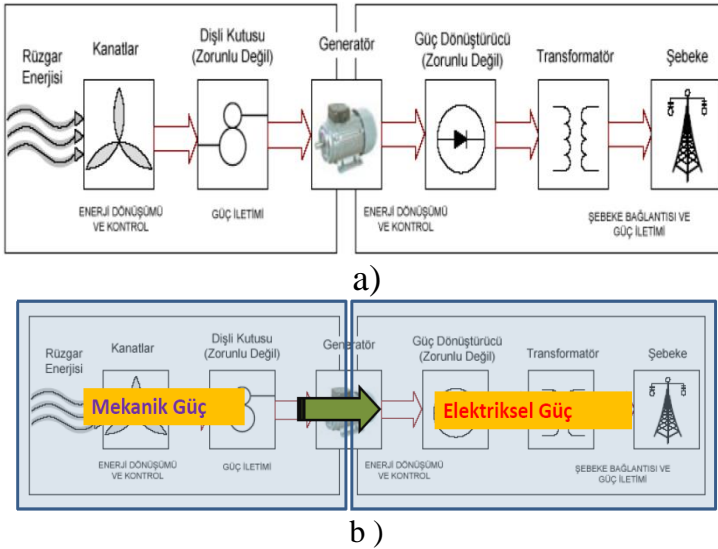


b)

Şekil 13: a) Dikey Eksenli b) Yatay Eksenli Bir Rüzgâr Türbinin Yapısı[16]

## Rüzgâr Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüşümü

Bir rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin temel safhaları aşağıdaki Şekil 13'de gösterilmiştir. Türbin rotoru kanatları vasıtası ile rüzgâr dalga enerjisinin bir kısmını yakalayıp mekanik enerjiye çevirir. Elde edilen bu düşük hızlı mekanik enerji dişli kutusu yardımı ile yüksek generatör hızı seviyesine çıkarılır. Eğer generatör yüksek kutup sayısına sahip ise dişli kutusuna ihtiyaç duyulmayabilir. Yüksek dönüş hızına sahip mekanik enerjiye çevrilmiş bu enerji ise generatör aracılığı ile elektrik enerjine dönüştürülür. Daha sonra transformatör ve iletim hatları aracılığı ile yerel elektrik şebekesine elektrik sayacı ve kesici üzerinden bağlanır. Tercih edilen rüzgâr enerji sistemine bağlı olarak transformatörden önce güç elektroniği üniteleri ile elektrik enerjisi farklı formlarda regüle edilir.



Şekil 14: a),b) Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Aşamaları

**Türbin Rotoru:** Aerodinamik olarak dizayn edilmiş kanatları vasıtası ile rüzgâr dalga enerjisinin bir kısmını yakalayıp mekanik enerjiye çevirir.

**Dişli Kutusu:** Düşük hızlı mekanik enerjiyi yüksek hıza çıkarılır.

**Generatör:** Yüksek dönüş hızına sahip mekanik enerjiye çevrilmiş bu enerji ise generatör aracılığı ile elektrik enerjine dönüştürülür.

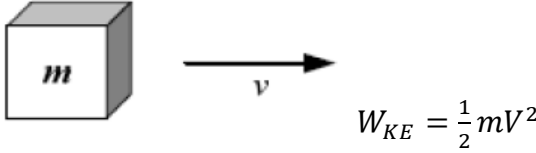


Güç Dönüştürücü: Rüzgâr enerji sistemi topolojisine bağlı olarak güç elektroniği üniteleri ile elektrik enerjisi farklı formlarda regüle edilebilir.

Transformatör ve İletim Hatları: Yerel elektrik şebekesine ayacı ve kesici üzerinden bağlanır.

### Rüzgâr Türbinlerinde Matematiksel Hesaplamalar

“v” hızı ile hareket eden “m” kütleli havanın kinetik enerjisi SI birim sistemine göre,



Bu şekilde hareket halinde olan hava akışındaki güç, birim zamanda akan Kinetik Enerji akışı olacağından;

$$P = \frac{dW_{KE}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2}mV^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V^2)$$

V hızında esmekte olan bir rüzgârdan elde edilebilecek güç, kanadın taradığı süpürme alanından geçen kütleli debiyle ilişkili olarak;

$$P = \left( \frac{1}{2}m^1V^2 \right) \quad m^1 = \rho AV \quad P = \left( \frac{1}{2}\rho AV^3 \right)$$

### Rüzgâr Gücüne Etki Eden Parametreler

#### Yatay eksenli türbin için rotor süpürme alanı;

Prüzgâr, Yatay eksenli türbin için rotor süpürme alanı olan A ile orantılıdır. A alanı ise

Yatay eksenli türbinlerde kanat çapının karesi ile orantılıdır.

$$A = \pi D^2 / 4 \quad D = \text{Rotor Çapı}$$

Dolayısıyla rüzgâr gücü “D<sup>2</sup>” ile orantılıdır. Yani kanat çapı iki katına çıkarıldığında, rüzgâr gücü 4 katına çıkar.

Bu inceleme daha büyük rüzgâr türbinleri ile çalışma konusunda ekonomik skala hakkında bize genel karşılaştırma imkanı verir.

Bir rüzgâr türbininin maliyeti yaklaşık kanat çapı ile orantılı olarak artar, hâlbuki güç kanat çapının karesi ile orantılıdır. Sonuç olarak daha büyük rüzgâr türbinleri daha ekonomiktir.

### **Sıcaklığın Hava Yoğunluğuna(AirDensity) Etkisi:**

$$\rho = \frac{PxMAx10^{-3}}{RxT}$$

$$8.2056.10^{-5} \left[ \frac{m^3 atm}{Kmol} \right]$$

R: İdeal Gaz Sabiti:

P: Mutlak Basınç (1 atm)

T: Mutlak Sıcaklık (K:Kelvin)

MA:Gazın Moleküler Ağırlığı (g/mol)

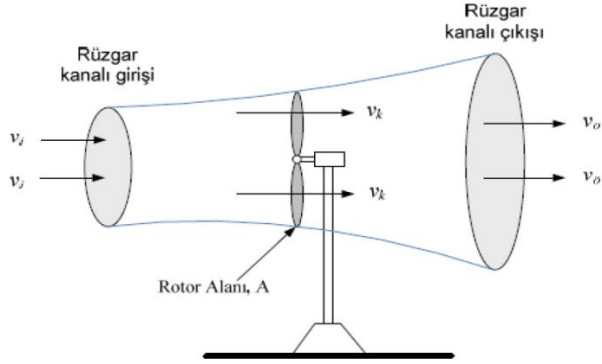
### **Kule Yüksekliğinin Etkisi**

Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemli hale gelmektedir.

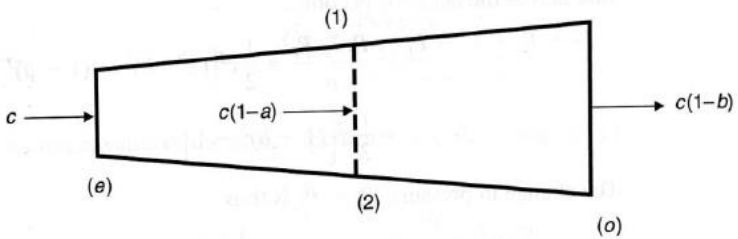
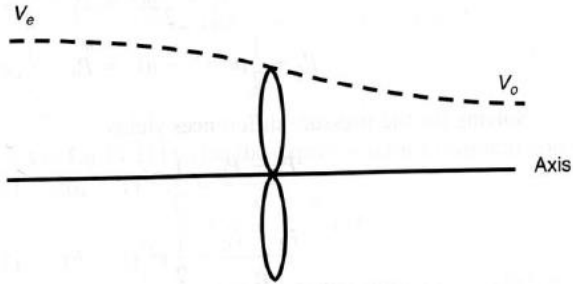
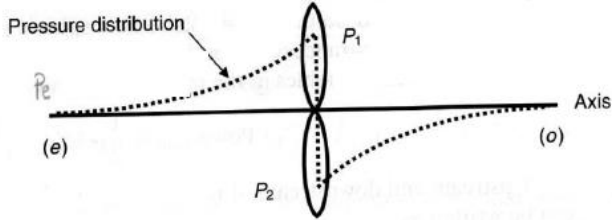
Türbini yüksek hızlı rüzgârlara maruz bırakmanın bir yolu da, türbinleri daha uzun kulelere monte etmektir. Yer seviyesinin ilk birkaç yüz metre yüksekliklerinde, rüzgâr hızı yeryüzü ile olan sürtünme ve etkileşiminden dolayı oldukça fazla etkilenir. Pürüzsüz yüzeyler örneğin; durgun deniz yüzeyi rüzgâra karşı oldukça düşük bir direnç gösterir. Rüzgâr hızındaki değişim oranı yüksekliğin artmasıyla birlikte daha düşük seviyelerde kalacaktır.

### **Rüzgârdan Elde Edilen Güç**

Rüzgardan elde edilebilecek gücün ne kadar olabileceği Betz teoremine göre belirlenmektedir. Betz analizi, aktuator disk yaklaşımını kullanır. Aktuator teorisinde, enerji transferi aktuator düzleminde gerçekleşir ve enerji dönüşümü aktuatörün önünde ve sonrasında meydana gelir. Aktuatör disk analizi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şekilde basınç, hız ve kesit alanı gösterilmiştir.



$$V_k = \frac{v_i + v_o}{2}$$



Şekil 15: a),b) Aktuatör Disk Analizi İncelemesi

Aktuatör disk, basınç ve hız dağılımlarında kanatlarda simgelenirken kesit alanı dağılımında kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Aktuatör alanı kanatların süpürme alanı olup  $A = \pi D^2/4$  'tür. Şekil(d)'de aktütörden önce (e) ile gösterilen giriş için hız rüzgar hızı olup  $c$  ile gösterilir. Aktuatör dikte hız  $c.(1-a)$  değerine düşer ve o ile gösterilen çıkışta  $c.(1-b)$ ' dir. Aktuatörün ön bölgesinde hız  $c$ 'den  $c.(1-a)$ 'ya düştüğü için, statik basınç  $P_e$ 'den  $P_1$ 'e çıkar. Aktuatörde akıştan enerji alındığında basınç  $P_2$ 'ye düşer. Aktuatörde sonra hız düşmeye devam edeceği için basınç 'den  $P_o$ 'a çıkar. Aktuatörden yeteri kadar uzakta basınç değeri atmosferik basınca ulaşılır ve çıkış basıncı  $P_o=P_e$  olur. Girişten çıkışa kadar hız düştüğü için, akışın kesit alanı mutlaka artmalıdır.

Dönen kanatlar boyunca hareket eden havanın kütle akış oranı ortalama hız ile hava yoğunluğunun çarpımından elde edilebilir.

$$m^1 = \rho AV_K = \rho A \frac{v_i + v_o}{2} \text{ ifadesi güç denkleminde yerine konulursa,}$$

$$P_K = \frac{1}{2} \left( \rho A \frac{v_i + v_o}{2} \right) (v_i^2 - v_o^2) \text{ olur. İfade düzenlenerek,}$$

$$P_K = \frac{1}{2} (\rho A v_i^3) \frac{\left(1 + \frac{v_o}{v_i}\right) \left(1 - \frac{v_o^2}{v_i^2}\right)}{2}$$

$$P_e = c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_e \cdot P_w$$

$$P_K = \frac{1}{2} (\rho A \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_e \cdot v^3) \text{ elde edilir.}$$

Genel olarak;

$$v_i = v \lambda = \frac{v_o}{\lambda}$$

$$c_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2)$$

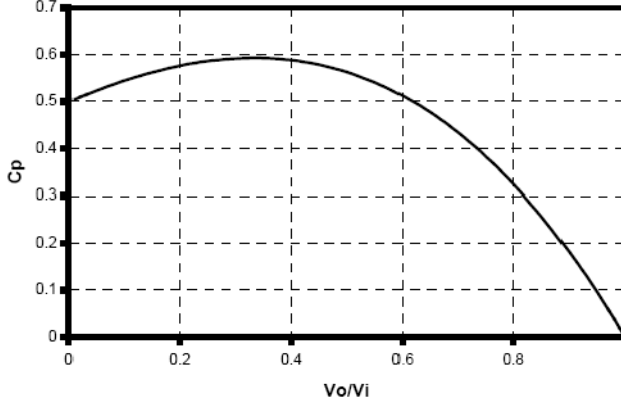
Burada  $c_p$  rotor verimi olarak bilinir.

Maksimum rotor verimini bulmak için  $c_p$  'nin  $\lambda$ 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenir. Buradan  $\lambda$ , 1/3 ve -1 gelir.

$$\lambda = \frac{1}{3} \text{ iken rotor verimi;}$$

$$c_p = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \right) \left( 1 - \frac{1}{9} \right) = \frac{16}{27} = 0,5926 = \%59,26$$

Buradan görüldüğü gibi maksimum %59,26'dır. Bu değere Lanchester-Betz limiti denir. Bu limit değer rüzgar türbininin en fazla %59,26 verime sahip olacağını göstermektedir.



Şekil 16:  $C_p$  'nin  $\lambda$  ile Değişimi [7]

### Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi

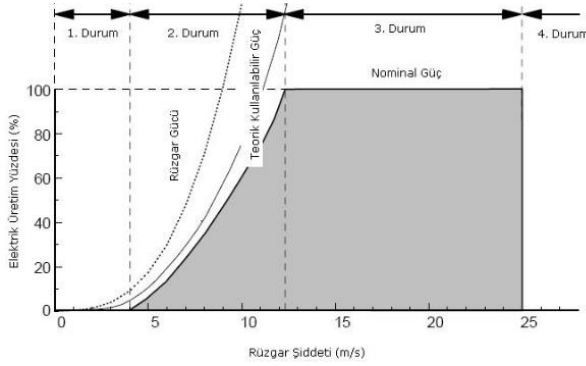
Bir türbinin güç eğrisi ortalaması ile üretebileceği güç hesaplanabilir. Güç eğrisi ortalama gücün ortalama rüzgar şiddetine bağlılığını gösterir. Böylece 4 durum teşekkül eder. Bu durumlar şu şekildedir:

Birinci durum; ortalama rüzgar şiddeti başlama (cut-in) hızından düşükse elektrik üretilmez. Türbin enerji üretmeden hareketsiz kalır.

İkinci durum; ortalama rüzgar şiddeti başlama hızından fazla ise sistem elektrik üretmeye başlar. Ancak türbinin üreteceği maksimum elektrik için gerekli hız sistem tarafından ayarlanmaya çalışılır.

Üçüncü durum; ortalama rüzgar şiddeti en uygun elektrik üretilen şiddeti yani nominal şiddeti geçerse türbin içindeki fren sistemi vb. araçlarla palaların dönüş hızı en uygun hıza düşürülür.

Dördüncü durum; ortalama rüzgar şiddeti türbinin tasarlandığı en yüksek (cut-off) hızı aşarsa sistem mutlaka kapatılmalıdır aksi takdirde türbinde hasarlar meydana gelir. Bu durumda enerji üretilemez [7]



Şekil 17: Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi

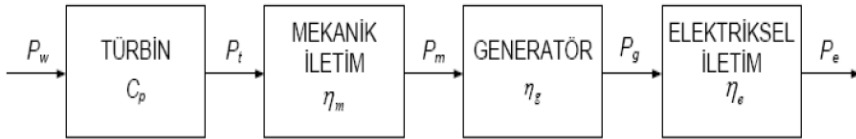
### Rüzgâr Türbinleri İçin Yer Seçimi

Rüzgar Enerji Santralının kurulacağı bölgedeki rüzgarın şiddeti ve diğer karakteristikleri, santralin veriminde doğrudan etkilediğinden türbinlerin olduğu yer önem arz etmektedir.

Rüzgar türbini kurmak için uygun yerler; yuvarlak kenarlı tepeler, kuvvetli rüzgar alanları, rüzgar yönüne paralel vadiler, yüksek ova ve platolar, tepe ve dağ zirveleridir.

Rüzgar türbini kurmak için uygun olmayan yerler; dik kenarlı tepeler, rüzgar yönüne dik vadiler, dar vadi veya kanyonlardır [7].

### Rüzgâr Enerji Verimi



$$P_e = c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_e \cdot P_w$$

$$P_K = \frac{1}{2} (\rho A \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_e \cdot v^3)$$

Sistemin geneline ilişkin verim tanımlanırsa;

$$\eta_T = c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_e$$

Yıllık enerji miktarının hesaplanmasında rüzgâr türbinine ilişkin ortalama verim kullanılabilir. Ortalama rüzgâr türbini verimleri aşağıdaki gibi tahmin edilebilir:

Rüzgâr türbinine ilişkin en yüksek verim %59,26~%60 olarak hesaplanmıştır. Optimum şartlarda modern rüzgâr türbinleri bu verimin ancak 3/4'ünü enerjiye çevirir. Generatör ve dişli kutusu ise miktarı bu enerjinin yaklaşık 2/3'ünü elektrik enerjisine çevirir.

Tüm bu faktörler birleşirse;

$$\text{Ortalama Rüzgar Türbin Verimi} = \%60 \times \frac{3}{4} \times \frac{2}{3} = \%30 \text{ olur}$$

### **Avantaj ve Dezavantajları**

Rüzgar enerjisi kullanmanın faydalarından biri, toplumsal maliyetin diğer enerji kaynaklarına göre çok düşük olmasıdır. Yani, üreteceğimiz her bir ekonomik değer için harcayacağımız tüm enerji tipleri içinde toplumsal maliyet açısından en ucuzu rüzgardır. Bu maliyetin içerisinde; kuruluş maliyetleri, işletme maliyetleri, üretilen atığın yok edilme maliyeti, ekonomik ömür gibi faktörler vardır[13].

Rüzgar santralinde türbinlerin kapladığı gerçek alan santral toplam alanının %1-1,2'si kadar olduğundan türbinlerin aralarında tarım ve hayvancılık yapılabildiğinden arazi kaybı olmadığından dolayı tarım alanlarında çiftçilik faaliyetlerine engel olmamaktadır.[9]

Rüzgar enerjisinden elektrik üretim santrallerinin kuruldukları alanda yaşayan insanlar için iş alanı yaratmaktadır. Diğer bir önemli özelliği de Rüzgar türbinleri denizde de kurulabilir. Rüzgar çiftlikleri kolayca sökülebilmekte ve buldukları arazi kolayca eski haline getirilebilmektedir.

Rüzgar santrallerinin faydalarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Görsel ve estetik kirliliği, gürültü yapması, kuş ölümlerine neden olması, kuşların göç yollarını değiştirmelerine neden olması, gerek radyo ve gerekse televizyon alıcılarında parazitler oluşturması (2-3 km'lik alan içinde) gibi olumsuz çevre etkilerinden söz edilebilmektedir.[12]

## KAYNAKÇA

- [1] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., (2018). "Analysis Of Thermoelectric Cooler Used To Produce Electrical Energy İn Terms Of Efficiency," Acad. Studies İn Eng., Gece Publishing, pp. 111-120.
- [2] Çimen, H., Ağaçyaka, A. C., Neşeli, S., Yalçın, G., (2017). "Comparison Of Two Different Peltiers Running As Thermoelectric Generator At Different Temperatures", In 2017 International Renewable And Sustainable Energy Conference (Irsec). pp. 1-6. Ieee.
- [3] Neşeli, S., Terzioğlu, H., Ağaçayak, A.C., Yalçın, G., (2017). "Electrical Power Generation By Thermoelectric Generator Using Geothermal Energy And The Low-Power Dc- Dc Buck\_Boost Converter Application", In Grad. Sch. Of Natur. And App. Scien., Selçuk University.
- [4] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). "Mathematical Modelling Of Thermoelectric Generator By Regression Analysis ," International Conference On Engineering Technologies (Icente'18). Selçuk University, Vol:3, pp.523-527.
- [5] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). "Small Power Wind Turbine Design," Acad. Studies İn Eng., Gece Publishing, pp. 121-130.
- [6] [www.yegm.gov.tr](http://www.yegm.gov.tr) [Erişim Tarihi: 10 Ekim 2019]
- [7] <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/windpower.html> [Erişim Tarihi: 10 Ekim 2019]
- [8] Yılmaz, M., (2012). "Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi", Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, Ankara , 4(2), pp. 33-54.
- [9] 2012, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Önemi 522EE0421, Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, Millî Eğitim Bakanlığı, <https://docplayer.biz.tr/1207015-Yenilenebilir-enerji-teknolojileri.html> , [Erişim Tarihi: 10 Ekim 2019]
- [10] Karaca, C., (2012). " Güneş ve Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [11] Bildirçin, H.B., (2018). " Rüzgar Türbin Teknolojileri ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kaynağının Genel Durumu", Yüksek Lisans Tezi, Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye.



- [12] Konyalı, İ., (2019). “Türkiye İçin Mevcut Enerji Üretimine Alternatif Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji Kaynaklarının Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [13] Gençoğlu, M.T., Cebeci, M., (2001). “Dünya’da ve Türkiye ‘de Rüzgar Enerjisi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu”, İzmir.
- [14] Dilaver, E.E, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, <http://www.lisanssizelektrik.org/docs/konya-sunum/lider-konya-sunum-22-ocak-2013-emel-dilaver.pdf> , 22 Ocak 2013.
- [15] Gültekin, U., (2019). “Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Yatırımlarının Gelişimi”, Turkish Studies International Academic Journals, Vol:14, Issue: 4, pp. 2333-2348.
- [16] Çolak, İ., Demirtaş, M., (2008). “Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Türkiye’deki Gelişimi”, Tübav Bilim Dergisi, Vol:1, Issue:2, pp.55-62
- [17] Özgener, Ö., (2002). “Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, İzmir, Vol: 4, Issue: 3, pp.159-173.



**YENİLENEBİLİR ENERJİ  
SİSTEMLERİNDE  
HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN  
EKONOMİK  
ANALİZİ VE PERFORMANSINA  
GENEL BİR BAKIŞ**

**BÖLÜM  
13**

**Hakan TERZİOĞLU<sup>1</sup>,  
Murat ARSLAN<sup>2</sup>,  
Havvanur Dilşah  
DEMİROK<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik, Konya, hterzioglu@ktun.edu.tr

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh. Yüksek Lisans Öğrencisi, Konya, muratarslaneem@gmail.com

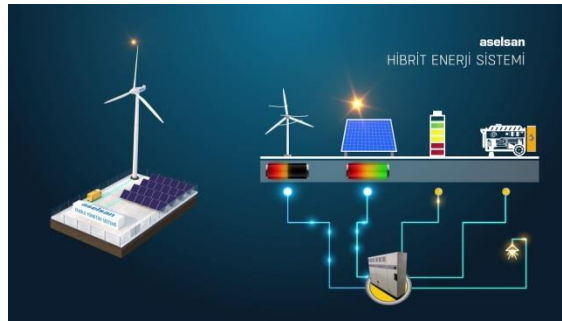
<sup>3</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh. Yüksek Lisans Öğrencisi, Konya,



## GİRİŞ

Hibrit sistemler, birbirini tamamlayıcı özellik gösteren iki veya daha fazla enerji kaynağını kullanan sistemlerdir. Bu sistem sayesinde daha verimli enerji elde edilmektedir. Rüzgâr ve Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının dezavantajları sürekliliklerinin bulunmamasıdır. Güneş ışınlarının en kuvvetli ve parlak olduğu yaz aylarında rüzgâr hızı düşük olduğundan dolayı rüzgar kış ayında sürekli fakat yaz aylarında rüzgar hızındaki düşüklük nedeniyle enerjide düşüş olmaktadır[1].

Yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye duyarlı olmasına karşın çevre ve atmosfer koşullarına bağlı olarak gün içerisinde ve yıl içerisinde değişkenlik göstermektedir. Fakat hibrit sistemler birden fazla yenilenebilir enerji kaynakları birlikte kullanılarak bu sorun aşılabılır. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları olan Güneş enerjisi, Rüzgar enerjisi, Hidrolik (hidroelektrik) enerjisi, Jeotermal enerjisi, Biyokütle enerjisi (biyoyakıt enerjisi de dahil), Hidrojen enerjisi, Dalga enerjisi, Gelgit enerjisi, birlikte kullanıldığı Hibrit Sistemler sayesinde güneş ışınımının yetersiz olduğu durumlarda diğer enerji türlerinden istifade edilebilir. Bu şekilde kesintisiz enerji sürekliliği sağlanmış olur. Son zamanlarda alternatif yenilenebilir enerji kaynakları üzerindeki bilimsel çalışmalar artmıştır[2-5]. Hibrit Sistemlerde en çok tercih edilen rüzgar ve güneş enerjisinin yanı sıra dizel jeneratörlerde kullanılabilir[6]. Hibrit Sistem kombinasyonları PV-rüzgâr, PV-rüzgâr-dizel, rüzgâr-dizel gibi enerji sistemleri örnek verilebilir.

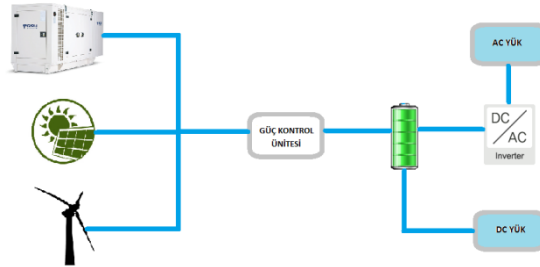


Şekil 1: Hibrit Sistem Modellemesi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi, optimum seviyede belirlenmiş olup, uygun şartlarda jeneratörün devreye girmesine gerek kalmaksızın yükü beslemeye uygun niteliktedirler. Ancak, güneşten sadece gündüz elektrik alınabilmekte ve gece yük

enerjisiz kalmaktadır. Rüzgar enerjisine güneş kadar net sınırlar çizilemese de günün belli saatlerinde enerji üretilebilmekte ve yük beslenebilmektedir. Güneş ve rüzgar enerjisindeki bu değişkenliklerden dolayı yük akü bankasından beslenmektedir. Güneş ve rüzgar enerjisi ise akü bankasını besleyerek akülerin daha uzun çevrim ömrüne sahip olmasını sağlamaktadır.

Güneş ve rüzgar enerjisinin yetersiz olduğu zamanlarda, akü bankası deşarj olarak yükü beslemekte ve enerjinin sürekliliği sağlanmaktadır. Akü bankasının belirli bir deşarj derinliğine indiği noktada dizel jeneratör devreye girerek hem yüke aktarılan enerjinin sürekliliği sağlanmakta, hem de akü bankası şarj edilerek yeniden kullanılabilir hale getirilmektedir. Bununla birlikte, akü bankasının daha uzun ömürlü olması için, akü deşarjına kısıtlamalar getirilmiştir. Akü bankası % 50 deşarj derinliğinin altına inmesi engellenerek, hem ömrünün daha uzun olması sağlanmakta hem de jeneratörün çalışma süresi minimum seviye de tutulmaktadır. Aynı zamanda aydınlatma ve yedek AC güç çıkışı için invertör sisteme eklenir.



Şekil 2: Hibrit Sistemler Çalışma Diyagramı

Hibrit Enerji Sistemlerinin Avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir[7]:

- Birden fazla elektrik üretim kaynağı kullanıldığı için, hibrit enerji sistemleriyle kesintisiz enerji elde edilmesi,
- Optimum tasarım teknikleriyle kurulduğu durumlarda, minimum elektrik üretim maliyeti.
- Özellikle Fotovoltaik (PV) panellerin kurulumunun kurşun-asit bataryalar gibi klasik enerji depolama aygıtlarının kullanıldığı durumlarda, sınırlı bakım ve işletim maliyeti,
- Özellikle hibrit enerji sisteminin hiçbir fosil yakıt kullanmadığı (sadece YES temelli hibrit enerji sistemleri) durumlarda, optimum çevre dostu durum, Hibrit Enerji Sistemlerinin Dezavantajları da mevcuttur;

- Uzun vadeli maliyeti normalde düşük olmasına rağmen, ilk kurulum maliyeti yüksektir.
- Hibrit enerji sistemi büyük boyutlandırılmıştır, çünkü, sistem tasarımcıları her bir sistem bileşeninin yük talebini diğer enerji kaynaklarının katılımı olmadan sağlayabilmesi için çabalar.
- Farklı teknolojilerin uygulanması şebekeden bağımsız sistemlere bir derece karmaşıklık getirir (özellikle elektronik kontrol aygıtlarında ve bakım ve işletim prosedürlerinde)
- Termal ünitelerin (örn. dizel elektrik jeneratörleri) ve bataryaların kullanılmasının çevresel etkilerle ilişkisi vardır, bu yüzden bu YES-temelli sistemlerin çevre dostu özelliklerini düşürmektedir.

## **YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNDE HİBRİT GÜÇ SİSTEMİ İLE İLGİLİ BİLİMSEL ÇALIŞMALAR**

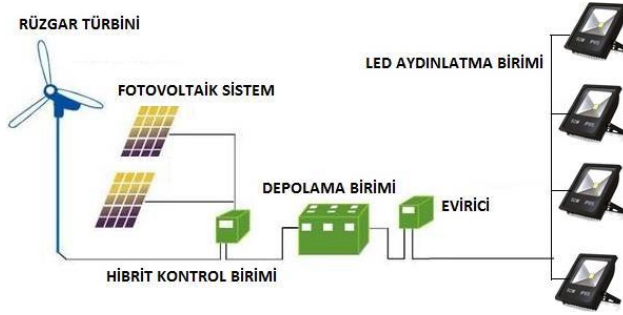
"Bahçelievler belediye başkanlık binasının enerji ihtiyacının güneş ve rüzgar sistemi ile karşılanması, optimizasyonu ve maliyet analizi" isimli çalışmada, bir binaya uygulanan hibrit enerji üretim sistemi ile enerji ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Güneş enerjisi için PVsyst programı kullanılarak benzetim yapılmıştır ve Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden alınan saatlik veriler kullanılmıştır. Rüzgar hızı verileri çeşitli rüzgar hızı işleme formülleri ile işlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda çalışılmak istenen bölgede, çalışma ömrü 25 yıl olan rüzgar türbininin amortisman süresinin 40 yılı aştığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak kurulması düşünülen hibrit sistem, rüzgar gücünden elde edilecek enerjinin ekonomik olmamasından dolayı kurulmayarak sadece güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir. Panel yerleştirilecek alanın kısıtlı olmasından dolayı üretilecek enerji, ihtiyacın tamamını karşılayamamaktadır bu sebepten güneş enerji sistemi şebekeye bağlantılı olarak yapılmıştır. Sistem yıllık tüketilen enerjinin %1'sini karşılamakta ve maliyeti 5,9 yılda kendini amorti etmektedir[10].

"Küçük ve mikro ölçekli enerji yatırımı için hibrit enerji modeli" isimli çalışmada, Türkiye'de çatı üstü güneş ve rüzgar türbinlerinin ayrı çalışmalarda kullanılmış olmasına rağmen hibrit değerlendirme metodolojisi ve sonuçlarının ülke çapında güneş ve rüzgar türbinlerinin ayrı çalışmalarda kullanılmış olmasına rağmen hibrit değerlendirme

metodolojisi ve sonuçlarının ülke çapında yayın olmadığı belirtilmiş, verilen tesis alanın mikro ölçekli güneş ve rüzgar esaslı toplam enerji kapasitesine göre iki kaynaktan üretilen enerjiyi azami noktaya ulaştırmak ve hızlı bir ön çalışma yaparak hibrit sistemin uygunluğunun hesaplanması için Hibrit Optimizasyon Aracı (Hybrid Optimization Tool - HOT) olarak isimlendirilmiş bir yazılım modeli önerilmiştir. Bu model yaygın olarak kullanılan HOMER yazılımı ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, enerji talebi dikkate alınarak şebekeye bağlantılı olacak şekilde batarya olmadan bir sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmada İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Binasına ve İzmir Urla bölgesinde bulunan bir eve ait elektrik tüketimleri dikkate alınmıştır. Veriler hem HOT yazılımında hem de Homer Pro yazılımında girdi olarak kullanılarak iki yazılım arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Girdilerin hassasiyetinin ve doğruluğunun yüksek olması durumunda, geliştirilen HOT yazılımının, Homer Pro ile benzer sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. Ek olarak çalışmada, sistemlerin ekonomik olarak daha uygun hale gelmesi için özellikle rüzgâr türbinlerinde birden fazla kullanılması durumunda, daha yüksek kapasiteye sahip daha az sayıda mümkünse tek rüzgâr türbini kullanılmasının maliyetleri ciddi anlamda düşüreceği ve yatırımı daha uygulanabilir hale getireceği belirtilmiştir[11].

"Yenilenebilir enerji kaynaklı hibrit sistemin fiziksel olarak gerçekleşmesi ve analizi" isimli çalışmada, Bitlis Eren Üniversitesi Rahva yerleşkesinde, güneş panelleri ve rüzgâr türbini birlikte kullanılarak oluşturulan hibrit enerji sisteminin fiziksel olarak kurulumu yapılmıştır. Çıkışlara LED projektörler yerleştirilmiş, çıkış verileri ölçülmüş ve sistemin farklı işletme koşulları altındaki durum davranış analizleri yapılmıştır. Hibrit sistem, 900 W'lık FV sistemi ve 500 W'lık rüzgar türbini ile oluşturulmuştur. Hibrit sistemin blok şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.





Şekil 3: Güneş panelleri ve Rüzgâr türbini birlikte kullanılarak oluşturulan hibrit enerji sisteminin kurulumu

Rüzgâr türbini için gerilim verileri Fluke 435 enerji analizörü kullanılarak belirlenmiş, sonuçta gerilim değerlerinin oldukça değişken olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ilgili bölge için depolamanın verim açısında gerekli olduğu kanısına varılmıştır. FV sistemin çıkış değerleri ölçülerek daha stabil olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak FV sistem tarafından üretilen enerjinin doğrudan şebekeye verilebileceği kanısına varılmıştır. Çalışmanın sonucunda bölgede yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisinin verimli bir şekilde üretilebileceği gözlemlenmiştir[12].

"Isparta ilinde fotovoltaik/termal (PV/T) hibrit sistemin performans analizi" isimli çalışmada, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi esnasında sıcaklığın artması sonucu azalan verimi, PV panelin arka yüzeyine yerleştirilen borulardan geçen su ile soğutarak arttırmak amaçlanmıştır. Sıcaklığı artan su, bir su deposu içerisinde dolaştırılarak bünyesindeki ısı depodaki suya aktarılmıştır. Çalışmada iki özdeş panel (870x1640x105 mm boyutlarında monokristal malzemeden yapılmış 72 hücre sayısına sahip ve nominal gücü 175 W' dır) kullanılarak biri soğutmalı, diğeri soğutmasız olarak elektrik enerjisi üretilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı sırada gün içerisinde sıcaklığın en fazla değere ulaştığı saat 13:00 saatlerinde soğutma yapılmayan panelin yüzey sıcaklığı 95 °C, soğutma yapılan panelin yüzey sıcaklığı 55 °C civarında ölçülmüştür. Panel açısının 37° ve su debisinin 0.33 kg/s olduğu su soğutmalı ve soğutmasız paneller için soğutma yapılmayan panelde maksimum 80.75 W' a ulaşılabilirken soğutma yapılan panelde 117.07 W' a ulaşılmıştır. Daha sonra panel açısı sabit tutularak su debisi 0.16 kg/sn 'ye düşürülmüş, soğutma yapılmayan panelde maksimum 80.09 W' a ulaşılabilirken soğutma yapılan panelde 112.703 W' a ulaşarak soğutmayla % 28'lik bir güç artışı sağlanmıştır. Panel açısı 33° 'ye düşürüldüğünde ve su debisi 0.33 kg/s olduğunda soğutma yapılmayan

panelde maksimum güç 83.22 W olarak ölçülürken soğutma yapılan panelde 123.44 W olarak ölçülmüş, % 32'lik bir güç artışı gözlemlenmiştir. Panel açısı 33° ve su debisi 0.16 kg/sn olduğunda soğutma yapılmayan panelde güç en fazla 83.72 W' a ulaşabilirken, soğutma yapılan panelde 120.14 W' a ulaşarak %30'luk güç artışı sağlanmıştır. Panel açısının sabit olduğu durumlarda su debisinin düşmesi sonucu panel sıcaklığı artmakta, sonuç olarak elde edilen verim azalmaktadır. Çalışma sonucu veriler değerlendirilerek soğutmalı ve soğutmasız paneller karşılaştırıldığında, soğutma işleminin yaklaşık % 30'luk güç artışına sebep olduğu gözlemlenmiştir[13].

"Rüzgar-güneş hibrit güç sistemi tasarımı ve uygulaması " isimli çalışmada, Adnan Menderes Üniversitesi Söke Meslek Yüksek Okulu'na kurulacak olan hibrit üç sisteminin tasarımı yapılmış ve ayrıca sistemin amortisman süresi hesaplanmıştır. FV sistemin kurulumu yapılmış, rüzgar güç sistemi için MATLAB/Simulink ortamında simülasyonlar yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında Söke Meslek Yüksekokulu'nun dış aydınlatmasını yapan lambaları beslemek için FV sistemi kurulmuştur. Sistem 4 adet 140 Wp değerinde monokristal panellerden oluşmaktadır. FV sistemin amortisman süresinin yaklaşık 12 yıl, kurulması düşünülen rüzgar türbininin amortisman süresinin ise yaklaşık 8 yıl olduğu hesaplanmıştır. Sonuç olarak yapılan hesaplamalardan anlaşılacağı üzere, oluşturulacak olan hibrit sistemin amortisman süresinin, aynı güçteki FV sistemin amortisman süresinden daha kısa olduğu görülmektedir. Bu sistemlerin 20 yıllık kullanım süreleri olduğundan, amortisman sürelerinin hesaplanmasının sonucunda uzun vadede ekonomik sistemler olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmanın yapıldığı bölgede, en az güneş enerjisi üretilebilecek olan aralık ayında bile sistemin dış aydınlatma lambalarını 10 saat çalıştırabileceği hesaplanmıştır[14].

"Fotovoltaik/termal hibrit güç sisteminin ekonomik analizi ve performansının incelenmesi" isimli yüksek lisans tez çalışmasında, güneş enerjisi ve ısı enerjisinden faydalanılarak hibrit olarak elektrik enerjisi üreten bir sistemin ekonomik analizi yapılmış ve bu sistemin performansı incelenmiştir. Fotovoltaik sistemler güneşten gelen fotonların enerjisi ile elektrik üreten sistemler olsalarda bu fotonların bir kısmı sistemde ısınmaya ve verim düşüklüğüne yol açmaktadır. Bu probleme çözüm olarak ısınan sistem hava veya sıvılar yoluyla soğutulmakta, ısınan hava veya sıvıların enerjisinden tekrar elektrik enerjisi üretilmektedir. Fotovoltaik/Termal Hibrit Güç Sistemlerinin çalışma prensibi bu

şekildedir.Çalışmada belirtildiğine göre PV/T hibrit sistemlerin, PV sistemlere göre avantajları; 1.Ayrı ayrı PV kollektör ve termal kollektör kullanımı için gerekli alan miktarının yarı yarıya inmesiyle kısıtlı alanlarda daha fazla enerji üretimine olanak sağlar. 2. Ayrı ayrı kullanılacak PV ve termal kollektör kurulumuyla ortaya çıkacak mimari ve estetik düzensizlik ortadan kalkar. İncelenen hibrit sistemin görüntüsü aşağıdaki şekilde verilmiştir.



*Şekil 4: Hibrit sistemin görüntüsü*

Bu tez kapsamında, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü'nde kurulan 0,38 kW<sub>p</sub> gücündeki bir PV/T sistemin performansı incelenerek şebeke bağımsız çalışma durumunda ürettiği enerji miktarı hesaplanmış, sistemin enerji maliyetleri ve amortisan süresi hesaplanmıştır. Sistemin deneysel termal çalışma performansı sonucu alınan verilerin doğrulaması, TRNSYS ve Matlab-Simulink ile yapılmıştır. Sistemin termal performansını incelemek amacıyla farklı debi değerlerine sahip akışkanlarla analizler yapılmış, akışkanın kütleli hızının artmasının termal verimi de arttırdığı gözlemlenmiştir. Yüksek verimlerdeki sıcaklığa bağlı kayıpların daha fazla olduğu dolayısıyla, sistemin tüm gün çalışma performansı incelendiğinde yüksek debi değerlerindeki çalışma durumlarında toplam termal enerji üretiminin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sistemin amortisman süreleri; elde edilen termal enerjinin elektrikten üretildiği düşünülürse 8,48 yıl, fuel-oilden elde edileceği düşünülürse 12,15 yıl ve doğalgazdan elde edileceği düşünülürse 23,5 yıl olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, soğutma yapılmayan panelde ışınımın her 100W/m<sup>2</sup> artışı hücre sıcaklığında 4,77 °C artışa neden olurken, soğutma yapılan panellerde bu sıcaklığın 2,34 °C olduğu ölçülmüştür. İlgili ay boyunca PV/T panellerden üretilen toplam elektrik enerjisi 40,7 kW olarak ölçülmüştür. Böyle bir sistemin 3,6kWh/gün“lük enerji harcayan bu yük için yaz aylarında yeterli olacağı

ancak kış aylarında yetersiz kalacağı tespit edilmiştir. PV/T sisteminin yüklü ve yüksüz durumlarında termal verimleri hesaplanmış, yüklü durumda %52,1 ve yüksüz durumda %59,7 olduğu hesaplanmıştır[15].

"Artvin Çoruh Üniversitesi seyitler yerleşkesi enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması" isimli çalışmada Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesinde 400 kWp güneş enerji sistemi ve 100 kWp rüzgar enerji sistemini kapsayan bir tesisin fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Renewable Energy Technology Screen (RETScreen) yazılımı ile analizler yapılmış ve rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit sistemin optimum koşullarda ne kadar fayda sağlayacağı tartışılmıştır. Belirlenen bölgede güneş sıcaklık parametreleri ve rüzgar enerji verileri incelenmiş, çalışmaya uygun olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında yerleşkenin aylık elektrik üretim miktarları, FV sistemlerinin ve rüzgar enerji santralinin kurulabileceği uygun yerler belirlenmiştir. RetScreen yazılımı farklı sistem konfigürasyonlarını simüle eden ve bunları kullanım süreleri boyunca işletim, kurulum vb. maliyet girdilerini net bir şekilde ölçkendirilen bir optimizasyon yazılım paketidir. Kullanıcının girdiği verilere göre program öncelikle Rüzgâr Enerji Santrali (RES) ve Güneş Enerji Santrali (GES)'in teknik fizibilitesini yani sistemin elektriksel ve termal yüklerle ve kullanıcı tarafından uygulanan diğer sınırlamalara yeterince uygun olup olmadığı değerlendirir ve daha sonra olası senaryolar çıkarır. Yazılım, giriş parametrelerinin bir veya daha fazlasındaki bir değişikliğin etkisini değerlendirmek için duyarlılık analizini de yapabilir. Çalışmada RetScreen ile rüzgar, güneş ve hibrit olmak üzere üç farklı sistemin karşılaştırılması yapılarak maliyetleri bir tabloda özetlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında hibrit sistemin yaz kış enerji üretimi sağlama ve yatırımın geri dönüş süresini (amortisman süresi) azaltmak gibi pek çok avantajlarının olduğu gözlemlenmiş, ayrı ayrı rüzgâr ve güneş enerjileri ile hibrit sistemler arasından 500 kW'lık hibrit sistem önerilmiştir[16].

"Sezgisel optimizasyon algoritması kullanılarak hibrit (fotovoltaik-rüzgar) enerji sistemi için boyut optimizasyonu" isimli çalışmada, belirli bir bölgedeki elektrik enerjisi talebini karşılamak üzere kurulması istenilen fotovoltaik/rüzgar hibrit enerji sisteminin boyutunun, sezgisel optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada algoritma olarak Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması seçilmiştir. Çalışmada maliyeti azaltmak ve hibrit güç üretim sistemi bileşenlerinin sayılarını belirlemek amacıyla Yapay Arı Kolonisi

algoritmasından faydalanılarak hibrit enerji sistemlerinin analizi ve optimizasyonu için nesne taanlı programlama dilinde yazılım geliştirilmiştir. Çalışma alanı olarak Kırklareli ili Pınarhisar ilçesinde bulunan ir okul binası seçilmiştir. Algoritma C# dilinde geliştirilmiş, parametre girişi ve sonuçların gösterilmesi için görsel bir ara yüz tasarlanmıştır. Kırklareli Meteoroloji İl Müdürlüğü'nün ölçüm istasyonlarından bir yıllık rüzgar hızı ve güneş radyasyonu verileri elde edilmiştir. YAK algoritması parametreleri FV panel sayısı ve rüzgar türbini sayısı olarak belirlenmiştir. YAK algoritması ile parametreleri belirlenmek istenen fotovoltaik panel/rüzgar türbini hibrit güç üretim sistemi, sadece fotovoltaik panel güç üretim sistemi ve sadece rüzgar türbini güç üretim sistemi olmak üzere üç güç sistemi için analiz yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Güç kaynağı kaybı olasılığı (LPSP) %3 iken, optimum boyutlandırma parametreleri hibrit sistem optimizasyon sonucunda için 3 rüzgar türbini, 216 FV panel ve 21 akü, sadece FV güç üretim sisteminin olduğu optimizasyon sonucunda 486 FV panel, 30 akü ve sadece rüzgar güç üretimi sisteminin olduğu optimizasyon sonucunda ise 13 rüzgar türbini, 45 akü olarak belirlenmiştir. Yıllık toplam maliyetler ise hibrit sistem için 26887,41\$, sadece FV güç üretim sistemi için 30812,85\$, sadece rüzgar güç üretim sistemi için ise 61780,06\$ olarak bulunmuştur. Çalışmada farklı LPSP değerlerinde yukarıda belirtilen değerlerin değişimi gözlemlenmiştir ve en uygun sistemin hibrit sistem olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma ile Yapay Arı Koloni algoritmasının güç sistemleri alanında optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılabilir olduğu ayrıca algoritmanın optimal çözüme kısa bir süre içerisinde ulaşabildiği görülmüştür[17].

