

ELEKTRİKLI VE HİBRİT ARAÇ TEKNOLOJİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER

DR. ÖĞR. ÜYESİ FATİH ALPASLAN KAZAN
ÖĞR. GÖR. GÖKHAN YALÇIN

EĞİTİM
yayınevi

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇ TEKNOLOJİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan Kazan, Öğr. Gör. Gökhan Yalçın

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Koordinatörü: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Grafik Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-011-1

1. Baskı, Aralık 2024

Kütüphane Kimlik Kartı

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇ TEKNOLOJİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan Kazan, Öğr. Gör. Gökhan Yalçın

167 s., 160x240 mm

Kaynakça var, dizin yok.

E-ISBN: 978-625-385-011-1

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mekanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM

yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah.

Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok,

No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42, 0 332 502 50 42

bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.

P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America

americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah.

10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

sevkiyat@egitimyayinevi.com

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye

+90 332 499 90 00

bilgi@egitimkitabevi.com

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr

+90 537 512 43 00

bilgi@kitapmatik.com.tr

 **kitapmatik**
İnternetteki kitaplarınız

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZiii

**BÖLÜM 1: PID YAZILIMI VE MİKROİŞLEMCİ
KULLANARAK BİR BLDC MOTORUN DENGELENMESİ ... 1**

*Raike Sena İSEM, Elif YEŞİLAY, Yusuf Kaan COŞKUN, Hasan Fırat
KESKİN*

BÖLÜM 2: İZOLASYON İZLEME DEVRESİ..... 17

*Ahmet Faruk YORULMAZ, Hüsamettin Kaan BEŞLER, Abdullah Cem
AĞAÇAYAK*

BÖLÜM 3: ARAÇ KONTROL SİSTEMLERİ 31

Sevim Sude BAL, Hakan TERZİOĞLU

**BÖLÜM 4: PEM YAKIT HÜCRESİ İÇİN BOOST
CONVERTER TASARIMI 55**

Bengisu GÜVEN, Hakan TERZİOĞLU

**BÖLÜM 5: ELEKTİRLİ ARAÇLARDA KULLANILAN
BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ 69**

Kağan SARIÇOBAN, Gökhan YALÇIN

**BÖLÜM 6: GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN ELEKTRİKLİ
ARAÇLAR, TASARIMI VE KONTROL ALGORİTMALARI 85**

Muhammed Talha ERTAN, Abdullah Cem AĞAÇAYAK

**BÖLÜM 7: ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN
HABERLEŞME PROTOKOLLERİ, DEVRE ŞEMALARI VE
ARAYÜZ TASARIMLARI..... 105**

Nihat GÜNEŞ, Gökhan YALÇIN

**BÖLÜM 8: PROTOTİPARAÇ AERODİNAMİĞİNİ
GELİŞTİRME: SÜRTÜNME DİRENCİNİ AZALTMAYA
YÖNELİK CFD TABANLI BİR YAKLAŞIM 129**

*Abdullah TAŞ, Namık Kemal YALÇIN, Osman KOCAASLAN, Süleyman
NEŞELİ*

**BÖLÜM 9: ELEKTRİKLİ ARAÇLAR YARIŞI İÇİN
ROLLBAR-ROLLCAGE TASARIMI, ÜRETİMİ VE
ANALİZİNE ÖRNEKLİ UYGULAMA147**

Namık Kemal YALÇIN, Abdullah TAŞ, Osman KOCAASLAN

ÖNSÖZ

Dünya, enerji kaynaklarının verimli kullanımına ve çevre dostu teknolojilere yönelik büyük bir dönüşüm yaşamaktadır. Elektrikli ve hibrit araç teknolojileri, bu dönüşümün öncülerinden biri olarak karşımıza çıkmakta ve yalnızca ulaşım sektörünü değil, enerji yönetimi, çevre politikaları ve mühendislik uygulamaları gibi pek çok alanı derinden etkilemektedir. Bu hızlı gelişim süreci, yenilikçi yaklaşımları ve disiplinler arası iş birliğini her zamankinden daha değerli hale getirmiştir.

Elinizdeki bu kitap, akademisyenler ile lisans ve yüksek lisans düzeyindeki mühendislik öğrencilerinin ortak çalışmaları sonucunda ortaya çıkmıştır. Çalışma, elektrikli ve hibrit araç teknolojilerine yönelik teorik bilgilerin yanı sıra, güncel araştırma ve uygulama örneklerini de içermektedir. Kitap, farklı bakış açılarını bir araya getirerek bu alandaki bilgi birikimini artırmayı ve gelecekte yapılacak çalışmalara ilham vermeyi amaçlamaktadır.

Kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm yazarlarımız, mühendislik ve bilimsel gelişimin yalnızca bireysel çabalarla değil, aynı zamanda takım çalışması ve bilgi paylaşımıyla mümkün olduğunu bir kez daha göstermiştir. Bu bağlamda, kitap boyunca yer alan her bölüm, okuyucuların elektrikli ve hibrit araç teknolojileriyle ilgili ufuk açıcı bilgiler edinmesine ve bu alandaki yenilikçi yaklaşımlar hakkında derinlemesine bir anlayış kazanmasına katkı sunacaktır.

Son olarak, bu kitabın hazırlanmasına katkı sağlayan değerli yazarlarımıza, fikir ve projeleriyle destek veren tüm araştırmacılara teşekkür ederiz. Bu eserin, bu alanda çalışan akademisyenlere, öğrencilere ve sektörel profesyonellere faydalı olmasını diliyoruz.

Editörler

Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan KAZAN

Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN

BÖLÜM-1

PID YAZILIMI VE MİKROİŞLEMCİ KULLANARAK BİR BLDC MOTORUN DENGELENMESİ

Raike Sena İSEM¹

Elif YEŞİLAY²

Yusuf Kaan COŞKUN³

Hasan Fırat KESKİN⁴

¹<https://orcid.org/0009-0000-5452-4916>

²<https://orcid.org/0009-0002-1749-1507>

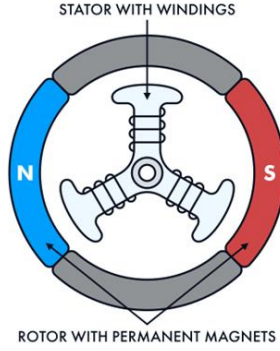
³<https://orcid.org/0009-0001-2534-7946>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-9537-0332>

PID YAZILIMI VE MİKROİŞLEMCİ KULLANARAK BİR BLDC MOTORUN DENGELENMESİ

1. BLDC Motorlar

BLDC motorlar, elektrikli araçlar, dronlar, robotik ve endüstriyel uygulamalar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Geleneksel motorların aksine fırçalara sahip değildir, bu da onları daha verimli hale getirmektedir. BLDC motorlar aynı zamanda elektronik komütasyonlu motorlar olarak ta bilinir. Bir BLDC motor kontrolörü motorun hızını, torkunu ayarlayabilir; ayrıca hızını artırıp, azaltır ve dönme yönünü ayarlayabilir[1]. Kontrolörün çalışma prensibini anlamak için önce BLDC motorlara değinelim.



Şekil 1. BLDC motor ana parçaları [2].

1.1. BLDC motorların çalışma prensibi

BLDC motorlar statorun manyetik alanları ile rotor arasındaki etkileşim sayesinde gerçekleşir. Stator rotordaki sabit mıknatıslarla etkileşime giren ve rotorun dönmesine neden olan bir tork üreten dönen bir manyetik alan üretir.

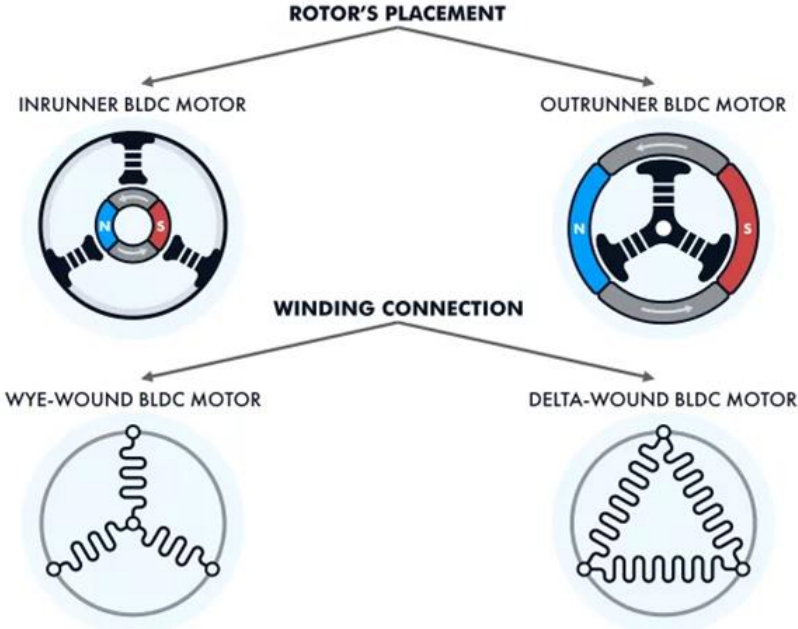
Stator, motorun sabit kısmıdır. Demir çekirdeğin etrafına yerleştirilmiş sargılardan oluşur. Bu sargılardan akım geçtiğinde, rotorun manyetik alanıyla etkileşime giren dönen bir manyetik alan oluşturur.

Rotor motorun dönen kısmıdır, kutuplara dönüşümlü olarak yerleştirilmiş kalıcı bir mıknatıstan oluşur. Tasarıma bağlı olarak rotor statorun içinde veya çevreleyecek şekilde dışında olabilir[3-6].

1.2. BLDC motor tipleri

Rotor yerleşimine göre BLDC motorlar iki tipdir: inrunner motor(rotor motorun içinde, stator ise dışındadır), outrunner motor(rotor motorun dışında stator ise içinde). Inrunner daha hafif bir yapıya sahip olması ve küçük çapları nedeniyle daha iyi bir dönüş hızına sahiptir. Outrunner motorları ise büyük çap ve rotora uygulanan büyük elektromotor kuvvet nedeniyle daha büyük bir torka sahiptir.

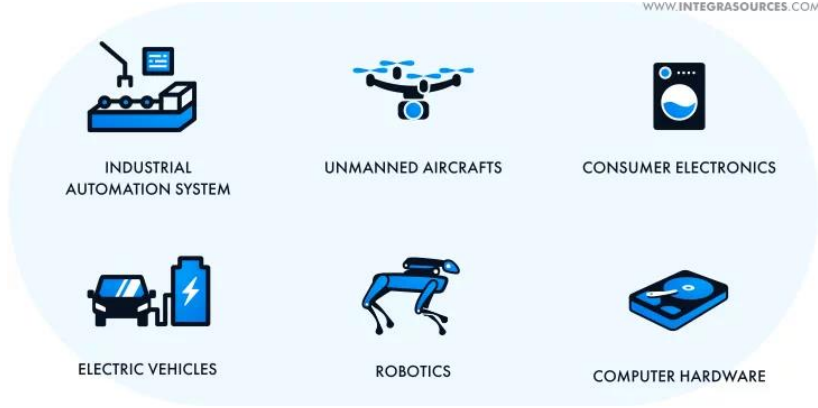
Üç fazlı motorların iki farklı tipte sargı bağlantısı bulunabilir. sargılar merkezde birleşerek yıldız oluşturur (Wye (Y) or star connection). Sargılar seri bağlanarak üçgen oluşturur nuna da delta bağlantısı denir.



Şekil 2. BLDC motor sınıflandırması [2].

1.3. BLDC motorların uygulama alanları

BLDC motorlar mekanik yerine elektronik komütasyon kullanmaktadır. Bu özelliği, akım akım anahtarlamasını iyileştirdiği, torku artırdığı ve geniş aralıkta etkili hız kontrolü ve daha iyi bir performans sağladığı için temel avantajıdır. Bu özellikler BLDC motorları, uzun çalışma ömrüne sahip cihazlar ve sistemler için mükemmel kılar.



Şekil 3. BLDC motor uygulama alanları [7].

2. İvmeölçer Sensörü

İvme sensörü bir cihazın hareketini ve hızındaki değişimi ölçen bir cihazdır. Genellikle lineer hız değişimini (ivmeyi) ölçmek için kullanılır. Bu sensör mikroelektronik teknolojisi sayesinde kompakt bir yapıya sahip olsa da yüksek hassasiyetle çalışabilirler.

Bir ivmeölçerin temel çalışma prensibi, bir yay üzerine atılmış bir kütle gibidir. Bu cihaz ivmelendiğinde, kütle yay kütleli kolayca hareket ettirebilene kadar yer değiştirir, aynı oranda algıladığı ivmeye eşit olur. Daha sonra bu yer değiştirme değeri ivmeyi ölçmek için kullanılır [7,8].

İvme ölçerler genellikle bir kütleyle bağlı yay veya piezoelektrik bir yapı kullanarak hareket, eden kütlelerin üzerine uygulanan kuvveti ölçer. Newton'un ikinci yasasına göre, bir kütleyle uygulanan kuvvet (F) ile ivme (a) arasında şu ilişki vardır:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$$

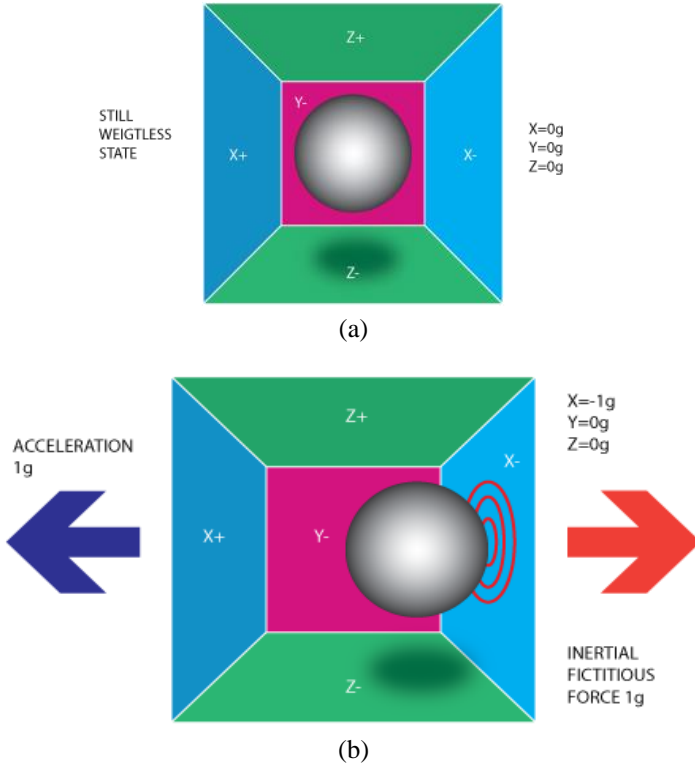
$$F = ma \quad (2)$$

İvme ölçer, hızdaki değişimi ölçmek için genellikle bu formülü kullanmak için yapısındaki kütlelerin hareketine dayanarak ivmeyi hesaplar.

Gravitasyonel ivme (yerçekimi), dünya yüzeyindeki kütlelerin serbest düşme hızını etkileyen kuvveti temsil eder. Bu genellikle ivmeölçerin yerçekimi ölçümü için kullanılır. Dünya yüzeyinde yerçekimi ivmesi yaklaşık olarak:

$$g \approx 9.81m/s^2$$

olur. Bu ivme ivmeölçerin sensörlerine yerçekimi yönünde bir kuvvet uygular, bu da sensörün ivmesini belirler.



Şekil 4. a) İvmeölçerin çalışma prensibi b) İvmeölçer içindeki kütleyle uygulanan kuvvet [7].

Modern ivmeölçerler genellikle üç eksende (x, y, z) ivme ölçer. Bu eksenler arasındaki ilişki, üçlü bir vektör toplamı kullanılarak hesaplanmaktadır:

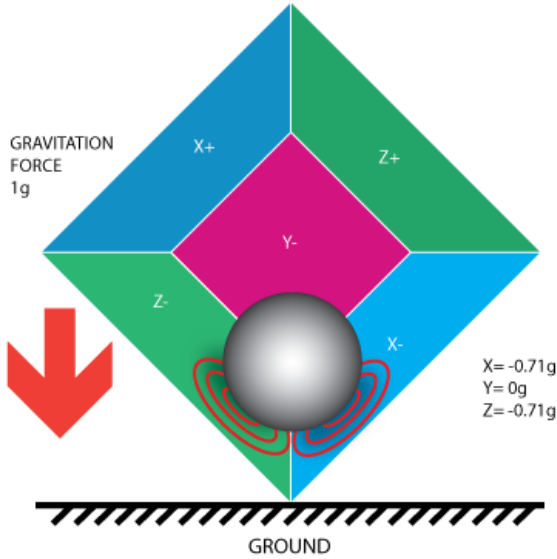
$$a_{total} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (3)$$

İvmeölçerler genellikle aşağıdaki prensiplere dayanırlar:

Kapasitif sensörler: İvme uygulandığında, iki paralel levha arasındaki mesafe değişir, bu da kapasitans değişikliği ile ölçülür.

Piezo elektrik sensörler: Hareket eden bir kütlenin üzerindeki kuvvet, piezoelektrik malzemede elektriksel gelişim oluşturur.

MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) teknolojisi: Bu sensör, mikro yapılar kullanarak küçük ivmeleri ölçer ve genellikle bir kütle ve yay sistemi ile çalışır.



Şekil 5. İvmeölçer içindeki kütleyle yer çekimi ile uygulanan kuvvet [9].

3. Jiroskop

Jiroskop; uçaklar, uzay araçları ve gemilerde kullanılan vazgeçilmez bir cihazdır. Aynı zamanda akıllı telefonlardaki “sessiz beyinler” olarak hayatımızda yer edinmiştir.

Jiroskop, aynı zamanda “düzdöner” yön bulmak veya ölçmekte kullanılır. Jiroskopların kütle merkezi sabittir bu sebeple jiroskopların dönüş eksenini yönünü özgür olarak seçer ve dönerken açısal hızını korur. Eksenin yönü dönerken, dayanağın yönünden etkilenmez. Her yöne dönebilen bir kütle, çark veya tekerlekte denebilir. Aynı zamanda çift dengeleme halkası bulunur.

Yaklaşık olarak bir eksen dönmeye odaklanan jiroskop aynı zamanda iç dengeleme çemberinde birleştirilmiş çark hareketlerini içeren bir mekanizma olarak tanımlanır. Jiroskopların birden fazla çeşidi vardır.

3.1.1. Jiostat

Dış kasası sabitlenmiş bir jiroskop türüdür ve diskin dönme hareketini koruyarak yönelim ve dengenin ölçülmesini sağlar.

3.1.2. Mikro elektromanyetik sistem(MEMS)

Titreşim tabanlı bir sensör olarak çalışan ve mikrofabrikasyon teknolojisiyle üretilen bir jiroskop türüdür. Küçük boyutları ve düşük maliyeti sayesinde akıllı telefonlar, dronlar ve araçlar gibi birçok taşınabilir cihazda yönelim ve hareket ölçümü için kullanılır.

3.1.3. Fiber optik jiroskop(FOG)

Işığın fiber optik kablolar içinde hareket etmesiyle açısal hız ölçümü yapan bir jiroskop türüdür. Döngü içindeki ışığın faz farkını algılayarak yüksek hassasiyetle yönelim değişikliklerini belirler ve özellikle havacılık ve denizcilik uygulamalarında kullanılır.

3.1.4. Yarı küresel yankılayıcı jiroskop (HRG)

Titreşim modalarını kullanarak açısal hızları hassas bir şekilde ölçen bir jiroskop türüdür

3.1.5. Titreşim yapılı jiroskop (VRG)

Titreşim yapan bir yapının Coriolis kuvveti etkisiyle yönelim değişikliklerini algılayan bir jiroskop türüdür.

3.1.6. Dinamik ayarlı jiroskop (DTG)

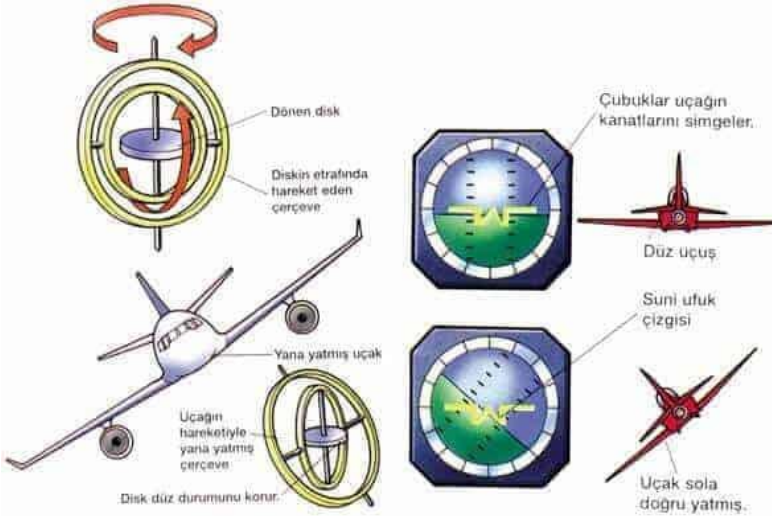
Bir titreşimli kütleli rezonans frekansına dinamik olarak ayarlanmasıyla açısal hız ölçümü yapan bir jiroskop türüdür.

3.1.7. Halka lazer jiroskop (RLG)

Kapalı bir optik yol içinde lazer ışınlarının döngüsel hareketiyle açısal hızı ölçen bir jiroskop türüdür.

3.1.8. Londra kuvveti jiroskopu

Süperlikten bir halkada oluşan kuantum mekaniksel Londra momentinden yararlanarak yönelim değişikliklerini ölçen bir jiroskop türüdür.



Şekil 6. Jiroskopun kullanım alanları [10].

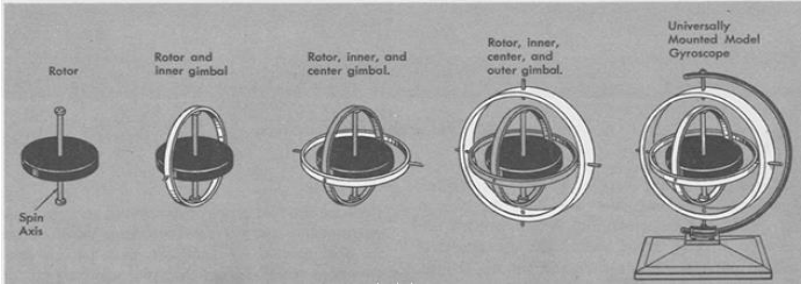
4. Jiroskobun Çalışma Prensipleri

Düzdönerler, dönen bir disklerdir. Bir nevi çark olarak da bilinir. Temeli fizik kurallarına ve merkezkaç ilkesine dayanır. Geleneksel bir jiroskop, dönen bir silindir veya çark, rotor ve eksenden oluşur. Eksen, rotor içinde dönebileceği bir çembere yataklanmış şekildedir. Çember de, dik açı ile başka bir çembere bağlanmıştır. İç ve dış çemberle dik açı yapan bir çerçeveye kenetlenmiş şekilde bir de dış çemberi bulunur. Dönüş eksenini, kendi kendine herhangi bir yönü seçmekte özgürdür. Jiroskopların dışındaki çerçeve dengeleme

çemberi ile desteklenmiştir. Dengeleme çemberi veya halkası, kendi düzleminde “bir eksen” dönmesi için çerçeve ile birleştirilmiştir. Dengeleme çemberi, “bir derece” dönme özgürlüğüne sahiptir. Çemberin ekseninin dönme özgürlüğü yoktur. İç dengeleme halkası ise, jiroskop çerçevesinin eksenine dikey pozisyonudur. Kendi düzleminde bir eksen dönebilir.

Bu amaçla jiroskop çerçevesi ile birleştirilmiş durumdadır. İç dengeleme çemberinin dönme özgürlüğü ise iki derecedir.

Jiroskopların dönen diski veya çarkı, dönüş eksenini belirleyen parçalardır. Disk, iç denge halkasının eksenine dikey olarak bir eksen kadar dönecek şekilde tetiklenir. Bu sebeple, diskin üç eksen, iki derece dönme özgürlüğüne sahiptir. Dönen diskin çıktı eksenine bağlantılı bir kuvvet, girdi eksenine ilgili bir kuvvete tepki verir. Yerçekimi merkezi sabit olabilen çark, kendiliğinden bir eksen kadar dönebilir, iki eksen kadar sallanabilir. Bu eylemler sırasında doğal olarak oluşan direnç dışında sabit bir nokta etrafında istediği yöne dönmekte özgürlüğe sahiptir. Jiroskoplardaki çarkın yerçekimi merkezi, salındığı eksenden dengelenebilir. Böylece çarkın yerçekimi merkezi ile salınım merkezi kesişmez. Ancak bazı durumlarda dış dengeleme halkası, diskin sadece iki özgür derecesi olması için çıkarılabilmektedir.



Şekil 7. Jiroskopun yapısı [11].

Jiroskop sensörleri, açısal hızın ölçümünü sağlayan hassas cihazlardır ve özellikle hareket, denge ve yön tayini gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu sensörler, genellikle MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) teknolojisi ile üretilerek küçük boyutlarda ve düşük güç tüketimiyle taşınabilir cihazlara entegre edilebilir. Jiroskoplar, üç eksenli ölçümler yaparak bir cismin uzaydaki hareketini anlamak için kullanılabilir. Örneğin, drone

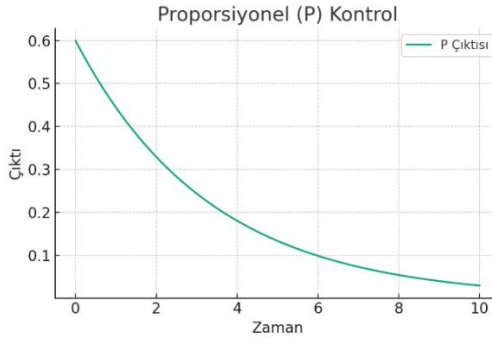
stabilizasyonu, oyun kontrolörleri, robotik sistemler ve otomotiv güvenlik sistemlerinde önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, ivmeölçerlerle birleştirildiğinde, daha kapsamlı hareket analizi ve navigasyon sistemleri oluşturulabilir [12].

5. PID

PID kontrolörleri, süreçlerin hassas kontrolünün gerekli olduğu kapalı döngü sistemlerde kullanılır. Geri besleme denetleyici yöntemlerinden olan PID oransal-integral-türevsel denetleyici kontrol döngüsü yöntemidir. Otomasyon ve kontrol sistemlerinde sıkça kullanılır. PID denetleyici hedef nokta ile mevcut nokta arasındaki farkı hesaplar ve girdiyi ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. PID üç ayrı temel terimden oluşur bunlar; oransal (P), integral (I), türev (D).

5.1. Oransal (P)

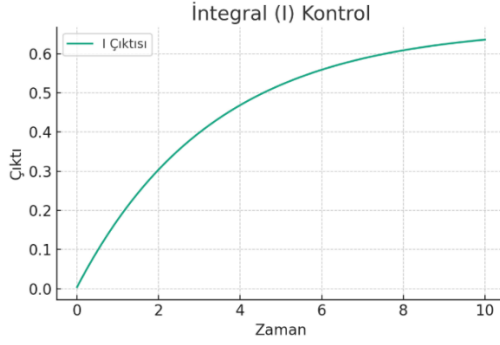
Mevcut hataya cevap vererek hatayı en aza indirmek için hatanın büyüklüğüyle orantılı bir çıkış üreterek hatayı hızla en aza indirir. Ancak tek başına salınım veya denge sorunlarına neden olabilir.



Şekil 8. Proporsiyonel (P) kontrol [13].

5.2. İntegral (I)

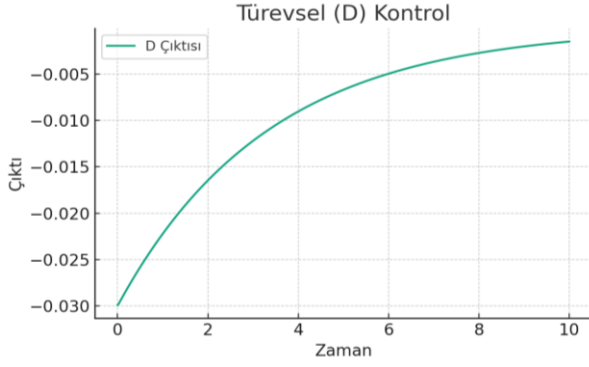
Zaman içinde biriken kalıcı hatayı ele alır. I terimi, hata sinyalini sürekli entegre ederek sistemin ayar noktasına doğru hassas bir şekilde ilerlemesini sağlar ve kararlı durum hatalarını tamamen giderir. Ancak fazla kullanımı aşırı düzeltme sorunlarına yol açabilir.



Şekil 9. İntegral (I) kontrol [13].

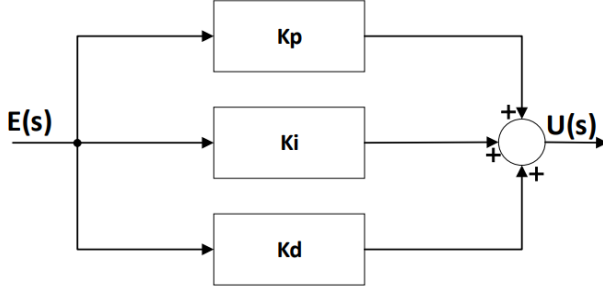
5.3. Türev (D)

Salınımları azaltmak için hatadaki gelecek değişiklikleri tahmin eder ve bu sayede sistem dengelenir.



Şekil 10. Türev (D) kontrol [13].

Bir PID kontrollü sistemin blok şeması Şekil 11 'de gösterilmektedir. PID kapalı kontrol döngüsü kontrolöründe, üç kontrolör P, I ve D'nin hepsi birbiriyle etkileşime giren farklı durumlara sahiptir, bu nedenle ayarlanması zaman alıcı ve zorlu bir görevdir.



Şekil 11. PID kontrolör sistem blok şeması.

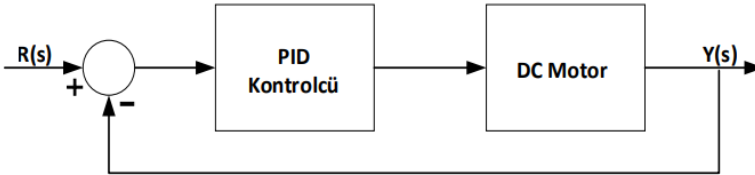
Giriş sinyali $e(t)$ ile çıkış sinyali $u(t)$ arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$U(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Bu ifadenin transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (5)$$

Buna göre DA motor hız kontrolü için PID kontrol sistemi blok şeması Şekil 12' deki gibi oluşturulur.



Şekil 12. PID kontrol şeması blok sistemi [14].

PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol yöntemi, mevcut konum ile hedef konum arasındaki hatayı analiz ederek bu hatadan ders çıkararak ve sistemin hedef noktaya ulaşmasını sağlayan bir yöntemdir. Örneğin, bir dronun havalanması durumunda, çevresel faktörlerden birisi olan rüzgar, dronun stabilizesini bozabilir. Rüzgar etkisiyle meydana gelen sapmaları telafi etmek için dronun kendini dengelemesi gerekir. Eğer bu dengeleme işlemi PID kullanılmadan yapılırsa, hata giderme yalnızca lineer bir yaklaşımla gerçekleştirilir. Bu yöntem, tek bir işlem üzerinden hata düzeltmeye çalıştığı için gecikmelere yol açabilir ve dengeleme süresi uzar.

sensörü verileri (hızlanma) mikro denetleyici tarafından okunur. PID kontrol tasarımı yapılır. PID algoritması, motor hızını ve yönlendirme sinyallerini dengelemek için kullanılır. PID kazançları (K_p , K_i , K_d) sistemi stabilize etmek için optimize edilir. Sensörden alınan jiroskop ve ivme verileri birleştirilerek bir filtreleme algoritması ile cismin konum ve eğim bilgisi elde edilir. Daha sonra IMU'dan gelen gelen veriler doğrultusunda PID algoritması fırçasız motorlara uygun PWM sinyalleri gönderir. Örneğin: Pitch, Roll ve Yaw açılarını kontrol etmek için motor hızları düzenlenir, stabilizasyon sağlanmazsa PID kazançları yeniden ayarlanır. Son olarak dron veya su altı aracı rüzgar, dalga gibi farklı durumlarda test edilir.

Tüm bunlar toparlanacak olursa, PID kontrol algoritması IMU sensör verilerini işleyerek hızlı ve kararlı bir sistem sağlar. Jiroskop ve ivme sensörlerinin birleştirilmesi sistemin doğruluğunu ve kararlılığını artırır. Kaanç parametrelerinin optimize edilmesi farklı ortam koşullarında dengeyi korumak için kritik öneme sahiptir.

6. Kaynakça

- [1] Binali R., Neşeli S., Yalçın G., "İmalat Yöntemlerine Genel Bakış", Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-2, (2021), , İksad, Editör:Prof. Dr. S. Neşeli, Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 113, Isbn:978-625-8423-14-3Solovey A., Petrova A. (2021)
- [2] <https://www.integrasources.com/blog/bldc-motor-controller-design-principles/>
- [3] Şahin D.C., Cobuloğlu M.Z., Ağaçayak A.C., "Bölüm 2: Fırçasız Doğru Akım Bldc Sürücü Tasarımı ", Mühendislikte Yeni Araştırmalar, (2022) , Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. G. Yalçın, Öğr. Gör. A.C. Ağaçayak, Basım sayısı:1, ss 305, ISBN:978-605-5447-75-5
- [4] Mirjafarli S., Terzioğlu H., Yalçın G., "2kw 72v Dış Rotorlu Hub Motor Tasarımı", Mühendislik Alanında Akademikçalışmalar-1, (2021), İksad, Editör:Dr. Öğr. Üy. H. Terzioğlu, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 200, Isbn:978-625-8423-15-0
- [5] Mirjafarli S., Terzioğlu H., Ağaçayak A.C. "Bölüm 2: Hub Motor Tasarımına Genel Bakış ", Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-1, (2021), İksad, Editör:H. Terzioğlu, G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 204, Isbn:978-625-8423-15-0
- [6] Servı S.,Inan O.,Yılmaz F.,Arsel I.,Pekgör A.,Genç A.,Oturanç G. (2024). A Performance Comparison of Different Machine Learning
- [7] <https://www.elprocus.com/accelerometer-sensor-working-and-applications/>
- [8] F. A. Kazan and H. Solak, "Improvement of ultrasonic sensor-based obstacle avoidance system in drones," International Journal of Aeronautics and Astronautics, vol. 4, no. 1, pp. 9-35, 2023.
- [9] http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [10] <https://www.muhenisbeyinler.net/jiroskop-nedir/>
- [11] <https://www.makaleler.com/jiroskop-nedir-nasil-calisir>
- [12] Titterton, D. H., & Weston, J. L. (2004). Strapdown Inertial Navigation Technology. The Institution of Engineering and Technology.
- [13] <https://ahmetyasincivan.com/pid-kontrolunun-temelleri/>
- [14] <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1308151>
- [15] H. Terzioğlu, F. A. Kazan, and M. Selek, "The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors," presented at the 3rd International Conference on Electrical Engineering and Applications (ICEEA 2013), Konya, Turkey, October 24-25, 2013, 2013.
- [16] Kazan, F. A. and Akkaya, R., "The Effect of Road Slope on Parameters of Disabled Vehicle Driven by PMDC Motor," Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 64-74, 2022.
- [17] https://web.hitit.edu.tr/dersnotlari/mehmetfatih_21.03.2014_4I1U.pdf

Algorithms to Forecast Wind Energy in Türkiye. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'24).

BÖLÜM-2

İZOLASYON İZLEME DEVRESİ

Ahmet Faruk YORULMAZ¹

Hüsamettin Kaan BEŞLER²

Abdullah Cem AĞAÇAYAK³

¹<https://orcid.org/0000-0002-5461-0117>

²<https://orcid.org/0009-0001-3704-0386>

³<https://orcid.org/0000-0002-9285-5764>

İZOLASYON İZLEME DEVRESİ

1. Giriş

İzolasyon, elektriksel sistemlerde, elektriksel bileşenlerin birbirinden ve çevreden izole edilerek güvenli bir çalışma ortamı sağlanması sürecidir. Elektriksel izolasyonun sağlanması, özellikle endüstriyel ve ticari uygulamalarda hayati önem taşır. İzolasyon izleme devreleri, bu izolasyonun bozulup bozulmadığını denetleyerek, güvenliğin sağlanmasına katkı sağlar. Bu devreler, izolasyonun kaybolması durumunda alarm verir veya sistemi kapatır, böylece kullanıcıları potansiyel tehlikelerden korur. İzolasyon izleme devreleri, elektrikli ekipmanların düzgün çalışmasını sağlamak ve olası arızaları erken aşamalarda tespit etmek için oldukça önemli bir rol oynar.

Elektrikli cihazların popüleritesinin artmasıyla birlikte, Cihazların güvenliği için katı gereklilikler oluşturulmaktadır. Cihazların yalıtımı, şarj ekipmanlarının dış ortama uzun süreli maruz kalmasından kaynaklanan yağmur, nem, çarpışma ve diğer nedenlerden dolayı azalır. Çok sayıda devre elemanları güç elektroniği cihazına bağlanır. Herhangi bir ekipmanın yalıtım arızası, tüm sistemin güvenliğini etkiler.

Bir izolasyon izleme devresi, sistemdeki elektriksel izolasyonun durumu hakkında sürekli bilgi sağlayan bir denetim mekanizmasıdır. Bu devreler, genellikle düşük gerilimli sistemlerde, trafo odalarında, hasta bakım ünitelerinde ve kritik öneme sahip diğer elektrikli ekipmanlarda kullanılır. İzolasyon izleme devresi, izolasyon seviyesinin izlenmesini sağlayarak, sistemde herhangi bir arıza veya sızıntı durumunda alarm verir.

Sistemin yalıtım direnci bir eşik değerinin altına düştüğünde, araç uyarı sinyalleri gönderir. Durum ciddi ise, sorun giderme için yüksek voltajlı sistem kesilmeli ve durdurulmalıdır. Bu nedenle sürme işlemi sırasında yalıtım izleme işlevi gereklidir. Çeşitli yalıtım izleme cihazları ve gömülü devreler, DC şarj yığınlarına, pil paketlerine, yüksek gerilim dağıtım kutularına tasarlanmış ve yerleştirilmiştir.

Temel olarak izolasyon izleme devresi, bir referans direnci (genellikle yüksek direnç) kullanarak gerilim değişikliklerini izler. Eğer izolasyon bozulur ve sistemde bir sızıntı akımı oluşursa, bu

akım, referans direnç üzerinden algılanabilir. Bu sayede, sızıntı akımının büyüklüğü ölçülerek, sistemdeki izolasyon bozulması hakkında bilgi edinilir.

2. İzolasyon İzleme Devresinin Bileşenleri

2.1.1.Referans Direnci

İzolasyon izleme devresinin kalbini oluşturan bu bileşen, sistemdeki gerilim artışlarını algılar. Referans direnç, genellikle yüksek değerde seçilir ve gerilim değişikliklerini izler. Sızıntı akımı, bu direnç üzerinden geçerek, devreye uyarı sinyali gönderir.

2.1.2.Gerilim Ölçüm Cihazları

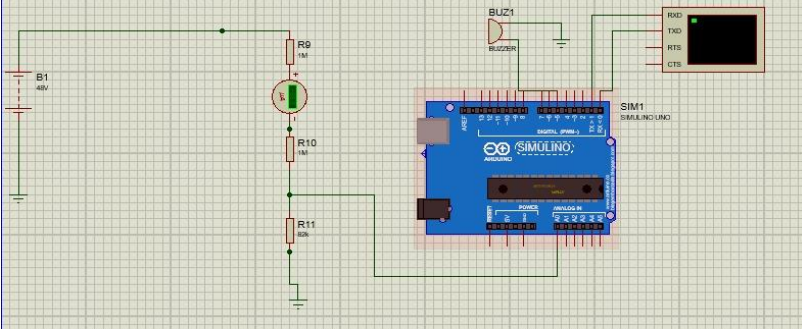
Bu cihazlar, sistemdeki gerilim seviyelerini ölçer ve referans dirençle karşılaştırır. İzolasyonun bozulması durumunda gerilimdeki değişiklikleri tespit ederler.

2.1.3.Buzzer veya Alarm Sistemi

İzolasyonun bozulması durumunda, alarm sistemi devreye girer ve kullanıcıyı uyarır. Bu alarm, genellikle sesli bir uyarı olan buzzer ile yapılır, ancak görsel bir alarm da kullanılabilir.

2.1.4.Kontrol Sistemi (Mikrodenetleyici)

İzolasyon izleme devresi, genellikle bir mikrodenetleyici tarafından yönetilir. Bu mikrodenetleyici, gerilim ölçümleri ile izolasyon durumunu değerlendirir ve alarmın aktif olup olmasına karar verir. Arduino gibi platformlar, bu tür devrelerin kurulmasında yaygın olarak kullanılır.



Şekil 1. İzolasyon İzleme Devresinin Temel Çalışma Prensiğini Anlatan Devre.

3. AC Sistemlerde İzolasyon İzleme

AC sistemler genellikle şebeke bağlantılı cihazları ve yüksek güçlü ekipmanları içerir. İzolasyon izleme devresi, genellikle bir faz veya nötr ile toprak arasındaki empedansı ölçer. İzolasyon direnci belirli bir eşik seviyesinin altına düştüğünde alarm verir veya sistemin kapanmasını tetikleyebilir. Endüstriyel tesisler veya hastane gibi kritik alanlarda bu devreler kullanılarak elektrik kesintileri ve güvenlik sorunları minimuma indirilir.

İzolasyon izleme devreleri aşağıdaki amaçlarla kullanılır:

3.1.1. Toprak Kaçağı Tespiti

İzolasyon arızası olduğunda akım, fazlardan toprağa kaçabilir. Bu, ekipman ve personel güvenliği için bir risk oluşturur. İzolasyon izleme devresi, bu tür toprak kaçaklarını tespit eder.

3.1.2. Yangın ve Çarpılma Riskini Azaltma

Topraklama sisteminde izolasyonun zayıflaması, yangına neden olabilecek arkların oluşmasına yol açabilir. Aynı zamanda bu durum, elektrik çarpması riski yaratabilir.

3.1.3. Hataları Önceden Algılama

İzolasyon direncinin düşmesi, gelecekteki arızaların habercisidir. İzolasyon izleme devresi, bu düşüşü erken tespit ederek önleyici bakım yapılmasını sağlar.

4. AC de kullanılan formüller

4.1. AC İzolasyon Empedansı

Empedans, direnç ve reaktans bileşenlerinin birleşimi olarak hesaplanır:

$$Z_{izolasyon} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1)$$

- Direnç (R): Devredeki saf ohmik bileşen.
- Reaktans (X): Devredeki kapasitif veya endüktif reaktif bileşen.
- Reaktans, kapasitif (XC) veya endüktif (XL) özelliklere bağlıdır.

