



Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm

Bayramcan İnce¹, Selahattin Çağlar Başlamışlı*¹

Hacettepe University, Department Mechanical Engineering, Ankara, 06800, Turkey

Highlights:

- Generating intracity driving cycle
- Development of an adaptive hybrid energy management system algorithm
- Sizing of hybrid power pack

Keywords:

- Hybrid energy management systems
- Adaptive ECMS (EEMY)
- Hybrid bus

Article Info:

Research Article
Received: 29.09.2019
Accepted: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.626431

Acknowledgement:

The authors are grateful for and acknowledge the support of the Scientific and Technological Research Council of Turkey (Tubitak grant number 115M593)

Correspondence:

Author: S. Çağlar Başlamışlı
e-mail:
scaglarb@hacettepe.edu.tr
phone: +90 312 297 62 08 /
130

Graphical/Tabular Abstract

Within the scope of this study, original methods were developed to determine driving cycles for local intracity busses and were used in the subsequent hybridization analyses. In this regard, powertrain and vehicle dynamics models of aforementioned vehicles were established in the virtual environment. The algorithms of the energy management systems of the electric/hybrid vehicles were investigated from the literature and analyses were carried out to determine the benefits of advanced optimal control based methods such as the Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) compared to simpler rule based methods.

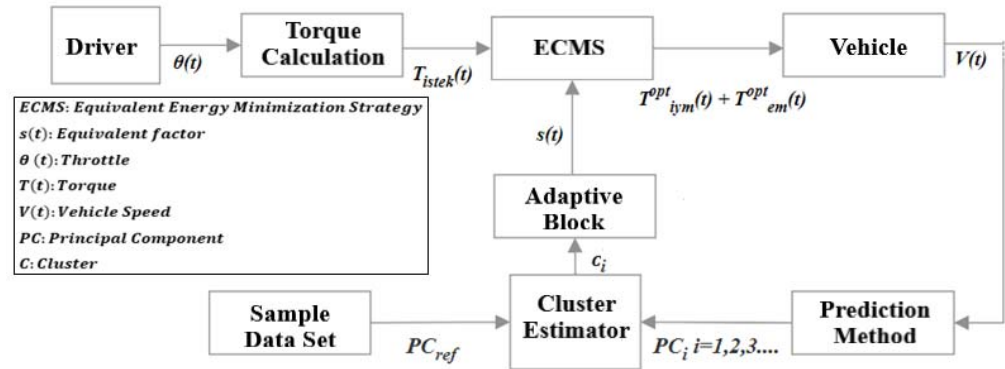


Figure A. Control diagram for adaptive ECMS

Purpose: Within the scope of this study, original methods were developed to determine driving cycles for local intracity busses and were then used in the subsequent hybridization analyses.

Theory and Methods:

Within the scope of the proposed method, the parameters of the bus energy management system were adapted to the traffic density information provided by the vehicle tracking system. In other words, in the virtual environment, the speed time graph for the road segment where the ego vehicle is about to travel is predicted theoretically, using the vehicle tracking system data of vehicles that travelled on the same road segment in the recent past.

Results:

ECMS and Adaptive ECMS controller achieved a fuel consumption improvement of nearly 40 % while the rule based controllers achieved an improvement of 30% only, which clearly indicates the benefit of using driving cycle information when designing hybrid EMS strategies for urban transportation systems.

Conclusion:

In the present study, we presented a systematic method for the determination of a real time applicable optimal energy management strategy for a hybrid road vehicle. Rule based and optimization based control strategies were compared. The comparison was conducted in parallel with a parametrization of the size of the electric motor and battery that allows following the line of best fuel economy. ECMS controllers were shown to provide a huge improvement over rule-based controllers in terms of fuel economy



Şehir içi hibrit otobüslerin yakıt ekonomisi iyileştirilmesi için enerji yönetim sistemi algoritmalarının tasarımı ve uyarlanabilir bir hibrit algoritmanın geliştirilmesi

Bayramcan İnce^{ID}, Selahattin Çağlar Başlamışlı*^{ID}
Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Böl, 06800 Beytepe, Ankara

Ö N E Ç I K A N L A R

- Şehir içi sürüş çevriminin oluşturulması
- Adaptif hibrit enerji yönetim sistemi algoritması geliştirilmesi
- Hibrit Güç Grubunun boyutlandırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 29.09.2019
Kabul: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.626431

Anahtar Kelimeler:

Hibrit enerji yönetim sistemleri,
Uyarlanabilir EEMY (ECMS),
Hibrit otobüs

ÖZET

Çalışma kapsamında, özgün bir yöntemle, araç takip sistemi verileri aracılığıyla şehir içi yerel sürüş çevrimlerinin belirlenmesinde kullanılacak bir yöntem geliştirilmiş ve sonrasında bu yöntem paralel hibrit otobüs analizinde kullanılmıştır. Bu doğrultuda, otobüs taşıtına ait güç dizini ve taşıt dinamiği modelleri sanal ortamda kurulmuştur. Elektrik-hibrit güç grubuna sahip taşıtların enerji yönetim sistemlerinin algoritmaları literatürden araştırılmış ve özellikle Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yönteminin (EEMY) daha basit olan kural tabanlı yöntemlere göre ne miktarda fayda sağlayacağı konusunda analizler yürütülmüştür. EEMY'nin gerçek zamanlı sürüş çevrimine göre eşdeğerlilik faktörünün güncellenmesi tabanlı özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem kapsamında, araç takip sistemlerinin kullanımı ile enerji yönetim sistemi parametrelerinin trafik yoğunluk bilgisine göre uyarlanması sağlanmıştır. Başka bir deyişle, sanal ortamda, trafiğe yeni katılan bir aracın, teorik olarak bulunduğu yol segmenti için hız zaman grafiğinin ne şekilde olacağı, yakın geçmişte bu yol segmentinde seyahat etmiş araçların araç takip sistemindeki hız-zaman verileri kullanılarak enerji sarfiyatı en aza indirilmiştir. Dolayısıyla, sürüş çevrimleri kullanılarak elde edilmiş algoritmaların kalibrasyonu araç rotası için yapılmıştır. Bu yöntem kullanılarak şehir içi sürüş çevrimlerinde %40'a varan yakıt tüketimi tasarrufu yapmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir.

Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm

H I G H L I G H T S

- Generating intracity driving cycle
- Development of an adaptive hybrid energy management system algorithm
- Sizing of hybrid power pack

Article Info

Research Article
Received: 29.09.2019
Accepted: 27.09.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.626431

Keywords:

Hybrid energy management systems,
Adaptive ECMS (EEMY),
Hybrid bus

ABSTRACT

Within the scope of this study, original methods were developed to determine driving cycles for local intracity buses and were used in the subsequent hybridization analyses. In this regard, powertrain and vehicle dynamics models of aforementioned vehicles were established in the virtual environment. The algorithms of the energy management systems of the electric/hybrid vehicles have been investigated from the literature and analyses have been carried out to determine the benefits of advanced methods such as the Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) compared to simpler rule based methods. In particular, an original method based on adaptive- ECMS, which consists in scheduling the equivalency factor according to the real-time driving cycle has been developed. Within the scope of the method, the parameters of the energy management system were adapted to the traffic density information provided by the vehicle tracking system. In other words, in the virtual environment, the speed profile for the road segment where the ego vehicle is about to travel is assumed to be known, using the vehicle tracking system speed data of vehicles that travelled on the same road segment in the recent past. Thereby, the calibration of the hybrid energy system algorithms is made possible by using driving cycles calculated for the road segment under interest. By using this method, it was found that fuel consumption savings up to 40% fuel consumption were possible for intracity driving cycles.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, kara taşıtlarının zararlı emisyonlarını azaltmak adına yapılan bilimsel çalışmalar ve siyasi teşebbüsler, petrole bağımlı toplu taşıma sektörünün yerini alacak alternatif teknolojilerin uygulamasına yönelik yenilikçi teknolojilerin tasarlanmasını kapsamaktadır [1]. Konvansiyonel içten yanmalı motoru (İYM) tahrikli araçların ürettiği emisyonları azaltmak amacıyla, ülkeler tarafından ortak oluşturulan standartların uygulanmasının (ör: Euro Standartları) belli bir etkisi olsa da bu girişimler, Kyoto protokolünde öngörülen emisyon hedeflerini karşılamak için henüz yeterli değildir. Bu doğrultuda, karayolu taşımacılığı sektöründe emisyon seviyelerini minimum düzeyde tutabilmek için alternatif teknolojilerin gerekli olduğu bilimsel literatürde yer alan çalışmalarda görülmektedir [2, 3]. Farklı teknolojik çözümler son yıllarda kullanılmakla beraber, petrol bazlı taşımacılık halen bu sektörde önemli bir paya sahiptir ve alternatif teknolojilerin pazar payı halen çok azdır [4]

Hibrit elektrikli otobüs teknolojisi çekiş gücünü tekerleklerle iletmek için, çeşitli yapılandırmalarla hem İYM hem de elektrik motorunu (EM) kullanır. Hibrit otobüsler genelde iki ayrı formda yapılandırılmıştır. Paralel yapılandırmada, motorlar (İYM ve EM) araca çekiş sağlamak için tork kuplörüyle bağlı bulunmaktadır. Çekiş gücü, İYM ve EM'nin beraber veya bağımsız bir şekilde çalışmasıyla üretilebilir. Seri yapılandırmada ise, İYM genellikle jeneratörü tahrik ederek elektrik üretmek için kullanılır. Üretilen elektrik EM'ye aktarılır veya batarya paketinde depolanır [5].

Bilimsel literatürde, elektrikli/hibrit otobüs benzetimleri oluşturularak, emisyon etkilerini ve ekonomik fayda değerlerini modelleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [6]. Bunun yanı sıra, enerji tüketimi modelleri, elektrikli/hibrit otobüsün enerji verimliliğini araştırmakta [7] ve ekonomik fizibilite çalışmaları elektrikli/hibrit otobüs uygulanmasının maliyet-fayda analizine odaklanmaktadır [8]. Topal [9] çalışmasında, Türkiye özelinde elektrikli otobüs uygulamalarının toplu taşıma içerisindeki kullanımını ve eğilimini incelemektedir. Aynı çalışmada, elektrikli otobüs kullanımının dünyadaki güncel durumuna da yer verilmektedir. Elektrikli/hibrit otobüs pazar payında son yıllarda istikrarlı bir büyüme vardır. 2012 yılında, elektrikli otobüsler dünya çapında yeni alımların %6 payını oluşturmuştur. Bu pay, Asya Pasifik, Avrupa ve Amerika (güney ve kuzey) gibi dünyadaki kilit oyuncular arasında dağılmıştır. Elektrikli/hibrit otobüsler için potansiyel pazar payını tahmin etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır; en önemlisi Frost ve Sullivan'ın çalışmalarında bulunmaktadır [10]. Araştırmacıların tahminlerine göre, elektrikli otobüsler 2020 yılında %26,4 Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (CAGR- Compound Annual Growth Rate) ile küresel pazarın %15 payını oluşturacaktır. Bir başka çalışmaya göre [11], 2030 yılında, batarya elektrikli ve yakıt hücreli elektrikli otobüslerin sayısı, Avrupa'da hibrit otobüs

sayısını aşacaktır. Çalışmada, kentsel elektrikli otobüs sistemleri için teknik fizibilite değerlendirmesine ve toplam sahip olma maliyetine dayanan temel performans göstergesi olarak kullanılan bütünsel bir tasarım metodolojisi sunulmaktadır. Çalışmada, operasyonel dönemde, tüm maliyet unsurlarının gelecekteki gelişmeleri göz önünde bulundurulmakta ve teknik sistemlerin maliyetini tahmin etmek için bileşene ait deneyim eğrisi yaklaşımı seçilmektedir. Değerlendirmeler, 2017 ve 2025 yılları için yapılmıştır. Elektrikli otobüs sistemlerinin teknik olarak elverişli olduğunu ve 2025 yılından itibaren ekonomik olarak rekabetçi olabileceğini belirlemiştir. Mevcut teknolojiler ve işletme gereklilikleri göz önüne alındığında kısa şarj süreli tipinin yıllar içinde en uygun çözüm olacağı belirlenmiştir.