"Hibrit güç sistemlerinde maksimum güç noktası takibi için bulanık denetleyicinin optimizasyonu" isimli çalışmada, fotovoltaik panel ile sabit mıknatıslı senkron jeneratör temelli rüzgar türbini kaynaklarından oluşan şebeke bağlantılı hibrit güç sisteminin modellenmesi çalışılmıştır. Sistem için değişen güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgar hız değişimini kontrol etmek amacıyla değişik kontrol yöntemlerinin benzetimleri yapılarak en etkin benzetim yöntemi bulunmuştur. Değişen güneş ışınımı ve sıcaklık koşulları altında güneş enerjisi için bulanık mantık yöntemi ile artımsal iletkenlik metodu kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmış, bulanık mantık tabanlı denetimin maksimum güç noktasını daha yüksek değerlerde izleyebildiği gözlenmiştir. Değişen rüzgar hızı koşulları altında rüzgar enerjisi için bulanık mantık yöntemi

ile değiştir-gözle metodu kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmış, bulanık mantık tabanlı denetimin daha yüksek değerlerde maksimum güç noktasını izleyebildiği gözlenmiştir. Rüzgar ve güneş enerji sistemlerinden oluşan hibrit sistem, ortak DA barada birleştirilmiş ve sistemin şebekeye bağlı olarak çalışabildiği görülmüştür. Sistem MATLAB/Simulink üzerinde modellenmiş ve gözlenmiştir. 10 kW'lık güneş enerji sistemi ve 5kW'lık rüzgar enerji sistemi için ayrı ayrı devre yapıları oluşturulmuş, daha sonra ortak DA barada birleştirilmiştir. Güneş ve rüzgar enerjisi için tasarımı yapılan her bir arttıran çeviri ortak bara gerilimi olan 500 Volt'ta her iki sistemi regüle ettiği görülmüştür. Yüksek doğruluklu izleme ve çalışma koşullarındaki değişimlere hızlı cevap verebilmek için bulanık mantık denetimi gerçekleştirilen 10 kW'lık güneş enerji sisteminde ve 5 kW'lık rüzgar enerji sisteminde üretilen enerjinin şebekeye bağlantısı sonucunda yapılan ölçümlerde, toplam enerjinin kabul edilebilir kayıplarla şebekeye aktarıldığı gözlenmiştir[18].

"Fotovoltaik-termal (PV/T) bir sistemin deneysel performansının incelenmesi" isimli çalışmada Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü'nde kurulan PV/T hibrit sisteminin elektriksel ve termal çalışma performansları ve sistemin şebeke bağımsız olarak akülerle birlikte elektriksel çalışma performansı incelenmiştir. PV sistem için soğutucu olarak sıvı akışkanı kullanılmıştır. Hibrit sistemin performans değerlendirilmesi amacıyla kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları, kütleli akış hızı, hava sıcaklığı, güneş ışınımı, panel hücre sıcaklığı gibi fiziksel büyüklüklerin ölçümü yapılarak kaydedilmiştir. Farklı kütleli akış hızlarında deneyler yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunun yanında sistemin şebeke bağımsız çalışma durumu aküler ve belirlenen bir yük profili ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu yüklerin çektiği akım değerleri ile PV/T sistemden çekilen akım değerleri anlık kaydedilip akü şarj seviyeleri ile sistemin anlık verim değeri belirlenmiştir. Deney sisteminde iki adet PV/T panel, 100 litre depo, sirkülasyon pompası, şarj regülatörü, 4 adet 98Ah-12V jel akü, 1 adet basınç tankı ve 1 adet inverter bulunmaktadır. Soğutmalı ve soğutmasız sistemler karşılaştırılarak panellerin soğutulması durumunda yaklaşık olarak %12,9'luk bir güç artışının olduğu gözlenmiştir. Farklı debilerde yapılan çalışmalarda verim 0.069 kg/s debide % 52.11, 0.015 kg/s debide ise % 49.9 olarak hesaplanmıştır. Sistemin şebeke bağımsız elektriksel çalışma performansının değerlendirilebilmesi için, 15-31 Ağustos tarihleri arasında elde edilen elektriksel ölçümler neticesinde; sistemden 25.788

kWh elektrik enerjisi elde edilerek akülerde depo edilmiştir. PV/T panellerin ve yük profilinin akülerin şarj durumuna etkisi bu tarihler arasında izlenmiştir ve akü şarj durumunun % 40-100 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda sistemin şebeke bağımsız çalışma performansının yaz aylarında yeterli olsa da kış aylarında yeterli olmayacağı görülmüş, verimin artırılması ve panel sıcaklığının düşürülmesi için soğutma için kullanılan deponun daha büyük olması önerilmiştir[19].

"Yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit kullanımını yapay zeka ile modellenmesi" isimli çalışmada, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin kullanılacağı bir sistem kurmak ve sistem kurulmadan önce yapay sinir ağları kullanılarak; hangi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli ve az maliyetli olacağını, seçilen yenilenebilir enerji kaynağının ne kadar miktar kurulursa ihtiyacı karşılayabileceğinin, sistemden hangi konumda ve açıda en fazla verim alınabileceğinin ve sistemin kurulumunun olabilesinin hesaplanması amaçlanmıştır. Yapay sinir ağları ile hesaplama MATLAB programında nftool araç kutusu kullanılmıştır. Çalışmada fotovoltaik sistemin amortisman süresi 3 yıl, rüzgar türbininin amortisman süresi 4,5 yıl olarak hesaplanmıştır. Çorlu ilçesinin rüzgar türbinlerinin reel verileri alınarak ve bölgedeki güneş panellerinin reel değerleri ölçülerek bir veri kütüphanesi elde edilmiş ve yapay sinir ağları metodu kullanılarak sistem simüle edilmiştir. Sonuç olarak daha sistem kurulmadan bu yapay sinir ağı üzerinden yapılan simülasyonla yüksek ölçüde saptamalar yapılabilmektedir[20].

"PV/T tabanlı bir sistemde matlab/simulink kullanılarak yapılan performans analizi" isimli çalışmada, Sıvı Tipi PV/T Kolektör sistemi kullanılarak Manisa ilinin iklim şartlarında elektriksel ve termal verim analizi yapılmıştır. Sistem MATLAB/Simulink programında simüle edilmiş, tasarım parametreleri (sızdırmazlık faktörü, geçirgenlik-soğurma faktörü, emici yüzeyin iletkenliği, ortam sıcaklığı, ışıınım değeri ) ile bunların termal ve elektriksel verime etkileri incelenmiştir. Oluşturulan model üzerinde  $(T_i - T_a)/G$ , sızdırmazlık faktörü ve ısı iletim katsayısının değişimine bağlı olarak PV/T kolektörün termal ve elektriksel verim değişimi analiz edilmiştir. Elektriksel verim için en önemli etkenin sızdırmazlık faktörü olduğu ve bu değer artması ile elektriksel verimin arttığı, termal verim için en önemli etkenin geçirgenlik-soğurma faktörü olduğu ve bu değer artması ile termal verimin arttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, çalışmada belirtilen özelliklerde bir PV/T sisteminin

Manisa ilinde kurulması durumunda elde edilebilecek termal verim %64,5, elektriksel verim %13,5 ve toplam verim %78 olarak tespit edilmiştir[21].

"Yarı-saydam güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrit sistemin izmir koşullarında analizi" isimli çalışmada, fotovoltaiik/termal bir hibrit sistemin elektriksel ve ısı verimleri incelenmiştir. Çalışma için kurulan prototip; düzlemsel toplayıcıya ulaşan güneş ışınımını arttırmak için yarı saydam PV modül ve ısı çıkışı arttırmak için titanyum dioksit kaplamalı düzlemsel toplayıcı beraber kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada genelin aksine güneş pilinin verimini azaltmasından ve cam örtüdeki ek yansımalarından dolayı güneş modülünün elektriksel çıkışını etkilemesinden dolayı kurulan sistemin termal kolektör kısmında cam örtü kullanılmamıştır. İnce-film a-Si PV modül iki cam arasında bulunduğu için düzlemsel plakalı kolektörün cam örtüsü yerine kullanılmıştır. Düzlemsel kolektör yutucu yüzeyi düz ve plaka ile iyi ısı temas halinde silindirik borulardan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Yutucu yüzey verimi arttırması için titanyum dioksit ile kaplanmıştır. Çalışmada PV/T sistemin anlık ısı verimi %71, günlük verimi %85,7 olarak ölçülmüştür. Doğal dolaşımli olarak çalıştırılan termal sistemin verimi ise %41 olarak ölçülmüştür. Güneş modülünün verimi 1000W/m<sup>2</sup>'de %4.5 olarak ölçülmüştür. PV/T hibrit sistemi ile güneş modülü ve termal sistemin verimleri karşılaştırılmıştır. Termal toplayıcının tek başına çalışması sonucu daha nce incelenen ünlere göre çıkış suyu sıcaklığında 30°C kadar artış olmuş, bunun da daha önce güneş modülünün toplayıcı yutucu yüzeyinin %90 oranında gölgelenmesinden dolayı olduğu sonucuna varılmıştır[22].

"Şebekeden bağımsız uygulamalar için hibrit bir rüzgar türbini / fotovoltaiik / yakıt hücresi / batarya sisteminin optimizasyonu, tasarımı ve uygulaması" isimli çalışmada, uygun bir güç biçimlendirme ünitesi üzerinden şebekeden bağımsız bir yük için gerekli güç talebini karşılayan hibrit (rüzgar enerjisi+güneş enerjisi+hidrojen enerjisi) bir yenilenebilir enerji sisteminin tasarımı, optimizasyonu ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada hibrit sistem rüzgar türbini / fotovoltaiik / yakıt hücresi / batarya ünitelerinden oluşmaktadır. Çalışmada ilk kez hibrit sistem bileşenlerinin performans azalmasını dikkate alan yeni bir perspektif ile şebekeden bağımsız bir alternatif enerji sisteminin optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Sistem öncelikle MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve incelenmiş,



ardından "alan tabanlı gözleme ve odaklan (AGO)" isimli bir yaklaşım kullanılarak optimum boyutlandırma çalışmaları gerçekleştirilmiş, ekonomik olarak karşılaştırılmış ve optimum boyutlandırılmış sistemin etkinliği bir de deneysel olarak sınanmıştır. Sistemde FV ve RT (Rüzgar Türbini) üniteleri başlıca enerji kaynağı konumundadırlar. YH (Yakıt Hücre) sistemi, bu kaynaklar meteorolojik koşulların değişiminden dolayı güç talebini karşılayamadığında devreye girerek sisteme güç aktarmaktadır. YH, gaz halindeki bir yakıt (hidrojen) ile oksidantı (havadaki oksijen) elektrokimyasal olarak birleştirilerek elektrik enerjisi ve ısı üreten bir enerji dönüştürücüsüdür. Yani bu sistemler kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedirler. Çalışmada sistem boyut hesaplaması için optimum boyutlandırma yaklaşımı önerilmektedir. Çalışmada genel hibrit sistem benzetim modelinin elde edilmesinin ardından gerçekleştirilen hibrit sistem boyutlandırma çalışmaları kapsamında YH-elektrolizör kombinasyonlu yedek güç ünitesi, gaz reformasyonu tabanlı hidrojen beslemeli YH yedek güç ünitesi ve sadece batarya bankası tabanlı yedek güç ünitesi opsiyonları ele alınmıştır. Sistem bileşenlerinin ne kadar güce sahip olarak kullanılacakları; 1- Sistem bileşenlerinin performans azalması dikkate alınarak, 2- Sistem bileşenlerinin performans azalması dikkate alınmadan, 3- Elektrolizör kullanımı olmadan sadece YH sistemi tabanlı yedek güç ünitesi kullanıldığında, 4- Hidrojen tabanlı yedek güç ünitesi olmadan maddelerine göre incelenmiş ve hesaplanmış, ele alınan sistem konfigürasyonları arasında en az maliyetli tasarımın gaz reformasyonu FV/RT/YH/Batarya kombinasyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak çalışmada gaz temini gereksinimi olduğundan bu konfigürasyonun bir mahsur oluşturabileceği konusunda uyarı yapılmıştır[23].

"Celal Bayar Üniversitesi Muradiye KYK Kız Yurdu için hibrit enerji sistemi fizibilite çalışması" isimli çalışmada, Celal Bayar Üniversitesi Muradiye yerleşkesinde bulunan Muradiye KYK Kız Yurdu'nun elektrik ihtiyacının karşılanmasına yönelik Güneş-Rüzgâr Hibrit Sistem kurulması için yıllık ve aylık elektrik tüketim değerleri tespit edilerek kurulabilecek hibrit sistemle alakalı fizibilite çalışmaları, hesaplamalar ve değerlendirmeler yapılmıştır. Manisa ili ortama radyasyon değeri 4,07 kWh/m<sup>2</sup>-gün ve ortalama güneşlenme saati 6,76 saat olarak tespit edilmiştir. Muradiye Yerleşkesi rüzgar hızı, rüzgar haritası dikkate alınarak 6-6,5 m/s aralığında tespit edilmiştir. Çalışmanın ekonomikliği için rüzgar hızının 7m/s olması gerektiğinden bu çalışmada güneş enerjisi

ile rüzgar enerjisini birleştiren hibrit bir enerji sistemi üzerinde çalışma yapılmıştır. Kullanılacak rüzgar türbini 500kW'lık %50 kapasiteye sahip bir türbindir ve bu değerler göz önüne alındığında yıllık kapasitesi 2.160.000 kW/h olarak hesaplanmıştır. Çalışmada çatı uygulamalı olarak 125 kWp gücünde FV Güç Sistemi (FVGS) kurulması planlanmıştır. Yapılan mali ve teknik hesaplamalar sonucunda projenin bu sahada uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada 500 kW rüzgar türbini yerine, geri dönüşüm sürecinin daha uygun olması nedeniyle 1MW rüzgar türbininin tercih edilmesi önerilmiştir. Önerilen rüzgar türbini kullanıldığında, yıllık ortalama rüzgar hızının 6,8 m/s olarak analiz edildiği sahada, yıllık elektrik enerjisi üretiminin 3.015.216 kWh olacağı hesaplanmıştır. Elde edilen tüm elektrik enerjisinin dağıtım şirketine satılması durumunda sistemin amortisman süresinin 3,5 yıl olacağı öngörülmüştür. Çalışmada yapılan hesaplamalarla sistemin sabit açılı değil, mevsimsel olarak belirlenen optimum açıyla değişken açılı olduğu durumda %5 oranında daha fazla enerji üreteceği sonucuna varılmıştır[24].

"Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri için şarj regülatörü tasarımı" isimli çalışmada, güneş ve rüzgar enerjilerinden oluşan hibrit sistemin enerjisini depolamak için mikroişlemci tabanlı bir hibrit şarj regülatörü tasarlanmıştır. Çalışmada 12 V güneş panelinden veya 24 V çıkışlı bir rüzgâr türbininden alınarak maksimum 15 V'da sabitlenen DC gerilim ile 12 V, 7 A'lık bir akü şarj edilmiştir ve literatürdeki çoğunluğun aksine kuru tip akü şarjı ve kontrolü yapılması uygun görülmüştür. Tasarlanan sistemde rüzgar ve güneş panellerinden elde edilen farklı değerlerdeki DC gerilimler konvertörler yardımı ile aynı barada birleştirilerek bir akü grubunda depolanmıştır, ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi, DC/AC dönüştürücü sistemlerle şebekeye verilebilmektedir. Kuru tip akü 12V/7A değerlerine sahiptir. Çalışmada tasarımı gerçekleştirilen regülatör; 15 V DC giriş, 12 V DC çıkış, maksimum devre akımı 10 A olan orta güçte bir DGM şarj regülatörüdür. Tasarlanan sistemde akü sıcaklık, akım ve gerilim değerleri sürekli olarak ölçülebilmekte, aküye ait veriler bir LCD ekranda görülebilmekte ve bu veriler RS 232 bağlantısı ile PC ortamına aktarılabilen ve bu sayede değerlerin grafiksel analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Akü doluluk oranı LED lambalar ile gösterilmektedir. Sistem bir arıza durumunda (aşırı akım, gerilim ve deşarj vb.) kendi kendini korumaya alabilecek ve arıza ortadan kalktığında otomatik olarak çalışmaya devam edebilecek şekilde

tasarlandığından, ulaşım zorluğu ve bakım maliyetleri yüksek olan uygulamalarda enerji depolamak için kullanılabilir[25].

"Kırsal tesisler için hibrit (rüzgar + güneş) sistem tasarımı ve analizi" isimli çalışmada, şebeke ile bağlantılı olarak çalışan bir hibrit sistem tasarımı ve Ordu ili Kabadüz İlçesi'nde bulunan Vali Konağı'nda uygulaması yapılmıştır. Sistem tasarımı MATLAB/Simulink programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Uygulamada hibrit sistemden elde edilen enerji akülerde depolanmakta, gerektiğinde yüklere enerji aktarımı yapılabilmekte, aküler dolduğu zaman üretilen enerji doğrudan yüklere aktarılmaktadır. Hibrit sistemin çeşitli sebeplerden elektrik üretmediği durumlarda ise yük, enerjiyi şebekeden sağlayabilmektedir. Bu şekilde tasarlanan sistemde yük her zaman gerekli enerjiyi sağlayabilmektedir. Sistemin ürettiği enerji akım ve erilim değerleri ile akü grubunun doluluk durumu hibrit invertere kaydedilebilmekte, bu veriler kullanılarak hibrit sistemin verimi incelenebilmektedir. Sistemde 200W gücünde 10 adet PV panel, kuzey-güney yönünde 30° açıyla kurulmuştur. Sistemde PV panellerin 28 Şubat- 19 Haziran 2015 tarihleri arasında ürettiği toplam enerji miktarı 142,32 kWh olarak ölçülmüştür. PV panellerinin enerji üretiminin en fazla olduğu 16.06.2015 tarihinde yapılan ölçümlerde panellerin saat 06:00'da üretime başlayıp 20:00 civarında sonlandığı görülmüştür. o Gün içerisinde üretilen enerji miktarı 3.15 kWh'dir. Üretim en az olduğu tarih olarak 21.03.2015 günü belirlenmiş ve gün içerisinde üretilen enerji miktarı 0,197 kWh olarak ölçülmüştür. Sistemde kullanılan rüzgar türbini 3200 W güce sahiptir. Rüzgar hızı 3m/s olduğu zaman enerji üretimine başlamakta, 12 m/s'yi aştığı zaman da kendi kendini frenleyerek enerji üretimini sonlandırmaktadır. 28.02.2015 tarihinde 08:00- 14:00 saatleri arasında RT'nin ürettiği enerji miktarı 8,8 kWh olarak ölçülmüştür. Çalışmada önceden yapılan araştırmalar sonucunda şebekeye bağlı sistemlerin, şebekeye bağımsız olan sistemlerden daha avantajlı oldukları sonucuna varılmıştır bu sebeple çalışmadaki hibrit sistem hem şebekeye bağlı hem şebekeden bağımsız olarak çalışabilecek şekilde yapılmıştır. Rüzgar türbininin enerjisi yükü doğrudan beslemekte, PV panellerinden üretilen enerji ile hem yük beslenmekte hem de aküler şarj edilmektedir. Çalışmayı benzerlerinden ayıran özelliklerinden bir tanesi 2 adet inverter kullanılarak DA/AA dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr türbininin çıkışında kullanılan inverterin çıkışındaki enerji doğrudan evin enerji hattına bağlanmıştır. Şebeke enerjisinin kesilmesiyle beraber rüzgâr türbini enerji üretimini

durdurmaktadır. Akü grubu şarj edildikten sonra enerji, şebekeye verilmektedir. Böylece, tasarlanan sistem kesintisiz güç kaynağı görevini de üstlenmektedir[26].

"Fotovoltaik/termal (PV/T) hibrit sistemlerin soğutma tekniklerinin deneysel olarak incelenmesi" isimli çalışmada, güneş enerjisinden elektrik üretimi esnasında panelin artması sonucu azalan elektriksel verimini, paneli su ve hava ile soğutarak arttırmak amaçlanmıştır. Çalışmada Isparta ilinde iki adet PV/T ve bir adet PV panel dikkate alınmış, panellerden bir tanesi su ile diğeri hava ile soğutulmuş, 3 panele ise soğutma işlemi uygulanmamıştır ve bu paneller karşılaştırılarak su ve hava ile yapılan soğutma işleminin verimliliğe katkısı incelenmiştir. Su ile soğutulan panelde giren ve çıkan suyun sıcaklıkları ve panelin yüzey sıcaklığı, hava ile soğutulan panelde havanın girişi ve çıkış sıcaklıkları ve panelin yüzey sıcaklığı, soğutma işlemi yapılmayan panelde ise panelin yüzey sıcaklığı yani toplamda 7 farklı noktada termokupullar yardımı ile sıcaklık değerleri 10 dakikalık aralıklarla ölçülmüş ve dataloger yardımıyla kaydedilmiştir. Su ile soğutulan panelde uygulama, su debisi 0,66 kg/s ve 1,46 kg/s olarak iki farklı değerde yapılmıştır. Sonuç olarak su ile soğutma işlemi yapılan panelin yüzey sıcaklığı 61°, hava ile soğutma yapılan panelin yüzey sıcaklığı 80° ve soğutma yapılmayan panelin ise yüzey sıcaklığı 73° civarında ölçülmüştür. 0,66 kg/s debide akan su ile panel verimliliğini yaklaşık olarak %5-7, 1,46 kg/s debide akan su ise panel verimliliğini yaklaşık olarak %10-14 civarında arttırmıştır. Soğutma işlemi yapılmayan PV panelin hava ile soğutulan PV/T'ye göre daha verimli olmasının nedeni olarak, hava ile soğutma işlemi yapılan sistemde panelin arkasına yapılan sac levha ile kapatma ve yapılan hava kanalları işleminin hava akışını dış ortam şartlarına göre kısıtlaması ile sıcak havanın istenildiği gibi atılamamasından kaynaklanmakta olduğu sonucuna varılmıştır[27].

"Hibrit fotovoltaik ısı PVT-su ve PVT-hava kolektörlerinin incelenmesi" isimli çalışmada, piyasada bulunan PV panellerinin sıcaklıkla veriminin düşmesinden dolayı, verim arttırmak ve termal enerji elde etmek amacıyla PVT hibrit solar sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada PV panele soğutucu olarak hava ve su kullanılarak araştırmalar yapılmış ve bu iki yöntem karşılaştırılmıştır. PVT-su hibrit sisteminin PVT-hava hibrit sisteminden daha fazla kullanıldığı, bunun nedeni olarak su bazlı sistemlerin daha yüksek elektriksel ve ısı verime sebep olması belirtilmiştir. PVT-hava tipi kolektörlerde su tipi kolektörlere göre

debinin artmasından dolayı verim artışının daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Genel olarak çalışma sonucunda PVT-su sistemlerinin, PVT-hava sistemlerinden daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır[28].

"Kırklareli iklim şartlarında hibrit fotovoltaik/termal sistemin analizi" isimli çalışmada, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi sırasında panel verimliliğini arttırmak amacıyla, Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binası için fotovoltaik termal kolektörün teorik tasarımı ve verimlilik değerlendirilmesi yapılmıştır. Sistem simülasyonu, TRNSYS "Transient System Simulation" isimli programda binanın bir yıllık elektrik tüketimi baz alınarak değişik kolektör eğim açılarında yapılmıştır. Çalışmada; 16° kolektör eğim açısıyla yazın yüksek elektrik üretiminin yapıldığı, 66° kolektör eğim açısıyla kış aylarında en yüksek elektrik üretiminin yapıldığı, 37° eğim açısıyla yıl boyunca optimum değerde elektrik üretiminin yapıldığı belirlenmiştir. 16° kolektör eğim açılı sistemin Haziran ayında, 37° kolektör eğim açılı sisteme göre % 8.24 oranında, 66° kolektör eğim açılı sisteme göre %45.04 daha fazla enerji üretmekte olduğu sonucuna varılmıştır. 66° kolektör eğim açılı sistemin ise kış aylarında, 37° kolektör eğim açılı sisteme göre %10.87 oranında, 66° kolektör eğim açılı sisteme göre %39.16 daha fazla enerji üretmekte olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, TRNSYS programında oluşturulan 16° kolektör eğim açılı sistemle yıllık 39417.55kWh, 37° kolektör eğim açılı sistemde 40485.01 kWh, 66° kolektör eğim açılı sistemde 35683.84 kWh elektrik enerjisi üretilebilmektedir. 16° kolektör eğim açılı sistemle ihtiyacın %61.29'u, 37° kolektör eğim açılı sistemle %62.95'i, 66° kolektör eğim açılı sisteme %55.48'inin karşılanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Yaz ayları için yapılan hesaplamada ise 16° kolektör eğim açılı sistemin elektrik ihtiyacının %86'sını karşılayacağı hesaplanmıştır. Çalışma sonunda kamu binasının enerji ihtiyacının %90'lara kadar yenilenebilir enerji tarafından karşılanacağı sonucuna varılmıştır[29].

"Biyokütle ve güneş enerjisinin kırsal alanlarda hibrit kullanım olanakları" isimli çalışmada, ülkemizin biyokütle ve güneş enerjisi potansiyeli irdelenmiş ve kırsal alanlarda her iki kaynağın da birlikte kullanılabilmesi için hibrit sistemler araştırılmıştır. Bu iki sistemin hibrit olarak kullanılmak istenmesinin sebebi, ülkemizin güneş enerjisi bakımından zengin bir ülke olması ve halkın tarım ve hayvancılık faaliyetleriyle iç içe yaşamasıdır. Çalışmada verilen bilgilere göre, ülkemizde kullanılmayan tarım alanlarında enerji bitkileri

yetiştiriciliğinin yapılması durumunda 320PJ/yıl kadar enerjinin geri kazanılabileceği öngörülmektedir. Çalışmada yazarların yaptığı araştırmalarda 2017 yılı değerlerine göre tarla ve bahçe ürünleri yetiştiriciliği sonrasında açığa çıkacak atık/artıkların kullanılmasıyla, yaklaşık olarak 909 PJ/yıl enerji üretiminin mümkün olabileceği görülmektedir. Büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının atıklarının biyogaz üretiminde kullanılabilir kısmının teknik biyogaz potansiyelini ise 104.970 TJ/yıl olarak hesaplamışlardır. Elde edilen bu verilere göre ülkemizde olası kurulu gücü 1900 MW olan 250 kW ve üstü güçte 7145 biyogaz sisteminin kurulabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca biyokütle enerjisinin önemli avantajlarından, ülkemiz sanayi alt yapısının mevcut haline uygun prosesler içermesi ve yerel üretime yeni bir pazar olanağı sunması da belirtilmektedir. Çalışmada ülkemiz koşullarında güneş enerjisi desteği olması ve olmaması durumunda üretilen biyogazın reaktör ek ısıtma ihtiyacını karşılama oranı, ısıl denge modeli kullanılarak farklı iklim bölgelerinden ikişer il seçilerek tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu iller seçilirken büyükbaş hayvancılık potansiyelinin yüksek olmasına dikkat edilmiştir. Çalışmada, Erzurum ilinde güneş enerjisi desteği olmadan üretilen biyogazın %33,74'lük kısmının sistemin ısıl ihtiyacını karşıladığı, güneş enerjisi desteği olduğunda bu yüzdenin %5,66'ya gerilediği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, ülkemizde biyogaz reaktörlerinin ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanımının teknik açıdan mümkün ve karlı olduğunu göstermektedir. İkinci aşama olarak biyogaz sistemlerinin ısıl ihtiyaçlarının yanı sıra elektrik enerjisine de ihtiyaç duyduğu göz önünde bulundurularak, PV/T (Fotovoltaik-Termal) destekli bir biyogaz sisteminin hem enerji gereksinimini karşılayabileceği hem de sistem verimini arttırabileceği düşünülmüştür. PV/T ile biyogaz hibrit sistemi çalışmasında, termal kolektörler panel sıcaklığını azaltarak elektrik üretim verimini arttırmakta, ayrıca kullanılabilir ısı enerjisinin de elde edilmesini sağlamaktadır. Kış aylarında panel üzerinde oluşabilecek karlanma- buzlanma sorunu da PV/T kolektörlerin ters olarak dolaştırılmasıyla engellenebilecektir. Yapılan çalışmalarla PV/T desteği ile biyogaz sisteminin %84 elektrik ve %66 ısı enerjisi gereksiniminin karşılanmasının mümkün olabileceği, bunun neticesinde de şebekeden bağımsız olan alanlarda da biyogaz üretiminin olabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmada, şebeke bağımsız kurulan PV/T biyogaz hibrit sisteminde elektriğin üretilmediği durumlarda depolanan biyogazın kojenerasyon sisteminde kullanılması sağlanarak, enerjinin kesikli üretimi önlenebilecektir[30].

"Aydınlatmada fotovoltaik-hidrojen hibrit enerji kaynağı kullanımı" (Engin Çetin, Ahmet Yılcı, Yusuf Öner, Harun Kemal Öztürk ) isimli çalışmada, Pamukkale Üniversitesi Temiz Enerji Evi'nde (PAÜ-TENEV) kurulu 5 kW fotovoltaik ve 2.4 kW yakıt pili sistemi ile elektrik üretimi ve üretilen elektriğin iç aydınlatma ihtiyacında kullanılabilir hale getirilmesi, sistemin tasarımı ve kurulum aşamaları ele alınmıştır. Çalışmada ele alınan enerji evi, tüm elektrik enerjisini fotovoltaik-hidrojen hibrit enerji üretim sisteminden karşılamaktadır. Yakın gelecekte sisteme rüzgar türbini ilavesi de planlanmaktadır. FV sistemi 125 W gücünde 40 adet FV panelden oluşmaktadır. Panellerin yarısı çatıda sabitlenmiş, diğer yarısı da sıvı bazlı 2 adet güneş takip düzeneği üzerine montaj yapılmıştır. Sıvı bazlı sistem herhangi bir motor takviyesi olmaksızın içindeki gaz-sıvı karışımı maddenin güneş ile ısınması neticesinde oluşan buhar basıncı ile düzeneği tek ekseninde hareket ettirmektedir. Üretilen enerjinin depolanması için, toplam 28.8kWh enerji depolama kapasiteli 16 adet 12V-150Ah AGM tip kursun asit aküler kullanılmıştır. Sistem şebekeye bağlantılıdır ve güneş enerjisi devrede olmadığı zamanlarda akü bankı şebekeden 30A'lık şarj cihazı ile şarj edilebilmektedir. Sistemin hidrojen ihtiyacı, suyun elektrolizinin gerçekleştiği PAÜ-TENEV bünyesindeki 6 kVA gücünde bir elektrolizer ile karşılanmaktadır. Ayrıca şehir su şebekesine bağlı bir deiyonizör ile elektroliz için gerekli olan su kalitesi sağlanmaktadır. Elektrolizörde üretilen hidrojen, altı adet metal hidrid hidrojen tankında katı halde depo edilmekte ve istenildiğinde elektrik enerjisine dönüştürülmek üzere saklanmaktadır. Her bir metal hidrid tank, hidrojenin üst ısıl değerine göre yaklaşık 2.7kWh enerji depolayabilmektedir. Çalışma sonucunda güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi aydınlatmada ve FV sistemin enerji üretmediği durumlarda şehir şebeke suyundan üretilen hidrojenin elektriğe dönüştürülmesi neticesinde aydınlatma elemanlarının enerjilendirilmesinde kullanılabilir[31].

"Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik analizi" isimli çalışmada, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin elektrik enerjisi ihtiyacının güneş ve rüzgar enerjisi barındıran bir hibrit sistemle karşılanma amacı doğrultusunda ekonomik analiz temelli optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ekonomik analiz için HOMER yazılımı kullanılmıştır. Fakültede kullanılan günlük elektrik enerjisi tüketim miktarı yaklaşık olarak 1366,9 kW/gün ve peak değeri ise 110 kW olarak belirlenmiş, bölgenin solar enerji profili NASA veri tabanından,

rüzgar enerji profili ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü veri tabanından alınmıştır. Elde edilen verilerle HOMER yazılımından toplam yükün enerjisini %52,21'ini rüzgardan, %10,88'ini güneşten ve %36,92'sini şebekeden karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda sadece rüzgar enerjisi kullanıldığında sistemin amortisman süresi yıl, hibrit sistem kullanıldığında sistemin amortisman süresi 7 yıl olarak hesaplanmıştır. Mevcut kurulum maliyetleri doğrultusunda çalışma sonucunda ilk aşamada sadece rüzgar enerjisinden yararlanılan bir tesisin kurulması öngörülmüştür[32].

"Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin endüstriyel tavukçuluk sektörü için ekonomik açıdan değerlendirilmesi: bir uygulama" isimli çalışmada, tipik bir ticari tavuk çiftliğinin enerji ihtiyacını karşılamak için HOMER yazılımında; sadece dizel, fotovoltaik-dizel-akü, rüzgar-dizel-akü, fotovoltaik-rüzgar-dizel akü hibrit sistemleri değerlendirilmiştir. Ek olarak şebekeden bağımsız optimum mesafeye karar vermek için hibrit enerji sistem ekonomikliğinin elektrik iletim hattına bağlı olarak baş başa nokta analizi yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar; 1- güneş ve rüzgar enerjisinden elde edilen enerji, 24 saatlik süreçte yükün enerji talebini tamamen karşılayamamaktadır. Bu nedenle rüzgar ve güneşten elde edilen enerji depolanarak gece boyunca kullanılabilir. Dizel jeneratör ile birlikte FV-rüzgar hibrit sistemi kullanıldığında depolama gereksinimi azalmaktadır. 2- Sadece dizel sisteminden elde edilen zararlı gaz emisyonu, FV-rüzgar dizel sistemi kullanıldığında azalmaktadır. 3- FV-rüzgar-jeneratör-akü sistemi ekonomik olarak en avantajlı sistem olarak bulunmuştur. 4- Baş başa noktası mesafe analizi sonucunda, elektrik şebeke hattına olan uzaklıklarının değerlendirilmesiyle, 9,26 km mesafe ile sadece dizel kullanılan sistem daha avantajlı çıkmıştır[33].

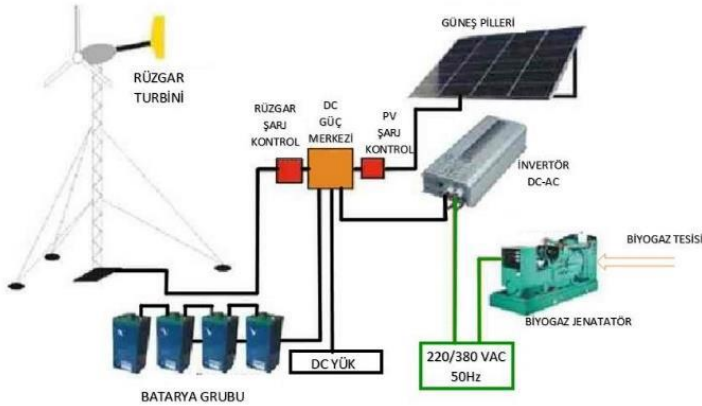
"Kahramanmaraş bölgesi için güneş ve rüzgar enerjisi hibrit sisteminin incelenmesi" isimli çalışmada, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Avşar Kampüsü'nde, güneş ve rüzgar enerjili hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmada kurulan sistemde 260 W gücünde 2 adet güneş paneli, 500 W gücünde 1 adet rüzgâr türbini, 100 A/h'lık 2 adet akü ve güneş ile rüzgârdan gelen enerjiyi akülere depolamak için 1500 W'lık kontrol ünitesi kullanılmıştır. Kurulan sistemde güneş panelleri ortalama 13 saat, rüzgar panelleri ise ortalama 16 saat boyunca elektrik enerjisi üretmiştir. ibrit sistem ele alındığı zaman ise günlük ortalama 21 saat enerji üretimi söz konusudur. Sistemin bir haftalık enerji verileri ve beş kişinin birlikte yaşadığı bir dairenin günlük ortalama enerji



tüketimi ele alındığı zaman, toplam güç değeri 1kW olan bir hibrit sistem, bu evin enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Araştırmada sadece güneş ve rüzgar enerjilerinin olduğu sistemler yerine hibrit sistemlerin daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır[34].

"Ev tipi yenilenebilir ibrit sistem için mikro-genetik algoritma ile optimal yük planlaması" isimli çalışmada, rüzgar türbinleri, güneş panelleri ve bataryalardan meydana gelen şebekeden bağımsız yenilenebilir hibrit sistemin, bir evin günlük enerji ihtiyacını minimum işletme maliyetinde karşılaması için reel sayılarla kodlanmış mikro-genetik algoritmalar tekniğini temel alan optimal güç planlaması yapılmıştır. Sistemde bir adet 1kW rüzgar türbini, 8 adet 235 Wp fotovoltaiik panel ve iki adet 200 Ah akü bulunmaktadır. Hesaplamalarda zaman aralığı 1 saat olarak alınmış ancak zaman aralığının azaltılmasının maliyeti düşüreceği öngörülmüştür. Çalışmada yapılan ölçümlere göre; 03:00- 05:00, 09:00-10:00, 12:00-13:00 ve 14:00-17:00 saatleri arasında üretilen güç yükü karşılamaktadır ve fazladan güç oluşmaktadır. 02:00-03:00, 08:00-09:00, 13:00-14:00 ve 18:00-24:00 saatleri arasında üretilen güç ve bataryalarda depo edilen güç miktarı yükü karşılayamamaktadır. Sistemin birim maliyetinin ortalama olarak 0,26 TL/kWh olduğu, 08:00-09:00 ve 18:00-19:00 saatleri arasında bu saatlerdeki eksik güç nedeniyle maliyetin en yüksek değerlerine çıktığı görülmüştür. Çalışma sonucunda MGA yöntemi yardımıyla sistemin işletim maliyeti önemli ölçüde azaltılmıştır[35].

"Biyogaz destekli yenilenebilir ibrit sistemler ile enerji üretimi" isimli çalışmada, biyogazın içeriği kapsamlı olarak araştırılmış, güneş ve rüzgar enerjili sistemlere ek olarak biyogaz sistemi incelenmiştir. FV-rüzgar hibrit sistemine ilave olarak biyogazı elektrik enerjisine dönüştüren sistem kullanılarak yeni bir hibrit sistem oluşturulmuştur. Fiziksel bir sistem kurulumunun yapılmadığı bu çalışmada güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyogaz enerjisi kombinasyonu akü grubu ile bir bölgeye kesintisiz güç sağlanabileceği gösterilmiştir. Önerilen hibrit sistemin şekli aşağıdaki gibidir[36]:



Şekil 5: Önerilen hibrit sistemin görüntüsü.

"Urla- İzmir'de bulunan müstakil bir ev için bütünlük hibrit sistem analizi" isimli çalışmada, FV paneller, bir rüzgar türbini ve hava kaynaklı bir ısı pompasından oluşan hibrit sistem aracılığı ile İzmir Urla'da 3 kişinin yaşadığı, 150 m<sup>2</sup> alana sahip iki katlı müstakil bir evin elektrik ihtiyacı karşılanması amaçlanmıştır. Kullanılan FV panelin kapasitesi 5,46 kW, rüzgar türbininin kapasitesi ise 3 kW olarak seçilmiştir. Sistem şebeke bağımlı olarak tasarlanmıştır yani enerjinin hibrit sistem tarafından karşılanmadığı durumlarda şebekeden enerji sağlamakta, enerjinin fazla olduğu durumlarda ise şebekeye enerji satmaktadır. Isı pompası, sistemde eve gerekli ısıtma/soğutmayı yapmak için bulunmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda sistem aylık bazda mart ile kasım ayları arasında evin enerji ihtiyacını karşılayıp, bu ihtiyaçtan daha fazla elektrik üretmekte, aralık ile şubat ayları arasında ise yeterli elektrik üretimi sağlayamamaktadır. Yıllık olarak sistem evin ihtiyacından %50,9 daha fazla enerji üretmektedir ve bu fazla üretilen enerji şebekeye satılmaktadır. Sistemin amortisman süresi ise yaklaşık 7,5 sene olarak hesaplanmıştır[37].

"Hibrit alternatif enerji sistemlerinde kullanılan enerji depolama üniteleri" isimli çalışmada hibrit yenilenebilir ve alternatif enerji sistemlerinde kullanılan farklı enerji depolama yaklaşımları incelenmiştir. Çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının sezonluk, günlük ve hatta anlık olarak bile büyük değişimler gösterebilmesinden kaynaklı olarak depolanma ihtiyacı sorununa çözüm aranmıştır. Çalışmada farklı elektrik enerjisi depolama sistemleri incelenmiştir. Bu sistemlerin karşılaştırılması aşağıdaki tablodaki gibi özetlenmiştir:

Tablo 1: Farklı elektrik enerjisi depolama sistemlerinin karşılaştırılması

<b>Enerji depolama ünitesi</b>	<b>Başlıca Avantajları</b>	<b>Başlıca Dezavantaj</b>	<b>Potansiyel kullanım alanı</b>
Batarya	En yaygınlaşmış elektrik enerjisi depolama teknolojisi	Düşük çevrim ömrü	Elektrikli taşıtlar taşınabilir cihazlar, küçük güçlü yenilenebilir enerji sistemleri
UK	Uzun çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu	Elektrikli taşıtlar
Volan	Yüksek güç yoğunluğu	Boştaki yüksek kayıplar	Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonu, bazı uzay ve elektrikli taşıt uygulamaları
Pompalanmış su ve sıkıştırılmış hava yaklaşımları	Oldukça büyük depolama olanağı	Gerekli arazi koşulları	Çok büyük güçlü yenilenebilir enerji sistemleri
Termal enerji	Güneş enerjisi gibi büyük bir kaynak potansiyeli	Depolama ve deşarj süresinin uzunluğu	Büyük miktartlı enerji depolaması

Çalışma sonucunda batarya tabanlı elektriksel enerji depolaması yaklaşımının, gelecekte de birçok uygulama açısından öncü bir konumda yer alacağı ancak farklı uygulamalar için farklı enerji depolama şekillerinin kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır[38].

"Hibrit enerji sistemlerinin şebekeden bağımsız bir çiftlik evinde uygulanabilirliğinin ekonomik ve teknik açıdan incelenmesi" isimli çalışmada, Yalova'nın Erikli Yaylasında bulunan bir çiftlik evinin elektriksel yük ihtiyacını karşılamak üzere şebekeden bağımsız güneş-rüzgar hibrit enerji sisteminin teknik ve ekonomik açıdan

uygulanabilirliği araştırılmıştır. Sistemde iki farklı akü tipi kullanılarak karşılaştırmaları yapılmıştır. Çiftlik evinin günlük enerji ihtiyacı hesaplanmış, rüzgar hızı ve güneş radyasyon verileri kullanılarak HOMER yazılımı vasıtasıyla hibrit sistem modeli oluşturulmuştur. Akü çeşiti olarak kurşun asit ve lityum iyon akü grupları kullanılmış olup, yapılan karşılaştırmada lityum iyon akü grubunun kullanıldığı sistemin daha uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada PV/Rüzgâr/Dizel jeneratör/Akü hibrit enerji sistemi, PV/Rüzgâr/Akü hibrit enerji sistemi, PV/Dizel jeneratör/Akü hibrit enerji sistemi, Rüzgâr/Dizel jeneratör hibrit enerji sistemi, Dizel jeneratör güç sistemi kombinasyonları karşılaştırılmıştır. Maliyet olarak en uygun sistem PV/dizel/jeneratör/akü sistemi, en pahalı sistem ise dizel jeneratör güç sistemi olarak belirlenmiştir. Çalışmada dizel güç sistemi yani fosil kaynaklı güç sisteminin, yıllık 10.785 kWh elektrik enerjisi üretmesine karşılık yılda 19.955 kg değerine sahip emisyon salınımı gerçekleştirmekte olduğu belirtilmiş, PV/Dizel jeneratör/Akü hibrit enerji sisteminin kullanılmasıyla, dizel jeneratörün yıllık 1.960 kWh enerji üreterek emisyon değerinin yılda 1.619 kg değerine düşmekte olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmada rüzgar enerjisi için yapılan hassasiyet analizinde, ortalama rüzgar hızının artmasının, rüzgar enerjisinin hibrit sistemlerde uygulanabilirliğini arttırdığı belirtilmiştir[39].

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Hibrit bir enerji sisteminin performansı, kurulduğu bölgedeki çevresel koşullara bağlı olmakla birlikte, aynı zamanda sistemde kullanılan elemanlara da bağlıdır. Hibrit sistemlerde kullanılan dizel jeneratörün yakıt masrafı hibrit sistemlerin ekonomik açıdan değerlendirilmesinde ve verimliliğinde önemli bir parametredir. Sistemde tek başına dizel jeneratör kullanılması işletme maliyeti açısından pahalı olmakta ve gün geçtikçe yakıt maliyeti artış göstermektedir. Dizel jeneratörün, bir hibrit enerji sisteminde kullanılmasıyla bu yakıt masrafı önemli ölçüde azalma göstermesini sağlamaktadır[3].

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) programı kullanılarak dünyanın farklı yerlerinde birçok hibrit enerji sistem modelleri geliştirilmiş ve bu modeller sayesinde bir güç sisteminin uzun vadeli çalışmasını simüle edilebilmektedir. Hibrit Sistemin kullanılacağı coğrafik bölge için en uygun maliyetli hibrit enerji sistemi bulunmasını ve farklı optimizasyonlar ve hassaslık analizleri sonucunda

da olası durumları, mevcut maliyetin artmasına göre uygulanabilir sistemlerin sıralamasını yapar hangi sistem daha avantajlı olacağı bu program sayesinde görülebilmektedir.[8]

HOMER yazılımı aynı zamanda hibrit enerji sisteminin bileşenlerinin seçimi ve boyutlandırılması içinde kullanılır. Optimal bir hibrit sistem türünü tanımlamak için hassaslık değişkenlerine karşın bir dizi parametrelerin belirlenmesine sağlar[9].



