

## Elektrikli Araçlarda Elektriksel Frenlemenin Bulanık Mantık Tabanlı Karar Destek Sistemleri ile Tasarlanması

Mehmet Şen<sup>1\*</sup>, Muciz Özcan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye  
(\*mehmet.sen@asbu.edu.tr)

**Özet** – Elektrikli araçlarda elektrik, mekanik ve kimyasal bileşenler kullanılmaktadır. Bu bileşenler çevre koşullarından ve aracın kullanıldığı yol durumundan dolayı farklı dinamiklere sahip olabilir. Bu nedenle aracın ortam durumuna göre dinamiklerinin ayarlanması bulanık mantık sistemi ile gerçekleştirilebilir. Bu çalışma elektrikli araçlarda, elektriksel frenlemenin geliştirilmesi için bulanık mantık tabanlı bir uygulama önermektedir. MATLAB/Simulink ile gerçekleştirilen uygulamada 3 farklı elektriksel frenleme çıktısı vardır. Frenleme tipinin seçiminde; batarya doluluk oranı (SOC), araç hızı, frenleme oranı ve batarya sıcaklığı değişken olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elektrikli araçlarda en uygun frenlemenin seçimi için 81 farklı kural belirlenmiştir. Belirlenen kontrol sisteminde araç kullanımı boyunca güvenlik ön planda olmak üzere, araçtan en yüksek seviyede geri kazanım elde edilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen kontrol sistemi modelinde en yüksek seviyeden geri kazanım elde edilirken, batarya yaşlanması dikkate alınmıştır. Bulanık mantık çıktısı incelendiğinde yüksek akım ve düşük akım gibi anormal durumlarda bataryaya enerji akışı gerçekleşmemektedir. Bu sayede elektrikli araçlarda batarya bozulmasını en aza indirmek için temel stratejiler sunulmuştur.

**Anahtar Kelime** – batarya sıcaklığı, bulanık mantık, dinamik frenleme, elektrikli araç, faydalı frenleme

### I. GİRİŞ

Fosil yakıtların kısıtlı olması ve yaşanan enerji krizleri başta olmak üzere, elektrikli araçlara olan ilgi her geçen gün artmaktadır [1]. Artan talep ile birlikte önümüzdeki yıllarda elektrikli araçları yollarda daha fazla göreceğiz. Başta Türkiye olmak üzere elektrikli araçlar üzerinde ülkeler araştırma ve geliştirme çalışmalarına hız vermiştir [2]. Bu araştırma konularından bir tanesi de elektriksel frenleme sistemidir. Elektrikli araçların getirmiş olduğu yüksek tork avantajı beraberinde güvenli frenleme sisteminin de geliştirilmesini beraberinde getirir [3, 4].

Elektrikli araçların sağlamış olduğu avantajlarının yanı sıra menzil değeri karşımıza bir dezavantaj olarak çıkmaktadır [5]. Bu konuda geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Ancak ülkelerin elektrikli araçların yaygınlaşmasını istemelerindeki temel neden çevreci olmasıdır [6]. Bu yüzden çalışmalar batarya teknolojilerinin geliştirilerek menzil değerinin artırılmasından ziyade enerjiyi en verimli kullanan araçlar üzerine yoğunlaşmıştır [7].

Elektrikli araçlarda enerjinin en uygun şekilde kullanımı ve araç verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalardan biride faydalı frenleme sistemidir [8]. Hibrit ve elektrikli araçlarda menzil değerini artırmak elektriksel fren sistemi üzerinde yapılan çalışmalar mevcuttur [9, 10]. Burada temel amaç güvenli bir fren sisteminin yanı sıra, faydalı frenlemeden yüksek seviyede geri kazanım elde edilmesidir.

Faydalı frenleme yapısı incelendiğinde, frenleme enerjisinin belirli hızlar ile sınırlı olduğu görülür. Bu hızlar

yeterli oranda ters elektromotor kuvveti oluşturarak bataryayı şarj etmesi de zordur [11]. Bu nedenle, faydalı frenlemeden geri kazanım elde edilebilmesi için belirli hızların üzerine devreye girmeli, düşük hızlarda ise mekanik frenleme sistemi kullanılmalıdır.

Elektrikli araçlar faydalı frenlemede yapılarak önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilir [12]. Ayrıca elektriksel frenleme ile hidrolik frenleme sisteminde kullanılan disk ve balata gibi belirli sürelerde değiştirilmesi gereken parçaların maliyetlerinden tasarruf sağlanır. Bu sayede daha uzun sürelerde değişmesi gereken parçaların güvenilirliği artar. Bu yüzden elektrikli araçlarda mekanik frenleme sistemi olabildiğince az veya hiç kullanılmamalıdır [13].

