

Elektrikli araçlarda tam elektrikli frenleme için bulanık mantık tabanlı yeni bir yöntemin geliştirilmesi ve uygulaması

Can Gökçe^{1*}, Özgür Üstün²

21.01.2015 Geliş/Received, 20.05.2015 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu makale çalışmasında bir elektrikli taşıtın yalnız elektrikli frenleme yöntemleri ile durdurulmasına çalışılmıştır. Enerji geri kazanımlı, dinamik ve ters akımla elektrikli frenleme yöntemlerinin sınırları araştırılmış, tüm fren aralığını kapsayabilecek yeni bir elektrikli frenleme algoritması tanımlanmıştır. Yöntem tam elektrikli frenleme (TEF) olarak adlandırılmıştır. Yöntemi gerçeklemek için model tabanlı kontrol yöntemleri kullanılarak bir bulanık mantık kontrolcü geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem bir elektrikli motosiklet üzerinde denenerek sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli frenleme, elektrikli araç, geri kazanımlı frenleme, dinamik frenleme, ters akımla frenleme, bulanık mantık kontrol, model tabanlı kontrol, tam elektrikli frenleme

Development and application of a fuzzy logic based novel method for electrical braking of electric vehicles

ABSTRACT

In this paper, it has been investigated to stop an electric vehicle only with electrical braking methods. The limits of regenerative, dynamic and plug braking methods have been researched; a novel electrical braking algorithm to cover all braking range is defined. The method is called Full Electrical Braking (FEB). To realize this method, a fuzzy logic based controller is developed, using model based control methods. The developed system has been tested on an electric scooter and the results have been discussed.

Keywords: Electrical braking, electric vehicle, regenerative braking, dynamic braking, plug braking, fuzzy logic control, model based control, full electric braking

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Bursa. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Doktora Programı, İstanbul - cangokce@gmail.com

² Mekatro Mekatronik Sistemler Ltd. Şti., İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul - oustun@itu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli taşıtlar sürüş unsurlarına göre ikiye ayrılmaktadır: (1) Tam elektrik araç (TEA) sürüş unsuru olarak yalnızca elektrik makinası kullanır. Şebekeden şarj olan batarya elektrikli araç ve hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlar bu tipe örnektir. (2) Hibrit elektrikli araç (HEA) ise sürüş unsuru olarak hem içten yanmalı motor, hem de elektrik makinası kullanır. Paralel hibrit elektrikli araç, karmaşık hibrit elektrikli araç ve şebekeden şarj olabilen (plug in) hibrit elektrikli araçlar bulunmaktadır. Petrol kaynaklarının sınırlı olması ve neticesinde yaşanan petrol krizleri ile küresel ısınma gibi çevresel etkiler başta olmak üzere çeşitli nedenler, elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmaların hızlanmasına, paralelinde de hem uluslararası otoritelerin ve hükümetlerin, hem de sivil toplum kurumlarının ve kamuoyunun bu konuya ilgi ve hassasiyet göstermesine neden olmuştur. Çeşitli kamu kuruluşlarının [1-4] ve özel araştırma firmalarının [5-7] teknoloji öngörülerinde de elektrik tahrikli araçların piyasada hızla yer alacağı görülmektedir. Bu denli kullanımı artan ve artacak olan elektrikli araçlarda konvansiyonel içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olan birçok teknolojinin de kullanıldığı görülmekte, üzerlerinde araştırma ve iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunlardan önemli bir tanesi de elektrikli fren teknolojileridir. Elektrik tahrikli araçlarda devinimi elektrikten sağlayan makina, aracın devinim enerjisinin elektrik enerjisine tekrar dönüştürülmesini de sağlar ve bu sayede aracı frenler.

Elektrikli araçların yaygınlaşma hızını azaltan en büyük etken batarya teknolojisinin henüz fosil yakıtların sağladığı erim (menzil) değerlerini sağlayamamasıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar sürmektedir. Ancak, çevreci bir teknoloji olan elektrikli araç, bu kavramdan yola çıkarak bakıldığında enerjiyi ideal kullanan, verimi çok yüksek bir sistem olmalıdır. Bu nedenle elektrikli araçlar üzerinde yapılan araştırma çalışmaları yalnızca batarya teknolojisi konusunda değil, daha hafif, daha az kayıplı ve enerjiyi ideal kullanan araçlar geliştirmek üzerine de yoğunlaşmaktadır. Enerjinin ideal kullanımı ve araçların veriminin artırılması üzerine yapılan çalışmalar içerisinde enerji geri kazanımlı frenleme en önemli uygulamalardandır. Hibrit ve tam elektrik tahrikli araçların elektrikli fren sistemleri üzerine yapılan uygulamalar [8, 9] ve çalışmalar incelendiğinde, enerji geri kazanımlı frenlemenin bütün araçlarda kullanıldığı ve bu yöntem üzerine geliştirme ve iyileştirmenin devam ettiği görülmektedir.

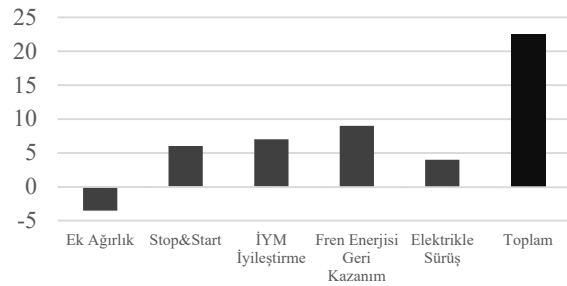
Aracın devinim enerjisi üzerinden frenleme ile geri kazanılan enerji miktarının incelendiği çalışmadan [10] elde edilen veriler Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu ve benzer çalışmalardan çıkabilecek sonuç; New York ve

İstanbul gibi trafiğin yoğun olduğu şehirlerde, geri kazanımlı frenlemenin araç veriminin artırılmasında çok önemli bir yere sahip olacaktır. Şekil 1'de hibrit elektrikli araç fonksiyonlarının ne miktarda yakıt tasarrufu olanağı getirdikleri gösterilmiştir. Bu verilere göre, en yüksek verim kazancının enerji geri kazanımlı frenlemeden elde edildiği görülmektedir [11, 12]. Tam elektrik tahrikli bir araç için yapılmış başka bir çalışmada ise [13], elektrikli aracın geri kazanımlı frenlemeden elde ettiği enerji sayesinde bir şarj döngüsünde %16 daha fazla yol yaptığı görülmüştür. Tüm bu veriler incelendiğinde, Tablo 1'de gösterilen frenleme enerjilerinin çok az bir kısmının uygulamada geri kazanılabildiği görülmektedir.

Tablo 1. Sürüş Çevrimi Karakteristikleri ve Enerji Tüketimi Verileri [10] (Driving Cycle Characteristics and Energy Consumption)

Sürüş Çevrimi	FTP75 Urban	LA92	US06	New York	ECE15
Maksimum Hız (km/h)	86,4	107,2	128,5	44,6	120
Ortalama Hız (km/h)	27,9	39,4	77,4	12,2	49,8
Gidilen Yol (km)	10,63	15,7	12,8	1,9	7,95
Sürüş Enj. (kWh/çevr.)	1,1288	2,3559	2,2655	0,296	0,9691
Sürüş Enj. (kWh/km)	1,1062	0,15	0,1769	0,1555	0,1219
Fren Enj. (kWh/çevrim)	0,6254	1,3666	0,9229	0,2425	0,3303
Fren Enj. (kWh/km)	0,0589	0,087	0,0721	0,1274	0,0416
Fren Enj./ Sürüş Enj. (%)	55,4	58,01	40,73	81,9	34,08

YAKIT TASARRUF OLANAKLARI(%)



Şekil 1. Paralel hibrit araç için fonksiyonlara göre yakıt tasarrufu olanakları. (Fuel save potentials vs. hybrid functions for parallel hybrid vehicle)

Bu çalışma kapsamında, öncelikle elektrikli frenleme tiplerinin sınırları incelenecek ve karakteristikleri belirlenecektir. Bu karakteristiklerden yola çıkarak, tam elektrikli frenleme (TEF) için yeni bir kontrol algoritması önerilecek sonrasında bir bulanık mantık kontrolcü ile önerilen algoritma gerçekleştirilecektir. Yine çalışma kapsamında yapılacak uygulama ile gerçekleştirilen algoritma

denecek, sonuçlar da bu deneyler üzerinden tartışılacaktır.