4.2. Kapasitif Reaktans (XC)

Bir devrede bulunan kapasitörlerin oluşturduğu reaktans, şu şekilde hesaplanır:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2)$$

- XC: Kapasitif reaktans (ohm)
- f: AC gerilimin frekansı (Hz)
- C: Kapasitans (Farad)

Eğer birden fazla kapasitör paralel veya seri bağlanmış ise

Paralel bağlı kapasitörler:

$$C_{eş} = C1 + C2 + C3 + \dots \quad (3)$$

Seri bağlı kapasitörler:

$$\frac{1}{C_{eş}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + \dots \quad (4)$$

4.3. Endüktif Reaktans (XL)

Endüktansın oluşturduğu reaktans şu şekilde hesaplanır:

$$X_L = 2\pi fL \quad (5)$$

- XL: Endüktif reaktans (ohm)
- f: AC gerilimin frekansı (Hz)
- L: Endüktans (Henry)

Eğer birden fazla indüktör paralel veya seri bağlanmış ise paralel bağlı indüktörler aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{1}{Leş} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots \quad (6)$$

Seri bağlı indüktörler:

$$Leş = L_1 + L_2 + L_3 + \dots \quad (7)$$

4.4. Genel Empedans Hesaplama

Bir devrede hem kapasitif hem de endüktif bileşenler varsa, toplam reaktans şu şekilde bulunur:

$$X = XL - XC \quad (8)$$

Pozitif X: Devre endüktif ağırlıklıdır.

Negatif X: Devre kapasitif ağırlıklıdır.

Toplam empedans:

$$Z_{izolasyon} = \sqrt{R^2 + (XL - XC)^2} \quad (9)$$

4.5. Güç Faktörü ve İzolasyon Durumu

AC devrelerde empedansın faz açısı (ϕ) ve güç faktörü de izolasyon analizinde önemlidir:

Faz açısı:

$$\tan \Phi = \frac{X}{R} \quad (10)$$

Güç faktörü:

$$\cos \Phi = \frac{R}{Z} \quad (11)$$

4.6. Frekansın İzolasyon Üzerindeki Etkisi

Kapasitif reaktans (XC) frekansla ters orantılıdır, bu yüzden yüksek frekansta XC küçülür ve kapasitif bileşenler devrede daha baskın hale gelir.

Endüktif reaktans (XL) ise frekansla doğru orantılıdır, bu yüzden yüksek frekansta XL artar.

5. DC Sistemlerde İzolasyon İzleme

DC sistemler, genellikle batarya tabanlı sistemlerde, yenilenebilir enerji sistemlerinde (ör. güneş panelleri), elektrikli araçlarda ve telekomünikasyon ekipmanlarında bulunur. İzolasyon izleme devresi, DC sistemlerde pozitif ve negatif kutuplar ile toprak arasındaki direnci ölçer. İzolasyon arızası durumunda, genellikle bir alarm sistemi devreye girer veya hata hakkında kullanıcıya bilgi verilir. Özellikle güneş enerjisi sistemlerinde, panel arızalarının ve izolasyon sorunlarının hızlı bir şekilde algılanmasını sağlar.

5.1. Kullanım Amacı

İzolasyon izleme DC sistemlerde de kritik öneme sahip olup aşağıdaki amaçlar için kullanılmaktadır.

5.1.1. Yalıtım Sorunlarının Erken Tespiti

DC sistemlerde izolasyon sorunları, AC sistemlere kıyasla daha zor fark edilir. İzolasyon izleme devresi, bu sorunları erken tespit eder.

5.1.2. Arıza Tespitinde Kolaylık

DC sistemlerde genellikle birden fazla kaynağın birleşimi bulunur (örneğin, bataryalar ve invertörler). İzolasyon izleme devresi, hangi noktada arıza olduğunu belirlemeye yardımcı olur.

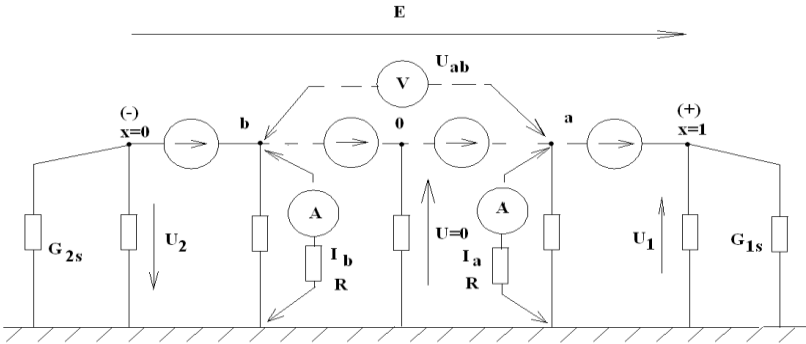
5.1.3. Enerji Kaybını Azaltma

İzolasyon arızaları, DC sistemlerde enerji kaybına neden olabilir. Bu kaybın erken tespiti, sistem verimliliğini artırır.

5.2.DC'de kullanılan formüller

$$R_1 = R_V \cdot \frac{E - U_1 - U_2}{U_2} \quad (12)$$

$$R_2 = R_V \cdot \frac{E - U_1 - U_2}{U_1} \quad (13)$$



Şekil 2. Yalıtım Eşdeğer Devresi.

Yalıtım eşdeğer direncinin bilinen birkaç başka basit yöntemi de vardır. Burada kullanılan en temel yöntemdir. Ampermetre kullanarak ölçüm Şekil 2'de gösterilmiştir

$$R_i = R_V \cdot \frac{U_{ab}}{I_a + I_b} - (R_a + R) \quad (14)$$

Bu formül Thevenin teoreminin yardımıyla aşağıdaki şekilde kolayca türetilebilir.

$$I_a = I_b \text{ (Akımlar birbirlerine eşittir)} \quad (16)$$

$$I_a = \frac{U_a \text{ no load}}{(R_a + R) + R_i} \quad (17)$$

$$I_b = \frac{U_b \text{ no load}}{(R_a + R) + R_i} \quad (18)$$

RA +R dirençlerinin toplamına göre RV direnci ve voltmetre göstergelerini şu şekilde ifade edilir.

$$U_a = (R_a + R) \cdot I_a \quad (19)$$

$$U_b = (R_a + R) \cdot I_b \quad (20)$$

Tablo 1. AC ve DC sistemlerde farklılıklar

Özellik	AC Sistemler	DC Sistemler
Frekans	Sabit bir frekans (ör. 50/60 Hz)	Sabit bir doğru akım
İzolasyon Direnci Ölçümü	Faz/toprak veya nötr/toprak direnci	Pozitif/negatif toprak direnci
Kullanım Alanı	Şebeke bağlantılı ekipman	Batarya, güneş panelleri, telekom
Arıza Tespiti	Akım kaçakları daha belirgin	Arıza tespiti daha zor ve kritik

6. İzolasyon İzleme Devrelerinin Faydaları ve Kazançları

İzolasyon izleme devreleri, elektrik sistemlerinde yalıtım hatalarını tespit ederek güvenliği artıran ve sistem performansını iyileştiren önemli bileşenlerdir. İşte bu devrelerin sağladığı başlıca faydalar ve kazançlar;

6.1. Güvenliğin Artırılması

Elektrik Çarpmalarını Önleme: İzolasyon izleme devreleri, yalıtım hatalarını erken tespit ederek elektrik çarpması riskini önler.

Yangın Riskinin Azaltılması: Yalıtım hataları sonucu oluşabilecek kısa devrelerin ve arkların önüne geçerek yangın ihtimalini düşürür.

Hata Tespitinde Hız: Sistemlerde oluşabilecek yalıtım hatalarını hızlıca tespit ederek müdahale süresini kısaltır.

6.2. Kesintisiz Çalışma

Süreklilik: Kritik altyapılarda (hastaneler, veri merkezleri gibi) sistem kesintilerini önler.

Koruyucu Bakım İmkânı: Olası arızaların önceden fark edilmesiyle bakım faaliyetlerini planlı hale getirir, beklenmedik duruşları önler.

6.3. Enerji Verimliliği

Kayıpların Azaltılması: İzolasyon hatalarından kaynaklanan enerji kayıplarını minimuma indirir.

Daha Uzun Ekipman Ömrü: Elektrik sistemlerini aşırı yüklenme ve hatalı çalışma koşullarından koruyarak ekipman ömrünü uzatır.

6.4. Ekonomik Kazançlar

Arıza Maliyetlerinin Azaltılması: İzolasyon hatalarından kaynaklanan ciddi ekipman hasarlarını ve yeniden kurulum maliyetlerini düşürür.

Enerji Tasarrufu: Yalıtım hatalarının neden olduğu enerji kayıplarını azaltarak işletme maliyetlerini düşürür.

6.5. Çevresel Etkilerin Azalması

Karbon Ayak İzini Azaltır: Enerji verimliliğini artırarak enerji tüketimini düşürür, dolayısıyla çevresel etkileri azaltır.

Sürdürülebilirlik: Güvenli ve uzun ömürlü sistemler, kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunur.

6.6. Yasal ve Standartlara Uygunluk

Uyum Sağlama: Elektrik sistemlerinde zorunlu hale getirilen izolasyon izleme gerekliliklerini karşılar.

Raporlama ve İzleme: Modern sistemler, yalıtım seviyelerini sürekli izleyerek raporlama yapar ve yasal düzenlemelere uygunluğu kolaylaştırır.

İzolasyon izleme devreleri, güvenlik, verimlilik ve ekonomik faydaları bir araya getirerek hem bireysel hem de endüstriyel kullanımda vazgeçilmez bir teknoloji olarak öne çıkar.

7. Sonuç

İzolasyon izleme devreleri, modern elektrik sistemlerinde güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yalıtım hatalarını tespit ederek olası kazaların ve ekipman hasarlarının önüne geçmekle kalmaz, aynı zamanda sistemlerin kesintisiz çalışmasını ve enerji kayıplarının en aza indirilmesini sağlar. Bu özellikleriyle, izolasyon izleme devreleri yalnızca maliyet avantajları sunmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilir bir gelecek için de önemli bir katkı sunar.

Endüstriyel tesislerden kritik altyapılara, konutlardan ticari alanlara kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahip bu sistemler, özellikle enerji verimliliği ve güvenlik standartlarına uyum açısından kaçınılmaz hale gelmiştir. İzolasyon izleme devreleri sayesinde, elektrik sistemlerinde koruyucu bakım faaliyetleri daha etkili bir şekilde planlanabilir ve operasyonel süreçler daha güvenli bir hale getirilebilir.

8. Kaynakça

- [1] J. Smith, " Electrical Safety for Isolation Monitoring Devices" *Electrical Safety Journal*, Vol. 45, No. 3, 2021, pp. 12–25.
- [2] P. Brown, " Principles of Isolation Monitoring in Medical Equipment ", *Biomedical Engineering Reviews*, Vol. 67, No. 4, 2020, pp. 214–230.
- [3] A. Kumar et al., " Design and Implementation of Isolation Monitoring Systems ", *IEEE Transactions on Circuit Design*, Vol. 58, No. 2, 2019, pp. 100–110.
- [4] H. Terzioğlu, G. Yalçın, E. Öksüm, "Bölüm 2: Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi", *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978-605-5447-75-5
- [5] H. Terzioğlu, A.C Ağaçayak, E. Öksüm, "Bölüm 3:Elektrikli Araç Ve Hidrojenli (Yakıt Pili) Araç Teknolojisinde Kullanılan Bataryalar ",*Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978625-6613-95-9
- [6] R. Thompson, " Advancements in Residual Current and Isolation Monitoring Technology ", *Journal of Power Electronics and Systems*, Vol. 12, No. 7, 2022, pp. 55–70.
- [7] H. Zhang, " Fault Detection Techniques in Isolation Monitoring Circuits ", *Electrical Engineering & Automation*, Vol. 9, No. 1, 2021, pp. 40–52.
- [8] International Standards for Isolation Monitoring Devices International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61557-8, 2018.
- [9] M. Y. Ergun, " Modeling and Simulation of Isolation Monitoring Systems ", *Simulation Studies in Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 4, 2020, pp. 89–104.
- [10] T. Lee et al., " Smart Isolation Monitoring Systems for Industrial Applications ", *Journal of Industrial Electronics*, Vol. 15, No. 5, 2023, pp. 145–162.
- [11] R. Binali, G. Yalçın, S. Neşeli, " Kompozit Malzemelere Genel Bakış", *Mühendislikte Yeni Araştırmalar*, (2022)., , Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. Gökhan Yalçın, Öğr. Gör. Abdullah Cem Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 305, Isbn:978-605-5447-75-5
- [12] F. Delgado, " Isolation Monitoring in Renewable Energy Systems", *Renewable Energy Systems Journal*, Vol. 20, No. 6, 2021, pp. 310–325.
- [13] K. Nguyen et al., " Artificial Intelligence Applications in Isolation Fault Detection ", *AI in Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 2, 2022, pp. 78–93.
- [14] S. Patel, " Isolation Monitoring Systems for Electric Vehicles ", *Electric Mobility Research*, Vol. 5, No. 4, 2021, pp. 205–215.

- [15] L. Garcia, " Challenges and Future Directions in Isolation Monitoring Circuits ", *Progress in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2020, pp. 15–28.
- [16] R. Binali, S. Neşeli, G. Yalçın, "İmalat Yöntemlerine Genel Bakış", *Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-2*, (2021)., , İksad, Editör:Prof. Dr. S. Neşeli, Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 113, Isbn:978-625-8423-14-3
- [17] D. Johansson, " Advanced Signal Processing Techniques in Isolation Monitoring ", *Signal Processing Journal*, Vol. 14, No. 3, 2023, pp. 120–138.
- [18] G. Cooper, " Historical Development of Isolation Monitoring Technologies ", *Electrical History Journal*, Vol. 2, No. 1, 2019, pp. 5–18.
- [19] Comprehensive Review of Isolation Monitoring Standards and Regulations World Health Organization (WHO), *Electrical Safety in Healthcare*, 2022.
- [20] A.C. Ağaçayak, H. Terzioğlu, B. Özdeş, "Bölüm 3: Elektrikli Araçlarda Telemetri", *Elektrikli Araçlara Genel Bakış 2* , (2020)., İksad, Editör:H. Terzioğlu, G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 132, Isbn:978-625-7687-48-5,
- [21] R. Binali, G. Yalçın, A.C. Ağaçayak "Modern İmalat Yöntemlerine Genel Bakış ", *Mühendislik Alanında Akademikçalışmalar-1*, (2021). İksad, Editör:Dr. Öğr. Üy. H. Terzioğlu, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 200, Isbn:978-625-8423-15-0
- [22] H. Terzioğlu, F. A. Kazan, and M. Selek, "The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors," presented at the 3rd International Conference on Electrical Engineering and Applications (ICEEA 2013), Konya, Turkey, October 24-25, 2013, 2013.
- [23] F. A. Kazan et al., Eds. *MikroC İle PIC18F4550 Uygulamaları*, 1th ed. Konya: Mesleki Akademi (in Türkçe), 2014.
- [24] H. Terzioğlu, F. A. Kazan, and M. Selek, "The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 446-447, pp. 1197-1201, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1197.



BÖLÜM-3

ARAÇ KONTROL SİSTEMLERİ

Sevim Sude BAL¹
Hakan TERZİOĞLU²

¹<https://orcid.org/0009-0006-1283-4434>

²<https://orcid.org/0000-0001-5928-8457>

ARAÇ KONTROL SİSTEMLERİ

1. Giriş

Araç kontrol sistemi, bir aracın güvenliği, konforu ve performansı için hayati öneme sahip, karmaşık bir elektronik sistemdir. AKS, araçtaki tüm fonksiyonları kapsayan bir ağın omurgasını oluşturur ve gerçek zamanlı veri işleme yeteneği sayesinde aracın dinamik davranışlarına anında yanıt verir. Seçilen haberleşme protokolü sayesinde sensörlerden ve birimlerden gelen verileri toplar, analiz eder ve gerekli durumlarda komut gönderir. Bu sayede aracın tüm fonksiyonları koordine ve optimize edilir. Motor sürücü, batarya yönetim sistemi, yerleşik şarj ve izolasyon birimi AKS ile iletişimde olan temel araç birimleridir. Ayrıca, aracın teşhis sistemi, güvenlik sistemleri ve bilgi sistemleri gibi diğer birçok sistemi de kontrol eder. Tüm bu süre zarfında araç verilerini kaydederek gelecekteki geliştirmelerde önemli bir rol oynar.

Geliştirilen araç kontrol sistemi kartı aşağıdakileri hedeflemektedir.

- Araç içi veri iletişimini sağlamak,
- Potansiyel arızaları teşhis etmek,
- Aracın anlık durumunu kullanıcıya aktarmak
- Toplanan verileri merkezi bir izleme sistemine aktarmak

Üzere dört temel fonksiyonla donatılmıştır. Bu sayede hem araç performansı optimize edilir hem de olası sorunlar erken teşhis edilerek güvenlik sağlanır. Şekil 1' de AKS fonksiyonlarını içeren bir blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. AKS Fonksiyonları.

İnsansız hava ve sualtı araçlarındaki elektrikli tahrik sistemleri hem güvenilirlik, dayanıklılık ve yüksek güç yoğunluğu gerektirirler hem de ağırlığı, karmaşıklığı ve operasyonel maliyetleri yönetmelidirler [1]. Bunu yapabilmeleri için de hız, tork ve yönlerinin çok iyi kontrol edilmeleri gerekir.

2. Materyal Metod

2.1. Araç İçi Haberleşme

Araç içi haberleşme sisteminde, tüm iletişim işlemleri MODBUS protokolü üzerinden gerçekleştirilmektedir. MODBUS protokolü, araç kontrol sistemi (AKS) ile diğer birimler arasındaki iletişimi soru – cevap ile sağlayan bir seri haberleşme standartıdır. AKS, diğer birimlere belirli verileri sorar ve bu birimler de sorulan sorulara cevap verir.

Tasarlanan sistemde, MODBUS protokolünün genel yapısı korunarak, özel bir protokol tasarlanmıştır. Bu tasarımın amacı, araç içi haberleşme yazılımının daha kolay anlaşılır ve yönetilebilir olmasıdır. Protokol 4 temel bölüme sahiptir. Adresleme, fonksiyon kodu, veri bilgileri ve CRC(hata tespiti).

Adresleme, AKS, diğer birimlere belirli bir formatta sorular gönderir ve cevaplar alır. Sistemdeki her bir alt sistem, kendine özgü bir adrese sahiptir ve sadece bu adrese yönelik komutlara cevap verir. Bu sayede, sistemde karmaşık bir haberleşme trafiği olmasına rağmen, her bir mesajın hangi bileşene ait olduğu net bir şekilde anlaşılır. Ayrıca gelen sorulara cevap verirken, cevap mesajının ilk kısmına kendi benzersiz kimlik bilgilerini (adreslerini) eklerler. Bu

sayede AKS, çok sayıda birimden gelen cevapları birbirine karıştırmadan doğru şekilde işleyebilir ve hangi birimin hangi veriyi gönderdiğini belirleyebilir.

Tablo 1’de slave birimlerin adresleri gösterilmektedir. Soruları soran ve cevapları alan tek birim master olan AKS olduğundan onun bir adresi yoktur. Sadece slavelerin adresleri bulunmaktadır. Slaveler sadece gelen sorulara cevap vermekle yükümlüdür.

Tablo 1. Slave Birim Adresleri

Slave Birimler	Adresleri
Batarya Yönetim Sistemi	0xF0
Motor Sürücü	0xF1
Yerleşik Şarj	0xF2
İzolasyon	0xF3

Fonksiyon kodu, AKS, mesajın devamında bir alt sisteme veri okuma, yazma veya durum sorgulama gibi bir işlem yaptırmak istediğine dair bir fonksiyon kodunu mesajın devamına yerleştirir.

Fonksiyon bölümü 1 byte’lık bir alana sahiptir. Slave birimlere yapacağı işlemi bildirir. Tasarımı gerçekleştirilen AKS kartında birimler arası haberleşme doğrultusunda tek bir fonksiyon bulunmaktadır. Durum sorulama. hız, batarya sıcaklığı, motor sıcaklığı, şarj durumu gibi yukarıda bahsedilen takip edilecek verilerin sorgulamasını kapsamaktadır.

Tablo 2’de fonksiyon bilgisi gösterilmektedir.

Tablo 2. Fonksiyon Kodu

Fonksiyon Sorgusu	Veri
Durum Sorgulama	0x01

Mesajın devamında yer alan veri bilgileri, bir mesajın en önemli kısımlarından biridir. Bu bölüm, hangi verinin gönderileceğini veya alınacağını belirler. Veri bölümünün içeriği, mesajın başında yer alan "fonksiyon kodu" ile belirlenir. Yani, fonksiyon kodu bir nevi talimat gibidir ve bu talimata göre veri bölümü şekillenir.

Mesajlarda, verilerin nereden başlayıp nerede biteceği, iki önemli parametre ile belirlenir:

- Veri Başlangıç Adresi: Bu, veri dizisinde nereden okumaya başlayacağını belirtir.
- Veri Uzunluğu: Bu ise toplam kaç baytlık veri okunacağını belirtir.

Slave cihazlar, AKS'ye cevap gönderirken, gönderdikleri verinin nereden başlayıp nerede bittiğini belirten iki önemli bilgiyi yeniden mesajın içinde tekrar ederler. Nedeni ise, AKS, aldığı cevap mesajındaki bu bilgileri kontrol ederek, gelen verinin hangi veriye ait olduğunu bilmesi ve doğru bir şekilde işleyebilmesidir. Böylece, veri alışverişinde olası hataların önüne geçilir.

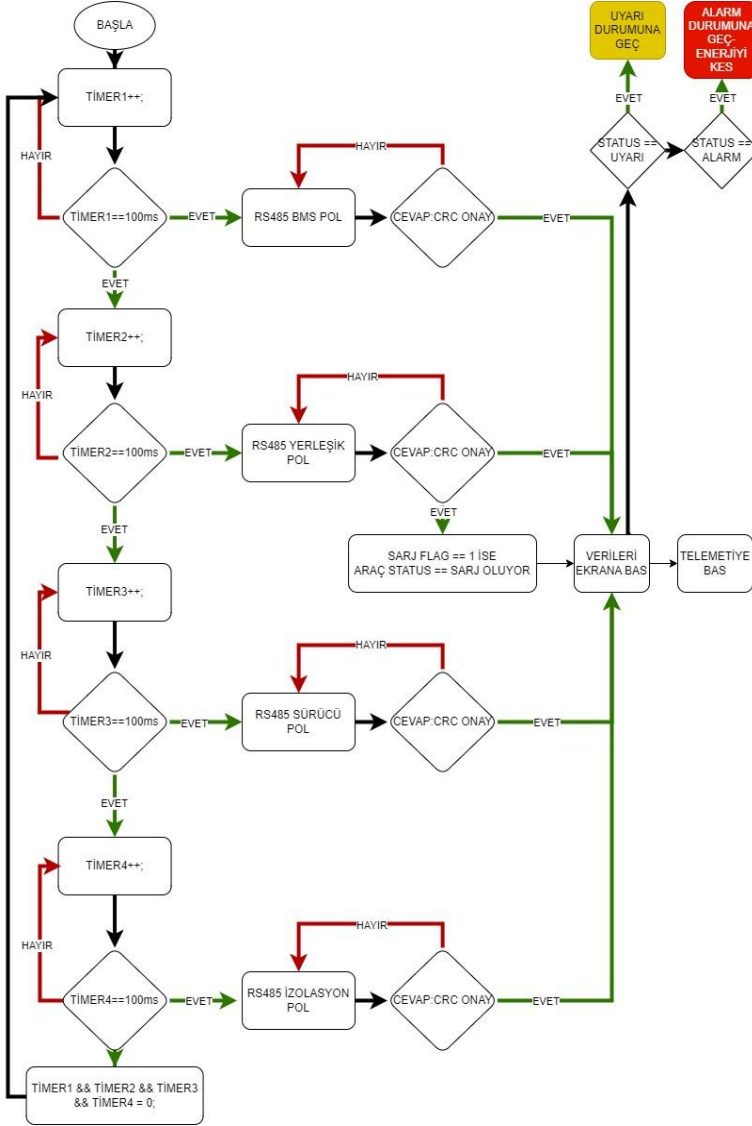
Sorulan ve gönderilen cevapların sonunda, veri iletimi sırasında hataların önlenmesi ve verinin güvenilirliğinin sağlanması için CRC (Cyclic Redundancy Check) adı verilen bir hata kontrol mekanizması kullanılır.

Tablo 3'te kontrol edilen birimlerden birine ait protokol bilgisi yer almaktadır

Tablo 3. Protokol Örneği

1: Durum Sorgulama (0x01)							
İstenen							
Alıcı Adresi	Fonksiyon Kodu	Veri Başlangıç Adresi		Veri Uzunluğu		CRC Kontrol Kodu	
1 byte	1 byte	2 byte		2 byte		2 byte	
0xF1	0x01	0x00	0xFF	0x00	0xFF	CRC_H	CRC_L
Alınan							
Alıcı Adresi	Fonksiyon Kodu	Veri Başlangıç Adresi		Veri Uzunluğu	Gelen Cevap	CRC Kontrol Kodu	
1 byte	1 byte	2 byte				2 byte	
0xF1	0x01	0x00	0xFF	0x00XX		CRC_H	CRC_L
Byte Adres		Veri		Değer Aralığı	Açıklama		
0x00		Araç Hızı		0-255			
0x01		Motor Sıcaklığı		0-255			
0x02		Motor Akım		0-255			
0x03		Motor Voltage		0-255			
0x04							
0x05							

Haberleşmeyi sağlayacak yazılımın oluşturulmasında bu protokol önemli rol oynamaktadır. Şekil 2'de araç içi haberleşme sistemine dair protokole dayalı yazılım algoritması verilmiştir.

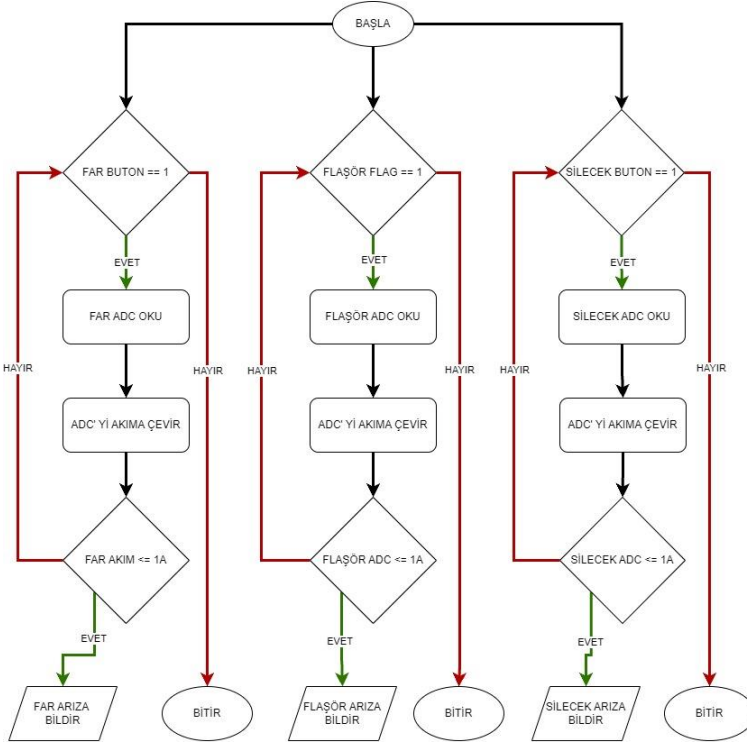


Şekil 2. Haberleşme Yazılım Algoritması

2.2. Arıza Teşhisi

Kartta bulunan arıza teşhisi 2 farklı yöntem ile çalışmaktadır. Birinci yöntem olan donanımsal arıza teşhisi; kart üzerinde bulunana ACS712 entegrelerinin işlemci ile akım verilerini paylaşması ile gerçekleşir. Bu sistemi anlatmak gerekirse AKS kartı üstünde bulunan ACS712 entegreleri bağlanacağı sistemin akımına göre

seçilerek sisteme ampermetre gibi seri bağlanır. Entegre üzerinden geçen akıma göre işlemciye 0-4095 değer aralığında bir analog sinyal (ADC) gönderir. Buna istinaden kod içerisinde yazılmış birkaç matematiksel işlemden geçerek akıma dönüştürülür. İkinci yöntem ise yazılımsal haberleşmede arıza tespiti; Bu sistem MODBUS haberleşme protokolümüze göre bir sistem üzerinden gerçekleşmektedir. Her birim ile haberleşme doğrulanma amacıyla CRC kontrolünden geçmektedir. Bir birim kendi haberleşmesinin CRC hesaplamasını yapar ve verileri ile AKS' ye gönderir. Aks ise bu verilerin tekrardan CRC hesaplamasını yaparak veriyi gönderen sistemin verileri doğru bir şekilde gönderdiği veya AKS' nin doğru bir şekilde alıp almadığını kontrol eder. CRC 'lerde bir uyumsuzluk olması durumunda AKS MODBUS haberleşme hatasına düşerek tekrardan bir uyarı vermektedir. Uyarı durumları sistemi aksatmamakla birlikte tekrar haberleşme gerçekleştiğinde normal çalışma rutinine dönmektedir. Şekil 3'te arıza teşhisi yazılım algoritmasına yer verilmiştir.



ekil 3. Arıza Teşhisi Yazılım Algoritması

2.3. Araç Durumunun İzlenmesi ve Kullanıcıya İletilmesi

Araçın birimlerinden senkron olarak gelecek olan veriler, tasarlanan ekran ile araç sürüş halinde iken araç sürücüsüne gösterilmesinde görev alır. Böylelikle araç sürücüsü, aracın sürüş esnasındaki durumdan haberdar olup sağlıklı ve güvenli bir sürüş gerçekleştirebilecektir. Sürücüye araçta oluşabilecek arıza durumlarını, motordan gelecek olan hız verisi, batarya ve motordan gelecek sıcaklık, akım, voltaj değerlerini, her bir batarya hücresinin sıcaklık ve voltaj değerlerini sürücüye gösterilmesi üzerine bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan ekranda Nexion HMI tercih edilmiştir. Kullanılan ekran modeli NX8048K070_011'dir. Ekran boyutu kolay tedarığı ve estetiksel duruşundan ötürü 7 inç tercih edilmiştir.

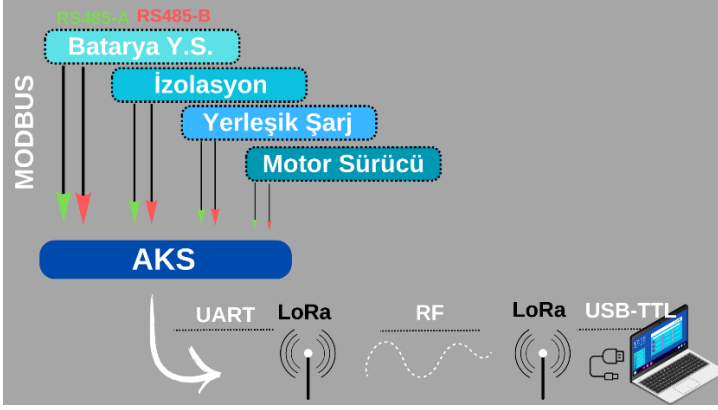
2.4. Araç Verilerinin İzleme Merkezine Aktarılması

Araçtaki verilerin izleme merkezi ile haberleşme kablosuz bağlantı ile sağlanmaktadır. RF teknolojisi ile haberleşmektedir. Bu haberleşme telemetri sistemi olarak adlandırılmaktadır. Bu sistem için piyasada bulunabilirliği, yarış şartlarını karşılayabilmesi ve maliyet açısından en uygun görülen LoRa E32 433T20D modeli kullanılmıştır.

4 adet değişken veri aktarımı gerçekleştirilmektedir. Bu değişkenler şu şekildedir:

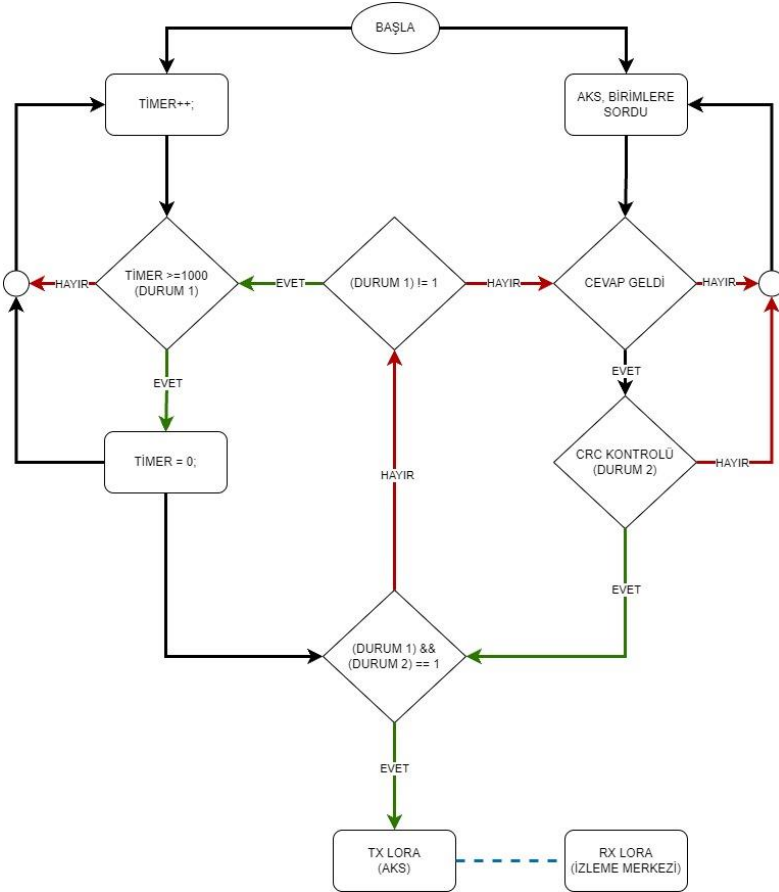
1. Araç hızı (km/h)
2. Batarya paketinin sıcaklığı (°C) (en yüksek olanının sıcaklığı)
3. Toplam batarya gerilimi (V)
4. Kalan enerji miktarı (Wh).

Haberleşme yönü tek taraflı olup AKS' den, izleme merkezine gerçekleştirilmektedir. Şekil 4'te telemetri haberleşme diyagramı görseli oluşturularak belirtilmiştir.



Şekil 4. Telemetri Haberleşme Diyagramı

Şekil 5'te telemetri sistemi yazılım algoritması verilmiştir.



Şekil 5. Telemetri Yazılım Algoritması

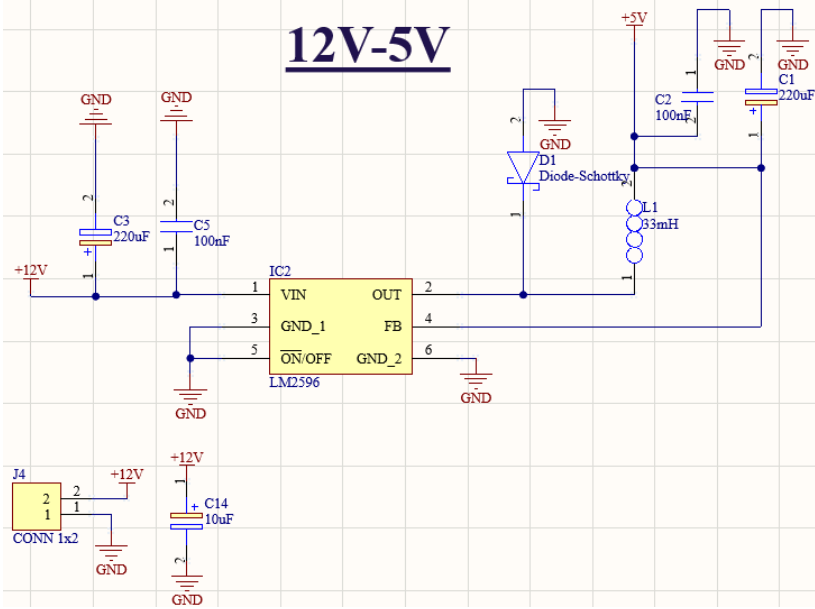
Tüm bu sistemler tek bir kartta toplanmış ve AKS kartı donanımsal olarak da tasarlanmıştır. Donanımında birçok hususa dikkat edilmiştir.

2.5. AKS Kartı Donanımsal Tasarımı

Araç kontrol sistemi (AKS) kartının tasarımında işlevselliği ve kullanılabilirliği ile ön plana çıkan bir tasarım yapılmıştır. İstenilenleri en sade tasarımla yapabilecek ve sürdürebilecek bir tasarım söz konusudur. Yüksek çalışma performansı, güvenlik ve koruma önemleri göze alınarak devre elemanlarına karar verilmiştir. Kartın tasarımı sırasında seçilen komponent ve malzemeler piyasa fiyatlandırılması ve piyasada bulunmuşluğu göz önüne alınarak seçilmiştir.

2.5.1. 12V-5V Regülatör

Şekil 6'da verilen görseldeki şematikte 12V – 5V dönüşümü için LM2596 regülatör entegresi kullanılmıştır. Kullanım sebebi, devrede bulunan RTC sistemi, telemetri sistemi ve sürücü ekranı sisteminin 5V ile çalışıyor olmasıdır. Bunun için 12V'tan 5V'a düşüren regülatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Direkt karta 5V verilmeme sebebi ise devrede en yüksek besleme olarak 12V ile çalışan flaşör, acil stop butonu ve herhangi bir durumda lazım olabilecek çıkışlar için mosfetler bulunmaktadır. Bu devre elemanlarını beslemek için gereken maksimum besleme 12V sağlanıp diğer devre elemanlarını beslemek için regülatörler kullanılmak istenmiştir. Lm2596 çalışma aralığı ve güvenlik özellikleri nedeniyle 12V'u 5V'a düşürmek için tercih edilmiştir. Regülatör çıkışından 5 volt (V), 3amper(A) elde edilir. 12V'tan 5V'a gerilimi düşürürken filtreleme amacı ile 2 adet 220uF polarize kapasitör ve 2 adet 100nF kutupsuz kapasitör tercih edilmiştir. Devrede olası bir geri beslemede entegrenin zarar görmemesi için schottky diyot kullanılmıştır.

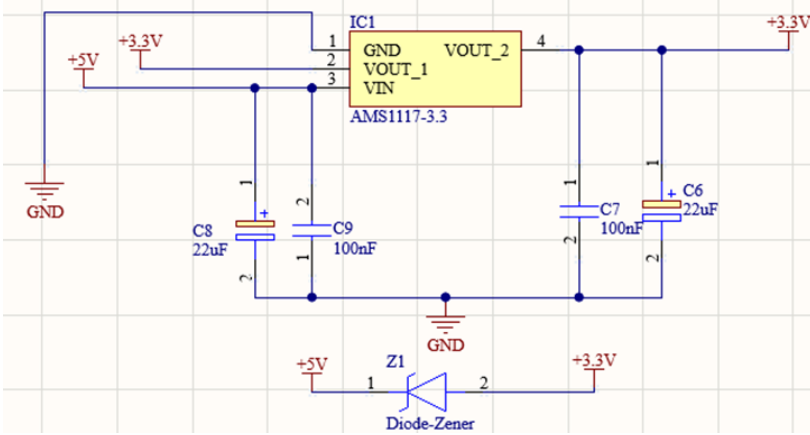


Şekil 6. 12V-5V Regülatör Şematik

2.5.2. 5V-3.3V Regülatör

Şekil 7’de LM2596 tarafından 5V’a düşürülen beslemenin 3.3V ile beslenen devre elemanlarını beslemek için tekrar düşürülmesinde kullanılacak entegrenin şematik bağlantısı görülmektedir. 3.3V ile beslenen devre elemanları SD kart, işlemci, ACS712’ler, dijital girişler ve MODBUS entegresidir. 5V-3A’in 3.3V-1A’e düşürülmesinde AMS1117 tercih edilmiştir.

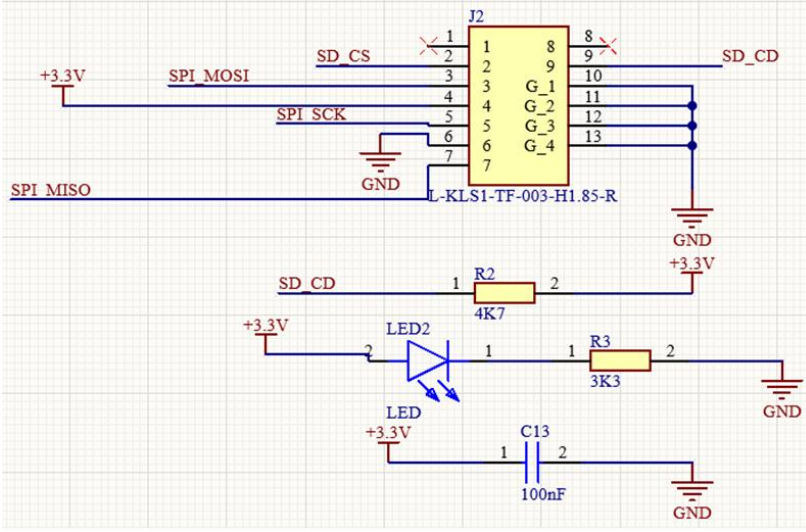
Datasheeti incelendiğinde yüksek ve stabil çalışma performansı tercihte etkili olmuştur. Zener diyot tercihi ise, 5 volt tarafında bir arıza oluşması durumunda gerilim 3.3 volta akarak bu gerilimde çalışan sistemlerin zarar görmemesi için koruma görevi üstlenmesidir. Filtreleme ve paraziti azaltmak için devrede 2 adet 22uF polarize kapasitör ve 100nF kutupsuz kapasitör kullanılmıştır.



Şekil 7. 5V/3.3V Regülatör Şematik

2.5.3. SD Kart

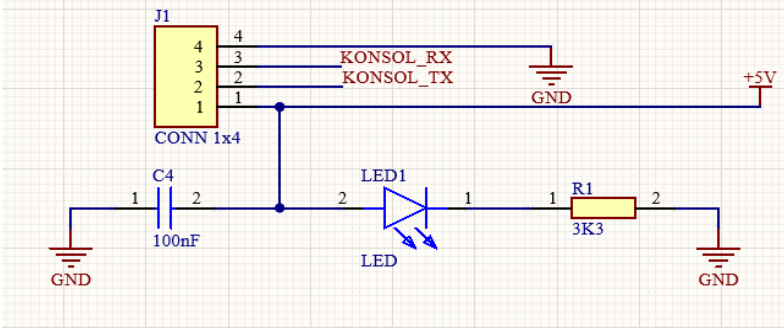
Şekil 8’de SD Kart şematik görseli verilmektedir. SD kart sistemi, AKS ile haberleşmede olan birimlerin ve telemetri sisteminin ilettiği tüm verilerin log kaydının tutulması ve saklanması için devrede kullanılmıştır. Olası durumlarda kayıtlara bakabilme imkanı sunmaktadır. SD_CD bacağı sd kartın okuma ve yazdırma yetkilerini verebilmek için 4.7K’lık pull up direnç ile desteklenerek kullanılmıştır. Kullanılan led ise SD karta gerilim gelip gelmediğini belirtmesi amacıyla yerleştirilmiştir. SD kart kendi protokolünde bulunan eş zamanlı veri iletimi sağlayan Master-Slave alt yapısına sahip SPI haberleşmesi ile işlemciyle iletişimini sürdürmektedir. Beslemesi 3.3V’tur. Filtreleme amacı ile besleme bağlantısında 100nF’lik kapasitör kullanılmıştır. Led için 3.3K’lık direnç tercih edilmiştir.