## KAYNAKÇA

- [1] Sekuçoğlu, S.A., (2012). “Fotovoltaik (Pv), Rüzgâr ve Hibrit Sistemlerin Tasarımı ve Ekonomik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- [2] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., (2018). ”Analysis Of Thermoelectric Cooler Used To Produce Electrical Energy In Terms Of Efficiency,” Acad. Studies In Eng., Gece Publishing, Pp. 111-120.
- [3] Çimen, H., Ağaçayak, A. C., Neşeli, S., Yalçın, G., (2017). "Comparison Of Two Different Peltiers Running As Thermoelectric Generator At Different Temperatures", In 2017 International Renewable And Sustainable Energy Conference (Irsec). Pp. 1-6. Ieee.
- [4] Neşeli, S., Terzioğlu, H., Ağaçayak, A.C., Yalçın, G., (2017). "Electrical Power Generation By Thermoelectric Generator Using Geothermal Energy And The Low-Power Dc-Dc Buck\_Boost Converter Application", In Grad. Sch. Of Natur. And App. Scien., Selcuk University.
- [5] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). “Mathematical Modelling Of Thermoelectric Generator By Regression Analysis ,” International Conference On Engineering Technologies (Icente’18). Selçuk University, Vol:3, Pp.523-527.
- [6] Ağaçayak, A.C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., Yalçın G., (2018). “Small Power Wind Turbine Design,” Acad. Studies In Eng., Gece Publishing, Pp. 121-130.
- [7] Çakır, Y.S., (2013). “Hibrit Sistemlerin Boyutlandırmasında veri Çözünürlüğü Etkisinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul
- [8] Türkdöğân, S., Dilber, S., Çam, B., (2018). “Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik ve Teknik Açidan İncelenmesi”, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Sinop, Uni J Nat Sci 3 (2): 52-65 (2018), Issn: 2536-4383
- [9] Khan, M.J., Iqbal, M.T., (2004). “Pre-Feasibility Study Of Stand-Alone Hybrid Energy Systems For Applications In Newfoundland”, Available Online 8 December 2004
- [10] Güven, A. F., (2016). “Bahçelievler Belediye Başkanlık Binasının Enerji İhtiyacının Güneş ve Rüzgar Sistemi İle Karşlanması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi”, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1), 24-36.

- [11] Yıldız, M., & Bingöl, F. (2017). “ Küçük Ve Mikro Ölçekli Enerji Yatırımı İçin Hibrit Enerji Modeli”. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Denizli, 25(1), 1-6.
- [12] Efe, S. B., & Kocaman, B. (2017). “ Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Hibrit Sistemin Fiziksel Olarak Gerçeklenmesi ve Analizi”, In 5th International Symposium On Innovative Technologies İn Engineering And Sci-Ence 29-30 September 2017 (Isites2017 Baku-Azerbaijan).
- [13] Kabul, A., & Duran, F. (2014). “ Isparta İlinde Fotovoltaik/Termal (Pv/T) Hibrit Sistemin Performans Analizi”, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 6(1), 31-43.
- [14] Başaran, K., Çetin, N. S., & Çelik, H. (2011). “ Rüzgar-Güneş Hibrit Güç Sistemi Tasarımı ve Uygulaması”, In 6th International Advanced Technologies Symposium (Iatsâ€™11), Pp. 114-119.
- [15] Metin, G.Ü.L., & Akyüz, E. (2019). “Fotovoltaik-Termal (Pv/T) Bir Sistemin Deneysel Performansının İncelenmesi”, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Balıkesir, 21(1), 444-458.
- [16] Aydın, E. H., & Çunkaş, M. (2019). “Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesi Enerji Talebinin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarıyla Karşlanması”, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, Konya 7(1), 241-252.
- [17] Ayan, S. (2019). “Sezgisel Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Hibrit (Fotovoltaik-Rüzgar) Enerji Sistemi İçin Boyut Optimizasyonu”, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.
- [18] Tüysüz, M. (2018). “ Hibrit Güç Sistemlerinde Maksimum Güç Noktası Takibi İçin Bulanık Denetleyicinin Optimizasyonu”, Doctoral Dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [19] Metin, G.Ü.L., & Akyüz, E. (2019). “Fotovoltaik-Termal (Pv/T) Bir Sistemin Deneysel Performansının İncelenmesi”, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(1), 444-458.
- [20] Sevdin, R. E. (2018),. “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Hibrit Kullanımını Yapay Zeka İle Modellemesi”, Master's Thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] Koç, İ., & Başaran, K., (2019). “Pv/T Tabanlı Bir Sistemde Matlab/Simulink Kullanılarak Yapılan Performans Analizi”, Politeknik Dergisi, 22(1), 229-236.



- [22] Engin, D., & Çolak, M., (2008). “Yarı Saydam Güneş Pili Termal Toplayıcı PV T Hibrid Sistemin İzmir Koşullarında Analizi”, Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi , vol.2, 10-22.
- [23] Erdinç, O., (2013). “Şebekeden Bağımsız Uygulamalar İçin Hibrit Bir Rüzgâr Türbini/Fotovoltaik/Yakıt Hücresi/Batarya Sisteminin Optimizasyonu, Tasarımı ve Uygulaması”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [24] Dolaşır, R. A. E., Ceylan, C., (2015). “Celal Bayar Üniversitesi Muradiye Kyk Kız Yurdu İçin Hibrit Enerji Sistemi Fizibilite Çalışması”.
- [25] Yüzer, E. Ö., Erduman, A., Durusu, A., (2018). “Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri İçin Şarj Regülâtörü Tasarımı”, Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Erzincan 11(1), 47-57.
- [26] Ulutaş, H., (2015). “Kırsal Tesisler İçin Hibrit (Rüzgâr + Güneş) Sistem Tasarımı ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu
- [27] Kabul, A., Yaşar, E., (2017). “Fotovoltaik/Termal (Pv/T) Hibrit Sistemlerin Soğutma Tekniklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 9(1), 17-32.
- [28] Öksüz, M., Köse, F., (2019). “Hibrit Fotovoltaik Isıl Pvt-Su ve Pvt-Hava Güneş Kollektörlerinin İncelenmesi”, Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, Sayı 2(3),: 95-102.
- [29] Doğanay, H. Ö. ,(2014). “Kırklareli İklim Şartlarında Hibrit Fotovoltaik/Termal Sistemin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne
- [30] Koçar, G., Eryaşar, A., (2018). “Biyokütle ve Güneş Enerjisinin Kırsal Alanlarda Hibrit Kullanım Olanakları”, Şırnak Enerji ve Maden Potansiyeli (pp.33-58), Konya: Eğitim Yayınevi.
- [31] Çetin, E., Ahmet, Y., Öner, Y., Öztürk, H. K., (2007). “Aydınlatmada Fotovoltaik-Hidrojen Hibrit Enerji Kaynağı Kullanımı”, Pamukkale Üniversitesi, Denizli
- [32] Çakmak, Ç., Kurban, M., Dokur, E., “Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Ekonomik Analizi”, Şeyh Edebalı Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilecik
- [33] Akyüz, E., Bayraktar, M., Oktay, Z., (2009). “Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Endüstriyel Tavukçuluk Sektörü İçin Ekonomik Açından Değerlendirilmesi: Bir Uygulama”, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2), 44-54.

- [34] Karadöl, İ., Keçecioglu, Ö. F., Açıkgoz, H., Şekkeli, M.,(2017). “Kahramanmaraş Bölgesi İçin Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Hibrit Sisteminin İncelenmesi”, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(2), 89-96.
- [35] Can, Ö., Tutkun, N., “Ev Tipi Yenilenebilir Hibrit Sistem İçin Mikro-Genetik Algoritma İle Optimal Yük Planlaması”
- [36] Bektaş, Y., Gülmez, M., (2016). “Biyogaz Destekli Yenilenebilir Hibrid Sistemler İle Enerji Üretimi”, 10.13140/Rg.2.1.3747.6884.
- [37] Eser, C., Öner, F., Başoğlu, O., Bilir, L., Özcan, N. Y., Özcan, H. G., “Ur-la-İzmir’de Bulunan Müstakil Bir Ev İçin Bütünleşik Hibrit Sistem Analizi”, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ,İzmir
- [38] Erdinç, O., Uzunoğlu, M.,Vural, B., (2011). “Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
- [39] Türkdogan, S., Dilber, S., Çam, B., (2018). “Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik Ve Teknik Açından İncelenmesi”. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(2), 52-65.

**ÇİMENTODA BULUNAN ALKALİ  
DEĞERİNİN ALKALİ SİLİKA  
REAKSİYONUNA ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**BÖLÜM  
14**

**Korkmaz YILDIRIM<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Aydın Adnan Menderes Üniversitesi korkmaz54@gmail.com



## Giriş

Agrega, su, bağlayıcı olarak çimento veya katkı çimento malzemelerinin bir araya gelmesiyle oluşan yapay kompozit malzemeye beton denmektedir. Agregada ile çimento arasındaki reaksiyonlar son derece karmaşıktır. Karmaşık reaksiyonlardan biri olan alkali silika reaksiyonu çimentodaki  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  alkalilerinin agregalarda bulunan reaktif silisile birbirini etkilemesi sonucu atmosferde bulunan nemi absorbe ederek alkali silika jelini oluşturmasıdır. Oluşan bu jel genişlerken betonda bozulmalara neden olmaktadır. Bu reaksiyon alkali silika reaksiyonu olarak isimlendirilmiştir. Alkali silika reaksiyonu beton veya betonarme yapı elemanlarında yavaş yavaş gelişen, ilerleyen yıllarda oluşan çatlaklar sonucu yapı elemanlarında ciddi hasara neden olmaktadır. Genellikle betonarme yapı ve beton yapı elemanlarında 10. yıldan sonra alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan çatlaklar belirginleşmektedir.

Alabama Tuscaloosa Arizona bölgesinde araştırdığı Stewart Barajı ve diğer yapıların yaklaşık 30 yıl sonra alkali silika reaksiyonu hasarının yapıları etkilediğini gözlemişlerdir [1]. Birkaç yıllık yapılarda ve 100 yıllık binalarda da alkali silika çatlak hasarı görülmektedir. Betonun mekanik yapısal davranışı basınç açısından alkali silika reaksiyonu çatlaklarından etkilenmektedir. Beton da dayanıklılık, servis ömrü ve uzun vadede yapıların sağlamlığı alkali silika reaksiyonu hasarlarından etkilendiği düşünülmektedir [2].

Sertleşen betonarme ve beton yapı elemanlarında alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan genişleme ve çatlaklar ile beton deformasyona uğrar, sonuçta betonun durabilitesi olumsuz etkilenmektedir [3].

Bu çalışma kapsamında alkali yönünden zararlı olduğu bilinen agregada ile alkali içeriği farklı iki çimento kullanımı ile yapılan deney numunelerinde alkali silika reaksiyonu oluşumları araştırılmıştır.

## Alkali silika reaksiyonu oluşumu

Alkali silika reaksiyonu, harçlarda veya betonda meydana gelmektedir. Çimentoda veya diğer kaynaklarda mevcut alkalilerle ilişkili hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) iyonları ile büyük veya küçük boyutlu agregalarda var olabilen belirli reaktif silisli bileşenler arasındaki zararlı kimyasal reaksiyon bir jel meydana getirir. Bu reaksiyon sonucu alkali silika jeli,

nemi absorbe ettiğinde genişerek betonda olan çimento hamuru ve agrega tanelerinde çatlakları oluşmasını kolaylaştırır [4].

Betonda oluşan çatlaklar sayesinde betonun su geçirimsizliği artar, artan su ve nem jel oluşumunu dolayısıyla çatlakların büyümesine, özellikle agrega çimento ara yüz bağının çekim gücünü zedeleyerek betonun parçalanmasına yol açmaktadır. Bu sebeple alkali silika reaksiyonu oluşumu hakkındaki araştırmalar hem deneysel, kimyasal ve yapısal açıdan devam etmektedir [4]. Agregada tanelerinde reaktif silisin büyüklüğü reaksiyonun oluşumunu ve hızını etkilemektedir. Ufak tanelerde reaksiyon sonucu genişmeler 1 ila 2 ay gibi kısa süre içinde oluşmakta iken daha iri tanelerde reaksiyon sonucu oluşan genişme yıllar sonra görülebilmektedir [4].

Dünya çapında alkali silika reaksiyonu, alkali karbonat reaksiyonuna göre daha çok görülen ve tanınan bozulma türüdür. Yani alkali karbonat reaksiyonunda oluşan genişme miktarı alkali silika reaksiyonunda oluşan genişmelerden daha azdır.

ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silis formları, yeterli miktarda alkali yanında ortamda neminde bulunması gereklidir. Bu şartlardan biri olmazsa ASR nedeniyle bir genişme nedeniyle çatlaklar oluşmayacaktır. Alkali silika reaksiyonu mekanizması basit bir anlatımla iki aşamada görülebilir;

1. Çimentoda Alkali + Reaktif Silis+ Su : → Alkali-Silis Jel Ürünleri
2. Çimentoda Alkali + Silis Jeli + Rutubet-Nem → Genişleme Çatlağı

Alkali silis reaksiyonu ile bu reaksiyon sonucu oluşan genişme arasında ayırım yapılmalıdır. Alkali silis reaksiyonu sonucunda genişme oluşabilir, ancak oluşan bu genişme betonda her zaman hasar yaratabilecek düzeyde gerilime neden olmaz.

Alkali silika reaksiyonunun oluşumuna neden olan bir diğer koşul olan nem, bozulmanın ve hacim değişikliğinin şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Alkali silika reaksiyonu, yalnızca nem varlığında gerçekleşmektedir. Nem, alkali iyonlarının yayılmasına, oluşan jel ise su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına böylece agrega ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olmaktadır. Çatlamadan sonra ortama giren su, jelin emebileceğinden fazla olursa bir miktar jel dışarı sızar, bu durum ileri düzeyde bir hasarın kanıtıdır. Su, Alkali Silika Reaksiyonunda jelin

taşınımına ve jelin büyümesine neden olmaktadır. Betonun kurutulması ve ileride su ile temasının önlenmesi reaksiyonun durdurulması için önemlidir. Bu durumun tersi olarak, tekrarlı ıslanma ve kuruma işlemi, alkali iyonlarının göçünü hızlandırarak reaksiyonun şiddetini arttırmaktadır. ASR sonucu meydana gelen genişleme agregası boyutu ile de ilgilidir ve reaktif parçacığın boyutu küçüldükçe genişleme artar ancak parçacık boyutu 20  $\mu\text{m}$  den daha küçük olduğunda bu artış sürekli değildir. Örneğin, sadece reaktif ince agregası içeren betonlarda meydana gelen genişleme erken dönemde artar, daha ileri dönemlerde sabit kalmaktadır.

Reaksiyon sonucu oluşan çatlaklar harita şekilli çatlaklar şeklinde kendini gösterir.



*Şekil. 1 ASR'den etkilenen 20 yaşındaki otoyol köprü güvertede pervaz üzerine boyuna çatlama [5].*

#### Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi (HHÇD) (ASTM C1260)

Amerikan standartlarında, ASTM C1260 “Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu (Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi)” olarak geçen bu deney, diğer genişleme deneylerine kıyasla kısa

sürmesi sebebiyle avantajlıdır. Deney metodu, yüksek (NaOH) alkalinite çözelti içerisinde yüksek sıcaklıkta bekletilen harç çubuğu numunelerinin boy uzama değişiminin ölçülmesine dayanmaktadır[6]. Bu deneysel çalışma, belirli çimento ve agregada karışım kombinasyonlarının davranışını değil, agregada bulunan potansiyel reaksiyonu belirlemektedir. Bu deney metodu, beton numunelerin kür-bakım koşullarını ağırlaştırarak reaksiyonun hızlanmasına ve agregaların reaktivitesinin 16-28 gün içinde belirlenmesine imkan vermektedir. Diğer deney metotlarında da belirtildiği gibi, deney uygulamadan önce agregalar üzerinde petrografik analizlerin yapılması esnasında standart seviye üzerinde genleşme görülmesi durumunda reaktivitenin Alkali Silika Reaksiyonu nedeniyle oluşup oluşmadığının araştırılması önerilecektir.

Standartta belirtilmiş olan gradasyondaki agregada, ağırlıkça çimentonun 2.25 fazlası olacak ve su/çimento 0.47 oranında harç numunelerin karışımını hazırlarız. 25×25×285 mm ebatındaki numune kalıplarına dökülen deney harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınır ve ilk boyları ölçülür. Harç çubukları ASTM C-227’de belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanmaktadır. Kalıplarda numune üzerine yapışarak suyun difüzyonunu önleyebilen teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı kalıp yağları kullanılmalıdır. Kalıp sökümünden itibaren numuneler bir gün süreyle 80°C suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80°C 1 N NaOH çözelti içerisinde bekletilerek periyodik ölçümleri yapılır. Standart, çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermemektedir. Bunun sebebi ise kür ve bakım şartlarından dolayı numunelerde boşluk çözeltisinin (alkalinitesinin) artmasıdır. Deneysel süreçte genleşme oranları aşağıdaki gibi değerlendirilmeye alınır,

1. 16 gün sonunda genleşme sonuçları, %0.10 değerinde düşük ise agregalar zararsız davranış göstermekte denilebilir.

2. 16 gün sonunda genleşme sonuçları, %0.20 değerinin üstünde ise agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterir denilebilir.

3. 16 gün sonunda genleşme sonuçları, %0.10 ile %0.20 değerleri arasında ise agregalar, yapılaşma koşullarına göre hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir.



Bu nedenle, agregalar üzerinde karara varılmadan, yapılacak ek deneyler yardımıyla genişleme oluşum sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28. güne kadar devam ettirilmesi önerilmektedir. Farklı organizasyon ve oluşumlar, yerel deneyimlere göre farklı genişleme kriterlerini belirleyebilirler. Agreganın genişleme-çatlak seviye oluşumuna bakılarak betonda kullanılacak agregalar hakkında karar verilebilir [6].

#### Alkalilerin Etkisi

Bilinen alkaliler olarak sodyum  $[Na^+]$  ve potasyum  $[K^+]$  gösterilebilir. Beton, çoğunlukla alkaliler ( $Na^+$ ,  $K^+$ ) ve hidroksil ( $OH^-$ ) iyonları içeren çözeltiyle dolu olan, sayılamayacak kadar çok gözenekten oluşmaktadır. ASR'nin oluşması için gözenekteki çözeltideki alkali seviyesi yüksek olmalıdır.

Aşağıdakiler betondaki alkalilerin kaynaklarıdır;

1. Çimentodan gelen alkaliler, çimento, çimento minerallerinin hidrasyonundan dolayı çözülebilir alkalilerin başlıca kaynağıdır. ASTM C 150'ye göre düşük alkalili çimentoyu tayin ederken standart seçenek %0.6'dır. Ancak, bu değerin bile reaktif agrega ile birlikte kullanıldığında yüksek olabileceği belirtilmektedir.

2. Çözünen tuzlardan gelen alkaliler, bu tuzlar, çözünen tuzların kullanıldığı alanlarda alkalilerin yaygın bir kaynağıdır. Betona zarar verebilecek tüm kimyasalların deneylere tabi tutulması için özenli çabalar gerekmektedir.

3. Tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler, örneğin, yüksek alkali içeriği ile uçucu kül alkali meydana getirebilir.

4. Agregalar, bazı agregaların kendisi alkaliler için potansiyel olabilir. Tipik olarak, agreganın kafes sistemi ASR sırasında bozulmaya başladığı zaman, alkaliler yayılmaktadır.

Bu alkaliler, sonradan daha ileri seviyede ASR için ilave bir kaynak hazırlamaktadır [7].

Yollarda kar mücadelesi amaçlı kullanılan tuz ( $NaCl$ ), beton kür suları, deniz suları, ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine sızan alkaliler, dış alkaliler olarak bilinmektedir. Özellikle geçirimli betonlarda dış alkaliler ASR'nin sebep olduğu genişleme

boyutlarını arttırmaktadır. Deniz sularının betona olan etkisini incelemek üzere yapılan araştırmada  $500 \text{ kg/m}^3$  normal Portland çimentosu içeren reaktif andezit agrega ile dökülen betonlarda reaksiyon sonucu oluşan genişlemenin yarısına kadar deniz suyuna batırılmış betonlarda tamamen deniz suyuna batırılmış betonlara nazaran daha hızlı olduğu görülmüştür. Deniz sularının sertleşmiş beton ve yapı elemanlarında oluşan alkali silika reaksiyonu ile oluşan genişmeleri artırıcı etkisi olarak, içeriğindeki hidrate olan C3A ve Portlanditi oluşturan bileşenlerinin NaCl ile oluşan reaksiyon sonucu ( $\text{OH}^-$ ) miktarının artması nedeniyledir. Özellikle İngiltere’de betonun alkali miktarını  $3\text{-}4 \text{ kg/m}^3$  gibi bir değerle kısıtlamak koruyucu olarak kabul edilmesine karşın araştırmalarında bu alkali içeriğinde ve yavaş reaktif agrega ile yapılan betonlarda bile NaCl etkisi ile fazla miktarda genişmeler olduğu belirlenmiştir [8].

### Çimento Özellikleri

Harç çubuklarının üretiminde CEM1 42.5 R türü çimento tipi kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun alkali içeriği  $\%0.6 \text{ Na}_2\text{O}$  eşdeğerinden az olarak kullanılması gerekmektedir. Bu alkali eşdeğer içeriği, çimento içerisinde bulunan sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) yüzdesi ve potasyum oksit ( $\text{K}_2\text{O}$ ) yüzdesi rakamlarının  $0.658$  ile çarpılmasıyla bulunan değerdir (Denklem 1) [9].

$$\% \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \% \text{K}_2\text{O} \quad (1)$$

Çimento ve mineral katkılara ait alkali düzeyleri Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Çimento ve mineral katkılara ait alkali düzeyi çizelgesi

	Alkali düzeyi ( $\% \text{Na}_2\text{O}$ eşdeğer)	Kullanılan Çimento ve Mineral katkılarda alkali düzeyinin bulunması için gerekli denklem ve alkali düzeyi	
		( $\% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 (\% \text{K}_2\text{O})$ )	( $\% \text{Na}_2\text{O}$ Eşdeğer)
Çimento-1	$< \%0.6$ ’dan az olmalı	$0.22+0.658*0.46$	0.52
Çimento-2	$< \%0.6$ ’dan az olmalı	$0,38+0,658*0,74$	0,86692

Birinci grup çimento Oyak Bolu çimento fabrikasından alınmış olup sodyum eşdeğer 0,52 değerine, ikinci grup çimento Batı Söke çimento fabrikasından alınmış olup sodyum eşdeğer 0,86 değerine sahiptir.

Çimentoların (1.grup ve 2. Grup) fiziksel ve kimyasal analiz değerleri Tablo 2’de görülmektedir.

*Tablo 2. CEM I 42.5, kimyasal ve fiziksel analiz değerleri*

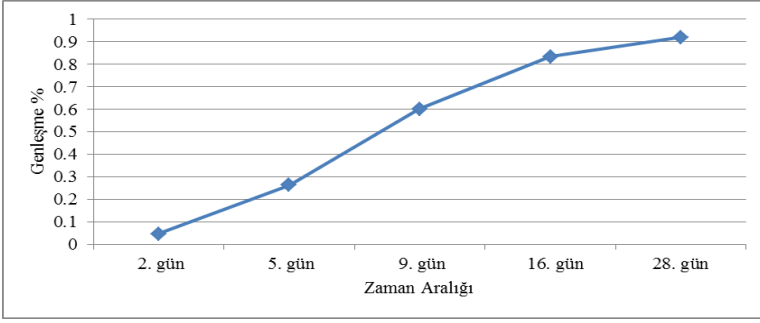
Ölçülen değerler	1. GRUP CEM I 42,5 R (%)	2. GRUP CEM I 42,5 R (%)
SiO <sub>2</sub>	19,95	19,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,12	4,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,75	3,27
CaO	63,82	62,82
MgO	1,64	2,70
SO <sub>3</sub>	3,36	2,58
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,38
K <sub>2</sub> O	0,46	0,74
Na <sub>2</sub> O eşdeğer	0,52	0,86
Kızdırma kaybı	1,11	2,92
SCaO	1,23	1,22
45 Mikron	1,90	16,23
90 Mikron	-	0,71
Özgül ağırlık	3,13	3,12
Blaine	3971(cm <sup>2</sup> /gr)	3188

## Deneysel Çalışma

Sakarya bölgesinde kullanılmakta olan doğal kum 1. Grup çimento ile deneye tabii tutulmuştur. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyine göre genleşme değerleri Tablo 3’de, grafiği Şekil 2’ de görülmektedir.

*Tablo.3. 1. Grup Çimento ile Yapılan Referans Numune Genleşme Değerleri*

Numune Yaşı	Referans Numune Genleşme Değeri
2. gün	0,044972
5. gün	0,26226
9. gün	0,601921
16. gün	0,834689
28. gün	0,920565

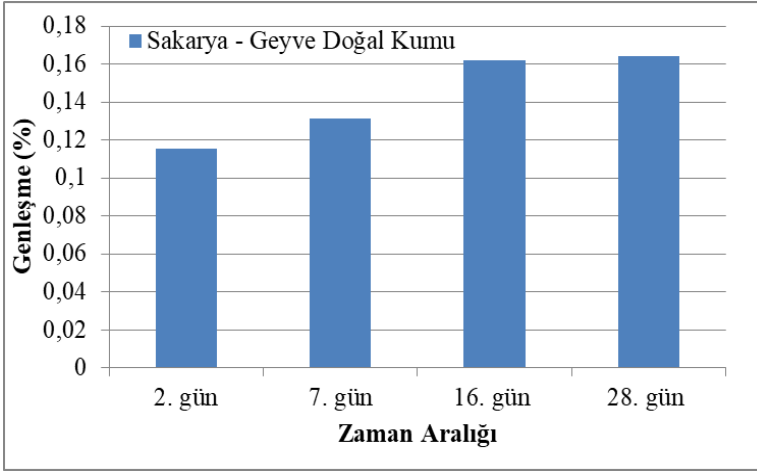


*Şekil 2. 1. Grup Çimento ile Yapılan Referans Numune Genleşme Değerleri Grafiği*

Ayrıca; Sakarya bölgesinde kullanılmakta olan doğal kum 2. Grup çimento ile deneye tabii tutulmuştur. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyine göre genleşme değerleri Tablo 4'de, grafiği Şekil 3'de görülmektedir.

*Tablo.4 2. Grup çimento ile yapılan Referans Numune genleşme Değerleri*

	Sakarya - Geyve Doğal Kum
2. gün	0,11548
7. gün	0,131186
16. gün	0,162034
28. gün	0,164068



Şekil.3 2. Grup çimento ile yapılan Referans Numune genleşme Değerleri Grafiği

## Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada potansiyel zararlı agregayı iki farklı alkali içeriğine sahip olan çimento ile hızlandırılmış harç metodu ile deneysel çalışma yapılmıştır. Alkali silika reaksiyonu oluşturan unsurlardan birinin veya her ikisinin olması durumunda çatlak mekanizmasını başlattığı gözlenmiştir.

Aynı kum çakıl ocağından alınmış olan doğal kum 2 farklı sodyum eşdeğerine sahip çimento ile hızlandırılmış harç çubuğu metoduna göre alkali silika deneyine tabii tutulmuştur.

Harç ve betonlarda çatlak oluşumuna neden olan Alkali silika reaksiyon oluşumu çimentodaki alkali eşdeğer ile agregada bulunan reaktif silis formlarının birleşmesiyle oluşan jel atmosferde bulunan nem ile birleştiğinde betonlarda harita şekilli çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır.

Reaksiyon mekanizmasına maruz kalan betonlarda dayanım oldukça düşmektedir. Betonda dayanım ve durabiliteyi düşüren alkali silika reaksiyonu oluşmaması için çimentodaki alkali değeri olan sodyum eşdeğerinin dünya literatürüne göre 0,60 değerinin altında olması istenmektedir.

Birinci grup çimentoda sodyum eşdeğer olan alkali değeri 0,60'ın altında olup, 0,52'dir. Bu çimento ile yapılan deneyde agreganın aşırı derecede aktif silis değerine sahip olduğu görünmektedir. Genleşme değeri deney standardında 16. gün sonunda yüzde 0,20'nin üzerinde aşırı derecede yüksek olması 0,92 civarında olması agregada bulunan silis miktarının fazla olmasına bağlıdır. Buda agreganın aşırı potansiyel zararlı olduğunu söyleyebiliriz.

İkinci grup çimentoda sodyum eşdeğer olan alkali değeri, 0,86'dır. Bu çimento ile yapılan deneyde agreganın aşırı derecede aktif silis değerine sahip olduğu görünmektedir. Genleşme değeri deney standardında 16. gün sonunda yüzde 0,20'nin altında kalması agreganın zararsız olduğu anlamına gelmez. 16. Gün sonunda yüzde 0,10 değerinin üzerinde olması hem agreganın potansiyel zararlı olması, hem de çimento içerisindeki alkali miktarının 0,86 civarında olması betonların ileriki yaşlarında çatlak zararlarına maruz kalabileceğini göstermektedir. Potansiyel zararlı agregaya ile alkali değeri yüksek olan çimento ile yapılan deney genleşme değerlerine baktığımızda alkali silika reaksiyonu mekanizmasını harekete geçiren unsurların bir arada bulunduğu görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde agregaya aşırı derece potansiyel zararlı iken, çimentoda bulunan alkali değeri iki farklı çimento için ayrı olmasına rağmen alkali genleşmesine neden olduğu görülmüştür. Çimentodaki alkali oranı sınır değerinin altında 0,52 olduğunda genleşmenin aşırı olduğu, diğer 0,86 alkali oranına sahip çimento ile yapılan deney sonuçlarında 16 günlük genleşme sınır değerinin altında kalmasına rağmen ileriki yaşlarda çatlak oluşmayacağı anlamına gelmemektedir. Bu anlamda çimento bulunan fazla alkali değerinin aktif silis içeren agregalarda olumsuz davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

Beton içerisinde ilerleyen yıllarda çatlak oluşturarak dayanımı azaltan Alkali Silika Reaksiyonun oluşmaması için bu reaksiyonu oluşturan unsurlardan en az bir tanesinin ortamda bulunmaması gerekmektedir.

## Kaynaklar

- [1] MATHER, B., "How to make concrete that will not suffer deleterious alkali-silica reactions," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1277-1280, 1999.
- [2] BACK, F., THORSEN, T.S. and NIELSEN, M.P., "Load-carrying capacity of structural members subjected to alkali-silica reactions," *Construction and Building Materials*, Vol. 7, No. 2, pp. 109-115, 1993.
- [3] LEGER, P., COTE, P., and Tinawi, R., "Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams," *Computers and Structures*, Vol. 60, No. 4, pp. 601-611, 1996.
- [4] SAĞLIK, A., KOCABEYLER, M., ORKUN, Y., HALICI, M., TUNÇ, E., Deriner Barajı ve Hes İnşaatı Kütle Betonunda Kullanılması Planlanan Agregalarda Alkali-Silis Reaksiyonu Riski ve Önlenmesine Yönelik Yürütülen Çalışmalar, Makale 5. Ulusal Beton Kongresi, 2003.
- [5] ACI Committee 221, State of the art report on alkali aggregate reactivity, ACI 221.1R-98, 31 p. 1998.
- [6] FARNY, J. A., KOSMATKA, S. H., Diagnosis and control of alkali aggregate reactions in concrete, *Concrete Information*, Portland Cement Association, 23 p. 1997.
- [7] KALMIŞ, M., GÜNGÖR, N., ERİBOL, S., Betonda Alkali-Agrega Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü, T.C. Karayolları Kurs Programı.
- [8] BAYHAN, B. Deprem Hasarlarının Bir Bileşeni Olarak Alkali Silika Reaksiyonları, T.C. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2006
- [9] SWAMY, R.N., *The Alkali Silica Reaction in Concrete*. Van Nostrand, London, pp.96-12, 1992.
- [10] TS EN 12350-5, *Beton- Taze Beton Deneylemleri-Bölüm 5-Yayımla Tablası Deneylemler Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2001.
- [11] ASTM C-227-97, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates*, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, 4 (2): 126-130, 1994.
- [12] ASTM C1260., Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, 2014,USA.www.astm.org.





**AYDIN İLİNDE KULLANILAN  
HARÇ VE BETONLARDA  
MİNERAL KATKILARIN  
ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**BÖLÜM  
15**

**Korkmaz YILDIRIM<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Aydın Adnan Menderes Üniversitesi korkmaz54@gmail.com



## Giriş

21. yüzyıl dünyasında hızla artan dünya nüfusu ve kentleşme nedeniyle bu alanda yeni inşaat çalışmalarında arz ve talep miktarını artırmıştır. 1930'lu yıllarda, Kaliforniya'da bazı yapılardaki betonlarda görülen genleşme sonucu çatlaklar kaygı uyandırmıştır. İlk çalışmalarda genleşme ve çatlakların çimentoda bulunan alkali içeriği ve agregadaki silis sayesinde olduğu saptanmıştır. En yaygın kullanılan yapı malzemesi olarak kullanılan betonlarda, dayanım ve sağlamlık alkali silika reaksiyonu oluşumu açısından deneysel çalışma ve araştırmalar devam etmektedir.

Beton malzemesinde kullanılan agrega ve çimento arasında reaksiyonlar son derece karışıktır. Bu reaksiyonlardan biri olan alkali silika reaksiyonu oluşumdur. Agregada olan reaktif silis ile çimentoda bulunan  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  alkalileri atmosferik ortamda olan nem ile birleşerek alkali silika jelini oluşturur. Jel zamanla betonda önce çatlak olarak görünür. Betonda ciddi hasara neden olan alkali silika reaksiyonu betonun dayanımını olumsuz etkiler[1].

Bazen birkaç yıllık yapılarda, bazen de 100 yıllık yapılarda alkali silika reaksiyonu hasarı görülmektedir. Betonun dayanımı alkali silika reaksiyonundan etkilenmektedir[2].

Betonlarda alkali silika reaksiyonu ilk olarak harita şekilli çatlaklar şeklinde kendini gösterir.



*Şekil.1 İzmir Adnan Menderes Havalimanı değiştirilen pist ve taksi yolu betonu [4]*

Sakarya nehri Geyve ilçesi yakınlarından alınan doğal kumları incelerken, yüksek oranda alkali silika reaksiyonu oluşumuna rastlanmıştır[1].

Alkali silis reaksiyonu mekanizmasını göz önünde bulundurduğumuzda, reaksiyon oluşmasını veya betonda çatlak oluşturan genişmeyi engellemek gerekmektedir. Betonda alkali silika reaksiyonu mekanizmasını etkileyen faktörler ile nasıl sınırlandırıldığına bakacak olursak;

- Betondaki alkali miktarının sınırlandırılması (Çimento alkalinitesinin düşük olanının kullanılması
- Reaktif olmayan agrega kullanımı,
- Betonun dışarıdan nem almasını engellemek,

Burada bahsedilen önlemler yeterli gelmemektedir. Bu kapsamda puzolanik malzemelerin ASR'yi önlemede asıl mekanizmasının boşluk çözeltisi alkalinitesini düşürmek olduğu kabul edilmektedir. Ortamdaki aşırı alkali yüküne rağmen mineral katkıları, ASR gelişmelerini önlemede etki göstermiştir[5-6].

Mineral katkılarla ilgili Kanada standardı CAN/CSA A23.5 mineral katkıların etkinliği ölçmek üzere hızlandırılmış harç çubuğu metodunu modifiye etmiştir[3].

Reaktif agrega ve mineral katkı kullanarak inşa edilen pek çok barajın 50 yıldan beri işlevlerine devam edebildiklerini belirtmektedir. 91-92 NBRI hızlandırılmış harç çubuğu deneyine tabi tuttıkları üç farklı uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu üç farklı agrega için denemelerinin ardından, deney sonuçlarını yorumladıklarında uçucu kül oranı arttıkça gelişmedeki azalmada artmaktadır [7].

Ülkemiz genelinde, bölgesel bazda yapılan çalışmalara ilave olarak Aydın ili genelinde kullanılan doğal kumlar ile üretilen harçlarda alkali silika reaksiyonu izlenmiştir. Harç ve betonlarda kullanılan Çine, İncirlioğa doğal dere kumları ile alkali silika deneyi gerçekleştirilmiştir. Çine kumları ÇDK<sub>1</sub>, ÇDK<sub>2</sub>, AÇDK<sub>3</sub> ve İncirlioğa doğal dere kumlarına % 30 oranında F sınıfı, C sınıfı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu çimento ile yer değiştirme yapılarak ikame edilerek hazırlanan numunelerde alkali silika reaksiyonu çatlakları gözlenmemiştir.

Bu çalışma kapsamında Aydın ili genelinde harç betonlarda kullanılan doğal kumlar ile yapılan alkali silika reaksiyonu deneyinde %70 oranında çimento ve %30 oranında ikame edilen F ve C sınıfı Uçucu kül ve

yüksek fırın cürufu katkı kullanılarak üretilen numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile reaksiyonun oluşumu izlenmiştir.

### **Deneysel Çalışma**

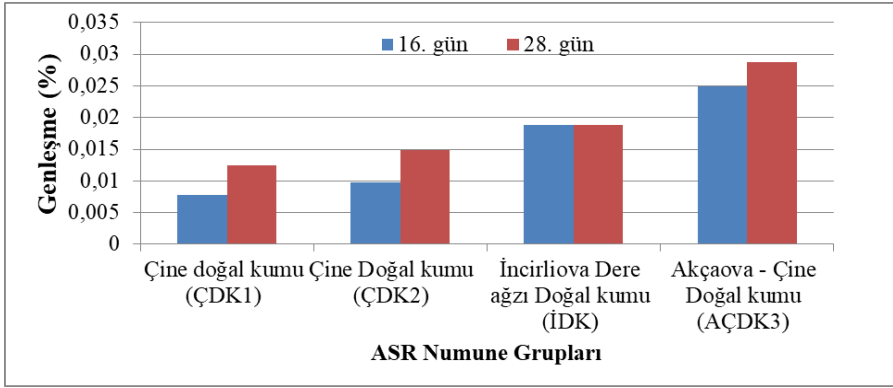
Aydın ili genelinde üretilen harç ve betonlarda kullanılan doğal kum ve kırma kum hazır sıva ve beton üreten firmalardan temin edilmiştir. Serttaş kum ocağından alınan Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>), Türen kum ocağından alınan Çine Doğal kumu (ÇDK<sub>2</sub>), Türen tesislerinden alınan İncirliova Dere ağzı Doğal kumu (İDK), Akçaova Korkmazlar kum ocağından alınan Akçaova - Çine Doğal kumu (AÇDK<sub>3</sub>) ile hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile deneyler yapılmıştır.

ASTM-C 227 standardına uygun olarak hazırlanan deney gruplarında agrega uygun eleklerde elenerek ve tartılarak 1320,000 gr. olarak hazırlandı. Çimento-Su oranı 0,47, su miktarı 276,000 gr. çimento ise 587,000 gr. alındı. Bu çalışma kapsamında %30 mineral katkı, %70 oranında çimento karışımı kullanıldı. Malzemeler hazır olduğunda yayılma tablasında 14-16 cm olacak şekilde harç hazırlandı. Numune kalıpları kalıp spreyi ile yağlanarak harç çubukları oluşturuldu. Harç çubukları 24 saat 20°C derece % 100 bağıl nemde iklimlendirme kabininde kür edildi. Harç çubukları 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak ilk ölçümlerinin ardından 80°C sıcaklıkta içerisinde sodyum hidroksitli su bulunan kazanın içine koyularak deney süresince genleşme değerlerine ulaşıldı. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sodyum hidroksit ile erken yaşta alkali silika reaksiyonunun oluşması için dünya genelinde kullanılan bir deneydir. Normal şartlar altında, alkali silika deneyi 12 ay süren bir deneydir fakat hızlandırılmış harç çubuğu deneyi yaklaşık 16 günde sonuç vermektedir. 16 gün sonunda genleşme yüzde olarak % 10 değerinin üzerinde ise deney 28 gün devam ettirilir. Bu değer % 20'nin üzerinde ise agreganın zararlı olduğu kanaatine varılmaktadır.

ASTM-C 227 standardına uygun elde edilen referans harç çubukları üzerinde alkali silika reaksiyonu hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile deneye tabii tutulmuş genleşme sonuçları Tablo 1'de genleşme grafiği Şekil 2'de görülmektedir.

*Tablo 1. Aydın İl Genelinde Kullanılan Doğal Kumlarda Referans Numunelerinde ASR Genleşme Değerleri*

	Çine doğal kumu (ÇDK1)	Çine Doğal kumu (ÇDK2)	İncirliova Dere ağzı Doğal kumu (İDK)	Akçaova - Çine Doğal kumu (AÇDK3)
16. gün	0,00779661	0,009830508	0,01887	0,024972
28. gün	0,012429379	0,014915254	0,01887	0,028701



*Şekil 2. Aydın İl Genelinde Kullanılan Doğal Kumlarda Referans Numunelerinde ASR Genleşme Değerleri*

Referans numune gruplarına uygulanan ASR genleşme değerleri, 16 gün sonunda hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme değerlerine göre ortalama değerlerin çok altında kalmış buda agrega da aktif silis varlığının az olduğu, hatta hiç olmadığı kanaatine varılmıştır. Deneyin sürdüğü 28. Gün genleşme değerlerine baktığımızda bir miktar genleşme artışının olduğu görülmüş, bu artışın nedeni ise çimentodaki alkali oranının yüksek olduğu söylenebilir.

Şekil 3’de deneysel çalışmalara ait görüntüler verilmiştir.



Şekil.3. Deneysel Çalışma Görüntüleri

Deneysel çalışmada kullanılan çimento ve mineral katkılarına ait alkali düzeylerine ilişkin değerler Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Çimento ve mineral katkılarına ait alkali düzeyi çizelgesi

	Alkali düzeyi (%Na <sub>2</sub> O eşdeğer)	Kullanılan Çimento ve Mineral katkılarda alkali düzeyinin bulunması için gerekli denklem ve alkali düzeyi	
		(%Na <sub>2</sub> O + 0,658 (% K <sub>2</sub> O)	(% Na <sub>2</sub> O Eşdeğer)
Çimento	<%0.6’da n az olmalı	0.22+0.658*0.46	0.52
F sınıfı Uçucu kül	<%3.0’de n az olmalı	0.00+0.658*2.53	1.66
Yüksek fırın cürufu	<%1.0’de n az olmalı	0.50+0.658*0.87	1.27
C sınıfı Uçucu kül	<%3.0’de n az olmalı	0,67+0,658*2,48	2,30

Harç çubuklarının üretiminde kullanılan çimento özelliği CEM I 42.5 R çimentosu olup Batı Söke Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan çimentonun alkali içeriği aşağıdaki formül ile elde edildi. Kullanılan çimento sodyum oksit eşdeğeri ASTM-C standardında olması gereken 0,60 değerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

$$(\text{Na}_2\text{O})_{\text{eşdeğer}} = \text{Na}_2\text{O}(\text{kütlece}\%) + 0.658 * \text{K}_2\text{O}(\text{kütlece}\%)$$

$$\% \text{Na}_2 + 0,658 \% \text{K}_2\text{O}$$

$0,38 + 0,658 * 0,74 = 0,86692$  kullanılan çimentonun sodyum eşdeğer sonucu 0,86 çıkmıştır.

Dünya genelinde yukarıda bulunan değer 0,60'ın altında olması uygun bulunmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan çimento ve mineral katkılara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Çimento Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

<b>Kullanılan Çimento ve Mineral Katkılara ait Kimyasal Özellikleri</b>				
	CEM I 42,5 R %	F sınıfı UK (%)	C sınıfı UK (%)	YFC (%)
SiO <sub>2</sub>	19,44	53,69	46,71	35,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,46	20,29	21,78	14,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,27	11,83	6,16	2,13
CaO	62,82	3,4	16,42	28,79
MgO	2,70	4,09	2,99	8,32
SO <sub>3</sub>	2,58	0,99	0,88	0,51
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,00	0,67	0,50
K <sub>2</sub> O	0,74	2,53	2,48	1,17
Na <sub>2</sub> O eşdeğer	0,86	1,66	2,30	1,27
Kızdırma kaybı	2,92	2,01	0,14	0,21
Serbest kireç CaO	1,22	---	---	---



45 Mikron	16,23	27,25	4,38	0,20
90 Mikron	0,71	---	2,05	---
Özgül ağırlık gr/cm <sup>3</sup>	3,12	1,98	2,35	2,95
Blaine (Özgül Yüzey cm <sup>2</sup> / gr)	3188	4020	2080	5074

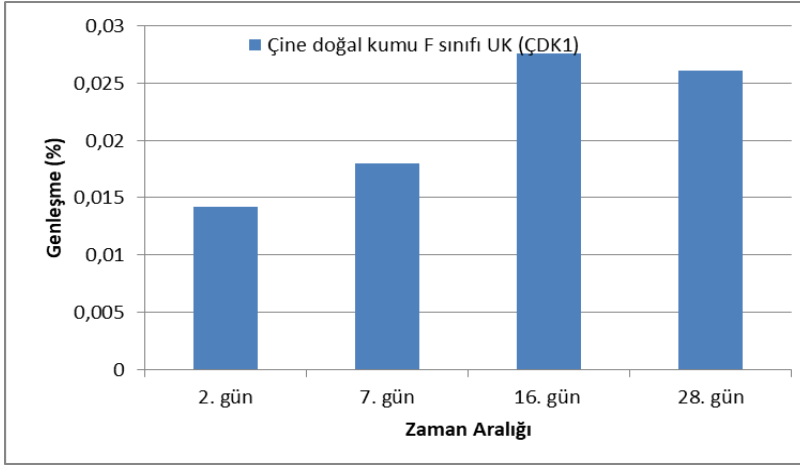
Doğal kumlar ile F sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve C sınıfı uçucu kül çimento ile yer değiştirme ikame edilerek deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bütün gruplarda mineral katkıları % 30, çimento %70 oranında karışım oranları sabit tutulmuştur.

### Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>)

Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) ASTM-C 227 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere %30 oranında F sınıfı uçucu kül ikame edildi. Gruba ait ASR genleşme değerleri Tablo 3' de, Şekil 3'de genleşme grafiği görülmektedir.