Bu çalışmada elektriksel frenlemenin en geniş aralıkta kullanılması için bir bulanık mantık tabanlı karar destek sistemi sunulmaktadır. Çalışmada faydalı frenlemeden en yüksek düzeyde enerji elde edilmesi sağlanırken, faydalı frenlemenin bataryaya vermiş olduğu zararlar en düşük seviyeye indirilerek batarya ömrü iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

### II. MATERYAL VE METOT

#### A. Elektriksel Frenleme Yöntemleri

Elektrikli araçların, elektriksel frenlemesi için üç farklı metod bulunmaktadır. İlk olarak faydalı frenleme olarak bildiğimiz enerji geri kazanımlı frenleme, araç belirli bir hızın üzerindeki iken araç verimini artıracak şekilde frenleme yapılarak bataryaya enerji depolanması gerçekleştirir [14]. Bir diğer yöntem, araç düşük hızlarda iken güvenli bir şekilde

aracın durması için kullanılan yöntem olan dinamik frenleme sistemidir [15]. Dinamik frenleme sisteminde yeteri kadar akım oluşmadığı için geri kazanım yapılamamaktadır [16]. Ancak bu yöntemde yükseltme yapılarak düşük hızlarda istenilen akım değerine ulaşarak gerekli kazanım elde edilebilir. Son yöntem ise aracın ani frenlemesi gerektiği durumlarda ters yönde akım akması sağlanarak araç en kısa sürede durdurulması sağlanır [17].

### B. Elektriksel Frenlemede Kontrol Sistemi

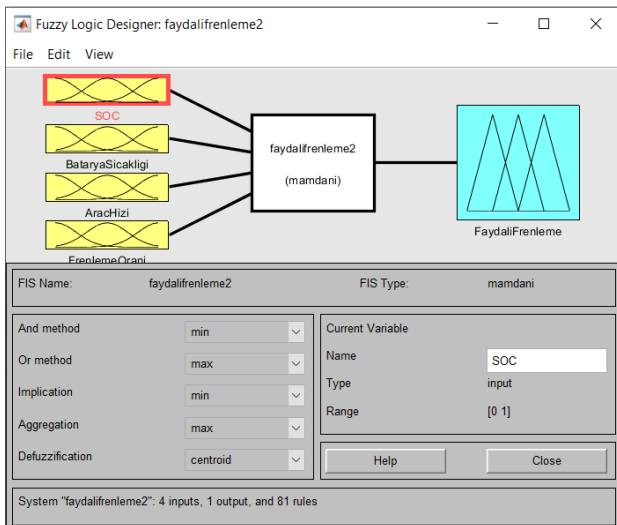
Elektriksel frenlemenin kontrol sisteminde MATLAB/Simulink Fuzzy Logic Toolbox'ı kullanılmıştır. Bulanık mantıkta en iyi frenleme yöntemini elde edebilmek için girdi olasılıklarının seviyeleri üzerinde çalışır. Bulanık mantığın çalışma mantığı insanın akıl yürütmesine benzerlik göstermektedir [18]. Girdilerin, en hangi kümeye ait olduğuna dair karar verme mekanizması matematiksel bir yöntemle elde edilir. Bu sayede en uygun çıktı sağlanmış olur. Bu çalışma güvenlik, yüksek geri kazanım ve batarya sağlığı açısından irdelenmiştir. Bu etkenlere bağlı olarak girdiler; SOC, batarya sıcaklığı, araç hızı ve frenleme oranı olarak seçilmiştir.

### C. Bulanık Mantık Kontrol Algoritması

Geliştirilen bulanık mantık kontrolcüsünün temel mantığı;

- Şarj oranı düşük ise faydalı frenleme,
- Şarj oranı düşük, batarya sıcaklığı yüksek ise dinamik frenleme,
- Şarj durumu ve batarya sıcaklığı yüksek ise ters akımla frenleme
- Şarj durumu yüksek araç hızı düşük ise ters akımla frenleme yapılması mantığı ile oluşturulmuştur.

Kontrolcü içerisinde D düşük, O orta ve Y yüksek seviye olarak belirlenmiştir. Şekil 1'de bulanık mantık kontrol yapısı gösterilmiştir.