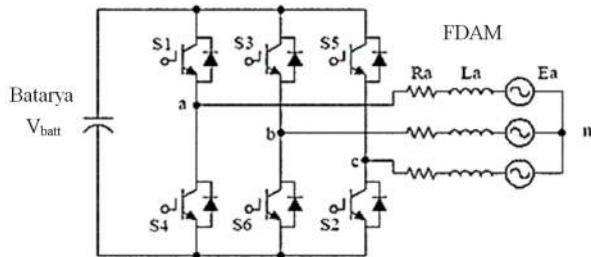
2. ELEKTRİKLİ FRENLEME YÖNTEMLERİNİN SINIRLARI (LIMITATIONS OF ELECTRICAL BRAKING METHODS)

Elektrikli frenleme yöntemlerinin karakteristiklerini inceleyebilmek için basit olarak tekerlekten elektrik makinasına, oradan da bataryaya kadar olan enerji akışının incelenmesi gerekir [14]. Denklem (1) ve (2)'de bir DC makina için basitçe elektrik makinasının hızı ile endüklenen gerilim arasındaki ilişki gösterilmiştir.

$$\varepsilon = k_e \cdot \omega \quad (1)$$

$$T = k_t \cdot i \quad (2)$$

Burada ω ; elektrik makinası dönüş hızını, k_e ; armatürde endüklenen EMK ile elektrik makinası hızı arasındaki oranı, ε ; EMK'ni, T ; elektrik makinasının milindeki momenti, k_t ; armatür akımı ile moment arasındaki oranı, i ; armatür akımını göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken unsur elektrik makinasının hızının gerilim ile, momentinin ise akım ile orantılı olduğudur [14].



Şekil 2. Fırçasız DA makinası ve sürücüsü bağlantı şeması (Brushless DC machine and driver connections)

Bir fırçasız DA makinası için endüklenen gerilim ile batarya arası şeması Şekil 2'de görülebilir. Buna göre sargı ve anahtarlarda kayıp olduğu ortadadır. Bataryalardan beslenen bir fırçasız DA makinası için sürekli durumda geçerli koşullar Denklem (3) ve (4)'te gösterilmiştir.

$$E_a - V_{batt} = I_{Brake} \cdot (R_{batt} + R_{pp} + R_{sc}) \quad (3)$$

$$T = k_t \cdot I_{Brake} = k_t \cdot \frac{E_a - V_{batt}}{R_{batt} + R_{pp} + R_{sc}} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde, E_a ; Frenleme esnasında endüklenen gerilim, V_{batt} ; bataryanın frenleme anındaki uç gerilimi, I_{brake} ; fren akımı, R_{batt} ; bataryanın iç direnci, R_{pp} ; elektrik makinasının faz-faz arası direnci; R_{sc} ; yarı iletkenlerin gerilim düşümleri ile ilişkili direnci,

T ; frenlemede oluşan momenti göstermektedir. Kullanıcı, aracı frenlerken belirli bir fren etkisi, yani frenleme momenti bekler. Momenti oluşturan faktörler, Denklem (4)'te görüldüğü üzere, armatür gerilimi ile batarya gerilimi arasındaki farktan doğmaktadır. Armatür gerilimi de makinanın hızıyla, dolayısı ile de elektrikli aracın hızı ile doğru orantılıdır.

2.1. Geri Kazanımlı Frenleme (Regenerative Braking)

Enerji geri kazanımlı frenlemenin karakteristiği incelendiğinde, belirli hızların altında geri kazanımlı frenleme enerjisinin sınırlı olduğu görülür [14]. Geri kazanımlı frenlemenin yapılabilmesi için EMK'nin tüm gerilim düşümleri çıkarıldıktan sonra batarya geriliminden yüksek olması gerekir. Buna göre, geri kazanımlı frenleme için endüklenmesi gereken gerilim seviyesi (5) numaralı eşitlikte görülmektedir. Bu durum haricinde geri kazanımlı frenleme olmayacaktır.

$$E_a > V_{batt} + (R_{batt} + R_{pp} + R_{sc}) \cdot I_{Brake} \quad (5)$$

Elektrikli aracın teorik maksimum hızı bataryanın maksimum gerilimi ile sınırlıdır. Ancak, frenleme esnasında gerilimin yükseltilecek bataryalara gönderilmesi mümkündür. Bu durumda dikkat edilmesi gereken; yükseltmeyi yapacak çevircinin girişinde, elektrik makinesinin armatüründe endüklenen akımın istenilen frenleme momenti seviyesini sağlayacak seviyede kalmasıdır. Burada diğer bir sınırlayıcı unsur da bataryaların dolu olması durumudur. Her ne kadar istenilen akım seviyelerine ulaşılsa da bataryalar dolu olduklarında direnç olarak davranmaya başlar, sonunda ısınarak ya da patlarlar. Ayrıca, bataryalar, birer elektrokimyasal makinalar oldukları için, bir tepki zamanları vardır. Bu tepki zamanları üzerlerine uygulanan ya da üzerlerinden çekilen akım ile doğrudan orantılıdır. Birim zamanda soğurabilecek elektrik enerjisi miktarı, yani elektriksel frenleme gücü en yüksek cihazlar ultrakapasitör sistemlerinin de uygulamada kullanıldığı görülmektedir. Bu cihazlar, genellikle batarya sistemleri ile birlikte kullanılarak ilk anda bataryaya darbe şeklinde gelecek (ya da sürüş esnasında darbe şeklinde çekilecek) akımı sınırlarlar, ancak depoladıkları enerji miktarı düşüktür, kısa sürede doyuma ulaşırlar. Bu çalışma kapsamında, kontrol mantığı oluşturulurken bataryalı sistem göz önüne alınmıştır. Buna göre; Denklem (5)'te gösterilen I_{brake} akımı bataryanın kabul edebileceği maksimum akım değerini geçtiğinde de geri kazanımlı frenlemenin performansı sınırlanmaya başlar.

2.2. Dinamik Frenleme (Dynamic Braking)

Dinamik frenlemede enerji geri kazanımlı frenlemeden farklı olarak, bataryanın yerini bir R_{brake} direnci alır. Karakteristiği, (3) ve (4) numaralı denklemlerden yola çıkarak ve $V_{bat}=0$ kabul ederek, (6) ve (7) numaralı denklemlerde görüldüğü şekilde ifade etmek mümkündür.

$$E_a = I_{Brake} \cdot (R_{brake} + R_{PP} + R_{SC}) \quad (6)$$

$$T = k_t \cdot I_{Brake} = k_t \cdot \frac{E_a}{R_{brake} + R_{PP} + R_{SC}} \quad (7)$$

Dinamik frenleme, herhangi bir hızda (uç geriliminde), gerilim yükseltme ihtiyacı duymadan yapılabilir. Fren etkisi, ihtiyaç duyulan frenleme momenti yüksek, buna karşın araç hızı düşük olduğunda sınıra ulaşabilir. Dış direnç sıfır olsa (motor kısa devre edilse) dahi istenilen fren momentlerine ulaşamadığı durumlarla karşılaşılabilir. Özellikle eylemsizliği yüksek olan ağır sistemler durabilmek için yüksek fren momentine (yüksek akım endükleme) ihtiyaç duyar [14]. Burada da yükseltme yapılması mümkündür, yine fren momenti için gerekli akımın armatürde olduğundan emin olmak gereklidir. Özellikle yüksek hızlarda istenilen akım değerlerine ulaşmak daha kolaydır, ancak düşük hızlarda istenilen fren etkisini (armatür akımını) oluşturacak gerilim seviyeleri mümkün olmayabilir.

2.3. Ters Akımla Frenleme (Plug Braking)

Ters akımla/gerilimle frenleme yöntemi, mevcutta hadde makinesi vb. gibi yüksek eylemsizliği olan ancak çabuk durdurulması gereken sistemlerde kullanılmaktadır. Temel mantığı faz sekansını ters çevirerek makina üzerinde ters yönde akım akmasını sağlamak ve enerji harcayarak frenleme yapmaktır [14, 15]. Referans hız (gerilim) pozitif yönde iken, elektrik makinasının negatif yönde motor gibi çalıştırılması durumu olarak da düşünülebilecek bu çalışmada ters yönde yüksek bir akım oluşur. Akım ve gerilimin referansları ters yönde olduğu için enerji yönü bataryadan makineye doğru olacak ancak frenleme gerçekleşecektir. Karakteristiği ise (8) ve (9) denklemlerinde görülebilir.

$$V_{plug} + E_a = I_{Brake} \cdot (R_{PP} + R_{SC}) \quad (8)$$

$$T = k_t \cdot I_{Brake} = k_t \cdot \frac{V_{plug} + E_a}{R_{PP} + R_{SC}} \quad (9)$$

Ters akımla frenleme tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken bir unsur, sistemin üzerinde hızla yükselecek bir akım oluşacağıdır. Elektronik bileşenlerin seçiminde buna dikkat etmek gerekecektir. Ayrıca sistem enerji harcayarak frenleme yaptığı için çalışırken maliyetli olacağını unutmamak gerekir. Bu

nedenlerle bu frenleme yöntemi, diğer elektrikli frenleme yöntemlerini tamamlayıcı bir unsur olarak kullanılmalıdır.