Hibrit araç enerji yönetim sistemlerinin tasarımında sürüş çevrimi bilgisi kullanılmaktadır. Farklı hibridizasyon faktörleri ve sürüş çevrimleri parametrelerinin yakıt ekonomisi üzerindeki etkisi üzerine bilimsel çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda, Temel Bileşen Analizi gibi yöntemler sürüş çevrimi verilerini değerlendirerek hibrit kontrol stratejisine önemli girdiler sunmaktadır [12, 13].

Hibrit araç uygulamalarında, yakıt ekonomisi veya emisyon değerlerinin azaltılmasına yönelik çeşitli enerji yönetimi stratejileri bulunmaktadır. Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritması, Sınırlanmış Termostat algoritması ve Uyarlanabilir/ Uyarlanabilir olmayan Eşdeğer Minimizasyon Yöntemi, hibrit tahrik sistemlerin kontrol yöntemleri arasında yer almaktadır. Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritmasında yüksek doluluk oranındaki batarya, sürücünün veya yolun istediği yüksek güç gereksinimlerinde araç performansını artırıcı olarak devreye girmektedir. Bu strateji sürekli dur- kalk yapan sürüş şekline oldukça uygundur. Sınırlanmış Termostat algoritması yönteminde motor gücünü belirlemek için sadece batarya doluluk oranı kullanılmaktadır. Algoritma son derece basit olduğundan ilk hibrit araç kontrol tasarımlarında sıklıkla kullanılmıştır. Buna rağmen, bahsi geçen algoritmanın birkaç olumsuz yönü vardır. Birinci olarak, içten yanmalı motorun açılıp kapanması, araç sürüşünden tamamen bağımsız koşullarda gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple araç içi oluşacak gürültü konforu etkilenmektedir. İkinci olarak, motorun açılma/kapanma sıklığının emisyonlar üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır [14] Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yönteminde (EEMY), anlık optimizasyon yöntemi kullanılarak, minimum yakıt tüketiminin elde edilmesi için İYM ve bataryadan talep edilen toplam gücün iki enerji kaynağı arasında hangi oranlarla paylaşılması gerektiği çevrimiçi olarak belirlenmektedir. Batarya enerji tüketimi eşdeğer İYM yakıt tüketimine çevrilip, eşdeğer toplam yakıt tüketimi hesaplanmakta ve her bir zaman diliminde hibrit aracın eşdeğer minimum yakıt tüketiminin bulunmasını sağlayan enerji paylaşımı tespit edilmektedir [14, 15, 16]. EEMY uygulamalarında ana parametre eşdeğerlik faktörüdür. Birçok çalışmada bu parametrenin anlık tahmini için çeşitli yöntemler sunulmuştur. Yöntemlerden biri, anlık araç hızından tahmin edilen yol yükünün mevcut sürüş

Tablo 1. Araç Takip Sistemi Veri Örneği (Data of Vehicle Tracking System)

Kayıt No	Cihaz No	Plaka	Tarih/Saat	Hız km/s	Mesafe km	Enlem	Boylam	Yükseklik metre
1	191753	06 BS 3483	19.9.2016 00:00:05	35,68		39,926544	32,854778	863
2	191753	06 BS 3483	19.9.2016 00:00:13	43,37	0,07	39,92598	32,854149	864
3	191753	06 BS 3483	19.9.2016 00:00:17	46,13	0,06	39,925713	32,85368	866

çevrimleri (NEDC, ECE vb.) ile karşılaştırılarak o sürüş çevrimlerine ait bir eşdeğerlik faktörü seçilmesine dayanmaktadır [17]. EEMY'nin daha da verimli hale getirilmesi için global optimuma yaklaşan öngörülü kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Kural vd. [18] çalışmalarında, rejeneratif geri kazanım için yol eğiminin bilinmesinin öneminden bahsetmektedir. Dijital harita ve GPS ile mevcut rota üzerinde olası yokuş aşağı yol profilleri öngörülebilmektedir. Bu kapsamda, mevcut yol eğimlerinin bilinmesiyle en uygun rejeneratif enerji kazanım stratejileri belirlenebilmektedir. Bunların belirlenmesinde batarya doluluk oranı da dikkate alınmalıdır. Belirlenen batarya doluluk alt ve üst sınırlarına göre geri kazanım noktaları etkilenmektedir. Bu yöntem ile yol eğiminden kaynaklı rejeneratif enerji kazanımı maksimize edilmektedir.

Mevcut çalışmanın amacı, paralel hibrit mimariye sahip otobüslerin, şehir içi taşımacılıkta uzun vadede ekonomik ve çevreye duyarlı bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda Bölüm 2'de, güzergâhları belirli taşıtlardan bir ay boyunca Ankara şehrinde bir hat üzerinden veri toplanarak, Temel Bileşenler Analizi yöntemi ile sürüş çevrimi oluşturulmuş ve makine öğrenmesiyle sınıflandırılmıştır. Bu noktada, MATLAB® programının 'Classification Learner' uygulamasından yararlanılmış ve uygulama içerisinde 'Fine KNN' kümeleme yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Bölüm 3 ve 4 ile hibrit enerji yönetim algoritma yaklaşımları ve 220 nolu hat üzerinde hibridizasyon benzetimleri anlatılmaktadır. Aynı zamanda Bölüm 4 ve Bölüm 5 ile kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı enerji yönetim algoritmaları tasarlanmış ve performansları otobüs modeli üzerinde sınanmıştır. Bölüm 7'de çalışma içerisinde oluşan sonuçların genel bir değerlendirmesine yer verilmiştir. Bu kapsamda, sürüş çevrimlerine göre geliştirilen 'Sınırlanmış Termostat Kontrol', 'Maksimum Batarya Doluluk Kontrol' algoritmaları ve Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan Eşdeğer Enerji Minimizasyon yöntemleri kullanılarak hibrit otobüsler için yakıt tasarrufu ve emisyon değerlerinin düşmesini sağlayacak detaylı bir çalışma yapılmıştır.

2. OTOBÜS İÇİN ŞEHİR İÇİ SÜRÜŞ ÇEVİRİMİNİN OLUŞTURULMASI VE SINIFLANDIRILMASI (GENERATION AND CLASSIFICATION OF URBAN BUS DRIVING CYCLE)

2.1. Veri Toplama (Data Acquisition)

Sürüş çevrimi tespiti için veri toplama işlemi bir araç takip firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Ankara ili sınırları içerisinde, farklı hatlar üzerinde hizmet veren belediye

otobüslerine araç takip cihazı takılarak bir ay boyunca veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Temin edilen veriler Tablo 1' de gösterilen formatta kaydedilmiştir.

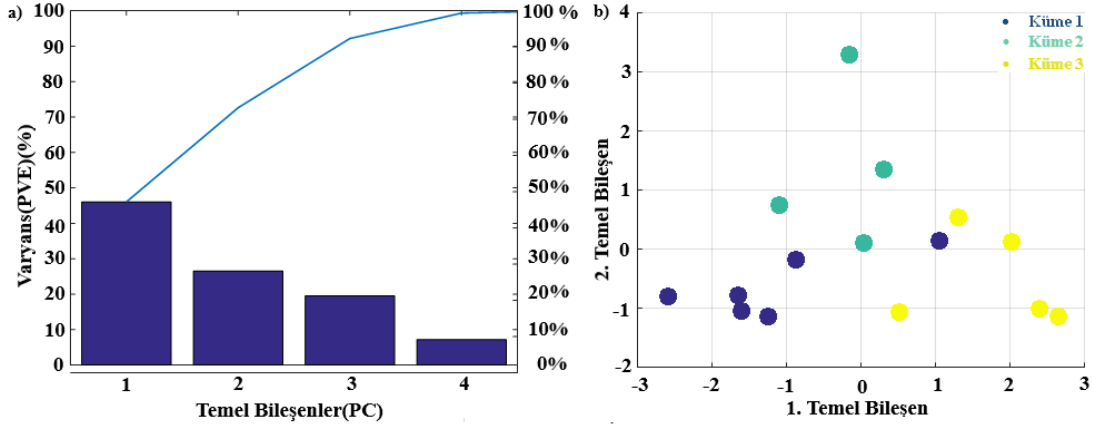
Tablo 1 ile gösterildiği gibi veri toplama cihazı sayesinde, takip edilen aracın belirli bir tarih ve saatteki konum bilgilerine ve hız bilgisine ulaşılabilmektedir. Aynı hat üzerinde farklı günlerde ve saatlerde birçok kez veri toplanmıştır. Buna ek olarak enlem ve boylam bilgilerinden otobüs hatlarına ait durakların yerleri işletme müdürlüklerinden doğrulanmıştır. Ankara şehrinde veri toplanan hatlardan birine ait rota Şekil 1 ile gösterilmektedir. Veri toplanan hatlardan biri olan 220 numaralı hat üzerinde toplam 141 adet durak vardır ve gün içerisinde 59 sefer düzenlenmektedir. Rotada gidiş ve geliş yönünde toplam kat edilen mesafe 61,38 km ve süresi 180 dakikadır. Hat üzerinde iki durak arası en kısa mesafe 107 m, en uzun mesafe ise 2427 metredir. Seferler 6:30-22:30 arası gerçekleşmekte ve bekleme süresi bulunmamaktadır. Sürüş çevrimi, 220 numaralı hat üzerinden toplanan veriler üzerinden oluşturulacaktır.