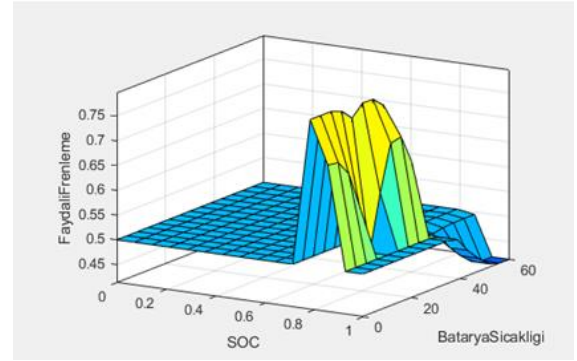
Şekil 1. Bulanık mantık kontrol yapısı

Faydalı frenleme için yazılan 81 kural MATLAB/Simulink Fuzzy Logic Toolbox bölümüne girilmiştir. Kuralın bir kısmı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Faydalı frenleme kural tablosu

SOC	Araç Hızı	Frenleme Oranı	Batarya Sıcaklığı	Faydalı Frenleme
D	D	D	D	D
D	D	D	O	D
D	D	D	Y	D
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
D	O	D	D	Y
D	O	D	O	Y
D	O	D	Y	D

Kural tablosuna uygun olarak değişkenler ile faydalı frenleme arasındaki ilişki Şekil 2'de gösterilmiştir.



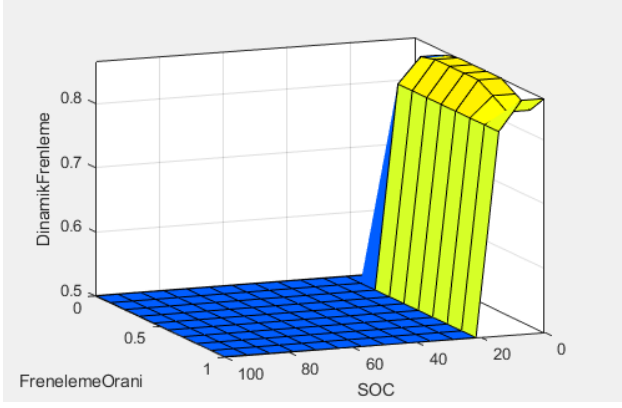
Şekil 2. Faydalı frenleme oranının grafiksel görünümü

Elektrikli aracın tamamen elektriksel frenleme ile durdurabilmesi için faydalı frenleme, dinamik frenleme ve ters akımla frenleme toplamının %100 olması gerekmektedir. Bu bağlamda dinamik frenlemede de benzer şekilde bulanık mantık kural tablosu oluşturulmuş ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Dinamik frenleme kural tablosu

SOC	Araç Hızı	Frenleme Oranı	Batarya Sıcaklığı	Faydalı Frenleme
D	D	D	D	Y
D	D	D	O	Y
D	D	D	Y	Y
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
D	O	D	D	D
D	O	D	O	D
D	O	D	Y	Y

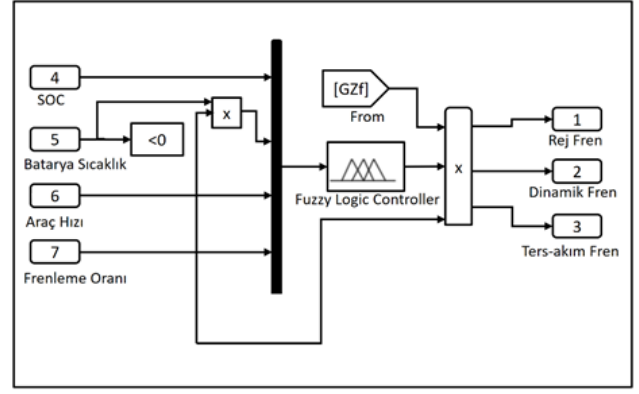
Kural tablosuna uygun olarak değişkenler ile dinamik frenleme arasındaki ilişki Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dinamik frenleme oranının grafiksel görünümü

Kural tablosunda faydalı frenleme ve dinamik frenlemenin düşük olduğu durumlarda ters akımla frenleme sistemi devreye girmektedir. Batarya sıcaklığının yüksek olduğu, SOC yüksek ve hızın düşük olduğu veya güvenlik gereği ani frenleme yapılması gerektiğinde ters akım frenleme uygulanmaktadır.