*Tablo.3 Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) F sınıfı uçucu kül katkılı ASR genleşme değerleri*

	Çine doğal kumu F sınıfı UK (ÇDK <sub>1</sub> )
2. gün	0,014237
7. gün	0,017966
16. gün	0,027571
28. gün	0,026102



Şekil.3 Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) F sınıfı uçucu kül katkıları ASR genleşme değerleri grafiği

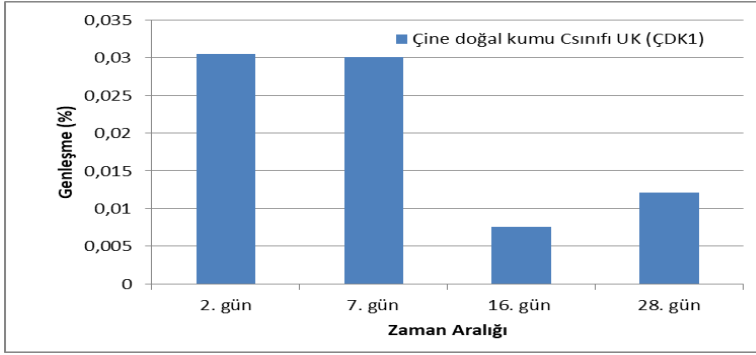
Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) F sınıfı uçucu kül ikamesi ile hazırlanan numunelere ait 28 günlük genleşme değerlerine bakıldığında ilk 7 günlük süreçte genleşmenin arttığı, 16 günde genleşmenin standart değerlerin altında kaldığı, 28 günlük genleşme sonucunun 16. Gün değerine göre çok az miktarda düşük kaldığı görülmüştür. Standartların çok altında genleşme olması uçucu külün şahit numuneye göre alkali silika reaksiyonunu durdurduğu gözlenmiştir.

Çine doğal kumuna (ÇDK<sub>1</sub>) aynı zamanda **C sınıfı uçucu kül** ikamesi yapılarak deneysel çalışma yapıldı.

Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) ASTM-C 227 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere %30 oranında C sınıfı uçucu kül ikame edildi. Gruba ait ASR genleşme değerleri Tablo 4'de, Şekil 4'de genleşme grafiği görülmektedir.

*Tablo.4 Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) C sınıfı uçucu küllü ASR genişleme değerleri*

	Çine doğal kumu C sınıfı UK (ÇDK <sub>1</sub> )
2. gün	0,030508
7. gün	0,030056
16. gün	0,007571
28. gün	0,01209



*Şekil.4 Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) C sınıfı uçucu küllü ASR genişleme değerleri grafiği*

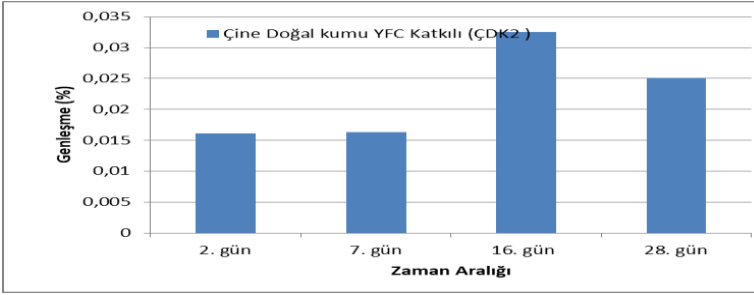
Çine doğal kumu (ÇDK<sub>1</sub>) C sınıfı uçucu kül ikamesi ile hazırlanan numunelere ait 28 günlük genişleme değerlerine bakıldığında ilk 7 günlük süreçte genişlemenin arttığı, 16 günde genişlemenin standart değerlerin altında kaldığı, 28 günlük genişleme sonucunun 16. Gün değerine göre çok az miktarda arttığı görülmüştür.

### **Çine Doğal kumu (ÇDK<sub>2</sub>)**

Çine Doğal kumu (ÇDK<sub>2</sub>) ASTM-C 227 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere % 30 oranında yüksek firm cürufu ikame edilmiştir. Numunelere ait ASR genişleme değerleri Tablo 5' de, Şekil 5'de genişleme grafiği görülmektedir.

Tablo.5 Çine doğal kumu (ÇDK<sub>2</sub>) YFC İkameli ASR genişleme değerleri

	Çine Doğal kumu YFC Katkılı (ÇDK <sub>2</sub> )
2. gün	0,016158
7. gün	0,016271
16. gün	0,032542
28. gün	0,025085

Şekil.5 Çine doğal kumu (ÇDK<sub>2</sub>) YFC İkameli ASR genişleme değerleri grafiği

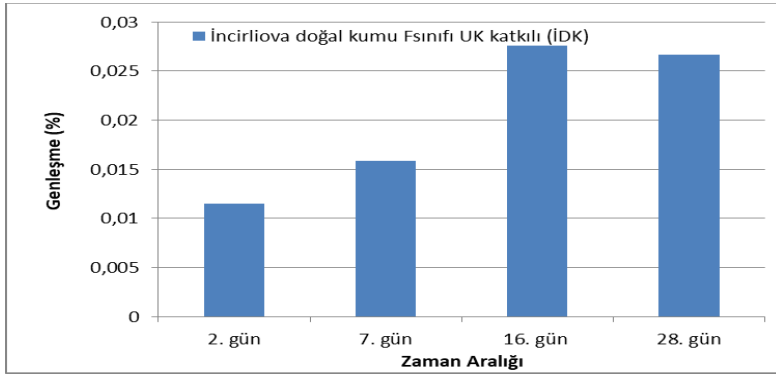
Çine doğal kumu (ÇDK<sub>2</sub>) YFC katkıli hazırlanan numunelere ait 28 günlük genişleme değerlerine bakıldığında ilk 7 günlük süreçte genişlemenin arttığı, 16 günde genişlemenin standart değerlerin altında kaldığı fakat yüksek olduğu, 28 günlük genişleme sonucunun 16. Gün değerine göre çok az azalışta kaldığı görülmüştür.

### İncirlioiva Dere ağzı Doğal kumu (İDK)

İncirlioiva Dere ağzı Doğal kumu (İDK) ASTM-C 227 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere %30 oranında F sınıfı uçucu kül ikame edildi. Gruba ait ASR genişleme değerleri Tablo 6' da, Şekil 6' da genişleme grafiği görülmektedir.

*Tablo.7 İncirliova doğal kumu (İDK) F sınıfı Uçucu kül katkılı ASR genleşme değerleri*

	İncirliova doğal kumu F sınıfı UK katkılı (İDK)
2. gün	0,011525
7. gün	0,015819
16. gün	0,027571
28. gün	0,026667



*Şekil.6 İncirliova doğal kumu F sınıfı Uçucu kül katkılı ASR genleşme değerleri grafiği*

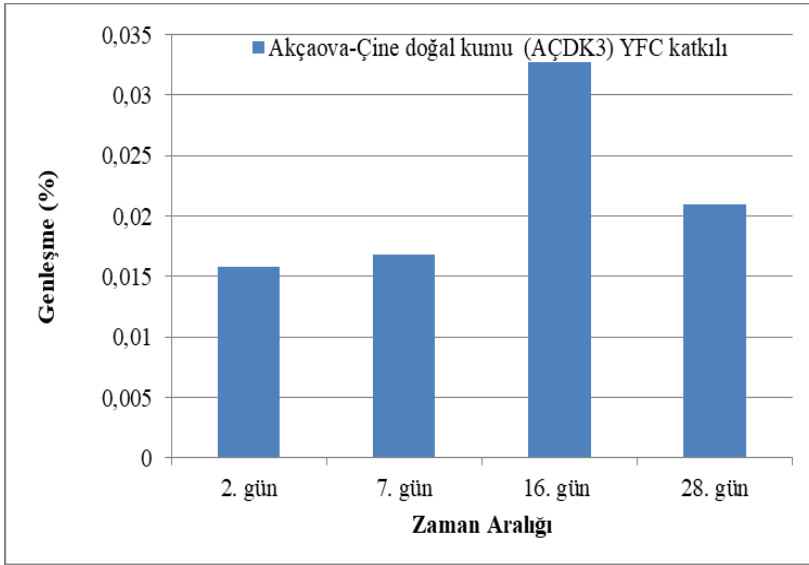
İncirliova Dere ağzı doğal kumu (İDK) F sınıfı uçucu kül katkılı hazırlanan numunelere ait 28 günlük genleşme değerlerine bakıldığında ilk 7 günlük süreçte genleşmenin arttığı, 16 günde genleşmenin standart değerlerin altında kaldığı, 28 günlük genleşme sonucunun 16. gün değerine göre çok az miktarda arttığı neredeyse aynı olduğu görülmüştür.

### **Akçaova - Çine Doğal kumu (AÇDK<sub>3</sub>)**

Akçaova - Çine Doğal kumu (AÇDK<sub>3</sub>) ASTM-C 227 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere % 30 oranında yüksek fırın cürufu ikame edilmiştir. Deney grubuna ait ASR genleşme değerleri Tablo 7' da, Şekil 7'de genleşme grafiği görülmektedir.

Tablo.7 Akçaova-Çine doğal kumu (AÇDK<sub>3</sub>) YFC katkıli ASR genişleme değerleri

	Akçaova-Çine doğal kumu (AÇDK <sub>3</sub> ) YFC katkıli
2. gün	0,015819
7. gün	0,016836
16. gün	0,032768
28. gün	0,021017



Şekil.7 Akçaova - Çine Doğal kumu (AÇDK<sub>3</sub>) ASR Genleşme Değerleri Grafiği

Akçaova - Çine doğal kumu (AÇDK<sub>3</sub>) yüksek fırın cürufu katkıli hazırlanan numunelere ait 28 günlük genişleme değerlerine bakıldığında ilk 7 günlük süreçte genişlemenin genel seviyede kaldığı, 16 günde genişlemenin standart değerlerin altında kaldığı fakat artışın gözüktüğü, 28 günlük genişleme sonucu 16. gün değerine göre yüzde 10 oranında azalma göstermiştir.

## Sonuçlar ve Öneriler

Aydın il genelinde beton ve harçlarda kullanılan Çine kumları ile İncirliova kumu alkali silika reaksiyonu deneyine maruz bırakılmış, 28

günlük deney süresi sonunda ASTM-C 1260 hızlandırılmış harç çubuğu deneyi referans numune genişleme değerlerine göre alkali silika oluşumunun az da olsa ilk günlerde görüldüğü tespit edilmiştir. Genel deney genişleme değerlerine bakıldığında alkali silika çatlak oluşumu görülmemiştir. Çatlak oluşmaması agregada içerisinde aktif silis olmadığını göstermiştir. Çimentonun içinde bulunan  $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğer değeri, 0,60 değerinin üzerinde olmasına rağmen alkali silika reaksiyon çatlakları oluşmamıştır. Bu deney genişleme sonuçlarından doğal kumların temin edildiği bölge genelinde kullanılan harç ve betonlardaki agregalarda aktif silis bulunmamaktadır denilebilir. Mineral katkı kullanımı ile numunelerde genişleme sınır değerlerin altında kaldığı bir kez daha görüldü. Bütün gruplarda kullanılan uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun alkali silika reaksiyonunu azalttığı gözlenmiştir.

Çine doğal kumu ( $\text{ÇDK}_1$ ) grubunu hem F Sınıfı, hem de C sınıfı uçucu kül ile deney gerçekleştirildi. F sınıfı uçucu kül ile 28 gün genişleme değeri standardının çok altında kalmasına rağmen 16 gün sonucuna göre bir miktar azalma gözlemlendi. C sınıfı uçucu kül katkılı numunelerde 28 gün genişleme değeri 16 gün değerine göre bir miktar artış gösterdi. Bunun nedeni olarak C sınıfı uçucu kül ve çimentoda bulunan sodyum eşdeğerinin yüksek olması özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Deneysel çalışmada kullanılan doğal kumlar için alkali silika reaksiyonu açısından zararsızdır ve mineral katkıları reaksiyonu azalttığını diyebiliriz. Bölgesel bazda kullanılmakta olan agregalarda Alkali silika reaksiyonu oluşumu ayrı ayrı kontrol edilmelidir. Böylece beton ve betonarme yapıların servis ömrü uzatılabilir.

**Teşekkür;** "Bu Çalışma Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince Desteklenmiştir. AYMYO-19001"





## Kaynaklar

- [1] YILDIRIM, K. 'Betonda Alkali Silika Reaksiyonunun Azaltılmasında Mineral Katkı Kombinasyonlarının Optimizasyonu' Yayınlanmamış Doktora Tezi Sakarya, 2013
- [2] BACK, F., THORSEN, T.S. and NIELSEN, M.P., "Load-carrying capacity of structural members subjected to alkali-silica reactions," *Construction and Building Materials*, Vol. 7, No. 2, pp. 109-115, 1993.
- [3] Canadian Standards Association (CSA) A23.2-25A, "Test method for detection of alkali silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars." CSA International, Toronto, Ontario, Canada, 2000.
- [4] ANDIÇ, Ç.Ö., Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi Doktora Tezi, 2007.
- [5] BERRA, M., MANGIARDI, T., PAOLINI, A.E., Application of the NaOH bath test method for assessing the effectiveness of mineral admixtures against reaction of alkali with artificial siliceous aggregate, *Cement and Concrete Composites*, Vol.16: 207-218. 1994.
- [6] BERUBE, M.A., DUCHESNE, J., CHOUINARD, D., Why the accelerated mortar bar method ASTM C1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion alkali silica reactivity, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.17, No.1: 26-34. 1995.
- [7] Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P., Eliminating or Minimizing Alkali- Silica Reactivity, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 266 p. 1993.
- [8] TS EN 12350-5, Beton- Taze Beton Deneyleri-Bölüm 5-Yayımla Tablası Deneyi Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2001.
- [9] ASTM C-227-97, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, 4 (2): 126-130, 1994.
- [10] ASTM C1260., Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, 2014,USA.www.astm.org.



# **BİYOPLASTİKLER: POLİHİDROKSİALKANOATLAR**

**BÖLÜM  
16**

**Mithat ÇELEBİ<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> (Dr. Öğr. Üyesi); Yalova Üniversitesi, Polimer Mühendisliği Bölümü, 77200 Yalova, Türkiye. E-posta: mithat.celebi@yalova.edu.tr



## 1. Giriş

Ekonomilerin sürdürülebilir bir temelde yürütülmesi ihtiyacı kimya sanayinin ham maddesi olan fosil kaynaklara alternatif arayışlarını ortaya çıkarmıştır. Toprak ve denizler ile birlikte doğada atık birikimleri, kimyasal ve plastik akıntılarının canlılarla temasa geçmesi gibi konular gittikçe artan endişeler oluşturmaktadır. Biyo-temelli kaynaklardan elde edilen biyoplastikler ise bu sorunlara bir çözüm olarak önerilmektedir. Biyo-temelli polimerler, kimyasal olarak sentezlenmiş polimerlerin aksine bitki, mantar, ve bakteri gibi canlılar tarafından üretilir. Özellikle bazı organizmalar enzimler kullanarak biyokütleyi biyopolimerlere dönüştürebilme kabiliyetine sahiptir. Polihidroksialkanoatlar (PHA'lar) gibi biyoplastik ve biyopolimer üretiminde biyolojik sistemler geliştirmek için sentetik biyolojik yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, biyoplastiklerin üretim yöntemlerinden birisi olan sentetik biyolojiden ve özellikle polihidroksialkanoatların özelliklerinden, çevreye olumlu katkılarından, enerji tüketimi ve atık yönetiminden bahsedilecektir.

## 2. Plastikler

Sanayileşmenin başından günümüze, insanoğlu fosilden elde ettiği kimyasallardan büyük ölçüde yararlanmışır. Petrol ve kömür tükenmekte olduğu için yenilenebilir kaynaklardan kimyasal ürünler üretmek amacıyla alternative yöntemler ve kaynak arayışları devam etmektedir. Biyolojik işlemlerin endüstriyel ölçekte fosil yakıtların yerine kullanılması kimya endüstrisinin çevreye verdiği zararın azaltılmasına katkı sunabilir. Kimyasal hammaddeler arasında polimerler diğer malzemelere göre bir çok avantajları nedeni ile modern yaşam için vaz geçilmez hale gelmiştir. Plastiğin, günlük yaşamı kolaylaştırmış olması ile birlikte kullanımı da artmaktadır. Avrupa Birliği 2009 yılı raporunda, yıllık küresel ortalama plastik üretim ve tüketimin % 9 artış olduğu belirtilmiştir. Avrupa, 2008 yılında 48.5 milyon ton plastiğe ihtiyaç duymuş ve bunun %75'i polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklor (PVC), polistiren (PS) ve polietilen teraftalat (PET)'den oluşmuştur. Bu polimerler petrol ham maddesi kullanarak kimyasal sentezler ile üretilir. Sentezlenen plastikler dayanıklı oldukları için biyobozunmaya karşı dirençlidirler. Zehirli katkı maddeleri, örneğin adipat ve ftalat gibi plastikleştiriciler, plastik yandığında zehirli atık madde salınımına yol açabilirler. Endüstriyel kimya ile üretilen kimyasalların çoğunda üretim sırasında çevresel tehlikeler oluşur. İklim değişikliği ve fosil

kaynaklarının azalımı gibi konular hakkındaki kaygılar biyoplastiklere karşı olan ilgiyi arttırmıştır (Pei ve ark., 2011; Karagöz, 2019).

Piyasada bulunan biyoplastikler, nişasta temelli polimerlerden, polihidroksialkanoatlardan (PHA) polilaktik asitlerden (PLA) ve yenilebilir kaynaklardan üretilmektedir (Çelebi ve Karagöz, 2019). Günümüzdeki petrol kaynaklı üretilen plastiklerin yerine kullanılabilecek en iyi aday, dayanıklılık ve geniş çapta özellikleri olmaları üzerine polihidroksialkanoatlar'dan (PHA) üretilen plastikler kabul edilmektedir. Günümüzde, PHA poliesterlerin 100'den fazla monomeri bulunmaktadır (Luef ve ark., 2015). PHA monomerleri, kısa zincir uzunluklu polihidroksialkanoat (SCL-HA, 3 ve 5 karbon arası monomerler) orta zincir uzunluklu polihidroksialkanoat (MCL-HA, 6 ve 14 karbon arası monomerler) olarak iki gruba ayrılırlar. PLA ve nişasta polimerleri gibi biyobozunur polimerlerin aksine, PHA'ların özelliklerini daha fazla geliştirmek için yapılan çalışmalarda biyobozunurluk özelliklerinden ödün verilmez.

Biyoplastikleri genel olarak beş sınıfa ayırabiliriz;

**a)** Biyokütleden üretilen biyobozunur plastikler

**b)** Monomeri yenilenebilir kaynaklı olan biyobozunur plastikler

**c)** Mikroorganizmalardan üretilen biyobozunur plastikler

**d)** Petrol kaynaklı biyobozunur plastikler

**e)** Monomeri yenilenebilir kaynaklı olan biyobozunur olmayan plastikler.

Ticari olarak kullanılan biyoplastikler Çizelge 1'de gösterilmektedir (Kaeb, 2009).

Çizelge 1. Ticari olarak kullanılan biyoplastikler

Polimer	Şirket	Ton/Yıl
<b>Biyobozunur, biyo-temelli olmayan</b>		
Sentetik poliesterler	Ecoflex (BASF)	14 000
Polivinil Alkol (PVA)	Wanwei	100 000
<b>Biyobozunur, biyo-temelli</b>		
Nişasta temelli malzemeler	Novamont	60 000
Selülöz temelli malzemeler	Inovia Films	30 000
Poliaktid (PLA)	Natureworks	140 000
Polihidroksialkanoat (PHA)	Metabolix (ADM)	50 000
<b>Biyobozunmaz, biyo-temelli</b>		
Biyo-temelli gliserinden PDO	Tate ve Lyle (DuPont)	45 000
Biyoetil alkolden PE	Braskem (DOW)	200 000 (planlı)
Biyoetil alkolden PVC	Solvay	360 000 (planlı)
Petrolden Poliamidler (PA)	Arkema	60 000 (planlı)

PHA'lar, sağlam ve kalıplanabilir termoplastiklerden elastik malzemelere, elastiklerden yumuşak ve yapışkan karışımlara kadar farklı özelliklere sahiptirler. PHA'lar da PLA ve türevleri gibi, ameliyat dikişi ipliği ve cerrahi kafesler gibi çeşitli medikal uygulamalarda kullanılabilirler. PHA'ların en çok bilineni ve en basiti olan polihidroksibutrat (PHB), ilk olarak Gram-pozitif bakterisi olan *Bacillus megaterium* tarafından üretilen bir hücre içi biyopoliester olarak keşfedildi. PHB'den elde edilen biyoplastikler, 175 °C erime noktasına sahip olarak ısıya dayanıklıdır. PHB, genelde ısıya dayanıklı ve transparan ambalaj filmlerinin üretiminde kullanılır. PHA'lar, PLA'lara göre üstün özelliklere sahip olmaları sebebiyle PHA gelişimine daha yoğun ilgi vardır (Chen, 2009; Pei ve ark., 2011).

Biyobozunur polimerler arasında polyesterlerin tercih edilmesindeki en önemli sebeplerden birisi içerdikleri ester bağlarından dolayı hidrolize olabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Polyesterler alifatik ve aromatik polyesterler olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bazı

bakteriyel polyesterler, polyesterlerin sentezinde görev alan bakteriler *Bacillus megaterium*, *Wautersia eutropha* ve *Pseudomonas* türleri tarafından üretilmektedirler. Bakteri hidrolizden önce kuru ağırlıklarının % 80'ine kadar polyester biriktirebilir (Ashter, 2016).

Bakteriyel polyesterlerin önemli olan bazı özellikleri aşağıda sıralanmaktadır (Ashter, 2016);

1. Suyu karşı dirençlidirler.
2. Enjeksiyon ve şişirerek kalıplamaya uygundur.
3. Esnek olmayıp kırılabilir bir özellik gösterirler.
4. Su buharı altında bariyer özellikleri zayıflamaktadır.

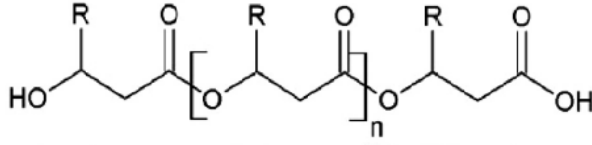
Çizelge 2'de PHA'ların yan gruplarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir (Ashter, 2016).

*Çizelge 2. PHA adlandırılmasında bulunan yan gruplar*

Polimer	Yan grup (R)
Polihidroksialkanoatlar	
Polihidroksibütirat (PHB)	-CH <sub>3</sub>
Polihidroksivalerat (PHV)	-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>
PHBH <sub>x</sub> (Kaneda)	-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>
PHBO (Nodax)	CH <sub>3</sub> ve/veya -(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> - CH <sub>3</sub>
PHBOd (Nodax)	CH <sub>3</sub> ve/veya -(CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> - CH <sub>3</sub>

PHA'lar şeker ya da lipidlerin bakterilerin fermantasyonu ile hücre içinde üretilen biyopolimerlerdir. PHA'ların molekül ağırlığını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar; büyüme koşulları, karbon kaynağı ve bakteri türü gibi değişkenlerdir. Molekül ağırlığında meydana gelen bir değişim ise aynı zamanda polimerin biyobozunurluğunu doğrudan etkilemektedir (Ashter, 2016).





Şekil 13. PHA'ların genel gösterimi

PHA'lar genel olarak doymuş ve doymamış hidroksialkanoik asitlerden meydana gelmektedir. PHA alkanooat monomeri dallanmış veya dallanmamış 3-hidroksialkanoat'lardan meydana gelir. Eğer substitute olarak bağlanırsa 4 ve 5 hidroksialkanoat olarak isimlendirilmektedir (Ashter, 2016).

Günümüzde, biyopolimer üretimi için araştırmaların çoğu gelişimin kavram yada erken aşamalarında olarak bazıları ticari aşamaya gelmiş bulunmaktadır (Chen, 2009). Bu polimerlerin çoğu, mikrobiyal fermantasyon ile üretilmektedir. Karbon kaynaklı biyokütleden kimyasal üretim üzerine endüstriyel gelişim ve uygulama yöntemlerini konu edinen, beyaz biyoteknoloji adı verilen yeni bir endüstriyel biyoteknoloji geliştirilmiştir. Endüstriyel biyoteknoloji yıllar önce geliştirilmiş olmasına rağmen, geniş çapta biyokütleden polimer üretimi pahalı olduğu için üretim mümkün değildi. Fakat son yıllarda, araştırma sektörlerindeki yenilikler, özelliklede biyoteknoloji sektörü, fosil temelli yöntemlere rekabet edebilen biyolojik yöntemler geliştirmişlerdir. Endüstriyel biyoteknoloji ile üretilen bazı ürünler; antibiyotikler, vitaminler ve etil alkoldür (DSM, 2004)

Sentetik biyoloji (SB) mühendislik temellerinin biyolojiye uygulandığı yakın tarihte oluşmuş bir bilim ve mühendislik alanıdır. SB'nin potansiyel faydaları; yeni ilaçlar, yenilenebilir kimyasallar ve yakıt üretimi yapılabilmesidir (Gibson ve ark. 2010).

Kırmızı ile nitelenen medikal ve ilaç endüstrisinde; antibiyotik üretimi, yeni ürünlerin üretimi, enzim immobilizasyonu, penisilin üretimi, nişasta ve selülozun parçalanması, hastalıkların tanısı için sensör üretimi, yeni ilaçların oluşturulması, kontrollü ilaç salınımı ile ilaçların hedef bölgeye ulaşması ve yan etkilerinin azaltılması ve aşuların üretilmesinde kullanılmaktadır. Beyaz renk ile nitelenen endüstriyel biyotekonoji; kimya sektöründe organik asitler, solventler, tarım ilaçları, plastikler, nişastanın hidrolizi ile glikoz ve fruktoz üretiminde ve kimyasal madde

üretiminde kullanılabilmektedir. Çevre kirliliğinin önlenmesinde; renk giderimi, atıkların miktarlarının azaltılmasında ve geri dönüşümünde kullanılmaktadır (Çelebi, 2017).

Çizelge 3: Sentetik Biyolojinin uygulamaları

Uygulama	Örnek
Medikal uygulamalar	Geliştirilmiş mayada sıtma ilaçlarının ön madde üretimi
	Noval polyo virus aşısı
	Deri altı implantlarda transgen belirtisinin kontrolü
Yakıt ve Enerji	Dallanmış zincirli yüksek alkoller biyoyakıt olarak fermentasyonsuz yoldan sentezi
	Fotokatalik nanoyapıların temeli için biyolojik sistem
Kimyasallar	Yapay protein iskelesi
	Glutarik asitin geliştirilmiş <i>E. coli</i> 'den yapımının gelişimi
Biyolojik hesap	Transkripsiyonel regülatörün yapay salınım ağları
	Ayarlanılabilir yapay memeli hayvan osilatörü
	Genetik saatlerin senkronize topluluğu
Organizmalar	Yapay mikroplar
	Haşere kontrolü için genetiği değiştirilmiş böcekler
Çevresel uygulamalar	Arsenik sensörler
	Herbisit tespiti ve yok edici biyosensörler

### 3. Biyokütleden Biyoplastik Üretimi İçin Sentetik Biyolojik Yaklaşımlar

PHA hücre içinde birçok bakteride üretilebilir. Bazı yetersiz büyüme ortamlarında, biyosentezlenmiş PHA'lar kuru hücre ağırlığının %90'a kadar varan kısmını kaplayabilir. *Rolstonia eutropha* (>80%), *Alcaligenes latus* (>75%), ve *Pseudomonas oleovorans* (>60%) cinsleri gibi bazı mikroorganizmalar doğal hallerinde iken PHA'yı yeterli oranda üretebiliyorlar (kuru hücre ağırlığının %50 ve %80'i arası miktarda) (Chen, 2009).

PHA'ların sentezi için bilinen 3 biyosentez yolu vardır. 1. yöntem, birçok bakteride bulunan en yaygın olanıdır. Şekerden türetilmiş asetil-CoA'dan 3-hidroksibutiril (3HB) monomerlerinin üretilmesine yol

açarken, asetilCoA'yı asetoasetil-CoA'ya dönüştüren PhaA (3-ketotiolaz), PhaB'ye (NADPH'ye bağlı asetoetel-CoA), PhaA (NADPH'ye bağlı asetoetil-CoA) gibi bir dizi enzim katılmaktadır). CoA redüktazı, 3-HB-CoA ve PhaC (PHA sentaz, 3HB-CoA'nın nihai monomerlere polimerize edilmesi) ile sonuçlanır. 2. ve 3. yöntemler daha yaygın olarak *psödomonas* cinsinde bulunur. Asetil-CoA ya da asil-CoA'ya dönüşmek için karbon kaynağı olarak ya şeker ya da yağ asitleri kullanan yollar olup, bunlar çoğunlukla mcl- (R) -hidroksiasil (3HA) monomerlerine yol açar. (R)'e özgü enoil-CoA hidrataz (PhaJ) ve (R)-3-hidroksiasil-ACP-CoA transferaz (PhaG), 1HA yolunu elde etmede PhaB ile benzer rol oynar (Tsuge, 2002; Verlinden 2007).

PHA'lar doğal polimerdir fakat sentetik polimerlere benzer özelliklere sahiptirler. Sürdürülebilir kaynaklar ile beslenen biyolojik yöntemler aracılığıyla PHA'ların üretimine yönelik ilgi artmaktadır. PHA'ların üretimi için bazı genetiği değiştirilmiş mikroorganizmalar tasarlanmıştır. Mühendislik'te genel olarak kullanılan bakteri soylarından biri *E. Coli*'dir. Bazı PHA'ların biyosentez genlerini içeren rekombinant *E. coli* türleri (*Aeromonas caviae*'dan phaCac, *Alcaligenes latus*'dan phaCABA1, ya da *Ralstonia eutropha*'dan phbCAB) tasarlanmıştır. Şeker ya da yağ asitlerini karbon kaynağı olarak kullanarak yeterli miktarda PHA'lar üretilebilir. *E. coli*'nin yanı sıra, PHA'ların üretiminde laurik asiti karbon kaynağı olarak kullanıp phbAB veya phaPCJ içeren *Aeromonas hydrophila* soylarında tasarlanmıştır. Doğal PHA'ları üreten bazı soyların genetikleri, verimliliklerini artırmak için değiştirilmiştir. Örneğin, plazmidler kullanılarak *P. putida*'nın fadA ve fadB beta-oksidasyon genleri değiştirilmesi sonucu doğal türlerine (%50) göre, değiştirilmiş türler daha yüksek oranda (%84) PHA'lar üretmiş (Ouyang ve ark., 2007).

Bakteriler çeşitli laboratuvar şartlarında kısıtlı besiyeri ortamında bırakıldıklarında PHA üretmeye başlamaktadırlar. Çeşitli tarımsal atıkları olan küspe, mısır sapı ya da benzeri ürünleri karbon kaynağı olarak kullanılmaktadır. Farklı çeşitte olan mikroorganizmalar da PHA üretmektedir. PHA'ları doğal enerji kaynağı olarak depolayan 300'den fazla mikroorganizma vardır. Bu mikroorganizmaların karbon kaynakları azaldığı zaman, gerekli zamanlarda PHA'lar karbon veya enerji eksikliğinde organizma tarafından kullanılır. Bakteriyal fermantasyonun birinci aşaması bakterinin katı besi yerine ekimidir. Besiyerine bakterinin büyümesi için gerekli besinlerin ilavesi ve gerekli fiziksel koşullarının

sağlanması gerekmektedir. İkinci aşama ise hücre içinde PHA sentezi gerçekleşir. PHA'ların molekül ağırlıkları 100.000 ile 500.000 arasında değişmektedir. Özel koşullar sağlandığında PHA'ların molekül ağırlıkları 1.000.000 g/mol'ü de aşabilmektedir. Fermantasyon prosesinin tamamlanması iki günde gerçekleşir (Ashter, 2016).

PHA'ların endüstriyel ölçekte üretilmesi için bir takım fermantasyon süreçleri geliştirilmiştir. Bu fermantasyonlar genellikle iki fazda gerçekleştirilir. İlk aşama hücrenin büyüme aşamasıdır. İkinci aşamada ise, yetersiz besin ortamında bulunan hücrelerin PHA biyosentezine yönelmesidir. PHA'ların mikrobiyal fermantasyonlarla ürettiği üretimin büyük kısmı, karbon kaynağı olarak şeker ve yağ asitlerini kullanmaktadır. Bu kaynaklar sürdürülebilir kaynaklardan elde edilir, ancak büyük ölçekte kullanılırken bazı kısıtlamaları vardır. Örneğin, şekerler aynı zamanda başlıca gıda kaynakları olarak da kullanılan nişastadan elde edilir. Bu nedenle, mevcut biyoteknoloji süreçleri tarafından üretilen PHA'lar hala fosil karbonlardan elde edilenlerden çok daha pahalıdır. Biyolojik esaslı bir işlemin geleneksel kimyasal işlemlerle rekabet edebilmesi için, PHA'ların daha yüksek verimle, tercihen gıda dışı bir biyokütleden, yeni özelliklere sahip daha gelişmiş PHA monomerlerinden, daha az enerji tüketiminden ve daha az sera gazından üretilmesi gerekecektir. (GHGs) emisyonu belirlenirken yaşam döngüsü analizi (LCA) dikkate alınmaktadır. SB tarafından geliştirilen yeni yaklaşımların bu hedeflere ulaşmaya katkı sunabileceği düşünülmektedir (Chen, 2009).

PHA'yı daha iyi üreten canlı soylarının geliştirilmesi SB'nin faydalarından biridir. Genetik mühendisliği yaklaşımlarındaki geçmiş çalışmaların çoğu doğal organizmalardan üretilen PHA biyosentez genlerinin düzenlenmelerine yoğunlaşmıştır. Buna karşılık SB, genetik mühendislik, metabok mühendislik, kimya ve biyoinformatiğin birlikte çalışmasını sağlamaktadır. Örneğin; SB yöntemleri ile mikroorganizmalar, PHA biyosentezini kodlayan genetik kodları içermekle birlikte verimliliğe katkıda bulunan metabolik yöntemlerde içerirler. PHA üretimini laboratuvarından endüstriyel boyuta taşıyabilmek için hücrelerin yüksek hücre yoğunluğunda büyüebilmelerini sağlayacak araştırmalar yapılmalıdır. Sınırlı oksijen kaynağının bulunması hücrelerin yoğun bir şekilde çoğalmalarına bir engel olduğu ileri sürülmüştür. Fakat, mikro veya anaerobik koşullara karşıt, koda geçen sentetik ve metabolik yollar oluşturularak çözüm sağlanmıştır (Jian, ve ark., 2010). Bu yöntem,

aynı zamanda bakterilerinde nişasta ya da glikoz ham maddeleri kullanarak ürettiği poli-3-hidroksibutirat (PHB) maddesinin üretiminde kullanılmıştır. Bu sentetik metabolik yollar ile PHB üretimini anaerobik koşullarda kuru hücre ağırlığının %29'undan %48'ine çıkartabilmiştir (Li ve ark., 2009).

Fermantasyonlarla yenilenebilir polimerler üretmenin önündeki en büyük engellerden biri, saflaştırma işlemlerinin maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Genetik kodları otoliz ile programlanmış olarak tasarlanan suşlar bu engeli ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Biyoyakıt üretimi için lipidlerin çıkarılmasını kolaylaştırmak için *Cyanobacterium Synechocystis sp.* İndükleyici bir otoliz uygulandı (Liu ve Curtiss, 2009). Eğer bu şekilde programlanmış otoliz sistemi PHA üreten suşlarda uygulanırsa, PHA fermantasyonunun etkinliği artar.

Büyük çapta biyopolimer üretiminin başlıca gelen engellerinden en önemlisi şeker ve yağ asitleri olan hammadelerin maliyetidir. Bu engel, PHA üretimi için olduğu gibi kimyasal ve yakıt ham maddelerin üretiminde de mevcuttur. Nişasta ve şekerden üretilen biyoyakıt miktarındaki artış, gıda güvenliğini gittikçe tehdiye atmaktadır. Bu nedenle, gıda dışı biyokütle kullanarak yeni üretim yöntemleri geliştirilmek kolay değildir. Kimyasal ham madde (çoğu biyoyakıt) üretimi için nişasta ve şekerler kullanıldığından, kalan boşluğun sürdürülebilir karbon kaynağı olarak selülozik biyokütle ile en iyi şekilde doldurulması gereklidir. Selülozik biyokütleyi yararlı ürünlere dönüştürebilmek için çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Uygun mikroorganizmaların, az sayıda ön-işlem ile selülozu etkili bir şekilde parçalayabilmesi gerekmektedir. Yenilebilir biyokütlenin çoğu, hemiselüloz olan uzun liflerden ve ligninden oluşur. Kimyasal bileşim olarak hemiselüloz D-ksiloz, L-arabinoz, D-mannoz ve D-galaktoz monomerlerinin ve 4-O-metil-D-glukuronik asiti gibi şekerlerin karışımından oluşur. Lignin ise aromatik monomerlerin polimerizasyonu ile oluşan bir maddedir. Enzimli veya enzimsiz hidroliz yolu ile bu tür selülozlar sindirilerek D-glikoz'e dönüştürülebilir. Klasik bir enzimli selüloz hidroliz yöntemi, çeşitli enzimlerin aracılık ettiği çok adımlı bir işlemdir. Selülozun etkili şekilde parçalanması için bazı mikroorganizmalarda bir grup enzim tespit edilmiştir. Örneğin; selüloz zincirlerini rastgele noktalardan ayırabilen endoglukonazlar, indirgeyici veya indirgeyici olmayan uçlardaki sellobiyoz gruplarını çıkarabilen endoglikonazlar ve sellobiyozları glikoza çeviren  $\beta$ -glukozidaz enzimleri

mevcuttur. Selüloz ve hemiselülozun doğada parçalanmasını sağlayabilen selülozomlar, doğanın en ayrıntılı ve yüksek verimli nanomakinelerinden biri olarak görülmektedir. Selülozomal bileşenlerin birleşimi, kohesyonlar ve dokereyenler adları verilen iki proteinin birbirleri ile etkileşimleri sayesinde gerçekleşir. Selülozomlar kumaşı beyazlatmaktan kâğıtların değerlendirilmesine, lignoselülozik biyokütleden kimyasal elde etmeye kadar, birçok alanda kullanılabilir (Çelebi, 2019).

#### **4. Sentetik Biyoloji ile Biyoplastik Üretiminin Çevresel Etkileri**

Fosilden elde edilmiş polimerler kullanılarak üretilen plastikler, çevre için ciddi yan etkiler oluşturmuştur. Her yıl, onda birinden daha azı geri dönüştürülen milyonlarca ton plastik atılmaktadır. Çoğu, doğada ve çöplük arazilerde birikerek kirliliğe yol açar. Bazıları ise, birkaç bin yıllık sürelerde bozunmaktadırlar. Dolayısıyla, fosil kaynakların tükenmeleri, plastik çöplerin birikmesi ve düşük karbon salınımlı çevre koruma girişimlerinin uygulanması için ciddi çalışmalar yapmak gerekmektedir. Biyoplastikler, fosil temelli plastiklere göre çevre için fayda sağlayabilirler. Günümüzde biyoplastikler, sürdürülebilir bir büyüme ve artan taleplere karşı daha iyi bir çözüm olarak kabul edilmiştir. Yenilenebilir ham maddelerden üretilen yeni nesil plastiklerin tasarım ve gelişiminde, doğada parçalanabilirlik ve yaşam döngüsü değerleri, biyoplastiklerin çevre üzerindeki etkilerini ölçebilmek için dikkate alınmalıdır. PHA'lardan yapılan biyoplastikler hidroliz ve mikrobik mikrobiyal fermantasyon yolu ile parçalanarak karbondioksit ve suya dönüşürler. Bazı bakteri ve mantar cinslerinde depolimerazlar adı verilen PHA parçalayıcı enzimler vardır (Çelebi, 2019).

Biyoplastiklerin, çevresel faydalarının yanı sıra, endüstriyel üretim sırasında biyolojik işlemlerin kullanılması bir başka avantajdır. Bu açıdan, SB temelli teknolojiler, üretim sürecinde zehirli moleküllerin kullanımını veya yan ürün oluşumunun azaltılmasında etkili olabilirler (DSM, 2004).

Belirtildiği gibi, son yarım yüzyıldan beri sentetik plastikler çevrede büyük miktarda kirliliğe yol açmıştır. SB yöntemleri sentetik plastikler yerine paçalanıp gübreye dönüşebilen çevre dostu plastikler üretimin yanı sıra, parçalanması zor olan ve uzun zaman gerektiren kimyasalları parçalamak için yeni yaklaşımlar sunmaktadır. Doğada bulunmamalarına

rağmen, sentetik plastikleri parçalayan mikroorganizmalar geliştirilebilir. Fakat, plastiği parçalayabilen bu plastikten beslenen mikroorganizmaların çevreye sızmaları ciddi sorunlara yol açabilir (Collins, 2008).

## 5. Sonuç

Biyoplastikler, yenilenebilir karbon kaynaklardan üretilen ve biyo-bozunur plastikler olarak, çevre dostluğuna katkılı ve sürdürülebilir gelişim için faydalı bir aday olarak kabul edilirler. Sentetik Biyoloji’de araştırma ve geliştirme çalışmalarının, biyoplastiklerin büyük çapta üretilmelerini kolaylaştıracağı beklenir. Sentetik Biyolojinin bu hedefe ulaşmakta katkıda bulunduğu birçok alanlar vardır. SB ve plastikler henüz gelişimlerinin erken aşamalarındadır. Biyoplastikler üzerine SB araştırmalarının çoğu PHA üretim gelişimine odaklıdır. SB tasarım yaklaşımları, biyokütlenin geniş çapta ve daha etkili yöntemler sonucu ile polimerlere dönüşmesinde büyük katkı sağlayabilir. Ancak, çevreye uzun vadede apaçık faydalı olacağı halde, endüstrinin yeni bir biyolojik işleme geçmesi hızlı olmayacaktır. Biyoplastiklerin araştırma ve geliştirmelerindeki gelişimini, yasal kurumların verdiği maddi destekler belirlerken ürünlerin pazarlanmalarındaki etki ve piyasa değerlerindeki etkiliyor. Lignoselülozden üretilen biyoplastikler sera gazlarının azalmasında umut vaat etmektedir fakat hala gelişme aşamasında bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler ticari olarak kullanılabilir aşamaya geldiğinde, biyo- temelli ürünlerin ham madde ücretleri azalacak ve fosil kaynaklar ile rekabet edebileceklerdir. Yeni polimer özelliklerinin tasarımı, biyoplastikleri sadece ambalaj ile sınırlı kalmayıp diğer uygulama alanlarında (medikal, tekstil ve elektronik gibi) genişletecektir. Biyoplastiklerin, özellikle enerji üretimi gibi biyo-parçalanma yöntemlerindeki gelişmeleri, var olan faydaları en üst düzeye taşıyacaktır.





## Kaynaklar

- Andrady, A. L. ve Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 364, 1977-84.
- Ashter, S. A. (2016). *Introduction to Bioplastics Engineering. Introduction to Bioplastics Engineering*. doi:10.1016/B978-0-323-39396-6.00005-1
- Chen, G. Q. (2009). A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) based bio- and materials industry. *Chem Soc Rev* 38, 2434-46.
- Collins, J. J. (2008). Collins: Boston University University Professor Lecture titled Biology by Design. Available from: [wyss.harvard.edu/viewpage/145/collins-bostonuniversity-university-professor-lecture](http://wyss.harvard.edu/viewpage/145/collins-bostonuniversity-university-professor-lecture).
- Çelebi, M. (2019). *Biyobozunur Polimerler ve Uygulamaları*, Ders Notu, Polimer Mühendisliği, Yalova Üniversitesi. Yalova.
- Çelebi, M. ve Karagöz, İ. (2019). Biyobozunur Polimerler ve Özellikleri; Nişasta, Poli(glikolik asit), Poli(laktik asit) ve Poli(kaprolakton), *Mühendislik Alanında Yeni Ufuklar*, Gece Akademi. İstanbul.
- Çelebi, M. (2017). Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği, *Biyoteknolojide Polimerler*, Ders Notu, Yalova.
- DSM (2004). Industrial (white) biotechnology: An effective route to increase EU innovation and sustainable growth.
- Gibson, D. G., Glass, J. I., Lartigue, C., Noskov, V. N., Chuang, R. Y., Algire, M. A., Benders,
- Karagöz, İ. (2019). Tarımda Polimer Malzemelerin Kullanımı, *Mühendislik Bilimlerinde Akademik Çalışmalar*, Ed. Kılıç, A., Tuncay, Y., Cetinje, Karadağ. Cetinje-Montenegro.
- Montague, G. A., Ma, M. G., Moodie, L., Merryman, M. M., Vashee, C., Krishnakumar, S., Assad-Garcia, R., Andrews-Pfannkoch, N., Denisova, C., Young, E. A., Qi, L., Segall-Shapiro, Z. Q., Calvey, T. H., Parmar, C. H., Hutchison, P. P., Smith, C. A., Venter, J. C. (2010). Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome. *Science* 329, 52-56.
- Jian, J., Li, Z. J., Ye, H. M., Yuan, M. Q. ve Chen, G. Q. (2010). Metabolic engineering for microbial production of polyhydroxyalkanoates consisting of high 3-hydroxyhexanoate content by recombinant *Aeromonas hydrophila*. *Bioresour Technol* 101, 6096-102.
- Kaeb, H. (2009). Bioplastics: Technology, Markets, Policies.