Şekil 1. 220 numaralı hatta ait rota bilgisi (Route information for line 220)

2.2. Sürüş Çevriminin Oluşturulması (Generation of Driving Cycles)

Sürüş çevrimleri oluşturulurken kümeleme yöntemlerine başvurulmuştur. Kümeleme kavramı, bir veri kümesindeki alt grupları bulmak için çeşitli teknikleri kapsamaktadır. Bir veri setinin gözlemlerinde kümeleme yapıldığında bu veri seti ayrı gruplara ayrılmış olur. Her gruptaki gözlemler birbirine oldukça benzerken, farklı gruplardaki gözlemler birbirinden oldukça farklıdır. Bu benzerlik ve farklılığı ifade etmek için gerekli kriterlerin tanımlanması gerekmektedir. Bu da genellikle, incelenen verilere dayalı olarak yapılması gereken alana özel bir işlemdir. Sürüş çevrimleri özelinde, bu parametreler, trafik koşullarına göre değişen maksimum hızlanma, yavaşlama, sabit hız süresi ve maksimum ve ortalama araç hızı gibi değerlerdir. Bu parametrelerin maksimum, minimum, yüzdesel ve ortalama değerleri



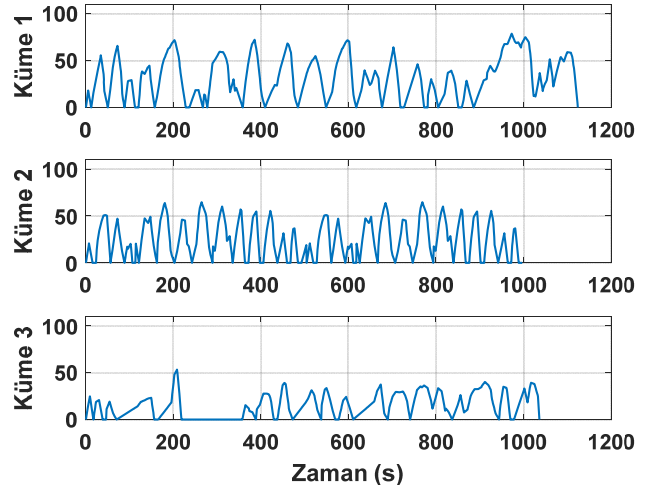
Şekil 2. a) Temel bileşenlere göre varyans değişimi b) Gözlemlerin k-means kümeleme işlemi sonucunda temel bileşenlere göre dağılımı (a) Change of variance according to principal components b) Distribution of observations according to principal components as a result of k-means clustering process)

standart sapma oranlarına göre sürüş çevrimi için alt gruplarda toplanmakta ve birbirine benzeyen grupları eşleştirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada araç sürüş verilerine göre beş farklı sürüş parametresi seçilmiştir. 1- Maksimum hız, 2- Ortalama Hız 3- Maksimum Hızlanma İvmesi 4- Maksimum Yavaşlama İvmesi 5- Rölanti süresi.

2.2.1. Temel Bileşen Analizinin (Principal Component Analysis-PCA) Uygulanması ve k-means kümeleme işlemleri (Implementation of Principal Component Analysis and k-means clustering)

Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis-PCA), çok değişkenli bir veriseti içerisindeki bilgiyi daha az değişkenle ve minimum bilgi kaybıyla açıklamanın bir matematiksel tekniğidir. Başka bir tanımla PCA, çok sayıda birbiri ile ilişkili değişken içeren veri setinin boyutunu, veri seti içerisindeki veriyi koruyarak daha küçük boyuta indirgenmesini sağlayan bir dönüşüm tekniğidir. Dönüşüm sonrasında elde edilen değişkenler ilk değişkenlerin temel bileşenleri olarak adlandırılır. İlk temel bileşenler olarak varyans değeri en büyük olan seçilir ve diğer temel bileşenler varyans değerleri azalacak şekilde sıralanır. Bu çalışmada araç takip sistemi verileri üzerinden elde edilen sürüş veri setinde PCA analizi yapılmıştır ve dört adet temel bileşenle sürüş çevrimi içindeki bilginin temsil edilebileceği görülmüştür (Şekil 2a). Temel Bileşenler tespit edildikten sonra elde edilen rota verileri k-means kümeleme işlemiyle üç ayrı kümeye bölünmüştür. Bu kümeler, pratik anlamda, trafik yoğunluğu ile ilintilidir. Şekil 2b’de seçilen farklı rota verilerinin hangi kümede yer aldıkları temel bileşenlerin ikili gösterimi üzerinden gösterilmiştir. Kümeleme işlemi sonucunda farklı kümelere farklı sürüş sürelerine sahip rota verileri elde edilmiştir. Hibrit enerji yönetim algoritmalarından Uyarlanabilir EEMY’nin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için süre olarak standartlaştırılmış sürüş çevrimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bilimsel literatürle uyumlu olarak, otobüs sürüş çevrimi analizi için, makalede, 3 ayrı 1000 sn lik sürüş çevrimi oluşturulmuştur. Şehir içi sürüş çevrimleri olan Küme 1, Küme 2 ve Küme 3, süre kısaltma işlemi öncesinde, 180 dakikalık çevrimlerden

oluşmaktadır. Bu sebeple Sürüş çevrimleri içerisinde o kümeyi temsil edecek şekilde 1000 sn’lik numuneler seçilmiştir. Seçilen 1000 sn’lik sürüş çevrimleri Şekil 3 ile gösterilmekte ve ait olduğu kümenin trafik karakteristiğini (akıcı, yoğun akıcı ve yoğun) yansıtmaktadır. Bu bağlamda, şehir içi otobüslere ait sürüş çevrimlerinin standartlaştırılmış olması, mevcut trafik yoğunluk bilgisinin hesaplanmasında kullanılmasını ve enerji yönetim sistemi parametrelerinin yoğunluk bilgisine göre uyarlanmasını sağlamıştır.



Şekil 3. Sınıflandırılmış sürüş çevrimler (Classified driving cycles)

2.3. Sürüş Çevrimlerinin Çevrimiçi Sınıflandırılması (Online Classification of Driving Cycles)

MATLAB programının ‘Classification Learner’ uygulaması, verileri sınıflandırmak için modelleri eğitmektedir. Bu uygulama içerisindeki çeşitli sınıflandırıcı teknikler (karar ağacı, farklılık analizi, en yakın komşu vb.) kullanılarak gözetimli öğrenme işlemi yapılabilmektedir. Bu bağlamda, ‘Classification Learner’ uygulaması içerisinde ‘Fine KNN’ kümeleme yöntemi kullanılarak ‘Temel

Bileşen' özelliklerine göre 220 numaralı hat için oluşturulmuş modele giren yeni bir verinin hangi alt kümeye ait olduğu ile ilgili öngörü işlemi yapılmıştır. Yukarıda anlatılan modelin eğitime amacı, çevrimiçi çalışmalarda öngörülerde kullanmaktır. Örnek bir sürüş setinden, belli bölgeler alınarak süresi 150 ila 200 sn arası değişen üç farklı hız profili elde edilmiştir (bkz. Şekil 4). Bu hız profilleri, sürüş çevrimlerini oluşturan alt sürüş çevrimleri olarak tanımlanmıştır ve özellik değerleri saptanmıştır. Alt sürüş çevrimleri, çevrimiçi çalışmalarda girdi olarak kullanılacağından dolayı hızlanma, sabit hız, boşta seyir ve yavaşlama modlarını kapsayacak en kısa süreli hız zaman profillerinden oluşturulmuştur. Oluşan özellik değerlerine göre ana bileşenler hesaplanmıştır. Eğitilen modelin hesaplamalarına göre, gözlemin hangi alt kümeye yerleştiği Tablo 2 ile gösterilmektedir. Bu yöntem ile Uyarlanabilir EEMY benzetiminde hız profili 150 sn'lik aralıklarla değerlendirmeye alınarak hangi kümeye ait olduğu %77,4 başarı oranıyla ön görülmüştür. Şüphesiz, 150 sn yerine daha uzun bir süre seçilmiş olsa, uyumdaki başarımlar daha yüksek olacaktır. Ancak, hem araç bilgisayarının işlem kapasitesi göz önünde bulundurulmalı, hem de sürenin uzamasıyla beraber, gerçek bir uygulamada, sürüş tipinin değişme ihtimali bulunmaktadır. Dolayısıyla, önerilen algoritmayı, 150 sn gibi kısa bir süre içerisinde güncelleyip sürüş tipini tespit etme gibi bir zorluluğumuz bulunmaktadır. Bu da uyumun mevcut seviyede olmasına neden olmaktadır. Böylelikle, yaşanan son hız profilinin hangi trafik koşulunda olduğu tahmin edilerek hibrit enerji yönetim algoritması parametreleri bu kapsamda güncellenmiştir (Bkz. Bölüm 3.4).

3. ŞEHİR İÇİ OTOBÜS SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİ İÇİN UYGULANAN HİBRİT ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMALARI (HYBRID ENERGY MANAGEMENT ALGORITHMS IMPLEMENTED FOR INTRACITY CITY BUS DRIVING CYCLES)

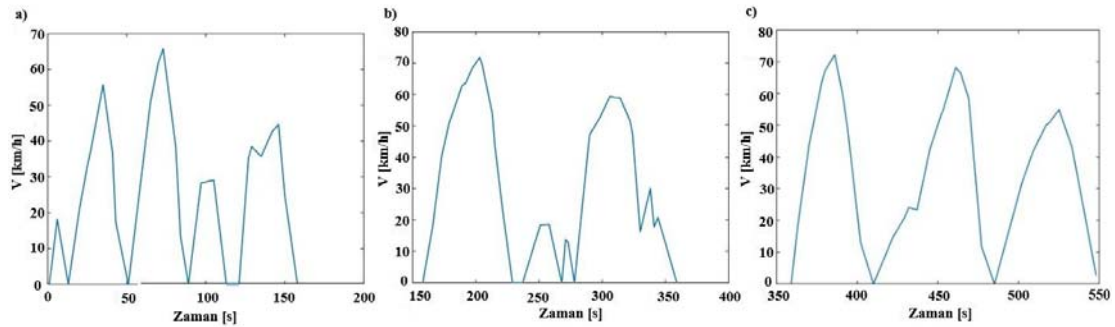
Hibrit araç benzetiminde kural tabanlı enerji yönetim algoritması olarak Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı stratejisi, optimizasyon tabanlı enerji yönetim algoritması olarak ise Uyarlanabilir/ Uyarlanabilir

olmayan Eşdeğer Enerji Minimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

3.1. Maksimum Batarya Doluluk Oranı Kontrol Stratejisi (Maximum SOC of Battery Control Strategy)

Maksimum batarya doluluk kontrol stratejisinde ana hedef güç talebinin karşılanmasıyla beraber batarya doluluğunun olabildiğince yüksek seviyede olmasını sağlamaktır. Maksimum Batarya Doluluk stratejisinde, yalnız elektrik motoru itiş modu, hibrit itiş modu, maksimum güç kaynağı şarj modu, yalnız içten yanmalı motor itiş modu, yalnız rejeneratif fren modu ve hibrit fren modu olmak üzere altı farklı sürüş modu bulunmaktadır. Güç talebine göre hangi işletim modunun devreye gireceği Şekil 5 ile gösterilmektedir. Şekil 5a ile gösterilen örnek çalışma bölgeleri ve araç hızına göre algoritma davranışı açıklanmak istenirse:

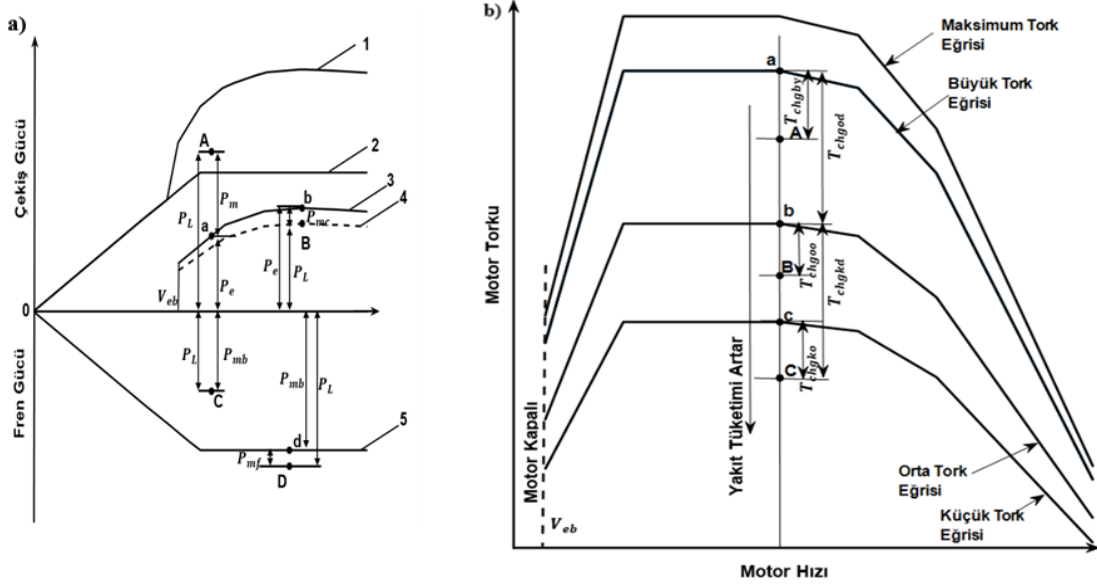
Eğer aracın hızı önceden belirlenen V_{eb} (kalkış esnasında seçilen düşük bir hız değeri) hızından düşüğe ya da içten yanmalı motorun verimsiz ya da yüksek emisyonlu bölgede çalışmasını gerektiriyorsa aracın hareketi için gerekli itiş kuvveti elektrik motoru tarafından sağlanır (*Yalnız Elektrik Motoru İtiş Modu*). A noktasına ait bölgeyi kapsayan bir güç talebi ihtiyaç duyulduğunda içten yanmalı motor ve elektrik motor birlikte çalışmaktadır (*Hibrit İtiş Modu*). Eğer güç talebi B noktası bölgesine ait bir yerde ve batarya doluluk oranı istenilen seviyeden düşük ise elektrik motoru jeneratör olarak çalışarak bataryayı şarj etmektedir (*Batarya Şarj Modu*). İçten yanmalı motorun en uygun çalışma çizgisi ile elde edilecek güçten daha az bir tahrik gerektiği ve aynı zamanda batarya da dolduğunda elektrik sistemi durdurularak tahrik yalnızca içten yanmalı motora bırakılır (*Yalnız İçten Yanmalı Motor İtiş Modu*). C noktası bölgesinde talep edilen güç elektrik motor tarafından rejeneratif fren gücü kullanılarak yapılmaktadır (*Rejeneratif Fren Modu*). İhtiyaç duyulan fren gücü elektrik motorunun sağlayabileceği maksimum rejeneratif fren gücünden fazlaysa (D noktası) mekanik frene de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda elektrik motoru maksimum fren gücünü sağlayacak şekilde kontrol edilmekte ve kalan fren gücü ise mekanik fren aracılığıyla sağlanmaktadır.



Şekil 4. a) Alt sürüş çevrimi 1 b) Alt sürüş çevrimi 2 c) Alt sürüş çevrimi 3
(a) Sub driving cycle 1 b) Sub driving cycle 2 c) Sub driving cycle 3

Tablo 2. Ön görülen kümeler ve temel bileşen değerleri (Predicted clusters and principal component analysis)

	PC1	PC2	PC3	PC4	Ön görülen kümeler
Alt Sürüş Çevrimi 1	-0,0105	-0,8869	-0,0986	0,1399	Küme 1
Alt Sürüş Çevrimi 2	3,2727	-1,4175	0,3419	0,6178	Küme 3
Alt Sürüş Çevrimi 3	-0,6323	3,0240	1,1316	-0,3839	Küme 2



Şekil 5. Maksimum batarya doluluk ve sınırlandırılmış termostat kontrol stratejisinde güç talebine göre çeşitli işletim modları a) Maksimum batarya doluluk oranı kontrol stratejisi b) Sınırlandırılmış termostat kontrol stratejisi, 1: Hibrit mod'da Maksimum güç, 2: Yalnız elektrikli çekiş maksimum güç, 3: Optimum çalışma çizelgesinde İYM gücü, 4: Kısmi İYM gücü, 5: Elektrikli motorun maksimum rejeneratif gücü, P_e : İYM gücü, P_m : Motor çekiş gücü, P_{mb} : Motor fren gücü, P_{mf} : Mekanik fren gücü, P_{mc} : PPS şarj gücü, P_L : Yük gücü, çekiş ya da fren, V_{eb} : İYM minimum motor hızına göre elde edilen taşıt hızı [17]

(Various operating modes according to power demand in Max. SOC of battery and Constrained thermostat control strategy) a) Demonstration of Max. SOC of Battery control strategy b) Demonstration of constrained thermostat control strategy: ICE operation areas, 1: Maximum power with hybrid mode, 2: Maximum power with electric alone traction, 3: Engine power on its optimum operating line, 4: Engine power with partial load, 5: Maximum generative power of electric motor, P_L : Load power, traction or braking, P_e : Engine power, P_m : Motor traction power, P_{mb} : Motor braking power, P_{mc} : PPS charging power, P_{mf} : Mechanical braking power, V_{eb} : Vehicle speed corresponding to the engine minimum rpm)

3.2. Sınırlandırılmış Termostat Kontrol Stratejisi (Constrained Thermostat Control Strategy)

Sınırlandırılmış termostat kontrol stratejisi, maksimum batarya doluluğu stratejisine benzer şekilde çalışmaktadır. Ancak düşük, orta ve büyük tork alanlarında komuta edilen çekiş tork değerleri, içten yanmalı motorun düşük, orta ve büyük tork alanlarına göre oluşturulmuş optimal verimlilik çizgisinin altında kalıyorsa bataryanın doluluk durumuna göre içten yanmalı motor, özel olarak belirlenen gaz kelebeği pozisyonlarına göre çalışmaktadır. Güç talebine göre hangi işletim modunun devreye gireceği Şekil 5b ve Tablo 3 ile anlatılmaktadır.

Tablo 3 ile aktarılan tork ve batarya doluluk oranlarına göre işletim stratejilerine bakıldığında genel yaklaşım, sürücünün tork isteğini gerçekleştirirken batarya doluluk oranının durumuna göre mevcut tork isteğinin bir üst alanına ait değeri vermesidir. Örneğin, Şekil 5b ile gösterilen C noktası

istek torku küçük alanda yer almaktadır. Bu tork isteğinde, içten yanmalı motor torku, eğer batarya doluluk oranı düşük seviyede ise orta alan optimal verimlilik çizgisi üzerinde yer alan b noktası tork değerini almaktadır. Ancak batarya doluluk oranı orta seviyede ise küçük alan optimal verimlilik çizgisinde yer alan c noktası tork değerini almaktadır. Aynı zamanda, küçük alan bölgesi tork isteği için mevcut batarya doluluk oranı istenilen seviyenin bir üst seviyesinde yer aldığı için içten yanmalı tork değeri sıfır olarak tanımlanmaktadır. Algoritmada bu durum sadece düşük tork alanı için geçerli olmaktadır.

3.3. Eşdeğer Enerji Minimizasyon Yöntemi (EEMY) (Equivalent Consumption Minimization Strategy -ECMS)

EEMY algoritmasının mantığı, minimum yakıt tüketiminin anlık olarak sağlanması halinde tüm yolculuk boyunca minimum yakıt tüketileceği varsayımına dayanmaktadır [14]. Bu durum Eş.1 ile ifade edilmektedir.

Tablo 3. Farklı komut çekiş torku ve batarya doluluğuna göre motor tork kontrol stratejisi şeması [19]
(Engine torque control strategy for different commanded traction torque and battery SOC)

		Batarya doluluk durumu		
		Düşük	Orta	Yüksek
Tork İsteği, T_L	Küçük Alan (C noktası)	$T_e = T_b$ $T_{chgkd} = T_b - T_c$	$T_e = T_c$ $T_{chgko} = T_c - T_c$	$T_e = 0$ $T_{chgky} = 0$
	Orta Alan (B noktası)	$T_e = T_a$ $T_{chgod} = T_a - T_B$	$T_e = T_b$ $T_{chgoo} = T_b - T_B$	$T_e = T_B$ $T_{chgoy} = 0$
	Yüksek Alan (A noktası)	$T_e = T_a$ $T_{chgyd} = T_a - T_A$	$T_e = T_A$ $T_{chgyo} = 0$	$T_e = T_A$ $T_{chgyy} = 0$

T_A, T_B, T_C --- A, B ve C noktalarına göre, küçük, orta ve büyük tork alanlarında komuta edilen çekiş tork değerleri
 T_a, T_b, T_c --- a, b ve c noktalarına göre, İYM kontrol edilerek üretilen tork değerleri
 T_{chgxx} --- Batarya şarj torku, xx = kd küçük tork, düşük batarya doluluk durumu, ko: küçük tork, orta batarya doluluk oranı, ky: küçük tork, yüksek batarya doluluk durumu, od: orta tork, düşük batarya doluluk durumu, oo: orta tork, orta batarya doluluk durumu, oy: orta tork, yüksek batarya doluluk durumu, yd: yüksek tork, düşük batarya doluluk durumu, yo: yüksek tork, orta batarya doluluk durumu, yy: yüksek tork, yüksek batarya doluluk durumu, T_e --- İYM torku

$$\int \text{Min}[\dot{m}_{iym}(t)]dt \approx \text{Min} \int \dot{m}_{iym}(t)dt \quad (1)$$

Her optimal kontrol yönteminde olduğu gibi, bu yöntemde de bir anlık maliyet fonksiyonu bulunmaktadır ve aşağıda belirtildiği gibi bu maliyet fonksiyonu EEMY yönteminde eşdeğer yakıt tüketimine dayanmaktadır. Maliyet fonksiyonu Eş. 2 ile ifade edilmektedir.

$$J_t = \dot{m}_{iym}(P_{iym}) + \Omega(SOC)\dot{m}_{elek,eqv}(P_{em}) \quad (2)$$

Güç üretimi sırasında, içten yanmalı motor devrinin tanımlanmış çalışma aralığında olması, içten yanmalı motor torkunun pozitif ve maksimum tork değerinden küçük olması, elektrik motor devrinin tanımlanmış çalışma aralığında yer alması, elektrik motor torkunun tanımlanmış çalışma aralığında olması (minimum kısıt elektrikli motor rejeneratif frenleme durumunda negatif olabilmektedir) optimizasyon problemi için Eş. 3 ile Eş. 6 arasındaki tanımlanmış kısıtları oluşturmaktadır:

$$w_{iym,min} \leq w_{iym} \leq w_{iym,maks} \quad (3)$$

$$0 \leq T_{iym}(t) \leq T_{iym,maks}(t) \quad (4)$$

$$w_{em,min} \leq w_{em} \leq w_{em,maks} \quad (5)$$

$$0 \leq T_{em}(t) \leq T_{em,maks}(t) \quad (6)$$

Hibrit güç paylaşımı, kontrol parametresi $u(t)$ değeri tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca, hibrit sistemin çalışması sırasında, beklenen Batarya Doluluk Oranı (SOC), seçilen üst ve alt sınırları aşmamalıdır. Bu sınırlar Eş.7 ve Eş. 8 ile ifade edilmektedir.

$$u(t) = \frac{P_{em}(t)}{P_{iym}(t)+P_{em}(t)} \quad (7)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{maks} \quad (8)$$

Yolun güç isteği, maliyet fonksiyonu en aza indirilirken, mutlaka karşılanması gereken bir şarttır. Karşılanması gereken diğer kısıtlamalar, işletim aralıklarında olması gereken İYM ve EM' nin çalışma hızları ile ilgilidir. Elektrik motoru torku için minimum sınır, rejeneratif frenleme nedeniyle negatif olabilir.