3. TAM ELEKTRİKLİ FRENLEME KAVRAMI (FULL ELECTRICAL BRAKING CONCEPT)

Elektrikli araçlar, üzerlerinde bulunan elektrik makinesini de kullanarak elektrikli ve mekanik frenleme yöntemleriyle frenleme yapabilirler. Araç, yol ile tekerlek arasında sonlu bir kayma olması durumunda frenlenebilir ya da hızlanabilir. Araç dinamiği ile ilişkili olan bu konu, bu çalışma kapsamında incelenmemiştir, ancak çeşitli kaynaklarda frenlemenin dinamiği ile ilgili birçok bilgi bulunmaktadır [10, 16, 17]. Ayrıca, frenleme bir güvenlik unsuru olduğu için, Türkiye’de ya da dünyada trafiğe çıkacak tüm üretilmiş araçların, Birleşmiş Milletler (BM) ve Avrupa Birliği’nin (AB) belirlediği, hatta hemen her araç üreticisinin kendi kalite ve geliştirme standartlarıyla daha da iyileştirdiği kanuni gereksinimlere [18] ve normlara [19] uyumu gerekir.

Sonlu kaymanın olduğu durum için, hem mekanik ve elektriksel frenleme kuvvetleri arasında, hem de aracın sürüş mimarisine ve dinamiğine uygun olarak ön ve arka tekerlekler arasında bir fren kuvveti paylaşımı olacaktır. Elektrikli araçta elektrikli ve mekanik frenlemenin arasındaki kuvvet paylaşımı seri ve paralel olmak üzere iki farklı yöntemle uygulanabilmektedir [17, 20, 21].

3.1. Seri ve Paralel Frenleme Yöntemleri (Series and Parallel Braking Methods)

Seri frenlemede, mekanik frenlemeden bağımsız olarak elektrik makinesinin bağlı olduğu tekerlekler elektriksel olarak frenlenebilir. Bu yapıda, bir elektronik kontrol birimi, elektrik frenleme miktarını ve mekanik freni sağlayan kontrol valflerinin çalışma oranlarını ayrı ayrı kontrol edebilir şekilde tasarlanır. Pilot, frene bastığında elektrik makinesi generatör olarak çalışarak bir negatif moment ve elektrik enerjisi üretir. Elektrikli frenlemenin yetersiz kaldığı durumda, ya da, tahrik alan tekerleklerdeki frenleme miktarının araç dinamiğini etkiler seviyeye geldiği koşullarda, kontrol birimi ön ve arka tekerleklerde mekanik frenlemeyi kademeli olarak devreye sokabilir.

Paralel frenlemede elektriksel ve mekanik fren aynı anda devreye girer. Uygulama açısından daha basit bir altyapı gereksinimi vardır. Bu sistemde, mevcut mekanik fren yapısına ek olarak elektriksel fren etkisi, İYM’deki kompresyon etkisine benzer bir şekilde devreye girer. Ancak, frenlemenin her anında mekanik frenleme devrede olduğu için, geri kazanım verimi düşüktür. Paralel frenleme yöntemi, elektriksel etkiyi en düşük

seviyede kullanan yöntemdir. Ancak, uygulamada bu sistem düşük maliyetlidir ve güvenilirliği yüksektir.

Seri ve paralel frenlemede dikkat edilmesi gereken bir diğer unsur da; kullanıcı, fren pedalında konvansiyonel frenlemeden farklı olarak, frenlemenin elektriksiz kısmına ilişkin bir karşı kuvvet hissedemeyecektir. Özellikle sadece elektrikli frenlemenin olduğu durumlarda fren pedalında karşı kuvvet oluşturmak üzere bir düzenek gerekebilir [22].

3.2. TEF (Tam Elektrikli Frenleme) Yöntemi [FEB (Full Electrical Braking) Method]

Bu çalışma kapsamında, elektrikli frenleme tipleri kullanılarak bulanık mantık tabanlı yeni bir yöntem geliştirilecek ve bir aracın yalnız elektrik ile frenlenebileceği gösterilecektir. Bu çalışmada önerilen, bir elektrikli aracın yalnız elektrikli frenleme ile durdurulabilmesi yöntemi, "Tam Elektrikli Frenleme (TEF)" olarak adlandırılmıştır.

Önceki bölümlerde, elektrikli frenlemeyi sınırlayan unsurlar belirtilmişti. Bu sınırların araç üzerindeki karşılıkları batarya gerilimi ya da şarj durumu, frenleme kuvveti talebi ya da frenleme oranı ve ters EMK oluşturacak motor ya da araç hızı olarak düşünülebilir. Buradan yola çıkarak, kontrol sisteminin girdileri şu şekilde belirlenmiştir:

Tablo 2. Bulanık mantık kontrolcü üyelik fonksiyonları (Fuzzy logic controller membership functions)

	Sınır				Gerekeçe
	A	B	C	D	
SOC	D (0;0)	(0;1)	(0.05;1)	(0.15;0)	Batarya üreticisi SOC < %5 durumunda bataryanın aşırı deşarj riski bulunduğunu bildirmektedir.
	O (0.05;0)	(0.15;1)	(0.8;1)	(0.95;0)	Bataryanın verimli çalışma aralığı %5-%85 şarj durumu olarak tanımlanmıştır.
	Y (0.8;0)	(0.9;1)	(1;1)	(1;0)	SOC > %90 durumunda batarya üreticisi aşırı şarj riski olduğunu bildirmektedir.
K _b	D (0;0)	(0;1)	(0.2;0)	-	En yüksek frenleme talebinin %10-15'e karşılık gelen kısmı konforlu yavaşlama için öngörülen değerdir.
	O (0.1;0)	(0.2;1)	(0.8;1)	(0.9;0)	En yüksek frenleme talebinin %20 ile %80 arasındaki kısmı standart yavaşlama için öngörülmüştür.
	Y (0.8;0)	(1;1)	(1;0)	-	En yüksek frenleme talebinin %80 ile %100'ü arası acil frenleme için öngörülmüştür.
V _a	D (0;0)	(0;1)	(10;1)	(30;0)	Şehir içi düşük kullanım hızları olan 0-30km/h düşük hız kabul edilmiştir.
	O (10;0)	(30;1)	(50;1)	(70;0)	Şehir içi standart kullanım hızları olan 30-70km/h orta hız kabul edilmiştir.
	Y (50;0)	(70;1)	(150;1)	(150;0)	Şehir dışı olan V _a >70km/h yüksek hız kabul edilmiştir.

Önerilen TEF yöntemine göre, aracın yalnız elektrikli frenleme yöntemleri ile durabilmesi için, tüm frenleme anlarında çalışma oranlarının toplamı R_c+R_d+R_p=1 olmalıdır. Frenleme oranlarının daha net tanımlanabilmesi için bulanık kontrol etkileşimi (FIS; Fuzzy Interference System) Sugeno tipi seçilmiştir. Bu

- Şarj Durumu (SOC): Batarya'dan okunacaktır. 0-1 arasında 0.01 çözünürlük ile değişmektedir.
- Frenleme Oranı (K_f): Fren talebinin büyüklüğünü ifade eder. Fren kolu ya da pedali üzerinde bulunan potansiyometreden okunan değere göre 0-1 arasında 0.01 çözünürlüklü normalize bir değer hesaplanıp kullanılacaktır. İdeal durumda, frenin pozisyonu ve pozisyon değişimi hızı (pozisyonun 1. türevi) da izlenerek acil-ani frenleme durumları tespit edilebilir. Hatta K_f, bu acil durumları da hesaba katacak şekilde normalize edilmiş bir ağırlık fonksiyonunun çıkışı olarak alınabilir.
- Araç Hızı (V_a): Aracın takometre değeri, ya da araç tek dişli oranına sahipse, elektrik makinasının devir durumu izlenerek elde edilebilir. Algoritma 0-150km/h arasında hızlar için tanımlanmıştır.

Bu verilere istinaden, geliştirilecek sistem, bahsi geçen 3 farklı elektrikli frenleme yöntemi arasında fren etkisini paylaşacaktır. Buna göre, kontrol sisteminin çıkışı şu şekilde belirlenmiştir:

- Enerji Geri Kazanımlı Frenleme Oranı (R_c)
- Dinamik Frenleme Oranı (R_d)
- Ters Akımla Frenleme Oranı (R_p)

tip etkileşimde, her kural için çıkışın matematiksel değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

→If Input 1 = x and Input 2 = y, then Output is z = ax + by + c

Sıfırıncı seviye (zero order) Sugeno'da $a=b=0$ 'dır, yani z bir sabittir. Sonuçta çıkan değer, tüm kural çıkış değerlerine göre alınan ağırlıklı ortalamadan oluşur [23].