- Li, Q., He, Y. C., Xian, M., Jun, G., Xu, X., Yang, J. M. ve Li, L. Z. (2009). Improving enzymatic hydrolysis of wheat straw using ionic liquid 1-ethyl-3-methyl imidazolium diethyl phosphate pretreatment. *Bioresour Technol* 100, 3570-5.
- Liu, X. ve Curtiss, R., 3rd (2009). Nickel-inducible lysis system in *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106, 21550-4.
- Luef K. P. et al., (2015). Poly(hydroxy alkanooate)s in Medical Applications, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, **29** (2) 287–297.
- OECD (2013-10-28), “Policies for Bioplastics in the Context of a Bioeconomy”, OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 10, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/5k3xpf9rrw6d-en>
- Ouyang, S. P., Luo, R. C., Chen, S. S., Liu, Q., Chung, A., Wu, Q. ve Chen, G. Q. (2007). Production of polyhydroxyalkanoates with high 3-hydroxydodecanoate monomer content by *fadB* and *fadA* knockout mutant of *Pseudomonas putida* KT2442. *Biomacromolecules* 8, 2504-11.
- Pei, L., Schmidt, M., Wei, W. (2011). Chapter 3: Conversion of Biomass into Bioplastics and, Their Potential Environmental Impacts, Ed. Magdy El-nashar, *Biotechnology of Biopolymers*, Intech.
- Verlinden R.A.J. et al, Bacterial synthesis of PHAs, *Journal of Applied Microbiology* 102 (2007) 1437–1449.
- Tsuge, T. (2002). Metabolic improvements and use of inexpensive carbon sources in microbial production of polyhydroxyalkanoates. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 94(6), 579–584. doi:10.1016/s1389-1723(02)80198-0

**AGREGALARDA İNCE MALZEME  
MİKTARINI BELİRLEMEK AMACIYLA  
YAPILAN METİLEN MAVİSİ VE KUM  
EŞDEĞERİ DENEYLERİNİN  
BİRBİRLERİYLE OLAN  
İLİŞKİSİNİN İRDELENMESİ**

**BÖLÜM  
17**

**Murat SERT<sup>1</sup>,  
Zeyni ARSOY<sup>2</sup>**



## GİRİŞ

Agrega, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, mineral esaslı kum, çakıl, kırma taş gibi inert malzemelere agrega denir (Özışık 1998, Yalçın ve Gürü 2006, Gün 2007). Agregalar betonu oluşturan temel malzemelerden biridir. Beton hacminin %60 – 80'ini agregalar oluşturmaktadır. Agregalar betonun maliyetini azaltmanın yanı sıra betonun teknik özelliklerine de önemli katkı sağlamaktadır. Agregalar günümüzde inşaat sektöründen kara yollarına, baraj yapımından demiryollarına ve dolgu malzemelerine kadar birçok alanda neredeyse alternatifsiz bir hammadde olarak kullanılmaktadır.

Agregalarda ince (kil, şist v.b.) malzeme miktarının artması yani daha küçük çözümlenip ayrışabilen yapıya sahip küçük tanelerin fazlalığı bazı olumsuz durumlara neden olmaktadır. Bunlar;

- Küçük tanelerin daha büyük agrega taneleri ile çimento, bitüm ve asfalt arasındaki bağlanmayı geciktirmesi ve zayıflatması,
- İhtiyaç duyulan yoğurma suyunun miktarını artırması,
- İnce malzemelerin yüzey alanlarının fazlalığından dolayı daha fazla su emmeleri sonucu hacimlerinin de artmasına neden olması, su kaybetmelerinin ise hacimlerinin azalmasına neden olması,
- İnce malzemelerin su emme oranları yüksek olduğundan soğuk iklimlerdeki donma olaylarından azami ölçüde etkilenmesi,
- Beton ve asfalt yapımında mekanik dayanımı ve bağlanmayı zayıflatması, buna bağlı olarak beton ve asfaltın kalitesini ve ömrünü azaltması şeklinde sıralamak mümkündür.

TS 706 EN 12620 standardına göre agregalar 4mm veya altı boyutunda ise ince agrega, 0,063mm veya altında ise de çok ince agregalar sınıfına girmektedir. İnce agregaların sınıflandırmaları elek analizi v.b. yöntemlerle yapılabilmekle birlikte çok ince malzeme miktarının tayin edilmesi için en çok kullanılan yöntemler Metilen Mavisini ve Kum Eşdeğeri deneyleridir.

Agregaların ince malzeme miktarlarının tespiti amacıyla kullanılan en yaygın deneyler Metilen mavisi (MB) ve kum eşdeğer (SE) deneyleridir. Beton girdi malzemeleri içinde betonda oluşturacağı olumsuz etkileri açısından en sık ve en etkili değişken olarak karşımıza çıkan ince agregaların kalitesinin takibi çok önemli olup hazırlanan kalite planları ile çok iyi takip edilmelidir. MB deneyi, beton agregası olarak kullanılacak agregaların 63 µm altında kalan çok ince malzeme miktarı hakkında bize yorum yapma imkânı sağlarken, kum eşdeğeri deneyi ise asfalt agregaları içindeki ince malzeme miktarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. MB deneyi ve SE deneyi ile ince agreganın çok ince malzeme kalitesini kolayca takip etmek mümkündür (Özbebek ve Açıık, 2012). Literatürde MB ve SE deneyleriyle ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

MB deneyi ile ilgili, Köksal v.d. (2012) çalışmalarında MB değeri arttıkça betonun ihtiyaç duyduğu kıvam suyunun arttığını belirtmişlerdir. Şenbil v.d. (2014), Farklı MB değerlerine sahip kırma kumların karakterizasyonu ve beton üzerindeki etkileri konusunda iki tip çalışma yapmışlardır. Her iki çalışmada da metilen mavisi değerlerinin betonun hava miktarlarına etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda kil ve silt gibi ince malzemelerin beton performansına ciddi anlamda etkisi olduğu belirlenmiştir. Hang ve Brindley (1970) kaolinit, illit ve montmorillonit'i farklı ölçümler kullanarak araştırmış ve kil minerallerinin hem yüzey alanlarının hem de değişim kapasitelerinin değerlendirilmesinde MB emiliminin kullanılabileceğini saptamıştır. Chiappone v.d. (2004), topraklarda nispeten yüksek aktiviteli kil minerallerinin varlığını tanımlamak için kullanılan MB testlerinin sonuçlarını bildirmiş, AFNOR ve ASTM olmak üzere iki MB test yöntemini karşılaştırmışlardır. Jeoteknikte, MB testlerinin sonuçları, toprak ve kil taşıyan kayalıkların aktivitesini ve şişme potansiyelini tanımlamak için kullanılmıştır. Çokça (2002), MB değeri, ilk toprak emme ve geniş toprak örneklerinin şişme yüzdesi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Petkovsek (2002, 2006) Slovenya'daki bazı tipik toprakların MB değeri, Enslin – Neff su adsorpsiyonu, katyon değişim kapasitesi (CEC) ve şişme potansiyeli arasındaki ilişkileri incelemiş ve tahmin etmek için MB değerini ve su emme özelliğini kullanarak ampirik bir diyagram önermiştir. Meisina (2007), MB testinin, killi toprak kaya üzerinde yıpranmış killi topraklar için artık dayanım sürtünme açısının bir göstergesi olarak kullanılmasını önermiştir. Yükselen ve Kaya (2008),

MB değerine dayalı yeni bir şişme potansiyeli sınıflandırma sistemi önermiştir. Dökümhanelerde, MB testi, döküm kumunun kalitesini kontrol etmek için hızlı bir test olarak kullanılmıştır. MB testinin yüzey alanını, kation değişim kapasitesini ve killi toprakların kabarma potansiyelini belirlemek için uygunluğunu araştırmışlardır. Stapel ve Verhoef (1989), MB adsorpsiyon testinin bazaltik tuf kaya agrega kalitesini değerlendirmede kullanıldığını bildirmiş ve kayalarda ve topraklarda şişen kil minerallerinin varlığını belirtmek için hızlı ve güvenilir bir yöntem bulmuşlardır. Kandhal ve diğ. (1998) üç farklı testin kullanımını araştırarak sıcak karışım asfaltının sıyırılmasıyla ilgili en iyi testi belirlemek için MB değeri, SE değeri ve plastisite indeksini karşılaştırmışlardır. Woodward ve diğ. (2002) ezilmiş talaşların sağlamlığını değerlendirmek, agrega üzerindeki toz kaplamaları değerlendirmek ve heterojen agregaları değerlendirmek için MB değerinin kullanımını tarif etmiştir. Ancak, araştırmacılar sonuçları etkileyen farklı prosedürler uygulamışlardır. Klika, Z., vd. (2007), Farklı metilen mavisi agregaları ile doymuş hale getirilen montmorillonitlerin bileşimi, yapısı ve ışıdaması konusunda çalışmışlardır. MB'nin su çözeltisinde kendi kendine birleşmesi, artan boya konsantrasyonu ile artmıştır. MB agregaları, düşük konsantrasyon çözeltilerinden birleştirilen monomerlerden ara katman aralarındaki boşluklara göre daha fazla düzensizlik eğiliminde oldukları belirlenmiştir. Katmanlar arası yapı, mont'deki MB'nin floresansı üzerinde sadece küçük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

SE deneyi Hveem (1954) tarafından, sıcak agrega asfaltının performansına zarar verdiğine inanılan ince agregadaki kil miktarını belirlemek için geliştirilmiştir. Daha sonra, yöntem aynı zamanda bağlanmamış taban agregalarını test etmek için standart bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Nikoladies ve diğ. (2007), Yunanistan'daki ocaklardan 16 örnekte elde edilen SE ve MB değerlerinin sonuçlarını yayınlamıştır. MB ve SE değerleri arasında bir ilişki olmadığını bulmuşlardır. MB ve SE değerlerinin kullanımıyla ilgili sayısız rapor ve çalışmanın sonuçları, farklı prosedürler ve malzemeler nedeniyle karşılaştırılamamıştır. Ürün Standardı SIST EN 13242, SE ve MB'nin hedef değer problemini kabul ederek, Avrupa'nın bazı bölgelerinde farklı agregalar için test metodlarının kullanıldığı başka kanıtlar bulunmadıkça kesin sınırlar evrensel olarak belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Slovenya 2004 yılında SIST EN 13242 Ürün standardını benimsemiştir. Daha önce,

Slovenya'nın sınırsız agregalar (PTP 1989) şartnamesi, donma-çözülme direncini üretim yerinde izin verilen %5'lik bir içeriğe sahip olarak tanımlamıştı. Yol tabakasında sıkışmanın ardından %8. Nesnelere kalitesi, otoyollar ve yoğun yüklü yollar için SE değeri %60, düşük ve orta yüklü yollar için %50 olarak belirlenmiştir. Açık ve Fırat (2005), çalışmalarında Konya'da yaygın olarak kullanılan Sarıcalar, Eğri bayat ve Göçü kumlarının ince madde miktarlarını SE ile tespit etmişlerdir. Sarıcalar kumunun optimum SE değeri 79, Eğribayat kumunun optimum SE değeri 84, Göçü kumunun optimum SE değeri 88 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada kumlarda optimum SE değerlerinin (80–90) aralığında olduğu ortaya konmuştur. Eryurtlu v.d., çalışmalarında ince agregalar için kullanılan kum eşdeğerliği deneyinin yapılışı ile bu deney sonuçlarının agreganın diğer fiziksel özellikleri ile ilişkisi ve betonun performansına etkisini araştırmışlardır. 0,063 mm'lik elekten geçen çok ince malzeme muhtevası, kırma kumun beton performansına etkisini tek başına yansıtmakta, belirlemede yetersiz kaldığını, betonun davranışını öngörebilmek için çok ince malzemenin kalitesi hakkında fikir veren kum eşdeğeri ve/veya metilen mavisi deneylerine gereksinim olduğu sonucuna varmışlardır.

Özbebek ve Açık (2012), çalışmalarında kaliteli beton elde etmenin en önemli şartlarından biri, üretimde kullanılan girdi malzemelerin standartlara uygunluğudur. MB değeri azaldıkça kirliliğin azaldığını, SE arttıkça kirliliğin azaldığını, SE değeri azaldıkça kirliliğin arttığını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde faaliyeti devam eden işletmelerden temin edilen 10 farklı numunenin karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen karakteristik özellikler ışığında MB ve SE değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

## **MALZEME VE YÖNTEM**

### **Malzeme**

Çalışmada kullanılan agrega örnekleri Afyonkarahisar çoğunlukta olmak üzere İstanbul, Mersin ve Muğla'daki taş ocaklarından temin edilmiştir (Şekil 1).





Şekil 1. Numunelerin alındığı sahalardan bir görünüm

Örneklerin kodları ve temin edildiği bölgeler Tablo 1.'de belirtilmiştir. Numuneler faaliyeti devam eden tesislerden, deneylerin yapılacağı standarda uygun boyutlarda ve her numune çeşidinden 2000 g olacak şekilde temin edilmiştir.

Tablo 1. Deney örneklerinin temin edildiği bölgeler

Numune Kodu	Bölge	Kaynağı
A	Afyonkarahisar / Çay	Akarsu Yatağı
B	Mersin	Taş Ocağı (Kırmataş)
C	Afyonkarahisar / Gebeceler	Taş Ocağı (Kırmataş)
D	Afyonkarahisar / Anıtkaya	Taş Ocağı (Kırmataş)
E	İstanbul	Kum Ocağı
F	Afyonkarahisar / Beyyazı – 1	Taş Ocağı (Kırmataş)
G	Afyonkarahisar / Beyyazı – 2	Taş Ocağı (Kırmataş)
H	Afyonkarahisar / Emirdağ	Taş Ocağı (Kırmataş)
I	Muğla	Taş Ocağı (Kırmataş)
J	Afyonkarahisar / Çobanlar	Taş Ocağı (Kırmataş)

## METOT

Deneylerde kullanılan örneklerin temel oluşum şekillerini belirleyebilmek için kimyasal analiz (XRF) ve petrografik incelemeleri yapılmıştır. XRF analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarında Rigaku marka ZSX Primus 2 model kimyasal analiz cihazında yapılmıştır.

Standarda uygun olarak agrega üretim tesislerinden alınan numuneler çeneli kırıcı ile boyut küçültme ve numune azaltma işlemine tabi tutulduktan sonra yapılacak deneyler için standartlarda belirtilen eleklerden geçirilerek deneyler için hazır hale getirilmiştir. Tablo 2’de agregalara uygulanan test/analiz listesi ve standartları verilmiştir.

*Tablo 2. Deney örnekleri üzerinde uygulanan testler*

Test/Analiz	Uygulanan Standart
Numune alma	TS 707
Numune azaltma	TS EN 932 – 2
XRF Yöntemiyle Elementel Bileşimin Tayini	TS EN 15309
Metilen Mavisi Deneyi	TS EN 933 – 9
Kum Eşdeğer Deneyi	TS EN 933 – 8

### Metilen Mavisi Deneyi

MB deneyi TS EN 933-9 standardına göre yapılmıştır. Metilen Mavisi üzerindeki pozitif yükü iyonlar kil mineralleri üzerindeki negatif yüklü iyonlara tutunarak metilen mavisi kil yüzeyine yapışmaktadır. Her bir farklı kil minerali farklı katyon değiştirme özeliğine sahip olduğundan Metilen Mavisinin kil üzerine yapışma miktarları değişmektedir.

Metilen mavisi deneyleri için teknik kalitede (saflık  $\geq$  %98,5)  $10 \pm 0,1$  g/L metilen mavisi kullanılmıştır. Kül ihtiva etmeyen kalınlığı 0,20 mm, süzme hızı 75 saniye; gözenek büyüklüğü 8  $\mu$ m olan filtre kâğıdı, uzunluğu 30 cm ve çapı 8 mm olan cam çubuk kullanılmıştır.

Metilen mavisi deneyi, 0 – 2 mm boyutundaki agreganın 110°C’lik etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulur. Daha sonra sabit kütleye gelen agrega numunesinden homojen bir şekilde 200 g numune alınır.

Alınan numune behere eklenir ve numune üzerine 500 g saf su eklenir. Daha sonra mekanik karıştırıcı ile en az 5 dakika 600 devir/dakika hızla karıştırılır. Süspansiyon iyice karıştırıldıktan sonra karıştırma hızı 400 devir/dakikaya indirilir. En az 1 dakika 400 devir /dakika karıştırıldıktan sonra süspansiyona 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenir, çözelti eklendikten sonra süspansiyon en az 1 dakika karıştırılır.

Deney cam çubuk ile süspansiyondan (numune + su + metilen mavisi) alınan damlanın filtre kâğıdı üzerine bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Filtre kâğıdı üzerinde oluşan dairesel iz çok açık mavi renkli bir hale ile çevrelenir ve merkezinde ise homojen mavi renkli bir haleye göre daha koyu renkli bir iz oluşur. Bu izin çapı 8mm ile 12 mm arasında değişmektedir. İzin etrafında oluşan 1mm'lik açık mavi halenin oluşması durumunda deney olumlu olarak kabul değerlendirilir.

Nihai sonuca yaklaşıldıkça hale belirginleşmeye başlar. Kil minerallerinin metilen mavisi emilimi biraz zaman alacağından bu hale daha sonra ortadan kaybolur. Bu nedenle deney daha fazla metilen mavisi çözeltisi ilave edilmeksizin 1 dakika aralıklarla 5 dakika süreyle tekrarlanmak suretiyle, nihayete erdirilir. Deney sonucunu hesaplamak için aşağıdaki denklem 1 kullanılır.

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (1)$$

### **Kum Eşdeğeri Deneyi**

Kum eşdeğeri deneyi, 0 – 2 mm boyutundaki ince agregalara uygulanır. Bu deneyin amacı ince agregadaki kil, silt oranı belirlemektir. Bu deneyde 0 – 2 mm aralığındaki kuru deney numunesinin silindir bir tüp içinde tabandan 100 mm yüksekliğe kadar doldurulur doldurma işlemi sırasında taneler arasında hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmelidir, numune doldurulduktan sonra yıkama solüsyonu (CaCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O veya 111 CaCl<sub>2</sub>+ 480 g gliserin + 12,5 g formaldehit + 1000 mL tamamlayacak kadar damıtık su) ile silindir tüpe ilave edilir ancak solüsyon belirli bir seviyesine kadar doldurulur. Yıkama solüsyonu eklendikten sonra silindir tüpün ağzı tıpa vasıtasıyla kapatıldıktan sonra dakikada 180 devir yapan cihaza yerleştirilerek 30 saniye (90 devir) çalkalanmaya bırakılır. Çalkalama işlemi bittikten sonra silindir alınarak düz bir yüzeye yerleştirilir daha sonra tabandan 380 mm yüksekliğine

kadar yıkama solüsyonu ile doldurulur. Solüsyon ilavesi sırasında silindirin kenarlarına yapışan ince tanelerin solüsyon yardımıyla aşağı indirilir. Bu işlem sonrasında silindirler dışardan müdahale ve titreşim olmaksızın 20 dakika süreyle çökmeye bırakılır. Çökme süresi dolduktan sonra standartta belirtildiği gibi, ölçümler alınarak numunenin kum eş değer hesaplanır.

Yükseklik ölçümlerinde kum yüksekliğinin ( $h_1$ ) / kum + askıda kalan ince malzeme yüksekliğine ( $h_2$ ) oranı bize kum eşdeğerliği sonucunu vermektedir. Kum eşdeğerliği deney sonucu sayısal bir değer olarak aşağıdaki denklemle hesaplanır

$$SE = 100 \times \left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (2)$$

Eşitlikte;

SE : Kum eş değeri (%)

$h_2$  : Kumun yüksekliği (mm)

$h_1$  : Kum + askıda kalan ince malzeme yüksekliği (mm)

## **BULGULAR**

### **Kimyasal Analiz**

Çalışmada kullanılan örneklerin kimyasal analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. A ve E kodlu numunelerin ise birincil ana elementi  $\text{SiO}_2$  'dir B, C, D, F, G, H, I, ve J kodlu örnekler örneklerin ise birincil ana elementinin  $\text{CaO}$  olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Örneklerin XRF yöntemiyle kimyasal analiz sonuçları

İçerik (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
CaO	2,57	55,29	32,82	30,62	0,68	33,23	50,25	55,73	55,40	55,74
SiO <sub>2</sub>	58,22	0,27	2,59	7,57	80,00	2,57	3,68	0,69	0,37	1,56
MgO	2,47	0,23	14,99	12,73	0,16	14,44	0,72	0,15	0,23	0,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,74	0,15	1,37	3,13	10,44	1,11	2,20	0,36	0,05	1,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,02	0,02	0,09	0,02	0,05	0,03	0,03	0,00	0,01
K <sub>2</sub> O	3,54	0,01	0,18	0,47	5,16	0,13	0,50	0,04	0,01	0,20
Na <sub>2</sub> O	1,16	0,01	0,06	0,06	1,92	0,05	0,04	0,02	-	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,24	0,07	1,82	2,66	0,69	1,85	0,84	0,12	0,07	0,41
TiO <sub>2</sub>	0,68	-	0,06	0,12	0,07	0,04	0,10	0,02	-	0,06
Diğer	0,41	0,05	0,29	0,37	0,24	0,31	0,41	0,06	0,03	0,50
*A.Z.	4,84	43,90	45,81	42,18	0,61	46,23	41,23	42,79	43,85	40,19

\*Ateş ziyatı

### Kum Eşdeğeri Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında teste tabi tutulan numunelerin kum eşdeğeri değerinin 129,0 ile 221,9 değerleri arasında olduğu saptanmıştır (Tablo 4). Her bir örnek için test iki defa tekrarlanarak ortalaması alınmıştır. Deneyin yapıldığı deney düzeneği Şekil 2. 'de verilmiştir.



Şekil 2. Kum eşdeğeri deney adımları

Tablo 4. Örneklerin kum eşdeğeri deney sonuçları.

Numune kodu		$h_2$	$h_1$	SE	Ortalama SE
<b>A</b>	1. Numune	10,9	8,1	134,6	129,0
	2. Numune	11,1	9,0	123,3	
<b>B</b>	1. Numune	11,3	7,9	143,0	141,5
	2. Numune	11,2	8,0	140,0	
<b>C</b>	1. Numune	11,6	6,1	190,2	189,5
	2. Numune	11,9	6,3	188,9	
<b>D</b>	1. Numune	13,9	6,6	210,6	206,0
	2. Numune	14,3	7,1	201,4	
<b>E</b>	1. Numune	10,2	9,2	110,9	111,3
	2. Numune	10,4	9,3	111,8	
<b>F</b>	1. Numune	12,2	7,6	160,5	165,4
	2. Numune	12,6	7,4	170,3	
<b>G</b>	1. Numune	15,9	8,9	178,7	178,8
	2. Numune	16,1	9,0	178,9	
<b>H</b>	1. Numune	17,5	8,0	218,9	221,9
	2. Numune	17,1	7,6	225,0	
<b>I</b>	1. Numune	13,1	8,1	161,7	150,4
	2. Numune	12,8	9,2	139,1	
<b>J</b>	1. Numune	11,2	7,5	149,3	146,3
	2. Numune	11,6	8,1	143,2	

Çalışma sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde SE değerlerinin yüksek olması nedeniyle ince malzeme miktarının fazla olduğu belirlenmiştir. En yüksek ince malzeme miktarı H numunesinde (SE=221,9) en düşük ince malzeme miktarının ise E numunesinde (SE=111,3) olduğu belirlenmiştir.

### Metilen Mavisi Deneyi Sonuçları

MB deneyi daha çok beton agregası olarak kullanılması planlanan agregaların 63  $\mu$ m altında kalan çok ince malzeme miktarı hakkında tahmin yürütmemize olanak sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan ince agregaların MB değerlerinin 0,63 ile 1,76 arasında olduğu saptanmıştır (Şekil 3). Agregadaki MB değerinin artması agrega içerisindeki ince malzeme miktarının artmasını ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan örneklerin metilen mavisi deneyi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 3. Metilen mavisi deney sonuçları

Tablo 5 incelendiğinde en yüksek ince malzeme miktarı J numunesinde (MB=1,76), en düşük ince malzeme miktarı ise E numunesinde (MB=0,25) olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Örneklerin metilen mavisi deney sonuçları

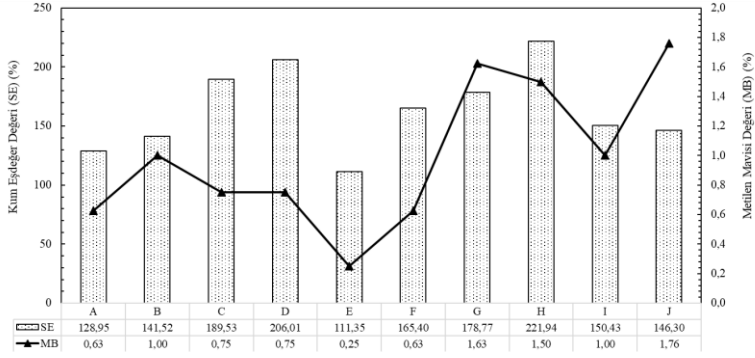
Numune kodu	MB	Ortalama MB
<b>A</b>	0,50	0,63
	0,75	
<b>B</b>	1,00	1,00
	1,00	
<b>C</b>	0,75	0,75
	0,75	
<b>D</b>	0,75	0,75
	0,75	

<b>E</b>	0,25	0,25
	0,25	
<b>F</b>	0,50	0,63
	0,75	
<b>G</b>	1,75	1,63
	1,50	
<b>H</b>	1,50	1,50
	1,50	
<b>I</b>	1,00	1,00
	1,00	
<b>J</b>	1,71	1,76
	1,80	

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

SE değerinin en yüksek olduğu (SE=221,94) H numunesinde, MB değeri 1,50 bulunmuştur. A ve F numunelerinde MB değeri (0,63) olmasına rağmen SE değerleri arasında %28,26'lık fark bulunmaktadır. Çalışma kapsamında saptanan MB ve SE değerlerinin istatistiksel açıdan birbirleri ile uygunlukları değerlendirildiğinde iki farklı ince malzeme deneyi arasındaki korelasyon katsayısının 0,39 olduğu belirlenmiştir. Bu da MB ve SE arasında çok da anlamlı bir ilişkinin bulunamadığı sonucunu ortaya koymaktadır (Şekil 4). Değerler incelendiğinde, beton agregalarındaki ince malzeme miktarını belirlemede MB deneyinin uygulanmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Kullanım alanına göre yöntem tercihinin daha doğru olacağı sonucuna varılmıştır.





Şekil 4. Metilen mavisi ve kum eşdeğeri deneyleri arasındaki ilişki.



## KAYNAKLAR

1. Açıkel H., ve Fırat F K., (2005), Kum Eşdeğerliğinin Beton Basınç Dayanımına Etkisi, S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg., c.20, s.2, 35 – 45.
2. Chiappone A, Marello S, Scavia C, Setti M (2004) Clay mineral characterization through the methylene blue test: comparison with other experimental techniques and application of the method. *Can Geotech J* 41:1168–1178
3. Çokça E (2002) Relationship between methylene blue value, initial soil suction and swell percent of expansive soils. *Turk J Eng Environ Sci* 26:521–529
4. Eryurtlu D. vd., Kum Eşdeğerliği Deneyinin Beton Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi
5. Hang PT, Brindley GW (1970) Methylene blue adsorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation Exchange capacities (clay-organic studies XVIII). *Clay and clay minerals* 18:203–212.
6. Hveem FN (1954) Sand equivalent test for control of materials during construction. *Proceedings*, vol 32. Highway Research Board.
7. Gün, M., (2007). Adapazarı Bölgesindeki Agregaların Alkali Agregat Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
8. Kandhal PS, Lynn CL, Parker F (1998) Tests for plastic fines in aggregates related to stripping in asphalt paving mixtures. In: *NCAT Report 98-3*, NCAT Auburn University.
9. Klika, Z., et al. (2007). "Composition, structure, and luminescence of montmorillonites saturated with different aggregates of methylene blue." *J Colloid Interface Sci* 311(1): 14-23.
10. Köksal A., Abit Ö., Karataş E., (2012), Metilen Mavisı Değeri Yüksek Agregalar ve Farklı Özellikteki Kimyasal Katkılarla Yapılan Beton Çalışmaları, 1 – 12
11. Meisina, C., (2007), Relationship between the residual shear strength and the methylene blue value in weathered clay soils. *EGU 2007, Geophysical Research Abstract*, vol 9, 06731
12. Nikoladies A, Manthos E, Sarafidou M (2007) Sand equivalent and methylene blue value of aggregates for highway engineering. *Foundations of civil and environmental engineering No.10*. Publishing House of Poznan University of Technology, Poznan, pp 111–121.

13. Özbebek H., ve Açık H., (2012), İnce Agregalarda Yapılan Metilen Mavisi ve Kum Eşdeğerliği Deney Sonuçlarının Beton Özelliklerine ve Maliyetine Etkisi, Hazır Beton, 84 – 92.
14. Özışık, G., (1998). Beton, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
15. Petkovšek, A., et al. (2010). "Fines characterization through the methylene blue and sand equivalent test: comparison with other experimental techniques and application of criteria to the aggregate quality assessment." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 69(4): 561-574.
16. Petkovšek, A., (2006) The influence of matrix suction on strength and stiffness of soils. PhD thesis. University of Ljubljana, UL-FGG, 168, 273 pp
17. SIST EN 13242, (2003), Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction
18. Stapel EE, Verhoef PNW (1989) The use of methylene blue adsorption test in assessing the quality of basaltic tuff rock aggregate. *Eng Geol* 26(3):233–246
19. Şenbil, U. E., Bağdatlı, Ö., Köseoğlu, K., Andiç Çakır, Ö. 2014. "Farklı Metilen Mavisi Değerlerine Sahip Kırma Kumların Karakterizasyonu ve Beton Üzerindeki Etkileri," *Mühendis ve Makina*, cilt 55, sayı 649, s. 74-80.
20. TS EN 15309, (2008), Atıkların ve toprağın nitelendirilmesi - X ışını floresans yöntemi kullanılarak elementel bileşimin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. TS EN 933 – 8:2018+A1, (2015), Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 8: İnce tanelerin tayini- Kum eşdeğeri tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
22. TS EN 933 – 9, (2014), Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce tanelerin tayini - Metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
23. TS 707, "Beton agregalarında numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
24. TS 706 EN 12620, (2009), "Beton agregaları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.

25. TS EN 932 – 2, “Agregaların genel özellikleri için deneyler Bölüm 2: laboratuvar numunelerin azaltılması metodu”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999.
26. TS EN 15309 “X Işını Floresans Yöntemiyle Elementel Bileşimin Tayini” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
27. TS EN 933 – 9, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – Bölüm 9: İnce malzeme tayini – Metilen mavisi deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.
28. TS EN 933 – 8, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – Bölüm 8: İnce tanelerin tayini – Kum eşdeğeri tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
29. Woodward D, Woodside A, Jellie J (2002) Clay in rocks. ISSN 1353-114X LPS 124/2002, 12.
30. Yalçın H., ve Gürü M., (2006). Çimento ve Beton Ders Kitabı, Palme Yayıncılık, Ankara.
31. Yükselen Y, Kaya A (2008) Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. Eng Geol 102:38–45.



**BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİNDE  
İNSAN HAREKETLERİ  
YAKALAMA SİSTEMLERİ**

**BÖLÜM  
18**

**Samet Cıklaçandır<sup>1</sup>,  
Şenay Mihçin<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

<sup>2</sup> İzmir Katip Çelebi Üniversitesi





## 1. Giriş

İnsan hareketlerini analiz etmek, hareket sırasında eklemelere düşen yükleri anlamak ve bunlara bağlı meydana gelebilecek yaralanmaların mekaniğini araştırmak açısından oldukça önemlidir. Bu yüzden hareket bilgisi toplayacak sistemlere ihtiyaç vardır. Bu tür sistemler hareket yakalama sistemleri (Motion Capture - MOCAP) olarak adlandırılır ve çalışma prensibine göre çeşitlilik gösterir. Prensip olarak hareket süresince insan vücudu üzerine yerleştirilen işaretleyiciler ve bu işaretleyiciden gelen ışınları kaydeden kameralar aracılığıyla ya da vücut üzerine yerleştirilen sensörlerden hareket verisini bilgisayara aktarmak suretiyle hareket verileri toplanmaktadır (Moeslund & Granum, 2001).

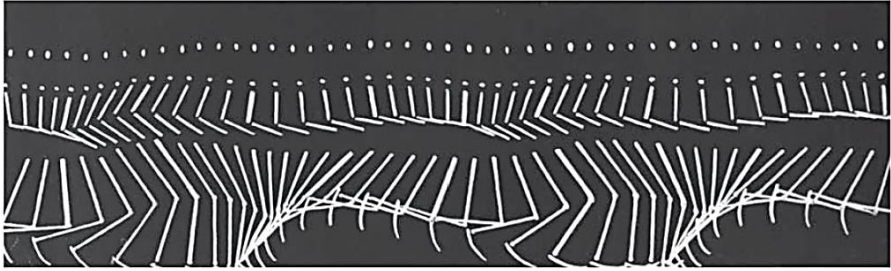
Teknolojideki ilerlemeler sonucu hareket yakalama sistemleri hem çeşitlenmiş hem de oldukça gelişmiştir. Özellikle pahalı ve kalibrasyonu zor olan kamera sistemleri yerine, sensör tasarımlarının gelişmesine bağlı olarak sensör boyutları küçüldü ve sensörlerin güç tüketimi azaldı. Bunun yanında mikroeletromekanik sistemlerin gelişmesiyle hareket yakalama sistemleri, laboratuvar ortamlarının da dışına çıkarak pek çok alanda daha yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir.

Hareket yakalama teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte görsel sanatlar; sanal gerçekliğe bağlı oyun endüstrisi, film endüstrisi gibi insanın hareketlerinin simülasyonunun önemli olduğu alanlarda ve bunun yanında askeriye, tıp gibi alanlarda da yaygınlaşmıştır (Kitagawa & Windsor, 2008). Medikal uygulamalara geçmeden önce ilk olarak Eadward Muybridge (1830-1904) İngiltere doğumlu fotoğrafçı atların at yarışındaki koşuları sırasında 4 ayaklarında aynı anda yere temas etmediği bir anın olup olmadığı konusunda çalışmalara başladı. Altı yıl süren çalışmaların ardından Muybridge, atın ayak hareketleri ile tetiklenen bir düzine kamera setinden elde ettiği verilerle tezini kanıtladı. Onun keşfettiği bu yöntemle, görüntüler birbiri ardına hızlıca hareket ettirilerek atın hareketlerinin izlenmesini sağlayan zoopraxiscope isimli cihazı 1879 yılında icat etti. Bu cihaz ilk kez hareket resimleri yakalayan bir icat olarak değerlendirilebilir. Şekil 1’de bu cihazın elde etmiş olduğu görüntü verilmektedir. Etienne-Jules Marey aynı yıllarda geliştirmiş olduğu MOCAP suit (elbise) ile hareket verilerini topladı. Bu sistem birbiri ardınca tek kameradan elde edilmiş görüntüleri barındırmaktaydı. Siyah kumaş üzerine eklem yerlerine denk gelecek şekilde yansıtıcı işaretleyiciler yerleştirilmiş giysi insan hareketlerini yakalamak için

kullanılan teknolojilerin başlangıcını oluşturmaktaydı. Şekil 2’de elde edilmiş hareket verileri gösterilmiştir. İlk ortaya çıkan bu teknolojiler kamera üzerinden alınan her karenin işlenmesiyle hareket verilerine ulaşılyordu. Dijital dünyanın gelişmesi sonucu MOCAP sistemleri çeşitlenmeye başladı.



Şekil 1 Eadward Muybridge sırt arkasından atlama hareketi (birdirbir oyunu) (“Zoopraxiscop: Room 6 | Tate,” n.d.).



Şekil 2 İnsan ekstremite hareket verilerinin gösterilmesi

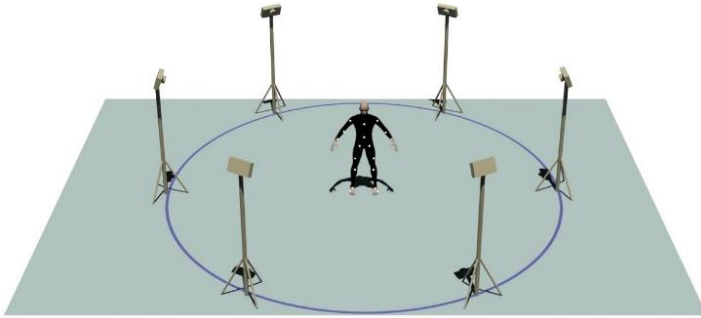
## 2. Hareket Yakalama Teknolojileri

Elektronik alanında son yıllarda önemli atılımlar yapılmaktadır. Her alana etki edecek gelişmeler biyomedikal sistemlerini daha güvenli daha hassas hale getirmektedir. Hareket verileri işlenerek hastalık tanısı yapılabilmekte ve tedaviye yönelik adımlar atılmaktadır. Hareket yakalama teknolojilerini 6 ana başlıkta sınıflandırabiliriz. Bunlar optoelektronik, elektromanyetik, elektromekanik, görüntü işleme tabanlı sistemler, akustik (ses) sistemler ve dış iskelet ya da robotik aletler

kullanılarak hareket yakalama sistemleri olarak yer almaktadır (Reda, Benaoumeur, Kamel, & Zoubir, 2018; Skogstad, Nymoen, & Hovin, 2011). Bu teknolojiler kullanım koşullarının değişkenliğine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu yüzden ölçülecek hareketin doğal akışını bozmadan, ölçüm yapılacak hareketin çeşidine ve hassaslığına uygun olarak hareket yakalama sistemi seçilmelidir. Hareket toplama yöntemleri genel olarak uzuvlar üzerine işaretleyiciler yerleştirilmesine dayanır. Fakat işaretleyici gerektirmeyen sistemlerde mevcuttur. Bu yüzden bu teknolojiler işaretleyici gerektiren ve işaretleyici gerektirmeyen olarak ikiye ayrılabilir. Bu kısımda teknolojilerin birbirinden farkları verilmiştir.

## 2.1. Optoelektronik Hareket Yakalama Sistemleri

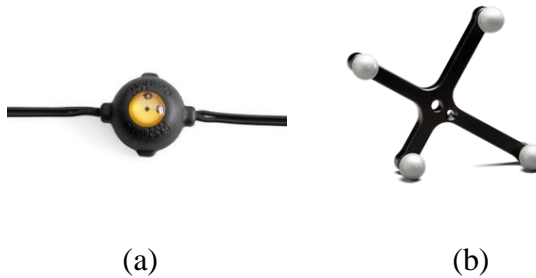
Birçok optik hareket yakalama sistemleri başlıca biyomedikal alanında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu sistem bilgisayara bağlanan çok sayıda kameranın birbiriyle eşgüdümlü olarak çalışmasına dayanır. Kameraların elde ettikleri 2 boyutlu görüntüler birleştirilerek 3 boyutlu pozisyon bilgisi hesaplanır (Skogstad et al., 2011). Kamera sayısı uygulamaya göre değişmekle beraber 2 ile 32 arasında olabilir. 3 boyutlu görüntü oluşturmak için en az 2 kamera olmalıdır fakat elde edilen verilerin daha doğru sonuç vermesi için 3 veya daha fazla kamera kullanılmalıdır. Sistemin kurulumu ve kameraların yerleşimi uygulamaya bağlı değişiklik göstermekle birlikte şekil 3’de gösterilmiştir. Optik sistemler işaretleyicili (marker) ve işaretleyicisiz (markerless) olarak iki türde uygulama karşımıza çıkmaktadır (Regazzoni, De Vecchi, & Rizzi, 2014). İşaretleyicisiz sistemler, optiğe dayalı fakat görüntü işleme barındırdığı için son kısımda son kısımda işlendi.



Şekil 3 Optik hareket yakalama sisteminde kamera ve işaretleyici dizilimi

İşaretleyicili sistemlerde, işaretleyiciler kişi üzerinde anatomik belirginliği olan bölgelere yerleştirilip, hareketin yakalanacağı uzuvları temsil ederler. Kameralar işaretleyicilerden yansıyan-gelen ışığa

duyarlıdır. Kullanılan işaretleyiciler aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Park, Park, Kim, & Adeli, 2015). Pasif işaretleyiciler ışığı yansıtırlken, aktif işaretleyiciler üzerlerinde ışık kaynağı taşıyarak ışık üretirler (Zhou & Hu, 2008). Pasif işaretleyicili sistemlerinde kameralar etrafında genellikle halka şeklinden dizilmiş LED'ler (kızılötesi ışık-infrared light) yer almaktadır. LED ışığı işaretleyiciler tarafından yansıtılmakta ve kameralar tarafından algılanmaktadır. Aktif işaretleyicili sistemlerde ise işaretleyici üzerinde LED'ler yer almaktadır. Aktif işaretleyicili sistemler pasif işaretleyicili sistemlere göre daha güçlü ölçümler yapmaktadır. Ancak aktif işaretleyicili sistemler güç kaynağına ihtiyaç duydukları için çeşitli kablolarla ve bataryalarla insan üzerinde ağırlığa sebep olmakta ve hareketlerin doğal akışını kısıtlamaktadır (Field, Stirling, Naghdy, & Pan, 2009). Şekil 4 (a)'da kablo sistemiyle beraber aktif işaretleyici, şekil 4 (b)'de ise herhangi bir kabloya sahip olmayan yapışkanlı ya da cırt cırtlı bant ile kolayca yerleştirilebilen pasif işaretleyici gösterilmektedir.



Şekil 4 (a) Aktif işaretleyici, (b) Pasif işaretleyici

İşaretleyicili sistemlerde, kameralar belirli yerlere sabitlenir dolayısıyla belirli bir alanda veri üretilebilir. Sistem genel olarak kamera ile işaretleyici arasında gidip gelen ışığın süresinin ölçülmesi ve bunun sonucunda oluşan üçgenel alanın hesap edilmesiyle işaretleyicilerin yaklaşık yeri dedekte edilmektedir. Sistemin doğruluğunu etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Kameraların yerleri, birbirine uzaklıkları kamera sayısı, kamera çözünürlüğü ve örnekleme frekansı, işaretleyici sayısı, hareket alanı içerisindeki işaretleyicilerin yerleri sistemin sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Optoelektronik sistemler diğer sistemlere kıyasla daha kesin sonuçlar verdikleri için literatürde altın standart olarak geçmektedir (van der Kruk & Reijne, 2018). Sistemde kamera sayısı arttıkça maliyet artar, kalibrasyon aşaması ve kameralar

arası senkronizasyon zorlaşır. Sistemde en ufak bir değişiklik (örneğin kameranın bakış açısının değiştirilmesi) sonuçları etkiler. Optik sistemlerin önemli dezavantajları arasında gün ışığının sistemin veri akışını etkilemesi söylenebilir. Gün ışığı kameralar tarafından işaretleyicileri algılayamama gibi sonuçları beraberinde getirmektedir (Muhtadin, Sumpeno, & Dyaksa, 2017). Bunun için sistem genellikle kapalı ortamlarda kullanılır. Özellikle spor biyomekaniğinde geniş alanlara ihtiyaç olduğundan bu dezavantaj sistemin kararlılığını etkilemektedir. Tablo 1’de güncel olarak piyasada bulunan optik temelli hareket yakalama teknolojilerinin kamera özellikleri verilmiştir.

*Tablo 1 Firmaların üretmiş oldukları optik hareket yakalama sistem özellikleri*

Optik Hareket Takip Sistemleri	Modeller	Çözünürlük - Hassaslık	Örnekleme Frekansı - Kare Hızı	Gecikme
<b>Vicon</b> ( <i>Vicon Motion Systems, Oxford, İngiltere</i> )	Vantage	5-16 MP	120-2000 Hz	4.7ms – 8.3ms
	Vero Family	1280×1024 – 2048×1088	120-330 Hz	3.4ms – 3.6ms
<b>Northern Digital</b> ( <i>Northern Digital Incorporated, Waterloo, Ontario, Kanada</i> )	Polaris Spectra	0.25mm – 0.30mm	60 Hz	-
	Polaris Vicra	0.25mm – 0.35mm	20 Hz	-
	Polaris Vega	0.12mm – 0.30mm	60 - 250 Hz	-
	Optotrak Certus	0.01mm – 0.1mm	4600 Hz	-
<b>Optitrack</b> ( <i>NaturalPoint, Corvallis, Oregon, ABD</i> )	Prime Serisi	1280×1024 – 2048×2048	180-360 FPS	2.8ms – 5.5ms
	Flex Serisi	640×480 – 1280×1024	100-120 FPS	8.3ms – 10ms
	Slim Serisi	640×480 – 1280×1024	120-240 FPS	4.2ms – 8.3ms
	V120 Serisi	640×480	120 FPS	8.3ms
<b>PhaseSpace</b> ( <i>PhaseSpace Inc., San Leandro, CA, ABD</i> )	Impulse X2E	3600×3600	960Hz	3ms
<b>Phoenix Technologies</b> ( <i>PTI, BC, Kanada</i> )	Visualeyez III	0.1mm – 0.5mm	10000 Hz	0.3ms
<b>Qualisys</b> ( <i>Göteborg, İsveç</i> )	5+, 6+, 7+ Serisi	640×512	300-10000FPS	4ms
	Miqus Serisi	912×544 - 1024×1024	180-650 FPS	5ms – 7ms

Tablo 1’de elde edilen bilgiler firmaların internet sitelerinde sağlanan verilerden elde edilmiştir (“Measurement Sciences Products,” 2019; “Optical Motion Capture Cameras | VICON,” 2019; “OptiTrack - Hardware,” 2019; “PhaseSpace,” 2019; “PTI Phoenix Technologies,” 2019; “Qualisys,” 2019).

## 2.2. Elektromanyetik Hareket Yakalama Sistemleri

Bu sistemler manyetik alandan faydalanarak alıcı-verici arasındaki elektromanyetik dalgaların zamana göre transferini hesaplayarak konum belirlerler. Dalgaların transponder ile ana istasyon arasındaki transfer süresi ölçülerek hareketin izlenmesi sağlanır. Sistemde elektromanyetik sensörler kullanılır. Ana istasyon bir diğer ismiyle elektronik kontrol ünitesi alınan verileri filtreler ve yükseltir. Daha sonra sensörlerin uzaysal pozisyonu ve oryantasyonu çıkarılmak üzere bilgisayarda gönderilir. Ters kinematik analiz ile gelen veriden açı ve vücut eklem yerleri bulunur. Sensör sayısı uygulamaya göre değişmekle birlikte 18 elektromanyetik sensöre kadar sistem kurulabilir (Estévez-García et al., 2015). Şekil 5’de sistem parçaları gösterilmiştir. Sistem çok sayıda kablo, anten ve sensör birimlerinden oluşur. Özellikle kablolar ölçüm sırasında hareket yeteneğini oldukça fazla kısıtlar (Nogueira, 2011). Ancak üreticiler bu sorunları aşmak için birçok yolu denemektedir. Çözüm olarak kablosuz veri aktarım metotlarıyla sistemi revize etmektedirler.