Bataryanın işletilmesi için iki eşdeğerlik faktörü tanımlanır: $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$. Bu faktörler, sürüş boyunca, batarya deşarjı ve şarjı esnasında, maliyet fonksiyonundaki eşdeğer yakıt miktarının ağırlıklandırılması sağlamaktadır [14-16], [20]. Maliyet fonksiyonundaki eş değer yakıt miktarı Eş. 9 ve Eş.10 ile ifade edilmektedir.

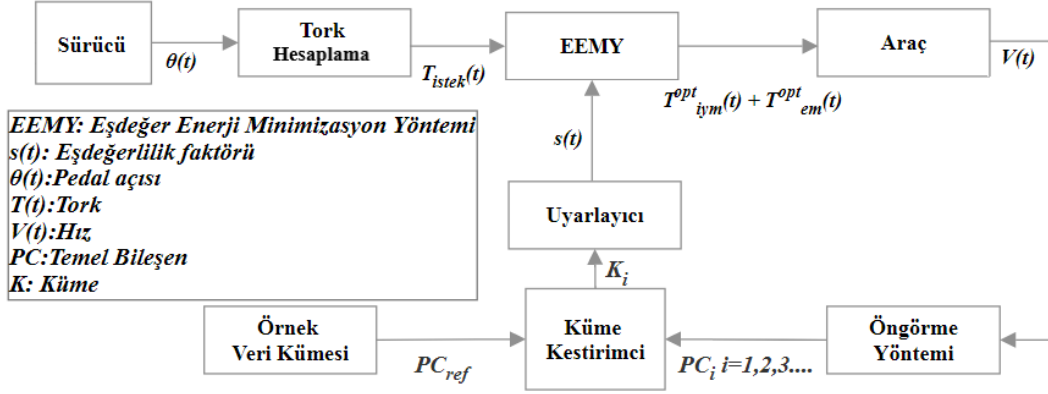
$$\dot{m}_{elek,eqv} = \gamma S_{deşarj} \frac{P_{em}(t)}{\eta_{batt}(P_{em})\eta_{em}(P_{em})H_{thv}} + (1 - \gamma)S_{şarj}\eta_{batt}(P_{em})\eta_{em}(P_{em}) \frac{P_{em}(t)}{H_{thv}} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1+sgn(P_{em})}{2} \quad (10)$$

Bataryadaki doluluk miktarının, çevrim başı ile sonunda aynı kalmasını sağlamak amacı ile aşağıdaki ceza fonksiyonu, optimal kontrol denklemlerine Eş. 11 ile ifade edildiği gibi eklenmektedir [16].

$$\Omega(SOC) = \begin{cases} \left(1 + \left(\frac{SOC_f - SOC(t)}{SOC_f - SOC_{min}}\right)^{2n+1}\right), & SOC(t) < SOC_f \\ \left(1 - \left(\frac{SOC(t) - SOC_f}{SOC_{maks} - SOC_f}\right)^{2m+1}\right), & SOC(t) \geq SOC_f \end{cases} \quad (11)$$

EEMY algoritmasının her zaman adımında, J_t değerini en düşük seviyede tutan uygun $u(t)$ değeri hesaplanmakta ve



Şekil 6. Uyarlanabilir EEMY için kontrol şeması (Control diagram for adaptive ECMS)

kontrol değeri olarak bir sonraki zaman adımına gönderilmektedir. Başka bir deyişle, aracın zaman adımı boyunca belli bir hız ve vites oranında hareket ettiği varsayılarak, İYM ve elektrik motorunun devirleri esas alınır. Bu devirlerde her iki eyleyicinin üretebileceği ve toplamda sürücü isteğini karşılayan tork değerleri tespit edilir. Sonuç olarak, her hesaplama adımında, maliyet fonksiyonunu minimize eden tork çifti seçilerek uygulanır.

3.4. Uyarlanabilir EEMY Uygulaması (Implementation of Adaptive ECMS)

Bölüm 3.3'te EEMY algoritmasında anlık olarak maliyet fonksiyonu hesaplanmasında elektrikli güç grubu için eşdeğerlik faktörleri ($S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$) tanımlanmaktadır. Farklı sürüş çevrimleri için farklı eşdeğerlik faktörleri tespit edilmelidir. Gelecek yol profilinin ve koşulunun bilinmesiyle eşdeğerlilik faktörlerinin uygun değeri tahmin edilebilmektedir. Bu noktada, farklı güç taleplerine sahip sürüş çevrimlerine göre, eşdeğerlilik faktörleri kümesi oluşturulduğunda, anlık olarak karşılaşılabilecek farklı güç taleplerine göre en yakın kümeye ait eşdeğerlilik faktörleri seçilebilecektir. Yeni veri setinin hangi kümeye ait olduğunun tespiti Şekil 6 ile gösterilen öngörme yöntemi bloğuyla gerçekleştirilmektedir. Öngörme yönteminde, Bölüm 2.2.1 ile temel bileşen analizine göre oluşturulmuş dört ana bileşen (PC1, PC2, PC3, PC4) MATLAB 'Classification Learner' aracıyla işlenmektedir. Böylelikle Küme Kestirimci bloğuyla modelin hesaplamalarına göre, ön görme bloğunun hazırladığı 150 sn'lik veri setini, örnek veri kümesi (Trafik koşullarını temsil eden 1000 sn'lik sürüş çevrimleri) ile eşleştirerek hangi alt kümeye ait olduğu belirlenmektedir. Veri kümesi oluşturularak gerçekleştirilen kontrol diyagram Şekil 6 ile gösterilmektedir. Şekil 6'da $s(t)$ fonksiyonu Tablo 5'te yer alan örnek veri kümesi içerisindeki $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ faktörlerinden oluşmakta ve eşleştiği sefer grubuna ait değerleri EEMY'ye göndermektedir. Böylelikle, EEMY'nin uygulanabilmesi için sürüş çevriminin önceden bilinmesi gerekliliğine ihtiyaç duyulmadan anlık yol bilgisine dayalı (150 sn'lik veri seti) eşdeğerlik faktörü seçilebilmekte ve uyarlanabilir bir EEMY ortaya çıkmaktadır.

4. 220 NOLU HAT İÇİN HİBRİT OTOBÜS MODELİ YAPILANDIRMASI (CONFIGURATION OF HYBRID BUS MODEL FOR LINE 220)

4.1. Boylamasına Otobüs Modeli (Longitudinal Bus Model)

MATLAB ortamında, bir paralel hibrit otobüs modeli oluşturulmuştur. Tablo 4 ile çalışmada kullanılan hibrit otobüsün parametreleri ve Şekil 8 ile, enerji kaynaklarında oluşturulan gücü tekerleklere aktaran bir paralel hibrit mimari gösterilmektedir. Araç üzerinde uygulanan yol dirençleri, yuvarlanma (F_r), hava direnci (F_a) ve yol eğiminden (F_g) ibarettir. F_{xf} ve F_{xr} araca etkiyen toplam çekiş ya da fren kuvvetleri olmak üzere, aracın boyuna ivmesi a_x Eş. 12 ile Eş. 15 arasındaki ifade edilen eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = \gamma m a_x = F_{xf} + F_{xr} - F_a - F_r - F_g \quad (12)$$

$$F_r = P^\alpha W^\beta (a + bV + cV^2) \quad (13)$$

$$F_a = \frac{1}{2} A \rho C_D V_{rel}^2 \quad (14)$$

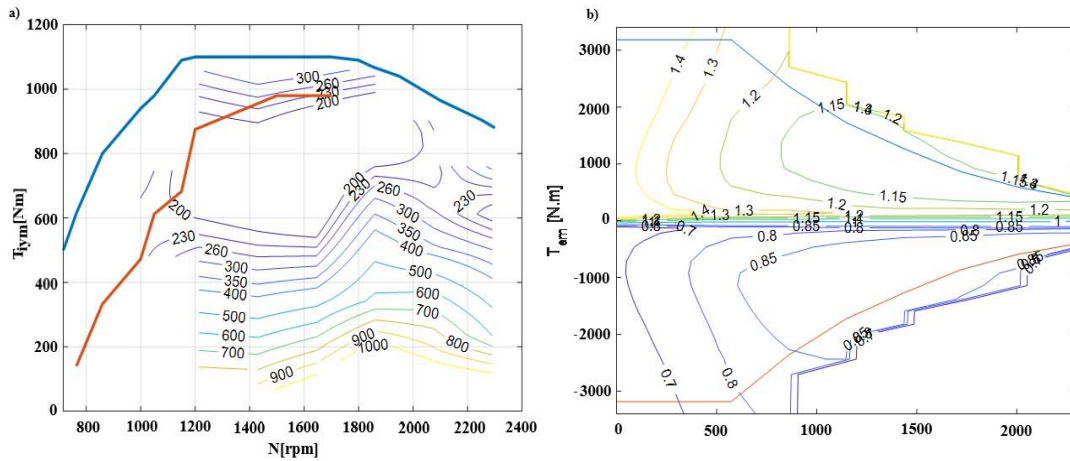
$$F_g = m g \sin \theta \quad (15)$$

İYM için, hız ve gaz keleşi pozisyonuna bağlı olan bir yakıt tüketimi haritası (Bkz. Şekil 7a) ve İYM'ye entegre bir CVT modeli kullanılmıştır. Bu modelde, istenilen güç miktarına bağlı olarak İYM'nin çalışma noktasını Hız-Tork haritasında 'Ekonomik Çizgi' üzerinde tutmak şartıyla uygun vites oranı seçilmektedir. EM için tork ve motor açısız hızına bağlı bir verimlilik haritası kullanılmıştır (Şekil 7b).

