

Saygın Kaynaklardan YZ Destekli bir Araştırma

Elektrikli ve Hibrit Araç Motorlarında Nadir Toprak Elementlerin Kullanımı

Neodimyum-Demir-Bor (Nd-Fe-B) Mıknatısların İşlevi, Gerekli Miktarı ve Alternatifleri

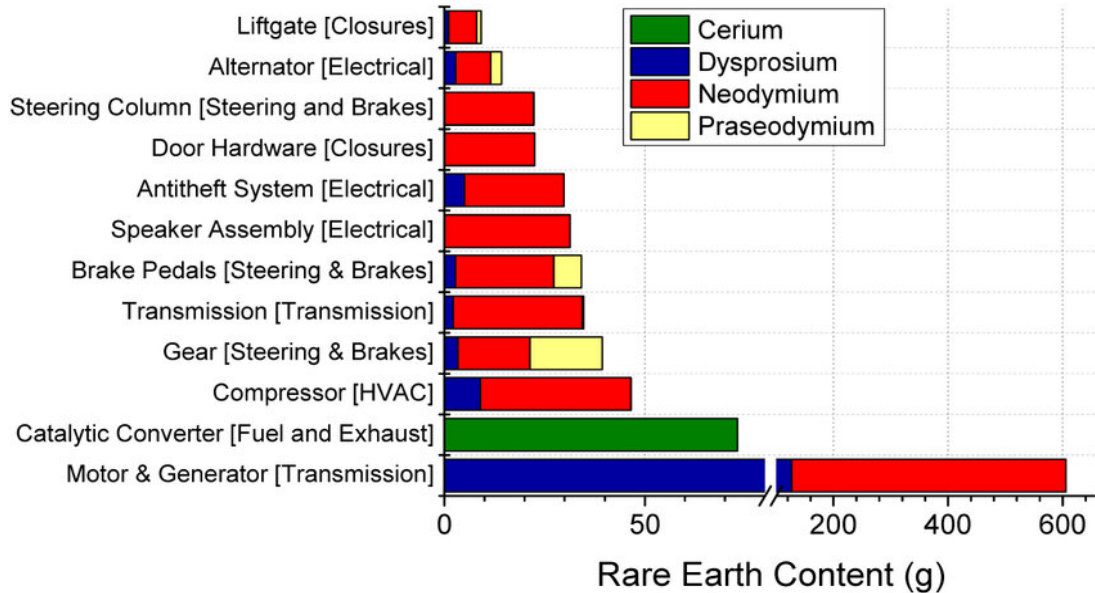
Hazırlayan : Yüksel Atakan ybatakan4@gmail.com 04.10.2026

Özet. Nadir toprak elementlerinden neodimyum (Nd), pratikte praseodimyum (Pr), disprosyum (Dy) ve terbiyum (Tb) ile birlikte Nd-Fe-B kalıcı mıknatıslarında kullanılır. Bu mıknatıslar rotorda sabit bir manyetik akı üreterek motorun tork yoğunluğunu ve verimini artırır. Literatüre göre bir elektrikli veya hibrit aracın çekiş motoru ortalama 1–2 kg Nd-Fe-B içerir; uç değerler 0 ile 4 kg arasındadır. Bu yazımızda mıknatısın işlevi, araç sınıflarına göre miktarlar, hesap örneği ve alternatifler (ferrit, SmCo, Fe₁₆N₂, harici uyarımlı senkron motor, asenkron motor, Dy azaltma teknikleri) örneklerle incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Nd-Fe-B, kalıcı mıknatıslı senkron motor, nadir toprak elementleri, elektrikli araç, ferrit, harici uyarımlı senkron motor.

1. Giriş

Elektrikli araçların yaygınlaşması, çekiş motorlarında kullanılan nadir toprak mıknatıslarına olan talebi hızla artırmıştır. Nd-Fe-B mıknatıslar 1984'te Sumitomo ve General Motors laboratuvarlarında birbirinden bağımsız olarak keşfedilmiş [1, 2] ve bugün bilinen en yüksek enerji yoğunluklu ticari kalıcı mıknatıs sınıfını oluşturmuştur [3, 4]. Dünya genelinde elektrikli araçların yaklaşık %80–90'ında kalıcı mıknatıslı çekiş motoru kullanılmakta ve bunların hemen hepsi Nd-Fe-B esastır [9, 13]. Nadir toprak üretimi ve mıknatıs imalatının birkaç ülkede yoğunlaşması ile 2025'te uygulanan ihracat kısıtları, alternatif arayışlarını stratejik bir mühendislik konusu haline getirmiştir [16].