Şekil 5 Manyetik alana dayalı hareket yakalama sisteminde mikrosensörler ve elektronik kontrol birimi ("Polhemus," 2019)

Optik hareket yakalama sistemlerine kıyasla hassaslığı düşüktür. Fakat büyük alanlarda yapılacak hareket izlemesi için idealdir. Optik sistemlerde kameranın ölçüm yapabilmesi için belirli bir görüş alanı olması gereklidir fakat elektromanyetik sistemlerde görüş alanı yoktur.

Etraftaki manyetik alanlardan örneğin cep telefonları gibi sinyale girişim yapabilecek cihazlardan etkilenirler. Bunun yanında manyetik malzemeler varsa onlarda bozucu girişim yapıp sistemin hatalı sonuçlar vermesine sebep olabilir (Field et al., 2009). Diğer sistemlerde de görüleceği üzere ana verici ile alıcı arasındaki mesafe arttıkça gürültü girişimi artar ve hata payı yükselir. Elektromanyetik hareket yakalama sistemlerinin örnekleme frekansı düşüktür. Diğer bir dezavantajı ise ölçüm yapılacak alan diğer sistemlere kıyasla daha küçüktür (Reda et al., 2018). Tüm bu dezavantajlar sistemi daha az kullanılabilir hale dönüştürmüştür. Tablo 2’de piyasada ticari olarak bulunan elektromanyetik hareket yakalama teknolojileri verilmiştir. Bu ticari firmaların kendi ürün yelpazelerinde çok sayıda modelleri mevcut olduğu için ürünler genelleme yapılmış ve tabloda bulunan özellikler bu şekilde oluşturulmuştur.

*Tablo 2 Elektromanyetik hareket yakalama teknolojileri (“Magnetic Motion Capture Systems - Tracklab,” 2019; “Polhemus,” 2019)*

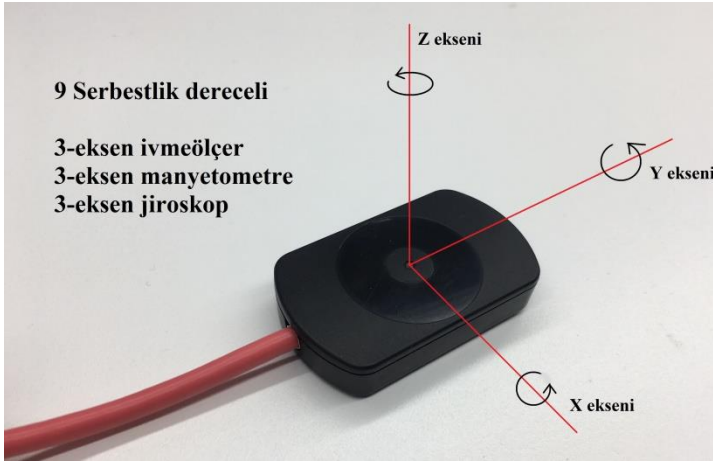
Üretici Firmalar	Modeller	Sensör Sayısı	Serbestlik Derecesi (DOF)	Örnekleme Frekansı
<b>Polhemus</b> (Vermont, ABD)	Liberty, Patriot, Fastrak, G4	1-16	6	60Hz - 240Hz
<b>TrackLab</b> (Footscray, VIC Avustralya)	Ascension TrakSTAR, TrakSTAR2, DriveBAY	1-16	6	240Hz - 420Hz

### 2.3. Ataletsel Ölçüm Birimi Hareket Yakalama Sistemleri (Elektromekanik)

Yaygın adıyla Inertial Measurement Unit (IMU) olarak bilinir. İçerisinde ivme ve açısal hız ölçen bileşenlere ek olarak manyetometreden de faydalanarak ölçüm yapan elektronik sensördür (Miller, Jenkins, Kallmann, & Mataric, 2005). Bu üç farklı bilgi birleştirilerek 3 boyutlu konum bilgisi oluşturulur. Dünyanın manyetik alanı sistemde yardımcı birim olarak kullanılır. Sensör bu manyetik alana duyarlıdır. Sistemin bileşenleri oldukça küçüktür ve vücudun istenilen kısmına yerleştirilebilirler. Ancak burada tam bir konum ölçümünden bahsedilemez. Vücut üzerine yerleştirilen sensörlerin bilgisayar ortamında katı modeli oluşturulur. Sensörlerin birbirinden uzaklığı gibi bilgiler sisteme tanıtılır. Oluşturulan katı model sensörlerden gelen 3 eksene bağlı hareket verisi ile yaklaşık modelin hareketleri izlenir.

Sistemde bozucu etki olarak yakında yer alan metaller gürültü oluşturabilir. Bunun yanında ivmeölçer tek başına doğru çalışmaz ve titreşimlerden çok etkilenir. Bunun önüne geçmek için Kalman filtresi ile gelen veri ayıklanır (Cloete, 2008; Ligorio & Sabatini, 2015). Piyasada bulunan sensörler 3, 6, 9 ve 10 serbestlik derecesine sahip olabilir. Sistem Kartezyen koordinat sisteminde 3 boyutlu (3B) veri üretir ve serbestlik derecesi arttıkça sistem daha hassas sonuçlar verir.

Şekil 6'da Rokoko (Rokoko Electronics, Kopenhag, Danimarka) firmasına ait IMU sensörü gösterilmiştir. Sensörler genellikle giyilebilen bir elbise üzerine yerleştirilmiş bir şekilde kullanılır (Pons-Moll et al., 2010). Elbise üzerindeki sensörler insan vücudundaki her bir eklem yerine yerleştirilir. Bu şekilde eklemler hareket ettikçe bilgisayar üzerinde oluşturulmuş olan katı modele bağlı sensörlerden gelen verilere göre hareket bilgisi yakalanır. Bu alanda en çok bilinen sistemler Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 6 Ataletsel sensör XYZ koordinat düzleminde 9 serbestlik dereceli hareket kabiliyeti



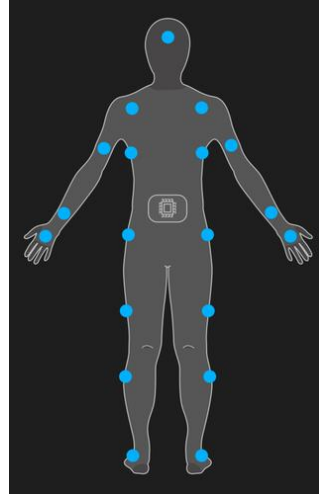
Tablo 3 Giyilebilen hareket yakalama teknolojileri

Giyilebilen Hareket Yakalama Teknolojileri	Sensör Sayısı	Bağlantı	Örnekleme Frekansı - Kare Hızı	Gecikme
<b>Xsens</b> ( <i>Enschede, Hollanda</i> )	17	WIFI	1000Hz	20ms – 30ms
<b>Rokoko</b> ( <i>Kopenhag, Danimarka</i> )	19	WIFI-USB	100FPS	-
<b>Nansense</b> ( <i>Los Angeles, ABD</i> )	7 - 54	WIFI-USB-Bluetooth	1000Hz	6ms – 20ms
<b>Shadow</b> ( <i>Motion Workshop, Seattle, WA, ABD</i> )	17	WIFI-USB	1000 Hz	5ms – 20ms
<b>Neuronmocap</b> ( <i>Perception Neuron, Miami, Florida, ABD</i> )	17 - 32	WIFI-USB	60FPS – 120FPS	20ms
<b>Captiks</b> ( <i>Roma, İtalya</i> )	5-16	WIFI	1000Hz	-
<b>Yostlabs</b> ( <i>YEI Technology, Portsmouth, Ohio, ABD</i> )	17	WIFI-USB-Bluetooth	1350Hz	-

Tablo 3’de verilen teknolojiler üreticilerin internet sitesinden alınan veriler doğrultusunda oluşturulmuştur (“Movit System G1,” 2019; “Nansense,” 2019; “Perception Neuron,” 2019; “Shadow Motion Capture System,” 2019; “Smartsuit Pro Rokoko,” 2019; “Xsens 3D motion tracking,” 2019; “Yost Labs,” 2019). Sensörler kablosuz ya da kablolu olabilir. Kablosuz sensörler şarj edilebilirken kablolu sensörler veri iletimini sağlayan bir merkeze bağlıdır ve bu merkez harici bir batarya ile sistemi besler. Sensörlerin bağlı olduğu ana aktarma istasyonu gelen verileri bilgisayara USB ya da WIFI aracılığıyla aktarmaktadır. Şekil 7 (a,b)’de sensörlerin dizilimi ve ana aktarma istasyonu gösterilmiştir. WIFI ile haberleşmede gecikme artarken USB ile aktarımda gecikme daha azdır. Fakat USB hareket kabiliyetini azaltmaktadır. Bu teknolojileri üreten firmalar genellikle yazılım desteğini kendileri vermektedirler ve yazılım sayesinde veriler başka platformlarda kullanılabilir. Şekil 7 (c,d)’de yazılım ile oluşturulan katı model ve hareketin meydana gelmesi gösterilmiştir.



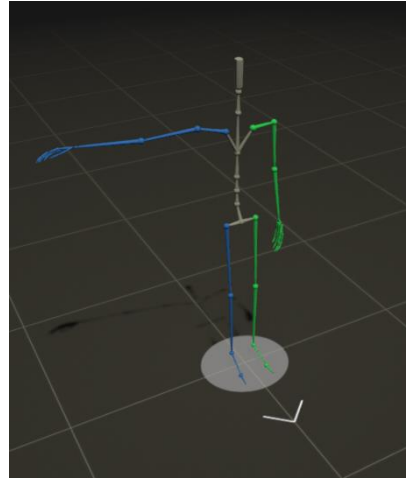
(a)



(b)



(c)



(d)

*Şekil 7 (a) Rokoko akıllı giysi, (b) IMU sensörlerinin vücut üzerinde dağılımı, (c) Katı modelin oluşturulması, (d) Katı modelin sensörden gelen veriler ile hareket etmesi (eklemlerin kinematik dizisi)*

## 2.4. Görüntü İşlemeye Dayalı Hareket Yakalama Sistemleri

Optoelektronik sistemlere benzer şekilde kameradan alınan görüntü işlenerek hareket izlenmesi sağlanır. Kamera ile elde edilen görüntü, bilgisayar ortamında önceden yazılmış algoritmalar çalıştırılarak hareket

yakalanır (Field, Pan, Stirling, & Naghdy, 2011). Sistem görüş alanı içerisine kızılötesi lazerden oluşan noktasal desenler gönderir. Kızılötesine duyarlı kamera bu desenlerden yansıyan ışınları referans desen ile karşılaştırarak 3 boyutlu konumu elde eder. Siyah renkli objeler ışığı emeceği için sistemde gürültüye neden olur. Bu sistemi optoelektronik sistemlerden ayırt eden herhangi bir sensörün ya da işaretleyicinin bulunmamasıdır. Bu açıdan sistem hareket kabiliyetinin artmasına yol açar ve diğer sistemlerden avantajlı bir hale dönüşür. Fakat sistemin hassasiyeti optoelektronik sistemlere kıyasla daha düşüktür, manyetik sistemlere göre hassasiyeti daha yüksektir. Güneş ışığı ya da açık alanda ölçümün yapılması sistemi olumsuz etkiler. Sistemin en tanınan örneği Microsoft'un oyunlar için piyasaya sürmüş olduğu Kinect (Microsoft, New Mexico, ABD) isimli cihazdır. Cihazın görseli şekil 8'de gösterilmiştir. Bu cihazın örnekleme frekansı 30 Hz, çözünürlüğü ise  $640 \times 480$  piksel'dir ("Kinect," 2019). Kinect başta oyunlar için kullanılmış olsa da diğer alanlarda da kullanımı yaygınlaşmıştır. Son zamanlarda oyun sektöründe etkisini kaybeden Kinect üretimi durdurulmuştur. Fakat Microsoft'un bu alandaki yatırımlarına devam etmiş ve Azure Kinect DK isimli yeni bir cihazı piyasaya sürecektir ("Azure Kinect DK," 2019).



*Şekil 8 Microsoft Kinect hareket yakalama sistemi ("Kinect," 2019)*

Tüm hareket sistemleri tek başlarına kullanım sunmalarının yanı sıra birlikte de eşzamanlı olarak çalışabilirler. Çoğu üretici farklı sistemlerin bir arada çalışması için yazılım desteği sunar. Burada hem gerçek zamanlı kayıtlar alınabilirken diğer sistemlerin birleştirilmesiyle daha hassas sonuçlara ulaşılabilir (Brodie, Walmsley, & Page, 2008; Chen, Phee, Luo, & Lim, 2011).

## **2.5. Akustik (Ses) Ölçüme Dayalı Hareket Yakalama Sistemleri**

Ultrasonik ses dalgasından faydalanılarak ölçüm yapılan sistemlerdir. Kişinin eklemleri üzerine yerleştirilen ses vericileri ve ölçüm yapılacak alana yerleştirilen ses alıcıları arasındaki frekans karakteristiği hesap edilerek eklem yerlerindeki vericilerin 3 boyutlu uzayda konumu belirlenir (Nogueira, 2011).

Sistem bazı dezavantajlara sahiptir. Vericilerin sıra ile haberleşmesi yüzünden anlık olarak doğru veri almak zordur. İstenilen düzeyde akış elde edilemeyebilir. Hareketi yakalanacak kişiler üzerinde vericilerin kabloları yerleştirildiği için hareketlerde sınırlamalar olabilir. Manyetik sistemlerde olduğu gibi metalik objeler gürültüye sebep olmaz ancak sistem dış ses gürültülerine ve ses yansımalarına duyarlıdır (Field et al., 2009).

## **2.6. Dış İskelet (Exoskeleton) ve Robotik Hareket Yakalama Sistemleri**

Kişiye metalden veya plastikten yapılmış dış iskelet giydirilerek ölçüm yapılan sistemlerdir. Eklem yerlerinde gonyometreler (açıölçer) veya potansiyometreler yardımıyla konum bilgileri ölçülür. Hareket sonucunda elektriksel sinyaller oluşur ve bu sinyaller kablosuz veya kablolu olarak bilgisayarlara transfer edilir (Regazzoni et al., 2014). Bu sistem optik sistemlere göre daha ucuzdur fakat hareketin doğasına uygun hareket yakalamak zordur. Diğer yandan manyetik malzemeler herhangi bir girişime sebep olmaz (Reda et al., 2018). Şekil 9'da dış iskelet yardımıyla hareket yakalama sistemine örnek gösterilmiştir.



*Şekil 9 Animazoo marka dış iskelet (“Animazoo,” 2019)*

Robotik hareket yakalama tekniğinde 3 boyutlu hareket edebilen ve dokunarak ölçüm alan bir alet kullanılır. Ters kinematik analiz ile son nokta analizi yapılır ve konum bilgisi elde edilir. Bu sistemlerin ölçüm alanı oldukça azdır fakat çok hassas verilere ulaşılabilir. Herhangi bir manyetik sistemlerden etkilenmezler. Şekil 10’da dokunmatik hareket yakalama sistemi gösterilmiştir.



*Şekil 10 Robotik dokunmatik hareket yakalama sistemi (Phantom 3-D)*

### 3. Hareket Yakalama Teknolojilerinin Biyomedikal Uygulamaları

Hareket yakalama teknolojileri klinik odaklı faydalı işleve sahip olmasına rağmen, oldukça az kullanım göstermiştir. Sistem maliyetinin yüksek olması, geniş bir alana ihtiyaç duyulması, sistemi kullanacak derecede eğitilmiş personele ihtiyaç duyulması, veri toplama ve işleme aşamalarının zaman alması, üretilen verinin yorumlanmasının zor oluşu bu teknolojilerin gelişimini klinik ortamlarda sınırlı kılmıştır (Simon, 2004).

MOCAP teknolojileri medikal anlamda birçok amaçla uygulamaya sahiptir. Engelli kişiler için vücut duruşlarını düzeltecek ve harekete yardımcı olan rehabilitasyon amaçlı (Chen et al., 2011), eğlence tabanlı rehabilitasyon uygulamaları gerçekleştirme (Tseng et al., 2009), gait (yürüyüş) analizi (Regazzoni, Rizzi, Comotti, & Massa, 2015), ameliyat öncesi uygun tedavi yöntemlerinin belirlenmesinde (Simon, 2004), vücut kaslarındaki dengesizliğin belirlenmesi (Gao, Lim, Lin, & Green, 2007), solunum sisteminin takibi (Massaroni et al., 2018), günlük aktivitelerin takibi oturma, ayakta durma, koşma gibi hem dinamik hem de statik duruş pozisyonlarının incelenmesi (Aminian & Najafi, 2004), (Murphy, Sunnerhagen, Johnels, & Willén, 2006) gibi alanların yanı sıra hareket yakalama sistemleri spor biyomekaniği alanında oldukça yoğun kullanılmıştır (van der Kruk & Reijne, 2018).

MOCAP sistemleri kullanılırken yapılacak olan uygulama çok önemlidir. Bu tür sistemler kullanılacak uygulamaya bağlı olarak seçilmelidir. Sistem seçiminde incelenecek parametreler ve sistemin hassaslık dereceleri karar verme kriterleridir. Biyomedikal uygulamalarda ilk önce işaretleyici kullanıp kullanılmayacağı belirlenmelidir. Eğer gecikme çok önemli değilse kablosuz sistemler tercih edilebilir. İncelenecek hareket türü ve hareketi gerçekleştirebilmek için gerekli olacak yaklaşık alan dikkate alınarak sistem tercih edilmelidir. Eğer kas ya da kemik incelenecekse hareketi zorlaştıran sistemler seçilmemelidir. Eklem yerlerini tam olarak belirlemek ve büyük sensörlerden kaçınmak gereklidir. Çünkü eklem üzerine eklenenler bir kalınlık oluşturur ve bunun sonucunda doğal hareket verileri sapmalar gösterir. Ayrıca eklem yerlerinde oluşacak hareketler işaretleyicilerin yerinden çıkmasına ya da kaymasına sebep olabilir. Bunun yanında kameraların görüş alanlarına dikkat edilmeli ve kameralar her hareket türünde işaretleyicileri

yakalayacak şekilde dizilmelidir. Sistemler dış gürültüye karşı maksimum düzeyde izole edilmelidir. Gürültü oluşturacak etmenler ortamdaki uzaklaştırıldıktan sonra ölçümler alınmalıdır.

#### 4. Biyomekanik Modelleme

MOCAP sistemleri hareket verisini toplayıp kinematik veriler üretirler. Mühendisler kinematik verilerden yola çıkarak kinetik verilere geçiş yaparlar. Kinetik veriler yük ve kuvvet hesaplamalarında kullanılır. Eklem üzerine düşen yüklerin hesaplanması oldukça önemlidir. Biyomalzemeler ya da insan vücudu içerisindeki kemik dokusu bu yüklere maruz kalarak aşınabilir hatta yaralanabilir. Bu yüzden MOCAP sistemlerinin sağladığı verilerin güvenilir olması hesaplanacak kuvvetler açısından önemlidir. Özellikle vücut içi implant tasarımında ya da ergonomik tasarımlarda ve ayrıca yaralanma mekanizmalarının anlaşılmasında kuvvet değerlerinin doğru olarak hesaplanması gerekmektedir. İnsan vücudunun hareketi statik olmayıp dinamiktir ve dinamik yüklerin hesaplanması daha karışık bir işlem olduğu için bilgisayar modellemelerine ihtiyaç vardır. Günümüzde Anybody (Anybody Technology, Aalborg, Danimarka), Opensim (Açık kaynak, Stanford Üniversitesi, ABD), BOB (Biomechanics of Bodies, BoB-Biomechanics Ltd, İngiltere) yazılımlarıyla bu kinetik veri alınıp kuvvet zaman grafikleri elde edilir. Bu programlardan Opensim ücretsiz bir yazılımdır. Kas-iskelet sisteminin modellenmesini ve dinamik hareketleri analiz edebilir. BOB programı çok basit bir ara yüze sahiptir. Görsel ve grafiksel çıktılar üretir. Eklem kontak kuvvetlerini, eklemde oluşan torkları, hareketlerin yörüngelerini ve kas aktivasyonunu hareket yakalama sistemlerinden alınan verilere göre hesaplar ve ara yüzde gösterir. BOB yazılımı Matlab'de (MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) ara yüzü oldukça basit olan GUI aracılığıyla parametreleri alarak analiz yapar. Anybody yazılımı diğer yazılımlara göre daha karmaşık kas ve iskelet modellerini analiz eder ve oldukça pahalı bir uygulamadır. Sistemde varsayılan modelin özellikleri (boy, ağırlık, eklem uzunlukları, kemik geometrisi vb.) kolaylıkla değiştirilebilmektedir.

Bilgisayar simülasyonları insan hareketlerini analiz eder. Bu aşamada hareketi oluşturan eklemlerin bileşenlerini ve koordinatlı hareketlerini, ölçüm sistemi yardımıyla modeller (Pandy, 2001). Tasarlanacak implant üzerine düşecek yüklerin bilinmesi tasarım aşamasında nasıl yapılacağını ortaya çıkarır ayrıca ergonomik tasarımda bu veriler kullanılır. İş

güvenliği sistemlerinde insanların kaldırabileceği maksimum yüklerin belirlenmesinde bu tür çalışmalar mühendisler için yol gösterici niteliğindedir (Langholz, Westman, & Karlsteen, 2016).

## 5. Tartışma ve Sonuçlar

İnsan hareketleri yakalama teknolojileri hem tedavi hem teşhis açısından büyük öneme sahiptir. Bu teknolojiler tıbbi açıdan doğacak zorlukları ortadan kaldırmıştır. Sistemleri kıyas ederken hassas bir sistem daha doğru sonuçlar doğuracaktır. Fakat bu sistemlerin maliyetleri yüksektir. Ayrıca sistemler düzgün bir şekilde kalibre edilmelidir. Kalibre edilmeden alınan sonuçlar uygulanacak tedaviyi değiştirebilir. Literatür incelendiğinde optoelektronik ve ataletsel ölçüm sistemi ile yapılan çalışmaların daha fazla olduğu görünüyor. Fakat IMU sensörlerinin ölçüm kayması ve gürültülerin üst üste binmesiyle sonuçları hatalı vermesi yüzünden optoelektronik sistemler tıbbi amaçlı olarak daha yaygın kullanılmaktadır. Maliyet açısından en pahalı sistemleri optoelektronik sistemleri oluşturmaktadır. Kamera maliyetleri diğer teknolojilere kıyasla oldukça fazladır. Giyilebilen hareket yakalama teknolojileri diğer sistemlere göre daha ucuza bulunabilmektedir. Bu bölümde kinematik veri toplayan sistemler ve bunları kullanarak kinetik veriye dönüştüren yazılım çeşitleri incelenmiştir. Her birinin avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir. Günümüzde sağlık harcamalarının azaltılmasında, kişiye özgü ergonomik ve implant tasarımlarının yapılmasında, güvenilir mühendislik çözümlerinin üretilmesi için bu tür sistemlere ihtiyaç vardır. Güvenilir veriler ile üretilen mühendislik çözümleri insanların sağlık problemlerini daha etkin bir şekilde çözecek ve daha iyi bir hayat kalitesi sağlayacaktır.

Günümüzde teknolojik gelişmelere bağlı olarak herkes tarafından erişilebilir düşük bütçeli demokratik sistemlerin üretilmiş olması MOCAP sistemlerinin her alanda kullanımının yaygınlaşması adına oldukça umut vericidir. Böylece daha kaliteli daha işlevsel ve daha güvenilir mühendislik çözümlerinin üretilmesi ile insanların sağlık problemlerinin giderilmesi, yaşam kalitelerinin artırılması ve daha güvenilir ürünlere ulaşılması açısından bir aşama kaydedilebilecektir.



## 6. Kaynakça

- Aminian, K., & Najafi, B. (2004). Capturing human motion using body-fixed sensors: Outdoor measurement and clinical applications. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 15(2), 79–94. <https://doi.org/10.1002/cav.2>
- Animazoo. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <http://www.virtual-window.com/animazoo.htm>
- Azure Kinect DK. (2019). Retrieved April 26, 2019, from <https://azure.microsoft.com/tr-tr/services/kinect-dk/>
- Brodie, M., Walmsley, A., & Page, W. (2008). Fusion motion capture: A prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Sports Technology*, 1(1), 17–28. <https://doi.org/10.1080/19346182.2008.9648447>
- Chen, I.-M., Phee, S. J., Luo, Z., & Lim, C. K. (2011). Personalized biomedical devices & systems for healthcare applications. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 6(1), 3–12.
- Cloete, T. (2008). Benchmarking of a full-body inertial motion capture system for clinical gait analysis. *Encyclopedia of Neuroscience*, 750–751. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2\\_1075](https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_1075)
- Estévez-García, R., Martín-Gutiérrez, J., Mendoza, S. M., Marante, J. R., Chinea-Martín, P., Soto-Martín, O., & Lodeiro-Santiago, M. (2015). Open Data Motion Capture: MOCAP-ULL Database. *Procedia Computer Science*, 75(Vare), 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.253>
- Field, M., Pan, Z., Stirling, D., & Naghdy, F. (2011). Human motion capture sensors and analysis in robotics. *Industrial Robot*, 38(2), 163–171. <https://doi.org/10.1108/01439911111106372>
- Field, M., Stirling, D., Naghdy, F., & Pan, Z. (2009). Motion capture in robotics review. *2009 IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2009*, 1697–1702. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2009.5410185>
- Gao, H., Lim, M., Lin, E., & Green, R. (2007). *Marker based Facial Tracking Application in Communication Disorder Research*. (December), 244–247.
- Kinect. (2019). Retrieved April 26, 2019, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>
- Kitagawa, M., & Windsor, B. (2008). MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture. In *MoCap for Artists*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-240-81000-3.50004-8>

- Langholz, J. B., Westman, G., & Karlsteen, M. (2016). Musculoskeletal modelling in sports-evaluation of different software tools with focus on swimming. *Procedia Engineering*, *147*, 281–287.
- Ligorio, G., & Sabatini, A. M. (2015). A novel kalman filter for human motion tracking with an inertial-based dynamic inclinometer. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *62*(8), 2033–2043. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2411431>
- Magnetic Motion Capture Systems - Tracklab. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <https://tracklab.com.au/magnetic-motion-capture-systems/>
- Massaroni, C., Venanzi, C., Silvatti, A. P., Lo Presti, D., Saccomandi, P., Formica, D., ... Schena, E. (2018). Smart textile for respiratory monitoring and thoraco-abdominal motion pattern evaluation. *Journal of Biophotonics*, *11*(5). <https://doi.org/10.1002/jbio.201700263>
- Measurement Sciences Products. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <https://www.ndigital.com/msci/products/>
- Miller, N., Jenkins, O. C., Kallmann, M., & Mataric, M. J. (2005). *Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation*. 547–565. <https://doi.org/10.1109/ichr.2004.1442670>
- Moeslund, T. B., & Granum, E. (2001). A survey of computer vision-based human motion capture. *Computer Vision and Image Understanding*, *81*(3), 231–268. <https://doi.org/10.1006/cviu.2000.0897>
- Movit System G1. (2019). Retrieved May 1, 2019, from <http://www.captiks.com/products/movit-system-g1-3d>
- Muhtadin, Sumpeno, S., & Dyaksa, A. P. (2017). Affective human pose classification from optical motion capture. *2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application: Strengthening the Link Between University Research and Industry to Support ASEAN Energy Sector, ISITIA 2017 - Proceeding, 2017-Janua*, 281–285. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2017.8124095>
- Murphy, M. A., Sunnerhagen, K. S., Johnels, B., & Willén, C. (2006). Three-dimensional kinematic motion analysis of a daily activity drinking from a glass: A pilot study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *3*, 1–11. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-3-18>
- Nansense. (2019). Retrieved April 26, 2019, from <https://www.nansense.com/suits/>
- Nogueira, P. (2011). *Motion capture fundamentals*. 1–12. Retrieved from [http://paginas.fe.up.pt/~prodei/dsie12/papers/paper\\_7.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~prodei/dsie12/papers/paper_7.pdf)

- Optical Motion Capture Cameras | VICON. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <https://www.vicon.com/products/camera-systems>
- OptiTrack - Hardware. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <https://optitrack.com/hardware/>
- Pandy, M. G. (2001). COMPUTER MODELING AND SIMULATION OF HUMAN MOVEMENT What to include in a model of movement depends on the intended use of the. *Kinesiology*, 3(1), 245–273. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.3.1.245>
- Park, S. W., Park, H. S., Kim, J. H., & Adeli, H. (2015). 3D displacement measurement model for health monitoring of structures using a motion capture system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 59, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.063>
- Perception Neuron. (2019). Retrieved April 26, 2019, from [https://neuronmocap.com/products/perception\\_neuron](https://neuronmocap.com/products/perception_neuron)
- PhaseSpace. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <http://phasespace.com/x2e-motion-capture/>
- Polhemus. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <https://polhemus.com/micro-sensors/>
- Pons-Moll, G., Baak, A., Helten, T., Müller, M., Seidel, H. P., & Rosenhahn, B. (2010). Multisensor-fusion for 3D full-body human motion capture. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 663–670. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5540153>
- PTI Phoenix Technologies. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <http://www.ptiphoenix.com/products/>
- Qualisys. (2019). Retrieved April 25, 2019, from <https://www.qualisys.com/hardware/>
- Reda, H. E. A., Benaoumeur, I., Kamel, B., & Zoubir, A. F. (2018). MoCap systems and hand movement reconstruction using cubic spline. *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2018*, 798–802. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2018.8394887>
- Regazzoni, D., De Vecchi, G., & Rizzi, C. (2014). RGB cams vs RGB-D sensors: Low cost motion capture technologies performances and limitations. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 719–728. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.011>

- Regazzoni, D., Rizzi, C., Comotti, C., & Massa, F. (2015). Towards automatic gait assessment by means of RGB-D Mocap. *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, V01AT02A057-V01AT02A057. American Society of Mechanical Engineers.
- Shadow Motion Capture System. (2019). Retrieved April 26, 2019, from <https://www.motionshadow.com/biomech>
- Simon, S. R. (2004). Quantification of human motion: Gait analysis - Benefits and limitations to its application to clinical problems. *Journal of Biomechanics*, 37(12), 1869–1880. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.02.047>
- Skogstad, S. A., Nymoen, K., & Hovin, M. (2011). Comparing inertial and optical mocap technologies for synthesis control. *Sound and Music Computing Conference*, 421–426.
- Smartsuit Pro Rokoko. (2019). Retrieved April 26, 2019, from <https://www.rokoko.com/en/products/smartsuit-pro>
- Tseng, Y. C., Wu, C. H., Wu, F. J., Huang, C. F., King, C. T., Lin, C. Y., ... Deng, C. W. (2009). A wireless human motion capturing system for home rehabilitation. *Proceedings - IEEE International Conference on Mobile Data Management*, 359–360. <https://doi.org/10.1109/MDM.2009.51>
- van der Kruk, E., & Reijne, M. M. (2018). Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 806–819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>
- Xsens 3D motion tracking. (2019). Retrieved April 26, 2019, from <https://www.xsens.com/products/>
- Yost Labs. (2019). Retrieved May 1, 2019, from <https://yostlabs.com/3-space-sensors/>
- Zhou, H., & Hu, H. (2008). Human motion tracking for rehabilitation-A survey. *Biomedical Signal Processing and Control*, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2007.09.001>
- Zoopraxiscope: Room 6 | Tate. (n.d.). Retrieved March 21, 2019, from <https://www.tate.org.uk/whats-on/tate-britain/exhibition/eadward-muybridge/exhibition-guide/zoopraxiscope>

**BEYİN BİLGİSAYAR  
ARAYÜZLERİ VE UYGULAMA  
ALANLARI**

**BÖLÜM  
19**

**Selma BÜYÜKGÖZE<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Öğretim Görevlisi, Kırklareli Üniversitesi TBMYO, selma.bulut@klu.edu.tr

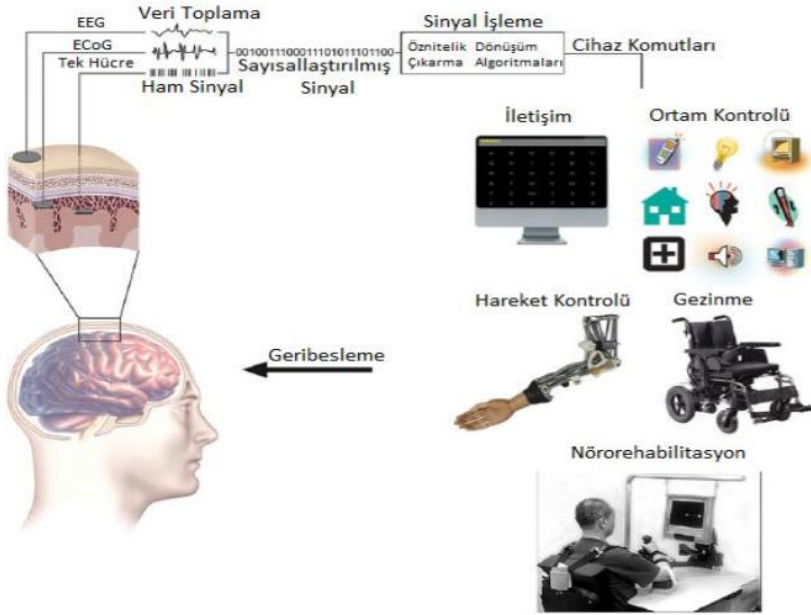


## Giriş

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insanoğlu; beynin nasıl çalıştığını anlamaya çalışmış ve bunu yeni teknoloji ile birleştirerek bilgisayar ile iletişimini sağlamıştır. Bu işlemi gerçekleştiren sisteme; “Beyin Bilgisayar Arayüzü” denilmektedir.

Başka bir tanıma göre ise; Beyin Bilgisayar Arayüzleri kullanıcılarına beynin normal çıkış yolları olan kas ve sinir hücrelerini kullanmaksızın doğrudan beyin aktivitesindeki değişimlerin analiz edilmesi yoluyla iletişim ve harici cihazların kontrolünü sağlayan uygulamalardır. BBA’lar veri algılama, öznitelik çıkarma, öznitelik dönüşümü ve çıkış cihazları ile bu dört bileşenin yönetiminden sorumlu olan, sistemin başlangıç, bitiş ve çalışma zamanlamasını belirleyen bir protokolden oluşmaktadır.

Bu elemanlar ve aralarındaki temel etkileşim Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 14. Bir Beyin Bilgisayar Arayüzü Sisteminin temel elemanları ve çalışması (Wolpaw vd, 2002).

## Beyin Bilgisayar Arayüzü Tarihçesi

BBA tarihi Hans Berger’in 1924 yılında ilk EEG (Elektroensefalografi) cihazı kullanımı ile başlamıştır. Hans Berger, bir

insanın beyin dalgalarını algılayabilen bir cihaz icat etmiştir. İlk EEG kafa derisinin altına yerleştirilen gümüş plakalar ve bunlara bağlı 0,0001 V hassasiyetli bir galvanometreden oluşmaktadır. Berger, ilk kez EEG sinyallerini kayıt etmiştir. Bu kayıtları analiz eden Berger, farklı dalgalar ve ritimler olduğunu keşfetmiştir. Bunun üzerine beyin hastalıkları ile beyin dalgaları arasındaki ilişki üzerine çalışmıştır. Fakat 73'lü yılların başına kadar beyin aktivitelerinin iletişim amacıyla kullanılması planlanmamıştır. 1970 yılında ARPA (Advanced Research Project Agency), beyin aktivitelerinden ve bilgisayardan yararlanarak insan yeteneklerini geliştirmeyi planlayan bir proje üretmiştir (Wessel 2006). Denemeler ilk olarak hayvanlar üzerinde başlamıştır. Daha sonra ise insanlar üzerinde denemeler yapılmıştır. Son yıllarda BBA, elektronik sistemlerin gelişmesi ve güçlü bilgisayarların yaygınlaşması ile araştırmacıların ilgisini daha çok çekmeye başlamış ve daha fazla araştırmaya konu olmuştur. Bu sayede geçmişten beri kullanılan yöntemlerin geliştirilmesinin yanında, yeni yöntemler de geliştirilmektedir.

Günümüzde, kelime işleyiciler, uyarlanmış web tarayıcılar, tekerlekli sandalye ve nöro protezlerin kullanımı ve oyunlar (Liao vd, 2012) gibi çeşitli BBA uygulamaları bulunmaktadır. BBA uygulamalarından olan EEG çalışmalarında, görsel uyarılmış potansiyeller (VEP) (Cao vd, 2011), yavaş kortikal potansiyeller (Birbaumer, 2003), P300 uyarılmış potansiyelleri (Piccione vd,2006) ve sensorimotor ritimler (Kübler ve Müller, 2007) kullanılmaktadır.

Emotiv EPOC, NeuroSky, HiBrain, iFocusBand, Muse, openBCI, Enobio genel kullanım için geliştirilmiş EEG tabanlı Beyin Bilgisayar arayüzleridir.

## **Beyin Bilgisayar Arayüzü Türleri**

Beynin çıktı yollarına göre bağımlı ve bağımsız olmak üzere iki tür Beyin Bilgisayar Arayüzü vardır.

### **Bağımlı BBA (Beyin Bilgisayar Arayüzü)**

Bağımlı bir BBA, mesajı taşımak için beynin normal çıkış yollarını kullanmaz, ancak bu yollardaki aktiviteyi, onu taşıyan beyin aktivitesini (örneğin EEG) oluşturmak için kullanır. Örneğin, kullanıcıya her seferinde bir tane yanıp sönen bir harf matrisi sunulduğunda ve kullanıcı



doğrudan ona bakarak belirli bir harfe odaklandığında, görsel uyarılmış potansiyel (VEP) oluşur. Bu harf yanıp söndüğünde kafa derisinden kaydedilen VEP görsel korteks, diğer harfler yanıp söndüğünde oluşan VEP'lerin ürettiğinden çok daha büyüktür (Sutter, 1992).

Bu durumda, beynin çıkış kanalı EEG'dir, ancak EEG sinyalinin üretilmesi bakış yönüne ve bu nedenle kaslara ve onları aktive eden kraniyal sinirlere bağlıdır. Bağımlı bir BBA, esasen beynin normal çıkış yollarında taşınan mesajları tespit etmek için alternatif bir yöntemdir. Mevcut örnekte bakış açısı, doğrudan göz pozisyonunu izlemek yerine EEG izleyerek tespit edilir.

### **Bağımsız BBA (Beyin Bilgisayar Arayüzü)**

Bağımsız bir BBA sistemi sadece kullanıcının eğilimlerine dayandığından sağlam bir çevresel sinir sistemi gerektirmez.

Bağımsız bir BBA, beynin normal çıkış yollarına hiçbir şekilde bağlı değildir. Mesaj periferik sinirler ve kaslar tarafından taşınmaz ve ayrıca, mesajı taşıyan beyin aktivitesini (örneğin, EEG) üretmek için bu yollardaki aktiviteye de gerek yoktur.

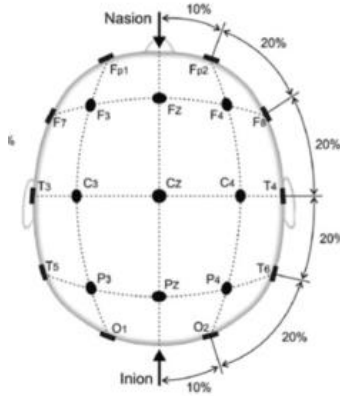
Örneğin, kullanıcıya her seferinde bir tane yanıp sönen bir harf matrisi sunulduğunda kullanıcı, o harf yanıp söndüğünde P300 uyarılmış bir potansiyel üreterek belirli bir harf seçer (Farwell ve Donchin, 1988; Donchin ve ark., 2000). Bu durumda, beynin çıkış kanalı EEG'dir ve EEG sinyalinin üretilmesi, gözlerin hassas oryantasyonuna değil, esas olarak kullanıcının amacına bağlıdır (Sutton vd, 1965; Donchin, 1981; Fabiani vd, 1987; Polich, 1999). Periferik sinirlerin ve kasların normal çıkış yolları, bağımsız bir BBA'nın çalışmasında önemli bir role sahip değildir (Wolpav vd, 2002).

### **BBA'ların Çalışma Prensipleri**

BBA'ların yapılması, beynin yaydığı sinyalleri okuyabilen alıcıların kullanıldığı EEG cihazları sayesinde mümkün olmuştur. Beyinde kimyasal ve elektriksel olmak üzere iki türlü iletişim vardır (Demirci, 2011; İşçan, 2009; Sevinç, 2006; Argunşah, 2006; Aydemir ve Kayıkçıoğlu, 2009). Her ikisinin de izlenebilir etkileri vardır ve bu verileri EEG aracılığıyla elde etmek mümkündür.

BBA beyindeki elektriksel hareketlerle ilgilenir; bu elektriksel hareketler, nöronların eylem potansiyellerinin tetiklenmesi ve aksonlar boyunca iletilmesi ile ortaya çıkar (Demirci, 2011; İşcan, 2009; Sevinç, 2006).

Bu durumda elektrotları nasıl yerleştirmek gereklidir sorusuyla karşılaşırız. Şekil 2. uluslararası 10-20 beyin elektrot yerleşimini göstermektedir. Tek sayılar solda, çift sayılar sağ tarafta yer almaktadır. F(rontal), T(emporal), P(arietal) ve O(ccipital) ifade etmektedir.



Şekil 15. Beyin Elektrot Yerleşimi

BBA'lar içerisinde elde edilmesinin kolaylığı açısından en çok tercih edilen yöntem EEG'dir. EEG dalga formları; konumlarına, genlik, frekans, morfoloji, süreklilik (ritmik, aralıklı veya sürekli), senkron, simetri ve reaktiviteye bağlı olarak tanımlanabilir. EEG dalga formlarını sınıflandırmak için en sık kullanılan yöntem ise frekanstır. EEG dalgaları, Yunan rakamlarını kullanarak frekans aralıklarına göre adlandırılmaktadır. En çok incelenen dalga formları delta (0,5 ila 4Hz); teta (4 ila 7Hz); alfa (8 ila 12Hz); sigma (12 ila 16Hz) ve beta (13 ila 30Hz) dır. Ayrıca, infra yavaş salınımlar (ISO) (0.5Hz'den az) ve yüksek frekanslı salınımlar (HFO'lar) (30Hz'den büyük) gibi geleneksel EEG bant genişliği dışında olan ancak son zamanlarda klinik öneme sahip olan diğer dalga formları da vardır (Chetan ve Arayamparambil, 2019).

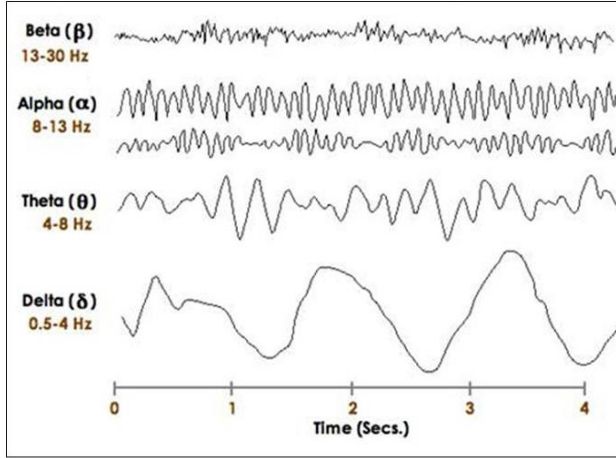
**1. Delta ( $\delta$  - 0.5-4 hz) Dalgaları:** Delta ritmi derin uykuda fizyolojik olarak görülür ve frontocentral kafa bölgelerinde belirgindir. Patolojik delta ritmi, genel ensefalopati ve fokal serebral disfonksiyon durumunda, uyanık durumlarda ortaya çıkar.

**2. Teta ( $\theta$ - 4-8 Hz) Dalgaları:** N1 ve N2 gibi uykunun erken aşamalarında ortaya çıkan uyuşukluk halidir.

**3. Alfa( $\alpha$ - 8-12 Hz) Dalgaları:** En iyi gözler kapalı ve zihinsel rahatlama sırasında görülür ve karakteristik olarak göz açma ve zihinsel eforla zayıflamaktadır.

**4. Beta ( $\beta$ - >13 Hz) Dalgaları:** Beta ritmi normal yetişkinlerde ve çocuklarda en sık görülen ritimdir. Ön ve orta kafa bölgelerinde en belirgin olanıdır ve arkaya doğru giderken azalır. Beta aktivitesinin genliği, genellikle nadiren 30 mikrovoltun üzerine çıkan 10 ila 20 mikrovoltur. Genellikle uyuşukluk, N1 uykusu sırasında genliği artar ve daha sonra N2 ve N3 uykusunda azalır.

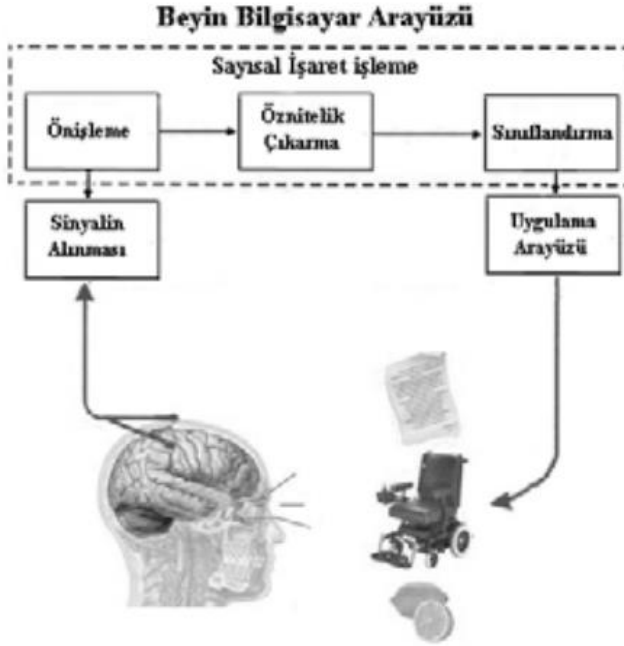
Şekil 3 beyinden elde edilen EEG dalgalarını göstermektedir.