Şekil 8. SD Kart Şematik

2.5.4.Sürücü Ekranı

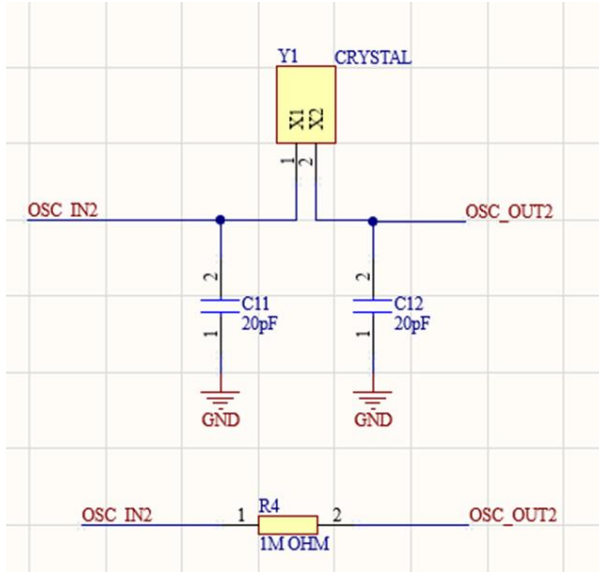
Şekil 9’da görseli bulunan şematik sürücü ekranına aittir. Araç sürücüsüne araç hızı, batarya sıcaklıkları, batarya enerji, akım ve gerilimleri, silecek far ikaz durumları gibi bilgileri aktarması için bu tasarım gerçekleştirilmiştir. Araç sürücüsünü aracın sürüş esnasındaki durumundan haberdar ederek güvenli bir sürüş gerçekleştirmesine yardımcı olur. Sürücü ekranı işlemciye KONSOL_RX ve KONSOL_TX pinleri ile bağlanmaktadır. UART tabanlı haberleşme ile görevini gerçekleştirmektedir. Sürücü ekranı şematik tasarımında kullanılan led, ekrana güç gidip gitmediğini belirtmesi amacıyla konulmuştur. Bu şekilde olası oluşabilecek sorunlarda kolaylık sağlayacaktır. Ekran şematik tasarımında filtreleme yapmak için 100nF’lik kapasitör kullanılmış, lede gelecek akımı düşürmek için 3.3K’lık direnç tercih edilmiştir. Sürücü ekranına güç gidip gitmediğini belli etmesi için de led kullanılmıştır.



Şekil 9. Sürücü Ekranı Şematik

2.5.5. 8MHz Kristal

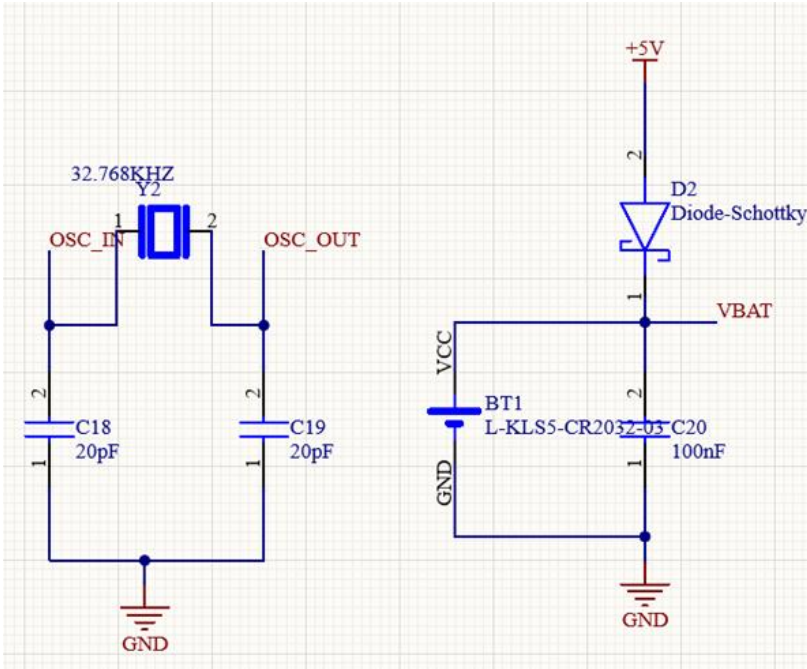
64 MHz frekans ayarında çalışan AKS devresini olası bir durumda 72MHz frekans bandına çıkarmak için 8MHz'lik bir kristal kullanılmıştır. Kristalin şematik devre tasarımı Şekil 10'da verilmiştir. Bu devre tasarımında kristalin işlemci ile olan bağlantıları OSC_IN2 ve OSC_OUT2 pinleri ile sağlanmıştır. İşlemcide OSC_IN ve OSC_OUT bacaklarına girişleri sağlanmıştır.



Şekil 10. 8MHz Kristal Şematik

2.5.6. RTC

Şekil 11’ de görseli bulunan RTC tasarımı SD kart ile senkron çalışmaktadır. Ana güç kaynağında oluşabilecek bir elektrik kesintisi veya arıza durumunda saatin tekrar programlanmasına gerek duyulmadan arka planda saat ve tarih akışına devam eder. Böylelikle log kaydının tutulması için SD karta yardımcı olur. Devreye bu sebep ile RTC tasarımı entegre edilmiştir. Güç kesintisinden etkilenmemesinin sebebi harici bir 3.3V pile sahip olmasıdır. Tasarımda yer alan 32.768 KHz’lik kristalin gerçek zamanlı saatin saniyede 32.768 kez sinyal göndererek ölçülmesinde önemli bir rol oynar. Filtreleme için 100nF kapasitör ve koruma sağlaması için schottky diyot kullanılmıştır. Kristalin çalışması esnasında gürültü ve parazit için önlenmesi için 20pF’lık 2 adet kapasitör tasarımda bulunmaktadır. İşlemciye bağlantısı VBAT pini ile sağlanmıştır.

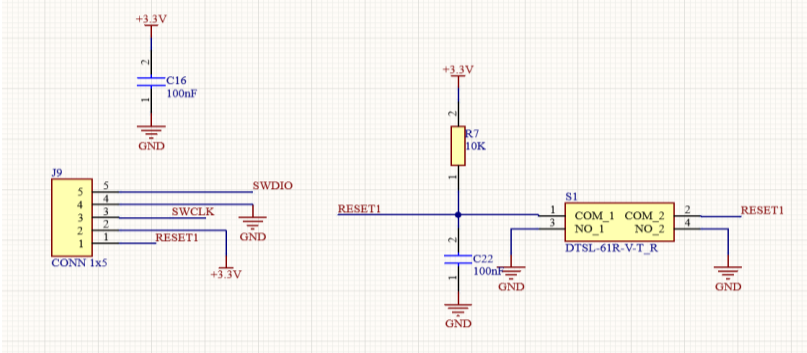


Şekil 11. RTC Şematik

2.5.7. Reset

Şekil 12’de bulunan tasarım Set-Reset sistemine aittir. İşlemciye kart kontrolü için atılacak kodun atılması ve kodun sıfırlanması için,

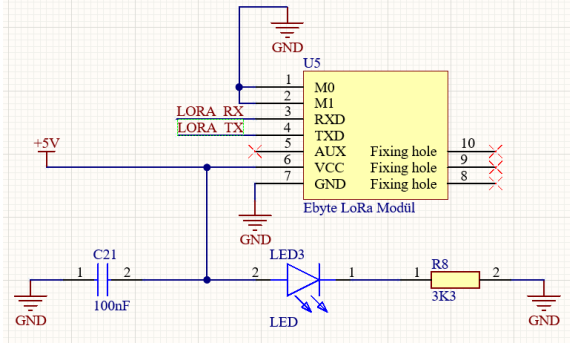
reset sistemine ihtiyacı bulunmaktadır. DTSL_61R-V-t_R butonu yerleştirilerek reset işlemi gerçekleştirilecektir. 5.bacakta bulunan reset bağlantısı ise sıfırlama (reset) işleminde bağlantıyı sağlayacak pindir. Filtrelemeler için 100nF kapasitörler ve pull up direnci devreye yerleştirilmiştir. 5'li konnektöre bağlı SWDIO, GND, SWCLK ve VCC set (kodu atma) işlemi sırasında aktive olacak pin bağlantılarıdır. Pin karşılıkları işlemci üzerinde yer almaktadır.



Şekil 12. Set-Reset Şematik

2.5.8. Telemetry

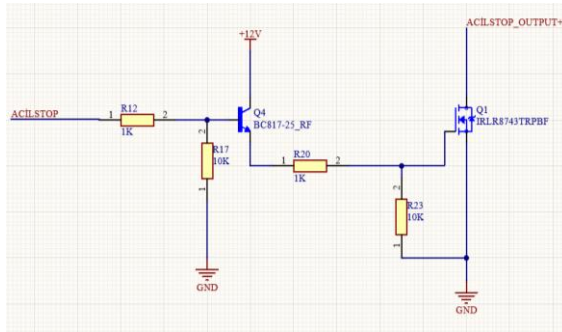
Şekil 13'te görseli bulunan şematik telemetry şematığıdır. Ebyte LoRa Modül olarak bulunan entegre Lora modülüne aittir. Telemetry tasarımında Lora Modülü olarak Ebyte32 serisi kullanılmıştır. LoRa'nın işlemciye bağlantıları LORA_RX ve LORA_TX pinleri ile sağlanmıştır. LoRa haberleşmesi iki LoRa arasında RF haberleşmesi vardır. İşlemci ile lora arasında ise Uart tabanlı bir haberleşmeye sahip olduğundan TX ve RX bacakları işlemciye girişte çaprazlanarak rx-tx, tx-rx bağlantıları kurulmuştur. Devre tasarımında filtreleme için 100nF kapasitör kullanılmıştır LoRa 5V'luk bir besleme ile çalışmaktadır. Ledin yüksek voltajda patlamaması için koruma direnci olarak 3.3K'lık direnç yerleştirilmiştir.



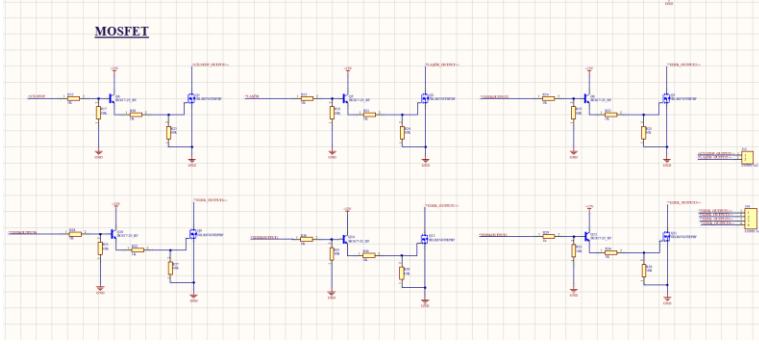
Şekil 13. Telemetri

2.5.9. MOSFET Çıkışlar

Şekil 14’te verilen sistem AKS kartının dijital çıkış sistemini oluşturmaktadır. Bu sistem olası sistemleri (acil stop sistemi, flaşör sistemi, alarm sistemi vb.) aks tarafından çalıştırmak için kullanılmıştır. Sistem aksden çıkan 3.3V dijital çıkış ile öncelikle transistörü açmakta ve 12 volt geçişini sağlamakta, geçişi sağlanan bu gerilim ise mosfeti verimli bir şekilde açarak çalıştırılmak istenen sistemin gnd hattını birleştirerek çalıştırmaktadır. Yani asıl amacı işlemcinin güç bakımından yetersiz kaldığı kontrol sistemlerini kontrol edebilmesi için geliştirilmiştir. Sistem logic 0 konumuna geçtiğinde sistemin deşarj olabilmesi için pull-down dirençleri yerleştirilmiştir. Toplam 6 adetten oluşan sistem şematığının görüntüsü Şekil 15’ te verilmiştir. Bu isterler doğrultusunda transistör olarak BC817 N Kanal tercih edilmiştir. Mosfet tercihi ise 7NM70G-TN3-R N Kanal olmuştur.



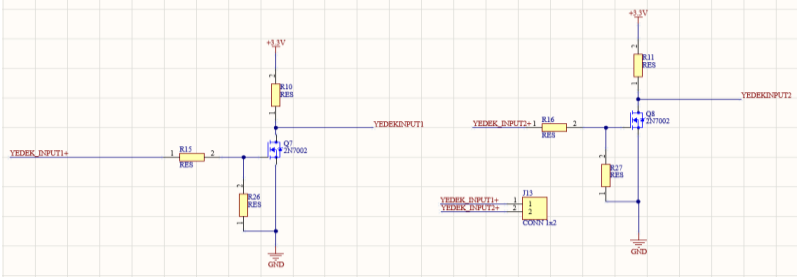
Şekil 14. Mosfet Çıkışlar Şematik[1]



Şekil 15. Mosfet Çıkışlar Şematik[2]

2.5.10. MOSFET Girişler

Aks sisteminde bulunan dijital girişler özellikle arıza teşhisinde buton kontrollerinin sağlanması amacı ile mosfetli bir sistem ile kurulmuştur. Şekil 16'da tasarımı yapılmış olan sistem işlemciye girecek voltajı 3.3 volt sınırının önüne geçmiştir. Tasarlanan sistem ile mosfetin gate bacağından girecek 12,5,3.3 volt seçeneklerinden hangisi girerse girsün mosfetin sistemini açarak işlemci girişini logic 1 konumundan logic 0 konumuna çekerek bir bildirim oluşturmaktadır ve buna göre işlem yaptırmaktadır. Bu isterler doğrultusunda 2N7002CK N Kanal SMD Mosfet kullanılmıştır. 60V drain- source gerilimine sahip ,sürekli olarak 300mA çalışma değerleri mevcuttur.

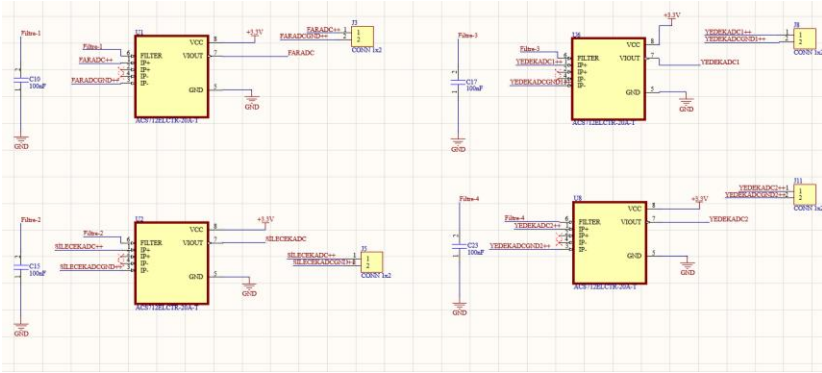


Şekil 16. Mosfet Girişler Şematik

2.5.11. ACS710

Arıza teşhisi için Şekil 17'de görülen ACS712 entegreleri kullanılmıştır. Devre tasarımında 4 adet ACS712 entegresi kullanılmıştır. Bu entegre sisteme seri bağlanarak bağlanan hat

üzerinden geçen akımı ölçmektedir. Ölçülen akımların ufak değerler olduğu göz önünde bulundurulduğunda hatta oluşabilecek gürültüler kullanıcı yanılması muhtemeldir. Bu sebep ile ADC hattında oluşabilecek gürültülerin önüne geçebilmek amacı ile 100nF'lık bir kapasitör kullanılmıştır. Acs712 kullanıldığı modele bağlı olarak çektiği akım değerine göre işlemciye 0-4095 değer aralığında bir değişken göndermektedir. Aks işlemcisinin gömülü yazılımında bu değer matematiksel işlemler ile akıma çevrilerek bunun üzerinden işlem yapmaktadır. Sistem akım çekmesi gerektiği yerde akım çekmiyorsa. Durumu UART yoluyla haberleşerek ekrana bildirmekte ve görüntülü uyarı vermektedir.

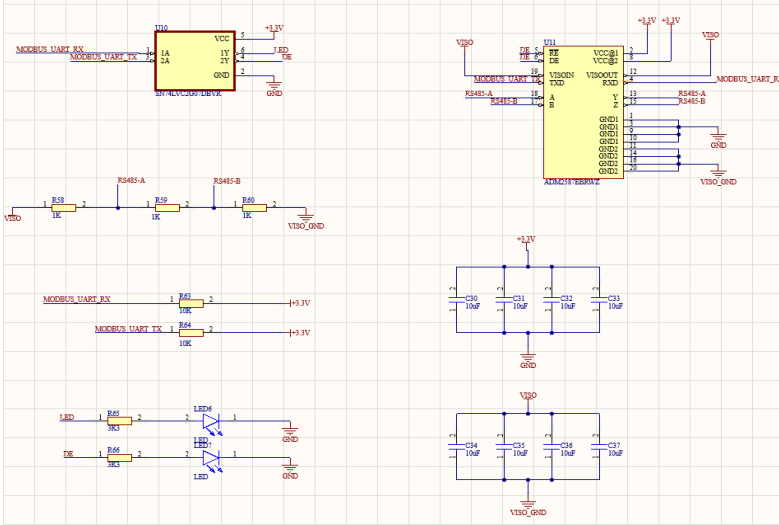


Şekil 17. Arıza Teşhisi Şematik

2.5.12. MODBUS

Sistem haberleşme kolaylığı ve düzeni açısından MODBUS protokolü araç takımı ile ortak karar ile belirlenmiştir. Şekil 18'de MODBUS haberleşme şematik çizimi görülmektedir. Bu sistem oluşturulurken haberleşme protokolünün sadeliği, anlaşılabilirliği ve sorunsuz olmasına özen gösterilmiştir. Oluşturulan şematikte ADM2587 entegresi kullanılmıştır. Piyasaya bakıldığında diğer entegrelere nazaran biraz daha maliyetli olması göze batmaktadır. Fakat bunun sebebi olarak entegrenin izole bir şekilde çalışarak ağır sistem gürültülerinden olabildiğince engellenmesi ve olası ani yük artışlarında veya farklı sorunlarda sistemlerin minimum düzeyde hasar alması göz önünde bulundurulmuş ve bu entegrenin seçilmesinin hem güvenilirlik hem de profesyonellik anlamında daha uygun olduğu kararlaştırılmıştır. Sistem üzerinde alıcı ve verici

ledlerinin bulunması ise harici bir göz ile haberleşmenin gerçekleştiğini göstererek kullanıcıya arıza durumlarında önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Entegrenin alıcı-verici durum seçimini gelen ve giden sinyallere göre durumunu değiştirmek için bir tampon –sürücü(tersleyici) entegresi olan SN74LVC2G07DBVR kullanılmıştır. Filtreleme kapasitörleri ile hem izole edilen haberleşme ağı hem de işlemci ile entegre arasında oluşabilecek gürültüler minimum düzeye indirgenmiştir. Yazılım tarafında ise her birime kendine özgü adresler verilmiş ve bu verilerin alış sıralaması belirlenerek verilerin karışmasının önüne geçilmiştir. CRC kontrolleri ile de bu sorun minimum düzeye indirgenmiştir. Araç içerisinde RS-485 hattının bağlantıları RJ45 soketleri ile gerçekleştirilmiştir.

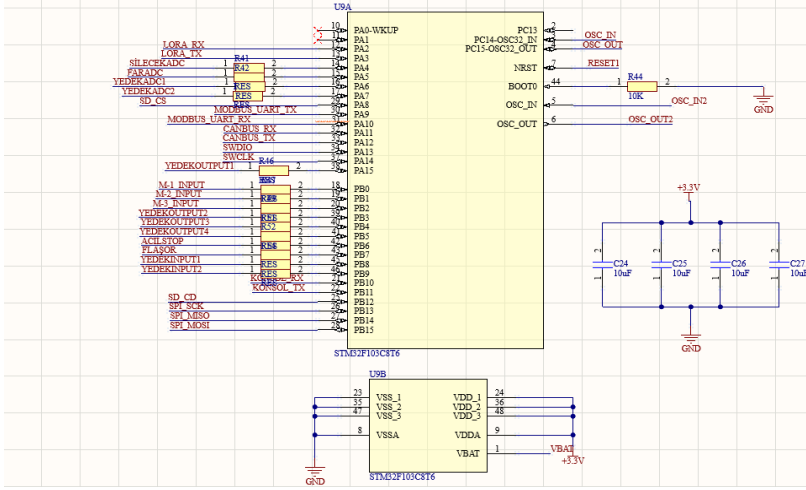


Şekil 18. MODBUS Haberleşme Şematik

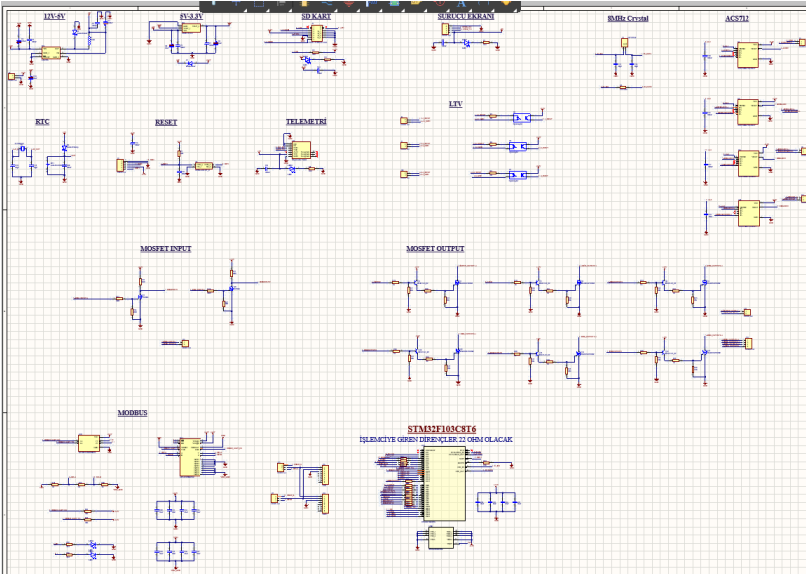
2.5.13. STM32F103C8T6

Şekil 19’da AKS kartının beyni olan işlemcisinin şematik tasarımı verilmiştir. Araç kontrol sistemi için maliyet, bulunabilirlik, yeterlilik ve güncel teknolojileri baz aldığımızda ST markasının üretmiş olduğu stm32f103c8t6 modeli uygun görülmüştür. Özellikleri incelendiğinde gerek haberleşme kanalları gerek işlemci çalışma frekansı gerek ise işlemci pin çeşitliliği ile isterlerin hepsini karşılamaktadır.

İşlemci giriş ve çıkışlarına seri, düzeni bozmayacak değerde 22 ohm dirençler atılmıştır. Bu dirençlerin atılma sebebi olası kartta yanan ve işlemciye geri besleyen yüksek ve düzensiz voltajlar sonucunda yüksek maliyetli işlemcinin aksine önündeki düşük ohm ve düşük maliyetli dirençlerin yanarak koruma görevi üstlenmeleridir. Şekil 20'de AKS kartı tam sayfa sheet görseli verilmiştir.



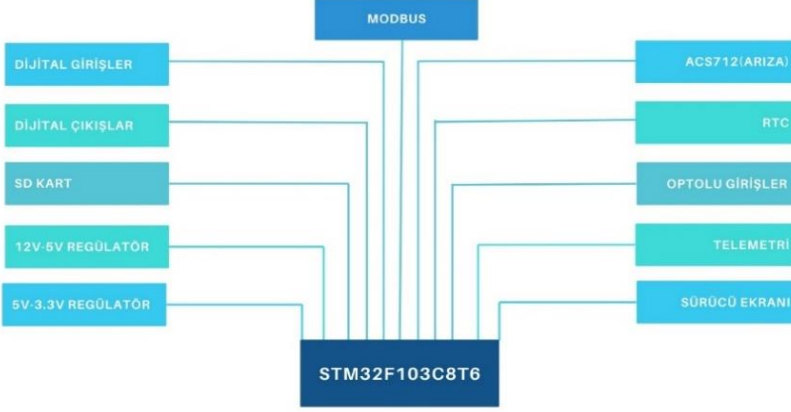
Şekil 19. İşlemci Şematik



Şekil 20. AKS Sheet Tam Sayfa Görşeli

Madde 1'den 13'e kadar ilerleyen tasarım adımları gerçekleştirilip devre tasarımı tamamlanmıştır.

Şekil 21'de AKS kartı devresine ait blok şeması verilmiştir.



Şekil 21. AKS Devresi Blok Şeması

3. Sonuç

Araç kontrol sistemi hem donanım hem de yazılım kullanılarak geliştirilmiş bir sistemdir. Bu sistem, aracın farklı parçaları arasında sürekli iletişim kurarak aracın sorunsuz çalışmasını sağlar. Ayrıca, aracın hareket halindeyken gerçekleşen tüm olayları kaydeder ve bu bilgileri hem sürücüye hem de uzaktaki bir merkezde bulunan yetkililere aktarır. Böylece, olası sorunlar önceden tespit edilebilir ve gerekli önlemler alınabilir.

Şu anda kullandığımız araç kontrol sistemi yalnızca RS485 haberleşme protokolünü desteklemektedir. Bu durum, farklı protokoller kullanan yeni nesil araç bileşenlerinin sisteme entegre edilmesini zorlaştırmakta ve sistemin esnekliğini kısıtlamaktadır.

Sistemi geliştirmek için, yazılım ve donanım altyapısını genişleterek CAN BUS, LIN BUS, Ethernet gibi farklı protokolleri de destekleyecek hale getirilmesi gerekmektedir. Bu sayede, sistem farklı üreticilerin ürettiği ve farklı protokoller kullanan araç bileşenleriyle sorunsuz bir şekilde çalışabilecektir.

4. Kaynakça

- [1] Terzioğlu H., Kazan F. A. and Selek M., "The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors," presented at the 3rd International Conference on Electrical Engineering and Applications (ICEEA 2013), Konya, Turkey, October 24-25, 2013, 2013.
- [2] Kazan F. A., Ağaçayak A.C., Arslan C., and Selek M., H. Terzioğlu and S. Satuk, Eds. MikroC İle PIC18F4550 Uygulamaları, 1th ed. Konya: Mesleki Akademi (in Türkçe), 2014.
- [3] Terzioğlu, H., Kazan F.A., and Selek M., "The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 446-447, pp. 1197-1201, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1197.
- [4] Durgun, Y. E., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elektromobil Araç Kontrol Sistemi Tasarımı ve Entegrasyonu, 20194
- [5] Çınar S., Ağaçayak A.C., "Bölüm 1: 48v Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı" *Mühendislikte Yeni Araştırmalar; (2022).*, *Tablet Kitapevi*, Editör:Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım sayısı:1, ss 305, ISBN:978605-5447-75-5
- [6] Kara, İ., Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, CAN Haberleşme Protokolünün İncelenmesi ve Bir Sıcaklık Kontrol Sistemine Uygulanması, 2009 A. Kumar et al., " Design and Implementation of Isolation Monitoring Systems ", *IEEE Transactions on Circuit Design*, Vol. 58, No. 2, 2019, pp. 100–110.
- [7] Ağaçayak A.C., Terzioğlu H., Özdeş B., "Bölüm 3: Elektrikli Araçlarda Telemetri", *Elektrikli Araçlara Genel Bakış 2* , (2020)., *İksad*, Editör:H. Terzioğlu, G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 132, Isbn:978-625-7687-48-5,
- [8] İstanbul Üniversitesi, Verimlilik Yarışları İçin Bir Elektrikli Otomobilin Gerçeklenmesi H. Zhang, " Fault Detection Techniques in Isolation Monitoring Circuits ", *Electrical Engineering & Automation*, Vol. 9, No. 1, 2021, pp. 40–52.
- [9] Topuz, M., Konya Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Hibrit Araçlar İçin Haberleşme Birimi İle Araç Kontrol Sistemi ve Linux Tabanlı GUI Tasarımı, 2021
- [10] Güneş D., Servi S., Kaya O., "A Mobile Pharmacy Application: Sıfaap", *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-3*, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Dr. Öğr. Üyesi Fatih Alpaslan Kazan, Öğr. Gör. Gökhan Yalçın, Basım sayısı:1, ss 113, ISBN:978-625-6613-96-6
- [11] Terzioğlu H., Yalçın G., Öksüm E., "Bölüm 2: Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi", *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, (2023)., *Eğitim Yayınevi*, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978-605-5447-75-5

- [12] Ağaayak A.C., Terzioğlu H., Özdeş B., "Bölüm 3: Elektrikli Araçlarda Telemetri", *Elektrikli Araçlara Genel Bakış 2* , (2020)., *İksad*, Editör:H. Terzioğlu, G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 132, Isbn:978-625-7687-48-5,

BÖLÜM-4

PEM YAKIT HÜCRESİ İÇİN BOOST CONVERTER TASARIMI

*Bengisu GÜVEN¹
Hakan TERZİOĞLU²*

¹<https://orcid.org/0009-0003-2393-0251>

²<https://orcid.org/0000-0001-5928-8457>

PEM YAKIT HÜCRESİ İÇİN BOOST CONVERTER TASARIMI

1. Giriş

Hidrojenin sıvı hale getirildiğinde hacminin yaklaşık 700 kat küçülmesi, yakıt depolama ve taşımada ciddi avantajlar sağlayarak araçların daha küçük, hafif ve ekonomik yakıt depoları kullanmasına olanak tanımaktadır. Bu özellik, hibrit ve hidrojenle çalışan araçların enerji sistemlerini optimize ederek toplam maliyetlerini düşürmekte ve performanslarını artırmaktadır.

Bununla birlikte, hidrojen enerjisinin araçlarda etkin bir şekilde kullanılabilmesi için proton değişim membranlı (Proton Exchange Membrane, PEM) yakıt hücresi gibi teknolojiler kritik bir rol oynamaktadır. PEM yakıt hücresi, hidrojenin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan yenilikçi bir teknolojidir. Ancak, bu hücrelerin düşük çıkış gerilimleri, doğrudan endüstriyel uygulamalar veya motor sürücülerine enerji sağlamak için yetersiz kalmaktadır. PEM yakıt hücresi sistemleri genellikle 30-46V aralığında çıkış gerilimi üretirken, hibrit araçların motor sürücülerinin genellikle 72V giriş gereksinimi bulunmaktadır.

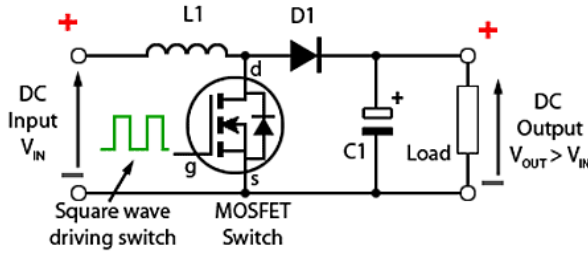
Bu noktada, DC-DC (doğru akım-doğru akım) yükseltici (boost) devrelerinin devreye girmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, PEM yakıt hücresi sistemlerinin düşük gerilim problemini çözmek ve enerji dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla DC-DC yükseltici devrelerin rolü ele alınacaktır. Yükseltici devrelerin teknik tasarımı ve performans iyileştirme yöntemleri incelenerek, hidrojen enerjisinin hibrit araçlara entegrasyonundaki zorlukların üstesinden gelinmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, PEM yakıt hücrelerinden elde edilen 30-46V aralığındaki enerjinin, 72V giriş gereksinimi olan motor sürücülerine daha yüksek verimlilikle aktarılmasını sağlamak için MOSFET transistörler, indüktörler ve diğer temel devre elemanlarıyla oluşturulan yapılar üzerinde durulacaktır.

Hidrojen enerjisinin ulaşım sektöründe geniş çaplı bir şekilde uygulanabilmesi hem çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunacak hem de ekonomik olarak uzun vadeli çözümler sunacaktır. Bu bağlamda, çalışma, enerji verimliliğini artırmaya ve hidrojen

enerjisinin potansiyelini ortaya koymaya yönelik önemli bir katkı sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metod

Boost converter, giriş gerilimini yükselterek daha yüksek bir çıkış gerilimi elde etmek için tasarlanmış bir DC-DC çevirici devresidir. Bu devreler, özellikle düşük voltajlı enerji kaynaklarının yüksek voltaj gerektiren uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılarak enerji sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 1’de boost converter devresinin genel yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Boost Converter Devresinin Genel Yapısı

Boost converter devresinin temel çalışma prensibi, bir bobin, genellikle MOSFET olan bir anahtarlama elemanı, bir diyot ve bir kondansatörden oluşan bir sistem üzerine kuruludur. Devre, anahtarlama elemanının periyodik olarak açılıp kapanması ile çalışır. Anahtarlama elemanı açık olduğunda, enerji indüktör içinde manyetik alan olarak depolanır. Anahtarlama elemanı kapandığında ise, bu enerji serbest bırakılarak diyot üzerinden çıkışa aktarılır ve çıkış geriliminde bir artış sağlanır. Bu süreç, devrenin hızlı ve sürekli bir şekilde çalışmasını sağlayarak yüksek verimlilikle enerji dönüşümü gerçekleştirir.

Boost converter tasarımında dikkate alınması gereken bazı kritik parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler arasında anahtarlama döngüsünün açık kalma oranı olarak ifade edilen duty cycle, devreden geçen ana akım, indüktör değeri, indüktör sarım sayısı ve kondansatör kapasitesi gibi faktörler yer almaktadır. Bu bileşenlerin uygun şekilde seçilmesi ve hesaplanması, devrenin kararlılığı, verimliliği ve uzun ömürlü çalışması için hayati önem taşımaktadır. Duty cycle değeri, çıkış geriliminin kontrol edilmesinde doğrudan

etkiliyken indüktör değeri ise enerji depolama kapasitesini ve akım salınımını belirlemektedir.

Mosfet gibi anahtarlama elemanları, devrede yüksek hızda açma ve kapama işlemleri gerçekleştirerek enerji dönüşüm sürecini yönetir. Diyotlar, akımın yalnızca çıkış yönünde akmasını sağlayarak enerji kayıplarını önlerken, kondansatörler çıkış geriliminin stabil olmasını sağlar, yani dalgalanmaları minimum seviyeye indirir. Tüm bu bileşenler, belirli bir algoritmaya uygun olarak çalışır ve bir araya geldiğinde yüksek verimli ve güvenilir bir boost converter sistemi oluşturur.

PEM yakıt hücrelerinden gelen ani gerilim dalgalanmalarını dengelemek ve giriş gerilimini daha istikrarlı hale getirmek için belirli önlemler alınması gerekmektedir. Bu kapsamda, PEM yakıt hücresi çıkışına paralel kondansatörler eklenmesi, devrenin performansını artırmak açısından kritik bir adımdır. Paralel bağlanan bu kondansatörler gerilim dalgalanmalarını filtreleyerek devreye daha sabit ve temiz bir giriş sinyali sunar. Böylece, boost converter devresi ve diğer enerji dönüşüm sistemleri, daha kararlı bir giriş sinyali ile beslenmiş olur.

Boost converter devresinde, anahtarlama açık veya kapalı olması, devredeki akımın izlediği yolu ve devrenin temel çalışma prensibini belirler. Anahtarlama elemanı kapalı konumdayken, akım bobin üzerinden geçerek anahtarlama elemanından devresini tamamlar. Bu süreçte bobin üzerinde bir manyetik alan oluşur ve enerji bobin içerisinde manyetik alan formunda depolanır. Aynı zamanda, bobin polaritesinde meydana gelen değişikliklerle birlikte akım, giriş ucunda pozitif bir polarite kazanır.

Anahtarlama elemanı açıldığında, bobinde ani bir gerilim değişimi meydana gelir. Bu anda, bobin akım akışını sürdürebilmek için ters polaritede bir zıt elektromotor kuvvet (EMK) üretir. Bu durum, güç kaynağı ve bobinin seri bağlı iki güç kaynağı gibi davranmasını sağlar ve toplam gerilim yüke uygulanır. Bu süreçte yüke paralel olarak bağlı olan kondansatörler, yükü beslemek için şarj olur ve enerjii depolar.

Anahtarlama elemanı tekrar kapandığında, kondansatörlerde biriken enerji yüke aktarılmaya devam eder. Böylece kesintisiz bir enerji beslemesi sağlanır. Diyotlar ise enerji akışını düzenleyerek gerilim geri dönüşlerini engeller ve çıkış geriliminin sabit

tutulmasına katkıda bulunur. Bu sistematik çalışma prensibi, boost converter devresinin giriş gerilimini artırmasına ve çıkışta kararlı bir enerji sağlamasına olanak tanır. Devrenin bu şekilde çalışması, yüke sürekli ve stabil bir enerji aktarımı ile enerji dönüşüm verimliliğini artırır.

Boost converter devresi için MOSFET seçimi, devrenin verimliliği, güvenliği ve uzun ömürlülüğü üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek akım ve gerilim dayanıklılığı, düşük anahtarlama kayıpları ve hızlı anahtarlama yetenekleri gibi parametreler göz önünde bulundurularak doğru MOSFET seçimi yapılmalıdır. Tablo 1’de bazı MOSFET’lerin önemli parametreleri verilmiştir.

Tablo1. Bazı MOSFET’lerin önemli parametreleri

MOSFET Modeli	Max Gerilim (V_{DS})	Max Akım (I_D)	Açık Durum Direnci ($R_{DS(on)}$)	Geçiş Hızı (t_{on}/t_{off})
IRF540N	100V	33A	0,044 Ω	~60 ns / ~70 ns
IRLZ44N	55V	47A	0,022 Ω	~40 ns / ~90 ns
STP55NF06	60V	50 A	0,018 Ω	~40 ns / ~100 ns
IRFP250N	200V	33 A	0,085 Ω	~50 ns / ~80 ns

Tablo 1’deki parametreler aşağıdaki detayları vermektedir:

- Maksimum Gerilim: MOSFET'in boştaki çalışırken dayanabileceği en yüksek gerilimdir.
- Maksimum Akım: MOSFET'in kanalından geçebilecek en yüksek sürekli akımdır.
- Açık Durum Direnci: MOSFET açık durumdayken kanalın gösterdiği dirençtir; düşük değerler daha verimlidir.
- Geçiş Hızı: MOSFET'in açılıp kapanma süreleridir, hızlı geçişler yüksek frekanslı devrelerde avantaj sağlar.

Duty cycle, boost converter devresinde giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki dönüşüm oranını belirleyen kritik bir parametredir. Bu değer doğru ayarlanması, enerji kayıplarını minimize ederek devrenin verimliliğini artırır ve daha etkili bir enerji aktarımı sağlar.

Ancak duty cycle’ın aşırı yüksek veya düşük olması devrenin performansını olumsuz etkileyebilir:

Aşırı yüksek duty cycle, MOSFET’in sürekli iletimde kalmasına neden olarak aşırı ısınma riski yaratabilir. Bu durum, MOSFET’in

zarar görmesine, devre güvenliğinin tehlikeye girmesine ve verimliliğin düşmesine yol açabilir.

Aşırı düşük duty cycle çıkış geriliminin yeterince yükselmemesine neden olur. Bu da yükün doğru bir şekilde çalışmamasına sebep olabilir. Özellikle yüksek gerilim gereksinimi olan uygulamalarda, yetersiz çıkış gerilimi sistemin işlevselliğini azaltır.

Yakıt hücresinin 30V'dan 72V'a yükseltilmesi gerektiği bir sistemde, boost converter devresi yakıt hücresinin çıkış gerilimini 72V'ye çıkaracak şekilde çalışacaktır. Bu durumda, hedef çıkış gerilimi 72V olduğundan ve giriş gerilimi 30V olduğu için, duty cycle hesaplaması Denklem 1'de açıklandığı gibi yapılır. Bu hesaplama, boost converter'ın MOSFET'inin iletim süresini belirler ve böylece çıkış geriliminin istenen seviyeye ulaşmasını sağlar.

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{30}{72} = 0.583$$

D = Duty Cycle

V_{in} = Giriş Gerilimi

V_{out} = Çıkış Gerilimi

(1)

Boost converter devresinde akım değeri, devrenin güvenli, verimli ve stabil çalışması için kritik bir parametredir. Kullanılan bileşenlerin akım dayanıklılığı yetersiz olduğunda aşırı ısınma, performans kaybı ve devre elemanlarının zarar görmesi gibi ciddi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle devreden geçen akımın doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, devrenin ana hat akımı 36A olarak belirlenmiştir. Bu hesaplama, giriş ve çıkış güçlerinin kayıplar göz ardı edilerek eşit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Giriş gücü ve çıkış gücü her biri 1 kW olarak kabul edilmiştir. Çıkış gerilimi 72V olarak hedeflenmiş ve buna bağlı olarak çıkış akımı 15A olarak hesaplanmıştır. Hesaplama Denklem 2 kullanılmıştır.

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_{in}}{I_{out}} &= \frac{1}{(1-D)} = \frac{1}{(1-0.583)} \\ I_{in} &= 36A \end{aligned} \right\}$$

I_{in} = Giriş Akımı

I_{out} = Çıkış Akımı

D = Duty Cycle

(2)

Bu hesaplamalar, motorun 72V ile çalışma gereksinimlerini karşılamak için çıkış geriliminin doğru şekilde sağlanmasını ve aynı zamanda sistemin ihtiyaç duyduğu akım değerlerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, devrede kullanılan MOSFET, indüktör ve diğer bileşenlerin uygun özelliklerde seçilmesine olanak tanıyarak, sistemin uzun ömürlü ve yüksek verimli çalışmasına önemli bir katkıda bulunmaktadır.

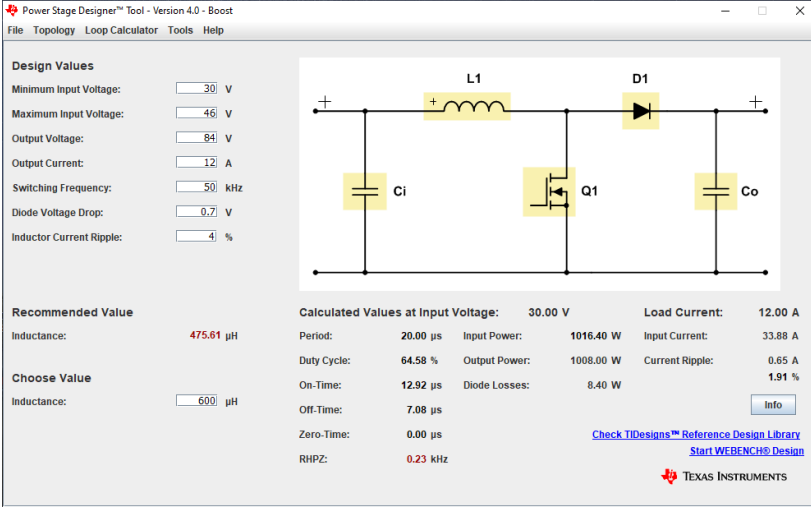
Devrenin kararlı ve verimli çalışabilmesi, akım salınımının kontrol altında tutulmasıyla doğrudan ilişkilidir. Akım salınımının aşırı yüksek olması, devrenin kararlılığını bozarak istenmeyen enerji kayıplarına ve performans düşüşüne neden olabilmektedir. Bu bağlamda, devrede kullanılan bobin, akım dalgalanmalarını dengeleyerek ve enerji akışını düzenleyerek sistemin stabilitesini artıran kritik bir rol üstlenmektedir.

Akım dalgalanma değeri (ΔIL), devredeki akımın ortalama değeri ile belirli bir salınım oranının çarpılmasıyla hesaplanır. Bu hesaplama, devrenin tasarımında hedeflenen stabilite ve verimlilik kriterlerinin sağlanmasına imkân verir. Bu çalışmada, maksimum akım salınım oranı %4 olarak belirlenmiştir. Bu oran, sistemin kararlı çalışmasını sağlarken, enerji kayıplarını minimize eden ve sistemin güvenliğini artıran kritik bir eşiktir.