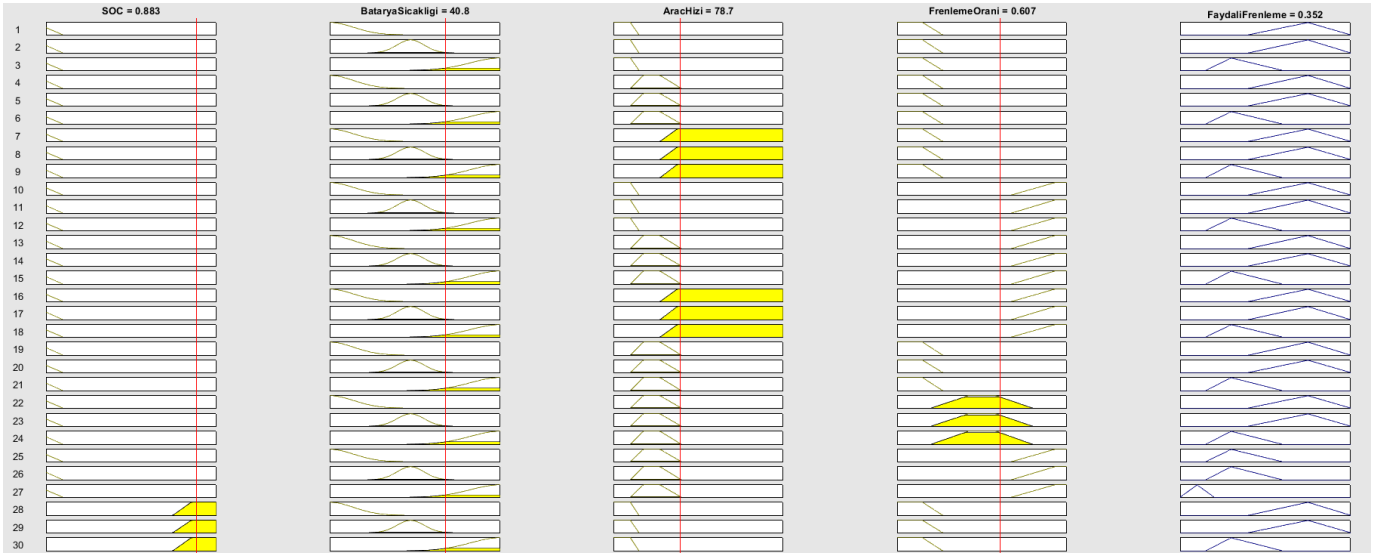
Elektriksel fren sistemi modelinde araç fren tipi dağılımının hesaplanabilmesi için Simulink alanı oluşturulmuştur. Elektriksel fren sisteminin batarya doluluk oranı, araç hızı, frenleme oranı ve batarya sıcaklığına bağlı kont-rolü bulanık mantık yöntemi ile yapılmıştır. Elektriksel fren sisteminin bulanık mantık ile kontrolünü sağlayan Simulink modeli Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Elektriksel fren sisteminin bulanık mantık ile kontrolü Simulink modeli

### III. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrikli araçların elektriksel frenleme yöntemi kullanılarak bulanık mantık tabanlı karar destek sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada elektriksel frenleme yöntemlerinden araç durumuna en uygun frenleme yönteminin seçilmesi sağlanmıştır. Elektriksel frenleme yöntemlerinin karakteristiklerine göre MATLAB/Simulink Fuzzy Logic Toolbox'ında kural tablosu oluşturulmuştur. Kural tablosu oluşturulurken araç güvenliği, batarya sağlığı ve geri kazanım oranı göz önüne alınmıştır. Şekil 5'te verilen örnek bir değerde faydalı frenlemenin geri kazanım yüzdesi gösterilmektedir. Bu sayede elektrikli araçlarda faydalı frenleme esnasında batarya sağlığı korunacak ve güvenli bir frenleme gerçekleştirilecektir.



Şekil 5. Matlab/Simulink bulanık mantık kural tablosu çıktısı

### REFERANSLAR

- [1] M. Özcan and H. Günay, "Control of diesel engines mounted on vehicles in mobile cranes via CAN bus," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 21, pp. 2181-2190, 2013, doi: 10.3906/elk-1203-96.
- [2] H. Oğuz, M. Özcan, M. Yağcı, and A. O. Özkan, "Automation of the Two Stage Biodiesel Production Process," *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 254-260.
- [3] Z. J. Zhang, Y. Y. Dong, and Y. W. Han, "Dynamic and Control of Electric Vehicle in Regenerative Braking for Driving Safety and Energy Conservation," (in English), *J Vib Eng Technol*, vol. 8, no. 1, pp. 179-197, Feb 2020, doi: 10.1007/s42417-019-00098-0.
- [4] W. Xu, H. Chen, H. Y. Zhao, and B. T. Ren, "Torque optimization control for electric vehicles with four in-wheel motors equipped with regenerative braking system," (in English), *Mechatronics*, vol. 57, pp. 95-108, Feb 2019, doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.11.006.
- [5] Q. W. Xu, C. Zhou, H. Huang, and X. F. Zhang, "Research on the Coordinated Control of Regenerative Braking System and ABS in Hybrid Electric Vehicle Based on Composite Structure Motor," (in English), *Electronics-Switz*, vol. 10, no. 3, Feb 2021, doi: 10.3390/electronics10030223.
- [6] D. M. Wu, Y. Li, J. W. Zhang, and C. Q. Du, "Optimal regenerative braking torque of permanent-magnet synchronous motor in electric vehicles," (in English), *Int J Heavy Veh Syst*, vol. 27, no. 3, pp. 359-386, 2020.