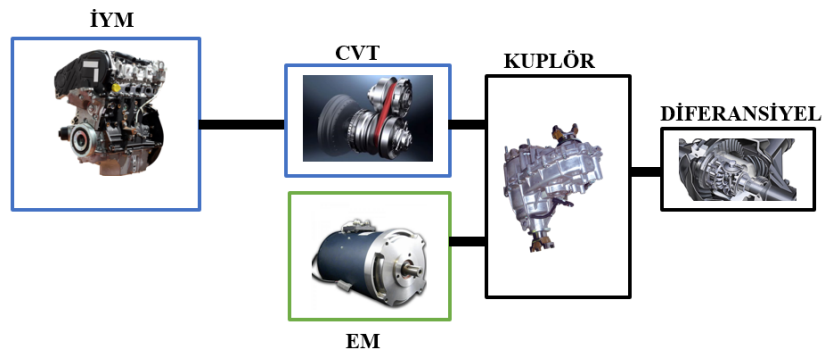
Batarya modellemesi eşdeğer bir devre diyagramı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu devrede, bataryanın iç direnci batarya doluluk oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Batarya iç direnci R_i , batarya şarj miktarı fonksiyonu olarak modelde tablolardan elde edilmektedir. Şarj ve deşarj sırasında, bataryadan çekilen veya batarya terminaline verilen akım büyüklüğü I , batarya açık devre voltajı V_{oc} ve iç direnç kullanılarak hesaplanmaktadır.

Tablo 4. Hibrit otobüs özellikleri (Specifications of hybrid bus)

Öge	Parametre	Değer
Araç	Tür	Paralel Hibrit
	Ağırlık	10000(kg)+Yolcu kütlesi
	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0,6
	Hava yoğunluğu	1,24 (kg/m ³)
	Ön cephe alanı	7,2 (m ²)
	Teker yarıçapı	0,475 (m)
İYM Vites Kutusu	Vites oranları	(0,7- 4,8) CVT
	Son dişli oranı	3,5
	Şanzıman verimi	0,8
İYM	Yakıt Türü	Dizel
	Maksimum Tork	1100 (N.m)
	Maksimum Güç	213(kW)
Elektrik Motor	Maksimum Hız	2300 (RPM)
	Maksimum Tork	3185 (N.m)
	Maksimum Güç	200 (kW)
Batarya	Maksimum Hız	2300 (RPM)
	Kapasite	3kW.h



Şekil 7. Güç gruplarına ait performans haritaları a) İYM yakıt haritası b) EM verim haritası
(Performance plots of power sources a) ICE fuel map b) EM efficiency map)



Şekil 8. Hibrit güç aktarma mimarisi (Hybrid powertrain architecture)

Tablo 5. Seferlere göre eşdeğerlik faktör değerleri
(Equivalence factor values according to route)

Sürüş Çevrimi	$S_{şarj}$	$S_{deşarj}$
10:00-13:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,14	1,21
13:00-16:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,2	1,03
16:00-19:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,36	1,30
19:00-21:00 arası 220 Numaralı Otobüs Hattı	2,25	1,40

Batarya iç gücü (P_s) ve batarya terminal gücü (P_{batt}) Eş. 16 ve Eş. 17 ile ifade edilmektedir.

$$P_s(t) = V_{oc}(SOC(t))I(t) \quad (16)$$

$$P_{batt}(t) = V_{oc}(SOC(t))I(t) - I(t)^2 R_i(SOC(t), sign(P_{batt})) \quad (17)$$

Yukarıdaki denklemlerde batarya doluluk oranı (SOC) bataryanın anlık şarjının $Q(t)$, batarya nominal kapasitesine Q_0 oranı olarak hesaplanmaktadır. Bu değer (0-1) arasında değişmektedir. Batarya doluluk oranı hesaplamalarında Eş. 18 ve Eş. 19 tanımları kullanılmaktadır.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (18)$$

$$\dot{Q}(t) = I(t) \quad (19)$$

Eşdeğer devre için şarj vedeşarj durumlarında Eş. 17 yazılırsa, Eş. 20 ve Eş. 21 eşitlikleri elde edilecektir.

$$R_i I(t)_{şarj}^2 + V_{oc} I(t)_{şarj} - P_{şarj} = 0 \quad (20)$$

$$R_i I(t)_{deşarj}^2 - V_{oc} I(t)_{deşarj} + P_{deşarj} = 0 \quad (21)$$

Şarj akımı, daima pozitif,deşarj akımı daima negatif olacağından, Eş. 17, Eş. 21 içerisinde yerine konulduğunda, akımlar Eş. 22 ve Eş. 23 ile verilmiş eşitlikler yardımı ile elde edilmektedir.

$$I_{chg} = \frac{-V_{oc} + \sqrt{V_{oc}^2 + 4R_i P_{şarj}(t)}}{2R_i} \quad (22)$$

$$I_{dis} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_i P_{dis}(t)}}{2R_i} \quad (23)$$

Bataryanın verimi, iç dirençler nedeniyle ortaya çıkan, batarya terminalindeki güç ve iç güç farklılığından dolayı Eş. 24 ile tanımlanmıştır. Verim, batarya şarj seviyesi ve iç dirençlerin bir fonksiyonudur.

$$\eta_{batt}(t) = \frac{P_s(t)}{P_{batt}(t)} = \frac{V_{oc} I(t)}{V_{oc} I(t) + I(t)^2 R_i} \quad (24)$$

Ek olarak bu bölümde, araç ağırlığının yolcu sayısına göre değişmesi ve yol eğimi parametreleri de hesaplamalara eklenmiştir (Bkz. Şekil 9).

4.1. Elektrik Güç Grubunun Boyutlandırılması (Sizing of Electric Power Group)

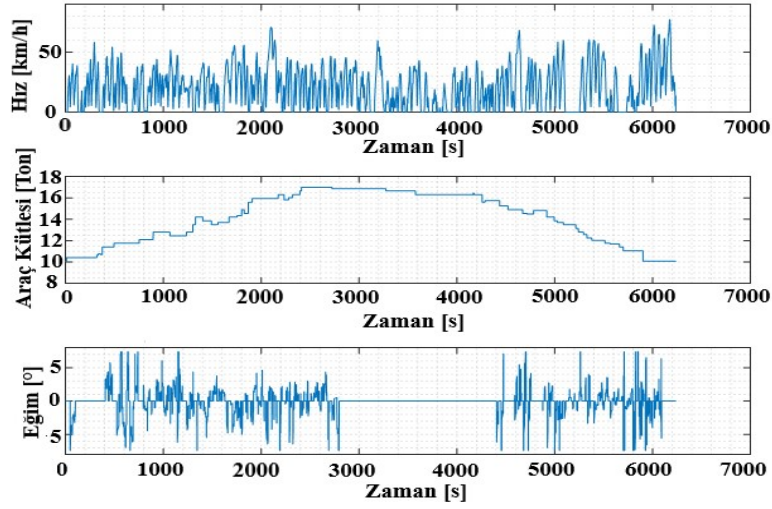
Ankara şehir içinde işletilen 220 nolu belediye otobüsüne ait veriler kullanılarak farklı trafik durumlarını gösteren üç grup sürüş çevrimi Bölüm 2.2'de elde edilmiştir. Bir ön analiz olarak, şehir içi sürüş koşullarını temsil eden üç küme ve EEMY algoritması kullanılarak, farklı batarya kapasiteleri ve farklı elektrik motor güç kombinasyonları kurularak hibrit araç mimarisi için yakıt tüketimi açısından en verimli elektrik güç grubu seçilmiştir. Aynı zamanda, benzetim yapılan bütün sürüş çevrimlerinde üç farklı kütle alınarak otobüs modelinin boş, yarı dolu ve tam dolu durumlarının elektrik güç grubu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Oluşturulan durumlara göre üç farklı sürüş çevrimi kümesi için 12,15,18 ton ağırlıklarla EEMY algoritması oluşturulmuştur. Benzetim sonucunda batarya ve elektrik motor kapasitesine göre EEMY algoritmasının sağladığı yakıt tasarrufları değerlendirilmiştir. Batarya paketi 2, 2,5 ve 3 kwh'lik, elektrik motor gücü ise 120, 150 ve 200 kW'lık kapasitelerde seçilmiştir. Bu doğrultuda, bütün otobüs kütlelerinde 200kW elektrik motoru, 3kWh batarya paketiyle en verimli sonuçların elde edilebileceği görülmüştür.

5. 220 NOLU HAT İÇİN TAM TUR BENZETİM SONUÇLARI (RESULTS OF SIMULATIONS FOR LINE 220)

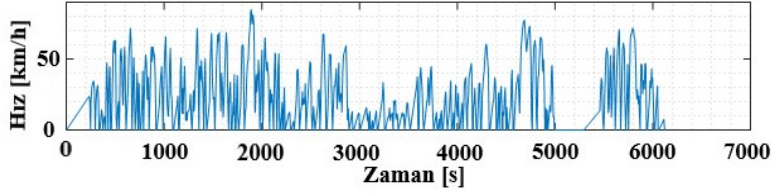
Enerji yönetim algoritmaları tasarlanırken Araç Takip Sistemi üreticisinden temin edilen ve düzenlenen verilerden, saat 10:00-13.00, 13:00-16:00, 16:00-19:00 ve 19:00-21:00 arasına denk gelen seferler seçilmiştir. Yol eğimini hesaplamak adına toplanan veriler içerisinde yer alan mesafe ve yükseklik değerlerinden faydalanılmıştır. Duraklardaki yolcu inmesi/binmesi nedeniyle aracın kütlesi zaman içerisinde değişken varsayılmıştır. Seferlere ait hız profili, eğim bilgisi ve kütle değişimi Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12 ile araç kütlesi ve yol eğimi değişmediği için sadece hız profili gösterilmektedir.

5.1. Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı Algoritma Sonuçları (Results of Constrained Thermostat and Maximum Battery SOC Algorithms)

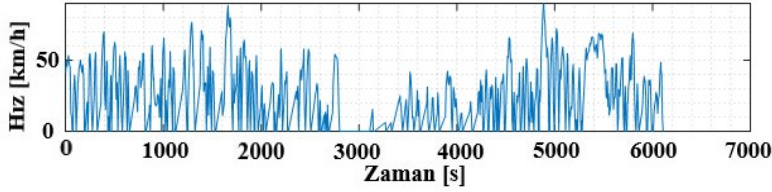
Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı kontrol algoritması tespit edilen dört farklı sefer için gerçekleştirilmiştir. Benzetim yapılan algoritmalarda batarya doluluk oranı sürüş çevriminin başında %70 olarak tanımlanmıştır. Bununla beraber, batarya doluluk oranının istenilen sınırlar içerisinde tutulması için Sınırlandırılmış Termostat algoritması kurgusunda minimum, orta ve maksimum batarya doluluk oranı sırasıyla %60, %67,5-%72,5, %80, Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritmasında, maksimum batarya doluluk oranı %80 olarak tanımlanmaktadır.