Kontrol sistemi Matlab programında geliştirilmiştir. Yukarıda bahsedilen girişler için üçer farklı durum tanımlanmıştır. Bu durumlar ve sınırların

belirlenmesinde göz önüne alınan gerekçeler Tablo 2'de gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonları trapezoidal olduğundan bu tabloda bahsi geçen sınır noktaları bir üçgen ya da yamuğun koordinatları (x,y) şeklinde tanımlanmıştır. Bu tabloda D düşük, O orta, Y yüksek seviyeyi gösterir.

Tablo 3. Bulanık mantık kural tablosu (Fuzzy logic rule table)

No	Enerji Geri Kazanımlı				Dinamik				Ters Akımla			
	SOC	K_f	V_a	R_e	SOC	K_f	V_a	R_d	SOC	K_f	V_a	R_p
1	D	D	D	1	D	D	D	0				
2	D	D	O	1	D	D	O	0				
3	D	D	Y	1	D	D	Y	0				
4	D	Y	D	1	D	Y	D	0				
5	D	Y	O	1	D	Y	O	0	D	-	-	0
6	D	Y	Y	1	D	Y	Y	0				
7	D	O	D	1	D	O	D	0				
8	D	O	O	1	D	O	O	0				
9	D	O	Y	0,9	D	O	Y	0,1				
10	O	D	D	1	O	D	D	0				
11	O	D	O	1	O	D	O	0				
12	O	D	Y	1	O	D	Y	0				
13	O	Y	D	1	O	Y	D	0				
14	O	Y	O	1	O	Y	O	0	O	-	-	0
15	O	Y	Y	0,9	O	Y	Y	0,1				
16	O	O	D	1	O	O	D	0				
17	O	O	O	0,9	O	O	O	0,1				
18	O	O	Y	0,8	O	O	Y	0,2				
19	Y	D	D	0	Y	D	D	0			D	1
20	Y	D	O	0	Y	D	O	1			O	0
21	Y	D	Y	0	Y	D	Y	1			Y	0
22	Y	Y	D	0	Y	Y	D	0			D	1
23	Y	Y	O	0	Y	Y	O	1	Y	-	O	0
24	Y	Y	Y	0	Y	Y	Y	1			Y	0
25	Y	O	D	0	Y	O	D	0			D	1
26	Y	O	O	0	Y	O	O	1			O	0
27	Y	O	Y	0	Y	O	Y	1			Y	0

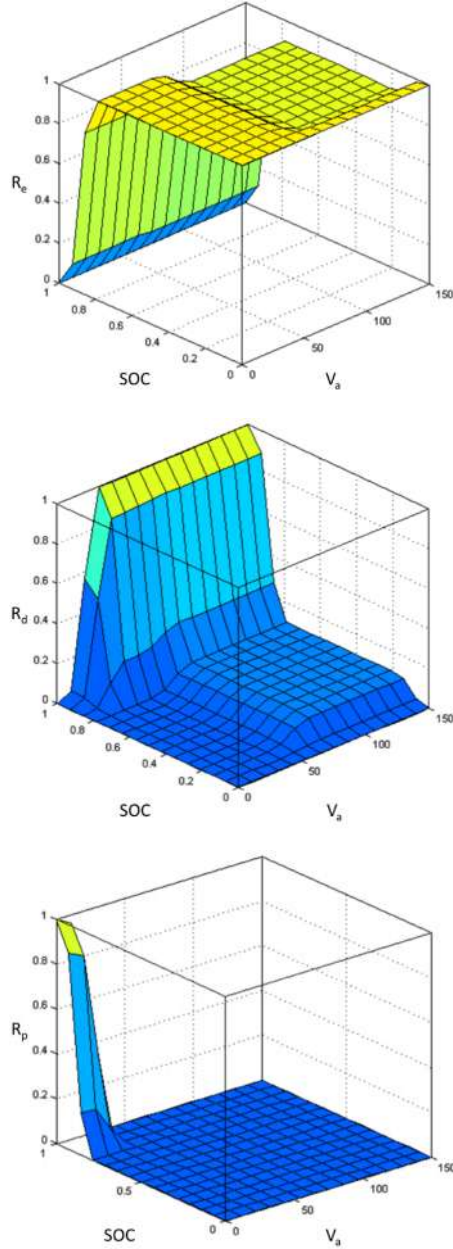
Geliştirilen bulanık kontrolcüde çıkış için kurallar, frenleme yöntemlerinin özelliklerine göre düşünülmüştür. Temel mantık;

- Şarj durumu düşük ise enerji geri kazanımlı;
- Şarj durumu orta ise istenilen frenleme kuvveti ve aracın o anki hızına göre hem enerji kazanımlı hem de dinamik;

- Şarj durumu yüksek ise dinamik, çok yüksek ise sadece dinamik;
- Şarj durumu yüksek ve araç hızı düşük ise ters akımla frenleme yapılacak şekilde oluşturulmuştur.

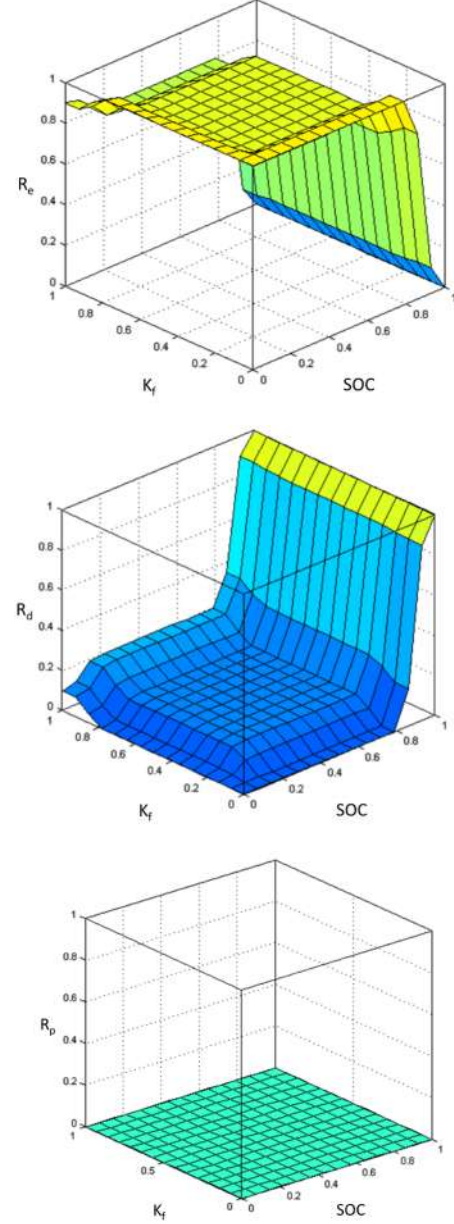
Kural tablosu Tablo 3'te verilmiştir. Bu tabloda, TEF kavramı ile paralel olarak, her kural için, farklı tipte frenlemelerin toplam oranı 1'e eşittir. Bu, istenilen frenleme kuvvetinin 3 farklı tipteki elektrikli frenleme ile karşılanması anlamına gelir. Bu tabloda D düşük, O orta, Y yüksek seviyeyi gösterir.

(V_a) ve şarj durumu (SOC) ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4'te ise elektrikli frenleme oranlarının frenleme talebi (K_f) ve şarj durumu (SOC) ile değişimi görülebilir. Şekil 5'te ise frenleme oranlarının frenleme talebi (K_f) ve araç hızı (V_a) ile değişimi verilmiştir.