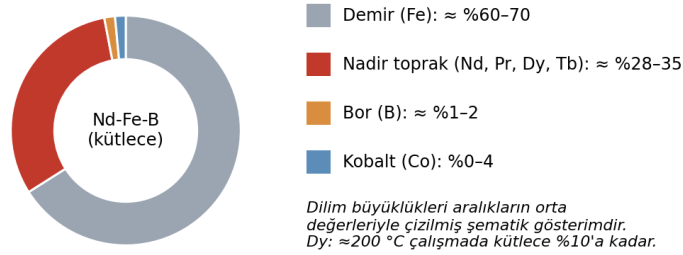


https://www.researchgate.net/figure/Top-12-vehicle-parts-containing-rare-earths-and-their-rare-earth-content_fig5_277639048 Araçların önemli parçalarında kullanılan 12 nadir toprak elementi gram olarak

2. Nd-Fe-B Mıknatısların Motordaki İşlevi

2.1 Malzemenin yapısı ve özellikleri

Mıknatısın ana fazı tetragonal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ bileşiğidir. Sinterlenmiş mıknatıslar kütlece kabaca %28–35 nadir toprak elementi (Nd, Pr, Dy, Tb), %60–70 demir ve %1–2 bor içerir [6, 7]. Nd-Fe-B'nin zayıf yönü, Curie sıcaklığının düşük (yaklaşık 310–330 °C) olması ve sıcaklık arttıkça koersivitenin (demanyetizasyona direncin) hızla düşmesidir. Hibrit araç motorlarında mıknatıs sıcaklığı yaklaşık 450 K (≈ 180 °C) düzeyine çıkabildiğinden [5], Nd'nin bir kısmı Dy veya Tb ile değiştirilir; en yüksek sıcaklıklarda (≈ 200 °C) kütlece %10'a kadar Dy bulunabilir [6]. Dy ve Tb nadir ve pahalı olduğundan, mıknatıs tasarımının en kritik hedefi bu ağır nadir toprakların miktarını azaltmaktır [4, 5].

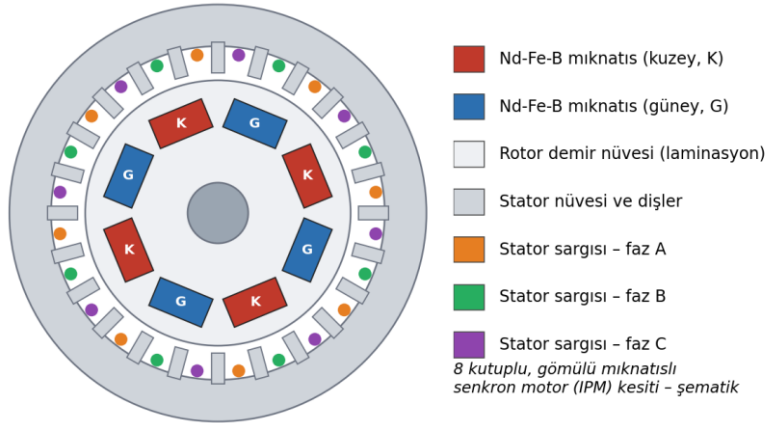


Şekil 1. Sinterlenmiş Nd-Fe-B mıknatısın tipik kütlece bileşimi (kaynak: [6, 7]).

2.2 Motordaki rolü

Kalıcı mıknatıslı senkron motorda (PMSM) rotor mıknatısları, bakır sargı akımı gerektirmeden sürekli bir uyarım akısı (ψ_{PM}) sağlar. Stator akımı bu akıyla etkileşerek tork üretir. Gömülü mıknatıslı (IPM) yapıda tork (1) numaralı denklemle ifade edilir (mıknatıs yerleşimi Şekil 2'de görülmektedir):

$$T = (3/2) \cdot p \cdot [\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (1)$$



Şekil 2. Gömülü mıknatıslı (IPM) bir çekiş motorunun şematik kesiti. Nd-Fe-B mıknatıslar rotor nüvesine yerleştirilmiş, stator sargıları üç faza bölünmüştür.