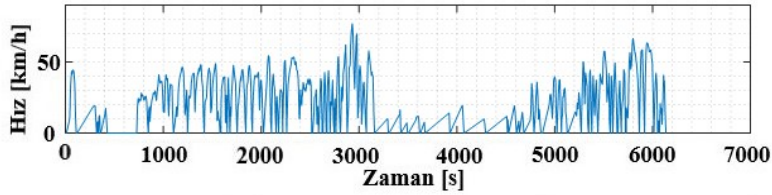
Şekil 9. Saat 10:00-13:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profili, araç kütlesi ve eğim verisi (Speed profile, vehicle mass and gradient data of line 220 between 10: 00-13: 00)



Şekil 10. Saat 13:00-16:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profil verisi (Speed profile of line 220 between 13: 00-16: 00)



Şekil 11. Saat 16:00-19:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profil verisi (Speed profile of line 220 between 16: 00-19: 00)



Şekil 12. Saat 19:00-21:00 arası 220 numaralı hatta ait hız profil verisi (Speed profile of line 220 between 19: 00-21: 00)

Tablo 6. Uyarlanabilir EEMY benzetimlerinde kullanılan seferlere ve araç kütlesine göre eşdeğerlik faktör değerleri oranları (Equivalence factors used for adaptive ECMS according to route and vehicle mass)

	Küme 1	Küme 2	Küme 3
	$S_{şarj}/S_{deşarj}$	$S_{şarj}/S_{deşarj}$	$S_{şarj}/S_{deşarj}$
Araç Kütleşi-12 ton	3,76/2,08	3,68/1,88	4/2,85
Araç Kütleşi-15 ton	3,92/1,25	3,4/1,4	3,57/2,88
Araç Kütleşi-18 ton	3,93/1,77	3,20/1,18	3,34/2,64

10:00-13:00, 13:00-16:00, 16:00-19:00 ve 19:00-21:00 saat dilimleri arasında oluşturulmuş seferlere göre gerçekleştirilen kural tabanlı hibrit algoritmalarının sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 7 ile verilmektedir. Bunun dışında algoritma sonucu olarak 10:00-13:00 arası sefere ait sonuçlar Şekil 13 ile verilmektedir.

5.2. Uyarlanabilir / Uyarlanabilir Olmayan EEMY Sonuçları
(Results of adaptive and non-adaptive ECMS)

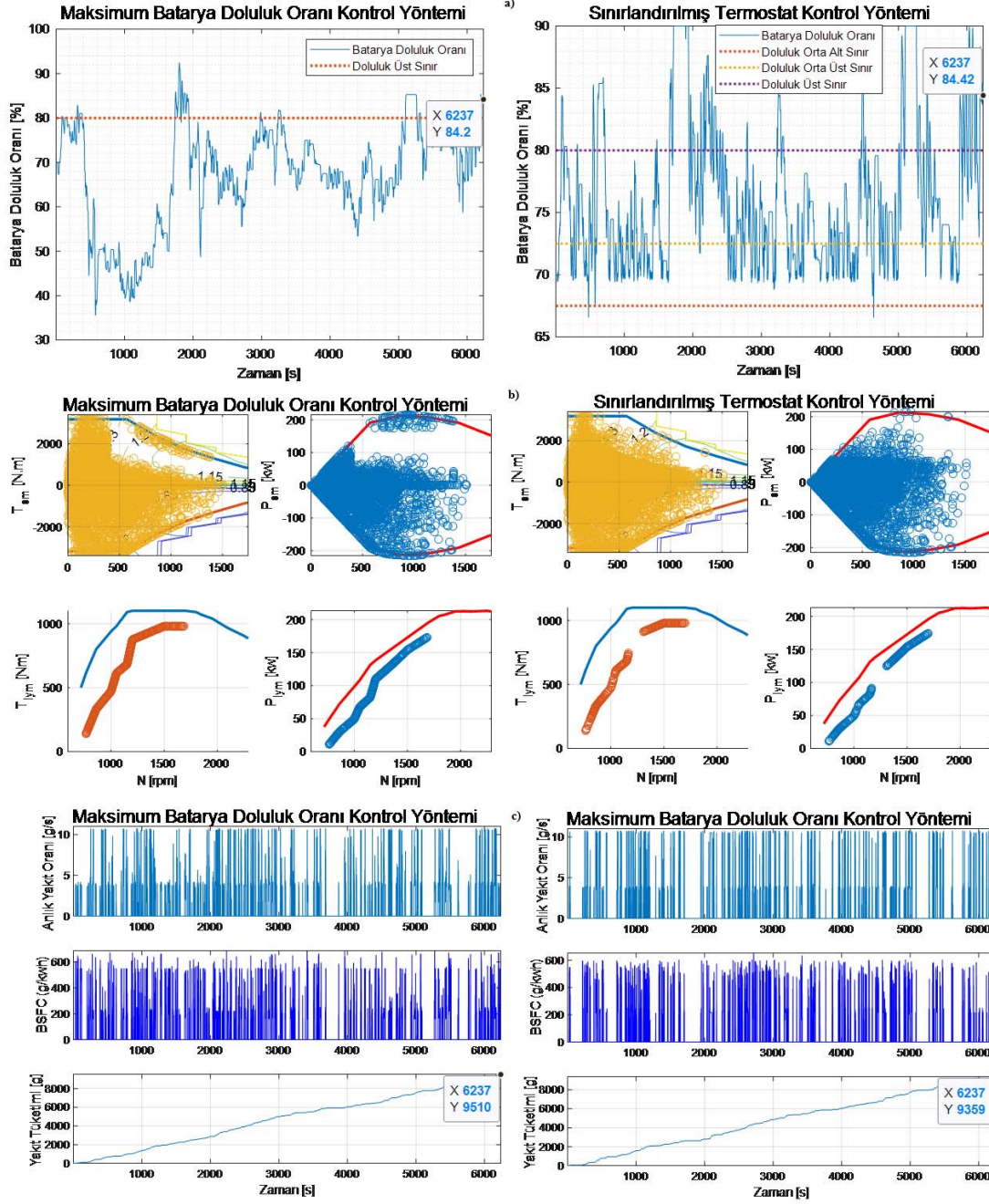
Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan EEMY algoritmaları da önceki bölümde tanımlanan seferler üzerinde uygulanmıştır. Uyarlanabilir olmayan eşdeğer enerji minimizasyon yönteminde eşdeğerlik faktörü, koşturulan sefer için optimize edilebilmektedir. Uyarlanabilir Olmayan EEMY benzetimlerinde kullanılan seferlere göre $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ parametreleri Tablo 5 ile gösterilmektedir. Tablo 5 ile gösterilen $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ parametrelerinin nasıl hesaplandığı Bölüm 3.3 içerisinde ifade edilmektedir.

Eşdeğerlik faktörünün optimal değeri yalnızca sürüş döngüsü biliniyorsa optimize edilebilmektedir. Bu sebeple mevcut çalışmada, farklı sürüş koşullarına göre kümelendirilmiş sürüş alt çevrimlerine (Bkz. Bölüm 2.2.1) ait eşdeğerlik faktörleri kümeleri oluşturulmuştur. Böylelikle sürüş esnasında sisteme girecek yeni veri setinin (150 sn'lik hız profili, güç talebi vb.) hangi sürüş alt çevrimine benzediği öngörülerek o kümeye ait eşdeğer katsayısı anlık olarak güncellenmiştir. Uyarlanabilir EEMY benzetimlerinde kullanılan seferlere ve araç kütlelerine göre $S_{deşarj}$ ve $S_{şarj}$ parametreleri Tablo 6 ile gösterilmektedir.

Her iki yöntemde de, batarya doluluk oranı sürüş çevrimi sonunda istenilen seviyede tutmak için önlemler bulunmaktadır. Batarya doluluk oranının değişmesiyle uygulanan ceza fonksiyonları batarya doluluk oranının başlangıç değerine yönelmesini sağlamaktadır. Benzetim yapılan algoritmalarda batarya doluluk oranı sürüş çevriminin başında %70 ve alt-üst sınırları 60%-80% olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 7. Farklı sefer saatleri ve farklı araç mimarilerine göre yakıt ve batarya doluluk oranları (Fuel consumption and SOC according to different vehicle architectures between 10: 00-13: 00)

Sefer	Durum	Eşdeğer Yakıt miktarı (gram)	Bitiş Batarya doluluk oranı (%) **Başlangıç SOC:70%	Yakıt Tasarrufu (%)
10:00-13:00	İYM	13690	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	9325	83,00	31,89
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	9429	84,00	31,13
	EEMY	8625	69,66	37,03
	Uyarlanabilir EEMY	8522	72,35	37,75
13:00-16:00	İYM	14490	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	9292	78,42	30,61
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	9903	86,7	31,64
	EEMY	8641	61,07	40,36
	Uyarlanabilir EEMY	8550	61,38	40,99
16:00-19:00	İYM	13900	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	9054	79,35	35,64
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	9778	68,52	29,65
	EEMY	8310	66,42	40,21
	Uyarlanabilir EEMY	8220	66,45	40,86
19:00-21:00	İYM	10280	-	-
	Sınırlandırılmış Termostat	6294	83,2	38,78
	Maks. Batarya Doluluk Oranı	6832	80	33,54
	EEMY	5420	63,08	47,27
	Uyarlanabilir EEMY	5418	63,46	47,30

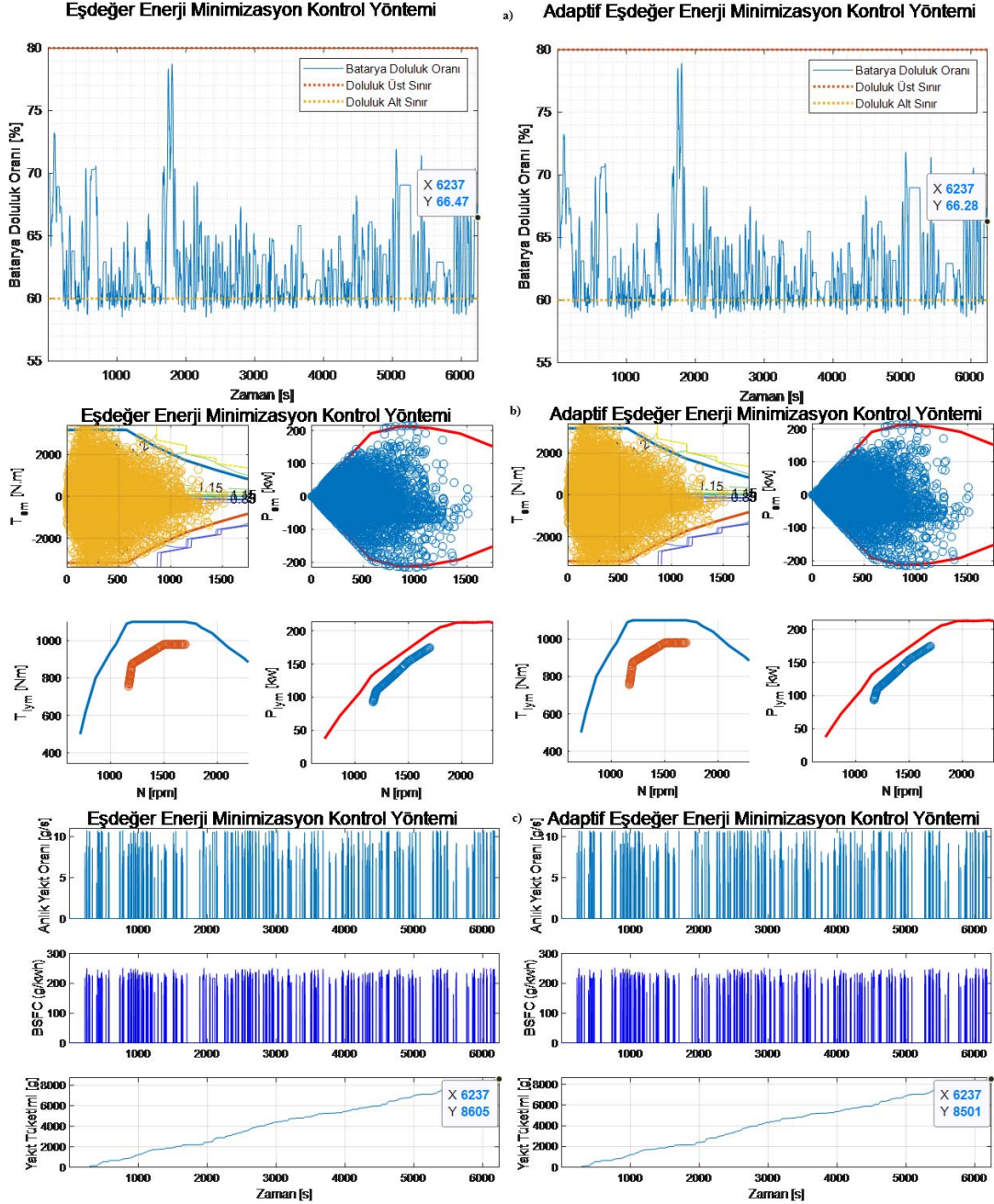


Şekil 13. 10:00-13:00 seferinde koşturulmuş Maksimum Batarya Doluluk Oranı ve Sınırlanmış Termostat kontrol yöntemi sonuçları a) Batarya doluluk oranları b) İYM ve EM çalışma noktaları c) Yakıt tüketim grafikleri
(Results of Maximum SOC and Constrained Thermostat Control Strategy simulated between 10:00-13:00 a) SOC b) Operation points of ICE and EM c) Charts of fuel consumption)