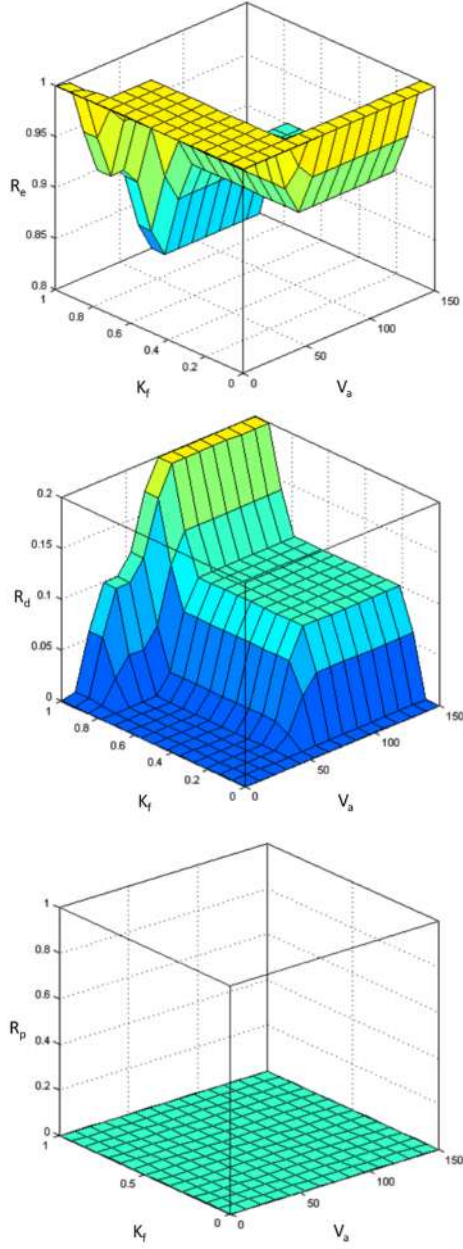


Şekil 3. Frenleme oranları (R_e, R_d, R_p) – SOC – V_a (Braking rates (R_e, R_d, R_p) – SOC – V_a)

Tablo 3'te gösterilen kural tablosuna uygun olarak yapılan simülasyonlar sonrasında çalışma karakteristiklerine ilişkin grafikler elde edilmiştir. Şekil 3'te elektrikli frenleme oranlarının (R_e, R_d, R_p) araç hızı



Şekil 4. Frenleme oranları (R_e, R_d, R_p) – K_f – SOC (Braking rates (R_e, R_d, R_p) – K_f – SOC)



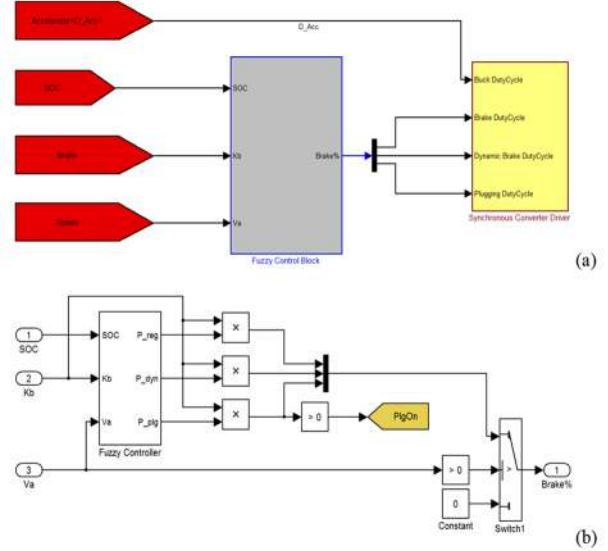
Şekil 5. Frenleme oranları (R_e , R_d , R_p) – K_f – V_a (Braking rates (R_e , R_d , R_p) – K_f – V_a)

3.3. Bulanık Mantık Kontrolcünün Araç Kontrol Yazılımına Entegrasyonu (Integration of Fuzzy Logic Controller to the Vehicle Control Software)

Matlab ortamında geliştirilen bulanık mantık kontrolcü, model tabanlı kontrol yapılacak sisteme adapte edilmelidir. Aracın kontrol altyapısı, SIMULINK yazılımı kullanılarak model tabanlı olarak geliştirilmiştir. Kontrol ünitesi üzerinde gömülü kontrol yazılımı, Matlab Embedded Coder ve elektronik kontrol birimine ait kütüphaneler yardımıyla otomatik kod üretme teknikleri

Elektrikli araçlarda tam elektrikli frenleme için bulanık mantık tabanlı yeni bir yöntemin geliştirilmesi ve uygulaması

ile geliştirilmiştir. Şekil 6'da, ana kontrolcü içerisinde bulanık mantık kontrol bloğunun yeri görülebilir. Model tabanlı kontrolcünün detayları ve geliştirme aşamaları başka bir inceleme konusu olacaktır.



Şekil 6. (a) Model tabanlı kontrolcünün içerisinde bulanık mantık kontrolünün yeri ve (b) bloğun içi (Place of the fuzzy logic control inside the model based controller (a) and inside of the block (b))

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

4.1. Deneysel Düzenliği (Experimental Setup)

Çalışmada geliştirilen bulanık mantık tabanlı elektrikli frenlemeye sahip kontrol sistemi, bir elektrikli motosiklet üzerinde denenmiştir. Motosiklete ait, standart kontrol birimi çıkartılarak, model tabanlı geliştirilmiş kodların üzerinde uygulandığı bir elektronik kontrol ünitesi (EKÜ) ile değiştirilmiştir. Ayrıca, motosikletin elektronik sürücüsü, önceki çalışmalarda tasarlanmış başka bir motor sürücü ile değiştirilmiştir. Diğer bir değişiklik ise, önceki bölümlerde gerekçesi anlatılan, hem yükselten hem de düşüren özelliğe, çift yönlü bir DA/DA çevircinin sisteme eklenmesidir. Ayrıca, bir DA kıyıcı devresi, direnç üzerinde yapılacak frenlemenin kontrolü için kullanılacaktır.

4.1.1. Elektrikli motosiklet (Electric scooter)

Deneysel çalışmaların tamamlanabilmesi için bir elektrikli motosiklet temin edilmiş, üzerinde kablolama ve montaj çalışmaları tamamlanmıştır. İlgili çalışmalar Şekil 7'de ve 8'de görülebilir. Motosikletin teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.



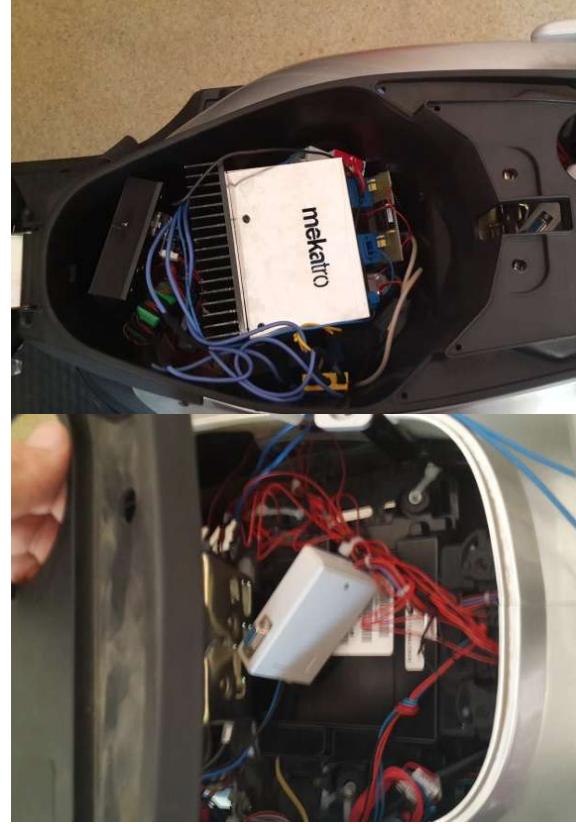
Şekil 7. Ön kablolama ve montaj çalışmaları (Front harness setup and installations)

Tablo 4. Elektrikli motosiklet teknik bilgi tablosu (Technical specifications for electric scooter)

Model	VS3
Boyutlar	1800*530*1150 mm
Araç Kütlesi	105 kg
Menzil	50 km - 70 km (Eco Mode)
Maksimum Hız	63 km/h (45 km/h ile sınırlı)
Tırmanma Kapasitesi	15°
Motor Gücü	1500 W
Batarya Kapasitesi	60 V 20 Ah
Batarya Tipi	Jel
Şarj Süresi	6-8 Saat
Şarj Çıkış	60 V, 3 A
Lastik Boyutu	90-12 Ön / 3.5-10 Arka

4.1.2. Motor Sürücü (Driver)

Fırçasız doğru akım motoru (FDAM) sürmek üzere daha önceki çalışmalarda [14] tasarlanmış bir sürücüdür. Bu çalışmada PWM işaretinin ayarlanması için kullanılan potansiyometre, maksimum değeri verecek şekilde ayarlanmıştır. Makinanın hız ayarı, sürücünün önüne konulacak senkron çevirici ile sağlanacaktır. Ayrıca, sürünün yön anahtarı (Fwd/Rev) ile sürüş-süzülüş (Run/Coast) anahtarı iptal edilerek EKÜ'nün ilgili analog çıkışlarından sürülecek şekilde getirilmiştir.