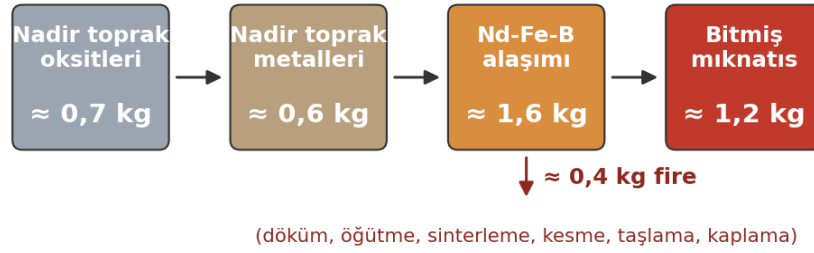
Burada p kutup çifti sayısı, i_d ve i_q akımın d–q eksen bileşenleri, L_d ve L_q ise eksen indüktanslarıdır. İlk terim mıknatıs torku, ikinci terim relüktans torkudur. Mıknatısın enerji çarpımı ne kadar yüksekse aynı torku daha küçük hacimde ve daha düşük bakır kaybıyla üretmek mümkün olur; bu da yüksek güç yoğunluğu (kW/kg) ve yüksek verim anlamına gelir. DOE raporu ve literatür derlemeleri, bu nedenle IPM motorlarının hibrit ve elektrikli araçlarda baskın tercih olduğunu ve Nd-Fe-B'nin bu motorlar için en uygun mıknatıs olduğunu belirtmektedir [7, 12].

3. Araç Motorlarında Gereken Mıknatıs Miktarı

Mıknatıs miktarı motorun tepe gücüne, kutup sayısına ve soğutma/sıcaklık tasarımına bağlı olarak değişir. DOE tedarik zinciri raporu çekiş motoru başına 1–2 kg mıknatıs malzemesi öngörür [7]. Alman geri dönüşüm projesi verilerine göre 10–20 kg'lık tipik bir rotor 1,5–2,5 kg mıknatıs taşır ve kalıcı mıknatıslı

sürücülerde 1,0–3,0 kg sinterlenmiş Nd-Fe-B bulunur [6]. Adamas Intelligence, ortalama bir PMSM'de tepe gücün her 100 kW'ı için yaklaşık 1,2 kg Nd-Fe-B gerektiğini (≈ 12 g/kW) ve üretim firesi ile birlikte bu değer 1,6 kg alaşıma çıktığını hesaplamıştır [8]. Daha geniş bir araç örnekleme dayanan bir veri derlemesi ise ortalama 1,5 kg/araç ($\approx 7,5$ g/kW), aralık olarak 0–4 kg/araç ve en yüksek 15 g/kW değerini bildirmektedir [9].

Hesap örneği. Tepe gücü 150 kW olan bir çekiş motoru için Adamas katsayısıyla (12 g/kW) mıknatıs kütlesi $\approx 1,8$ kg, veri derlemesindeki ortalama katsayısıyla (7,5 g/kW) $\approx 1,1$ kg bulunur. Mıknatısın yaklaşık %28–35'i nadir toprak olduğundan [6], 1,5 kg'lık bir mıknatıs setinde kabaca 0,4–0,5 kg nadir toprak elementi (çoğunlukla Nd ve Pr) vardır. Örnek bir orta sınıf hibrit otomobilde ise araç başına yaklaşık 532 g Nd ve 130 g Dy'nin büyük bölümünün çekiş motorunda bulunduğu bildirilmiştir [10].

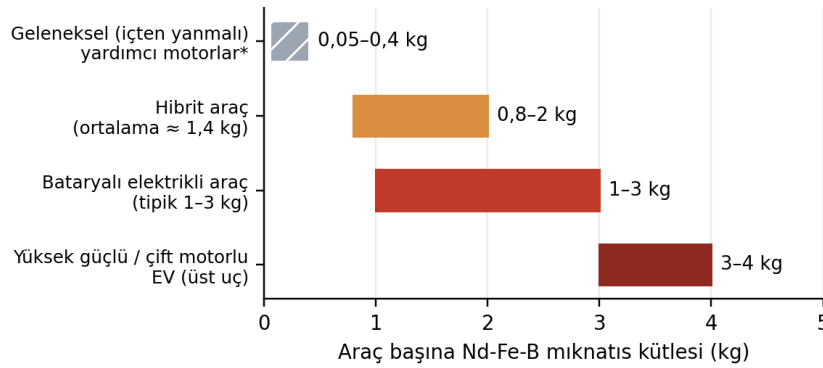


Şekil 3. Her 100 kW tepe motor gücü için hammaddeden bitmiş mıknatısa yaklaşık malzeme akışı (kaynak: [8]).