10:00-13:00, 13:00-16:00, 16:00-19:00 ve 19:00-21:00 saat dilimleri arasında oluşturulmuş seferlere göre gerçekleştirilen Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan eşdeğer enerji minimizasyon yöntemi algoritmalarının sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 7 ile verilmektedir. Bunun dışında algoritma sonucu olarak 10:00-13:00 arası sefere ait sonuçlar Şekil 14 ile verilmektedir.

5.3. Sonuçların Genel Değerlendirilmesi (General Discussion of Results)

Batarya doluluk oranlarının başlangıç ve bitiş yüzdeleri karşılaştırıldığında ortaya çıkan batarya enerjisinin ne kadarlık bir yakıt miktarına denk geldiği EPA (Environmental Protection Agency) tarafından, yayınlanan



Şekil 14. 10:00-13:00 seferinde Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan EEMY sonuçları a) Batarya doluluk oranları b) İYM ve EM çalışma noktaları c) Yakıt tüketim grafikleri
(Results of adaptive and non-adaptive ECMS between 10:00-13:00 a) SOC b) Operating point ICE and EM c) Charts of fuel consumption)

bir çalışmada ele alınmıştır [21]. Bu çalışmaya göre, 33,7 kwh'lik enerji 1 galon yakıtı denk gelmektedir.

Bu doğrultuda, benzetimler sonucu ortaya çıkan başlangıç/bitiş batarya enerji farkları yukarıdaki bilgiler doğrultusunda İYM yakıt tüketimine eklendiği zaman, eşdeğer yakıt miktarı elde edilmiştir. Tablo 7 ile dört farklı sefer için sadece İYM ile tükettiği yakıt miktarı ve diğer enerji yönetim algoritmalarına ait eşdeğer yakıt tüketimi

verilmektedir. Eşdeğer yakıt miktarına göre yapılan yakıt tasarrufuna bakıldığında uyarlanabilir EEMY bütün sürüş çevrimlerinde en az yakıt tüketen algoritma olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 13 ve 14 ile gösterilen grafiklerde enerji yönetim sistemi algoritmalarının benzetimi sonucu 'a' bölümünde batarya doluluk oranı değişimi, 'b' bölümünde elektrik ve içten yanmalı motorların çalışma noktaları, 'c' bölümünde

ise yakıt tüketim değerleri gösterilmektedir. Şekil 13 ile 10:00-13:00 seferine ait kural tabanlı hibrit algoritmalar, Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritması sonuçları, Şekil 14'te ise 10:00-13:00 seferinde Uyarlanabilir / Uyarlanabilir olmayan EEMY sonuçları gösterilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14 incelendiğinde, kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı algoritmalar arasında %6 ile %15 arasında yakıt tasarrufu farkı bulunmaktadır.

Kural tabanlı hibrit algoritmalar içerisinde Sınırlandırılmış Termostat algoritması 10:00-13:00 seferinde Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritmasına göre daha az yakıt tüketimi sağlamıştır. Tablo 7 incelendiğinde, sadece 13:00-16:00 seferinde Maksimum Batarya Doluluk Oranı algoritması daha az yakıt tüketimi sunmuştur. Batarya doluluk oranı açısından, kural tabanlı hibrit algoritmalarının bazı sürüş çevrimleri içerisinde minimum belirlenen %60 doluluk seviyesinin altına düştüğü gözlemlenmekte, ancak çevrim sonunda istenen doluluk seviyeleri elde edilmektedir. EEMY ve Uyarlanabilir EEMY algoritmaları arasında yakıt tasarrufu farkı %1 seviyesindedir. Ancak genel olarak varılan sonuç, otobüs hatları gibi araç takip sistemleri vasıtasıyla oldukça yoğun hız-zaman verisi bulunan ulaştırma sistemlerinde, EEMY yönteminin yakıt tüketimi azaltımı konusunda oldukça yüksek başarımlı olduğudur.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

θ	: Yol eğimi
m	: Araç kütlesi (kg)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
F_g	: Yokuş direnç kuvveti (N)
A	: Aracın ön yüzey alanı (m^2)
C_D	: Aerodinamik sürtünme katsayısı
ρ	: Hava kütle yoğunluğu (kg/m^3)
V_{rel}	: Bağlı Hız (m/sn)
F_a	: Hava direnci
P	: Tekerlek basıncı (kPa)
W	: Tekerler üzerindeki yük
a, b, c, α, β	: Yuvarlanma direncine ait katsayı
F_f	: Yuvarlanma direnci (N)
F_{xf}, F_{xr}	: Çekiş/fren kuvvetleri (N)
γ	: Dönel Kütle Katsayısı
S_{dis}, S_{chg}	: Eşdeğerlik faktörü
η_{em}	: Elektrik motor verimi
η_{batt}	: Batarya verimi
H_{thv}	: Isıl değer (J/kg)

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, şehir içi ulaşımda kullanılan otobüslerin paralel hibrit güç aksamı yapılandırması için hibrit enerji yönetim algoritma yaklaşımları ve 220 nolu hat üzerinde hibridizasyon benzetimleri anlatılmaktadır. Hibrit araç benzetiminde kural tabanlı enerji yönetim algoritması olarak Sınırlandırılmış Termostat ve Maksimum Batarya doluluk stratejisi, optimizasyon tabanlı enerji yönetim algoritması olarak ise Uyarlanabilir/ Uyarlanabilir olmayan Eşdeğer

Enerji Minimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon tabanlı yöntemlerden EEMY'nin gerçek zamanlı sürüş çevrimine göre güncellenmesi tabanlı özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem kullanılarak % 40 seviyesinde yakıt tüketimi tasarrufu yapmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir. Yöntem kapsamında, araç takip sistemlerinin kullanımı ile enerji yönetim sistemi parametrelerinin trafik yoğunluk bilgisine göre uyarlanması sağlanmıştır. Dolayısıyla, bu yöntemle sanal ortamda, trafiğe yeni katılan bir aracın teorik olarak bulunduğu yol segmenti için hız zaman grafiğinin ne şekilde olacağı yakın geçmişte bu yol segmentinde seyahat etmiş araçların araç takip sistemi verilerine göre öngörülerek enerji sarfiyatının oldukça azaltılabileceği gösterilmiştir. Bununla beraber, yol eğimi ve anlık araç kütlesi hesaplamalara dâhil edilmiş ve EEMY algoritması üzerinden elektrik güç grubu için boyutlandırma benzetimleri yapılmıştır. Hibrit otobüslerin, kullandıkları güç dizinleri ve sürüş çevrimlerine bağlı olarak, dizel otobüslere göre %29 ile %40 arası yakıt tasarrufu sağlayabildikleri gösterilmiştir. Bu yöntemler doğrultusunda kurgulanan Uyarlanabilir EEMY algoritmasının, güç kaynaklarını daha verimli bölgelerde çalıştırarak en yüksek yakıt tasarrufunu sağlayacağı ortaya konulmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

115M593 numaralı projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Spash C.L., The Kyoto Protocol: A guide and assessment, Environmental Values, 2001.
2. Sarikurt T., Balıkcı A., A novel energy management system for full electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2) 323-333. 2017.
3. Sezer İ., Theoretical investigation of the effects of diesel fuel, biodiesel fuel and their blends on internal combustion engines, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (4), 799-812, 2016.
4. Mahmoud M., Garnett R., Ferguson M., Kanaroglou P., Electric buses: A review of alternative powertrains, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.
5. McKinsey & Company, Urban buses: alternative powertrains for Europe, November, 1-57, 2012.
6. McKenzie E.C., Durango-Cohen P.L., Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology, Transp. Res. Part D Transp. Environ., 2012.
7. Ou X., Zhang X., Chang S., Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations, Energy Policy, 2010.
8. Nurhadi L., Borén S., Ny H., A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in swedish medium sized cities in Transportation Research Procedia, 2014.

9. Topal O., Türkiye Toplu Ulaşımında Elektrikli Otobüsler, *Eur. J. Sci. Technol.*, 15, 155–167, 2019.
10. Sold H. T. B., Hybrid F., Drive E., Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 2013.
11. Göhlich D., Fay T., Jefferies D., Lauth E., Kunitz A., Zhang X., Design of urban electric bus systems, 1–28, 2018.
12. Zhou W., Driving cycle development for electric vehicle application using principal component analysis and k-means cluster: with the case of Shenyang, 105, 2831–2836, 2017.
13. Fu J., Gao W., Principal Component Analysis Based on Drive Cycles For Hybrid Electric Vehicle, 2009 IEEE Veh. Power Propuls. Conf., 1613–1618, 2009.
14. Galip Ulsoy A., Peng H., Çakmakçı M., Automotive control systems. 2012.
15. Boyalı A., Hibrit Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
16. Liu J., Peng H., Modeling and control of a power-split hybrid vehicle, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2008.
17. Musardo C., Rizzoni G., Staccia B., A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management, 1816–1823, 2005.
18. Kural E., Güvenç B. A., Predictive-Equivalent Consumption Minimization Strategy for Energy Management of a Parallel Hybrid Vehicle for Optimal Recuperation Paralel Hibrit Elektrikli Aracın Optimal Reküperatif Frenleme i çin Öngörülü-Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Start, 18 (3), 113–124, 2015.
19. Ehsani M., Gao Y., Gay S.E., Emadi A, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design, 39 (5). 2008.
20. Koprubasi K., Modeling and Control of a Hybrid-Electric Vehicle for Drivability and Fuel Economy Improvements, Thesis, 2008.
21. Environmental Protection Agency, New Fuel Economy and Environment Labels for a New Generation of Vehicles, 2011, 9, 2011.