Şekil 8. Arka kablolama ve montaj çalışmaları ile kullanılan EKÜ (Rear harness setup and installations with ECU used)

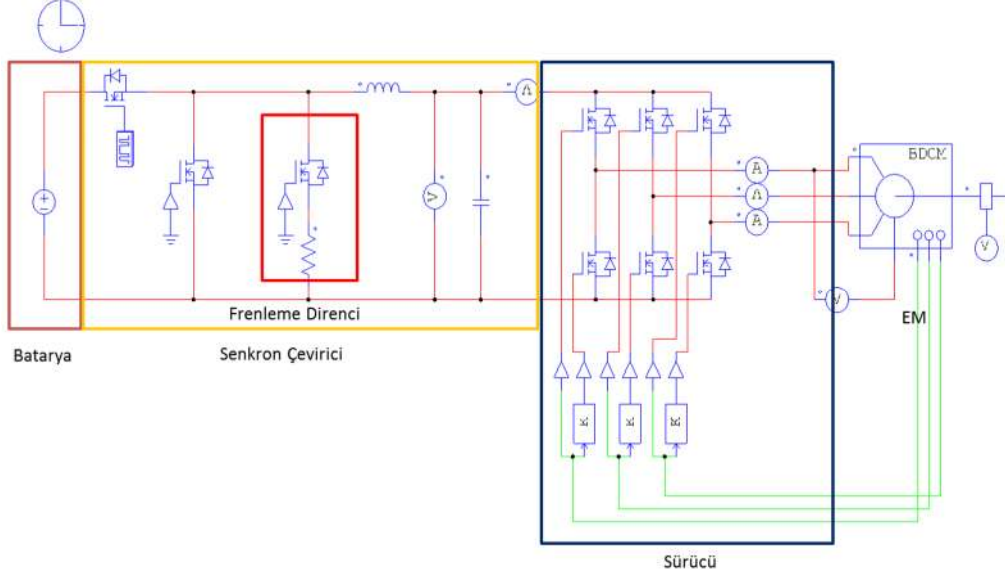


4.1.3. Senkron Çevirici (Synchronous Converter)

Senkron çevirici, çift yönlü iletim yapabilen, hem yükseltme hem de düşürme modunda çalışabilen bir çeviricidir. Bu makalenin parçası olduğu proje kapsamında tasarlanmıştır [14]. Tasarımda MOSFET anahtarlar ile SEMIKRON SKYPER sürücü katları kullanılmıştır. Sürücü katı TTL standardında işaretler ile sürülebilmektedir. EKÜ, üzerinde koşan bulanık mantık kontrolcünün hesapladığı değerler ile senkron çeviricinin ilgili anahtarlarını sürer. Önerilen yapı Şekil 9'da gösterilmiştir.

Konvertör, motor çalışma esnasında, hız ayarı yapılabilmesi için, batarya çıkışı ile motor sürücünün girişi arasında, gerilim düşürücü (Buck) modunda çalışacaktır. Frenlemede ise, motordan gelen enerjiyi bataryaya yükselterek gönderebilmek için gerilim

yükseltici (Boost) modunda çalışacaktır. Devreye ayrıca, dinamik frenleme için bir direnç ve bunun üzerinden akacak akımın kontrolü için DC kıyıcı MOSFET eklenmiştir.



Şekil 9. Senkron çeviricili yapının modeli (Model of the system with synchronous converter)

4.1.4. Dinamik Frenleme Devresi (Dynamic Braking Circuit)



Şekil 10. Dinamik frenleme direnci (Dynamic braking resistor)

Dinamik frenleme için 18 adet 1Ω 'luk dirençler kullanılmış, 3 seri – 6 paralel koldan toplam $0,5\Omega$ 'luk direnç bloğu oluşturulmuştur. Devrenin geri kalan kısımları, (motor iç dirençleri dâhil) çalışma frekansında yaklaşık $0,2\Omega$ olarak ölçülmüştür. Dirençleri sürececek olan kıyıcının maksimum çalışma oranında ve maksimum hızda dirençler üzerine $36V$ 'luk gerilim uygulanması öngörülmüştür. Buna göre maksimum dinamik frenleme gücü;

$$R_{toplaml} = R_{iç} + R_{banko} = 0.2\Omega + 0.5\Omega = 0.7\Omega \quad (10)$$

$$I_{dinamik_maks} = \frac{36V}{0.7\Omega} = 51.4A \quad (11)$$

$$P_{Dinamik_maks} = 36V \times 51.4A = 1850W \quad (12)$$

olacaktır. Bu değer motor gücü anma değeri olan $1500W$ 'tan %24 fazladır. Ancak dinamik frenleme akımı motor ve dirençlere kısa süre etkiyeceğinden sorun oluşturması beklenmemektedir. Dinamik frenleme devresi, soğutmanın kolay sağlanabilmesi için motosikletin arka bölmesine monte edilmiştir. Dinamik frenleme bloğunun son konumu Şekil 10'da görülebilir.

4.1.5. Elektronik Kontrol Ünitesi – EKÜ (Electronic Control Unit - ECU)

EKÜ olarak, otomotiv standardında, Freescale MPC5554 tabanlı bir modül seçilmiştir. Bu EKÜ, aynı zamanda Matlab/SIMULINK üzerinde, model tabanlı kontrol sistemi geliştirmeye uygun bir yazılım ara yüzüne de sahiptir. EKÜ üzerinde 112 pin vardır. Bu pinler çeşitli analog ve sayısal giriş ve çıkışlar ile 3 adet CAN (Controller Area Network) ara yüzü ve 1 adet de RS485 haberleşme kanallarını içerir. Çalışma kapsamında, EKÜ'nün TTL çıkış veren sayısal çıkışları, MOSFET sürücülerini tetiklemekte ve motor sürücünün kontrol butonlarına ait sinyallerin üretilmesinde kullanılmıştır. EKÜ, analog girişlerinden alacağı, gaz-fren potansiyometreleri değerleri ve araç hızı gibi verileri yazılımına iletacaktır. Programlama ve ilk test çalışmaları, EKÜ ile programın çalıştığı kişisel bilgisayar

CAN ağı üzerinden bağlanarak, geliştirilen bir ara yüz yardımıyla yapılmıştır.

4.1.6. Giriş – Çıkış Bağlantıları (Input – Output Connections)

Tüm deneylerin yapılabilmesi için giriş-çıkış birimleri EKÜ üzerinde seçilmiş ve ilgili bağlantılar yapılmıştır. Buna göre, sistemin giriş ve çıkışları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

i. EKÜ Güç Devresi

EKÜ'ye, programlanma ve çalışma esnasında bir röle üzerinden enerji verilmektedir. Röle, motosikletin anahtarının marş konumuna çevrilmesi, ya da yazılım tetiklemesi (örn. EKÜ'nün programlanması esnasında) ile EKÜ'ye enerji iletilmesini sağlar.

ii. Analog Girişler

Analog girişlerdeki sinyal 0-5V aralığında değişmektedir. Okunan sinyal 12bit çözünürlüğe sahiptir ve periyodu 1ms'dir. Girişin yapısına göre çıkış sinyalini yukarıya, giriş gerilimine (pull-up, PU) ya da aşağıya, toprağa (pull-down, PD) çekecek dirençler eklenmiştir. Sistemin analog girişleri şunlardır:

- Hızlanma işareti; motosiklet üzerinde bulunan gaz potansiyometresi üzerinden alınmıştır.
- Fren işareti; elektrikli frenleme için, sol elcik üzerine gaz işareti için kullanılan potansiyometre takılmıştır. Kullanıcı frenlemek istediğinde bu konu öne doğru çevirecektir. El ile sıkılan mekanik fren, deneyler esnasında elektrikli frenleme ile ilgili bir sorun olursa kullanılabilir durumdadır.
- Mekanik fren işareti; mekanik fren devrede sinyalini taşır. Stop lambası müşirinden veri alınmıştır.
- Batarya akımı; bir akım sensörü üzerinden veri alır.
- Batarya gerilimi; bir gerilim sensörü devresi üzerinden veri almaktadır.