Hedeflenen bu oran dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, ΔIL değeri 0.5 olarak bulunmuştur. Bu değer, çıkış akımının ortalama değeri olan 15A etrafında $\pm 0.25A$ 'lık bir değişimle, 15.25A ile 14.75A arasında salınmasına olanak tanımaktadır. Bu dar aralıkta gerçekleşen akım dalgalanması, sistemin yüksek verimlilikle çalışmasını ve yükün stabil bir enerji kaynağı ile beslenmesini sağlamaktadır.

Bu analiz, akım dalgalanmasının minimum düzeyde tutulmasının, devrede kullanılan bileşenlerin doğru bir şekilde seçilmesine ve devrenin uzun ömürlü, güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasına olan katkısını açıkça göstermektedir.

Boost converter devresinde kullanılan bobinin tasarım parametreleri, Texas Instruments'ın Şekil 2'deki Power Stage Designer yazılımı kullanılarak optimize edilmiştir. Bu yazılım sayesinde, bobin değerleri ve diğer tasarım parametreleri detaylı bir şekilde analiz edilmiş, sistemin stabilitesi ve verimliliğini artıracak en uygun tasarım seçenekleri belirlenmiştir.



Şekil 2. Texas Instruments'ın Power Stage Designer İsimli Programı

Bobin tasarımında bakır telin sarım sayısının doğru bir şekilde belirlenmesi, bobinin verimliliği ve performansı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sarım sayısı, bobinin manyetik alan kapasitesini ve indüktans değerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken temel parametrelerden biridir. Bobinin tasarımında ilk adım, nüvenin manyetik geçirgenlik değeri (AL) gibi bir parametre ile başlar. Bu değer, bobinin manyetik alan yoğunluğunu artırarak istenilen indüktans değerine ulaşmasına yardımcı olur.

Nüve, bobin tasarımında önemli bir bileşen olarak kabul edilir. Nüvenin manyetik geçirgenliği, kullanılan malzemenin manyetik alanı iletme kapasitesini ifade eder. Elektronik devrelerde genellikle ferrit nüveler tercih edilir. Ferrit nüvelerinin manyetik geçirgenlik değeri genellikle henry/metre (H/m) birimiyle ifade edilir ve kullanılan ferrit malzemesine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ferrit nüveler, bobinin manyetik alan yoğunluğunu artırarak daha verimli ve stabil bir performans elde edilmesini sağlar.

Bobinin sarım sayısı (N) ise hedeflenen indüktans değeri (L) ile doğru orantılıdır. İndüktans değeri, bobinin fiziksel boyutları, sarım sayısı ve nüve malzemesinin manyetik geçirgenliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki, belirli bir indüktans değeri için gereken sarım sayısı denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır. Bobinin manyetik alan

yoğunluğu ve indüktans değeri doğru bir şekilde hesaplanarak belirlenen sarım sayısı, devrede istenilen performansın elde edilmesine olanak tanır.

Sonuç olarak, bobin tasarımında doğru sarım sayısının belirlenmesi, manyetik alan yoğunluğunu artırarak bobinin verimliliğini ve performansını optimize eder. Bu da devrenin stabil çalışmasını ve istenilen çıkış değerlerinin elde edilmesini sağlar. Bu tasarım yaklaşımı, boost converter devresinin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını garanti eder.

$$\begin{aligned}
 L &= N^2 * A_L \\
 1750\mu H &= N^2 * 16800nH \\
 N^2 &= 104.1 \\
 N &\cong 10 \text{ tur}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} L &= N^2 * A_L \\ 1750\mu H &= N^2 * 16800nH \\ N^2 &= 104.1 \\ N &\cong 10 \text{ tur} \end{aligned}} \right\} (3)$$

L = Bobin Değeri (H)
N = Sarım Sayısı
 A_L = Nüvenin Manyetik Geçirgenliği (nH)

Yüke paralel yerleştirilen kondansatörler, devreye kesintisiz enerji sağlama ve çıkış gerilimindeki dalgalanmaları en aza indirme açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, kondansatör değerlerinin doğru seçimi devre stabilitesi için büyük önem taşır. Devredeki elemanların seçiminde yapılan detaylı hesaplamalarla, her bir bileşenin dayanım seviyeleri, güç kapasiteleri ve diğer önemli parametreleri belirlenmiştir. Tasarım aşamasında, anahtarlama elemanları, bobinler ve diyotlar üzerindeki stresleri azaltmak amacıyla paralel iki ayrı devre yapısı geliştirilmiştir. Bu paralel yapı, bobinler, anahtarlama elemanları ve diyotlar üzerinden geçen akımları eşit bir şekilde paylaştırarak akım ve gerilim dalgalanmalarını minimum seviyeye indirmeyi amaçlamaktadır.

Projede, tasarlanan devrelerin performansını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla gerekli simülasyonlar LTspice, OrCAD ve Proteus programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar devre elemanlarının davranışlarını ve sistemin genel performansını analiz etmek için önemli bir aşamadır. Devrenin şematik tasarımı ve PCB (baskı devre kartı) çalışmaları ise Altium Designer programı aracılığıyla yapılmıştır. Altium Designer, karmaşık devre tasarımlarını kolaylıkla yönetmeyi sağlayan, kullanıcı dostu bir arayüze sahip profesyonel bir yazılımdır. Bu

süreçte, devre elemanlarının yerleşimi, bağlantıları ve diğer önemli tasarım parametreleri titizlikle göz önünde bulundurularak, yüksek kaliteli bir PCB tasarımı oluşturulmuştur.

Devre tasarımında, giriş ve çıkış akımlarını hassas şekilde izlemek ve enerji verimliliğini değerlendirmek amacıyla çeşitli ölçüm sistemleri kurulmuştur. Giriş kısmında, gerilim bölücü ve opamp ile akım ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Gerilim bölücü, yüksek voltaj seviyelerini daha düşük ve ölçülebilir seviyelere düşürerek sinyalin güvenli bir şekilde işlenmesine olanak tanımaktadır. Bu düşürülen gerilim, opamp ile daha da güçlendirilerek ADC'ye iletilebilecek bir sinyal seviyesine getirilmiştir. Böylece, devrenin giriş akımına dair doğru ve güvenilir veriler elde edilmiştir.

Çıkış kısmında ise, gerilim okuma işlemi yine bir gerilim bölücü üzerinden gerçekleştirilirken, akım ölçümü şönt direnç kullanılarak yapılmıştır. Şönt direnç, devreden geçen akımı ölçerken oluşturduğu gerilim düşüşü aracılığıyla hassas akım değerlerini belirlemeye olanak tanımaktadır. Bu ölçümler sayesinde, devrenin çıkış gerilimi ve akımı gerçek zamanlı olarak izlenip analiz edilmiştir. Bu süreç, devrenin enerji verimliliğini optimize etmek ve potansiyel kayıpları minimize etmek için kritik öneme sahiptir.

3. Sonuç

Boost converter devresinin tasarımında kullanılan ana bileşenlerin seçimi ve optimizasyonu ile ilgili önemli bulguları ortaya koymaktadır. Tasarımda, özellikle MOSFET seçimi, bobin tasarımı, kondansatör değerleri ve ölçüm sistemlerinin entegrasyonu gibi parametrelerin devrenin genel verimliliği ve güvenilirliği üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Tasarım sürecinde, doğru MOSFET seçiminin, verimlilik kayıplarını minimize ederek daha verimli bir enerji aktarımı sağladığı ve devrenin ısınma riskini azalttığı görülmüştür. Ayrıca, bobin parametrelerinin optimize edilmesi, akım dalgalanmasını kontrol altına alarak devrenin stabilitesini artırmıştır. Akım dalgalanmasının minimum düzeyde tutulması, devredeki elemanların daha güvenli ve verimli çalışmasına olanak tanımaktadır.

Özellikle, devrede kullanılan paralel kondansatörlerin, çıkış gerilimindeki dalgalanmaları en aza indirerek yüke kesintisiz enerji sağlama işlevi kritik bir rol oynamaktadır. Kondansatörlerin doğru

değerlerde seçilmesi, devrenin güvenli çalışmasını desteklemiş ve sisteme kararlılık kazandırılmasında önemli bir faktör olmuştur. Ayrıca, şönt direnç kullanılarak yapılan hassas akım ölçümleri sayesinde, çıkış akımının doğru bir şekilde izlenmesi, enerji verimliliğini değerlendirmede ve olası kayıpların tespit edilmesinde önemli bir araç olmuştur.

Simülasyonların başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve devre elemanlarının beklentilere uygun performans gösterdiği gözlemlenmiştir. LTspice, OrCAD ve Proteus gibi yazılımlar kullanılarak yapılan simülasyonlar, devre elemanlarının doğru çalıştığını ve sistemin genel verimliliğini artırmak için gerekli düzenlemelerin yapıldığını doğrulamıştır. Altium Designer ile gerçekleştirilen PCB tasarımı ise devre elemanlarının düzenli ve güvenli bir şekilde yerleştirilmesini sağlamış, bu da devre performansının artırılmasına önemli bir katkı sağlamıştır.

Bu çalışma, boost converter devresinin tasarımında kullanılan bileşenlerin doğru seçimi ve optimizasyonunun, devrenin enerji verimliliğini, stabilitesini ve güvenliğini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Yapılan hesaplamalar, simülasyonlar ve fiziksel ölçümler, tasarlanan devrenin giriş ve çıkış akımlarını hassas bir şekilde izleyebilme ve enerji verimliliğini optimize etme konusunda başarılı bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Tasarımda yapılan iyileştirmeler, özellikle akım dalgalanmasının kontrolü ve doğru bileşen seçimi, devrenin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamış ve sistemin istenen çıkış değerlerine ulaşmasına olanak tanımıştır.

Gelecekteki çalışmalar, farklı yük koşullarında ve çeşitli çalışma ortamlarında devrenin performansını test ederek, daha ileri düzeyde optimizasyonlar yapılmasını ve sistemin daha da geliştirilmesini sağlayabilir. Ayrıca, boost converter devrelerinin daha geniş uygulama alanlarında kullanımı için, düşük maliyetli ve daha verimli bileşenlerin araştırılması önerilmektedir. Bu şekilde, devrelerin performansı daha da artırılabilir ve enerji verimliliği sağlanabilir.

Kaynakça

- [1] Ravi, V., & Mohan, N. (1998). Simulation and design of a high-efficiency DC–DC converter for the power distribution system of electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 34(2), 479-486.
- [2] Basso, C., & Dorf, D. (2013). Design of a DC-DC Boost Converter for Electric Vehicle Applications. *Journal of Power Electronics*, 13(1), 105-115.
- [3] Chavez, J. J., & Hsieh, C. H. (2005). Boost Converter Design for Low Voltage Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(1), 97-105.
- [4] Huang, A. Q., & Wei, J. (2009). High-efficiency and high-power-density boost converters with high-current output. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(9), 3643-3652.
- [5] Çınar S., & Ağaayak A.C., “Bölüm 1: 48v Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı” Mühendislikte Yeni Araştırmalar, (2022)., Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. A. C. Ağaayak, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım sayısı:1, ss 305, ISBN:978605-5447-75-5
- [6] Liu, X., & Li, Z. (2015). Advanced design of boost converter circuits for improved efficiency in renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 413-420.
- [7] Grosvenor, P., & Lee, K. (2011). Efficient Design and Optimization of Power Converters for Battery-Powered Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(8), 3476-3485.
- [8] Texas Instruments. (2014). Designing Power Converters with Switch-Mode Power Supply Components. Application Report, SLVA680A, Texas Instruments.
- [9] Sundaram, A., & Sarkar, S. (2006). Optimal Design of a Boost Converter for Maximum Efficiency. *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 121-126.
- [10] Blomberg, A., & Johansson, B. (2007). Boost Converter for Electric Drive Systems: Design and Modeling. *Power Electronics and Motion Control Conference*, 45-50.
- [11] Nagarajan, V., & Chen, K. (2012). High-frequency switching and high-performance components for power electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(9), 3793-3801.
- [12] Terzioğlu H., Ağaayak A.C. & Öksüm E., “Bölüm 3:Elektrikli Araç Ve Hidrojenli (Yakıt Pilli) Araç Teknolojisinde Kullanılan Bataryalar “,Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978625-6613-95-9

- [13] Peng, F. Z., & Zhao, J. (2012). Design and Implementation of a High-Efficiency Boost Converter for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3484-3492.
- [14] Ümit Ö., & Ağaçayak A.C., (2023). “Bölüm 2:Elektrikli Güneş Panelli Araçlar Üzerine Bir Araştırma“, *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-3*, Eğitim Yayınevi, Editör:Dr.Öğr.Üyesi. F.Alpaslan Kazan, Öğr.Gör. G. Yalçın, Basım sayısı:1, ss 118, ISBN:978-625-6613-96-6
- [15] Wu, H., & Fang, J. (2010). Design of a High-Efficiency Boost Converter for Power Supply Systems. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 5(4), 463-470.
- [16] Jiang, H., & Zhang, X. (2011). Optimization of Power Converter Design in High Power Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(3), 862-870.
- [17] Huang, Y., & Xu, J. (2014). Modeling and Simulation of Boost Converters Using MATLAB/Simulink. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 4(3), 303-310.
- [18] Wu, Z., & Zeng, Z. (2015). A Practical Design and Simulation Method for Boost Converters in Renewable Energy Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3), 904-911.
- [19] Terzioğlu H., Yalçın G., & Öksüm E. (2023). “Bölüm 2: Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi”, *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978-605-5447-75-5
- [20] Kerkhoff, D., & He, Z. (2013). Design and Simulation of Boost Converter Circuits for Low Power Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(7), 3203-3211.
- [21] Sullivan, C. R., & Meyers, L. A. (1999). Boost Converter Performance and Design Tradeoffs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 35(4), 1120-1131.
- [22] Yang, Z., & Yang, G. (2016). Energy Management in Boost Converters for DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(4), 1880-1889.
- [23] Zhang, J., & Zhou, X. (2013). Analysis and Design of Boost Converter Topologies for Automotive Applications. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 51(6), 5327-5335.
- [24] Wang, X., & Zhang, L. (2005). A Comparison of Efficiency in Boost Converter Topologies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(5), 1401-1410.
- [25] Atakan T.A., Terzioğlu H., & Ağaçayak A.C., “Chapter 7: Photovoltaic System Integrated Electric Vehicle Charging Station” *New Trends In Engineering*, (2022)., Tablet Kitapevi, Editör:Prof. S. Neşeli, Asst. Prof. H.Terzioğlu, Basım Sayısı:1, ss 242, Isbn:978-605-5447-74-8.
- [26] Atakan T.A., Terzioğlu H., & Ağaçayak A.C., “Chapter 20: Electric Vehicle Charging Station “, *New Trends In*

Engineering, (2022)., Tablet Kitapevi, Editör:Prof. S. Neşeli, Asst. Prof. H. Terzioğlu, Basım Sayısı:1, ss 243, Isbn:978-605-5447-74-8.

[27]Karaoğlu O., Servi S., Keskin Y., & Kurnaz A. (2007). Isı İletim Probleminin Çözümü için Yeni Yöntemler. 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (Tam Metin Bildiri/Poster)



BÖLÜM-5

ELEKTİRLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

*Kağan SARIÇOBAN¹
Gökhan YALÇIN²*

¹<https://orcid.org/0009-0004-7964-9765>

²<https://orcid.org/0000-0002-5929-917X>

ELEKTİRLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

1. Giriş

Dünyada gün geçtikte yaygınlaşan elektrikli araçlar, ulusal elektrikli otomobil TOGG'un da piyasaya çıkmasıyla ülkemizde de yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu araçların insan hayatına daha fazla girmesi ve kullanımlarının artmasıyla birlikte araçların izlenmesi, elektrikli araç özelindeki donanımsal aksamaların güvenilirliği önem arz etmektedir. Elektrik enerjisiyle çalışan araçlar, batarya tabanlı bir güç kaynağı kullanır. Bu araçlar arasında otonom araçlar ve robotlar gibi çeşitli teknol elektrikli araçlar sınıfına dâhil edilebilmektedir. Batarya teknolojisindeki gelişmeler, elektrikli araçların verimliliklerini de yönlendirmektedir.[1] Verimlilik nedeniyle Li-on bataryalar yaygın bir şekilde kullanılabilir.[2][3][4] Bu nedenle hem akademik hem de endüstriyel alanlarda büyük ilgi görmektedir. Elektrikli araç endüstrisinin daha da gelişmesiyle birlikte, batarya performansı arızalarını mümkün olduğunca önlemek veya önceden uyararak için elektrikli araç bataryalarının arıza tespit ve teşhis yönetimi oldukça yoğun ilgi görmüştür. [5-9]

Lion bataryalar için etkili bir Batarya Yönetim Sistemi kullanmak, bataryanın güvenli bir şekilde çalışmasını, fiziksel hasarın önlenmesini ve termal bozulma ve hücre dengesizliği ile başa çıkmayı sağlar. BMS ayrıca, bataryanın farklı durumlarını ölçebilen ve değerlendirebilen, batarya şarj durumu SoC ve SoH doğruluğu için verileri kontrol eden ve güncelleyen, arızaları tespit eden, batarya voltajını eşitleyen ve aşırı şarj/aşırı deşarjı önleyen bir batarya yönetim sistemi sunar. [10]

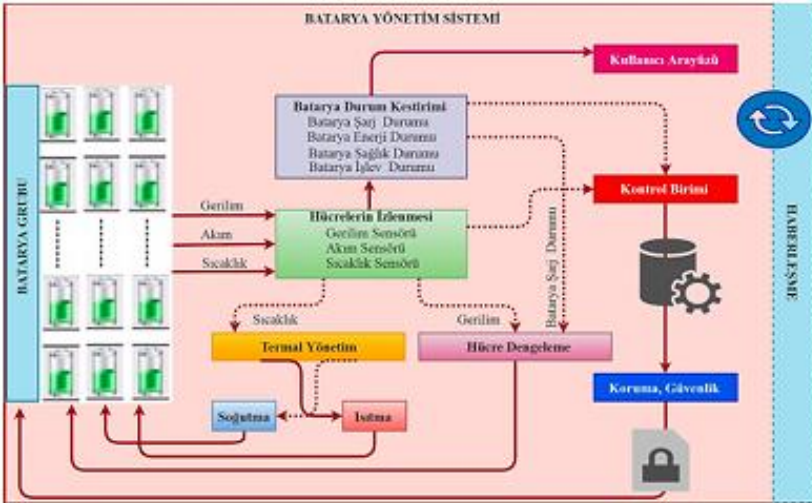
EA'lar için tekrarlanan şarj/deşarj işlemleriyle şarj kapasitesi azaldığından, batarya ömrü gibi hala çözülmesi gereken bazı zorluklar vardır. En dikkate değer olanı ise, SoC tahmini ve EA sürücülerinin batarya SoH durumudur. Doğru SoH ve SoC tahminleriyle bir batarya yönetim sistemi, bataryadaki her bir hücrenin aşırı şarj olmasını veya aşırı deşarj olmasını önleyebilir ve tüm batarya ömrünü uzatabilir.[4]

2. Batarya Yönetim Sistemleri Alanında Yapılan Çalışmalar

2.1. Bataryalar

Bataryalar yapısındaki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji depolama aracıdır. Bataryalar birincil ve ikincil batarya türü adı altında kategorize edilir. Birincil batarya türü tümüyle deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilemeyen batarya türleri iken ikincil batarya türleri ise deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilebilen ve dolayısıyla tekrar tekrar kullanılabilen batarya türleridir. Batarya teknolojisine bağlı olarak ilk elektrikli araçlarda birincil batarya türleri kullanılmıştır. Daha sonra tekrar şarj edilebilen ikincil batarya türlerinin gelişimiyle birlikte elektrik araçlarda ikincil batarya türleri kullanılmıştır. İlk şarj edilebilen batarya sistemine sahip elektrikli araçlarda kurşun-asit bataryalar kullanılmaktaydı. Ancak bu bataryalar ağır, düşük enerji yoğunluğuna sahip ve çevre dostu değildi. Bundan dolayı kurşun-asit tabanlı bataryalarının yerini nikel tabanlı bataryalar almıştır. Özellikle nikel kadmiyum (Ni-Cd) ile Ni-MH bataryalar, kurşun-asit bataryalar ile karşılaştırıldığında daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olduğu için tercih edilmekteydi. Ancak şarj olma süresi uzun ve deşarj olma süresi kısa olması, kendi kendine deşarj olma oranının yüksek olması ve hafıza etkisinin olması gibi dezavantajlara sahip olmasından dolayı elektrikli araçlarda uygun olmadığı anlaşılmıştır. ZEBRA veya diğer adıyla sodyum-nikel klorür (Na-NiCl₂) bataryalar, Ni-MH bataryalar ile aynı dönemde kullanılmıştır. Bu batarya türü yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olsa da çalışma sıcaklığı aralığı (245350°C) olması elektrikli araçta güvenlik açısından endişe oluşturduğu ve maliyeti artıracak bir termal yönetim sistemi gerektirdiğinden dolayı tercih edilmemektedir (Yong vd., 2015). 1970 yılında Lityum-iyon (Li-ion) tabanlı bataryaların gelişimi ile elektrikli araçlarda batarya sistemi açısında yeni bir çağ açılmıştır. Li-ion bataryaların yüksek enerji yoğunluğu sahip olması, az bakım gerektirdiği, daha ucuz olması, sülfatlaşmasının olmaması, yüksek şarj ve deşarj verimliliği oranına sahip olması, kendi kendine deşarj olma faaliyetinin düşük olması ve hafıza etkisinin olmaması gibi avantajları nedeniyle EA'lar da kullanıma elverişli olan ve en yaygın olarak kullanılan batarya türüdür. Li-ion batarya teknolojisinin gelişmesiyle EA'larda standart güç kaynağı olarak kullanılmasına neden olmuştur (Adany vd., 2013). EA'larda yüksek voltaj ve kapasite için batarya hücreleri birbirlerine seri ve paralel

bağlanarak bir batarya grubu paketi oluşturulur. Seri bağlanan hücreler gerilimi yükseltirken, paralel bağlanan hücreler kapasiteyi ve akımı yükseltir. Yüzlerce seri ve paralel hücrelerden oluşmuş bir batarya paketi elektrikli araçta güvenlik zafiyeti oluşturmaktadır. Batarya paketinde bulunan tüm hücrelerin gerilim, akım ve sıcaklık değerlerinin en uygun çalışma bölgesinde tutulması adına batarya yönetim sisteminin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Özellikle Li-ion bataryalar en uygun çalışma bölgesinde kullanılmazsa batarya yaşlanması hızlanır, ısınır ve araçta yanma/patlamalara neden olur. Elektrikli araçlarda BYSS'nin temel görevleri bünyesindeki sensörler ve mikroişlemci vasıtasıyla hücrelerin tek tek gerilim, akım ve sıcaklıklarını izlemek; bataryayı aşırı/düşük gerilim/akım/sıcaklık değerleri sınırlarında korumak ve önlemine almak; şarj/deşarj esnasında hücrelerdeki dengesizliği gidermek; durum kestirimleri yaparak bataryanın şarj durumunu/state of charge (BŞD/SOC), bataryanın genel sağlık durumu/state of health (BGSD/SOH), bataryanın enerji durumunu/state of energy (BED/SOE), bataryanın işlev durumunu/state of function (BİD/SOF) tespit etmek ve bu sistemlerin bir haberleşme protokolü ile birbirleriyle etkileşim içinde bulunmasıyla kullanıcıya bilgiler sağlamaktır. Şekil 1'de BYSS'nin genel gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. BYSS'nin Genel Gösterimi

2.2. Batarya Grubunun ve Hücrelerinin İncelenmesi

EA'larda batarya grubu yüzlerce seri-paralel hücrelerden oluştuğu için çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Batarya grubundaki hücrelerin değişen ortam şartlarına bağlı olarak gerilim, akım ve sıcaklık değerleri değişir. EA'larda bu değişim özellikle sürüş esnasında bariz bir şekilde yaşanır. EA değişen bu ortam koşulları ve karmaşık yapıya kendisini uyarlamalıdır. Bu işlem batarya yönetim sistemindeki algılayıcılar ile hücrelerin ve batarya grubunun gerilim, akım ve sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi ve izlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu ölçüm işlemleri çok hassas algılayıcılarla yapılmalıdır. Batarya grubundaki hücre gerilimlerinin tek tek ölçülmesi ve izlenmesi BYS'nin temel görevlerinden bir tanesidir. Gerilim genellikle ADC (analog dijital konvertörler) ya da çoklayıcı devreler (multiplexer) tabanlı geliştirilen kartlar ile ölçülür. Ölçülen gerilim verilerine göre bataryanın güvenli çalışma bölgesinde olup olmadığı tespit edilir. Buna göre şarj/deşarj işlemleri kontrollü bir şekilde yapılır. Bataryanın düşük/yüksek gerilimlerine karşı önlemini almak ve özellikle yüksek gerilimlerden dolayı yanmalara karşı önlem alınması sağlatılır. Bunun yanında batarya durum kestirimleri için (BŞD, BGSD vb.) hesaplanmasında ve batarya grubundaki hücrelerin dengelenmesinde hücre gerilimlerinden faydalanır. Gerilim değerleri gibi akım değerlerinin de ölçülmesi ve izlenmesi gerekir. Akım değeri istenilen hücrenin ya da batarya grubunun ana hat kablosuna bağlanan bir alan etkili (hall effect) akım sensörü ya da bir şönt direnci ile ölçülür. BYS ölçülen değerlere göre batarya akımının sınır koşullarının dışına çıkmamasını sağlar. Ayrıca akım değeri bataryanın BŞD'nin kestirim için önem arz etmektedir. Bataryalar değişen ortam, yol ve sürüş profiline göre sıcaklıkları yükselir veya düşer. Sıcaklığın değişimi bataryanın çalışma yapısını değiştirerek erken yaşlanmasına ve verimsizleşmesine neden olur. Bu yüzden bataryanın en uygun çalışma sıcaklığında olması istenir. BYS hücrelerin ve batarya grubunun belirli noktalarına yerleştirilen sıcaklık algılayıcıları (termistör, termokupl) vasıtasıyla belirli aralıklarla ölçümler alır ve değerlendirir. Böylelikle sıcaklık artığında soğutucunun, sıcaklığı azaldığında ısıtıcının devreye girmesini sağlar. [11]

Lion bataryalar, yüksek verimlilik, daha düşük hacim, küçük ağırlık, sıcaklık hassasiyeti ve bakım gibi avantajlar bataryalar,

taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar, havacılık sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları için güç depolama gibi birçok uygulamada parlak bir geleceğe sahiptir. Batarya Yönetim Sistemleri, batarya ile araç arasında bir bağlayıcı görevi gördüğü için Li-on bataryalar için RUL tahmininde önemli rol oynar. [12] Batarya Yönetim Sisteminin ana hedefleri batarya hasarını önlemek, batarya ömrünü tahmin etmek ve artırmak ve batarya sisteminin doğru ve güvenilir bir çalışma koşulunda tutmaktır. Batarya Yönetim Sistemi, yazılım algoritmaları ile sensörler, kontrolörler, iletişim ve hesaplama donanımının bir bütünüdür. [13-15]

3. Batarya Yönetim Sistemi Türleri

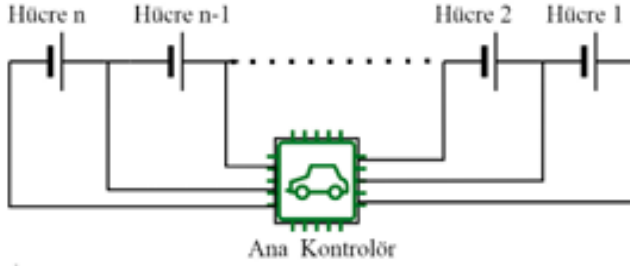
Batarya Yönetim Sistemi temel olarak 4 farklı şekilde tasarlanabilir.

1. Merkezi Batarya Yönetim Sistemi
2. Modüler Batarya Yönetim Sistemi
3. Ana Kart-Yardımcı Kart Batarya Yönetim Sistemi
4. Dağıtılmış Batarya Yönetim Sistemi

3.1.1. Merkezi Batarya Yönetim Sistemi

Merkezi BYS'de batarya grubundaki hücrelerin hepsi ana kontrolöre bağlıdır. N sayıda hücre için N+1 sayıda bağlantı kablosu bulunur. Batarya gurubu hücrelerinin bilgilerini almayı sağlayan kablolar, ana kontrol merkezine doğrudan geldiği için ana kontrolör merkezi bir yere konumlandırılır. Merkezi BYS'yi kullanmak yalnızca tek bir kurulum noktası gerektirdiği gibi ayrıca karmaşıklığa da neden olmaktadır. Tek bir işlemci tarafından hücrelerdeki gerilim, akım ve sıcaklık ölçümleri değerlendirilir. Bu durum ana kontrolör tek olduğu için haberleşmeden kaynaklı gecikmeleri azdır. Bu nedenle bu BYS türünün uygulanması kompakt, kolay ve ucuzdur. Ancak tek bir ana kontrolör olmasından dolayı işlemcisinin çıkış girişi sayısı sınırlıdır. Bu yüzden batarya grubundaki hücrelerin artması merkezi BYS için sınırlı bir çalışma aralığı doğuracaktır. Ana kontrolör hücre dengelemesinin tek kaynağı olduğu için aşırı ısıya maruz kalabilmektedir. Yüzlerce hücreye sahip EV'ler için, büyük sensör donanımları oldukça karmaşıktır ve yüksek bir ölçüm hassasiyetine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle merkezi

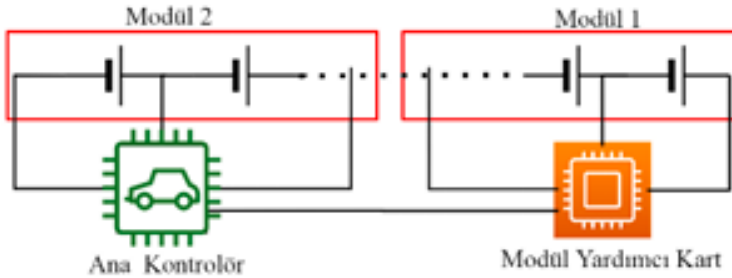
BYS’de kontrolörün yükü oldukça ağırdır. Merkezi YYS’nin, EA batarya grubundaki kullanımı oldukça azdır. [11]



Şekil 2. Merkezi Batarya Yönetim Sistemi

3.2. Modüler Batarya Yönetim Sistemi

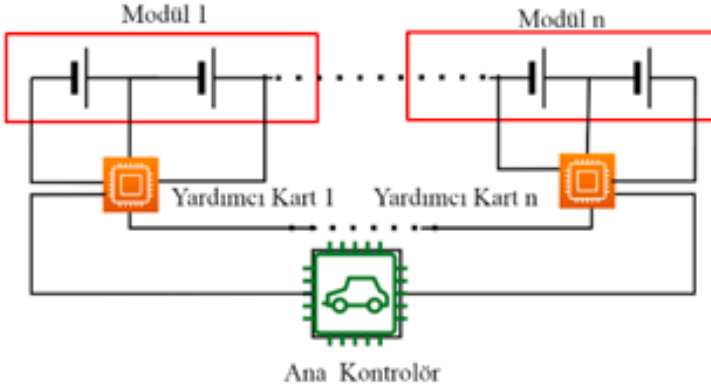
Modüler YYS temel olarak merkezi batarya yönetim sistemine benzemektedir. Yalnız Modüler YYS’deki denetim, iki birime ayrılmıştır. Birincisi ana kontrolör, ikinci ise modül yardımcı kartıdır. Batarya grubu kullanıcıya göre istenilen şekilde 2 gruba ayrılmaktadır. Yardımcı kart birinci gruptan gerekli ölçüm verilerini alıp iletişim ağıyla ana kontrolöre gönderir. Ana kontrolör de ikinci gruptan aldığı ölçümleri ve yardımcı karttan gelen diğer birinci grup ölçümlerini alıp gerekli hesaplama ve iletişimi sağlama görevini üstlenmektedir. Parçalı YYS, merkezi YYS ile benzer avantajlara sahiptir. Bunun yanında yardımcı kart ile ana kontrolör denetleyicisi batarya grubunun yakınına kurulabileceğinden dolayı hücrelerden gelen kablo bağlantılarının kurulumu daha kolaydır. Ancak maliyet bakımından merkezi YYS’ye göre daha pahalıdır.



Şekil 3. Modüler Batarya Yönetim Sistemi

3.3. Ana Kart-Yardımcı Kart Batarya Yönetim Sistemi

Ana-Yardımcı kart BYB, birden fazla seri-paralel hücreden oluşan modüllerin yardımcı kartlar ile denetlenmesi ve bu yardımcı kartların hem kendi aralarında hem de bir ana kontrolör ile iletişim kurmasıyla uygulanan bir BYB türüdür. Buradaki yardımcı kartların görevi modüllerdeki gerilim, akım ve sıcaklık ölçümlerinin yapılması, hücre dengelemesinin yapılması ve bu verilerin haberleşme ağı ile ana kontrolöre gönderilmesini sağlamaktır. Ana kontrolörün buradaki görevi yardımcı kartlardan gelen ölçümler doğrultusunda batarya grubu için kestirim, termal yönetim, koruma, hesaplama vb. görevleri yerine getirmektir. Çalışma yapısı, bazı avantaj ve dezavantajları bakımından parçalı BYB ile benzer özellikler göstermektedir. Ancak burada ana kontrolör, parçalı BYB'deki gibi gerilim ölçümü yapmaz, sadece hesaplama ve iletişimi yapar. Bundan dolayı ana kontrolörün hesaplama yükü daha azdır. Sonuç olarak EA 'lar gibi büyük batarya gruplarına sahip sistemler için ana kontrolörün yükünü hafifleten, birden fazla modülde yardımcı kartların kullanılması daha hassas ve güvenilir sonuçlar doğurduğundan, üreticiler tarafından diğer türlere göre daha çok tercih edilmektedir[18-20].

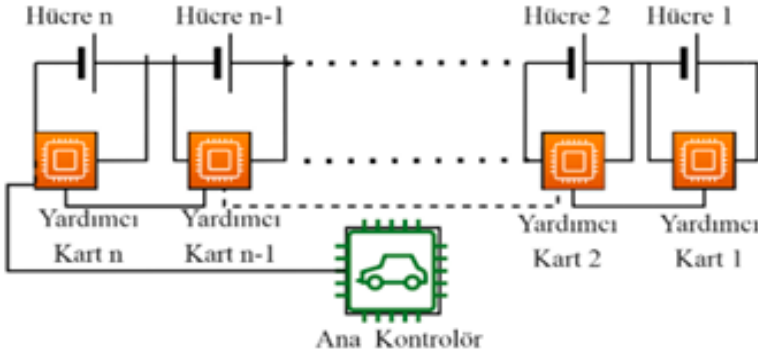


Şekil 4. Ana Kart-Yardımcı Kart Batarya Yönetim Sistemi

3.4. Dağıtılmış Batarya Yönetim Sistemi

Dağıtılmış BYB, ana-yardımcı kart BYB ile benzer yapı göstermektedir. Buradaki fark yardımcı kartların batarya grubundaki

hücre modüllerine değil de tek tek her hücreye direkt olarak bağlanması şeklindedir. Her bir hücreye direkt bağlı olan yardımcı kartlar bir haberleşme ağıyla birbirine ve ana kontrolöre bağlanmaktadır. Yardımcı kartların görevi hücrelerdeki gerilim, akım, sıcaklık vb. verileri almaktır. Hücreye direkt bağlı olduğu için ölçüm güvenilirliği oldukça yüksektir. Burada ana kontrolörün görevi, yardımcı kartlardan gelen bilgiler doğrultusunda sadece hesaplama ve haberleşme işlemlerini yerine getirmektir. Bu yöntem de her bir hücre için bir yardımcı kart olduğundan dolayı sistemin uygulanması karmaşık ve geniş alan kaplamaktadır. Dahası diğer türler arasında en maliyet olan türdür. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda pek tercih edilmemektedir[21-22].



Şekil 5. Dağıtılmış Batarya Yönetim Sistemi

4. Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri

Batarya Yönetim Sisteminin asıl görevi, pil hücrelerini aşırı şarj ve deşarjdan kaynaklanan hasarlardan korumaktır. Bunun yanı sıra kalan şarjı hesaplar, pilin sıcaklığını izler, gevşek bağlantılar ve kısa devreleri kontrol ederek pil sağlığını izler. Pillerin her birine takılı olan izleme sensörleri ile bu işlevleri yerine getirir.

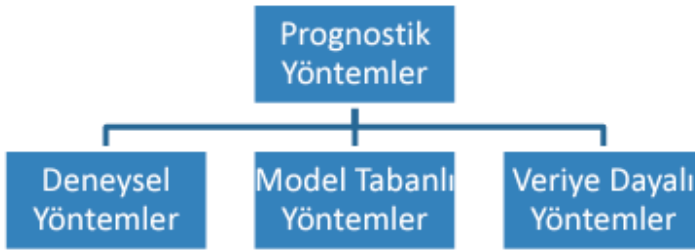
4.1. Bataryayı Koruma Görevi

Bir BYS pillerin değerlerine odaklanmaktadır. BYS görevleri arasında voltaj ve akım kontrolü, termal yönetim çözümleri, yangından korunma ve siber güvenlik bulunmaktadır. Şarj edilebilir piller, BYS'lerin temel taşıdır. Şarj edilebilir bir piller, oldukça

karmaşık ve hassastır ve dikkatli kullanım gerektirir. Tüm işlevleri, mümkün olan en uzun sürede pilden en iyi şekilde yararlanmayı amaçlamaktadır. Böylece, bir BYS, şarj durumunu ve sağlık durumunu kontrol ederek pil ömrünü ve performansını artırabilir. Bir pil takımı içindeki enerji durumunu, güç durumunu ve dengeleme hücrelerini tahmin ederek, pilin tüm potansiyelini ve sonuç olarak pil enerji depolama sistemini (PEDS) kullanabilir. Bileşimine bağlı olarak, piller çalışma aralıkları dışında bir çevreye karşı oldukça hassas olabilir. Sınırları aşmak bir pilin geriliminin düşmesine ve erken ölümüne neden olabilir. Ayrıca, bir pilin ezilmesi pile ciddi zarar verebilir. Örneğin, lityum bazlı piller, bazı durumlarda yanıcı ve patlayıcı olmaları nedeniyle kötü bir özelliğe sahiptir. Tam donanımlı bir BYS, potansiyel tehlikeleri tahmin edebilir ve hem pili hem de kullanıcıyı koruyabilir. İyi geliştirilmiş bir BYS, kısa devreleri, toprak arızalarını ve sıcaklık yükselmesini önleyen akü güvenlik sistemlerine sahiptir. Böylece bir BYS güvenlik sistemi, güvenli veri aktarımı sağlar ve pil depolama sistemini korur.

5. Enerji Yönetim Sistemi

Batarya yönetim sistemleri ve prognostiği için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Yük akımları, uç gerilimleri ve yüzey sıcaklıkları gibi ölçülebilir değişkenlere dayalı bu yöntemleri Şekil 2'de gösterildiği gibi temel olarak aşağıdaki üç kategoride sınıflandırılabilir.



Şekil 6. Prognostik Yöntemler

5.1.1. Deneysel Yöntemler

Bu yöntemler, batarya ile çalışmanın tarihsel deneysel verilerine ve bataryanın bozulmasının ana nedenleri hakkındaki önceki bilgilere bağlıdır.

5.1.2. Model Tabanlı Yöntemler

Deneysel yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelmek için, çeşitli çalışma koşullarını ve çeşitli batarya türlerini içeren batarya sağlığı teşhis yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu yöntemler, fiziksel veya matematiksel yöntemler oluşturarak bataryanın bozulma dinamiklerini tanımlamaya ve batarya SoH' sini tahmin etmeye çalışır.

5.1.3. Veriye Dayalı Yöntemler

Ölçülen verilerden veya çıkarılan özelliklerden batarya bozulma dinamiklerini modellemek için bir başka çözümdür [23-25].

6. Sonuç

Çevre kirlenmesi, küresel ısınmaya sebep vb. durumlarından dolayı geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerine alternatif bir kaynak olan elektrikli araçlar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Özellikle bataryalı elektrikli araçlar yolda iken tamamıyla temiz, sessiz ve çevre dostu bir hizmet sunmaktadır. Ancak bataryaların enerji kapasitesi araca güç aktarımı açısından sınırlı bir çalışma aralığı sunmaktadır. Bundan dolayı mevcut batarya sistemlerinin daha verimli ve daha güvenli çalışması için bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulması kaçınılmaz olmuştur. Bu çalışma, elektrikli araçlarda kullanılan batarya yönetim sistemleri için kısa derleyici bir çalışma niteliğindedir.