Şekil 16. Normal EEG'de beyin dalgaları

### Beyin Bilgisayar Ara Yüzlerinin Temel Bileşenleri

Beyin bilgisayar arayüzlerinin genel yapısına baktığımızda sinyalin alınması, ön işleme, öz nitelik çıkarma, sınıflandırma ve uygulama arayüzü olmak üzere 5 adım karşımıza çıkmaktadır. Şekil 4'te Beyin bilgisayar arayüzlerinin temel bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 17.BBA'nın temel işlem bileşenleri

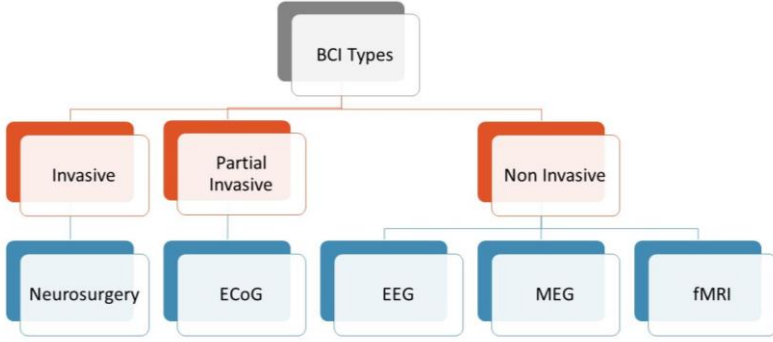
### Sinyal Toplama

Beynin, farklı işlemleri gerçekleştiren bölümlerden oluştuğunu düşündüğümüzde ilgili bölüme yakın yere yerleştirilecek olan elektrotlar o bölgeye ilişkin bir bilgi edinmemizi sağlar.(Sevinç, 2006).

BBA sistemleri farklı kombinasyondaki elektrotlar ve bu elektrotlardan alınan elektriksel sinyallerin farklı şekillerde analiz edilmeleri ile gerçekleştirilir.

BBA sistemlerinde elektrotlar ile nöronların elektrokimyasal etkileşimlerinin elektriksel yansımalarını algılayabilmenin üç yolu vardır (Argunşah, 2006).

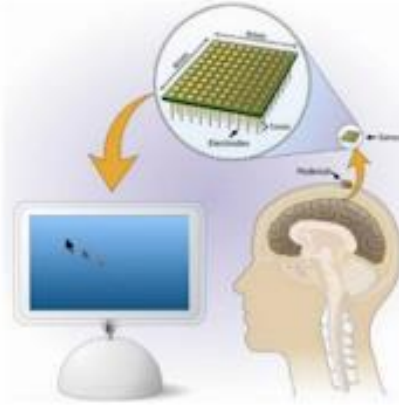
Şekil 5 Beyin bilgisayar arayüzü sinyal toplama yöntemlerini bir şema şeklinde göstermektedir.



Şekil 18.Beyin Bilgisayar arayüzü sinyali toplama yöntemleri

•İnvaziv yöntemde, elektrotlar mikro elektrotlar halinde beyin kabuğu üzerine direkt olarak yerleştirilirler. Bunun için kafatasının açılması ve bir operasyon ile mikro elektrot matrisinin beyine tutturulması gereklidir(Behm vd., 2006;Leuthardt vd., 2004).

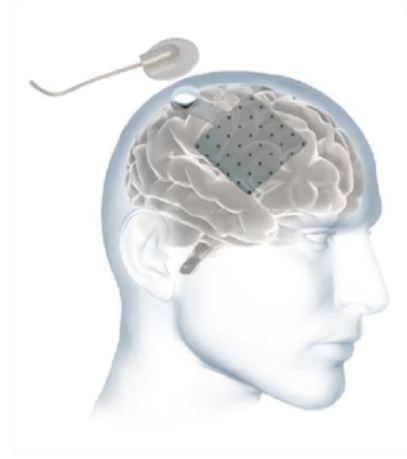
**NeuroSurgery** işleminde; ameliyatla beyinde belirlenen bölgeye direkt olarak nöro çip ve bağlantı sağlanacak aparatör yerleştirilir. Şekil 6 bu yöntemi göstermektedir.



Şekil 19.Neuro surgery yöntemi

•Kısmi invaziv yöntemde, kafatası açılır ancak elektrotlar beyin kabuğuna saplanarak yerleştirilmez, elektrot matrisi halinde beyin kabuğu üzerine serilir(Navin ve diğ., 2004). ECoG cihazı beyinde oluşan

sinyalleri kaydeder ve kablosuz ağ aracılığıyla bilgisayara gönderir. Şekil 7 bu yöntemi göstermektedir.



Şekil 20.ECoG yöntemi

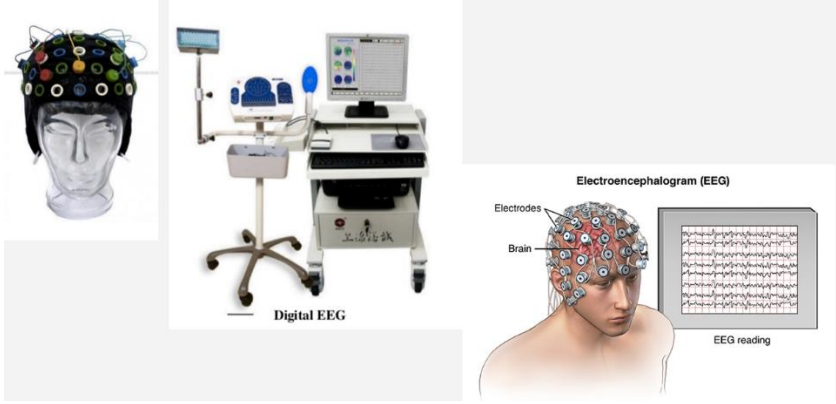
İlk 2 yöntem invaziv (müdahaleli) teknik olarak adlandırılmaktadır. İnvaziv tekniklerde mikro-elektrot dizilerinin beyinde yerleştirilmesi için ciddi cerrahi müdahale gerekmektedir. BBA sinyalini sağlayan mikro-elektrot dizileri etrafındaki dokulara zarar da verebilir. Bu problem de, algılayıcının zamanla sinyal kalitesinin düşürmesine yol açabilmektedir. Bu durumda, mikro-elektrotların tekrar yerleştirilebilmesi için yeniden aynı işlemlerin yapılmasını gerektirmektedir(Mishchenko vd, 2017).

- Üçüncü yöntemde ise, kafatası üzerine iletken bir jelle tutturulan elektrotlar kullanılır. Bu yönteme ise non-invaziv (müdahalesiz) teknik adı verilmektedir.

Bu yöntemler içerisinde en pratik olanı müdahale gerektirmeyen invaziv olmayan yani son yöntemdir. Son araştırmaların çoğu non-invaziv BBA sistemleri üzerine yapılmaktadır (Argunşah, 2006; İşcan, 2009).

Günümüzdeki BBA sistemleri derin ve yüzeysel EEG (Elektroensefalografi) kayıtları ile alınan beyin sinyallerinin işlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Yüzeysel kayıtlar pratik uygulanabilmelerinden dolayı en çok tercih edilen BBA yöntemi olmuştur. Genel olarak Gümüş-Gümüş Klorür (Ag-AgCl) elektrotları kullanılmaktadır(Demirci, 2011; Argunşah, 2006).

Şekil 8 non-invaziv metot olan EEG yöntemini göstermektedir.



Şekil 21. EEG yöntemi

EEG müdahalesiz bir yöntemdir. EEG tabanlı BBA sistemler dışında;

- Tek hücre kayıtlamaları (SCR),
- Bölgesel alan potansiyelleri (LFP),
- Elektrokortigrafi (ECoG),
- Magnetoensefalografi (MEG),
- Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI),
- Yakın infrared spektroskopisi (NIRS) gibi teknikler de kullanılmaktadır. Ancak, bu tekniklerin hiç birisi EEG kadar çabuk erişilebilir, ucuz ve pratik değildir (Argunşah, 2006).

### 3.2. Sinyal İşleme: Özellik Çıkarma

Genellikle EEG verileri kaydedildikten sonra, gürültüden arındırmak ya da içerisinde gömülü bulunan gerekli bilginin ortaya çıkarılması için bir ön işleme tabi tutulması gerekir. EEG sinyalleri çok fazla gürültü barındırırlar ve gözlerin, kasların ya da yüz veya çene kaslarının elektriksel aktivitesinden çok fazla etkilenirler (Fatourehci vd, 2007). Bu kas aktivitelerinin genliği EEG'ninkinden kat kat fazladır, bu nedenle bu artifaktların ayırt edilmesi kolay olmamaktadır. Ayrıca, bu sinyaller içerisinden istenen hareketle ilgili olmayan, beyin aktivitesine

ait sinyallerin de ayırt edilmesi gerekmektedir. Kafatasına veya beyine yerleştirilen elektrotlardan elde edilen sinyaller 0 Hz ve üzerindeki frekanslarda olduklarından yapıları kolaylıkla bozulmaktadır. Bozulan bu sinyallerin kalitelerinin artırılması için bir şeyler yapmak gerekir. İşte bu kaliteye “sinyal gürültü oranı ”adı verilir. Bu oranla ifade edilmek istenen, yüksek oranın kaliteli sinyali temsil ettiğidir. Sinyal gürültü oranı, gürültü giderici filtreler kullanılarak ve istenmeyen veri ve artefaktları yok sayarak iyileştirilebilir. Ön işleme işlemini gerçekleştirmek için pek çok uzaysal, spektral ve temporal (geçici) filtreler kullanılmaktadır(McFarland vd, 1997 ve Ramoser vd, 2000).

Kaydedilen sinyallerin amaca uygun kullanılabilmesi için sinyali en iyi ifade eden bazı özelliklerin belirlenerek, bu özelliklerle çalışılması gerekir. Bu özellikler literatürde ‘öz nitelik’ olarak adlandırılır ve bir öz nitelik vektörü içerisinde saklanırlar. Kısaca, öz nitelik çıkarma işlemi sinyallerin sınıflandırılmasını kolaylaştıracak bir forma dönüştürülmesi şeklinde ifade edilir. Öz nitelik seçimi hangi özellikler seçilecek ve miktarı ne olacak sorularına cevap verecek şekilde yapılmalıdır(Hyvärinen ve Oja,2000).

Zaman domeni, frekans domeni ve uzaysal domen olmak üzere farklı öz nitelikler bulunmaktadır(O'Regan, 2013).

### **Sinyal İşleme: Dönüştürme Algoritması**

Beyin sinyalinden öz nitelikler elde edildikten sonra; içindeki örüntülerin taranması ve tanınması gerekmektedir. BBA sistemi böylece hangi komutların gerçekleştirilmesi gerektiğini çözümlenmektedir. Toplanan verideki özellikleri çözümlenmek içinse;

- doğrusal sınıflandırıcılar,
- sinir ağları,
- doğrusal olmayan Bayes sınıflandırıcılar,
- en yakın komşuluk sınıflandırıcıları ve
- birleşik sınıflandırıcılar kullanılmaktadır.



## **Doğrusal Sınıflandırıcılar**

Doğrusal sınıflandırıcılar sınıfların birbirinden ayırt edilmesinde doğrusal fonksiyon kullanan algoritmalarlardır. BBA uygulamalarında en çok kullanılan yöntemlerdir. İki önemli tipi vardır:

- a) Doğrusal Ayırıcı Analizi
- b) Destek Vektör Makinesi

## **Sinir Ağları**

Doğrusal sınıflandırıcıların dışında en çok kullanılan sınıflandırma yöntemlerinden biridir(Anderson ve Sijercic, 1996). En yaygın kullanılan çok katmanlı algılayıcıdır(MLP - multilayer perceptron).

## **Doğrusal Olmayan Bayez sınıflandırıcılar**

Bu bölümde sıklıkla kullanılan Bayez kuadratik ve Gömülü Markov Modelidir. Bu sınıflandırıcılar doğrusal sınıflandırıcılar ve sinir ağları kadar yaygın olmamakla birlikte motor betimleme ve zihinsel görev sınıflandırmalarında başarıyla uygulanmıştır(Lemm vd, 2004).

## **En Yakın Komşuluk Sınıflandırıcısı**

Bir özellik vektörünü en yakın komşuluğa göre belli bir gruba atama esasına dayanmaktadır. Bu en yakın komşuluk oranı “k” en yakın komşuluk veya Mahalanobis mesafesine göre seçilir. Bunlar ayırt edilir doğrusal olmayan sınıflandırıcılardır. BBA uygulamalarında boyut hassasiyetlerinden ötürü çok başarılı olamamışlardır.

## **Birleşik Sınıflandırıcılar**

Günümüze kadarki BBA araştırmalarının çoğunda tek bir sınıflandırma yöntemi denenmiştir fakat son yıllarda gelişmekte olan bir uygulama olarak birkaç sınıflandırıcının birlikte kullanılmasına geçilmiştir. Farklı türlerden sınıflandırıcı kullanılmasının nedeni varyansı azaltmak ve sınıflandırma hatasını en aza indirmektir.

## Çıktı Cihazı

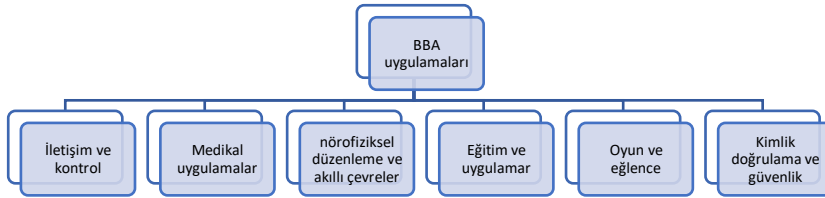
BBA sisteminin çıktısı genellikle bilgisayarlar ya da bilgisayar kontrollü robotlar olmaktadır. Yapılan araştırmalarda ve deneylerde kullanıcıya geri besleme yapmak için çoğunlukla bir bilgisayar monitörü ve bunun üzerinde olan imleçler, ikonlar ve harf seçimleri sunulmaktadır(Sevinç, 2006).

## İşletim Protokolü

Tasarlanan sistemin davranışını ve kullanımını belirleyen kurallardır. Protokol sistemin ne tür bir iletişim kullanacağını, ne tür beyin sinyallerinin analiz edileceğini ve sistem ile kullanıcı arasındaki etkileşim kurallarını belirlemektedir. BBA sistemi gerçek hayat ortamında bir hasta tarafından tek başına kullanılacaksa ve hasta kendisi cihazı açıp kapatmak, komut vermek zorunda ise protokol detayları son derece önemlidir(Sevinç, 2006).

## Beyin Bilgisayar Arayüzlerinin Uygulama Alanları

Beyin bilgisayar ara yüzleri uygulamaları birçok farklı alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Şekil 9 BBA'ların farklı uygulama alanlarını göstermektedir.



Şekil 22.BBA uygulama alanları (Abdulkader vd,2015)

- a) İletişim ve kontrol: Engelli bireylerin, yazım uygulamalarında olduğu gibi çeşitli yöntemlerle görüş ve fikirlerini anlatıp yazabilmelerine anlamsal sınıflandırma(Wang vd, 2011) veya sessiz konuşma iletişimi(Brumberg vd, 2010) ile yardımcı olabilmektedirler(Lelievre vd, 2013). BBA yardımcı robotları, engelli kullanıcılar için günlük ve profesyonel yaşamda destek

sunabilir ve topluluklarını oluşturmadaki işbirliğini arttırabilir(Prataksita vd, 2014).

- b) Medikal uygulamalar da yol tutması, sigara ve alkolü önleme amaçlı, tümörler, beyin ve uyku hastalıklarını teşhis aşamasında; beyin felci, sakatlık ya da fizyolojik rahatsızlıkların rehabilitasyonunda kullanılmaktadır.

*Tespit ve teşhis:* Zihinsel durum izleme fonksiyonu, anormal beyin yapısı (beyin tümörü gibi), Nöbet bozukluğu (epilepsi gibi), Uyku bozukluğu (narkolepsi gibi) ve beyin şişmesi (ensefalit) gibi sağlık konularının tahmin edilmesine ve saptanmasına da katkıda bulunmuştur. Kontrolsüz hücrelerin kendi kendine bölünmesinden elde edilen tümör, EEG kullanılarak MRI ve CT-SCAN için ucuz bir sekonder alternatif olarak kullanılabilir. EEG sinyallerini kullanarak beyin tümörü, meme kanseri ve epilepsi nöbetleri tanımlanmıştır(Selvam ve Shenbagadevi, 2011; Sharanreddy ve Kulkarni,2013a; Poulos vd,2013; Sharanreddy ve Kulkarni, 2013b)

*Rehabilitasyon ve yenileme:* Daha önceki hareketlilik ve iletişim seviyelerini geri kazanamayan hastalar için, nöroprostatik cihazlar olarak da adlandırılan BBA tabanlı protez uzuvlar normal işlevselliği yeniden kazanmak için kullanılabilir (Ang vd, 2010; Jones vd, 2014). Gerçek, sanal ve artırılmış yaklaşımlar gibi BBA tabanlı rehabilitasyon eğitimi için çeşitli gerçeklik yaklaşımları sunulmuştur.

- Gerçek rehabilitasyon yaklaşımı, sağlıklı insanlardan üretilen beyin sinyallerini kodlanmış kinematik parametrelerle birlikte kullanılmaktadır(Presacco vd,2011). Felç geçiren hastalara, kaydedilen sinyalleri andırmak ve beynin sağlıklı bölgelerini yeniden ele geçirmek için yeniden düşünme davranışlarını değiştirmelerine yardımcı olmaktadır.
- Rehabilitasyon için başka bir yaklaşım ise giden beyin dalgalarından üretilen hareketin izlenmesi ve kontrol edilmesi yoluyla sanal gerçekliği içermektedir(Contreras vd,2012).
- Artırılmış gerçeklik, Ayna Kutusu Terapisi (MBT) için bir gelişim olarak ortaya çıkan, artırılmış ayna kutusu sistemi gibi gerçeklik tabanlı BBA tedavisindeki üçüncü yaklaşımı temsil etmektedir. MBT, yaralı ve sağlıklı ekstremiteleri içeren

simetrik hareketlerden üretilen beyin sinyallerini kullanmaktadır(Regenbrecht vd,2014).

1. Nero fiziksel ve akıllı çevreler: Akıllı evler, işyerleri veya ulaşım gibi akıllı ortamlar, insanların günlük yaşamına daha fazla güvenlik, lüks ve fizyolojik kontrol sunma konusunda beyin bilgisayar ara yüzlerinden yararlanabilir. Bu durumda, Nesnelerin İnterneti (IOT) ve BBA teknolojileri arasındaki işbirliği kaçınılmazdır. Lin ve diğerleri (2012) beyin bilgisayar Arayüz tabanlı Akıllı Yaşam Çevresel Otomatik Ayar Kontrol Sistemi (BSLEACS) adlı bir bilişsel kontrol sistemi önermişlerdir. Bu sistem, kullanıcının zihinsel durumunu izlemekte ve çevreleyen bileşenleri buna göre uyarlamaktadır. Ev ağı katılımı ile de işlevselliğini genişletilmiştir.
2. Neuromarketing ve advertising: Pazarlama uyarılarının değerlendirilmesi sürecinde kullanılmaktadır. TV reklamlarının, pazarlama aktivitelerinin, beynimiz tarafından gerçekten de beğenilip, beğenilmediği tespit edilebilmektedir. Böylece izleyicilerin hangi reklama olumlu yanıt verdikleri, hangilerine vermediklerini tespit edilebilir. Bunun sonucu olarak da bankalara ve reklam şirketlerine profesyonel hizmet verilebilmektedir. Bu konuda yapılan bir çalışma BBA tabanlı değerlendirme ile izleme aktivitesine eşlik eden dikkati ölçmektedir (Yoshioka vd, 2012). Başka bir çalışma ise televizyon reklamlarının ezberlenmesini tahmin etmekle ilgilenmiş ve böylece reklam değerlendirmesi için bir başka yöntem daha sunmuşlardır(Vecchiato vd,2011).
3. Eğitim ve uygulamaları: insan beyninin aktivite modülasyonunu hedefleyerek beyin performansını arttırmak için kullanılmaktadır. Depresyon duygusuyla mücadele etmek için hibrit rtfMRI-EEG BBA kullanımı önerilmiştir(Zotev vd,2014). Ayrıca, EEG tabanlı duygusal zeka, (Márquez ve diğerleri (2012) 'de yapılan çalışmada; incelenen eşlik eden stresi kontrol etmek için spor müsabakalarında uygulanmıştır.
4. Eğlence ve oyun: Mevcut oyunların özelliklerini beyin kontrol yetenekleriyle birleştirmek, çok beyinli bir eğlence deneyimi sağlama eğiliminde olan gibi birçok araştırmaya konu

olmuştur(Bonnet vd, 2013). Video oyunu olan BrainArena da oyuncular iki BBA aracılığıyla işbirlikçi veya rekabetçi bir futbol maçına katılabilirler. Sol veya sağ el hareketlerini hayal ederek gol atabilirler. Tan ve Nijholt'un (2010) daki çalışmasında; stres seviyesini düşürmeyi amaçlayan Brainball oyununda kullanıcılar sadece topu rahatlayarak hareket ettirebilirler; bu nedenle, daha sakin oyuncu kazanma olasılığı daha yüksektir ve bu nedenle, eğlenirken, streslerini kontrol etmeyi öğrenirler.

5. Kimlik doğrulama ve güvenlik: bilgi tabanlı güvenlik sistemleri, nesne tabanlı ve/veya biyometrik tabanlı kimlik doğrulamayı içermektedir. Basit güvensiz parola, omuz sörfü, hırsızlık suçu ve iptal edilebilir biyometri gibi çeşitli dezavantajlara karşı hassastırlar(Khalifa vd, 2013). Bilişsel Biyometri veya elektro fizyoloji, sadece biyo-işaretler (beyin sinyalleri gibi) kullanan modalitelerin kimlik bilgisi kaynağı olarak kullanıldığı yerlerde, bu zayıflıklar için bir çözüm sunmaktadır (Karthikeyan ve Sabarigiri,2011; Svogor ve Kisasondi,2012).

Elektro fizyolojinin fizibilitesini araştırmadaki amaç biyo-işaretlerin dış gözlemciler tarafından rasgele elde edilememesidir. Ayrıca engelli hastalar veya ilişkili fiziksel özelliği olmayan kullanıcılar için de büyük bir değer olabilir(Revettd vd, 2010). Bu durum, bu tür sinyallerin sentezlenmesini zorlaştırır ve bu nedenle biyometrik sistemlerin sahtecilik saldırılarına karşı direncini artırır. Biyometrik bir modalite olarak elektroensefalogramın (EEG) yanı sıra, yetkili kullanıcı harici zorlama koşullarında gizli uyarı göndermek için de kullanılabilir (Su vd,2012). Bazı araştırmalar, akıllı sürüş sistemlerinin bir parçası olarak sürüş davranışından kaynaklanan EEG sinyalini doğrulamayı düşünmüştür. Nakanishi ve diğerlerinin (2011, 2013)'deki çalışmalarında, yazarlar, talep üzerine sürücü kimliğini doğrulamak için zihinsel görevli koşuluyla basitleştirilmiş bir sürüş simülatörü kullanmışlardır. Bilinçsiz sürücü kimlik doğrulaması ise Nakanishi ve diğerlerinin (2012) çalışmasında gerçekleştirilmiştir.

### **Sonuç olarak;**

Bu çalışmada, insan bilgisayar etkileşimi kapsamında beyin bilgisayar ara yüzleri incelenmiş ve BBA'nın hangi amaçlar doğrultusunda kullanıldığı, neden kullanma ihtiyacının doğduğu, hangi bileşenlere sahip olduğu ve uygulama alanlarının neler olduğu ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

BBA teknolojisinin; sadece sağlık alanında değil; reklam, iletişim, akıllı uygulamalar, eğitim, oyun, eğlence, güvenlik, kimlik denetimi gibi birçok alanda kullanılacağı, yakın gelecekte cihazların, beyin sinyalleri aracılığıyla bizim isteklerimizi anlayacakları ve düşüncelerimiz doğrultusunda çalışacakları öngörülmektedir. Bu konuda halen sürdürülmekte olan çalışmalar da mevcuttur.

## KAYNAKÇA

- A. Kübler ve K.R. Müller. (2007). “*An introduction to brain computer interfacing*” In Guido Dornhege, Jose del R. Millán, Thilo Hinterberger, Dennis McFarland, and Klaus-Robert Müller, editors, *Toward Brain-Computer Interfacing*, pages 1-25. MIT press, Cambridge, MA.
- Abdulkader, S. N., Atia, A., & Mostafa, M. S. M. (2015). “*Brain computer interfacing: Applications and challenges*”. *Egyptian Informatics Journal*, 16(2), 213-230.
- Anderson, C. W., & Sijercic, Z. (1996). “*Classification of EEG signals from four subjects during five mental tasks*”. In *Solving engineering problems with neural networks: Proceedings Of The Conference on Engineering Applications in Neural Networks (EANN'96)* (pp. 407-414). Turkey.
- Ang KK, Guan C, Sui Geok Chua K, Ang BT, Kuah C, Wang C, Phua KS, Chin ZY, Zhang H. (2010). “*Clinical study of neurorehabilitation in stroke using eeg-based motor imagery braincomputer interface with robotic feedback*”. In: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*; p. 5549–52.
- Argunşah, A.Ö. (2006). “*Beyinden Bilgisayara Bir Yol: Beyin Bilgisayar Arayüzü*”, [http://www.emo.org.tr/ekler/a130f1dc6f0c829\\_ek.pdf?dergi=429](http://www.emo.org.tr/ekler/a130f1dc6f0c829_ek.pdf?dergi=429).
- Aydemir, Ö., Kaykçıoğlu T. (2009). “*EEG Tabanlı Beyin Bilgisayar Arayüzleri*”, *Akademik Bilişim'09 - XI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri* 11-13 Şubat, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Behm, A., Kollotzek, M. A., & Hüske, F. (2006). *Brain Computer Interfaces—Controlling computers by thoughts*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.187.9534&rep=rep1&type=pdf>.
- Bonnet L, Lotte F, Le'cuyer A. ( 2013). “*Two brains one game: design and evaluation of a multi-user bci video game based on motor imagery*”. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in games*, 5(2), 185-198.
- Brumberg JS, Nieto-Castanon A, Kennedy PR, Guenther FH. (2010). “*Brain-computer interfaces for speech communication*”. *Speech Commun*; 52(4):367–79.
- Chetan S. Nayak; Arayamparambil C. Anilkumar. (2019). *EEG Normal Waveforms*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539805/>

- Contreras-Vidal JL, Presacco A, Agashe H, Paek A. (2012). “*Restoration of whole body movement: toward a noninvasive brain-machine interface system*”. Pulse, IEEE 2012;3(1):34–7.
- Demirci, E. (2011), “*Beyin Dalgalarıyla Oyun Oynamak*”, TÜBİTAK Bilim Teknik Dergisi, Mart, 44 (520), 18-24.
- Donchin E, Spencer KM, Wijesinghe R. (2000). *The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface*. IEEE Trans Rehabil Eng 8:174–179.
- Donchin E. (1981). *Surprise!...Surprise?* Psychophysiology 18:493–513.
- F. Piccione, F. Giorgi, P. Tonin et al. (2006). “*P300-based brain computer interface: Reliability and performance in healthy and paralysed participants*”, Clin Neurophysiol 117 (3), 531-537.
- Fabiani M, Gratton G, Karis D, Donchin E. (1987). *Definition, identification and reliability of the P300 component of the event-related brain potential*. Ackles PK, Jennings JR, Coles MGH, editors. Advances in psychophysiology, vol. 2. New York, NY: JAI Press pp. 1–78.
- Farwell LA, Donchin E.(1988). *Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials*. Electroenceph clin Neurophysiol 70:510–523.
- Fatourechi, M., Bashashati, A., Ward, R., ve Birch, G. (2007). “*EMG and EOG artifacts in brain computer interface systems: A survey*”. Clinical Neurophysiology, 118,3. 480–494.
- Hyvärinen, A. & Oja, E. (2000). “*Independent component analysis: algorithms and applications*”. Neural networks, 13(4-5), 411-430.
- İşcan, Z. (2009). “*Elektroensefalogram (EEG) ve Uyarılmış Potansiyel (UP) İşaretlerinin Ölçülmesi*”, Tıp Elektronikine Giriş Ders Sunusu, İTÜ.
- Jones CL, Wang F, Morrison R, N.Sarkar N, Kamper DG., (2014). “*Design and development of the cable actuated finger exoskeleton for hand rehabilitation follow, ing stroke*”. IEEE Syst J 2014.
- Karthikeyan DT, Sabarigiri B. (2011). “*Enhancement of multi-modal biometric authentication based on iris and brain neuro image coding*”. Int J Biometrics Bioinform (IJBB);5(5):249–56.
- Khalifa W, Salem A, Roushdy M, Revett K. (2012). “*A survey of EEG based user authentication schemes*”. In: Informatics and Systems (INFOS), 8th International Conference on. IEEE; 2012. p. BIO–55.
- L.D. Liao, C.Y. Chen, I.J. Wang, S.F. Chen, S.Y. Li, B.W. Chen, J.Y. Chang, C.T. Lin. (2012). “*Gaming control using a wearable and wireless EEG-*



- based brain-computer interface device with novel dry foam-based sensors". *J Neuroeng Rehabil.*, 28, 9:5.
- Lelievre Y, Washizawa Y, Rutkowski TM. (2013). "Single trial BCI classification accuracy improvement for the novel virtual sound movement-based spatial auditory paradigm". In: Signal and information processing association annual summit and conference (APSIPA), Asia-Pacific. IEEE; 2013. p. 1–6.
- Lemm,S., Schafer,C. ve Curio G. (2004). "BCI competition 2003–data set III: probabilistic modeling of sensorimotor mu rhythms for classification of imaginary hand movements", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51. 1077–80.
- Leuthardt, E. C., Schalk, G., Wolpaw, J. R., Ojemann, J. G., & Moran, D. W. (2004). "A brain–computer interface using electrocorticographic signals in humans". *Journal of neural engineering*, 1(2), 63.
- Lin C-T, Lin B-S, Lin F-C, Chang C-J. (2012). "Brain computer interface-based smart living environmental auto-adjustment control system in UpnP home networking". *IEEE Syst J* 2012.
- Márquez, B. Y., Alanis, A., Lopez, M. Á., & Magdaleno-Palencia, J. S. (2012). "Sport education based technology: Stress measurement in competence". In *e-Learning and e-Technologies in Education (ICEEE)*, 2012 International Conference on (pp. 247-252). IEEE.
- McFarland, D.J., McCane, L.M., David, S.V., ve Wolpaw, J. R., (1997). "Spatial filter selection for EEG-based communication", *Electroencephalographic Clinical Neurophysiology*, 103, 3 (1997a) 386–394.
- Mishchenko, Y., Murat, K. A. Y. A., & Cömert, M. (2017). "Beyin Bilgisayar Arayüzü İçin Dvm Makine Öğrenme Yöntemi Kullanılarak EEG Verilerinden Sağ Ve Sol El Hareket Düşüncelerinin Tespiti". *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10(3), 1-20.
- N. Birbaumer. (2003). "Just short of telepathy: can you interact with the outside world if you can't even blink an eye?", *Psychology Today*.
- Na, L., Weiwei, S., Lifeng, C., Wensheng, H., & Zhengqin, Y. (2011). "Recording visual cortex electrical activity through flexible microelectrode array implanted on duramater endocranium of cats". *Journal of Third Military Medical University*, (11), 6.
- Nakanishi I, Baba S, Li S. (2011). "Evaluation of brain waves as biometrics for driver authentication using simplified driving simulator". In: *Biometrics and Kansei Engineering (ICBAKE)*, International Conference on. IEEE; 2011 Cincotti. p. 71–76.

- Nakanishi I, Baba S, Ozaki K, Li S. (2013). “Using brain waves as transparent biometrics for on-demand driver authentication”. *Int J Biometrics*;5(3):288–305.
- Nakanishi I, Ozaki K, Li S. (2012). “Evaluation of the brain wave as biometrics in a simulated driving environment”. In: Biometrics Special Interest Group (BIOSIG), BIOSIG-Proceedings of the International Conference of the. IEEE; 2012. p. 1–5.
- Polich J. (1999). *P300 in clinical applications*. In: Niedermeyer E, Lopes da Silva FH, editors. *Electroencephalography: basic principles, clinical applications and related fields*, 4th ed. Baltimore, MD: Williams and Wilkins. pp. 1073–1091.
- Poulos M, Felekis T, Evangelou A. (2012). “Is it possible to extract a fingerprint for early breast cancer via EEG analysis?”. *Med Hypotheses*;78(6):711–6.
- Prataksita N, Lin Y-T, Chou H-C, Kuo C-H. (2014). “Brain-robot control interface: Development and application”. In: Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB), 2014 IEEE International Symposium on. IEEE; p. 1–4.
- Presacco A, Forrester L, Contreras-Vidal JL. (2011). “Towards a noninvasive brain-machine interface system to restore gait function in humans”. In: Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE; p. 4588–91.
- Ramoser, H., Muller-Gerking, J., ve Pfurtscheller, G. (2000). “Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand movement”. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 8,4. 441–446.
- Regenbrecht H, Hoermann S, Ott C, Muller L, Franz E. (2014). “Manipulating the experience of reality for rehabilitation applications”. *Proc IEEE* 2014;102(2):170–84.
- Revett K, Deravi F, Sirlantzis K. (2010). “Biosignals for user authentication-towards cognitive biometrics?”. In: Emerging Security Technologies (EST), International Conference on. IEEE; 2010. p. 71–76.
- S. H. O'Regan, (2013). “Artefact detection and removal algorithms for EEG diagnostic systems”, Ph.D Thesis, University College Cork, Available online at <https://cora.ucc.ie/handle/10468/1391>.
- Selvam VS, Shenbagadevi S. (2011). “Brain tumor detection using scalp eeg with modified wavelet-ica and multi layer feed forward neural network”. In: Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE. p. 6104–09.

- Sevinç E. (2006). “*Beyin Bilgisayar Arayüzleri*”, [http://www.rehabilitasyon.com/action/makale/1/Beyin\\_Bilgisayar\\_Arayuzleri-2299](http://www.rehabilitasyon.com/action/makale/1/Beyin_Bilgisayar_Arayuzleri-2299).
- Sharanreddy M, Kulkarni P. (2013a). “*Detection of primary brain tumor present in eeg signal using wavelet transform and neural network*”. *Int J Biol Med Res*;4(1).
- Sharanreddy M, Kulkarni P. (2013b). “*Automated eeg signal analysis for identification of epilepsy seizures and brain tumour*”. *J Med Eng Technol*;37(8):511–9
- Su F, Zhou H, Feng Z, Ma J. A. (2012). “*Biometric-based covert warning system using EEG*”. In: *Biometrics (ICB), 2012 5th IAPR International Conference on*. IEEE; 2012. p. 342–47
- Sutter EE, Tran D. *The field topography of ERG components in man*. *Vision Res* 1992;32:433–446.
- Sutter EE. (1992). *The brain response interface: communication through visually induced electrical brain responses*. *J Microcomput Appl* 15:31–45.
- Sutton S, Braren M, Zubin J, John ER. (1965). *Evoked correlates of stimulus uncertainty*. *Science* 1965;150:1187–1188.
- Svogor I, Kisasondi T. (2012). “*Two factor authentication using eeg augmented passwords*”. In: *Information Technology Interfaces (ITI), Proceedings of the ITI 2012, 34th International Conference on*. IEEE; 2012. p. 373–78.
- Tan DS, Nijholt A. (2010). “*Brain-computer interfaces: applying our minds to human-computer interaction*”. Springer; 2010.
- Vecchiato, G., Babiloni, F., Astolfi, L., Toppi, J., Cherubino, P., Dai, J., ... & Wei, D. (2011). “*Enhance of theta EEG spectral activity related to the memorization of commercial advertisings in Chinese and Italian subjects*”. In *Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2011 4th International Conference on (Vol. 3, pp. 1491-1494)*. IEEE.
- Wang W, Degenhart AD, Sudre GP, Pomerleau DA, TylerKabara EC, (2011). “*Decoding semantic information from human electrocorticographic (ecog) signals*”. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*. p. 6294–98.
- Wessel M (2006). “*Pioneering research into Brain Computer Interfaces*”. Delft University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science.

- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). *Brain-computer interfaces for communication and control*. *Clinical neurophysiology*, 113(6), 767-791.
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D.J., Pfurtscheller, G., and Vaughan, T. M. (2002). “*Brain-computer interfaces for communication and control*”. *Clinical Neurophysiology*, 113:767–791.
- Yoshioka, M., Inoue, T., & Ozawa, J. (2012). “*Brain signal pattern of engrossed subjects using near infrared spectroscopy (NIRS) and its application to TV commercial evaluation*”. In *Neural Networks (IJCNN), The 2012 International Joint Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Zotev, V., Phillips, R., Yuan, H., Misaki, M., & Bodurka, J. (2014). “*Self-regulation of human brain activity using simultaneous real-time fMRI and EEG neurofeedback*”. *NeuroImage*, 85, 985-995

**YOL YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE  
YOL  
GEOMETRİSİNİN SÜRÜCÜLER  
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**BÖLÜM  
20**

**Sercan SERİN<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü [sercanserin@duzce.edu.tr](mailto:sercanserin@duzce.edu.tr)



## GİRİŞ

Ulaştırma; bir eşyanın bir nesnenin veya bir insanın bir noktadan başka bir noktaya taşınması olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, taşıma malların marjinal faydalarının nispi olarak düşük olduğu yerlerden, daha yüksek olduğu yerlere taşınarak, yer ve zaman faydası meydana getiren bir süreç olarak da tarif edilmektedir [1].

Kara ulaşımı ilk önce demiryollarının oluşturulmasıyla başlamış, bir noktadan diğer noktaya ulaşma isteklerinin artması sonucunda ise karayolu taşımacılığı ön plana çıkmıştır. Zaman içerisinde seri bir şekilde geliştirilerek hem insan hem yük taşımacılığı demiryolundan ziyade karayoluna yönelmiştir. Bu durum hem karayollarının özelliklerinin hem de karayolunda kullanılacak olan araçların gelişmesini sağlamıştır [2].

Karayolu üstyapıları genel olarak esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç kısma ayrılır. Esnek üstyapılar genelleştirilmiş bir ifade ile, zemin sıkıştırılması yapılmış doğal zemin üzerine temel-alttemel tabakaları yerleştirilip üzerine bağlayıcı olarak bitümün kullanılarak kaplama tabakası yapılmasıyla oluşur [3]. Rijit üstyapılar, doğal zemin üstüne yerleştirilen bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılan beton kaplaması tabakasından oluşur [3]. Kompozit kaplamalar ise, asfalt betonu ve portland çimentosu betonu kaplamaların birleşiminden oluşur [4].

Dünyada ulaşım için tercih edilen en etkili yol karayoludur. Türkiye’de de bu durum benzerdir. %90 gibi bir oranla karayolu tercih edilmektedir. Bu durum da kazalarda ölüm oranının en yüksek olmasında etkili olmaktadır [5].

Karayolları Trafik Kanunu’nda trafik kazası; karayollarında hareket halinde olan, bir veya birden çok aracın karıştığı ölüm, yaralanma veya maddi zararlar sonucunda meydana gelen olay olarak tanımlanır [6]. Klasik kaza tanımlarının hemen hepsinde anlatılmak istenen; “önceden planlanmayan, beklenmeyen ve bilinmeyen bir zamanda ortaya çıkan, can ve mal kaybı ile sonuçlanan kötü olaydır. Kaza tanımının, böyle yapılması; bir kaçınılmazlık içermektedir. Bu algının değiştirilmesi kazayı; “bilinen yanlış davranış ve ihmaller veya nedenler zincirinin son halkası olup, daha önce alınacak önlemler ile kaçınılabılır ve korunulabilir bir olaydır” şeklinde tanımlanmaktan geçmektedir [7].

Kazalardan kaynaklanan üç çeşit hasar tipi vardır. Bunlar; sürücülerde veya kazaya karışan kişilerde ölüm de dahil olmak üzere oluşan fiziksel hasarlar, araçlara, yol elemanlarına gelen zararlardan oluşan maddi hasarlar, kazadan sonra kazaya karışan kişilerde oluşan psikolojik hasarlar [8].

Trafik kazaları hem Türkiye’de hem de dünyada sürekli gündemde olan önemli sorunlardandır. Alınan önlemlere rağmen tamamen bir çözüm bulunabilmiş değildir. Bu konuyu irdeleyerek bilimsel olarak araştırmak üzere bir çözüm yoluna gidilebileceği düşünülmüştür ve yol kaplamasının sürücü ve kazalar üzerindeki etkisine değinilmiştir [2].

Austroroads (1994)’e göre kazaların ana nedenleri olarak; yaya ve/veya sürücülerin psikolojik karakteristiklerinden kaynaklanan insan kaynaklı, kullanılan araçların bakım-onarımlarının tam olarak yapılmamasından, kronik hatalarından kaynaklanan hataları içine alan araç kaynaklı, yol tasarımı ve bakımını, hava şartlarını, trafik işaret ve levhalarını da kapsayan yol ve çevre kaynaklı sebepler olarak gruplandırılmıştır [9].

Deery (1999) ise çalışmasında acemi sürücülerin trafikte oluşturduğu riskleri ölçmeye çalışmıştır. Çalışmanın sonuçları; yaşı genç olan araç sürücülerinin araç kullanma ve kontrolünü sağlamak için gerekli beceriyi hızlı ve kolay bir şekilde öğrenmesine rağmen güvenli sürüş için gereken ileri düzeyde algı ve becerileri kazanması uzun sürmekte olduğu saptanmıştır [10].

Hayakawa, vd., (2000), Amerika Birleşik Devletlerinde ve Japonya ülkesinde yaşayanların trafik güvenliklerinin ve trafikte algılamış oldukları risk faktöründeki farklılıkları ortaya koymaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda Japonya’da meydana gelen ölümle sonuçlanan trafik kazalarının çoğunluğu araç, bisiklet ve motor sürücüleri ile yayalar arasında gerçekleşmektedir. ABD’de ise meydana gelen ölümle sonuçlanan kazaların çoğunluğu araba sürücüleri arasında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Oluşan bu farklılığın nedeni de kültür farklılığı ile araç sürücülerinin trafikte algıladığı tehlikenin farklı olduğunu ortaya koymuştur [11].

Medina, vd., (2007) yapmış oldukları çalışmada yayaların trafikte soforlere gereken özeni gösterdiklerini fakat, binek araç sürücülerinin yarısının ve ağır vasıta sürücülerinin üçte birinin trafikte yayalar adına umursamaz ve dikkatsiz davrandıklarını, motorlu araç sürücülerinin ise



yayaların yarısından fazlasının karşıdan karşıya geçerken çok dikkatsiz davrandıklarını bildirmiştir [12].

Braitman vd. (2008) yapılan çalışmada genç sürücülerin aşırı hız, çabuk kontrol kaybı ve trafik kontrollerine uymamaları sonucunda kazalara karışma oranlarının yüksek olduğunu belirtmiştir [13].

Rosenbloom, vd., (2008) çalışmalarında trafikte oluşan tehlikenin yaş ve cinsiyete göre farklılıklar gösterdiğini, ayrıca eğitimlerin düzenli verildiğinde algılanacak olan tehlikenin arttırıldığını tespit etmiştir [14].

Boccia (2010) yapmış olduğu çalışmada sürücüler üzerinde gerçekleştirilen araştırmalara göre sürücülerin psikolojisinin yolun tasarımı için gerekli bilgileri verebileceğini tespit etmiştir [15].

SARTRE 4 (2011) projesi kapsamında 19 Avrupa ülkesinin trafik konusundaki düşüncelerinin ölçüldüğü çalışmada motorlu taşıt kullanıcıları ve diğerleri (yayalar, bisiklet sürücüleri ve toplu taşımayı kullanan insanlar) kullanıcılar üzerinde araştırma yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre kişilerin tehlike algıları genel olarak alkol vb. uyuşturucular etkisinde araç kullanma, aşırı hızlı sürüş ve eğitimdeki eksiklikler konuları üzerinde gerçekleşmektedir. Aynı zamanda erkek ve gençlerin trafikte kadınlara göre daha olumsuz tutum ve davranışlar içinde olduklarını belirtmiştir [16].

İngiltere, Essex Üniversitesi veri arşivi aracılığıyla İngiltere’de yaşanan kazaların verileri alınmış ve raporları incelenmiştir. Raporda kazaya neden olan faktörler olarak; hatalı trafik tabelaları, yol kusurları, araç kusurları olarak belirlenmiştir [17].

Trafik kazaları, taşıt ya da yayaların karıştığı kuralsız hareketler sonucu oluşan olgulardır. Kazaların genel nedeni olarak resmi kayıtlarda beş ana unsur tanımlanmıştır. Bunlar; sürücü kusuru, yolcu kusuru, yaya kusuru, yol kusuru, araç kusuru olarak belirtilmiştir. Yine resmi kayıtlara göre, bu kusurlar içinde sürücü kusurlarının %96.09, yolcu kusuru %0.22, yaya kusuru %2.94, yol kusuru %0.38, araç kusuru ise 0.37 oranında olduğu belirtilmektedir (TUİK).

Bu nedenle çalışmada trafik kazalarında önemli derecede rol oynayan sürücü faktörü ele alınarak, sürücü niteliklerinin kazalardaki rolü araştırılmıştır. Sürücünün yaşı, cinsiyeti, öğrenim durumu ve gelir durumu gibi demografik özellikleri ile trafik kazalarındaki etkisi,

Türkiye'de bir grup sürücü üzerinde yapılan anket çalışmasıyla değerlendirilmiştir.

## YÖNTEM VE METOT

Bu çalışma yol yüzey özelliklerinin sürücü psikolojisi üzerindeki etkileri ile trafik kaza risklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Sanal ortamda internet tabanlı olarak hazırlanan sorular ile ülkenin farklı bölgelerinden ve kesiminden görüşler alınarak anket çalışması olarak yapılmıştır.