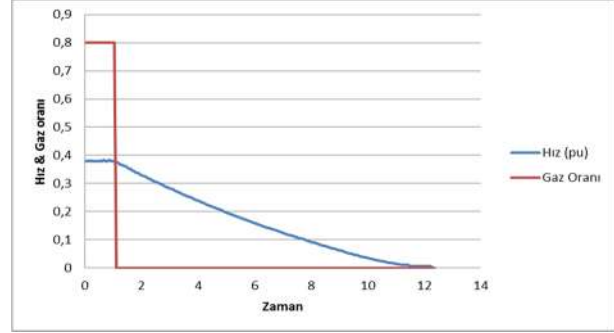
4.2. Deneysel Çalışmalar (Experiments)

Hazırlanan deneysel elektrikli motosiklet üzerinde, önerilen TEF yöntemine uygun olarak, geri kazanımlı-dinamik-ters akımlı frenleme yöntemleri arasındaki geçişler incelenmiştir. Deneyler esnasında ölçülen motor hızı, sayısal devrenin ölçebileceği en yüksek hız olan 16 bit'e göre, birim başına (pu, per unit) oran olarak verilmiştir. Ölçümlerde batarya giriş-çıkış akımı izlenmiştir. Ayrıca, EKÜ üzerinden alınan hız-frenleme oranı vb. veriler ile osiloskop çıktıları karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Deney 1: Doğal Yavaşlama (Experiment 1: Natural Slowdown)

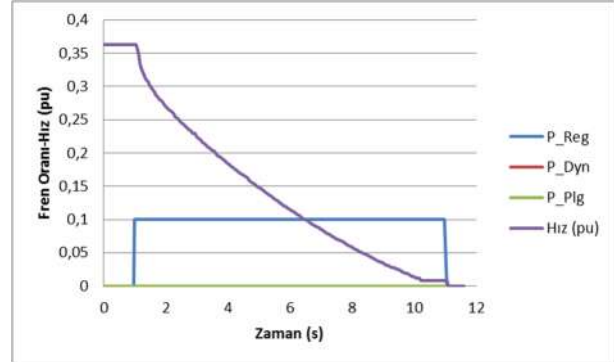
Sistemin doğal yavaşlama davranışının anlaşılabilmesi için gaz oranı %80 olarak ayarlanmış ve hiçbir frenleme yöntemi kullanılmadan duruşu gözlemlenmiştir. Bu gaz oranında sistem 0,38pu hıza ulaşmış ve yaklaşık 11.4s'de

durmuştur. Sistemin ölçüm verileri Şekil 11'de görülebilir

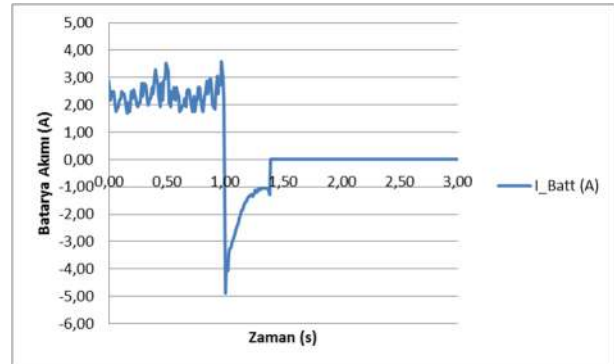


Şekil 11. Doğal yavaşlama (Natural deceleration)

4.2.2. Deney 2: Hız 0,36pu, SOC %70, Fren oranı %10 (Experiment 2: Speed 0,36pu, SOC %70, Brake Rate %10)



Şekil 12. SOC %70, K_b %10 için hız ve fren oranı (Speed and brake rate for SOC %70, K_b %10)

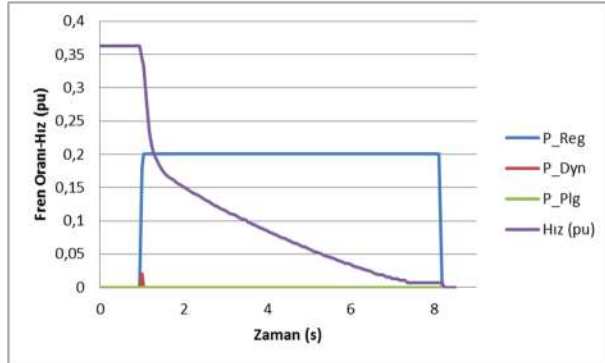


Şekil 13. SOC %70, K_b %10 için batarya akımı (Battery current for SOC %70, K_b %10)

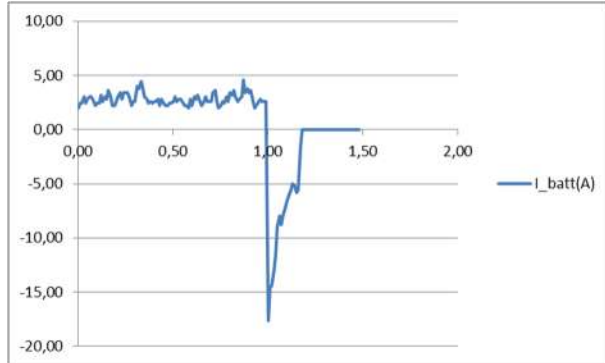
Bu deneyde SOC'nin %70 olduğu durumda yavaşlama incelenmiştir. Bu SOC'de %80 gaz oranı ile elde edilen hız 0,36pu'dur (önceki deneyler nedeniyle batarya uç gerilimi bir miktar düşmüştür). Geliştirilen algoritmaya göre, bu şarj oranında yalnız geri kazanımlı frenleme yapılması beklenmektedir. Deney esnasında yapılan ölçümlerde sadece geri kazanımlı frenleme isteği

görülmüştür. Bu bağlamda bulanık mantık kontrolcüsünün amacına uygun çalıştığı söylenebilir. %10 fren oranı ile sistemin yaklaşık 9,9 s'de durduğu gözlemlenmiştir. Osiloskop ölçümleri incelendiğinde bu fren oranında bataryaya yalnızca 0,42s süresince akım basıldığı, maksimum 5A'ye ulaşıldığı görülmüştür. Bu da, hızın 0,18 pu'nun aşağısına düştüğü durumda, endüklenen ters EMK'nın bataryaya akım basabilecek kadar yükseltilmediğini gösterir. Öngörülmediği şekilde yükseltici devre hız belirli bir değerinin altına indiğinde bataryaya enerji basabilecek seviyede gerilim yükseltmesi yapamamaktadır. İlgili ölçüm verileri ve osiloskop çıktıları Şekil 12 ve 13'te görülebilir.

4.2.3. Deneysel 3: Hız 0,36pu, SOC %70, Fren oranı %20 (Experiment 3: Speed 0,36pu, SOC %70, Brake Rate %20)



Şekil 14. SOC %70, K_b %20 için hız ve fren oranı (Speed and brake rate for SOC %70, K_b %20)

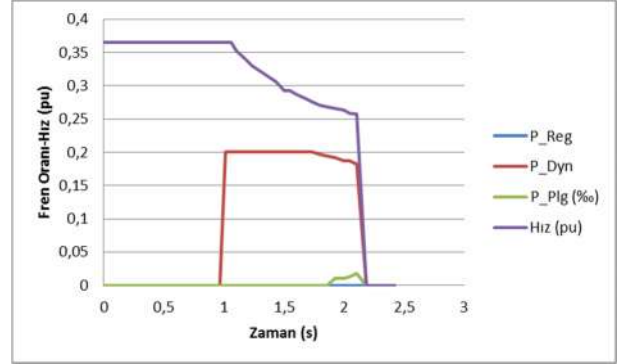


Şekil 15. SOC %70, K_b %20 için bataryaya akımı (Battery current for SOC %70, K_b %20)

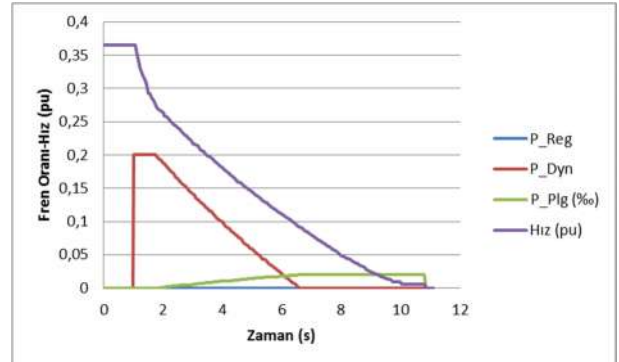
Bu deneyde bir öncekine göre frenleme oranı %20'ye çıkarılmıştır. Frenlemenin başında çok kısa bir süre dinamik frenleme görülmüştür. Bu da yine TEF bulanık mantık kontrolcüsünde ani frenleme isteği durumunun tetiklendiği anlamına gelir ki kontrolcünün doğru çalıştığını göstermektedir. %20 frenleme ile yavaşlandığında sistemin yaklaşık 7,1 s'de durduğu gözlemlenmiştir. Bu, %10 frenleme oranında elde edilen 9,9s'lik durma süresinden yaklaşık %30 daha kısa bir

süredir. Ancak, osiloskop ölçümleri incelendiğinde bu fren oranında bataryaya yalnızca 0,18s süresince akım basıldığı, maksimum 17A'ye ulaşıldığı görülmüştür. Bu da, yine hızın yaklaşık 0,18pu'nun aşağısına düştüğü durumda, endüklenen ters EMK'nın bataryaya akım basabilecek kadar yükseltilmediğini gösterir. İlgili ölçüm verileri ve osiloskop çıktıları Şekil 14 ve 15'te görülebilir.