7. Kaynakça

- [1] J. Deng, C. Bae, A. Denlinger, ve T. Miller, “Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges”, *Joule*, c.4, sy 3, ss. 511-515, Mar. 2020.
- [2] A. Marongiu, F.G.W. Nussbaum, W.Waag, M.Garmendia ve D. U. Sauer, “Comprehensive study of the influence of aging on the hysteresis behavior of alithium iron phosphate carhode-based lithium ion battery – An experimental investigation of the hysteresis ”, *Applied Energy* c.171, ss. 629-645, Haz. 2016
- [3] M.M. Hoque, M.A.Hannan ve A.Mohamed, *Model Development of Charge Equalization Controller for Lithium-Ion Battery*. 2016.
- [4] U. Yayan, A. T. Arslan, ve H. Yucel, “A Novel Method for SoH Prediction of Batteries Based on Stacked LSTM with Qick Charge Data ”, *Applied Artificial Intelligence*, c 35, sy 6, ss. 421- 439, May. 2021.
- [5] H. Yu, Qiu, L. Weng, K. Huo, S. Liu, ve H. Liu, “A Health Indicator for the Online Lifetime Estimation of an Electirc Vehicle Power Li-Ion Battery”, *World Electric Vehicle Journal*, c.11, sy 3, Art. Sy 3, Eyl. 2020.
- [6] F. A. Kazan ve R. Akkaya, "The Effect of Increases in User Weight and Road Slope on Energy Consumption in Disabled Vehicle Driven with PMSM," *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 1-7, 2021.
- [7] S. Aksoy ve F. A. Kazan, "Investigation of the Effect on the Drone's Energy Consumption the Flying at Different Altitudes," *New Trends in Engineering*, S. Neşeli and H. Terzioğlu, Eds., Konya, Türkiye: Tablet Kitabevi, 2022, pp. 129-140.
- [8] H. Terzioğlu, G. Yalçın, ve E. Öksüm, “Bölüm 2: Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi”, *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978-605-5447-75-5
- [9] J. Wu, X. Cui, H. Zhang, ve M. Lin, “Health Prognosis With Optimized Feature Selection for Lithium-Ion Battery in Electric Vehicle Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics* c. 36, sy 11, ss. 12646-12655, Kas. 2021.
- [10] M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, A. Hussain ve A. Mohamed, “A review of lithium battery state of charge estimation and management system in eletric vehicle applications: Challenges and recommendations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c.78, ss.834-854, Eki.2017.
- [11] R. Menak , T. Karadağ , M. Altuğ, ve N. Tan. *Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması*.
- [12] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. Laroire, P. Van Den Bossche ve J.Van Mierlo, “Battery Management System — Balancing Modularization Based on a Single Switched Capacitor an dBi-

- Directional DC/DC Converter with the Auxiliary Battery”, *Energies*, c.7, sy 5, Art. Sy 5, May. 2014.
- [13] H. Terzioğlu, F. A. Kazan, ve M. Selek, "The Designing of an Educational Solar Panel That Can Be Controlled in Different Ways," in *Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 24-26 April 2015 2015, pp. 960-964, doi: 10.1109/ICISCE.2015.217.
- [14] H. Terzioğlu, F. A. Kazan, ve C. Sungur, "The Irrigation System Fed from Biaxial PV Panels," in *Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 24-26 April 2015 2015, pp. 981-987, doi: 10.1109/ICISCE.2015.222.
- [15] A. Allam, S. Onori, S. Marelli ve C. Taborelli, "Battery Health Management System for Automotive Applications: A retroactivity-based aging propagation study", içinde 2015 American Control Conference (ACC), Tem. 2015.
- [16] F. A. Kazan, C. Sungur, ve H. Terzioğlu, "The Extension of Battery Lives Used in Solar Irrigation System With Regards to Charge-Discharge Numbers," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 752-753, pp. 988-994, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.988.
- [17] S. Aksoy ve F. A. Kazan, "Investigation of the Effect on the Drone's Energy Consumption the Flying at Different Altitudes," presented at the Selcuk University International Technology And Innovation Student Symposium (SUTIS), Konya, Türkiye, November 24 - 27, 2022, 44.
- [18] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LIPB-based HEV battery packs: Part 1. Background", *Journal of Power Sources* c.134, sy 2, ss. 252-261, Ağu. 2024.
- [19] S. Çınar, ve A.C. Ağaçayak, "Bölüm 1: 48v Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı" *Mühendislikte Yeni Araştırmalar*, (2022)., Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım sayısı:1, ss 305, ISBN:978605-5447-75-5
- [20] H. Terzioğlu, A.C. Ağaçayak, E. Öksüm, "Bölüm 3:Elektrikli Araç Ve Hidrojenli (Yakıt Pili) Araç Teknolojisinde Kullanılan Bataryalar "Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978625-6613-95-9
- [21] T.A. Atakan, H. Terzioğlu, ve A.C. Ağaçayak, "Chapter 7: Photovoltaic System Integrated Electric Vehicle Charging Station", *New Trends In Engineering*, (2022)., Tablet Kitapevi, Editör:Prof. S. Neşeli, Asst. Prof. H.Terzioğlu, Basım Sayısı:1, ss 242, Isbn:978-605-5447-74-8.
- [22] T.A. Atakan, H. Terzioğlu, ve A.C. Ağaçayak, "Chapter 20: Electric Vehicle Charging Station ", *New Trends In Engineering*, (2022)., Tablet Kitapevi, Editör:Prof. S. Neşeli, Asst. Prof. H. Terzioğlu, Basım Sayısı:1, ss 243, Isbn:978-605-5447-74-8.
- [23] N. Şahin, ve S. Servi, "New Perspectives On Artificial Intelligence, Optimization, And Data Analytics In Computational Engineering

- Innovative Approaches In Applied Engineering Fields”, A Novel Hybrid Algorithm: Enhancing Tuna Swarm Optimization with Cuckoo Search for Global OptimizationG/) (2024)., Selcuk University Press, Editör:Doğan Nurettin, Alan Selahattin, Yılmaz Acar Züleyha, Basım sayısı:1, ss 318, ISBN:978-975-448-246-1.
- [24] G. İyidiler, F. Akkuş, ve S. Servi, “Veri Bilimi Öğretimi İçin Grafikselleştirilmiş Programlama Ortamı “, Mühendislikte Yeni Araştırmalar, (2022)., Tablet Kitabevi, Editör:Yalçın Gökhan, Ağaçayak Abdullah Cem, Basım sayısı:1, ss 294, ISBN:978-605-5447-75-5.
- [25] O. Karaoğlu, S. Servi, Y. Keskin, ve A. Kurnaz. (2007). Isı İletim Probleminin Çözümü için Yeni Yöntemler. 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi.



BÖLÜM-6

GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN ELEKTRİKLİ ARAÇLAR, TASARIMI VE KONTROL ALGORİTMALARI

*Muhammed Talha ERTAN¹
Abdullah Cem AĞAÇAYAK²*

¹<https://orcid.org/0009-0009-5608-0592>

²<https://orcid.org/0000-0002-9285-5764>

GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN ELEKTRİKLİ ARAÇLAR, TASARIMI VE KONTROL ALGORİTMALARI

1. Giriş

Elektrikli araçlar (EV), fosil yakıtların kullanımını azaltarak çevre dostu ulaşım alternatifleri sunmaktadır. Ancak, elektrikli araçlar için güvenilir ve verimli enerji depolama sistemlerinin tasarımı oldukça önemlidir. Geleneksel elektrikli araçlarda bataryalar kullanılırken, güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlarda ise güneş panellerinden alınan enerjinin depolanması ve yönetilmesi gerekir. Bu araçların verimli çalışabilmesi için, güneş ışınımındaki değişkenliği ve aracın güç taleplerini yöneten gelişmiş enerji yönetimi algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar, batarya yönetimi, enerji depolama sistemleri ve enerji akış kontrolü gibi karmaşık tasarım bileşenleri içerir. Bu makale, bu bileşenlerin her birini detaylı bir şekilde açıklamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, güneş enerjisinden alınan enerjiyi verimli bir şekilde kullanabilmek için kullanılan kontrol algoritmaları ve enerji yönetim stratejileri de tartışılacaktır.

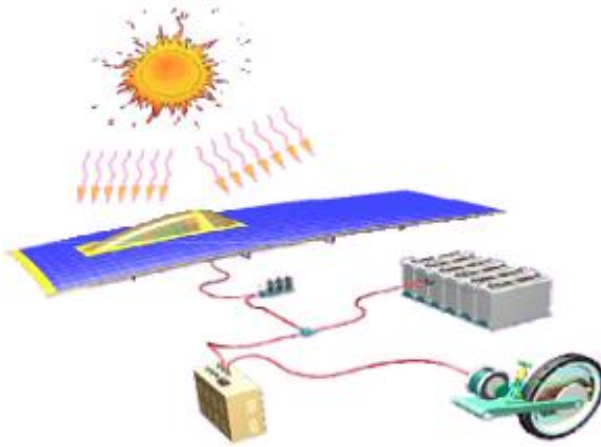
2. Güneş Enerjisiyle Çalışan Elektrikli Araçlara Giriş:

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar (GEÇEV), sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin önemli bir parçası olarak son yıllarda büyük bir potansiyel göstermektedir. Bu araçlar, enerji üretiminde güneş enerjisini kullanarak şebekeden bağımsız bir şekilde çalışabilmektedir. Bu, karbon salınımının azaltılması ve enerji bağımsızlığının sağlanması gibi çevresel ve ekonomik faydalar sunmaktadır. Elektrikli araçlar (EV'ler) hâlihazırda içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilirken, güneş enerjisinin entegrasyonu, bu araçları daha sürdürülebilir kılmaktadır. Ortalama olarak, GE-EA'lar yaşam döngüsü boyunca geleneksel fosil yakıtlı araçlara göre %60 daha düşük karbon salınımına sahiptir. İlk yatırım maliyetleri geleneksel elektrikli araçlara göre daha yüksek olsa da, enerji maliyetlerinin

düşük olması nedeniyle uzun vadede ekonomik avantajlar sunmaktadır {Nawaz, 2024 #14}

2.1. Güneş Enerjisiyle Çalışan Elektrikli Araçların Çalışma Prensibi

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar, aracın üzerine yerleştirilen fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu enerjinin büyük bir kısmı, aracın bataryalarını şarj etmek için kullanılır. Bataryalar, aracın hareket etmesini sağlamak için depolanan elektriği motora iletir. Hava koşulları, gölgeler, güneşin konumu nedeniyle çıkıştaki güneş panellerinden maksimum gücü elde etmek mümkün değildir.(Kashani, Soleimani et al. 2023) Güneş ışığının şiddeti, hava koşullarına, saat dilimine ve coğrafi konuma bağlı olarak değişir, bu da enerji üretimini tahmin etmeyi ve denetlemeyi zorlaştırır (Zhao et al., 2023; Benalla et al., 2023). Araçların güneş paneli alanlarının optimize edilmesi de önemlidir. Daha büyük panel yüzeyleri, daha fazla enerji üretimi sağlar, ancak bu da aracın ağırlığını artırır. Bu nedenle panel boyutları ve taşıma kapasitesi arasındaki dengeyi bulmak kritik olmuştur{Lv, 2016 #16}



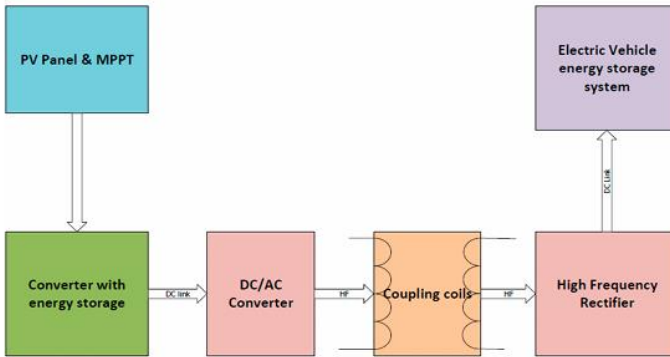
Şekil 1. Genel elektrik devresi

2.2. Sürdürülebilir Ulaşımın Güneş Enerjisinin Rolü

Güneş enerjisinin ulaşım sistemlerine entegrasyonu, özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Elektrikli araçlar, karbon salınımını önemli ölçüde azaltmakla birlikte, güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar bu etkiyi daha da artırabilir. Geleneksel elektrikli araçlar, bataryalarını şebekeden temin ettikleri elektrikle şarj ederken, güneş enerjisiyle çalışan araçlar, kendi enerjilerini üretebilmeleri sayesinde daha sürdürülebilir bir alternatif sunar [1]. Ayrıca, güneş enerjisinin şebekeden bağımsız bir güç kaynağı olması, özellikle gelişmekte olan bölgelerde enerji erişimini iyileştirebilir (Perera et al., 2024).

3. Güneş Enerjisiyle Çalışan Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetim Sistemleri:

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar (GEÇEV) için enerji yönetimi, bu araçların verimli çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu sistemler, aracın enerji üretiminden depolamaya ve tüketimine kadar olan tüm süreçleri optimize etmek amacıyla çeşitli algoritmalar ve teknolojiler kullanır. Güneş ışınımının dalgalı doğası ve bataryaların sınırlı depolama kapasitesi, enerji yönetimini karmaşık hale getiren başlıca faktörlerdir. Bu nedenle, GEÇEV'ler için enerji yönetim sistemlerinin tasarımı, enerji verimliliğini artırmayı, batarya ömrünü uzatmayı ve güneş enerjisi üretiminin dalgalanmalarını dengelemeyi hedefler.



Şekil 2. Güneş paneliyle desteklenen kablosuz şarja genel bakış

3.1. Enerji Yönetimi ve Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

Güneş pillerinden maksimum verimi almak için çeşitli devreler üretilmektedir. Genel adı MPPT (Maximum Power Point Tracker) olan bu devreler yardımıyla alınan güç sürekli maksimum seviyede tutulmaktadır. Devre temel olarak sürekli akım ve gerilim örnekleri olarak bunları çarpımını yani gücü sürekli maksimum seviyede tutacak şekilde giriş akımını ayarlamaktadır.(ÜSTÜN, YILMAZ et al.)

Bu algoritmalar, özellikle yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleriyle desteklendiğinde, daha dinamik ve adaptif hale gelir. Bu sayede GEÇEV'ler, çeşitli hava koşullarına ve ışınım seviyelerine göre en iyi enerji yönetimini gerçekleştirebilir (Liu et al., 2022).

3.1.1. Perturb and Observe (P&O)

Güneş paneli çıkış gerilimini veya akımını periyodik olarak değiştirerek en uygun çalışma noktasını bulur.

3.1.2. Incremental Conductance (IC)

Güneş panellerindeki gerilim ve akım eğimlerini karşılaştırarak maksimum güç noktasını belirler.

3.1.3. Fuzzy Logic MPPT

Yapay zekâ tabanlı, dinamik ışık koşullarına hızlı yanıt verir.

3.1.4. Particle Swarm Optimization (PSO)

Doğal optimizasyon prensiplerini kullanarak hızlı ve hassas MPPT sağlar.

3.2.3.2. Model Prediktif Kontrol (MPC)

Enerji yönetiminde bir diğer önemli teknoloji Model Prediktif Kontrol (MPC)'dür. MPC, aracın enerji akışını optimize etmek için kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem, enerji talebi ile arzını dengelemek için geçmiş veriler ve gelecekteki tahminlere dayalı olarak enerji akışını yönetir. GEÇEV'lerde, güneş enerjisinin üretimi anlık olarak değiştiğinden, MPC, bataryaların şarj ve deşarj

döngülerini optimize ederek batarya ömrünü uzatmaya yardımcı olur. Aynı zamanda, aracın hızını ve tüketimini de kontrol ederek enerji verimliliğini artırır (Luo et al., 2022).

3.3. Hibrid Enerji Depolama Sistemleri

GEÇEV'lerde, yalnızca güneş enerjisinin kullanılabilirliğiyle sınırlı kalmamak adına, hibrid enerji depolama sistemleri (batarya ve süperkapasitör kombinasyonu gibi) kullanılarak enerji verimliliği artırılabilir. Bu sistemler, güneş ışığının yetersiz olduğu durumlarda enerji depolama kapasitesini artırır ve böylece aracın her koşulda çalışabilirliğini sağlar. Bataryalar, uzun vadeli enerji depolama için kullanılırken, süperkapasitörler kısa vadeli yüksek güç taleplerini karşılamak için devreye girer. Bu tür bir enerji yönetimi, sistemin esnekliğini artırır ve aynı zamanda enerji kayıplarını azaltır (Zhang et al., 2022; Wang et al., 2023).

3.4. Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Uygulamaları

Yapay zekâ ve makine öğrenimi, enerji yönetim sistemlerinin gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, enerji tüketim desenlerini öğrenir ve aracın ihtiyaçlarına göre en verimli enerji yönetim stratejilerini geliştirebilir. Özellikle, makine öğrenimi algoritmaları, araçların batarya şarj seviyelerini, güneş ışınımı yoğunluğunu ve enerji taleplerini analiz ederek, gelecekteki enerji gereksinimlerini tahmin edebilir ve buna göre önceden gerekli önlemleri alabilir (Choi et al., 2023). Ayrıca, **derin öğrenme** ve **takviyeli öğrenme** algoritmaları, enerji akışını dinamik olarak kontrol etmek için kullanılmaktadır (Zou et al., 2022).

4. Gelecek Perspektifi ve Yeni Yöntemler

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlarda enerji yönetimi, teknoloji geliştikçe daha da sofistike hale gelmektedir. Gelecekte, akıllı şebekeler ve yapay zeka destekli kontrol sistemleri, GEÇEV'lerin daha verimli hale gelmesine olanak sağlayacaktır. Akıllı şebekeler, araçların şebekeyle etkileşimini optimize ederek, araçların şebekeye enerji geri beslemesi veya şebekeden enerji alması gibi işlemleri daha verimli hale getirebilir (Wang et al., 2023). Ayrıca, gelecekte veri analitiği ve IoT teknolojileri sayesinde daha

kapsamlı ve esnek enerji yönetim çözümleri geliştirilmesi beklenmektedir.

4.1. Güneş Enerjisi ve Entegrasyonu

Güneş enerjisi, elektrikli araçlar (EV'ler) için sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak hızla popülerlik kazanmaktadır. Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar (GEÇEV), şebekeden bağımsız bir şekilde enerji üretebilen, doğa dostu araçlardır. Bu araçlarda güneş enerjisinin entegrasyonu, araçların enerji ihtiyacını karşılamak için güneş panellerinin kullanılmasıyla sağlanır. Güneş enerjisinin kullanılması, araçların menzilinı artırabilir, batarya ömrünü uzatabilir ve enerji verimliliğini artırarak karbon salınımını azaltabilir. Ancak, güneş enerjisinin doğasında bulunan belirsizlikler ve güneş ısınımının zaman içindeki değişkenliği, GEÇEV'lerin enerji verimliliğini doğrudan etkileyen faktörlerdir.

4.2. Güneş Enerjisi ile Elektrikli Araçlar: Temel Konsept ve Uygulama Alanları

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların temel prensibi, araçların üzerinde bulunan güneş panelleriyle güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürmektir. Güneş panelleri, fotovoltaiik hücreler aracılığıyla ısınımı elektrik enerjisine dönüştürür ve bu enerjiyi bataryalara depolar. Böylece, araç sürüş esnasında ya da park halindeyken güneş enerjisiyle şarj olabilir. GEÇEV'ler, enerji üretimini sağlayan güneş panelleriyle batarya yönetimini optimize eden enerji yönetim sistemlerini birleştirerek daha verimli hale gelir (Liu et al., 2022).

Bu sistemlerin uygulanabilirliği, özellikle güneş enerjisinin ulaşılabilirliğine bağlıdır. Güneş ısınımı, coğrafi konum ve hava koşullarına göre değişkenlik gösterdiğinden, GEÇEV'lerin tasarımında bu faktörler dikkate alınarak enerji üretimi ve tüketimi optimize edilmelidir (Perera et al., 2024).

4.3. Güneş Enerjisi Sistemlerinin Entegrasyonu

Güneş enerjisi sistemlerinin elektrikli araçlarla entegrasyonu, iki ana bileşen üzerinden gerçekleştirilir: güneş panelleri ve enerji

yönetim sistemleri. Güneş panelleri, aracın enerji ihtiyacını karşılamak için gereksinim duyduğu enerjiyi üretirken, enerji yönetim sistemleri bu enerjiyi bataryalara depolar veya anında kullanır. Bu entegrasyonun en büyük avantajı, şebekeden bağımsızlık sağlayarak enerji maliyetlerini düşürmesidir. Ayrıca, batarya şarj döngülerini optimize eden kontrol algoritmaları ile güneş enerjisinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlar (Wang et al., 2023).

Enerji akışının yönetimi için genellikle model prediktif kontrol (MPC), maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve makine öğrenimi gibi ileri düzey kontrol algoritmaları kullanılır. Bu algoritmalar, güneş ışınımındaki değişiklikleri ve aracın enerji talebini dikkate alarak anlık güç akışını optimize eder. Örneğin, güneş ışınımı düşüken sistem, bataryalardan güç çekerken, ışınım seviyeleri arttığında fazla enerjiyi depolamak için bataryaları şarj edebilir (Fathabadi, 2023).

Enerji kaynağı pil ve güneş pili olan elektrikli araç, çıkış gücü ve verimliliği söz konusu olduğunda hayati bir rol oynayabilir. Bir depolama aygıtı olan pil, enerji üretmek için anot ve katot arasında bir elektrokimyasal reaksiyon kullanır ve enerji kimyasal formda depolanır. Oysa güneş pili, güneş ışığı fotonlarından enerji üretir. Güneş hücreleri, güneş enerjisini PV sistemi aracılığıyla elektrığe dönüştürür. Bu üniteler, daha verimli kapasite üretmek için paralel, seri veya her ikisi olarak yapılandırılabilir.(Mohammadi 2018)

4.4. Entegre Güneş Şarj Sistemleri ve Akıllı Şebekeler

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların geleceği, yalnızca aracın üzerinde bulunan güneş panelleriyle sınırlı değildir. Araçların, akıllı şebekelerle entegrasyonu, güneş enerjisini daha verimli bir şekilde kullanabilmek için önemli bir adımdır. Akıllı şebekeler, elektrikli araçların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için gerçek zamanlı veri analizleri yaparak, güneş enerjisinin üretildiği yer ve zaman dilimlerine göre enerji akışını yönlendirebilir. Bu sayede, aşırı yüklenme ve enerji kayıpları engellenebilir, sistem daha verimli hale gelir (Zhao et al., 2023).

Ayrıca, akıllı şebekeler aracılığıyla güneş enerjisiyle çalışan araçlar, farklı enerji kaynaklarından daha etkin şekilde faydalanabilir. Örneğin, araçlar güneş enerjisi ile şarj olurken, aynı zamanda şebekeye enerji geri gönderebilirler. Bu, vehicle-to-grid

(V2G) sistemleri olarak bilinir ve GEÇEV'lerin akıllı şehirlerin enerji sistemlerine entegrasyonu için büyük bir fırsat yaratır. Akıllı şebekelerin sunduğu bu tür özellikler, güneş enerjisinin araçlar için daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmasını sağlayabilir (Zhang et al., 2022).

4.5. Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların entegrasyonu, bazı zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. En büyük zorluk, güneş ışınımının zamana bağlı olarak değişkenlik göstermesi ve bu değişkenliğin enerji üretimi ve talebini etkileyebilmesidir. Bu nedenle, güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların verimliliğini artırmak için daha gelişmiş enerji yönetim sistemlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca, batarya kapasitesinin sınırlı olması ve enerji depolama sistemlerinin verimliliği gibi faktörler de geliştirilmesi gereken alanlar arasında yer almaktadır.

Geçmişte, güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar yalnızca belirli koşullar altında verimli olabilmıştır. Ancak, yeni nesil güneş panelleri, enerji yönetim algoritmaları ve akıllı şebekelerle yapılan entegrasyonlar, bu araçların daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlayabilir. GEÇEV'lerin geleceği, sadece enerji verimliliğini değil, aynı zamanda daha sürdürülebilir ulaşım çözümleri sunma potansiyelini artırmaktadır (Wang et al., 2023).

5. Enerji Yönetimi Sistemleri (EMS)

Enerji Yönetim Sistemleri (EMS), enerji kaynaklarının verimli bir şekilde üretildiği, depolandığı, dağıtıldığı ve tüketildiği bir sistemi kontrol etmeye yönelik geliştirilmiş yazılım ve donanım kombinasyonlarıdır. Elektrikli araçlar (EV'ler) için bu tür sistemler, aracın bataryalarının şarj edilmesi, enerji tüketiminin yönetilmesi ve sistemin genel verimliliğinin artırılması gibi işlemleri otomatik olarak optimize eder. Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlarda (GEÇEV), EMS, araçların güneş ışınımından elde ettikleri enerjiyi en verimli şekilde kullanabilmeleri için büyük bir rol oynar.

5.1. EMS'nin Temel Bileşenleri

Enerji yönetim sistemleri, çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır ve aşağıda detaylandırılmıştır.

5.1.1. Enerji Akışının İzlenmesi ve Kontrolü

Güneş enerjisiyle çalışan araçlarda, enerji akışının doğru bir şekilde izlenmesi ve yönetilmesi gerekir. Güneş ışınımı seviyeleri, batarya durumu, motor güç gereksinimi gibi faktörler sürekli değişkenlik gösterdiğinden, EMS'nin bu değişken koşullara anında tepki verebilmesi gerekmektedir (Fathabadi, 2023).

5.1.2. Enerji Depolama Yönetimi

Bataryalar, enerji depolamak için kritik bileşenlerdir ve enerjinin verimli bir şekilde depolanabilmesi, bataryaların uzun ömürlü olmasını sağlar. EMS, bataryaların şarj döngülerini optimize ederek enerji kayıplarını en aza indirir (Liu et al., 2022).

5.1.3. Enerji Üretimi ve Tüketimi Dengesi

Güneş panellerinden elde edilen enerji ile aracın enerji talebi arasındaki dengeyi kurmak, EMS'nin başlıca görevlerinden biridir. Bu dengeyi sağlamak için, EMS güneş ışınımı ve batarya durumu gibi verileri analiz eder ve gerektiğinde enerji üretimini optimize eder (Zou et al., 2022).

5.2. EMS'nin Çalışma Prensipleri

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlarda, EMS genellikle maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve model prediktif kontrol (MPC) gibi gelişmiş algoritmalarla desteklenir. Bu algoritmalar, sistemdeki enerji akışını dinamik bir şekilde kontrol eder.

5.2.1. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

MPPT, güneş panellerinin elde edebileceği maksimum güç çıkışını sağlamak için kullanılan bir tekniktir. Bu sistem, güneş ışınımı koşullarına göre panellerin çalışma noktasını sürekli izler ve en verimli enerji üretimini elde etmek için panel voltajı ve akımını optimize eder (Zhang et al., 2021). Bu algoritma, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırarak, araçların bataryalarına daha fazla enerji depolanmasını sağlar.

5.2.2. Model Prediktif Kontrol (MPC)

MPC, gelecekteki enerji talebine dayalı olarak, sistemin enerji akışını optimize eden bir kontrol yöntemidir. Bu teknik, EMS'nin sadece anlık enerji ihtiyacını değil, aynı zamanda gelecekteki enerji gereksinimlerini de dikkate almasını sağlar (Luo et al., 2022). MPC, özellikle enerji talebinin öngörülemezliğiyle başa çıkma yeteneğini yönetmekte büyük bir avantaj sağlar.

5.3. Enerji Yönetim Stratejileri ve Makine Öğrenimi

Gelişen teknoloji ile birlikte, makine öğrenimi (ML) ve yapay zeka (AI) uygulamaları, GEÇEV'lerin enerji yönetim sistemlerine dahil edilmektedir. Bu sistemler, geçmiş verileri analiz ederek, güneş enerjisi üretimi, enerji tüketimi ve batarya durumu gibi faktörleri tahmin eder. Bu tahminlere dayalı olarak, daha verimli enerji yönetim stratejileri geliştirilir (Choi et al., 2023).

Makine öğrenimi, özellikle batarya ömrünü uzatmak için kullanılan enerji yönetim algoritmalarında kritik bir rol oynar. Batarya şarj döngülerinin optimize edilmesi, bataryaların kapasitesinin doğru bir şekilde kullanılması ve şarj sürelerinin kısaltılması için makine öğrenimi yöntemleri devreye girer (Jafari et al., 2024).

5.4. İleri Düzey Enerji Yönetimi ve Akıllı Şebekeler

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar, akıllı şebekelerle entegre edildiğinde, enerji yönetim sistemlerinin verimliliği daha da artar. Akıllı şebekeler, şebekedeki enerji talep ve arzını sürekli izler ve EV'lerin enerji şebekesinden bağımsız bir şekilde şarj olmasını sağlayan vehicle-to-grid (V2G) uygulamaları gibi yeni nesil çözümleri içerir (Zhao et al., 2023). Bu tür entegre sistemler, enerji üretimindeki dalgalanmaları minimize ederek, GEÇEV'lerin daha verimli hale gelmesini sağlar.

5.5. Gelecek Perspektifleri

Enerji yönetim sistemlerinin geleceği, daha fazla verimlilik ve sürdürülebilirlik odaklıdır. Yeni nesil batarya teknolojileri ve daha hassas kontrol algoritmalarının entegrasyonu, GEÇEV'lerin performansını önemli ölçüde iyileştirecektir. Özellikle yenilikçi depolama çözümleri (superkapasitörler, yenilikçi batarya türleri) ve

yapay zeka destekli optimizasyon algoritmaları, gelecekte enerji yönetimini daha akıllı ve verimli hale getirecektir.

6. Gelecekteki Gelişmeler ve Araştırmalar

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların (GEÇEV) gelişimi, teknolojinin ilerlemesiyle önemli bir ivme kazanmıştır. Ancak mevcut sistemler, güneş enerjisinin verimli şekilde kullanımı, batarya ömrü ve enerji yönetimi gibi çeşitli alanlarda geliştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Bu alandaki gelecekteki gelişmeler ve araştırmalar, teknolojik yenilikler ve sistem entegrasyonları ile GEÇEV'lerin performansını önemli ölçüde artıracaktır.

6.1. Yenilikçi Depolama Teknolojileri ve Batarya Sistemleri

Batarya teknolojileri, GEÇEV'lerin etkinliğini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Gelişen batarya yönetim sistemleri ve yeni nesil batarya teknolojileri, güneş enerjisiyle çalışan araçların enerji verimliliğini artıracaktır.

Lityum-iyon bataryalar hala yaygın olarak kullanılsa da, katı hal bataryalar (solid-state batteries), süperkapasitörler ve sodyum-iyon bataryalar gibi alternatif depolama sistemleri, daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun ömür ve daha hızlı şarj olanakları sunmaktadır (Zhang et al., 2021). Bu teknolojiler, GEÇEV'lerin daha uzun mesafeler kat etmesine ve şarj sürelerinin kısalmasına olanak tanıyacaktır.

6.2. Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Uygulamaları

Yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) alanındaki gelişmeler, güneş enerjisiyle çalışan araçların enerji yönetiminde devrim yaratacaktır. Bu teknolojiler, araçların güneş enerjisi üretim kapasitelerini, batarya şarj durumlarını, sürüş koşullarını ve hava durumunu analiz ederek, enerji yönetimini optimize eder (Choi et al., 2023).

Derin öğrenme ve takviye öğrenme gibi gelişmiş yapay zeka teknikleri, araçların enerji akışlarını daha verimli bir şekilde yönlendirecek ve enerji tasarrufu sağlayacaktır. Ayrıca, görüntü işleme ve sensör teknolojileri ile güneş ışınımı ve hava durumu

verileri gerçek zamanlı olarak analiz edilip, güneş enerjisi üretimi daha etkin bir şekilde tahmin edilebilecektir (Zou et al., 2022).

6.3. Enerji Optimizasyonu ve Entegre Sistemler

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların verimliliğini artırmak için, daha sofistike enerji optimizasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Model prediktif kontrol (MPC), bu alandaki en önemli tekniklerden biridir. MPC, araçların enerji talebini ve güneş enerjisi üretimini sürekli olarak gözlemleyip, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını optimize eder (Luo et al., 2022). Bununla birlikte, hibrid enerji depolama sistemleri (batarya ve süperkapasitör kombinasyonları gibi) de bu optimizasyon süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, enerjinin hem depolanmasını hem de daha hızlı ve verimli bir şekilde sağlanmasını mümkün kılmaktadır (Wang et al., 2022).

6.4. Akıllı Şebekeler ve V2G Entegrasyonu

GEÇEV'lerin gelecekteki en önemli gelişmelerinden biri, **akıllı şebekelerle** entegrasyon olacaktır. Bu şebekeler, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengeyi optimize etmek için EV'lerin şebeke ile etkileşime girmesini sağlar. **Vehicle-to-grid** (V2G) teknolojisi, GEÇEV'lerin şebekeye enerji geri vermesini sağlar ve bu da şebekenin enerji arzını destekler.

Bu tür bir entegrasyon, güneş enerjisinin verimliliğini artırarak, araçların yalnızca enerji tüketicisi değil, aynı zamanda şebeke için bir enerji kaynağı haline gelmesini sağlar (Wang et al., 2023). Akıllı şebekelerin gelecekteki gelişmeleriyle, GEÇEV'ler daha verimli bir şekilde entegre olabilir ve sürdürülebilir ulaşımın temel bir bileşeni haline gelebilir.

6.5. Güneş Enerjisi Entegrasyonunun Yeni Yöntemleri

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçların geleceği, güneş enerjisi entegrasyonunun daha verimli hale gelmesiyle şekillenecektir. Araçlar üzerindeki güneş panelleri, daha hafif, daha verimli ve daha dayanıklı hale geldikçe, araçların kendi kendine enerji üretme kapasiteleri de artacaktır.

Bu panellerin katmanlı tasarımlar ve esnek yapılar gibi yenilikçi özellikleri, araçların daha geniş alanlarını güneş enerjisi üretimi için kullanmaya olanak tanıyacaktır (Sadeghi et al., 2023). Ayrıca, solar şarj istasyonları ve ulusal güneş şebekeleri ile entegrasyon, EV'lerin daha hızlı ve verimli şarj olmasına olanak tanıyacaktır.

6.6. ürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler

GEÇEV'lerin geliştirilmesindeki en büyük itici güçlerden biri, sürdürülebilirlik hedefleridir. Güneş enerjisi kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak, sera gazı emisyonlarını düşürür. Araç üretiminden itibaren her aşamada çevresel etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. GEÇEV'lerin gelecekteki gelişmeleri, bu araçların karbon ayak izinin daha da azaltılmasına odaklanacaktır (Nguyen & Wang, 2024). Yenilikçi batarya geri dönüşüm yöntemleri ve güneş paneli üretimindeki çevresel etkiyi azaltan yeni teknolojiler, bu süreçte önemli bir rol oynayacaktır.

7. Sonuçlar ve Öneriler

Güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar (GEÇEV), sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geleceği için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu araçlar, çevresel etkileri azaltma, fosil yakıt bağımlılığını minimize etme ve enerji verimliliğini artırma açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin verimliliği, güneş ışınımının doğal değişkenliği ve batarya yönetimi gibi teknik engellerle sınırlıdır.

Sonuçlar, güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçların tasarımında kullanılan enerji yönetim sistemlerinin (EMS) ve kontrol algoritmalarının önemini vurgulamaktadır. Model prediktif kontrol (MPC), maksimum güç noktası takibi (MPPT), yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamaları, GEÇEV'lerin performansını önemli ölçüde artırabilir. Özellikle yapay zeka tabanlı optimizasyon teknikleri, enerji akışını daha verimli bir şekilde yönlendirerek, enerji tasarrufu sağlar ve batarya ömrünü uzatır (Zhang et al., 2021; Liu et al., 2022).

Gelişen batarya teknolojileri ve enerji depolama sistemleri, GEÇEV'lerin enerji verimliliğini artırarak, daha uzun mesafeler kat etmelerine ve daha hızlı şarj olmalarına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, akıllı şebeke entegrasyonu ve V2G (Vehicle-to-Grid) teknolojileri,

bu araçların sadece bir enerji tüketicisi değil, aynı zamanda şebekeye enerji sağlayan bir kaynak haline gelmesini mümkün kılacaktır (Sadeghi et al., 2023).

7.1. Öneriler

7.1.1. Batarya Teknolojilerinin Geliştirilmesi

GEÇEV'lerin verimliliğini artırmak için batarya teknolojilerinde önemli ilerlemeler gerekmektedir. Katı hal bataryalar, süperkapasitörler ve sodyum-iyon bataryalar gibi alternatif depolama çözümleri, daha uzun ömür, hızlı şarj ve yüksek enerji yoğunluğu sağlama potansiyeline sahiptir. Bu teknolojilere yapılacak yatırımlar, gelecekteki GEÇEV tasarımlarında önemli bir rol oynayacaktır (Wang et al., 2022; Fathabadi, 2023).

7.1.2. Enerji Yönetim Sistemlerinin İyileştirilmesi

Enerji yönetimi, güneş enerjisiyle çalışan araçların performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Model prediktif kontrol (MPC) gibi algoritmaların daha sofistike hale getirilmesi ve yapay zeka tabanlı kontrol sistemlerinin entegrasyonu, enerji verimliliğini artırmak için büyük fırsatlar sunmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi üretimini daha doğru tahmin edebilecek algoritmalar geliştirilmelidir (Liu et al., 2023; Choi et al., 2023).

7.1.3. Akıllı Şebekelerle Entegrasyon

GEÇEV'lerin akıllı şebekelere entegrasyonu, şebeke dengesizliğini çözmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımını sağlamak için önemlidir. V2G teknolojisi, bu araçların şebekeye enerji geri vermesine olanak tanıyacak ve şebeke üzerinde stres oluşturan enerji talebini dengeleyecektir (Zou et al., 2022). Gelecekteki araştırmalar, bu entegrasyonların daha da iyileştirilmesi için yeni yöntemler geliştirmelidir.

7.1.4. Güneş Paneli Verimliliği ve Entegrasyonu

GEÇEV'lerin güneş enerjisinden daha fazla verim elde edebilmesi için, güneş panellerinin verimliliği artırılmalıdır. Esnek, hafif ve dayanıklı güneş panellerinin tasarımı, araçların enerji

üretimini artıracak ve taşıma kapasitesini olumsuz etkilemeyecektir (Perera et al., 2024). Araç üzerindeki güneş panellerinin tasarımı ve konfigürasyonu, gelecekte daha verimli hale getirilmelidir.

7.1.5. Araştırmaların Yoğunlaştırılması ve Teknolojik Yenilikler

GEÇEV'lerin gelecekteki gelişimi, sürekli araştırma ve teknolojik yeniliklerle mümkün olacaktır. Bu araçların entegrasyonunda yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarının artırılması, güneş enerjisi üretimi ve depolama sistemlerinin optimize edilmesi gerektiği açıkça ortadadır. Ayrıca, aracın çevresel etkilerini azaltmaya yönelik batarya geri dönüşüm yöntemleri ve üretim süreçlerinin daha çevre dostu hale getirilmesi gereklidir (Liu et al., 2022; Perera et al., 2024)

Sonuç olarak, Güneş Enerjisiyle Çalışan Elektrikli Araçlar sürdürülebilir ulaşım için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Ancak bu potansiyelin gerçekleştirilmesi için, batarya yönetimi, enerji yönetim sistemleri ve şebeke entegrasyonu gibi alanlarda önemli araştırmalar ve gelişmeler gerekmektedir. Bu alanlarda yapılacak çalışmalar, GEÇEV'lerin enerji verimliliğini artıracak ve gelecekte daha yaygın hale gelmelerini sağlayacaktır.

8. Kaynakça

- [1] Fathabadi, H. (2023). "Solar-Powered Electric Vehicle Systems: Design and Control." *Energy Reports*, 9(6), 2023.
- [2] Benalla, M. et al. (2023). "Design of Hybrid Energy Storage Systems for Solar Electric Vehicles." *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 15(2).
- [3] Liu, X. et al. (2022). "Applications of Machine Learning in Energy Management for Solar-Powered Electric Vehicles." *Renewable Energy*, 163, 1007-1019.
- [4] Nguyen, S., & Wang, Q. (2024). "Simulation of Solar and Hybrid Energy Systems in Electric Vehicles." *Energy Conversion and Management*, 168, 90-101.
- [5] Ghadimi, S. et al. (2020). "Hybrid Power Management Techniques for Electric Vehicles: A Review." *International Journal of Renewable Energy*, 12(4), 420-432.
- [6] Terzioğlu H. et al. (2023). "Bölüm 2: Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi", *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-2*, , Eğitim Yayınevi, Editör:Prof.Dr. S. Neşeli, Dr.Öğr.Üyesi. H. Terzioğlu, Basım sayısı:1, ss 149, ISBN:978-605-5447-75-5
- [7] Fathabadi, H. (2023). "Optimization of Energy Flow in Solar-Powered Electric Vehicles: A Hybrid Approach." *Renewable Energy*, 154, 405-416.
- [8] Choi, J. et al. (2023). "Machine Learning Techniques in Solar Electric Vehicle Energy Management." *Energy & Environmental Science*, 16(4), 1122-1133.
- [9] Wang, T. et al. (2022). "Optimization of Hybrid Storage Systems for Solar Electric Vehicles." *Applied Energy*, 268, 115-130.
- [10] Jafari, A. et al. (2024). "Design of Intelligent Control Algorithms for Solar-Powered Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(1), 44-56.
- [11] Luo, Y. et al. (2022). "Model Predictive Control for Solar-Powered Electric Vehicle Energy Management." *Control Engineering Practice*, 119, 104-115.
- [12] Liu, B. et al. (2023). "Energy Storage Systems for Electric Vehicles: A Comprehensive Review." *Journal of Power Sources*, 498, 120-135.
- [13] Huang, Z. et al. (2022). "Simulation and Analysis of Solar Electric Vehicle Performance." *Energy Conversion and Management*, 255, 115-128.
- [14] Terzioğlu H. et al. (2015). "A New Approach to the Installation of Solar Panels," in *Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on*, Shanghai, China, 24-26 April 2015 2015, pp. 573-577, doi: 10.1109/ICISCE.2015.133.
- [15] Terzioğlu H. et al. (2015). "The Irrigation System Fed from Biaxial PV Panels," in *Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on*, Shanghai, China, 24-26 April 2015 2015, pp. 981-987, doi: 10.1109/ICISCE.2015.222.

- [16] Lee, S. et al. (2023). "Hybrid Solar-Energy Management Systems in Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(2), 1480-1492.
- [17] Zou, Y. et al. (2022). "Optimal Energy Flow Control for Solar-Powered Electric Vehicles Using Deep Reinforcement Learning." *Energy Reports*, 9, 2195-2207.
- [18] Sadeghi, P. et al. (2023). "Power Management Strategies for Solar Electric Vehicles: A Review." *International Journal of Energy Research*, 47(7), 3274-3290.
- [19] Yilmaz, F. et al. (2023). "Advanced Energy Management Algorithms for Solar-Powered EVs: A Comparative Study." *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 19(1), 75-87.
- [20] Zhu, J. et al. (2022). "Multi-Objective Optimization for Solar-Powered Electric Vehicle Systems." *Renewable Energy*, 159, 451-460.
- [21] Zhao, L. et al. (2023). "Solar-Powered Electric Vehicle Design and Control for Smart Cities." *Journal of Clean Energy Technologies*, 12(4), 234-245.
- [22] Xu, D. et al. (2023). "Design and Control of Photovoltaic-Integrated Electric Vehicles." *Solar Energy*, 204, 215-224.
- [23] Kashani, S. A. et al. (2023). "State-of-the-Art Research on Wireless Charging of Electric Vehicles Using Solar Energy." *Energies* 16(1): 282.
- [24] Mohammadi, F. (2018). "Design, analysis, and electrification of a solar-powered electric vehicle." *Journal of Solar Energy Research* 3(4): 293-299.
- [25] Üstün, Ö. et al. "Güneş Enerjili Yarış Aracının Elektrik Tasarım Ölçütlerinin, Yol Performans Simülasyonunun Ve Enerji Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi."
- [26] Kazan F.A. et al. (2015) "The Extension of Battery Lives Used in Solar Irrigation System With Regards to Charge-Discharge Numbers," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 752-753, pp. 988-994, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.988.
- [27] Terzioglu H. et al. (2015) "The Designing of an Educational Solar Panel That Can Be Controlled in Different Ways," in *Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 24-26 April 2015 2015, pp. 960-964, doi: 10.1109/ICISCE.2015.217.
- [28] Zhang, F. et al. (2022). "Battery and Supercapacitor Hybrid Systems for Solar Electric Vehicles: Design and Optimization." *Energy*, 248, 124-135.
- [29] Smith, D. et al. (2022). "Energy Efficiency in Solar-Powered Electric Vehicle Systems." *Journal of Sustainable Mobility*, 9(3), 45-57.
- [30] Khosravi, A. et al. (2023). "Modeling of Energy Flows in Solar-Powered Electric Vehicles Using Advanced Simulation Tools." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(5), 1312-1324.
- [31] Song, J. et al. (2023). "Dynamic Power Control for Solar-Powered Electric Vehicles Based on Real-Time Data." *Energy Reports*, 10, 500-512.