Bu kapsamda çalışmada katılımcıların demografik özelliklerinin belirlenmesine yönelik 4 adet soru sorulmuştur. Bunun yanında 3 adet çoktan seçmeli 1 adet 4'lü likert ve 14 adet 3'lü likert sorudan oluşan toplamda 22 soruluk bir anket uygulanmıştır. Sorulan soruların 11 tanesi yol yüzey özellikleri hakkındaki düşünceler ve 7 tanesi yol özelliklerinin sürücüler üzerindeki etkilerini araştırmak üzere hazırlanmıştır. Anket çalışması grafikler sabit bir seviyeye gelinceye kadar devam ettirilmiştir. Türkiye'nin farklı kesimlerinden araç sürücülerin katılımıyla toplamda 500 kişinin katılımıyla tamamlanmıştır.

## ARAŞTIRMA BULGULARI

Yapılan araştırma sonucunda araştırmaya katılan kişilerin %30,4 kadın, %69,6'sı ise erkek olduğu görülmektedir (Tablo 1).

*Tablo 1. Ankete katılanların cinsiyet dağılımı.*

Yanıtlar	n	%
<b>Erkek</b>	348	69,6
<b>Kadın</b>	152	30,4
$\Sigma$	500	100

Katılımcıların %44,6'sı 18-24 yaş arası, %35'i 25-34 yaş arası, %16,6'sı 35-44 yaş arası, %3,2'si 45-54 yaş arası ve %0,6'sı da 55 yaş ve üstü grubundadır (Tablo 2).

*Tablo 2. Ankete katılanların yaş dağılımı.*

Yanıtlar	n	%
<b>18-24 yaş arası</b>	223	44,6
<b>25-34 yaş arası</b>	175	35

<b>35-44 yaş arası</b>	83	16,6
<b>45-54 yaş arası</b>	16	3,2
<b>55 yaş üstü</b>	3	0,6

Ankete katılanların eğitim durumlarına bakıldığında %2,4'ü ilköğretim, %14,8'i lise, %72,2'si üniversite ve %10,6'sı yüksek lisans-doktora okumakta veya mezun olmuş durumdadır (Tablo 3).

*Tablo 3. Ankete katılanların eğitim durumu.*

<b>Yanıtlar</b>	<b>n</b>	<b>%</b>
<b>İlköğretim</b>	12	2,4
<b>Lise</b>	74	14,8
<b>Üniversite</b>	361	72,2
<b>Yüksek lisans- doktora</b>	53	10,6
<b>Σ</b>	500	100

Katılımcıların meslek gruplarına bakıldığında %38,2'si öğrenci, %3,4'ü uzun yol şoförü, %47,2'si İşçi-memur, %9,6'sı ev hanımı ve geriye kalan %1,6'sı ise emeklidir (Tablo 4). Çalışma kapsamında meslek grubu belirlemede uzun yol şoförlerinin eğilimlerinin özellikle merak uyandırması nedeniyle İşçi-memur grubundan ayrı olarak ele alınmıştır.

*Tablo 4. Ankete katılanların meslek durumu.*

<b>Yanıtlar</b>	<b>n</b>	<b>%</b>
<b>Ev hanımı</b>	48	9,6
<b>İşçi-memur</b>	236	47,2
<b>Şoför</b>	17	3,4
<b>Öğrenci</b>	191	38,2
<b>Emekli</b>	8	1,6
<b>Σ</b>	500	100

Çalışmaya dahil olan katılımcılara “Yaptığınız yolculuklarda aşağıdaki kaplama türlerinden hangisinde titreşim, gürültü vb. rahatsızlıkları en az hissedersiniz?” sorusu yöneltilmiş çoktan seçmeli cevaplar içinden değerlendirme yapılması istenmiştir (Tablo 5). Ayrıca

seçeneklerdeki bazı özel terim ve kavramların tanımları detaylıca sunulmuştur (sathi, stabilize vb.).

*Tablo 5. Katılımcıların titreşim, gürültü vb. rahatsızlıkları en az hissettiği kaplama tercihi.*

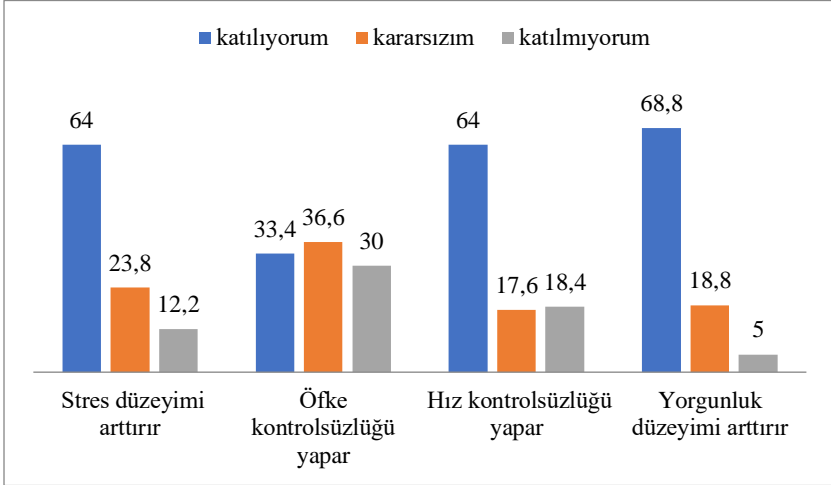
Yanıtlar	n	%
<b>Sıcak asfalt karışımli kaplama yol</b>	399	79,8
<b>Beton kaplama yol</b>	49	9,8
<b>Sathi kaplama yol</b>	29	5,8
<b>Stabilize kaplama yol</b>	23	4,6
$\Sigma$	500	100

Katılımcılara titreşim, gürültü vb. rahatsızlıkları en az hissettiği kaplama tercihi sorulmuştur. Yanıtlar incelendiğinde %79,8 ile sıcak asfalt karışımli kaplama yol türü olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre sıcak asfalt karışımli kaplama yolun seçilme nedenlerinden en önemlisi konforlu ve güvenli olmasıdır. Sıcak asfalt karışımli kaplama yol üzerinde seyir ederken yolun gürültü çıkarmaması sürücü üzerinde pozitif yönde etki yarattığı düşünülmektedir.

Beton yolların yüzey özellikleri ile araçların yakıt harcaması arasında doğrudan bir ilişki olduğu bilinmektedir. Bu duruma yol açan neden ise araçların tekerleklerinin direkt olarak maruz kaldığı yuvarlanma direncidir. Yuvarlanma direnci, büyük oranda, tekerlek lastiğinin bir yol yüzeyini aşması için harcaması gerektiği güce bağlıdır [18].

Şekil 1’de yol geometrik özelliklerinin sürücüleri nasıl etkilediğine dair sonuçlar sunulmuştur. Grafik incelendiğinde yol geometrik özelliklerinin bozuk olmasının sürücüler üzerinde %68,8 ile en yüksek oranda yorgunluk yarattığı tespit edilmiştir. Sürücülerin %5’inin ise bu durumdan etkilenmediği görülmektedir. Katılımcıların %64’ü yol geometrik özelliklerinin bozuk olmasının stres düzeyini arttırdığını düşünürken %12,2’si etkilenmeyeceğini belirtmiştir. Katılımcıların %64’ü yol geometrik özelliklerinin bozuk olmasının hız kontrolsüzlüğü yaptığını ve %18,4’ü ise yapmadığını ifade etmiştir. Katılımcıların %33,4 yol geometrik özelliklerinin bozuk olmasının öfke kontrolsüzlüğüne sebep olduğunu, %30’u ise etkilemediğini belirtmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında yolun geometrisinin bozuk olması sürücülerin en çok yorgunluk düzeylerini arttırdığı görülmektedir. Sürekli aracın hızını,

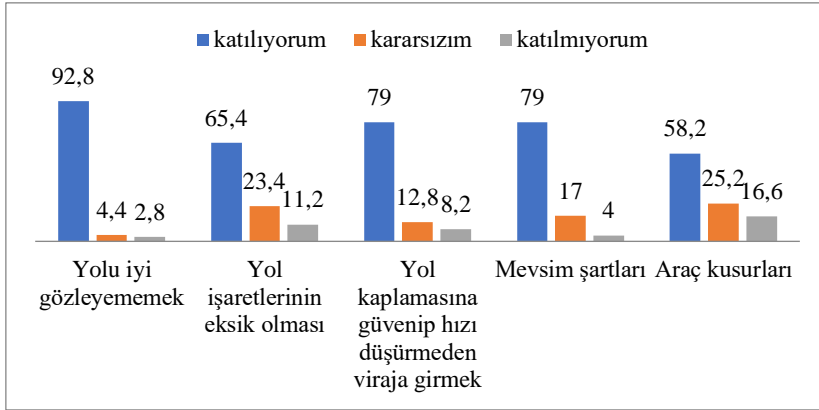
direksiyonunu, vitesini ayarlamak insanları bedensel olarak yormaktadır. Yolu geometrisine uyum sağlamakta ruhsal olarak sürücülerin yorgunluğunu arttırmaktadır. Bu soru tek başlık altında 4 seçenek sunulup 3'lü likert olarak sorulmuştur.



Şekil 1. Yolu geometrik özellikleri ve sürücüler üzerindeki etkisi.

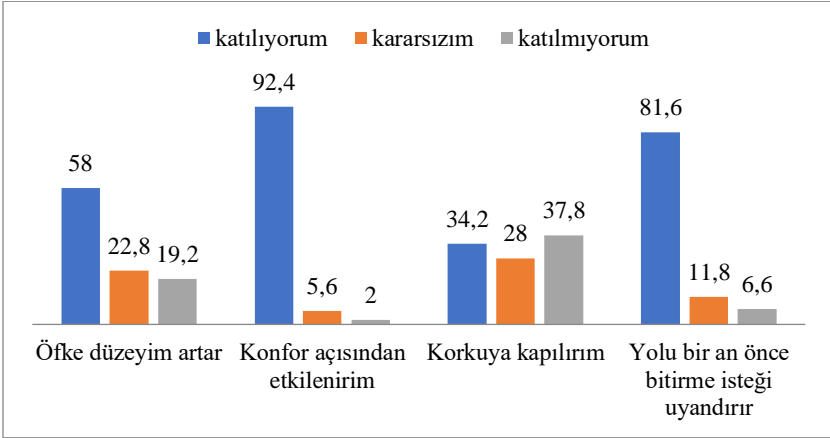
Şekil 2'de aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza olmasının nedenlerine dair görüşler sunulmuştur. Grafik incelendiğinde katılımcıların %92,8'i aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza olmasının nedeni yolu iyi gözlemleyememek olduğunu ifade etmiş, %2,8 ise bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %79'u aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza olmasının yol kaplamasına güvenip hızı düşürmeden viraja girmek olarak görmüştür ve %8,2 katılımcı bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %79'u aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza olmasının nedenini mevsim şartları olarak nitelendirmiş, %4 oranında katılımcı ise bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %65,4 aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza olmasının nedenini yol işaretlerinin eksik olması olarak ifade etmiş, %11,2 si bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %58,2'si aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza olmasının nedenini araç kusurları olarak düşünmüştür ve %16,6'sı bu görüşe katılmamıştır. Bu sonuçlara bakıldığında sürücülere göre aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza yapılmasının en önemli nedeni yolu iyi gözlemleyememek olduğu belirlenmiştir. Eğimli ve virajlı yollara girilince karşıdan gelen aracı görememe refüje yaklaşma gibi yolu gözlemleyememe sorunu yüzünden kazalar meydana

gelmektedir. Bu soru tek başlık altında 5 seçenek sunulup 3'lü likert olarak sorulmuştur.



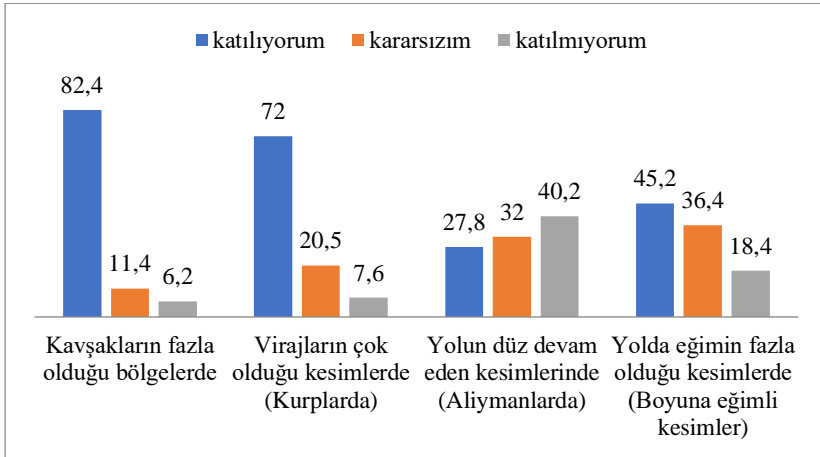
Şekil 2. Aşırı eğim ve virajların çok olduğu yollarda kaza yapma nedenleri

Şekil 3'te Hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek sürücülerini nasıl etkilediğine dair görüşler sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, katılımcıların %92,4'ü hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek konfor açısından etkileyeceğini düşünürken %2'si bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %81,6'sı hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek yolu bir an önce bitirme isteği uyandıracaklarını düşünürken %6,6'sı bu duruma katılmamaktadır. Katılımcıların %58'i hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek öfke düzeyini arttıracaklarını düşünmüştür ve %19,2 si bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %34,2'si hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek konfor açısından etkileneceğini düşünürken %37,8'lik bir çoğunluk bu düşünceye katılmamıştır. Bu sonuçlara bakıldığında hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek sürücülerini konfor açısından etkilediği belirlenmiştir. Yolların bozuk olması, banket genişliğinin az olması, yolların tek yönlü ve dar olması sürücüye psikolojik olarak kötü bir sürüş deneyimi yaşatır. Yolun bir an önce bitirmek için hızını arttıran sürücüler kazalara daha fazla yol açmaktadır. Bu soru tek başlık altında 4 seçenek sunulup 3'lü likert olarak sorulmuştur.



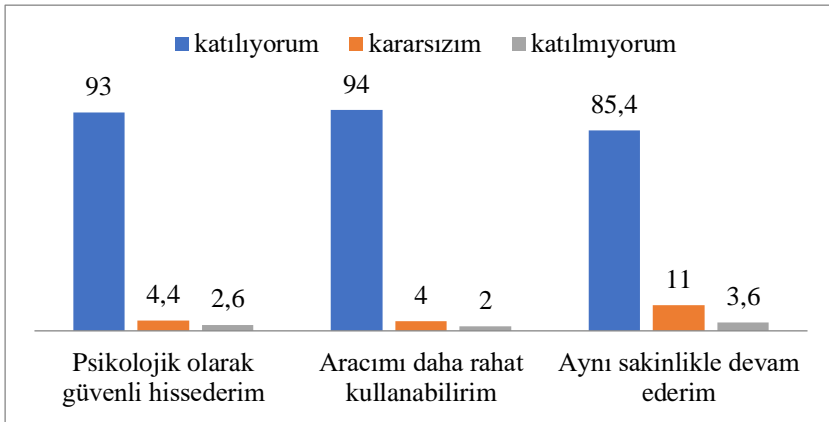
Şekil 3. Hizmet düzeyi düşük veya bozuk yolda seyahat etmenin katılımcılar üzerindeki etkileri.

Şekil 4'te kazaların karayollarının en çok hangi bölgelerinde meydana geldiğine dair görüşler sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, katılımcıların %82,4'ü kazaların karayollarında kavşakların fazla olduğu bölgelerinde olduğunu düşünürken %6,2'si bu duruma katılmamıştır. Katılımcıların %72'si kazaların virajların çok olduğu kesimlerde olduğunu savunurken %7,6'sı bu görüşe katılmamıştır. Katılımcıların %45,2'si kazaların yolda eğimin fazla olduğu kesimlerinde olduğunu düşünürken %18,4'ü bu görüşe katılmamaktadır. Katılımcıların %27,8'i kazaların yolun düz devam eden kesimlerinde meydana geldiğini söylerken %40,2 çoğunlukla bu görüşe katılmamaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında, Karayollarının genellikle kavşaklarının fazla olduğu bölgelerinde meydana geldiği belirlenmiştir. Yapılan araştırmalarda ülkemizde en çok kavşaklarda kaza olduğu ispatlanmıştır. Çok fazla araç olması, geçiş önceliği, işaret eksikleri ve virajların açısının fazla olması bu kazalara sebep olan faktörlerdendir. Bu soru tek başlık altında 4 seçenek sunulup 3'lü likert olarak sorulmuştur.



Şekil 4. Katılımcıların kazalar karayollarının en çok hangi bölgelerinde meydana geldiğine dair görüşleri.

Şekil 5’te katılımcılara karp geometrisinin düzgün ve rahat olması sizi nasıl etkiler diye sorulmuştur. Alınan veriler incelendiğinde karp geometrisinin düzgün ve rahat olması hep olumlu yönde etki yapmıştır. Bu soru tek başlık altında 3 seçenek sunulup 3’lü likert uygulanmıştır.



Şekil 5. Kullandığınız yoldaki virajın (kurb) geometrisinin düzgün ve rahat olması sizi nasıl etkiler?

Tablo 6’da Katılımcı yaşı ile “Seyahat edilen yolun aşırı virajlı olması daha yavaş gitmeye neden olur” seçeneğinin analizleri yapılmıştır ve sonuçlar incelendiğinde sürücülerin yaşı arttıkça daha yavaş gittikleri görülmektedir.



Tablo 6. Katılımcı yaşı ile “Seyahat edilen yolun aşırı virajlı olması daha ya-  
yaş gitmeye neden olur” seçeneklerinin analizleri

			Katılıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum	
Yaşınız	18 yaş altı	Count	2	1	0	3
		% within Yaşınız ?	66,7%	33,3%	0,0%	100,0%
		% within Diğer	0,5%	2,3%	0,0%	0,6%
		% of Total	0,4%	0,2%	0,0%	0,6%
	18-24 yaş arası	Count	183	24	13	220
		% within Yaşınız ?	83,2%	10,9%	5,9%	100,0%
		% within Diğer	42,4%	55,8%	52,0%	44,0%
		% of Total	36,6%	4,8%	2,6%	44,0%
	25-34 yaş arası	Count	157	14	4	175
		% within Yaşınız ?	89,7%	8,0%	2,3%	100,0%
		% within Diğer	36,3%	32,6%	16,0%	35,0%
		% of Total	31,4%	2,8%	0,8%	35,0%
35-44 yaş arası	Count	75	0	8	83	
	% within Yaşınız ?	91,4%	0,0%	9,6%	100,0%	
	% within Diğer	16,4%	9,3%	32,0%	16,6%	
	% of Total	14,2%	0,8%	1,6%	16,6%	
45-54 yaş arası	Count	16	0	0	16	
	% within Yaşınız ?	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	
	% within Diğer	3,7%	0,0%	0,0%	3,2%	
	% of Total	3,2%	0,0%	0,0%	3,2%	
55 yaş üstü	Count	3	0	0	3	
	% within Yaşınız ?	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	
	% within Diğer	0,7%	0,0%	0,0%	0,6%	
	% of Total	0,6%	0,0%	0,0%	0,6%	
Σ	Count	432	43	25	500	
	% within Yaşınız ?	86,4%	8,6%	5,0%	100,0%	
	% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% of Total	86,4%	8,6%	5,0%	100,0%	

Tablo 7’de meslek faktörü ve “Seyir halindeyken aracın hızını mevsim şartlarına göre ayarlarım” seçeneğinin analizleri yapılmış, şoförlerin diğer meslek gruplarına oranla daha fazla mevsim şartlarına dikkat ettiği tespit edilmiştir.

Tablo 7. Meslek grupları ve “Seyir halindeyken aracın hızını mevsim şartlarına göre ayarlarım seçeneklerinin” analizleri

		Katılıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum		
Mesleğiniz	Ev hanımı	Count	40	4	4	48
		% within mesleğiniz ?	83,3%	8,3%	8,3%	100,0%
		% within Diğer	9,1%	9,8%	22,2%	9,6%
		% of Total	8,0%	0,8%	0,8%	9,6%
işçi- memur		Count	206	24	6	236
		% within mesleğiniz ?	87,3%	10,2%	2,5%	100,0%
		% within Diğer	46,7%	58,5%	33,3%	47,2%
		% of Total	41,2%	4,8%	1,2%	47,2%
Şoför		Count	17	0	0	17
		% within mesleğiniz ?	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%
		% within Diğer	3,9%	0,0%	0,0%	3,4%
		% of Total	3,4%	0,0%	0,0%	3,4%
Öğrenci		Count	171	13	7	191
		% within mesleğiniz ?	89,5%	6,8%	3,7%	100,0%
		% within Diğer	38,8%	31,7%	38,9%	38,2%
		% of Total	34,2%	2,6%	1,4%	38,2%
Emekli		Count	7	0	1	8
		% within mesleğiniz ?	87,5%	0,0%	12,5%	100,0%
		% within Diğer	1,6%	0,0%	5,6%	1,6%
		% of Total	1,4%	0,0%	0,2%	1,6%
Σ		Count	441	41	18	500
		% within mesleğiniz ?	88,2%	8,2%	3,6%	100,0%
		% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tablo 8’de ‘Eğitim düzeyi ve sizce yol güvenliği açısından sürücülerin kurallara uyması ne kadar önemli’ seçeneğinin analizleri yapılmıştır ve eğitim düzeyinin artması halinde kurallara uyma oranının düştüğü belirlenmiştir.

Tablo 8. “Eğitim düzeyi” ve “Yol güvenliği açısından sürücülerin kurallara uyması ne kadar önemli” seçeneklerinin analizi.

		En önemli		Az önemli		Onemsiz	
		Onemli	Onemli	Onemli	Onemli	Onemli	Onemli
Eğitim düzeyimiz	İlköğretim	Count	11	1	0	0	12
		% within eğitim düzeyimiz ?	91,6%	8,4%	,0%	,0%	100,0%
		% within Diğer?	2,2%	6,3%	,0%	,0%	2,4%
		% of Total	1,6%	0,4%	,0%	,0%	2,4%
	Lise	Count	63	1	2	8	74
		% within eğitim düzeyimiz ?	85,1%	1,4%	2,7%	10,8%	100,0%
		% within Diğer	17,2%	3,1%	5,4%	12,5%	14,8%
		% of Total	12,6%	0,2%	0,4%	1,6%	14,8%
	Üniversite	Count	263	24	22	52	361
		% within eğitim düzeyimiz ?	72,9%	6,6%	6,1%	14,4%	100,0%
		% within Diğer	71,7%	75,0%	59,5%	81,3%	72,2%
		% of Total	52,6%	4,8%	4,4%	10,4%	72,2%
Yüksek lisans- Doktora	Count	33	5	12	3	53	
	% within eğitim düzeyimiz ?	62,3%	9,4%	22,6%	5,7%	100,0%	
	% within Diğer	9,0%	15,6%	32,4%	4,7%	10,6%	
	% of Total	6,6%	1,0%	2,4%	0,6%	10,6%	
Σ	Count	367	32	37	64	500	
	% within eğitim	73,4%	6,4%	7,4%	12,8%	100,0%	
	% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% of Total	73,4%	6,4%	7,4%	12,8%	100,0%	

Tablo 9’da trafikte en çok kimler tehlike yaratır sorusuna cinsiyete göre verilen yanıtlar analiz edilmiştir. “Kurallara uymayan sürücülerin daha fazla tehlikeli olduğu” cevabı hem kadınların hem de erkek sürücülerin ortak tercihi olmuştur.

Tablo 9. Cinsiyet ve “Trafikte en çok kimler tehlike yaratır” seçeneklerinin analizi.

		Uzun araç sürücülere (tr kamyon)	Acemi sürücüler	Hız yapan sürücüler	Trafik kurallarına uymayan sürücüler		
Cinsiyetiniz	Erkek	Count	16	47	27	258	348
		% within cinsiyetiniz ?	4,6%	13,5%	7,8%	74,1%	100,0%
	% of Total	% within Diğer	48,5%	83,9%	51,9%	71,9%	69,6%
		% of Total	3,2%	9,4%	5,4%	51,6%	69,6%
Kadın	Count	Count	17	9	25	101	152
		% within cinsiyetiniz ?	11,2%	5,9%	16,4%	66,4%	100,0%
	% of Total	% Diğer	51,5%	16,1%	48,1%	28,1%	30,4%
		% of Total	3,4%	1,8%	5,0%	20,2%	30,4%
Σ	Count	Count	33	56	52	359	500
		% within cinsiyetiniz ?	6,6%	11,2%	10,4%	71,8%	100,0%
	% of Total	% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	6,6%	11,2%	10,4%	71,8%	100,0%

Tablo 10’da cinsiyetiniz ve yolun geometrik durumuna göre stres düzeyinde ki artış göz önüne alınmıştır ve bulunan veriler incelendiğinde kadın sürücülerin daha fazla strese girdiği belirlenmiştir.

Tablo 10. Cinsiyet ve “Yol kaplamasının bozuk olması gürültüye bağlı stres oluşturur mu?” seçeneği arasındaki analiz

		Katlıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum		
Cinsiyetiniz	Erkek	Count	256	54	38	348
		% within cinsiyetiniz ?	73,6%	15,5%	10,9%	100,0%
	% of Total	% within Diğer	68,4%	69,2%	79,2%	69,6%
		% of Total	51,2%	10,8%	7,6%	69,6%
Kadın	Count	Count	118	24	10	152
		% within cinsiyetiniz ?	77,6%	15,8%	6,6%	100,0%
	% of Total	% within Diğer	31,6%	30,8%	20,8%	30,4%
		% of Total	23,6%	4,8%	2,0%	30,4%
Σ	Count	Count	374	78	48	500
		% within cinsiyetiniz ?	74,8%	15,6%	9,6%	100,0%
	% of Total	% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	74,8%	15,6%	9,6%	100,0%

Tablo 11’de cinsiyet ve geometrisi bozuk yolda daha çok dikkatli olma seçenekleri arasında yapılan analiz sonucunda kadınların erkelere göre daha dikkatli ve temkinli olduğu saptanmıştır. Kadın sürücüler

97,4% ve erkek sürücüler ise 95,4% oranında katılıyorum seçeneğini işaretlemiştir.

*Tablo 11. Cinsiyet ve “Geometrisi bozuk ve görüş kısıtlılığı olan bir viraja yaklaşırken yola daha çok dikkatimi veririm” sorusuna verilen cevapların analizi.*

Cinsiyetiniz	Erkek	Count	332	9	7	348
		% within cinsiyetiniz?	95,4%	2,6%	2,0%	100,0%
		% within Diğer	69,2%	81,8%	77,8%	69,6%
		% of Total	66,4%	1,8%	1,4%	69,6%
	Kadın	Count	148	2	2	152
		% within cinsiyetiniz?	97,4%	1,3%	1,3%	100,0%
		% within Diğer	30,8%	18,2%	22,2%	30,4%
		% of Total	29,6%	0,4%	0,4%	30,4%
Σ		Count	480	11	9	500
		% within cinsiyetiniz ?	96,0	2,2%	1,8%	100,0%
		% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	96,0%	2,2%	1,8%	100,0%

Tablo 12’de hizmet düzeyi düşük yolda seyahat etmenin cinsiyete göre nasıl değişim gösterdiği analiz edilmiştir. Sonuçlar her iki cinsiyetinde yüksek derecede hizmet düzeyinden etkilendiği göstermektedir.

*Tablo 12. Hizmet düzeyi düşük bir yolda seyahat etmek ile cinsiyet arasındaki ilişki*

Cinsiyetiniz	Erkek	Count	Katılıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum	
		Count	321	19	8	348
		% within cinsiyetiniz ?	92,2%	5,5%	2,3%	100,0%
		% within Diğer	69,5%	67,9%	80,0%	69,6%
		% of Total	64,2%	3,8%	1,6%	69,6%
	Kadın	Count	141	9	2	152
		% within cinsiyetiniz ?	92,8%	5,9%	1,3%	100,0%
		% within Diğer	30,5%	32,1%	20,0%	30,4%
		% of Total	28,2%	1,8%	0,4%	30,4%
Σ		Count	462	28	10	500
		% within cinsiyetiniz ?	92,4%	5,6%	2,0%	100,0%
		% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	92,4%	5,6%	2,0%	100,0%

Tablo 13’de katılımcıların cinsiyeti ve geometrisi bozuk yolda oluşan stres düzeyinin analizi yapılmıştır. Alınan sonuçlar incelendiğinde kadınların erkeklere göre daha fazla strese girdiği tespit edilmiştir.

*Tablo 13. Cinsiyet ve Yolun geometrisinin bozuk olması Yorgunluk düzeyimi artırır seçeneği arasındaki analiz*

			Katılıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum	
Cinsiyetiniz	Erkek	Count	237	60	51	348
		% within cinsiyetiniz ?	68,1%	17,2%	14,7%	100,0%
		% within Diğer	68,9%	63,8%	82,3%	69,6%
		% of Total	47,4%	12,0%	10,2%	69,6%
	Kadm	Count	107	34	11	152
		% within cinsiyetiniz ?	70,4%	22,4%	7,2%	100,0%
		% within Diğer	31,1%	36,2%	17,7%	30,4%
		% of Total	21,4%	6,8%	2,2%	30,4%
	Σ	Count	344	94	62	500
% within cinsiyetiniz ?		68,8%	18,8%	12,4%	100,0%	
% within Diğer		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
% of Total		68,8%	18,8%	12,4%	100,0%	

Tablo 14 eğitim düzeyi ile buzla kaplı yolda sürüş özelliklerine dair yapılan analizlerin sonuçlarını yansıtmaktadır. Değerlendirme sonuçları eğitim düzeyi fark etmeksizin tüm grupların marjinal hava olaylarında yolda daha dikkatli devam ettiğini göstermiştir.

Tablo 14. Eğitim düzeyi ve “Seyir halinde buzla kaplı bir yolda ve/veya karlı bir havada daha dikkatli sürmeye devam ederim” seçeneği arasındaki ilişki.

Eksen	Eğitim düzeyimiz		Katılıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum	
			Count	Count	Count	
n)	İlköğretim	Count	12	0	0	12
		% within eğitim	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%
		% of Total	2,5%	0,0%	0,0%	2,4%
	Lise	Count	69	5	0	74
		% within eğitim	93,2%	6,8%	0,0%	100,0%
		% of Total	14,4%	29,4%	0,0%	14,8%
	Üniversite	Count	346	11	4	361
		% within eğitim	95,8%	3,0%	1,1%	100,0%
		% of Total	72,4%	64,7%	80,0%	72,2%
	Yüksek lisans-doktora	Count	51	1	1	53
		% within eğitim	96,2%	1,9%	1,9%	100,0%
		% of Total	10,7%	5,9%	20,0%	10,6%
Σ	Count	478	17	5	500	
	% within eğitim düzeyimiz ?	95,6%	3,4%	1,0%	100,0%	
	% within Diğer	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% of Total	95,6%	3,4%	1,0%	100,0%	

Çalışma kapsamında katılımcılara trafikte en çok kimlerin tehlike yarattığı sorusu yöneltilmiş ve dört farklı grup içerisinde tercih yapmaları istenmiştir. Alınan cevaplara göre katılımcıların yaklaşık %72’si trafik kurallarına uymayan sürücülerin daha fazla tehlike yarattığını savunmuştur (Tablo 15).

Tablo 15. Katılımcıların trafikte en çok tehlike yaratanlara dair görüşleri.

Yanıtlar	n	%
Uzun araç sürücüleri ( tır kamyon vb.)	33	6,6
Acemi sürücüler	56	11,2
Hız yapan sürücüler	52	10,4
Trafik kurallarına uymayan sürücüler	359	71,8
Σ	500	100

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Trafik kazalarının meydana gelmesinde birçok faktör etkili olabilmektedir. Bu faktörler sırayla insan, yol ve taşıt olarak sıralayabiliriz. Kazalar, bu ana başlıklar altındaki faktörlerin tek başına veya birlikte etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Kazaların meydana gelmesinde en etkili faktör olarak insanlar görülmektedir. İnsan ile ilgili olan kazaların azaltılabilmesi ancak eğitim ve denetimle mümkün olabilmektedir. Kazaların meydana gelmesinde insanlardan sonra gelen en önemli diğer faktörler ise yol ve taşıttır [19].

Yol ve taşıt ile ilgili faktörlerin de kazalarda etkisinin büyük olduğu görülebilmektedir. Bu hedefe yönelik olarak yaptığımız çalışmada ise sürücülerin yol özellikleri hakkındaki düşünceleri ve bu özelliklerin sürücüler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan anket çalışmasında sürücülerin üzerinde oluşan psikolojik olumsuzluklar ele alınarak detaylandırılmıştır.

Yapılan araştırmaya katılan sürücülere ait demografik özelliklere bakıldığında zaman %29,7'si kadın, %70,3'ü ise erkek olduğu görülmektedir. Katılımcıların %96'sı 18-44 yaş grubunda ve %4'ü ise 45 yaşından daha büyüktür. Ankete katılanların eğitim durumuna bakıldığında %71'i üniversite, %15'i lise ve %3'ü ise ilköğretimi işaretlendiği belirlenmiştir. Katılanların meslek durumlarına bakıldığında %50'si işçi-memur, %36'sı öğrenci, %9'u ev hanımı, %3'ü şoför ve %2'si emekli olduğu görülmüştür (Tablo1-4).

Araştırma bulgularının değerlendirilmesi sonucunda, kadın sürücülerin erkek sürücülere göre trafikteki olumsuz durumlarda daha fazla strese girdiği belirlenmiştir (Tablo 10). Kadın sürücülerin erkek sürücülere göre trafik kurallarına, yol durumuna ve mevsim şartlarına daha fazla önem verdikleri belirlenmiştir (Tablo 11).

Yapılan anketlerin değerlendirilmesi sonucu, hizmet düzeyi düşük veya bozuk bir yolda seyahat etmek hem kadınları hem de erkekleri konfor açısından fazlasıyla etkilediği saptanmıştır (Tablo 12). Bu da hizmet düzeyi düşük yollarda seyahat etmemeye yönlendirmektedir.

Yapılan anketlere göre yolun geometrisinin bozuk olması, alınan cevaplar incelendiğinde sürücüler üzerinde olumsuz etkiler bıraktığı saptanmıştır. Bu etkiler sürücü kişiliklerine göre değişen tepkiler doğurmaktadır. Bazı sürücülerde sinir ve öfke durumu ortaya çıkarken



(%33,4), bazılarında ise hız kontrolsüzlüğü (%64) ve yorgunluk düzeyini arttırdığı (%68,8) görülmektedir. Yolun geometrisinin bozuk olmasının birden fazla etkeni vardır ve bu etkenler birçok kazaya ve neticesinde maddi, manevi kayıplara neden olmaktadır. Bunun nedenle yol tasarım ve yapım aşamasında geometri seçimine hassasiyet büyük önem arz etmektedir (Şekil 1).

Araştırma bulgularının değerlendirilmesi sonucunda, yolun geometrisinin bozuk olması durumunda kadınların yorgunluk düzeyinin erkeklere göre daha fazla olduğu saptanmıştır (Tablo 13).

Sürücülerden alınan cevaplara göre eğitim durumu fark etmeksizin buzla kaplı veya karlı bir havada daha dikkatli bir sürüş yapmaya özen gösterildiği saptanmıştır (Tablo 14). Bu durumda karlı veya buzlu havada oluşan kazaların kişinin eğitim durumuyla alakası olmadığını göstermiştir.

Yapılan anketlerin değerlendirilmesi sonucu yolculuk esnasında dikkat bozukluğuna neden olan faktörler belirlenmiştir. Belirlenen bu tehlikeli faktörler çeşitli önlemler alınarak ortadan kaldırılabilir. Böylece sürücüler hem daha güvenli hem de daha konforlu bir sürüş gerçekleştirebilir ve oluşan kazaların önüne geçilebilir. Yapılan çalışma ile sürücülerin etkileyen en önemli faktörün yol yüzey kaplaması olduğu ve bunun sürücülerin çeşitli durumlarda etkilediği tespit edilmiştir.

Sürücülerin kendilerini güvende hissettiği ve en konforlu yol olarak ifade ettikleri kaplama türü sıcak asfalt karışımli kaplamalar olmuştur (Tablo 5). Sıcak asfalt karışımli kaplama üzerinde sürüş yapan sürücünün gürültüyü daha az hissetmesi, daha konforlu bir seyahat gerçekleştirmesine; böylece daha az yorgunluk hissetmesi ve sürüş keyfi almasına neden olmaktadır. Ayrıca uygun kaplama tipi ile beraber düzgün tasarlanmış yol geometrisi bu etkilere katkı sağlayacaktır.

Sürücülerden alınan cevaplara göre trafikte en çok tehlike yaratıp, kazaya sebebiyet veren etkenin trafik kurallarına uyulmaması olduğu ifade edilmiştir (Tablo 15). Bu sonuç insan faktörünün kazalar üzerindeki etkisini açık şekilde göstermektedir.

Sürücülerden alınan cevaplara göre trafikte tehlike yaratıp, kazaya sebebiyet veren önemli bir etken de trafik kurallarına uymayan sürücüler olarak seçilmiştir. Kadın sürücülerin %66,4 ve erkek sürücülerin ise %71,9'u aynı konu üzerinde hem fikirdir. Ayrıca bu oranlara bakıldığı

zaman erkeklerin kadınlara göre trafik kurallarına daha fazla duyarlı olduğu söylenilebilir.

Araştırmalar sonucu edinilen bulgulara göre, geometrisi bozuk ve görüş kısıtlılığı olan bir yatay kurba (viraj) yaklaşırken cinsiyet ayrımı olmaksızın sürücülerin çoğunun yola dikkatini daha fazla verdiği tespit edilmiştir (Tablo 11). Bu durum hem erkeklerin hem de kadınların geometrisi bozuk ve görüş kısıtlılığı olan bir yol kesimine girdikleri zaman kazaların en az yaşanması için gerekli önlemi aldığını göstermektedir.

Sürücülerden alınan cevaplara göre kişinin yaşı arttıkça aşırı virajlı yollarda daha yavaş bir sürüş gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Alınan sonuçlar yolun bu bölümünde kazaya sebebiyet verenlerin genellikle daha genç kişiler olduğu göstermektedir (Tablo 6).

Araştırmalar sonucu edinilen bulgulara göre, diğer meslek gruplarına kıyasla şoförler seyir halindeyken araçlarının hızını mevsim şartlarına göre ayarladıkları tespit edilmiştir (Tablo 7). Bu sonuçlara göre mesleği şoförlük olan insanların mevsim şartlarına göre hızlarını ayarladıkları için özellikle kış aylarında kazalara en az karışanlar olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan araştırmada sürücülerin bir kısmının seyir halindeki hızlarını; %85,8'i kurallara göre, %71,8'i yol kaplamasına, %74,8'i yol geometrisine göre, ama en fazla %88,2 oranıyla mevsim şartlarını göz önünde bulundurarak ayarladığı saptanmıştır.

Yapılan anketlerin değerlendirilmesi sonucu sürücülerden alınan cevaplara göre eğitim seviyesi arttıkça yol güvenliği açısından sürücülerin kurallara uyma eğilimlerinin azaldığı görülmüştür (Tablo 8). Alınan sonuçlara göre eğitim seviyesinin artışıyla birlikte kendine olan güvenin artması vb. sebeplerle yol güvenliğini tehlikeye düşürecek davranışlara eğilim arttığı tespit edilmiştir.

Sürücülere yöneltilen sorulara bakıldığında yolun geometrisinin ve yatay kurp (viraj) geometrisinin düzgün olduğu durumlarda tüm sürücülerin üzerinde pozitif bir etki yaptığı gözlemlenmiştir (Şekil 5). Bu kapsamda sürücülerin memnuniyet derecesini arttırmak için verilen cevaplar dikkate alınarak sürücülere daha emniyetli ve daha konforlu sürüş yolları kazandırılabilir.

Çalışma neticesinde tüm yol kullanıcıları için verilen ortak cevaplardan yala çıkarak aşağıda sıralanmış olan öneriler ortaya koyulabilir.

- Yolun geometrik standartlarının seçiminde hassas olunmalı ve bu standartlar mümkün mertebe yüksek tutulmalıdır.
- Konforlu bir sürüş için, yoldaki enine ve boyuna geometrik bozuklukların en düşük seviyelerde olması, yolda girinti çıkıntı, yama, ek vb. bulunmaması gerekmektedir.
- Yatay kurbaların geometrik özellikleri doğru hesaplanmalı ve proje uygulamaya geçilmeden önce yetkili kişiler tarafından yerlerinde görülüp onay verildikten sonra uygulamaya geçilmelidir.
- Yol yüzeyinin özellikleri de trafik kazalarını etkilemektedir. Kaplama yüzeyindeki kusurlar sürtünme kaybına ve taşıt tekerleklerinin kaplama üzerine oturmamasına neden olabilir. Bu da olası bir trafik kazasının şiddetini artırır. Bu hedefe yönelik yol kaplama türü seçiminde yolun yapılacağı bölgenin mevsim şartlarına göre tasarlanmalı ve uygulanmalıdır.
- Proje hızı ve görüş uzunluğu yolun geometrik standartlarının belirlenmesinde çok önemli unsurlardır ve bu unsurlar trafikte taşıt kullanıcılarını etkilemektedir.
- Yol güzergahı boyunca yolun her kesiminde aynı geometrik standartları sağlamak, sürücüde güvenlik hissinin oluşmasına, konforlu seyahat edilmesine ve trafik kapasitesinin artmasına yardımcı olacaktır.
- Anket sonuçlarında saptandığı gibi en tehlikeli sürücülerin kurallara uymayanlar olduğu düşünülürse; yol güvenliğini tehlikeye atan sürücüler hakkında yaptırımların ağırlaştırılması caydırıcı etki yaratacaktır.
- Yol üzerinde bulunan yön tabelaları, bilgi levhaları sürücünün dikkatini dağıtmayacak ve herhangi bir kaza esnasında araca veya sürücüye kazanın şiddetini arttırmayacak bir yere konularak tasarımı yapılmalıdır.
- Ülkemiz şartlarında yaygın kullanılan sathi kaplamalı ve bölünmemiş yolların azaltılarak yerine daha konforlu ve güvenli olabilecek sıcak asfalt karışımli bölünmüş yolların arttırılması gerekmektedir.

- Trafik güvenliği eğitimlerinin daha ciddi yapılması ve sürücülerin eksik oldukları düşünülen yönlerde periyodik eğitimlere tabi tutulması gerekmektedir.
- Stres düzeyi yüksek, öfke kontrolsüzlüğü olabilecek sürücüler için denetimler gerçekleştirilmeli ve destek oluşturabilecek eğitim programları verilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Bilgin, V., Akın, F., (1995). Türkiye'de Demiryolunun Bugünü ve Geleceği, Demiryol-İş Yay, Ankara.
- [2]. <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/11171.pdf> (Erişim tarih:05.12.2018)
- [3]. Papagiannakis, A. T., Masad, E.A., (2008). Pavement Design and Materials, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- [4]. Huang, Y.H., (1993). Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [5]. Özen E, Genç E, Kaya Z., (2013). Türkiye'de Trafik Kazalarının Maliyetlerinin Sigortacılık ve Finansal Sistem Bağlamında Değerlendirilmesi Uşak İlinde Ampirik Bir Çalışma, 17. Finans Sempozyumu, Muğla, 100- 109.
- [6]. Karayolları Trafik Kanunu; <http://www.mevzuat.adalet.gov.tr/html/644.html> (Erişim tarihi:01.05.2014).
- [7]. Akdur R., (2012). Türkiye'deki Trafik Kazalarının Epidemiyolojik İlkeler Işığında Değerlendirilmesi. Ulaşım ve Trafik Güvenliği Dergisi, Ankara: Adli Bilimciler Derneği;12-20
- [8]. ICD-10, (2007). International Classification of Diseases, 10th revision. <https://www.cdc.gov/nchs/icd/icd10cm.htm> (accessed 7 November 2017).
- [9]. Austroads, (1994). Road Safety Audit, Sydney.
- [10]. Deery, H.A. (1999). Hazard and Risk Perception Among Young Novice Drivers, Journal of Safety Research, Vol.30, No.4, p. 225-236.
- [11]. Hayakawa, H., Fischbeck, P.S., & Fischhoff, B., (2000). Traffic Accident Statistics and Risk Perceptions in Japan and the United States, Accident Analysis and Prevention, 32, p. 827-835.
- [12]. Medina, J.C., Benekohal, R.F., & Wang, M., (2007). Analysis of Pedestrians and Drivers Opinions on Crosswalk Safety At UIUC Campus, Civil engineering Studies, Transportation Engineering Series No 145, England.
- [13]. Braitman, K.A., Kirley, B.B., McCartt, A.T., Chaudhary, N.K., (2008). Crashes of novice teenage drivers: characteristics and contributing factors. J. Saf. Res. 39 (1), 47-54.
- [14]. Rosenbloom, T., Shahar, A., Elharar, A., & Danino, O., (2008). Risk Perception of Driving as a Function of Advanced Training Aimed At Recognizing and Handling Risks in Demanding Driving Situations, Accident Analysis and Prevention, 40, p.697-703.
- [15]. Boccia, P. (2010). Manuale di psicologia generale, Edizioni Psiconline.

- [16]. SARTRE 4, (2011). European Road Users Risk Perception and Mobility, The SARTRE 4 Survey.
- [17]. [http://docs.adrn.ac.uk/888043/mrdoc/pdf/888043\\_stats19-road-accident-injury-statistics-report-form.pdf](http://docs.adrn.ac.uk/888043/mrdoc/pdf/888043_stats19-road-accident-injury-statistics-report-form.pdf). (Erişim tarihi: 20 Aralık 2017).
- [18]. Descornet, G., “Influence of Surface Characteristics on Rolling Resistance and Fuel Consumption”, International Conferance on Roads and Road Traffic for the Year 2000, Berlin, Germany, 1988.
- [19]. Tezcan E., Beşdok E., (2018). Trafik Kazalarına Etki Eden Faktörler Arasındaki İlişkilerin TBA Biplot Analiz Yöntemi İle Değerlendirilmesi, Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech. 8(1): 103-111.