4.2.4. Deneysel 4: Hız 0,36pu, SOC %95, Fren oranı %20 (Experiment 4: Speed 0,36pu, SOC %95)



Şekil 16. SOC %95, K_b %20, K_p sabit için hız ve fren oranı (Speed and brake rate for SOC %95, K_b %20, K_p constant)



Şekil 17. SOC %95, K_b %20, K_p %10 ölçekli durum için hız ve fren oranı (Speed and brake rate for SOC %95, K_b %20, K_p %10 scaled)

Bu deneyde yüksek şarj durumunda ters akımla frenleme yönteminin de çalışması incelenmiştir. Ters akımla frenleme düşük hızlarda devreye girdiği ve boştaki sistemi çok hızlı durdurduğu için bu hız ve fren oranında iki deney yapılmıştır. İlkinde ters akımla frenleme yöntemi için bulanık mantık kontrolcüsünün ürettiği çıkış aynen alınmıştır. Bu deneyde ters akımla frenleme devreye girdikten çok kısa bir süre sonra sistem durduğundan dinamik ve ters akım arasındaki geçiş, mevcut ölçüm cihazları ile düzgün ölçülemez. İkinci deneyde ise ters akım referansı %10 oranında ölçeklenerek sisteme verilerek hem dinamik kontrolcüsünün devreden çıkışı, paralelinde de ters akım kontrolcüsünün devreye girişi incelenebilmiştir. Ters akımla yavaşlama için üretilen referans tam olarak

sisteme verildiğinde sistemin yaklaşık 1,1 s’de durduğu gözlemlenmiştir. Burada ters akım 0,9 s’de devreye girmiş sonrasında sistemi 0,2 s içinde durdurmuştur. Ölçüm sistemi ters akım frenleme oranının tepe değerini (teorik olarak %20’ye ulaşması gerekir) yakalayamamıştır. Ters akımla frenleme ile dinamik arasındaki geçişin iyi izlenebilmesi için sisteme %10 ölçekleme oranında verildiği deneyde ise, dinamik frenleme oranındaki azalma ile ters akımla frenlemedeki artış, aracın hızının azalması ile uyumlu olarak gözlemlenmiştir. Belirli bir hız (yaklaşık 0,1 pu) sonrasında ters akımla frenleme oranı maksimum değerine (%20 frenleme oranı ile %10 ölçekleme oranı çarpımından; 0,02) ulaştığı görülmüştür ki bu da bulanık mantık kontrolcünden beklenildiği şekildedir. İlgili ölçüm verileri Şekil 16 ve 17’de görülebilir.

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR (RESULTS AND REMARKS)

Bölüm 4’te anlatılan deneylerde, belirli hızlarda geri kazanımlı frenlemeden efektif olarak yararlanılabildiği görülmüştür. Bu frenleme tipinin etkinliği batarya şarj durumu düştükçe ve aracın hızı arttıkça artacaktır. Bulanık mantık kontrolcü bu frenleme tipini etkin olarak TEF yöntemi içerisine katabilmektedir. Şarj durumunun yüksek olduğu durumlarda beklenildiği üzere dinamik frenleme devreye girmektedir. Bulanık mantık kontrolcünün buradaki çalışması da TEF yöntemine uygun olarak gerçekleşmektedir. Sistem, bataryaya gönderilemeyen enerjiyi dirençlere yönlendirebilmektedir. Ters akımla frenleme için kontrolcünün oluşturduğu frenleme oranı sistemi çok çabuk durdurma yeteneğine sahiptir. Bu yöntemin daha düşük oranlarda kullanılması ya da daha düşük hızlarda devreye girmesi faydalı olabilir. Yüklü durumda çalışmada bu yöntemi iyi incelemek gerekecektir. Ancak bulanık mantık kontrolcüsü yine deneysel olarak doğru çalışarak ters akımla frenlemeyi de uygulayabilmektedir.

Bu makalede bahsi geçen çalışma 1591.STZ.2012-2 kodlu SANTEZ projesi kapsamında, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.’nin elektrikli araçlarında kullanılacak frenleme kontrolcüsü geliştirilmesi çalışmasının bir parçasıdır. Ayrıca, Can Gökçe’nin İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği’nde devam etmekte olduğu doktora çalışmalarını içermektedir. Makalede anlatılan düzen ve algoritmalar, “Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi” başlık ve TR20120009307 numara ile Türk Patent Ofisi’ne, “Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren” başlık ve DE102013215763 numara ile Alman Patent Ofisi’ne incelemeli patent olarak tescil edilmek üzere başvurulmuştur. İlgili başvurular patentlenme (patent pending) aşamasındadır [24, 25].

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] ERTRAC European Road Transport Research Advisory Council, «ERTRAC European Road Transport Research Advisory Council,» European Union, 2008.
- [2] FUIRORE Future Road Vehicle Research, «R&D Technology Roadmap,» European Union, 2007.
- [3] IEA - International Energy Agency, «Electric and Plug in Hybrid Electric Vehicle (EV/PHEV),» 2009.
- [4] NREL National Renewable Energy Laboratory, «A Renewable Energy Community: Key Elements,» US Department of Energy, 2008.
- [5] R. Burgelman ve A. Grove, «An Electric Plan for Energy Resilience,» *The McKinsley Quarterly*, no. 4, 2008.
- [6] Global Insight, «World: Electric Dreams: Will Lithium-Ion Battery Technology Represent the Tipping Point for Hybrids and Electric Cars?,» Global Insight, 2008.
- [7] C. Lang, «Plugging into Tomorrow’s Vehicles,» Price Waterhouse Coopers Automotive Institute, 2008.
- [8] Tesla Motors, Inc., «Tesla Model S Specs,» Aralık 2014. [Çevrimiçi]. <http://www.teslamotors.com/models/specs>.
- [9] Toyota, «Yeni Nesil Prius,» Aralık 2014. [Çevrimiçi]. <http://www.toyota.com.tr/new-cars/prius/index.json>.
- [10] Y. Gao, L. Chu ve M. Ehsani, «Design and Control Principles of Hybrid Braking System for EV, HEV and FCV,» %1 içinde *VPPC 2007 - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007.
- [11] C. Gökçe, «Modeling and Simulation of a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle,» İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [12] H. Jene, E. Scheid ve H. Kemper, «HEV Concepts – Fuel Savings and Costs,» *ICAT’04 - International Conference on Automotive Technologies*, İstanbul, 2004.
- [13] M. Ji-Yank ve et.al., «A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 56, no. 6, 2009.
- [14] C. Gökçe, Ö. Üstün ve A. Y. Yeksan, «Dynamics and Limits of Electrical Braking,» *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, 2013.
- [15] K. Zang, J. Li, M. Ouyang, J. Gu ve Y. Ma, «Electric Braking Performance Analysis of

- PMSM for Electric Vehicle Applications,» *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 2011.
- [16] J. Guo, J. Wang ve B. Cao, «Application of Genetic Algorithm for Braking Force Distribution of Electric Vehicles,» *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009.
- [17] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay ve A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, CRC Press LLC, 2005.
- [18] United Nations, *ECE R13. Regulation; Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles of Categories M, N and O with Regard to Braking*, 2006.
- [19] FIAT Technical Norms, *Vehicle Subsystem Specifications - Fren ve Yan Sistemleri*, 2010.
- [20] J. Zhang, X. Lu, J. Zue ve B. Li, «Regenerative Braking System for Series Hybrid Electric City Bus,» *The World Electric Journal*, cilt 2, no. 3, 2008.
- [21] S. DeMers, *Mechanical and Regenerative Braking Integration for a Hybrid Electric Vehicle*, Master Tezi, Waterloo Üniversitesi, Kanada, 2008.
- [22] C. Gökçe, «A Brake System for Vehicles with Electric Drive». Avrupa Birliği (EPO) Patent EP2463163(B1), 17 Nisan 2013.
- [23] The MathWorks Inc., «What Is Sugeno-Type Fuzzy Inference?,» The MathWorks Inc., [Çevrimiçi]. <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-sugeno-type-fuzzy-inference.html>. [05 12 2014 tarihinde erişilmiştir].
- [24] C. Gökçe ve Ö. Üstün, «Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi». Türkiye Cumhuriyeti Patent TR20120009307, 9 9 2012.
- [25] C. Gökçe ve Ö. Üstün, «Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren». Almanya Federal Cumhuriyeti Patent DE102013215763, 9 9 2013.