- [7] M. R. Pinandhito, K. Indriawati, and M. Harly, "Active Fault Tolerant Control Design in Regenerative Anti-lock Braking System of Electric Vehicle with Sensor Fault," (in English), *Aip Conf Proc*, vol. 2088, 2019.
- [8] I. Pielecha, W. Cieslik, and A. Szalek, "Energy recovery potential through regenerative braking for a hybrid electric vehicle in a urban conditions," (in English), *Top C Ser Earth Env*, vol. 214, 2019.
- [9] M. G. S. P. Paredes and J. A. Pomilio, "Comparative Strategies of Control for Regenerative Braking in Electric Vehicles," (in English), *Brazil Power Electr*, 2019.
- [10] C. C. Monroy, C. A. Siachoque, I. C. Duran-Tovar, and A. R. M. Guerra, "Comparative Study of Regenerative Braking System and Regeneration with Constant Kinetic Energy in Battery Electric Vehicles," (in Spanish), *Ingenieria-Bogota*, vol. 25, no. 3, Sep-Dec 2020, doi: 10.14483/23448393.16220.
- [11] S. Manoharan, K. Krishnamoorthy, A. Sathyaseelan, and S. J. Kim, "High-power graphene supercapacitors for the effective storage of regenerative energy during the braking and deceleration process in electric vehicles," (in English), *Mater Chem Front*, vol. 5, no. 16, pp. 6200-6211, Aug 21 2021, doi: 10.1039/d1qm00465d.
- [12] S. Lupberger, W. Degel, D. Odenthal, and N. Bajcinca, "Nonlinear Control Design for Regenerative and Hybrid Antilock Braking in Electric Vehicles," (in English), *Ieee T Contr Syst T*, vol. 30, no. 4, pp. 1375-1389, Jul 2022, doi: 10.1109/Tcst.2021.3109340.
- [13] Z. Q. Liu, S. Lu, and R. H. Du, "A genetic-fuzzy control method for regenerative braking in electric vehicle," (in English), *Int J Comput Sci Mat*, vol. 11, no. 3, pp. 263-277, 2020.
- [14] J. Liang, P. D. Walker, J. Ruan, H. T. Yang, J. L. Wu, and N. Zhang, "Gearshift and brake distribution control for regenerative braking in electric vehicles with dual clutch transmission," (in English), *Mech Mach Theory*, vol. 133, pp. 1-22, Mar 2019, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.08.013.
- [15] W. F. Li, H. P. Du, and W. H. Li, "Driver intention based coordinate control of regenerative and plugging braking for electric vehicles with in-wheel PMSMs," (in English), *Iet Intell Transp Sy*, vol. 12, no. 10, pp. 1300-1311, Dec 2018, doi: 10.1049/iet-its.2018.5300.
- [16] M. Kumar, K. A. Singh, K. Chaudhary, R. K. Saket, and B. Khan, "Regenerative Braking in Electric Vehicle Using Quadratic Gain Bidirectional Converter," (in English), *Int T Electr Energy*, vol. 2022, Jan 31 2022.
- [17] K. Krishnamoorthy, P. Pazhamalai, V. K. Mariappan, S. Manoharan, D. Kesavan, and S. J. Kim, "Two-Dimensional Siloxene-Graphene Heterostructure-Based High-Performance Supercapacitor for Capturing Regenerative Braking Energy in Electric Vehicles," (in English), *Adv Funct Mater*, vol. 31, no. 10, Mar 2021.
- [18] S. C. V. Kumar, K. Karunanithi, S. P. Raja, S. Ramesh, P. Chandrasekar, and R. Obulupathy, "Modelling of electric vehicle charging station and controlled by fuzzy logic controller with different modes of operation," (in English), *J Control Decis*, May 26 2022, doi: 10.1080/23307706.2022.2074901.