- [32] Wang, J. et al. (2024). "Optimization of Solar Charging Systems for Electric Vehicles in Urban Areas." *Journal of Solar Energy Engineering*, 146(2), 205-215.
- [33] Li, H. et al. (2023). "Efficient Energy Management Systems for Solar-Powered Electric Vehicles: A Review of Recent Advances." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 12-27.
- [34] Atakan T.A., et al. (2022). "Chapter 7: Photovoltaic System Integrated Electric Vehicle Charging Station", *New Trends In Engineering*, Tablet Kitapevi, Editör:Prof. S. Neşeli, Asst. Prof. H.Terzioğlu, Basım Sayısı:1, ss 242, Isbn:978-605-5447-74-8.
- [35] Atakan T.A., et al. (2022). "Chapter 20: Electric Vehicle Charging Station ", *New Trends In Engineering*, Tablet Kitapevi, Editör:Prof. S. Neşeli, Asst. Prof. H. Terzioğlu, Basım Sayısı:1, ss 243, Isbn:978-605-5447-74-8.
- [36] Zhang, Y. et al. (2021). "Maximum Power Point Tracking and Energy Efficiency in Solar-Powered Electric Vehicles." *Journal of Solar Energy Engineering*, 143(3), 254-267.
- [37] Perera, W. et al. (2024). "The Future of Solar-Powered Electric Vehicles: Technological Advancements and Challenges." *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 76-89.
- [38] Cheng, K. et al. (2023). "Integrated Solar Charging Systems for Electric Vehicles: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 340-350.
- [39] Wu, X. et al. (2024). "Artificial Intelligence for Energy Management in Solar Electric Vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 112-121.
- [40] Wang, L., et al. (2023). "The Role of Smart Grids in Solar Electric Vehicle Integration." *Energy Science & Engineering*, 11(1), 62-72.
- [41] Binali R., et al. (2022). " Kompozit Malzemelere Genel Bakış", *Mühendislikte Yeni Araştırmalar*, Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. Gökhan Yalçın, Öğr. Gör. Abdullah Cem Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 305, Isbn:978-605-5447-75-5
- [42] Binali R., et al. (2021). "İmalat Yöntemlerine Genel Bakış", *Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-2, İksad*, Editör:Prof. Dr. S. Neşeli, Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 113, Isbn:978-625-8423-14-3
- [43] Neşeli S., et al. (2018). Surface Roughness Estimation For Turning Operation Based Ondifferent Regression Models Using Vibration Signals. *International Journal Ofintelligent Systems Andapplications İn Engineering*, 6(4), 282-288.
- [44] Arsel İ., et al. (2024). A new approach to estimate solar radiation. *International Journal of Renewable Energy Research*, 14(3), Doi: 10.20508/ijrer.v14i3.14913.g8909.
- [45] Yılmaz, F., et al. (2024). "New Perspectives On Artificial Intelligence, Optimization, And Data Analytics In Computational Engineering/Alternative Distributions In Wind Speed Forecasting And A Comparison ", *Innovative Approaches in Applied Engineering Fields*, Selcuk University Press, Editör:Doğan Nurettin, Alan

Selahattin, Yılmaz Acar Züleyha, Basım sayısı:1, ss 318, ISBN:978-975-448-246-1.

BÖLÜM-7

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN HABERLEŞME PROTOKOLLERİ, DEVRE ŞEMALARI VE ARAYÜZ TASARIMLARI

*Nihat GÜNEŞ¹
Gökhan YALÇIN²*

¹<https://orcid.org/0000-0004-7964-9765>

²<https://orcid.org/0000-0002-5929-917X>

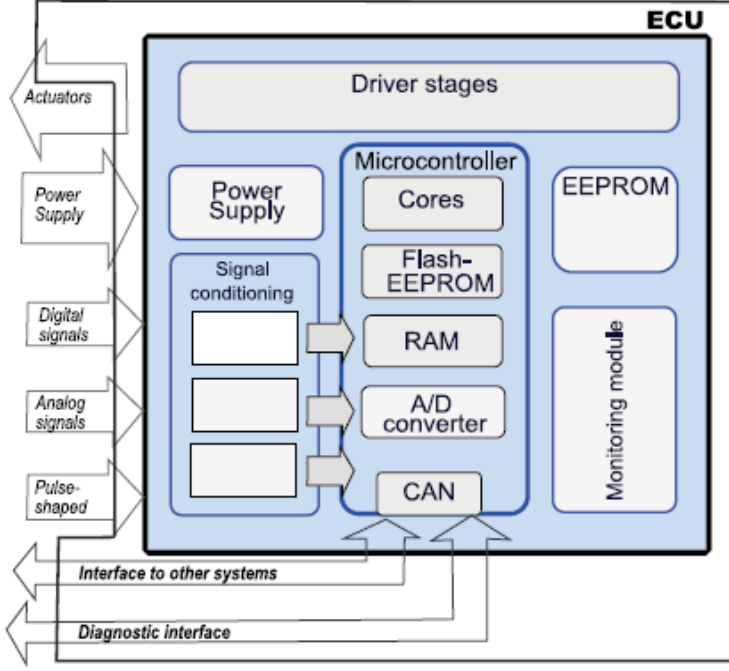
ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN HABERLEŞME PROTOKOLLERİ, DEVRE ŞEMALARI VE ARAYÜZ TASARIMLARI

1. Giriş

Yeni teknolojilerin ve daha optimize edilmiş iletişim sistemlerinin gelişi, daha fazla işlevselliğe ve daha iyi özerklik seviyelerine sahip akıllı arabaların yaratılmasına yol açtı. Dahası, farklı cihazlar arasında daha verimli iletişim sistemleri elde etmek için yeni iletişim protokolleri tasarlandı. Bir iletişim protokolü, iki veya daha fazla varlığın bir iletişim sistemi içinde iletişim kurmasına ve bir kanal veya fiziksel bir ortam aracılığıyla bilgi göndermesine izin veren bir dizi kural olarak tanımlanabilir [1].

Otomotiv endüstrisi, iletişim teknolojilerinin hızlı, güvenli ve güvenilir veri iletimi için kullanıldığı ve güvenli ulaşımı sağlayan alanlardan biridir. Modern araçlar, aracın normal çalışmasını sağlamak için birbirleriyle iletişim kuran birden fazla Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU) içerir. İletişim protokolleri, aracın durumu hakkında kontrol üniteleri arasında veri alışverişi yapmak için kullanılır [2].

ECU, farklı parametreleri ölçmek için çeşitli sensörlerden alınan sinyalleri işlemekten sorumlu gömülü bir sistemdir. Çalışmasına bağlı olarak, güç aktarma sistemleri, araç güvenliği, konfor, bilgi-eğlence, motor kontrolü vb. gibi farklı ECU tipleri vardır. Bunlar aracın farklı bölümlerine yerleştirilir ve birkaç önemli birimi kontrol eder. Bu, bir ECU'nun genellikle bir mikrodenetleyici, belirli bir sinyal işleme birimi ve bir denetleyicinin yanı sıra elektronik bileşenler ve güç kaynağı gibi diğerlerine sahip bir mikrobilgisayar sistemi olduğu anlamına gelir. Sensörler temeldir, aracın farklı parçalarından sinyaller alır ve bunları işlenmesinden sorumlu olan ECU'ya iletir. Buna karşılık, bazı işlevleri gerçekleştirmek için aktüatörlere kontrol sinyalleri göndermek üzere verileri işler. Şekil 1, bir Elektronik Kontrol Ünitesindeki ana bileşenleri gösterir [1].



Şekil 1. Main Electronic Control Unit (ECU) Components [1]

Modern otomobillerde eğlence sistemleri, navigasyon sistemleri, araç içi arıza göstergesi ve artırılmış gerçeklik (AR) gösterge panelleri gibi sayısız yeni uygulama bulmak artık bir standart haline gelmiştir. Dahası, lüks araçlar adaptif hız sabitleme, şerit değiştirme uyarısı, otomatik park etme ve otonom sürüş gibi çeşitli kamera tabanlı Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri (ADAS) özellikleriyle donatılmıştır [3].

Günümüzde telemetri ve ADAS gibi yeni özelliklerle uzmanlar, tek bir modern lüks aracın artık 150'ye kadar ECU entegre edebileceğinden bahsediyor. Her ECU, araçtaki belirli bir işlevi yönetir, örneğin gövde kontrolü, fren kontrolü, koltuk kontrolü, akıllı anten modülü, kapı/pencere kontrolü, vb. Arabaların içinde farklı elektronik bileşenler vardır, bunlardan bazıları Şekil 2'de gösterilmiştir, örneğin ön ünite ekranı, arka kamera ve ışık kontrol ünitesi [1].



Şekil 2. Electronic components in a car [1]

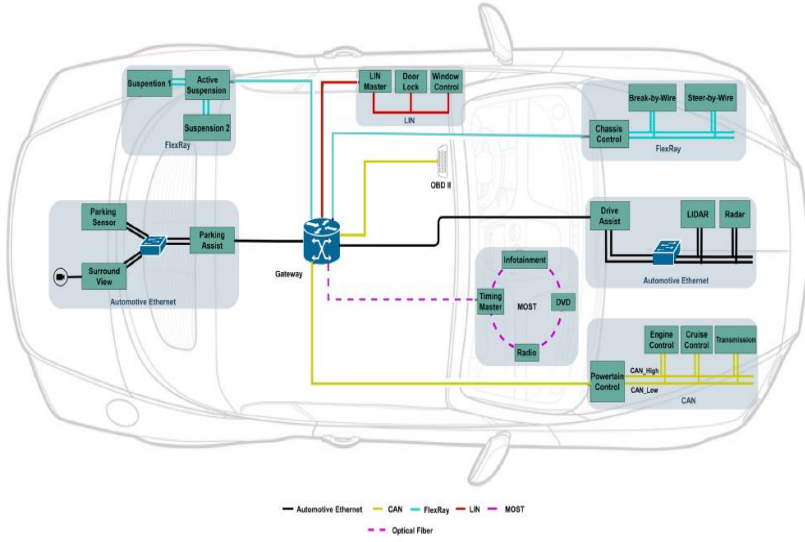
Elektronik sistemlerin kullanılmasının temel nedenlerinden biri, sürücünün aracı ilgili fonksiyonlarla kontrol edebilmesi için sürücüye yardım sağlamalarıdır, örneğin araç hızını kontrol etme, aracın kaymasını önleyen Kilitleme Önleyici Fren Sistemi (ABS) ve güvenliği sağlayan elektronik denge programı (ESP). ECU'ları kullanmanın bir başka nedeni de kapılar, ışıklar ve hava yastıkları, motor kontrolü gibi aracın farklı bileşenlerini izlemek ve kontrol etmektir ve tüm bu işlemlere otomotiv iletişimi ile erişilir. İşlevsellik sayısını artırdıkça ECU sayısı da artar ve bunun için farklı veri yolu iletişimi türlerine ihtiyacımız vardır [4].

ECU'lar, modern araçların mümkün olan en iyi performansını ve işlevselliğini garantilemek için birbirleriyle etkili bir şekilde iletişim kurmalı ve koordine olmalıdır. Zamanla, otomotiv sistemlerinin farklı parçaları arasında sorunsuz iletişimi sağlamak için özel iletişim protokolleri oluşturulmuştur. Bir otomobilin farklı sistemleri ve parçalarının veri alışverişinde bulunmasını sağlayan iletişim kanalları oluşturmak, otomobillerde ağ oluşturma olarak bilinir. Bir protokol, veri alışverişi için formatı, zamanlamayı, sıralamayı ve hata kontrolünü belirten bir dizi standartlaştırılmış kuraldır. Cihazlar arasında veri aktarımında güvenilirliği ve uyumluluğu garanti eder [5-8].

Modern araç içi iletişim sistemlerinde en yaygın kullanılan beş araç içi ağ vardır: LIN (Local Interconnection Network), CAN (Controller Area Network), FlexRay, Ethernet ve MOST (Media Oriented Systems Transport) [9].

2. Haberleşme Protokolleri

Ağ, bir araçtaki çeşitli bileşenleri ve sistemleri birbirine bağlayarak bunların birbirleriyle iletişim kurmasını ve veri alışverişinde bulunmasını sağlar [10]. Otomotiv sektöründe en yaygın olarak kullanılan beş protokol Şekil 3’de gösterildiği gibi modern bir aracın çeşitli sistemleri ve bileşenleri arasında verimli ve güvenilir iletişimi sağlar. Bu protokoller ECU’lar ve diğer cihazlar arasında veri alışverişi için iletişim yolları görevi görür.



Şekil 3. Araç İçi Ağ [10]

Bu protokoller, aracın genel performansı, güvenliği ve eğlence yönleri için çok önemli olan güvenilir ve verimli veri iletimi sağlamada önemli bir sorumluluk üstlenir [2].

Alt sistemler, ECU'lar arasında bir iletişim ortamı kurmak için CAN, LIN, FlexRay, Medya Odaklı Sistemler Taşıma (MOST), Ethernet gibi iletişim protokollerini kullanır [11].

Flexray ve LIN gibi eski teknolojiler basitlikleri ve güvenilirlikleri nedeniyle hala kullanılıyor ancak düşük veri hızları nedeniyle daha yeni geliştirmelerle ortadan kalkıyor [12].

ECU’larla veri alışverişi için kullanılacak en uygun haberleşme protokolünü belirlemek için karşılaştırma kriterleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Karşılaştırma kriterleri:

Veri Hızı (Mbps): Verilerin bir iletişim kanalı üzerinden iletildiği hızı ifade eder. Günümüzde kullanılan yüksek hızlı protokoller sayesinde birçok sistem, sensör ve araç bileşeni daha hızlı ve daha güvenilir bir şekilde iletişim kurabilir. Bu, araçlar ve diğer sistemler arasında daha hızlı iletişimi mümkün kılar ve bu da otonom araçların güvenliği ve verimliliği için gereklidir. Daha yüksek veri hızları ayrıca daha güvenilir veri iletimi sağlayarak veri bozulmasını ve kaybını azaltır [2].

Kablo Uzunluğu (m): Verilerin fiziksel bir cihaz içinde veya araçlar arasında iletilmesi gereken mesafeyi ifade eder. Tüm araç bileşenleri arasındaki sinyaller ve iletişim, sağlamlığı sağlamak için uygun bir protokol tarafından desteklenmelidir [2].

Girişim Dayanıklılığı (dB): Protokolün sinyali bozan bozulmalara ve girişimlere dayanma yeteneğini ifade eder. Daha yüksek dayanıklılık değerine sahip protokoller güvenilir ve istikrarlı iletişimi garanti eder [2].

Hata Tespiti ve Düzeltme: Araç iletişiminde veri bütünlüğünü korumak için bir hata tespiti yöntemi zorunludur. Bu protokoller, araçtaki çeşitli sistemler arasındaki veri iletiminin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırır [2].

Maksimum Güç Tüketimi (mA): Aracın elektrik sistemindeki maksimum yükü ifade eder. Elektrikli araçlar ve pille çalışan cihazlar için daha düşük enerji tüketimi esastır. Bu, elektrik sistemindeki yükü azaltan ve enerjinin verimli kullanımını sağlayan protokollerle elde edilir [2].

Uygulama Maliyeti: Araçlarda bir iletişim protokolünü uygulamak ve entegre etmek için gereken finansal yatırımı da içeren uygulama maliyetini ifade eder. Bunlar yazılım, donanım bileşenleri, altyapı ve kurulum ve yapılandırma için gereken tüm kaynakların maliyetleridir [2].

Ölçeklenebilirlik: Protokolün, araca bağlı cihazların artan karmaşıklığı ve sayısının artan veri iletim gereksinimlerini karşılama becerisi ile ilgilidir. Protokolün gelecekteki araçlar için daha fazla cihaz ekleyebilmesi veya veri hacmini artırabilmesi önemlidir [2].

Otomotiv Endüstrisinde Benimsemesi: Otomotiv sektöründe bir iletişim protokolünün benimsenme ve destek düzeyini ifade eder. Yerleşik protokoller birlikte çalışabilirliğe, uyumlu bileşenlere ve

kanıtlanmış güvenilirliğe sahiptir. Otomotiv üreticileri ve tedarikçileri bu protokolleri yaygın olarak benimser ve uygular [2].

Birlikte Çalışabilirlik: Araçlar farklı üreticilerden gelen birden fazla sisteme ve bileşene dayandığından, otomotiv endüstrisinde birlikte çalışabilirlik kritik öneme sahiptir. Farklı cihazlar, sistemler ve araçlar arasında kesintisiz iletişim ve veri alışverişi için, birlikte çalışabilirliği teşvik eden, standartlaştırılmış entegrasyonu ve uyumluluğu kolaylaştıran protokoller kullanılır [2].

Uygulama: Uygulama yönü, otomotiv endüstrisindeki belirli kullanım durumlarını ve gereksinimleri ele alır. Belirli iletişim protokollerinin, araçtan araca (V2V) ve araçtan altyapıya (V2I), telemetri, gelişmiş sürücü destek sistemleri (ADAS), otonom sürüş veya araçtan altyapıya (V2I) gibi belirli uygulamalar için daha uygun olduğu unutulmamalıdır [2].

Tablo 1. Protokollerin Kriterlere Göre Karşılaştırması [2]

No	Kriter	Controller Area Network (CAN)	Local Interconnect Network (LIN)	FlexRay	Ethernet	Media-Oriented Systems Transport (MOST)
1	Veri Hızı (Mbps)	1-8	0.02	2.5 – 10	1000	14 – 25
2	Kablo Uzunluğu (m)	40 – 1000	40	40 – 200	15 – 40	50 – 1500
3	Girişim Dayanıklılığı (dB)	20-25	20-25	>25	>70	>70
4	Hata Tespiti ve Düzeltme	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
5	Maksimum Güç Tüketimi (mA)	50	20	200	1000	500
6	Uygulama Maliyeti	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
7	Ölçeklenebilirlik	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek
8	Otomotiv Endüstrisinde Benimsenmesi	Yaygın kullanım	Sınırlı	Sınırlı	Sınırlı	Sınırlı
9	Birlikte Çalışabilirlik	Farklı tedarikçilerden bileşenlerin ve sistemlerin entegrasyonunu sağlayan endüstri standardı protokolü	Sınırlı birlikte çalışabilirlik, genellikle aynı tedarikçiden gelen bileşenler ve sistemler	Diğer FlexRay bileşenleriyle birlikte çalışabilir, ancak CAN kadar yaygın olarak kullanılmaz	Sınırlı birlikte çalışabilirlik, farklı Ethernet sürümleri her zaman birbirleriyle uyumlu değildir	Diğer protokollerle birlikte çalışmaz, belirli uygulamalar için tasarlanmıştır
10	Uygulama	Aracın neredeyse tüm önemli fonksiyonlarından sorumludur	Genellikle CAN alt veri yolu olarak kullanılır ve aracın aktüatörlerinden ve sensörlerinden sorumludur	Veri iletiminin güvenliğiyle ilgili uygulamaları hedefleyen güvenlikle ilgili yüksek hızlı otomotiv ağları	Elektrikli ve hibrit, bağlantılı araçlar, otonom araçlar vb. gibi otomotiv araçlarındaki uygulamalardan sorumludur.	Yüksek kaliteli video multimedya veri akışlarının iletiminden sorumludur

3. Controller Area Network (CAN)

Otomotiv otomasyonunda kullanılmak üzere Bosch firması tarafından geliştirilen kablolu karmaşıklıklarını ve maliyetlerini azaltmak için kullanılan bir ağ protokolüdür. Dönemin başlarında, çoğunlukla otomotiv endüstrisi tarafından kullanılan CAN,

günümüzde ise otonom endüstri ve tıbbi ekipman, uzay aracı üretimi gibi tıbbi alandaki diğer gömülü sistemler tarafından desteklenmektedir [4].

CAN protokolü kullanılmayan bir aracın toplam ağırlığına katkıda bulunan çok sayıda kablo vardır. Ek olarak, bu kablolar, motor gürültüsü, rüzgar direnci, radyo parazitleri ve diğer eklenen faktörlerden kaynaklanan araç içinde gelişen büyük gürültü ortamı nedeniyle sinyallerdeki ek gürültüye katkıda bulunur [13-15].

Şekil 3'de gösterildiği gibi CAN, fiziksel ortamda bükümlü çift kablo bulunan yayın tabanlı bir veri yolu ağıdır. Tüm ECU'lar ağda iletilen herhangi bir mesajı alır. Her ECU, alınan bir mesajı işleyip işlemeyeceğine mesaj türüne göre karar verir. CAN teknik özellikleri ISO 11898 uyarınca standartlaştırılmıştır. Açık Sistemler Bağlantısı (OSI) modelinin uygulamasını, veri bağlantısını ve fiziksel katmanını uygular. CAN, kısa mesajlar aracılığıyla bilgi alışverişinde bulunmak için geliştirilmiştir. Uzun veriler bölünür ve birden fazla mesajda değiştirilir [10].

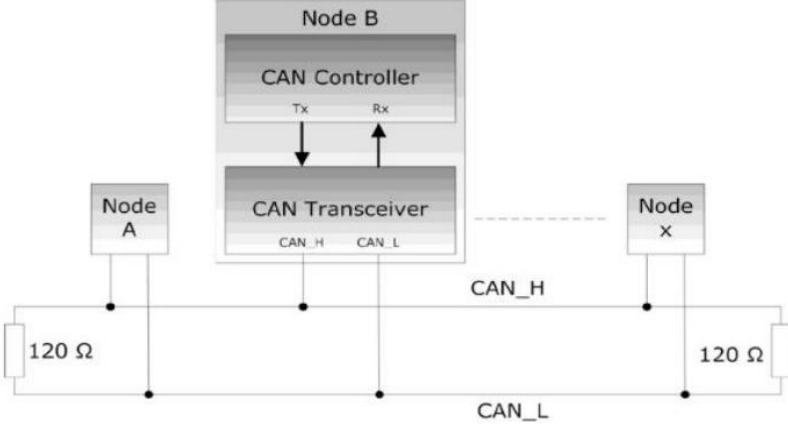
CAN mesajları döngüsel olarak gönderilir, bu yoğunlukla birden fazla ECU ile kontrol ve geri bildirim döngülerini gerçekleştirmek için kullanılır veya genellikle kullanıcıyla etkileşim için olay tabanlıdır (örneğin, dönüş sinyalinin, cam regülatörünün etkinleştirilmesi) [16].

Yüksek hızlı CAN bus'un maksimum hızı 1 Mbps'ye ulaşabilir. CAN Flexible Data Rate (CAN FD) için maksimum hız 8 Mbps olabilir ve veri alanı uzunluğu 64 bayt olabilir [17].

Genellikle dokuz pimli bir D-SUB konektörü kullanır ve 40 m'ye kadar uzunluklarda 1 Mb/sn'lik maksimum veri yolu hızına izin verir. Mesajlar, 64 bitlik maksimum veri alanı boyutuna sahip çerçevelerde kapsülendir. Zaman tetiklemeli protokol (TTP) gibi zaman bölmeli çoklamalı erişim (TDMA) tabanlı bir ortam erişim kontrol katmanı kullanmaz ancak yine de şu anda otomotiv alanında olay tetiklemeli iletişim için bir iletişim veri yolu olarak oldukça popülerdir [18].

CAN veri yolu üzerindeki cihazlara "düğüm" denir. Her düğüm, bir Merkezi İşlem Birimi (CPU), CAN denetleyicisi ve düğüm tarafından gönderilen ve alınan verilerin sinyal seviyelerini uyarlayan bir alıcı-vericiden oluşur. Şekil 4'te gösterilmiştir. Tüm düğümler veri gönderip alabilir, ancak aynı anda değildir. Düğümler

doğrudan birbirlerine veri gönderemezler. Bunun yerine, verilerini, adreslendikleri herhangi bir düğüm için mevcut olan ağa gönderirler. CAN protokolü kayıpsızdır ve veri yolundaki çekişmeleri çözmek için bit tabanlı bir tahkim yöntemi kullanır.

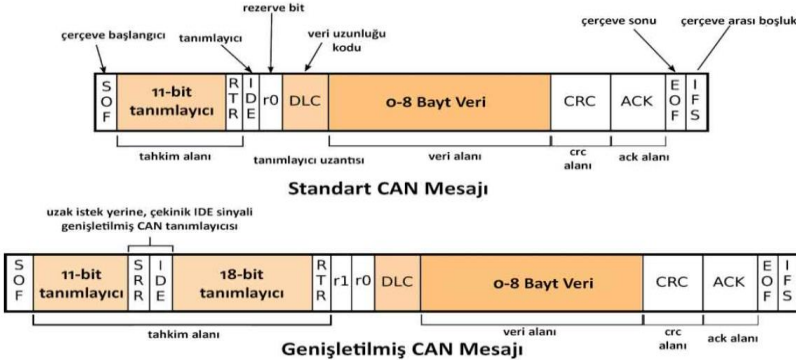


Şekil 4. CAN Ağ Yapısı [4]

CAN High ve CAN Low, ECU'nun fiziksel olarak bağlandığı ve diğer ECU'larla iletişim kurmak için kullandığı bağlantıdır. CAN, diferansiyel bir sinyal göndermek için bu iki kabloyu kullanır ve tüm bu kablolar bükümlü çifttir ve kablunun her iki ucunda 120 Ω sonlandırma direnci bulunur. Bu dirençler bir CAN standardı olarak standartlaştırılmıştır ve direnç, bükümlü çift kablunun karakteristik empedansına eşittir ve bu da iletim veri kalitesinin sağlanmasına yardımcı olur [19].

3.1. CAN Mesajı

CAN, ağ üzerinden veriyi paketler halinde gönderebilir, buna çerçeveler denir, tanımlayıcıya göre iki farklı çerçeve türü vardır, 11 bitlik alan tanımlayıcısına sahip bir mesaj çerçevesi standart mesaj çerçevesi olarak bilinir ve diğeri 29 bitlik alan tanımlayıcısına sahiptir, buna genişletilmiş çerçeve denir [4]. Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. CAN Mesaj Türleri

SOF (Start of Frame 1 bit) Tek baskın çerçeve (frame) başlangıcı. Bu bit, bir mesajın başlangıcını işaretler. Boş bir sürenin ardından düğümleri (nodes) senkronize eder.

CAN 11-bit tanımlayıcı veri alanı, mesaj önceliğini ayarlar. Daha düşük değerler, daha yüksek öncelikler anlamına gelir.

Uzaktan İletim Talebi (Remote Transmission Request) 1 bit. Bu bit, başka bir düğüm tarafından bilgi istendiğinde baskındır. Tüm düğümler isteği alır, ancak tanımlayıcı istenen düğümü belirler.

Tanımlayıcı Uzantısı (Identifier Extension) 1 bit. Standart bir CAN tanımlayıcısının (genişletilmiş değil) iletilmekte olduğunu gösterir.

r_0 , 1 bit gelecekte kullanılmak üzere rezerve edilmiştir.

Data Length Code (DLC) 4 bit, Veri Uzunluğu Kodu, iletimdeki bayt sayısını içerir.

Data 0-64 bit, gerçek veriler aktarılırken kullanılır.

Cyclic Redundancy Check (CRC) 16 bit, çerçevedeki hatayı ve mesajın bütünlüğünü kontrol eder.

Acknowledgement (ACK) 2 bit, CAN mesajının standart çerçevesinde, vericinin herhangi bir alıcı düğümün veriyi düzgün bir şekilde aldığını belirlemesine yardımcı olan bir onay slotudur.

End of Frame (EOF) 7 bit, çerçeve sonu, her CAN çerçevesinin (mesajın) sonunu gösteren 7 bitlik bir alandır.

Inter Frame Space (IFS) 7 bit, çerçeveler Arası Boşluk (IFS), denetleyicinin bir çerçeveyi (mesajı) arabellek alanındaki konumuna taşınması gereken zamandır.

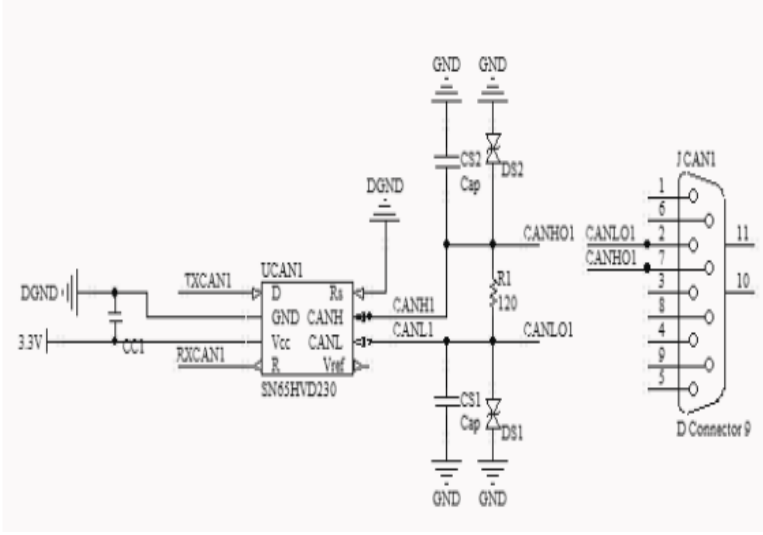
Artıları: Kablolamayı azaltmak, CAN dağıtılmış bir kontrol ağı olduğu için gelişmiş sistem performansı sağlar. CAN veri yolu

teknolojisi hatasız iletimi garanti eder. Burada, her düğüm hata çerçevesini gönderebilir ve mesaj iletiminde hataları kontrol edebilir. CAN sistemleri arasında doğrudan bir ilişki olmadığında, bir sistemin arızası diğerini etkilemez ve sistem güvenli kalırken sağlıklı modüller amaçlanan işlevlerini sürdürür [5].

Eksileri: Bir düğüm kaldırıldığında veri yoluna doğru şekilde bağlanmış 120 ohm'luk bir sonlandırma direnci gerekir. CAN veri yolu ile artan bakım ve yazılım maliyetleri ilişkilidir [5].

3.2. CAN Devre Şeması

Örnek CAN iletişim modülünün donanım yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir. SN65HVD230 alıcı-vericisine dayalı bir CAN veri yolu sürücü devresi ile tasarlanmıştır. SN65HVD230 denetleyici alan ağı (CAN) alıcı-vericisi, ISO 11898-2 yüksek hızlı CAN fiziksel katman standardı spesifikasyonuna uygundur ve cihaza ve CAN ağına sağlamlık sağlamak için birçok koruma özelliği dahil olmak üzere 1 Mbps'ye kadar veri hızlarına sahip uygulamalar için tasarlanmıştır. Alıcı-verici doğrudan Main Computer Unit'un (MCU) CAN fonksiyon kaydına bağlanır ve diğer uç, ISO 11898-2 fiziksel katman standardına uygun CAN_High ve CAN_Low iletişim hatlarıdır. Veri yolu kontrol kartının çalışma kararlılığını iyileştirmek, kartın mesaj alma ve alma işlevinin elektromanyetik girişimin olduğu ortamda bile normal şekilde çalışabilmesini sağlamak için, alıcı-verici devresinin bir kısmı özel olarak Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) için tasarlanmıştır. CAN arayüzünün CAN_High ve CAN_Low devrelerinde, girişim için düşük empedanslı bir dönüş yolu sağlamak için geçici baskılama diyotları ve filtre kapasitörleri eklenir ve diferansiyel hat üzerindeki ortak mod girişimini filtrelemek için ortak mod indüktörü eklenir. Ayrıca, PCB tasarımı izole edilmiştir. CAN sinyal kablosu örgülü bir kalkanla korunur ve diferansiyel kablo bükülür [20].



Şekil 6. CAN Devresi [15]

4. Local Interconnect Network (LIN)

Yerel Bağlantılı Ağ (LIN), 1998 yılında otomotiv şirketlerinden oluşan bir konsorsiyum (BMW, Audi, Daimler Chrysler, Mercedes-Benz, Volcano Automotive ve Volkswagen) ile Motorola tarafından önerildi. Amaç, standart ve düşük maliyetli bir veri yolu oluşturmaktır [1].

CAN yüksek bant genişliği ve güvenilir veri iletimi sağlasa da kullanımı maliyetlidir. Yerel Bağlantı Ağı (LIN), performans ve güvenilirliğin önceliklendirilmediği uygulamalar için uygun maliyetlidir. 20 Kbit/s veri aktarım hızına sahip sensörler ve aktüatörler arasında seri zaman tetiklemeli iletişimdir [4].

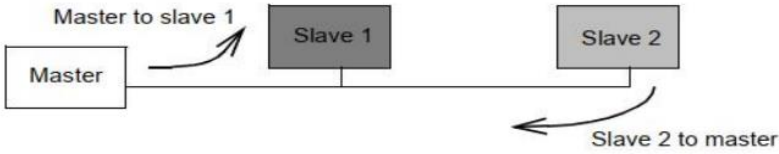
LIN, kapı kilitleri, elektrikli camlar ve silecekler gibi araç içi elektronikleriyle iletişim kurmak daha uygundur. LIN, Şekil 3'de gösterildiği gibi tek kablolu bir seri veri yoludur. CAN gibi, LIN de OSI modelinin uygulamasını, veri bağlantısını ve fiziksel katmanını dağıtır [10].

LIN düşük maliyetli ve tek kanallı bir ağa sahiptir ve yalnızca kısa mesafeli ağlar için kullanılır; bu ağ, master-slave ilişkisine dayanır; tek bir master, 16 slave'a kadar kontrol edebilir. LIN'in özellikleri aslında seri iletişim için de kullanılan ve seri iletişim standartlarına ulaşan Evrensel Asenkron Alıcı Vericileri (UART)

protokolüne dayanmaktadır; ancak LIN, standartları küresel gereksinimlere göre optimize eder. LIN'in özellikleri, otomotiv endüstrisi için yeni bir küresel standart sağlar ve sensörler ve aktüatörler sistemleri için ağ sağlar. LIN, sensörlerin ve aktüatörlerin seri iletişim sistemlerinin küresel standardizasyonuna göre yeni çözümler ve zorluklar taahhüt ediyor [4].

Günümüzde LIN, otomotiv ağlarında hala yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü bu, eşsiz maliyet rekabet gücüne sahiptir. Günümüzde, tam yüklü bir premium otomobilin 30'dan fazla LIN düğümüne sahip olması yaygındır [9].

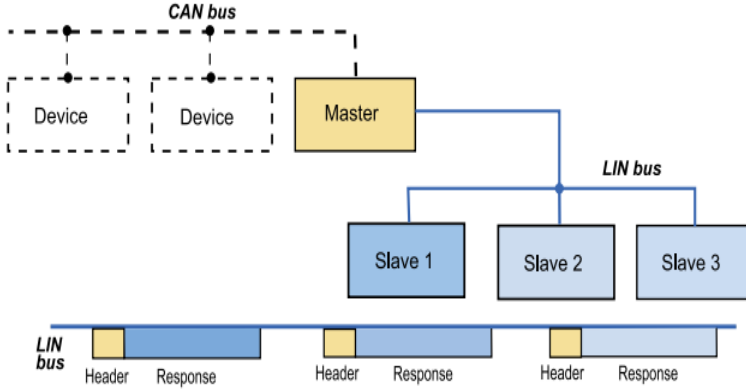
Master düğüm tarafından başlatılan tek bir mesaj iki kaynaktan oluşur: master düğüm ve slave düğüm. LIN protokolü, master düğümün LIN veri yolundaki tüm iletişimlerde tam kontrol sahibi olduğu bir master/slave mimarisinde çalışır. Master düğüm LIN veri yolundaki tüm iletişim etkinliklerini başlatır ve düzenler. İletişim, master düğümün bir başlık iletilmesiyle başlar, ardından slave düğümünden gelen yanıt gelir [5]. Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. LIN Haberleşmesi [4]

Şekil 8, diğer slave cihazlarla iletişim kuran bir ana cihazdan oluşan tipik bir LIN ağını gösterir. Bu şema, zaman tetikleyici olaylara dayalı olarak bir ana cihazın bir dizi cihazla iletişim kurmasına yol açar ve aynı zamanda bu ana cihaz, CAN veri yolu gibi başka bir ağın parçası olabilir. LIN, veri iletişimi için 2 ila 16 düğümü destekler [1]. Bir LIN ağında yalnızca tek bir ana düğüm ve en fazla 15 köle düğüm bulunur.

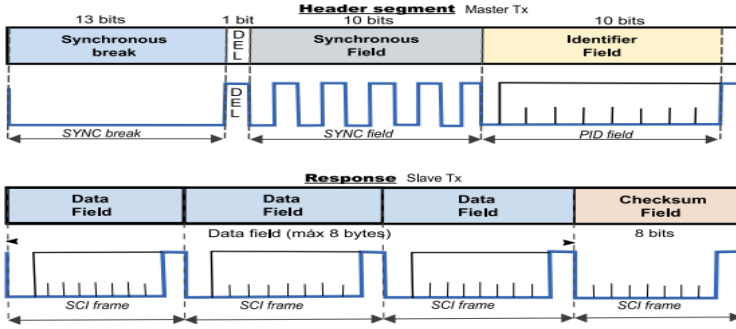
Bir LIN ağının veri yolu uzunluğu 40 metreyi (önerilen değer) geçmemeli ve toplam düğüm sayısı 16'dan fazla olmamalıdır. OSI modeline göre, tek çerçeveli yerleşik LIN iletişimini gerçekleştirmek için yalnızca üç katmana (fiziksel katman, veri bağlantı katmanı ve uygulama katmanı) ihtiyaç vardır [9].



Şekil 8. LIN Şeması [4]

4.1. LIN Mesajı

Her LIN çerçevesi iki ana bölümden oluşur: (1) Bir başlık her zaman Master cihaz tarafından iletilir ve üç alana ayrılır: Senkronizasyon Kesintisi, 1 Sınırlayıcı Bit, Senkronizasyon Alanı ve Korunmalı Bir Tanımlayıcı (PID), (2) Veri Bloğu (yanıt), Slave cihaz tarafından gönderilen çerçevedir. Yanıt, 8 bayta kadar veri ve bir kontrol toplamından oluşur. Şekil 9, LIN veri yolu veri çerçevesinin ayrıntılı yapısını gösterir [1].

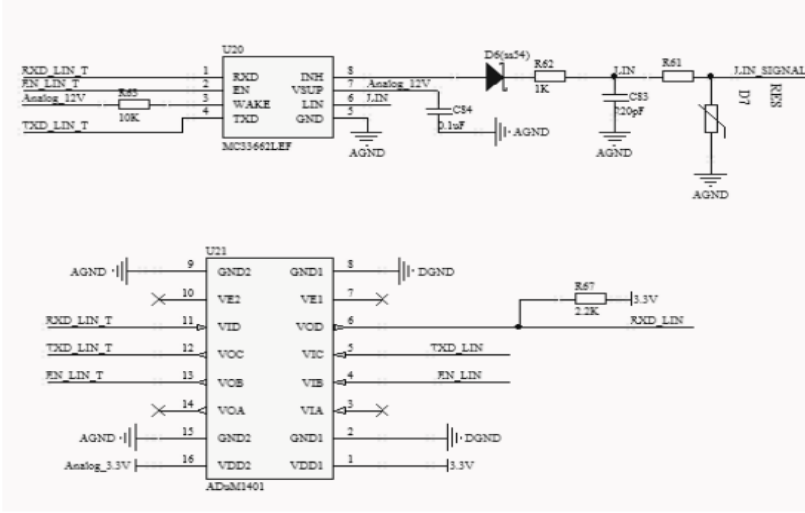


Şekil 9. LIN Çerçevesi [1]

4.2. LIN Devre Şeması

Örnek LIN iletişim modülü kartı, MC33662 alıcı-vericisini içeren bir LIN veri yolu sürücü devresi ile tasarlanmıştır. Doğrudan giriş 12V güç kaynağı tarafından çalıştırılır. İletişimin kararlılığını

artırmak için, LIN modülünün EMC performansını artırmak için izolasyon modülü ADUM1401 eklenir. NXP'nin MC33662'si, otomotiv LIN veri yolu uygulamalarına adanmış bir fiziksel katman bileşenidir ve LIN protokol özellikleri 1.3, 2.0, 2.1 ve SAEJ2602-2 ile uyumludur. LIN iletişim modülü, LIN mesajının ve TTL seviyesinin dönüşümünü gerçekleştirmek için UART seri portu aracılığıyla tek çipli mikrobilgisayara bağlanır. LIN iletişim modülünün donanım yapısı Şekil 10'da gösterilmiştir [20].



Şekil 10. LIN Devresi [20]

5. FlexRay

Otomobillerdeki işlevselliğin artmasıyla birlikte otomotiv sistemlerindeki ECU sayısı da arttığından, telemetri ve ADAS gibi otomotiv yardımı gibi yeni hizmetler eklenmiştir, bu nedenle gerçek zamanlı iletişim ağları zorunlu hale gelmiştir. FlexRay bu zorlukları hedeflemek için tasarlanmıştır. FlexRay 2000 yılında önerilmiş ve Daimler Chrysler, BMW, Freescale ve Phillips tarafından geliştirilmiştir. FlexRay, otomotiv araçlarında yüksek hızlı teknoloji için tasarlanmış yüksek bant genişliğine sahip bir iletişim protokolü olarak tanımlanmıştır [1].

FlexRay ağı, LIN ve CAN'dan çok daha hızlı iletim hızına ve daha büyük arıza toleransına sahiptir. Ayrıca, bir FlexRay sisteminin gerçek maliyeti tartışılmalı olsa da, önemli ölçüde daha yüksek bir

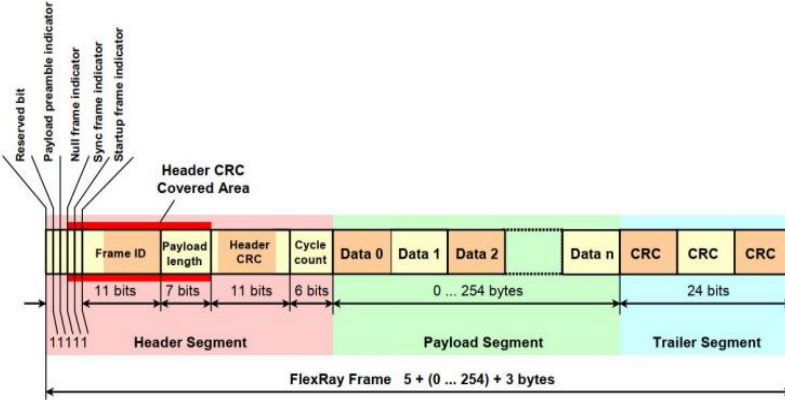
maliyeti vardır. Örneğin, bazı uzmanlar FlexRay'in maliyetinin çok yüksek olduğunu düşünüyor ve bunun otomotiv endüstrisi tarafından yaygın olarak kabul görmesini engelleyebileceğinden endişe ediyor. Bazıları ayrıca FlexRay'in araçlarda konuşlandırılması için çok karmaşık olduğu için çok sınırlı bir geleceği olacağına inanıyor. Ancak FlexRay, birden fazla CAN alt ağını ve bazı yedek sensörleri değiştirebileceği düşünüldüğünde, yaklaşık olarak bir CAN sistemiyle aynı maliyete sahip olacaktır [9].

İletişim için zamanlama gerçekleştirilmesi gereklidir ve zorunludur. FlexRay ağı, bir veri yolu ağı yapısı üzerinden 64 düğümü bağlayabilen esnek bir yeteneğe sahiptir. Fiziksel ortam yapısı için, iletim için bakır ve optik fiber kablolar kullanılabilir. FlexRay'de, veri yolu iletişim sistemi, Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) kullanan bir alıcı seçebilir ve yüksek önceliğe göre senkron ve asenkron veri gönderebilir. Statik ve dinamik segmentasyonları kullanarak veri aktarımı ve hata toleransı veya işleme, yedeklilik ile elde edilebilir ve veri yolu koruyucusu bazı mantıksal hataları tolere edebilir [4].

FlexRay veri yolu, CAN veri yolundan daha yüksek bir aktarım hızına sahiptir ve esas olarak otomotiv güç kontrol sisteminde kullanılır. FlexRay'in maksimum hızı 10 Mbps'ye kadar çıkabilir. Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) ve esnek zaman bölmeli çoklu erişim (FTDMA), ağ iletişiminin gerçek zamanlı gereksinimlerini sağlamak için FlexRay'de kullanılır (ISO 17458-1, 2013). FlexRay çerçevesinin veri alanı uzunluğu 254 bayttır. CRC, FlexRay'de veri yolu iletişimi sırasında hataları kontrol etmek için kullanılır [17].

5.1. FlexRay Mesajı

FlexRay'in çerçevesi 3 bölüme ayrılmıştır ve bu bölümler Şekil 11'de tanımlandığı gibi header, paylod ve trailer'dır. FlexRay çerçevesini CAN çerçevesiyle karşılaştırdığımızda, FlexRay çerçevesinin CAN standart ve CAN genişletilmiş çerçeveden daha büyük olduğu açıkça görülmektedir ve bunun nedeni bu çerçevenin ekstra hataları kontrol etme yeteneğine sahip olmasıdır [4].



Şekil 11. FlexRay Çerçevesi [4]

Header, 5 bayt içerir, örneğin çerçevenin boş çerçeve olup olmadığını veya herhangi bir yük verisi içermediğini veya yalnızca senkronizasyon için kullanıldığını belirten durum bilgisine sahiptir. İletilmesi gereken yükün gerçek uzunluğunu belirten bazı bitlere ve başlığın doğru alınıp alınmadığını kontrol edebilen bazı CRC bitlerine sahiptir [4].

Payload Segmenti, payload uzunluğu 0 ila 254 bayt arasında olabilir, payload çerçeveler hakkında daha fazla bilgi göndermek için kullanılabilir ancak bu isteğe bağlıdır çünkü başlıkta da yapılabilir [4].

Trailer Segmenti, bu bölüm 3 bayt içerir ve çerçevenin doğruluğunu ve alıcı düğümün bu bölümü kullandığını ve ayrıca başlıkta ve yükte değerlendirilen bu 3 baytlık CRC'yi gösterir [4].

FlexRay, Şekil 3'de gösterildiği gibi seri, yıldız veya hibrit dâhil olmak üzere ağ mimarisinde esnekliğe sahip çoklu ana ağdır. Bağlantılar için bir veya iki çift kablo kullanan tek veya çift kanallı bir kurulumla birlikte gelir. İsteğe bağlı ikinci kanal, ağ yedekliliği sağlayarak ek bant genişliği ve yüksek güvenilirlik sağlar. Ağ ayrıca iki tür iletişimi destekler: zaman tetiklemeli ve olay tetiklemeli [10].

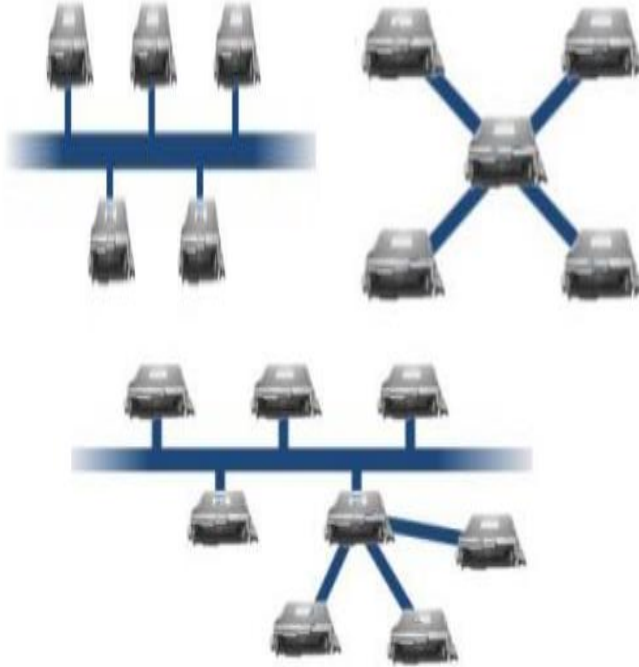
5.2. FlexRay Topolojileri

FlexRay, ağların karmaşıklığına bağlı olarak pasif bağlantıları ve çoklu bağlantıları takip eder. Doğru topolojiyi seçmek tasarım, maliyet, performans ve güvenilirlikte yardımcı olur. Topoloji ayrıca tek kanal veya çift kanal gibi kanaldan kanala değişir [4]. Şekil 12'de topoloji çeşitleri gösterilmiştir.

Bus Topolojisi, en yaygın olarak, FlexRay tek bir “Bus”ın birden fazla ECU'ya bağlandığı “Bus” topolojisini kullanır. Bus omurga olarak bilinir çünkü bu durumda “Bus”ta herhangi bir arıza olursa tüm ağ arızalanır. Küçük ağlar için kullanılan “Bus” topolojisi, diğer topolojilere göre daha az kabloya ihtiyaç duyar ve ek cihazlar kullanırsak, ağın hızını yavaşlatır [4].

Yıldız Topolojisi, bu topolojide ayrı düğümler vardır ve bu düğümler merkezi bir düğümlle bağlantılıdır, bu düğüm yerel alan ağındaki bir hub gibi davranır. Yıldız topolojisi daha fazla güvenilirlik sağlar çünkü bir düğüm herhangi bir arızayı gösterirse diğer düğümleri etkilemez ancak merkezi düğümler arızalanırsa tüm ağ arızalanır [4].

Hibrit Topoloji, bus ve yıldız topolojileri bir araya gelerek hibrit topoloji oluşturur. Kullanım kolaylığı sağlar, daha güvenilir, etkili ve esnektir, bu topolojinin herhangi bir yerinde hata varsa o kısım ağdan izole edilebilir, böylece ağ etkilenmez. İki topolojinin birleşimidir, bu nedenle ağın boyutunu eklemek veya artırmak kolaydır. Bu topoloji gereksinimlere göre tasarlanmıştır [4].

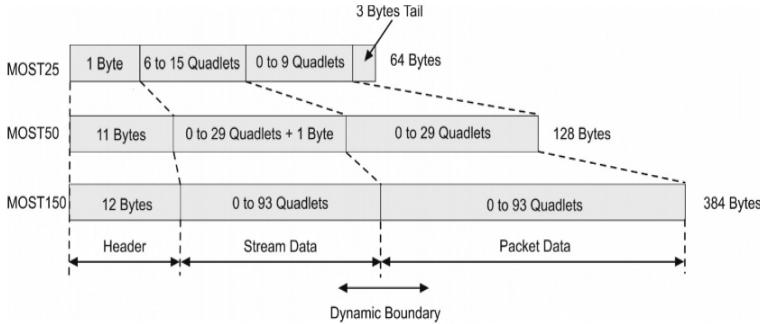


Şekil 12. FlexRay Topolojileri; Bus, Yıldız ve Hibrit [4]

6. Media Oriented System Transport (MOST)

Otomotiv üreticileri, artan güvenlik ve konfor talebini karşılarken gelişmiş bir araç içi deneyim sunmak için bilgi-eğlence sistemlerini bir araya getiriyor. Multimedya uygulamalarını daha kullanıcı dostu hale getirmek için yüksek hızlı bir iletişim ağı gereklidir. Medya Odaklı Sistem Taşımacılığı (MOST), yüksek bant genişliğinde medya odaklı iletişimi etkinleştirmek için geliştirilmiştir. MOST ağlarının üç versiyonu, MOST25 (Optik), MOST50 (Elektrik/Optik) ve MOST150 (koaksiyel kabloya dayalı Elektrik/Optik), bant genişliğine göre kullanılır. Hepsi düşük bit hata oranına sahip optik fiziksel katman destekler. MOST50 ve MOST150 ayrıca elektriksel fiziksel katmanı da destekler. Ağ, hem akış verilerinin (yani ses, video) hem de kontrol verilerinin iletimini destekler. Bant genişliği, gerçek zamanlı iletişim sağlamak için akış verilerine ayrılmıştır. MOST, OSI modelinin yedi katmanının hepsini uygular. Şekil 1'de gösterildiği gibi halka topolojisini izler [10].

Ağ, bir zamanlama ilkesinden ve 64'e kadar aracı düğümden oluşur. Zamanlama ilkesi, çerçeveleri periyodik olarak aracıya iletir. Her aracı, çerçeveyi işler, boş yuvalara bilgi ekler ve halkadaki bir sonraki aracıya iletir. MOST hem senkron hem de asenkron veri iletimini destekler. Şekil 13, MOST25'in çerçeve yapısını gösterir. Preamble (giriş), aracı düğümlerini zamanlama ilkesiyle senkronize etmek için kullanılır. Veri alanının senkron kısmı, gerçek zamanlı akış verilerini (yani ses ve video) taşır. Asenkron kısım, olay odaklı veriler için kullanılır. Kontrol, durum ve teşhis mesajları gibi komutları göndermek için kullanılır. MOST50 ve MOST150'nin çerçeve biçimleri, MOST25'e benzerdir ancak daha büyük bir çerçeve boyutuna sahiptir [10].



Şekil 13. MOST Çerçevesi [9]

Üç MOST sürümü arasında, MOST150, birçok nedenden dolayı yakın gelecekte otomotiv endüstrisi tarafından yaygın olarak benimsenmesi en umut verici olanıdır. Ayrıca, MOST zaman tabanına senkronize bile olmayan ses/görüntü akışlarını iletmek için de kullanılabilir. MOST150 ayrıca paket veri iletimi için MAC adreslemesini destekler ve bu da popüler Ethernet iletişimiyle uyumluluğunu artırabilir [9].

7. Ethernet

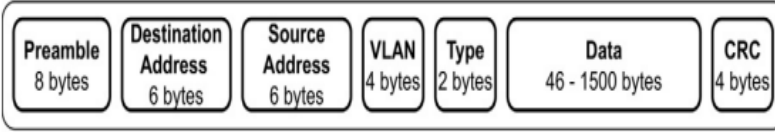
Günümüzde, arabalar birbirleriyle ve diğer cihazlarla kablolu veya kablosuz bir ağ üzerinden iletişim kurar. Araç ağlarını uygulamanın farklı yolları vardır, bunlar arasında şunlar yer alır: Sistem eğlencesini, kontrol sistemlerini vb. kullanmak için araba içinde ağ kurma. Arabalar arasındaki iletişim çarpışmaları önler, daha fazla güvenlik ve araç verimliliği için arabalar ve yol arasında ağ kurulmasına olanak tanır ve son olarak, internete bağlantı, yolcuların navigasyon ve trafik güncellemeleri için haritaları kullanmasını sağlar. Otomotiv Ethernet (AE), Ethernet'in önerilmesinden 40 yıldan fazla bir süre sonra, BMW'nin X5'i tarafından 2013 civarında piyasaya sürüldü [1].

Ethernet tabanlı ağ oluşturma 1980'lerden beri var olmasına rağmen, gürültülü kanalları ve yüksek gecikmesi nedeniyle başlangıçta otomotiv endüstrisinde kaçınıldı. Ancak, yakın zamanda, Otomotiv Ethernet, araç içi ağın heterojen protokollerinin (yani, CAN, LIN, MOST, FlexRay) karmaşıklığını ve maliyetini azaltmak için ortaya çıktı. Otomotiv Ethernet, araç içi alt sistemlerin tüm iletişim gereksinimlerini karşılayacak ve maliyeti ve karmaşıklığı en aza indirecek tek bir protokol standardına geçmek üzere tasarlanmıştır [7].

Geleneksel Ethernet'e benzer şekilde, düğümler seri, tekli yayın ve çoklu yayın iletişimini destekleyen Otomotiv Ethernet'inde anahtarlarla bağlanır. Ancak, Otomotiv Ethernet'in farklı bir fiziksel katmanı vardır ve bükümlü çift kablo ile dağıtılabilir. Broadcom, 100 Mbps'ye kadar bant genişliğine sahip bükümlü çift kablolar üzerinden çift yönlü veri aktarımına izin veren tescilli bir Otomotiv Ethernet fiziksel katman standardı olan BroadR-Reach'i (100BASE-

T1) tasarladı. Ancak, düşük gecikme, zamana duyarlı, öncelikli iletişim ve bant genişliği rezervasyonu sağlamada yetersiz kalmaktadır. Audio Video Bridging/Time Sensitive Network (AVB/TSN) standardı, bu sorunları çözmek için IEEE 802.1 çalışma grubu tarafından geliştirilmiştir [20]. Otomotiv Ethernet'inde AVB/TSN'nin benimsenmesi, düğüm senkronizasyonuna izin vererek kesin, yüksek bant genişliğine sahip, verimli bir ağ ile sonuçlanır [10].

Şekil 14, Otomotiv Ethernet'inin çerçeve formatını göstermektedir. Giriş alanı, düğüm senkronizasyonu sağlar. CAN, LIN, MOST ve FlexRay'ın aksine, otomotiv Ethernet çerçevesi kaynak ve hedef adreslerini içerir. Adresler ağda benzersiz olduğundan, kimliğe bürünme saldırılarının gerçekleştirilmesi zor olacaktır. 4 baytlık VLAN etiketi, çerçevenin önceliğini taşır. 2 baytlık tür alanı, veri türünü belirtir. Yük boyutu, diğer protokollerden çok daha yüksek olan 46-1500 bayttır. Son olarak çerçeve hata tespiti için 4 baytlık CRC değeri ile sonlanır.



Şekil 14. Ethernet Çerçevesi [7]

8. Sonuç

İletişim teknolojilerinin ve gelişmiş bilgi işlemin otomotiv endüstrisine entegrasyonu, modern akıllı araçların geliştirilmesine yol açmıştır. Araç içi ağlar, CAN, LIN, MOST, FlexRay ve Otomotiv Ethernet gibi farklı protokollerden oluşan karmaşık araç içi ağlar üzerinden iletişim kuran Elektronik Kontrol Üniteleri (ECU'lar), sensörler, kameralar, radarlar ve otonom sürüş sistemleri gelişmiş teknolojilere dayanır. Ancak, başlangıçta araç içi ağlara yönelik güvenlik tehditleri dikkate alınmamıştır. Şimdi, kötü niyetli saldırılara karşı koymak için daha sofistike güvenlik şemaları gereklidir.

Araç içi ağların iletişim açıklarını belirlemek, güvenlik tehditlerini ve güvenlik açıklarını ortaya çıkarmak bu alanda devam eden araştırmalara ilham kaynağı olmalıdır.

9. Kaynakça

- [1] Martínez-Cruz, A. et al. , Security on in-vehicle communication protocols: Issues, challenges, and future research directions. *Computer Communications*, 2021. 180: p. 1-20.
- [2] Yordanova, M. and A. Haka. Comparative Evaluation of Communication Protocols in the Automotive Industry. in 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2023. IEEE.
- [3] Huang, J. et al. , In-vehicle networking: Protocols, challenges, and solutions. *IEEE Network*, 2018. **33**(1): p. 92-98.
- [4] Hardt, W. and D.I.R. Schmidt, *Automotive Communication Buses*.
- [5] Prerana, S. et al. Review on Communication Technologies used in Electric Vehicles. in 2024 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER). 2024. IEEE.
- [6] Ağaçayak A.C. and Sungur C., “Dron Ağları İçin Topoloji İncelenmesi”, *Mühendislik Alanında Yeni Ufuklar*, (2019)., Gece Akademi, Editör:Mahmut Turhan, Basım Sayısı:1, ss 415, Isbn:978-60580229-1-1
- [7] Binali R., S. Neşeli, and G. Yalçın, "İmalat Yöntemlerine Genel Bakış",*Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-2*, (2021)., , İksad, Editör:Prof. Dr. S. Neşeli, Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 113, Isbn:978-625-8423-14-3
- [8] Dhulkefl E., A. Durdu, and H. Terzioğlu. (2020). Dijkstra Algoritması Kullanılarak İha Yol Planlaması. *Konya Journal Of Engineering Sciences*, 8, 92-105., Doi: 10.36306/Konjes.822225.
- [9] Zeng, W., M.A. Khalid, and S. Chowdhury, In-vehicle networks outlook: Achievements and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016. 18(3): p. 1552-1571.
- [10] Anwar, A. et al. , Security assessment of in-vehicle communication protocols. *Vehicular Communications*, 2023. 44: p. 100639.
- [11] Park, H.-B. et al. , Practical Methodology for In-Vehicle CAN Security Evaluation. *J. Internet Serv. Inf. Secur.*, 2019. 9(2): p. 42-56.
- [12] Kainrath, K. et al. Advancing Automotive Connectivity: New Technologies and Security Considerations. in 2024 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom). 2024. IEEE.
- [13] Roksic, S., *Controller Area Network (CAN) Bus Simulator and Data-logger for In-Vehicle Infotainment Testing*. 2020.
- [14] Binali R., G. Yalçın, and A.C. Ağaçayak, “Modern İmalat Yöntemlerine Genel Bakış “, *Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-1*, (2021), İksad, Editör:Dr. Öğr. Üy. Hakan Terzioğlu, Öğr. Gör. Gökhan Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 200, Isbn:978-625-8423-15-0
- [15] Yılmaz M., O. İnan, and H. Terzioğlu, “Hiyerarşik Kümeleme Yöntemleri Üzerine Kısa Bir Derleme “, *Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar-1*, (2023)., Eğitim Yayınevi, Editör:Dr. Öğr. Üyesi Sema

- Servi, Öğr. Gör. Abdullah Cem Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 115, Isbn:978-625-6613-94-2
- [16] Rumez, M. et al. , An overview of automotive service-oriented architectures and implications for security countermeasures. IEEE access, 2020. 8: p. 221852-221870.
- [17] Hu, Q. and F. Luo, Review of secure communication approaches for in-vehicle network. International Journal of Automotive Technology, 2018. 19: p. 879-894.
- [18] Tuohy, S. et al. , Intra-vehicle networks: A review. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014. 16(2): p. 534-545.
- [19] Chan, B., Study on Communication Protocols Modbus and CAN Bus. 2023.
- [20] Luo, F. and P. Wei. A design of CAN, LIN Bus test board. in 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). 2019. IEEE.
- [21] Ağaçayak A. C., H. Terzioğlu, and B. Özdeş, "Bölüm 3: Elektrikli Araçlarda Telemetri", Elektrikli Araçlara Genel Bakış 2 , (2020)., İksad, Editör:H. Terzioğlu, G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 132, Isbn:978-625-7687-48-5.



BÖLÜM-8

PROTOTİP ARAÇ AERODİNAMİĞİNİ GELİŞTİRME: SÜRTÜNME DİRENCİNİ AZALTMAYA YÖNELİK CFD TABANLI BİR YAKLAŞIM

Abdullah TAŞI¹

Namık Kemal YALÇIN²

Osman KOCAASLAN³

Süleyman NEŞELİ⁴

¹<https://orcid.org/0009-0006-9651-3442>

²<https://orcid.org/0000-0002-8715-2087>

³<https://orcid.org/0000-0002-7848-6974>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-1553-581X>

PROTOTİP ARAÇ AERODİNAMİĞİNİ GELİŞTİRME: SÜRTÜNME DİRENCİNİ AZALTMAYA YÖNELİK CFD TABANLI BİR YAKLAŞIM

1. Giriş

Küresel enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların çevresel etkilerinin giderek belirginleşmesi, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ilgiyi artırmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe, araçların enerji tüketimini azaltmak amacıyla gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri, sürdürülebilir mobilite hedefleri doğrultusunda büyük bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, aerodinamik optimizasyon, araç tasarımında enerji tüketimini minimize eden en etkili yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Sürüklenme kuvvetini azaltmaya yönelik yenilikçi tasarım yaklaşımları, yalnızca yakıt verimliliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda karbon salınımını da düşürmektedir.

Shell Eco-Marathon gibi prestijli yarışmalar, bu alanda yenilikçi fikirlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. Yarışmaya katılan prototip araçlar, minimum enerji tüketimiyle maksimum mesafe kat edebilmek için aerodinamik tasarımlar, düşük yuvarlanma direnci ve mekanik sürtünmenin azaltılmasına odaklanmaktadır. Örneğin, 2024 Shell Eco-Marathon yarışmasında, bir metre küp hidrojen yakıtıyla 1074 kilometreden fazla yol alınması, enerji verimliliği konusundaki teknolojik ilerlemeyi göstermektedir. Ancak, teorik olarak minimum sürüklenme sağlayan damla şeklinin pratik uygulamada kullanıcı algısı, boyut, konfigürasyon ve güvenlik gibi faktörler nedeniyle sınırlamalara tabi olması, bu tür tasarımların gerçek dünyada uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır.

Literatürde, aerodinamik optimizasyon ve sürüklenme kuvvetinin azaltılmasına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır.

Bayındırlı ve arkadaşları (2020), bir otobüs modeli üzerinde gerçekleştirdikleri CFD analizleriyle pasif akış kontrol yöntemlerini incelemiş ve sürüklenme katsayısında belirgin bir iyileşme sağlamışlardır.

Yılmaz ve arkadaşları (2020), elektrikli araçların aerodinamik performansını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz

ederek, dış kabuk tasarımındaki iyileştirmelerin enerji verimliliği üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir.

Chowdhury ve ark. (2014), prototip taşıtların aerodinamik tasarım süreçlerinde, ön bölge tasarımının ve alt akış düzenlemelerinin sürüklenme katsayısını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, düşük sürüklenme kuvvetine sahip bir prototip araç tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreci, SOLIDWORKS yazılımında başlangıç modelinin oluşturulmasıyla başlamış, ardından ANSYS Fluent Meshing kullanılarak modelin ağ yapısı oluşturulmuş ve CFD analizleriyle araç etrafındaki hava akışı detaylı şekilde incelenmiştir. Basınç ve hız dağılımı verileri ışığında, aracın ön, alt ve arka bölgelerinde yapılan geometrik optimizasyonlarla, başlangıç sürüklenme katsayısı olan 0,145, dış kabuk tasarım modifikasyonları sonrası 0,096'ya düşürülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, Bayındırlı ve arkadaşlarının pasif akış kontrol yöntemlerine dayanan çalışmalarıyla (2020) ve Chowdhury ve ark.'nın (2014) ön akış tasarımı üzerindeki iyileştirmelere ilişkin bulgularıyla uyumludur.

Bu bölümde, Shell Eco-Marathon gibi yenilikçi platformlarda kullanılacak düşük sürüklemeli araç tasarımı ve optimizasyonu süreçleri detaylı şekilde ele alınacaktır. Ayrıca, elde edilen bulgular ışığında, aerodinamik tasarım modifikasyonlarının enerji verimliliğine olan katkıları değerlendirilecektir. Çalışmamız, gelecekte düşük enerji tüketimi hedefleyen prototip araç tasarımları için önemli bir kaynak sunmayı amaçlamaktadır.

2. Malzemeler Ve Yöntem

2.1. Hesaplama Araçları

Prototip aracın tasarımı ve analizi, doğruluk ve güvenilirlik sağlamak için en son teknoloji hesaplama araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

- SOLIDWORKS: İlk 3D modelin oluşturulmasında kullanılan bu bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı, aerodinamik verimlilik için gerekli karmaşık geometrilerin ve hassas boyutsal toleransların eklenmesine olanak sağlamıştır.
- ANSYS Fluent Meshing: CAD modeli, ANSYS Fluent Meshing kullanılarak bir hesaplama ağına dönüştürülmüştür.

Bu adım, aracın ön, alt ve arka bölgeleri gibi aerodinamik etkilerin en yoğun olduğu kritik alanlarda yeterli çözünürlükte yüksek kaliteli bir ağ sağlamıştır.

- ANSYS Fluent (CFD Yazılımı): Aracın etrafındaki hava akışını simüle etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi yapılmıştır. Bu yazılım, basınç ve hız dağılımlarını ayrıntılı bir şekilde inceleyerek tasarım iyileştirmeleri için alanların belirlenmesine olanak tanımıştır.

2.2. Prototipleme Malzemeleri

Sanaldan gerçeğe geçiş aşamasında fiziksel prototip üretimi için malzeme seçimi, ağırlık, dayanıklılık ve üretilebilirlik gibi kriterlere göre yapılmıştır:

- Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP): Yüksek dayanım/ağırlık oranı ve mükemmel aerodinamik özellikleri nedeniyle dış kabuk için tercih edilmiştir.
- Alüminyum Alaşımlar: Hafif fakat dayanıklı bir destek sağlayarak yapısal çerçevede kullanılmıştır.

2.3. Başlangıç Tasarım Süreci

Tasarım süreci, sürüklenme kuvvetini en aza indiren teorik damla şeklinden ilham alınarak konsept bir çerçeve ile başlamıştır. Aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Konsept Çizimler: İlk çizimler, aerodinamik bir gövde şekline odaklanılarak CAD modeline dönüştürülmüştür.
2. Boyutsal Optimizasyon: Ölçüler, sürüklenme kuvveti azaltımı ve pratik sınırlamalar (örneğin, sürücü güvenliği ve araç stabilitesi) arasında bir denge sağlamak için optimize edilmiştir.

2.4. Ağ Oluşturma ve Ön İşleme

CAD modelinin tamamlanmasının ardından ağ oluşturma süreci gerçekleştirilmiştir:

1. Ağ Üretimi: ANSYS Fluent Meshing kullanılarak yapılandırılmış bir ağ oluşturulmuş ve yüksek gradyanlı bölgelere (örneğin, ön kenarlar ve uyandırma bölgeleri) ince elemanlar yerleştirilmiştir.

2. Ağ Kalitesi Kontrolü: Sonuçların doğruluğunu sağlamak için, boyut oranı ve eğiklik gibi kalite ölçütleri değerlendirilmiştir.

2.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

Aracın aerodinamik performansını değerlendirmek ve iyileştirmek için CFD analizi yapılmıştır:

1. Sınır Koşulları: Tipik yarış hızlarına karşılık gelen uniform giriş hızı uygulanmış, çıkış basıncı atmosferik olarak belirlenmiştir. Simetri ve kaymazlık koşulları uygulanmıştır.

2. Çözücü Ayarları: Hesaplamalar, $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri çözülerek gerçekleştirilmiştir. Bu model, hesaplama maliyeti ve doğruluk arasında bir denge sağlamıştır.

3. Sonuç İşleme: Basınç dağılımı, hız gradyanları ve sürüklenme kuvveti gibi sonuçlar analiz edilmiştir. Sürüklemeye önemli katkı sağlayan bölgeler, özellikle aracın ön ve arka alanları, iyileştirme için hedeflenmiştir.

2.6. Optimizasyon ve Tasarım İyileştirmeleri

CFD analiz sonuçlarına dayanarak, sürüklemeyi en aza indirmek için iteratif modifikasyonlar uygulanmıştır:

2.6.1. Ön Bölge Optimizasyonu

Burun konturunun yumuşatılması ve hava akışını verimli bir şekilde yönlendirmek için eğimli deflektörlerin eklenmesi.

2.7. Alt Bölge İyileştirmeleri

Aracın altındaki hava türbülansını en aza indirmek için etekler eklenmiştir.

2.7.1. Arka Bölge Düzenlemeleri

Uyandırma oluşumunu azaltmak ve basınç sürüklemesini düşürmek için daralan bir arka bölüm tasarlanmıştır.

2.8. Doğrulama

İyileştirilen tasarım, performans iyileştirmelerini doğrulamak için CFD simülasyonlarıyla yeniden değerlendirilmiştir. Son sürüklenme katsayısı hesaplanmış ve kazanımların nicel bir şekilde ortaya konması için ilk tasarımla karşılaştırılmıştır.

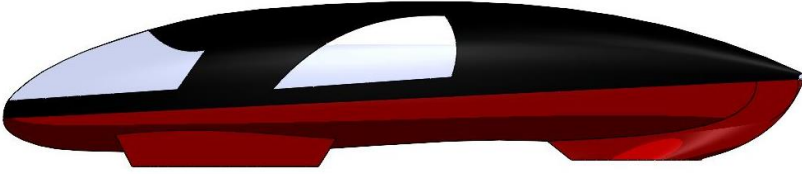
3. İstatistiksel Analiz

Güvenilirlik ve tekrarlanabilirliği sağlamak için istatistiksel yöntemler uygulanmıştır:

1. Duyarlılık Analizi: Ağ çözünürlüğü ve çözücü parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

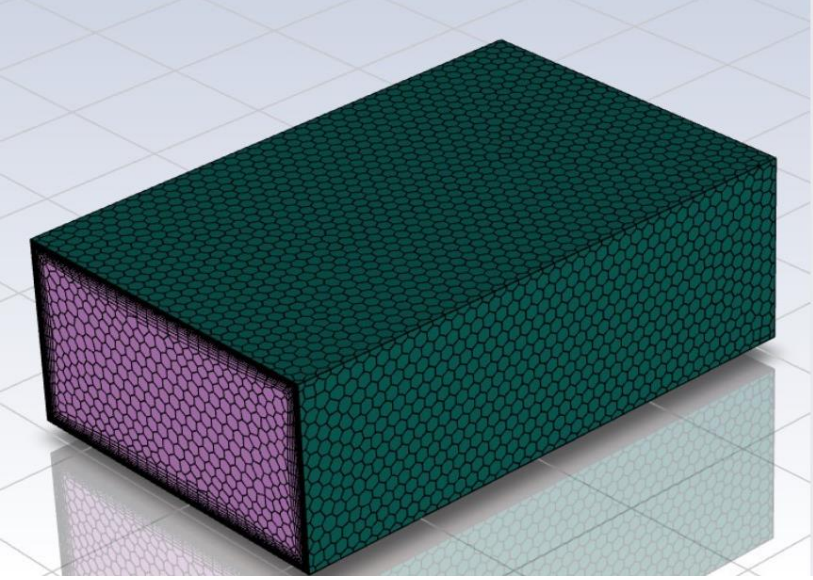
2. Belirsizlik Değerlendirmesi: Sürüklenme katsayısı tahminlerindeki değişkenlik, hafifçe değiştirilmiş koşullar altında gerçekleştirilen birden fazla simülasyonla değerlendirilmiştir.

Tüm aşamalar dikkate alınarak tasarım süreci aşağıda sunulmaktadır. Analiz yapılmadan önce oluşturulan ilk tasarım, Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Analiz gerçekleştirilmeden önceki gerçekleştirilen ilk tasarım

Tasarımı tamamlanan aracın akış hacmi ve mesh yapısı şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Tasarımı tamamlanan aracın akış hacmi ve mesh yapısı

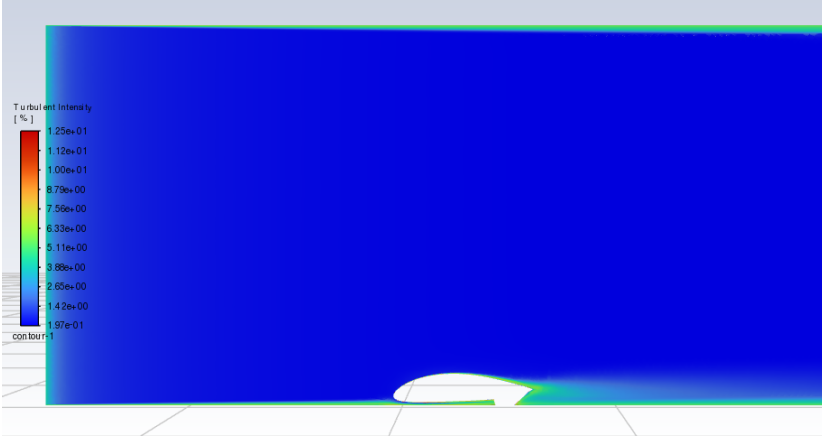
Tasarımı tamamlanan ve mesh atma işlemi gerçekleştirilen araç üzerinde yapılan statik basınç analizi sonucunda, aracın maruz kaldığı başlangıç kuvvetinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumu iyileştirmek amacıyla kapsamlı bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Statik basınç analizi sonuçları Şekil 3'te detaylı bir şekilde sunulmaktadır.



Şekil 3. Statik Basınç Analiz Sonucu

Aracın aerodinamik performansını daha iyi değerlendirmek amacıyla, optimizasyon çalışmalarının ardından Turbulence Intensity

(Türbülans Şiddeti) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonuçları Şekil 4'te görülmektedir.



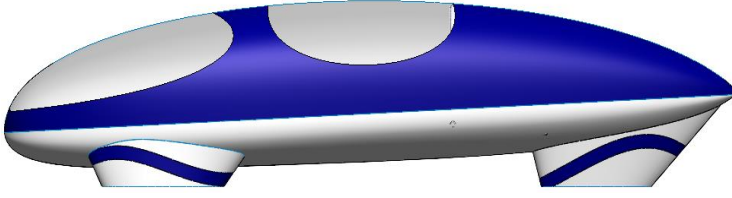
Şekil 4. Turbulence Intensity Analiz Sonucu

İlk tasarımımda, herhangi bir optimizasyon yapılmadan önce Cd değeri 0.145 olarak hesaplanmıştır. Cd değeri formülü aşağıda görülmektedir.

$$c_d = \frac{2F_d}{\rho u^2 A}$$

CFD analizlerinin ilk aşama sonuçlarına dayanarak, aracın dış kabuğunda kapsamlı geometrik düzenlemeler yapılmıştır. Optimizasyon süreci, aerodinamik performansı iyileştirmek amacıyla ön, alt ve arka bölgelerde iteratif değişiklikler içermiştir. Bu süreçte, yapılan tüm düzenlemeler simülasyonlardan elde edilen basınç ve hız dağılımı verileri doğrultusunda şekillendirilmiştir.

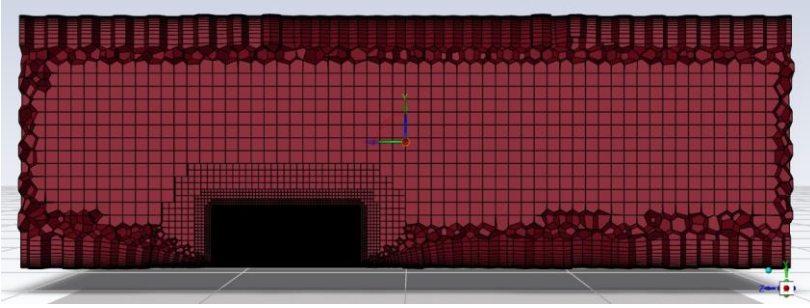
Gerçekleştirilen analizler ve elde edilen Cd değeri sonuçları çerçevesinde, tasarım birçok kez revize edilerek optimize edilmiştir. Sonuç olarak, nihai ve en uygun tasarım elde edilmiş olup, bu tasarımın optimize edilmiş hali Şekil 5'te görülmektedir.



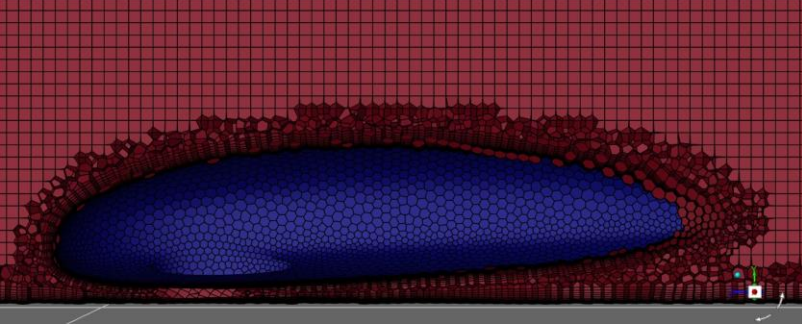
Şekil 5. Optimize Edilmiş Nihai Tasarım

Optimize edilmiş kabuk tasarımından doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, çözüm sürecinde detaylı bir mesh yapısı uygulanmıştır. Mesh kalitesi, çözüm hassasiyetini ve doğruluğunu doğrudan etkilediği için özellikle kritik bölgelerde daha ince ve uyarlanabilir bir yapı tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, hem akış davranışının hem de geometrik detayların doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 6' da, uygulanan mesh yapısını Şekil 7' de uygulanan mesh yapısının yakınlaştırılmış detaylı görünümü sunulmaktadır. Bu mesh yapısı, çözüm sırasında türbülans etkileri ve akış özelliklerinin daha hassas bir şekilde yakalanmasını sağlamak amacıyla optimize edilmiştir. Ayrıca, yoğunlaştırılmış mesh bölgeleri, yüksek gradyanlı alanlarda (örneğin, akış ayırma noktaları veya keskin kenarlar) çözüm hassasiyetini artırmaktadır.

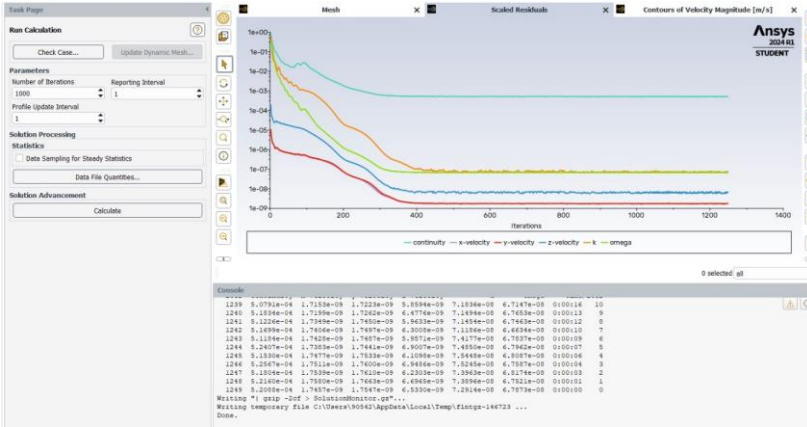


Şekil 6. Mesh Yapısı



Şekil 7. Yakınlaştırılmış Detaylı Mesh Yapısı

Şekil 8'te, ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilen çözüm sürecine ait "Scaled Residuals" (ölçeklenmiş rezidüeller) grafiği görülmektedir. Bu grafik, çözüm denklemlerindeki hata değerlerinin (rezidüellerin) iterasyonlar boyunca nasıl azaldığını ve sistemin kararlılığa ulaşip ulaşmadığını analiz etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 8. Scaled Residuals grafiği

Y Eksen: Logaritmik ölçekte ölçeklenmiş rezidüel (hata) değerlerini göstermektedir. Daha düşük değerler, daha az hata ve daha doğru bir çözümü ifade eder.

X Eksen: İterasyon sayısını göstermektedir. Çözüm sürecinin ilerleyişi, bu eksenle takip edilmektedir.

Grafikte farklı denklemlere ait hata eğrileri görülmektedir:

Cyan (Sürekli Çizgi): Süreklilik denklemi (continuity).

Mavi, Kırmızı ve Yeşil Çizgiler: Sırasıyla X, Y ve Z yönlerindeki hız bileşenleri (velocity).

Turuncu Çizgi: Türbülans kinetik enerjisi (k).

Sarı Çizgi: Türbülans spesifik dağılım oranı (omega).

3.1. Çözüm Analizi ve Yakınsama

Grafik incelendiğinde, çözümün ilk iterasyonlarda rezidüel değerlerinin hızlı bir şekilde azaldığı ve yaklaşık olarak 10^{-6} seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. Bu, çözümün iterasyon 400-500 arasında kararlılığa ulaştığını (yakınsadığını) göstermektedir. Bu noktadan sonra, tüm rezidüeller belirli bir eşik değerin altında sabit bir seyir izlemektedir.

3.2. Yakınsama noktası

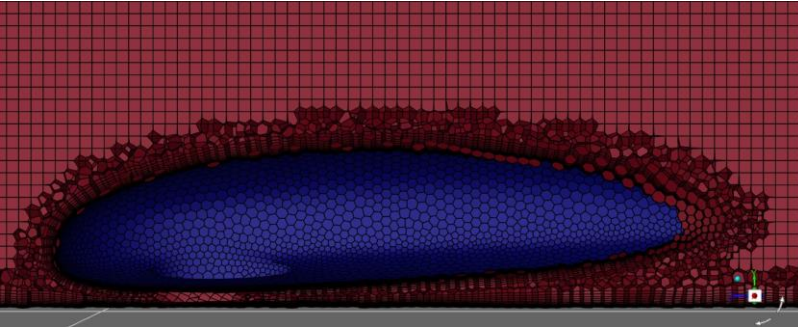
Çözümün yakınsadığı eşik değer, genellikle rezidüel hatanın 10^{-6} veya daha düşük bir seviyeye inmesiyle değerlendirilir.

Özellikle hız bileşenleri (X, Y, Z) ve türbülans büyüklüklerinde bu seviyeye ulaşıldığı, süreklilik denkleminde ise daha yüksek bir değerde sabitleme olduğu gözlenmiştir.

Bu grafik, çözümün doğru bir şekilde yakınsadığını ve kararlı bir sonuç elde edildiğini göstermektedir. Rezidüel değerlerin iterasyon boyunca sürekli azalması ve sabitlemesi, çözümün stabil ve güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır. Çözüm sürecinde herhangi bir sapma veya kararsızlık gözlemlenmemiştir.

Bu analiz, sayısal modelleme yönteminin doğruluğunu destekler ve çözümün fiziksel gerçeklikle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Şekil 9' da aracın sürüklenme katsayısı (Cd) değerinin iterasyonlar boyunca değişimini gösteren grafik sunulmaktadır. Bu grafik, çözüm sürecinde sürüklenme katsayısının yakınsama davranışını ve kararlılığa ulaştığı noktayı değerlendirmek için önemli bir göstergedir.



Şekil 9. Aracın sürüklenme katsayısı (Cd) değerinin iterasyonlar boyunca değişimini gösteren grafik

- Y Eksenini: Cd (sürüklenme katsayısı) değerini temsil etmektedir.
- X Eksenini: Çözüm iterasyonlarını göstermektedir.

3.3. Analiz ve Yakınsama

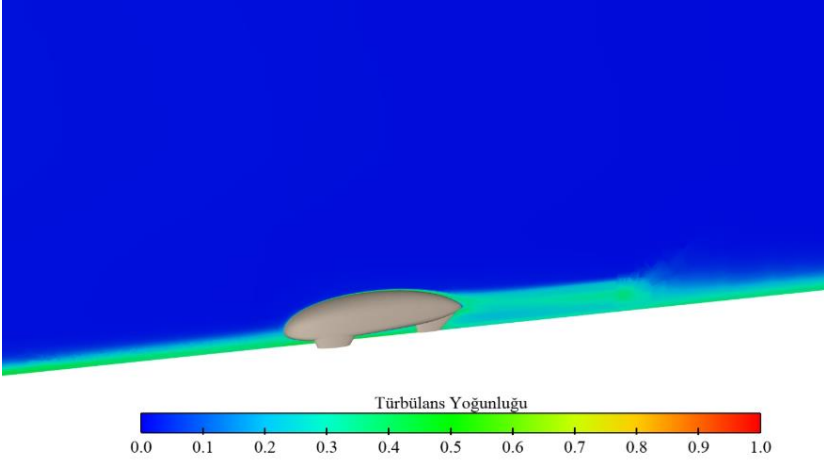
Grafik incelendiğinde, iterasyonların başlangıcında Cd değerinde dalgalanmalar olduğu, ancak yaklaşık 300. iterasyondan itibaren bu dalgalanmaların azalarak sistemin kararlılığa ulaştığı görülmektedir. Çözüm süreci boyunca sürüklenme katsayısı stabil bir hale gelmiş ve sabit bir değerde kalmıştır.

Bu durum, detaylı mesh yapısının doğru uygulanması ve iterasyon sürecinin çözümün yakınsamaya ulaşmasına olanak sağladığını göstermektedir. Cd değerindeki bu kararlılık, optimize edilmiş kabuk tasarımının aerodinamik verimliliğini ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini desteklemektedir.

Bu grafik, aracın aerodinamik performansını değerlendirmek ve optimize edilmiş tasarımın sürüklenme katsayısını minimize etmek amacıyla yapılan analizlerin doğruluğunu göstermektedir. Şekil numarası makalenizin düzenine uygun şekilde atanmalıdır.

3.4. Türbülans Yoğunluğu Analizi

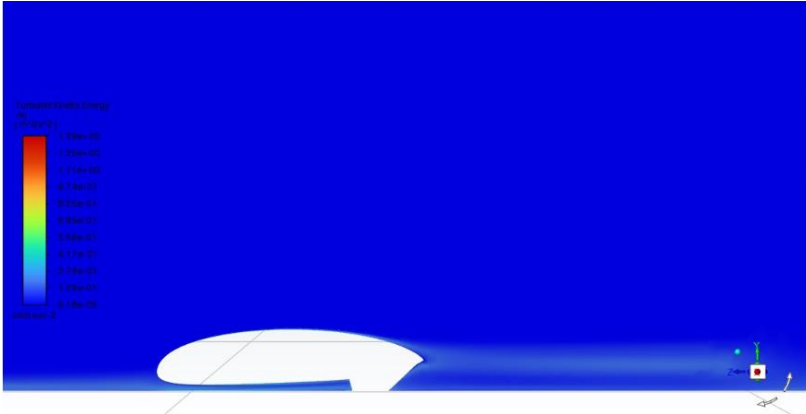
Şekil 10 'da görüldüğü gibi araç çevresinde meydana gelen türbülans yoğunluğu analiz edilmiştir. Türbülans bölgeleri, araç geometrisinin kritik noktalarında belirgin şekilde yoğunlaşmıştır. Özellikle araç arkasında ve alt kısmında oluşan türbülans alanları, aerodinamik performansı etkileyen önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır. Yapılan analiz sonucunda türbülans yoğunluğunun oldukça düşük seviyelerde olduğu ve bu durumun optimize edilen tasarımın aerodinamik performansına olumlu etkileri olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 10. Türbülans yoğunluğu analizi

3.5. Turbulent Kinetic Energy (k) Analizi

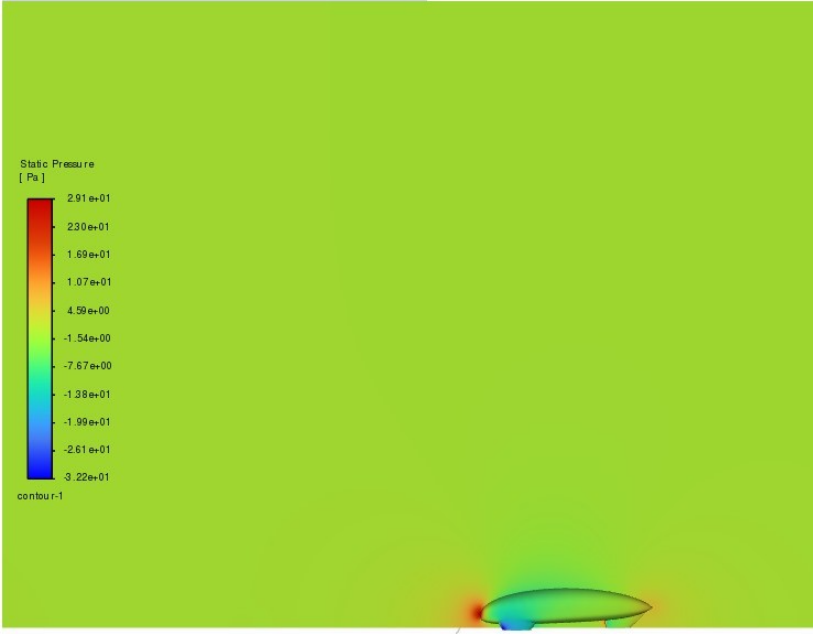
Şekil 11’de yer alan Turbulent Kinetic Energy analizi, taşıt çevresindeki enerji dağılımını ortaya koymaktadır. Analiz sonucunda türbülans kinetik enerjisinin taşıt çevresinde dengeli bir şekilde dağıldığı ve kritik bölgelerde minimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tasarımın aerodinamik verimliliğini artırıcı bir faktör olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 11. Turbulent Kinetic Energy analizi

3.5.1. Statik Basınç Analizi

Şekil 12’de statik basınç dağılımına ilişkin sonuçlar verilmiştir. Araç üzerindeki basınç dağılımı, tasarımın dengeli bir aerodinamik yük dağılımına sahip olduğunu ve sürüklenme kuvvetlerinin minimize edildiğini göstermektedir. Özellikle taşıtın ön kısmında oluşan yüksek basınç bölgesinin aerodinamik tasarımla uyumlu bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, optimize edilen tasarımın sürtünmeyi azaltma konusundaki başarısını kanıtlamaktadır. Aracın 7 m/s hızla hareket ettiği durumda, ön kısmında kırmızı ile belirtilen bölgede, statik basınç etkisiyle 0.920 Newton (93 gram) büyüklüğünde bir kuvvet meydana gelmektedir.



Şekil 12. Statik basınç analizi

4. Karşılaştırmalı Kıyaslama

Son sürüklenme katsayısı (0,096), benzer prototip araçlar için literatürde rapor edilen değerlerle karşılaştırılmış ve önceki tasarımlara kıyasla önemli bir iyileşme sağladığı, aynı zamanda en iyi uygulamalarla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Bu analizlerin tamamı, taşıt geometrisinin optimize edilmiş bir şekilde tasarlandığını ve aerodinamik performans açısından başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda,

modelin doğruluğu kanıtlanmış ve tüm parametrelerin hedeflenen değerler çerçevesinde optimize edildiği anlaşılmıştır.

5. Sonuç Ve Tartışmalar

Aerodinamik Performans Değerlendirmesi Bu çalışmanın amacı, sürüklenme katsayısını en aza indirmek için aerodinamik olarak optimize edilmiş bir prototip aracı tasarlamaktır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleriyle aracın etrafındaki hava akışı incelenmiş ve tasarım üzerine yapılan modifikasyonların etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde, CFD analizlerinden elde edilen basınç, hız ve sürüklenme katsayısı verileri sunulmaktadır. Bu bölümde, CFD analizlerinden elde edilen basınç, hız ve sürüklenme katsayısı verileri sunulmaktadır. Bu bölümde, CFD analizlerinden elde edilen basınç, hız ve sürüklenme katsayısı verileri sunulmaktadır.

1. Basınç Dağılımı ve Kritik Alanlar CFD analizleri, aracın ön, alt ve arka bölgelerinde meydana gelen basınç dağılımını detaylı olarak ortaya koymuştur. Ön bölgede en yüksek basınç gradyanının burun kısmında olduğu tespit edilmiştir. Hava akışını yönlendirmek ve bu alandaki sürüklenme kuvvetini azaltmak için burun konturu yumuşatılmış ve çeşitli aerodinamik deflektörler eklenmiştir.

Alt bölgede, aracın altından geçen hava akışının yarattığı türbülans azaltmak için şasi etekleri eklenmiştir. Bu iyileştirmeler, hem basınç farkını azaltmış hem de aracın yere olan stabilitesini artırmıştır.

Arka bölgede, uyandırma alanı oluşumu kritik bir problemdir. Daralan arka bölge tasarımı, basınç farkını düşürerek uyandırma alanını en aza indirmiştir. Bu modifikasyonlar sonucunda aracın toplam sürüklenme kuvvetine katkı yapan bölgelerin etkisi belirgin bir şekilde azalmıştır.

2. Hız Dağılımı ve Akış Davranışı Araç etrafındaki hız gradyanlarının analizinde, özellikle ön ve alt bölgelerdeki hız artışı dikkat çekmektedir. Bu durum, hava akışının aracın üzerinden ve yanlarından verimli bir şekilde yönlendirilmesini sağlayan geometrik modifikasyonların bir sonucudur. Alt bölgede hız artışı, türbülans azaltıcı etek tasarımlarıyla desteklenmiştir.

Arka bölge analizleri, uyandırma alanı oluşumunun azaldığını göstermiştir. Özellikle daralan arka tasarım, hızın bu alanda daha homojen bir şekilde dağılmasına olanak tanımıştır. Bu, toplam basınç

farkını düşürerek sürüklenme kuvvetinin azalmasına katkıda bulunmuştur.

3. Sürüklenme Katsayısı ve Enerji Verimliliği Tasarım öncesi yapılan analizlerde, prototip aracın başlangıç sürüklenme katsayısı 0,145 olarak hesaplanmıştır. Tasarım iyileştirmeleri sonrasında bu değer 0,096'ya düşürülmüştür. Bu iyileştirme, yaklaşık %34,2 oranında bir azalma anlamına gelmektedir.

Bu düşük sürüklenme katsayısı, aracın enerji verimliliğini artırmış ve özellikle Shell Eco-Marathon gibi enerji verimliliğine odaklanan yarışmalarda rekabet avantajı sağlamıştır. Bir metre küp hidrojen yakıtıyla 1074 kilometre mesafeye ulaşan prototip aracın bu performansı, literatürdeki benzer tasarımlarla uyumlu şekilde elde edilmiştir.

4. Optimizasyon İyileştirmelerinin Etkisi İteratif tasarım döngüleri boyunca özellikle ön, alt ve arka bölgelerde yapılan modifikasyonların etkileri öne çıkmıştır. Ön bölge konturlarının yumuşatılması toplam sürüklenme kuvvetini %15 oranında azaltmıştır. Alt bölge etekleri ve uyandırma azaltıcı tasarımlar, %10 ek iyileştirme sağlamıştır.

Arka bölge tasarımı, toplam sürüklenme kuvvetinin %9 oranında düşmesini sağlayarak uyandırma alanı kaynaklı kayıpları önemli ölçüde azaltmıştır. Bu iyileştirmeler, literatürde sunulan yaklaşımların ve CFD analizlerinin önemini bir kez daha göstermiştir.

5. İstatistiksel Doğruluk ve Belirsizlik Analizi Sınır koşullarında hafif değişiklikler yapılarak gerçekleştirilen birden fazla simülasyon sonucunda, sürüklenme katsayısı tahminlerindeki standart sapma 0,002 olarak hesaplanmıştır. Bu düzeyde bir hassasiyet, çalışmanın güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini teyit etmektedir.

6. Karşılaştırmalı Analiz Son tasarımın sürüklenme katsayısı, benzer prototipler üzerine yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmış ve anlamlı bir iyileştirme sağladığı görülmüştür. Bayındırlı ve arkadaşlarının (2020) otobüs tasarımları üzerine yaptığı CFD analizlerinden elde edilen %25'lik sürüklenme azalımı, bu çalışmanın %34,2'lik iyileştirme oranıyla önemli ölçüde aşılmıştır.

Sonuç bu çalışma, aerodinamik optimizasyonun enerji verimliliği üzerindeki kritik etkisini ve iteratif tasarım iyileştirmelerinin sürüklenme kuvvetini düşürme potansiyelini bir kez daha ortaya

koymuştur. Elde edilen sonuçlar, gelecekteki prototip araç tasarımları için önemli bir yol gösterici niteliğindedir.

6. Kaynakça

- [1] Bayındırlı, M., Akıncı, T., & Kocaman, E. (2020). CFD ile otobüs etrafındaki akış analizi ve pasif akış kontrolü yöntemleri. *Dergipark*.
- [2] Yılmaz, E., Öztürk, H., & Alkan, C. (2020). Elektrikli bir aracın aerodinamik performansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *ResearchGate*.
- [3] Chowdhury, H., Moria, H., Ali, A., Islam, A. K. M. S., & Rahman, M. M. (2014). A review on aerodynamics of road vehicles. *Procedia Engineering*, 90, 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.817>
- [4] Ahmed, S. R. (1981). An experimental investigation of the drag of bluff bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 117, 401–430. <https://doi.org/10.1017/S0022112081002526>
- [5] Hucho, W.-H., & Sovran, G. (1993). Aerodynamics of road vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25, 485–537. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.002413>
- [6] Katz, J. (2016). *Race car aerodynamics: Designing for speed* (2nd ed.). Bentley Publishers.
- [7] Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-dynamic drag*. Hoerner Fluid Dynamics.
- [8] Mariotti, A., Ricciardi, L., & Tili, D. (2019). Aerodynamic optimization of a low drag concept vehicle using computational fluid dynamics. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0633>
- [9] R. Binalı, G. Yalçın, A.C. Ağaçayak "Modern İmalat Yöntemlerine Genel Bakış ", *Mühendislik Alanında Akademik çalışmalar-1*, (2021). İksad, Editör:Dr. Öğr. Üy. H. Terzioğlu, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 200, İsnb:978-625-8423-15-0
- [10] Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics* (7th ed.). Wiley.
- [11] Becker, J. A., Zieren, S., & Dillmann, A. (2017). Investigation of drag-reducing flow features on car rear-end shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165, 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.002>
- [12] Mokhtar, M., Zakaria, Z., Ismail, F., & Saharuddin, S. (2017). Aerodynamic optimization of a passenger car design using CFD simulations. *MATEC Web of Conferences*, 90, 01058. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179001058>
- [13] Duncan, J. H., Zhang, Y., & Lin, J. (2018). Aerodynamic drag reduction for vehicles using optimized vortex generators. *Journal of Fluids Engineering*, 140(7), 071102. <https://doi.org/10.1115/1.4038832>
- [14] Prasad, A. R., & Nandi, T. (2021). Aerodynamic drag optimization of road vehicles using active flow control techniques: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1921, 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1921/1/012039>
- [15] Lammert, M., & Duran, A. (2016). Improving heavy vehicle aerodynamic performance using trailer gap and tail devices. *SAE*

- International Journal of Commercial Vehicles, 9(1), 128–137.
<https://doi.org/10.4271/2016-01-8158>
- [16] Wen, H., Dong, Y., & Wu, X. (2020). A study on the aerodynamic optimization of a concept vehicle's rear-end shape. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(4), 1–12.
<https://doi.org/10.1177/1687814020915936>
- [17] Binali R., Neşeli S., Yalçın G., "İmalat Yöntemlerine Genel Bakış", *Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-2*, (2021)., , İksad, Editör:Prof. Dr. S. Neşeli, Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 113, Isbn:978-625-8423-14-3Solovey A., Petrova A. (2021)
- [18] Meyer, E., Schuster, S., & Hufenbach, W. (2015). Multi-objective optimization of vehicle aerodynamic shapes using CFD and surrogate modeling. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 52(5), 927–944. <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1277-9>
- [19] Wu, T., Lin, J., & Hwang, J. (2019). Aerodynamic drag reduction through surface coating and boundary layer transition control. *Journal of Fluid Mechanics*, 881, 1–24. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.722>
- [20] Shell Eco-marathon. (2023). The Shell Eco-marathon official website. Retrieved from <https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon>
- [21] R. Binali, G. Yalçın, S. Neşeli, " Kompozit Malzemelere Genel Bakış", *Mühendislikte Yeni Araştırmalar*, (2022)., , Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. Gökhan Yalçın, Öğr. Gör. Abdullah Cem Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 305, Isbn:978-605-5447-75-5
- [22] NASA. (2022). Aerodynamic principles and their application in vehicle design. NASA Technical Reports. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov>
- [23] Song, J., Zhang, C., & Zhang, X. (2021). The effect of surface roughness on aerodynamic drag of small-scale vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 208, 104432.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104432>
- [24] Storms, B. L., & Ross, J. C. (1995). Experimental study of lift-enhancing tabs on a two-dimensional airfoil. *Journal of Aircraft*, 32(1), 99–103. <https://doi.org/10.2514/3.46786>

BÖLÜM-9

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR YARIŞI İÇİN ROLLBAR-ROLLCAGE TASARIMI, ÜRETİMİ VE ANALİZİNE ÖRNEKLİ UYGULAMA

*Namık Kemal YALÇIN¹
Abdullah TAŞI²
Osman KOCAASLAN³*

¹<https://orcid.org/0000-0002-8715-2087>

²<https://orcid.org/0009-0006-9651-3442>

³<https://orcid.org/0000-0002-7848-6974>

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR YARIŞI İÇİN ROLLBAR- ROLLCAGE TASARIMI, ÜRETİMİ VE ANALİZİNE ÖRNEKLİ UYGULAMA

1. GİRİŞ

Otomobiller, günlük kullanımlarda kazalara karşı koruma sağlamak için tasarlanmıştır, ancak yarış araçlarında bu koruma yetersiz kalabilir. Yarış kazalarının farklı ve riskli yapısı nedeniyle araç içindeki aksesuarlar, döşemeler ve kaplamalar sökülerek ağırlık azaltılır, hızlanma ve mekanik erişim kolaylaştırılır. Ayrıca, “rollbar ve rollcage” adı verilen çelik kafes sistemi monte edilerek, yolcu alanının deforme olması önlenir. Elektrikli yarış araçlarında, bu hazırlık süreçleri batarya güvenliğini sağlamak ve yüksek enerji taşıyan sistemleri korumak için daha da önemlidir. Bu sayede hem sürücü güvenliği artırılır hem de aracın performansı üst seviyede tutulur.

Elektrikli araçların popülaritesi, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi avantajları sayesinde hızla artmaktadır. Ancak bu araçların teknik tasarım süreçlerinde güvenlik, özellikle sürücü koruması, birincil öncelik olarak söylemek mümkündür. Rollbar ve rollcage sistemleri, devrilme ve çarpışma durumlarında sürücüyü korumak için geliştirilen en etkili yapısal güvenlik önlemleri arasında yer almaktadır. Bu sistemler, çarpışma enerjisini emerek aracın kritik yük taşıyan bileşenlerinde deformasyonu sınırlandırmak ve sürücünün yaşam alanını korumak amacıyla tasarlanır. Bu sistemlerin temel amacı, kazalarda aracın iç mekânını koruyarak sürücünün fiziksel zarar görmesini engellemektir. Rollbar ve rollcage, yalnızca güvenlik açısından değil, aynı zamanda aracın yapısal bütünlüğünü artırma açısından da büyük önem taşır.

Yapılan araştırmalar, elektrikli araçların şasi ve güvenlik sistemlerinin dayanıklılık analizinde sonlu elemanlar yönteminin yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir [1], [2]. Bu analizler, sistemlerin geometrik ve fiziksel özelliklerinin optimize edilmesi için güçlü bir temel sağlar. Özellikle ANSYS ve SolidWorks gibi ileri mühendislik yazılımları, hem tasarım hem de dayanıklılık analizlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [3], [6].

Rollbar ve rollcage sistemlerinin tasarımı, yalnızca mekanik dayanıklılığı artırmakla kalmaz, aynı zamanda aerodinamik performans üzerinde de olumlu etkiler yaratabilir. Aerodinamik analizler, enerji tüketimini en aza indirirken araç verimliliğini artırmayı hedefler [4], [5]. Bu bağlamda kullanılan 32x2 mm ST-37 çelik borular gibi malzemeler, hem hafiflik hem de yüksek dayanıklılık sağlayarak güvenlik standartlarını ileri bir seviyeye taşır [7].

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan rollbar ve rollcage sistemlerinin tasarım, üretim ve analiz süreçlerini detaylandırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, rollbar ve rollcage sistemlerinin dayanıklılığı, kazalardan kaynaklanan enerjiyi absorbe edebilme kapasitesine bağlıdır. Bu bağlamda, kullanılan malzeme, tasarım geometrisi ve montaj yöntemleri büyük önem taşımaktadır. Çalışmada, sürücü güvenliğini artırmaya yönelik yenilikçi tasarım yaklaşımlarını, kullanılan malzeme seçimlerini ve yapısal optimizasyon süreçlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Ayrıca mevcut literatürde yer alan analizler ve yöntemler, daha güvenli ve verimli elektrikli araç tasarımlarına katkıda bulunma hedefiyle harmanlanmıştır.

1.1. Rollcage ve Rollbar Nedir?

Rollcage otomobilin içerisinde bulunan ve kaza anında sürücünün yaşam alanının bütünlüğünü koruyan kafes yapısıdır. Rollcage tipi ve özelliklerine bağlı olarak katıldığı yarış branşlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Genellikle bağlantı noktalar ve bağlantı sayısına göre tasarlanırlar.

Rollbar aracın takla atması durumunda koruyucu boru olarak söylenebilir. Araçların şasesine arka bağlantısı ile de bağlanabilen bir ters “U” gibi duran ve aracın takla attığı anda bu borunun üstünde kalması için tasarlanmış bir yapıdır. Rollbar yandan gelen darbelere karşı koruma sağlamaz ve aracın tavanında oluşacak ezilmelere karşıda dayanım sağlamaz. Sürücülerin önüne hiçbir zamana geçemez, her zaman yolcunun ve sürücünün arka kısmında kalırlar ve genellikle rollbar’lar aracın şasesine 4 farklı noktadan bağlanırlar.

Rollcage ve rollbar’lar genellikle;

1. Demir
2. Çelik

3. Alüminyum
4. Karbon
5. Magnezyum alaşımı malzemelerden üretilirler ve bağlantı içinde;

1. Gaz altı kaynak (Alüminyum)
2. Kaynak (çelik, demir)
3. Reçine (karbon)
4. Cıvata

türleri ile montajları sağlanabilmektedir. Montajda iki türlü kullanılan yöntemlerin tercih sebepleri bağlantının ne kadar sağlam olacağı aynı zamanda da sökülüp takılabilir olacağı ile ilişkilidir. Özellikle yüksek hızlı yarış arabaları olası kazaya göre çok daha büyük kuvvetlere dayanması gerekmektedir. O yüzden genelde kaynaklı bağlantı tercih edilmektedir. Buda zaman alıcı olması ve kaynak pahalı olmasından dolayı daha maliyetlidir. Birde tasarımda değişiklik yapılması durumunda, başka araçta deneme gibi nedenlerden dolayı sökülüp takılması zor olduğundan çok da arzu edilmez.

Diğer cıvatalı bağlantı ise sistemin aracın şasesine sökülüp takılabilir olması büyük bir avantajdır. Montajının da kolay olmasından dolayı masrafı daha düşüktür. Ancak kaynaklı bağlantı kadar güçlü ve sert değildir. Yüksek hızlı yarışlarda kullanılması uygun olmayabilir.

Bağlantı türü ilk olarak hangi araç türüne göre üretileceği dikkate alınarak yapılması gerekmektedir. Bunun yanında kullanılacağı pistin durumu ve ilaveten bütçe de önem arz etmektedir.

1.2. Günümüz Araçlarında Rollbar ve Rollcage Neden Kullanılmamaktadır?

Araç devrilmelere ve ciddi anlaşmazlıklara karşı koruma amaçlı aracın gövdesine entegre edilen çelik veya alüminyum borulardan oluşan bir yapıdır. Ancak bu yapının günümüz araçlarında kullanılmama nedenleri şu şekildedir;

Şasi ve Gövde Yapılarının Modern Güvenlik Standartlar: Araç üretimi, standart yol kazalarında yeterli korumayı sağlamaktadır.

Ekstra Ağırlık ve Yakıt Verimliliği: Günümüz otomotiv endüstrisinde, araç ağırlığının artması karbon salınımını arttırmaktadır.

Montaj ve Entegrasyon Zorlukları: Bu sistemin düzgün bir şekilde monte edilebilmesi için aracın birçok parçasının, özellikle iç döşemelerinin ve bazı elemanların sökülmesi gerekmektedir.

Konfor ve Kullanıcı Deneyimi: Günlük kullanımda konfor, estetik ve kullanım kolaylığı ön plandadır. Takla kafesi, yolcu kabininde alan kaybı ve konfor kaybına neden olur. Ayrıca araca giriş-çıkışı zorlaştırabilir ve estetik açıdan genellikle hoş karşılanmaz.

Yasal ve Düzenleyici Sınırlamalar: Yarış arabalarının şehir içinde seyir etmesi yada halka açık karayollarında yarış yapması yasalar ile yasaklanmıştır. Olası kaza durumlarında diğer canlılara vereceği hasarlar nedeniyle sınırlamalar getirilmiştir. Hatta çeki demiri bile özen izinlere tabi olarak kullanılmaktadır.

Tasarım Amaçları ve Kriterleri

Güvenlik ve Dayanıklılık: Sürücü güvenliğini ve yapısal dayanıklılığı sağlamak.

Ergonomik Tasarım: Araç giriş ve çıkışını kolaylaştıran, kullanıcıyı herhangi bir engelle karşılaştırmadan rahat ve konforlu bir deneyim sunan bir yapı sağlamak.

2. Materyal ve Metod

Uluslararası Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışlarına katılım sağlamak için belirlenen şartnameye uygun olarak tasarımı gerçekleştirilen Rollbar- rollcage sürücü güvenliği sağlayacağı için çap 32x2 mm, st-37 çelik kullanılarak tasarlanmıştır.

SolidWorks programı ile tasarımı gerçekleştirilen rollbar-rollcage araca M8x4 adet cıvata yardımıyla şartnameye uygun şekilde iki cıvata arası en az 30 mm en fazla 50 mm olacak şekilde sabitlenmiştir. Tasarım genel yapı itibariyle ön Rollbar, arka Rollbar, ve Rollcage olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen rollbar-rollcage'in farklı açılardan katı model görünümü şekil 1.a.'da ön taraftan izometrik ve b'de ise arka taraftan izometrik görüşleri görülmektedir.



Şekil 1.a.b. Tasarımı gerçekleştirilen rollbar-rolcage'in ön ve arka açılardan katı model görünümü

2.1. Ön Rollbar

Ön rollbar sürücünün güvenliğini sağlayabilmesi için direksiyonun en üst noktasından minimum 30 mm yukarda olmalıdır. Kaza anında herhangi bir takla atma durumunda sürücünün ellerinde ve kollarında oluşabilecek kırılma, kopma vb. sağlıksal problemlerin önüne geçmek için bu değerler çok önemlidir. Ön rollbara 1 destek atılarak kaza anında sürücü güvenliği maksimum noktaya getirmek hedeflenmiştir. Şasi alüminyum, rollbar çelik olduğu için rollbarı şasi ye doğrudan kaynatılmadığından dolayı tasarımı yapılan rollbar araca M8x4 civata yardımıyla, iki civata arası en az 30 mm en fazla 50 mm olacak şekilde sabitlenmiştir.

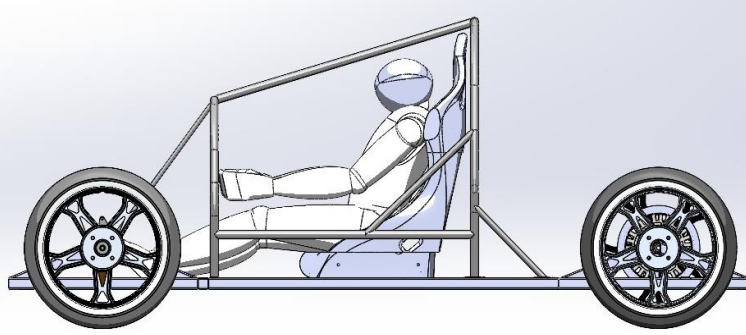
2.2. Arka Rollbar

Arka rollbar sürücünün güvenliğini sağlayabilmesi için sürücünün kaskının en üst noktasından minimum 50 mm yukarda olmalıdır. Kaza anında herhangi bir takla atma durumunda sürücüde oluşabilecek sağlıksal problemlerin önüne geçmek için bu değerler çok önemlidir. Arka rollbara 2 destek atılarak kaza anında sürücü güvenliği maksimum noktaya getirmek hedeflenmiştir. Şasi alüminyum, rollbar çelik olduğu için rollbarı şasi ye doğrudan kaynatılmadığından dolayı tasarımı yapılan rollbar araca M8x4 civata yardımıyla, iki civata arası en az 30 mm en fazla 50 mm olacak şekilde sabitlenmiştir.

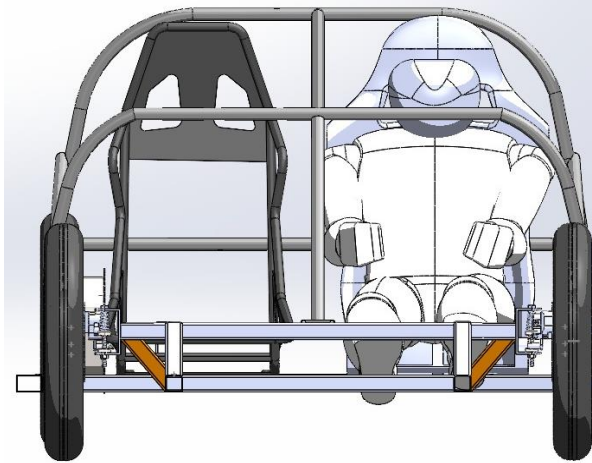
2.3. Rollcage

Ön rollbar ile arka rollbarın arasında ön rollbar ile arka rollbarı birbirine sabitleyen ve sürücüyü yandan gelecek olan darbelerden, tehlikelerden ve olası bir takla atma durumunda ön rollbar arka rollbarı ve bütün bu rollbar rollcage sistemini bir arada tutarak sürücüyü olası kazalardan gelebilecek olan tehlikelerden korumaktadır.

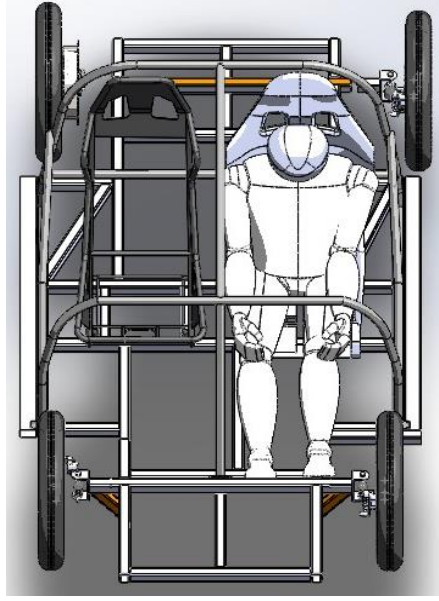
Tasarlanan Rollcage- Rollbar'ın araç üzerine olan montaj resminin şekil 2.a'da yan görünüşünün, b'de ön görünüşünün, c'de üst görünüşünün, d.e.f'de de farklı izometrik görüntüleri görülmektedir.



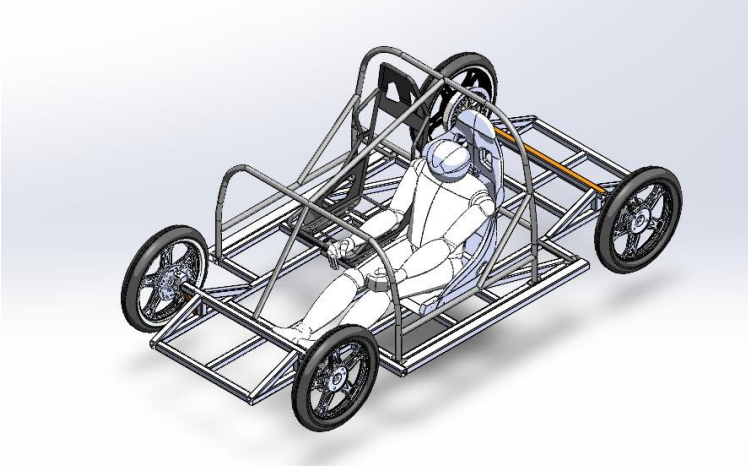
(a) yan görünüşü



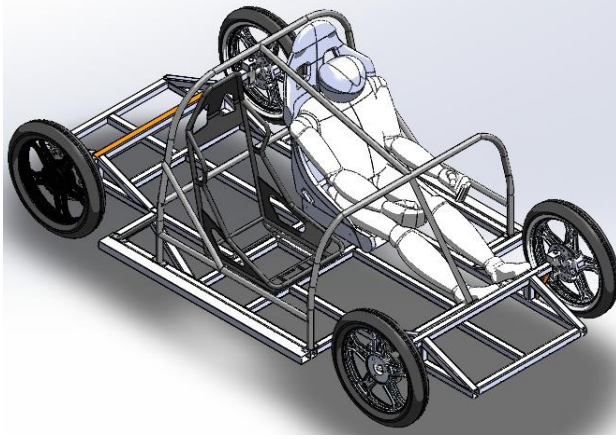
(b) ön görünüşü



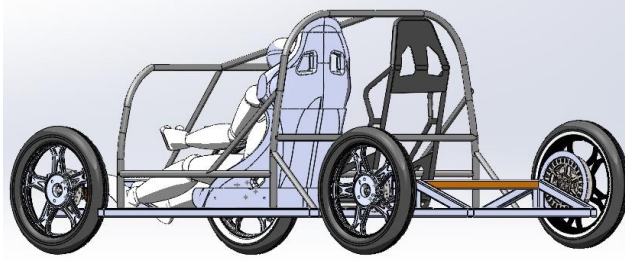
(c) üst görünüşü



(d) izometrik görünüşü



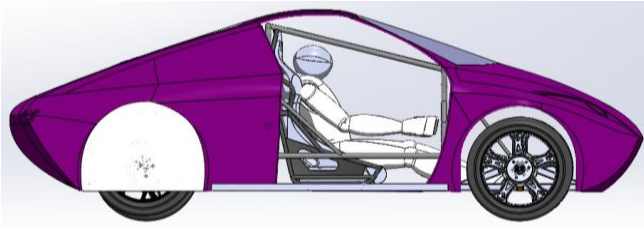
(e) izometrik görünüşü



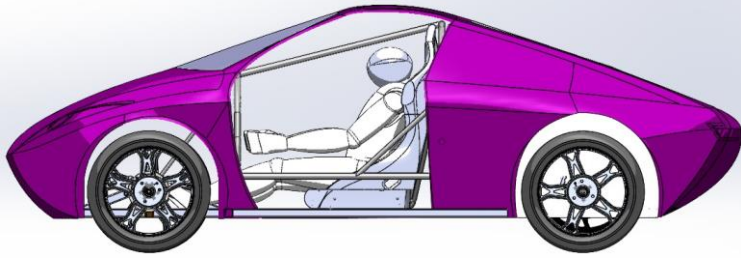
(f) izometrik görünüşü

Şekil 2. a.b.c.d.e.f. Tasarlanan Rollcage- Rollbar'ın araç üzerine olan montaj resimleri

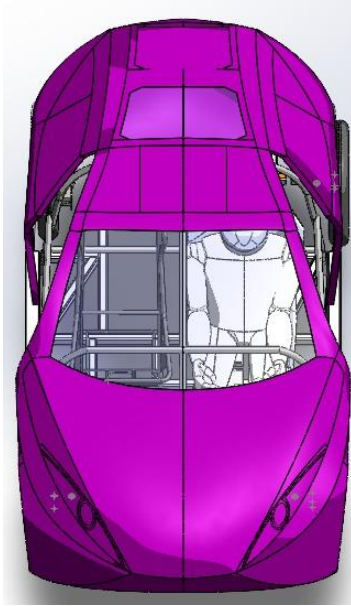
Tasarlanan Rollbar-Rollcage'in şase ve kabuk ile eşleşmesinin doğruluğunu görebilme için yapılan montaj resmini şekil 3.a ve b'de yan görünüşleri c'de ön üstten, d ve e'de izometrik görüntüleri araç üzerinde Rollbar-Rollcage konumu ve kabuk giydirilmiş görüntüleri görülmektedir.



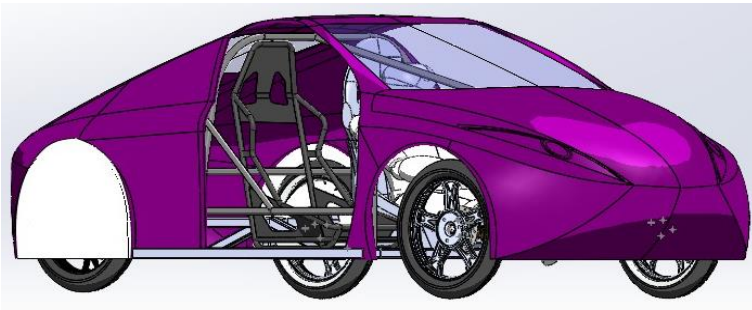
(a)



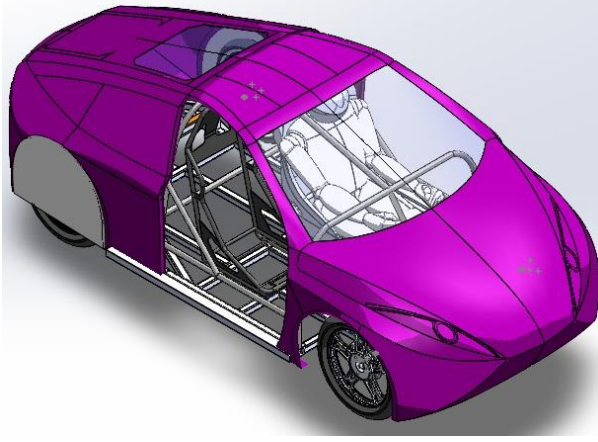
(b)



(c)



(d)



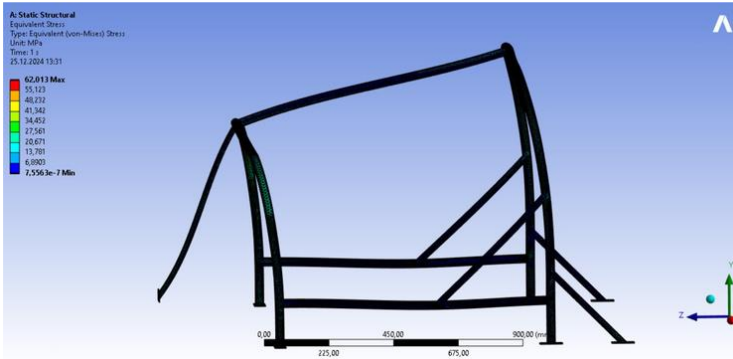
(e)

Şekil 3.a.b.c.d.e. Araç üzerinde Rollbar-Rollcage konumu ve kabuk giydirilmiş görüntüleri

3. Yapısal Analiz

Elektrikli araç yarışlarında belirlenen yük dağılımlarına göre tasarımın dayanıklılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, ANSYS yazılımı kullanılarak 700 N'luk bir kuvvet altında statik yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz ekran görüntüsü şekil 4'te görülmektedir.

Maksimum Gerilme: 62 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, St-37 çeliğin 225 MPa'lık akma dayanımının oldukça altında kalarak tasarımın güvenli sınırlar içerisinde olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4. Yapılan analiz ekran görüntüsü

Analiz sonuçları, yapının hem dayanıklı hem de güvenilir bir performans sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

4. İmalat Süreci

Şasi yapımında büküm ve kaynak yöntemleri kullanılmıştır. Alüminyum şasi ve çelik rollbar gibi farklı malzemelerden üretilen parçalar arasında doğrudan kaynak işlemi uygulanamamıştır. Bu uyumsuzluğu gidermek adına özel bir ara bağlantı sacı tasarlanmış ve şasiye 4 adet M8 cıvata ile güvenli bir şekilde monte edilmiştir.

5. Sonuç

Yapılan bu çalışmada, solidWorks programında yapılan rollbar ve rollcage tasarımları hem güvenlik hem de maliyet etkinliği açısından optimize edilmiştir. ANSYS yazılımı ile yapılan yapısal analizler, tasarımın dayanıklılık ve güvenilirlik kriterlerini tam anlamıyla karşıladığını ortaya koymuştur. Malzeme uyumu sorunlarına yönelik yenilikçi çözümler geliştirilmiş, farklı malzemeler arasında güvenli bağlantılar sağlanmıştır. Ergonomik tasarım prensipleri doğrultusunda, kullanıcı dostu bir yapı elde edilmiştir. Tüm bu sonuçlar, tasarımın mühendislik gerekliliklerini karşılayarak güvenli, dayanıklı ve ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

6. Kaynakça

- [1] Yıldırım, İ., & Kaya, H. (2022). Sonlu Eleman Analizi Kullanarak Elektrikli Golf Aracı Şasesi Tasarım ve Analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. Retrieved from <https://www.acarindex.com>
- [2] Şahin, M., & Demir, A. (2021). Önceden Tasarlanmış Elektromobil Bir Aracın Çarpışma Analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. Retrieved from <https://dergipark.org.tr>
- [3] Yılmaz, T., & Aktaş, O. (2020). Elektrikli ve Konvansiyonel Araçlara Ait İki Şasi Tasarımının Yandan Çarpışma Deformasyonlarının İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. Retrieved from <https://gcris.pau.edu.tr>
- [4] Demirci, S., & Yıldız, M. (2022). Elektrikli Bir Şehir Aracının Gövde Tasarımı ve Aerodinamik Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. Retrieved from <https://gcris.pau.edu.tr>
- [5] Aksoy, H., & Erdem, B. (2021). Elektrikli Bir Aracın Aerodinamik Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi. Akademik Teknik Dergi. Retrieved from <https://www.academia.edu>
- [6] Zhang, L., & Li, M. (2020). Design and Analysis of Chassis Using Finite Element Analysis. International Journal of Automotive Engineering.
- [7] Kim, H., & Park, J. (2021). A Structural Investigation of an Electric Car Chassis. Journal of Mechanical Science and Technology.
- [8] Binali R., Neşeli S., Yalçın G., "İmalat Yöntemlerine Genel Bakış", Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar-2, (2021)., , İksad, Editör:Prof. Dr. S. Neşeli, Öğr. Gör. A. C. Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 113, Isbn:978-625-8423-14-3Solovey A., Petrova A. (2021)
- [9] Oymak, Y. A., & Feyzullahoğlu, E. (2021). Formula Student Race Car Chassis Design and Analysis. Journal of Advanced Research, 7(2), 201-218.
- [10] R. Binali, G. Yalçın, S. Neşeli, " Kompozit Malzemelere Genel Bakış", Mühendislikte Yeni Araştırmalar, (2022)., , Tablet Kitapevi, Editör:Öğr. Gör. Gökhan Yalçın, Öğr. Gör. Abdullah Cem Ağaçayak, Basım Sayısı:1, ss 305, Isbn:978-605-5447-75-5
- [11] Kumar, P., & Singh, R. (2019). Optimization of Rollcage Structures for Crashworthiness. International Journal of Vehicle Safety, 15(1), 100-110.
- [12] Wang, H., & Zhou, Y. (2018). Structural Analysis of Automotive Roll Bars Using Finite Element Methods. Mechanical Design Journal, 22(3), 210-225.
- [13] Zhang, X., & Li, M. (2020). Material Selection for High-Strength Rollcages. Materials Science & Engineering, 50(6), 560-570.
- [14] Lopez, F., & Rivera, S. (2017). Lightweight Rollbar Design Using Composite Materials. Journal of Vehicle Dynamics, 12(1), 50-65.

- [15] Tanaka, K., & Suzuki, T. (2018). Innovative Rollcage Configurations for Electric Race Cars. Proceedings of the SAE International Conference, 102-108.
- [16] R. Binali, G. Yalçın, A.C. Ağaçayak "Modern İmalat Yöntemlerine Genel Bakış ", Mühendislik Alanında Akademikçalışmalar-1, (2021). İksad, Editör:Dr. Öğr. Üy. H. Terzioğlu, Öğr. Gör. G. Yalçın, Basım Sayısı:1, ss 200, Isbn:978-625-8423-15-0
- [17] Chang, Y., & Lee, H. (2019). Simulation-Based Testing of Rollbar Systems. Engineering Simulation Journal, 35(2), 250-260. [18] Patel, D., & Gupta, N. (2021). The Role of Rollcages in Vehicle Safety Standards. Journal of Transport Engineering, 47(5), 390-402. [19] Johnson, P., & Clark, D. (2018). Comparative Study on Steel and Aluminum Rollbars. Materials & Design, 65(7), 700-715.
- [18] Torres, J., & Martinez, R. (2019). The Impact of Design Standards on Rollcage Performance. Journal of Engineering and Technology, 29(4), 320-335.
- [19] Smith, R., & Taylor, D. (2020). Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis. SAE Technical Paper Series.
- [20] Smith, J. R., & Brown, T. (2020). Advanced Safety Systems for Electric Vehicles. Automotive Engineering Journal, 45(4), 350-362.
- [21] Müller, C., & Fischer, L. (2020). Safety Enhancement in Automotive Racing: A Case Study. Safety Engineering Review, 8(3), 190-200.