Geleneksel (içten yanmalı) araçlarda Nd-Fe-B yalnızca elektrikli direksiyon, koltuk ayar motorları ve ses sistemi gibi yardımcı birimlerde bulunur; miktar donanım düzeyine göre onlarca ile birkaç yüz gram arasında değişir ve çekiş motorlarına göre çok düşüktür [10]. Hibrit araçlarda ortalama yaklaşık 1,4 kg Nd-Fe-B ölçülmüştür [10].

Tablo 1. Araç sınıflarına göre Nd-Fe-B mıknatıs miktarları (literatür özeti)

Araç / motor sınıfı	Nd-Fe-B miktarı	Kaynak ve not
Çekiş motoru (genel)	1–2 kg	DOE tedarik zinciri raporu [7]
PM çekiş motoru (rotor)	1,5–2,5 kg (sürücü başına 1,0–3,0 kg)	Elwert ve ark. [6]
Güç bazlı katsayı	≈ 12 g/kW (üretim firesi dahil 16 g/kW)	Adamas Intelligence [8]
Elektrikli araç ortalaması	1,5 kg (0–4 kg); 7,5 g/kW	Veri derlemesi [9]
Hibrit araç	$\approx 1,4$ kg; orta sınıfta 532 g Nd + 130 g Dy	OSTI raporu [10]
Geleneksel araç (yardımcı motorlar)	Onlarca – birkaç yüz g (tahmini)	OSTI raporu [10]; büyüklük mertebesi

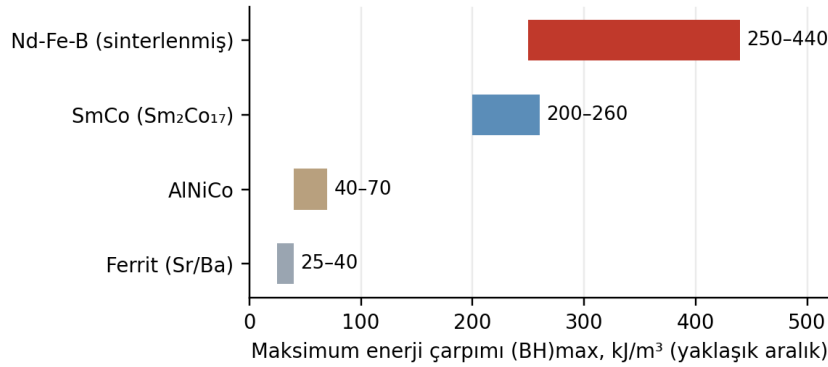


Şekil 4. Araç başına Nd-Fe-B mıknatıs kütlesi aralıkları. Aralıklar [6–10] numaralı kaynaklardaki ortalama ve uç değerlerden derlenmiş gösterimdir; *geleneksel araç aralığı tahminidir.

4. Nd-Fe-B Yerine Kullanılabilecek Seçenekler

4.1 Malzeme düzeyinde alternatifler

Başka bir mıknatıs malzemesine geçmek, genellikle enerji çarpımındaki düşüşü hacim artırarak veya motor tasarımını değiştirerek telafi etmeyi gerektirir (Şekil 5, Tablo 2). **Ferrit mıknatıslar ucuz ve korozyona dayanıklıdır; ancak ferrit destekli senkron relüktans motorlar çok daha fazla mıknatıs hacmi gerektirir ve Nd-Fe-B'li tasarımlara göre yaklaşık %15–25 tork yoğunluğu kaybeder [13].** Nd-Fe-B ile ferritin birlikte kullanıldığı hibrit tasarımlar nadir toprak içeriğini %60–80 azaltabilir [13]. **Tam ölçekli 80 kW'lık bir ferrit IPM motor prototipi de test edilmiştir [16]. SmCo yüksek sıcaklığa dayanır fakat Sm ve Co da kritik hammaddelerdir; dolayısıyla tedarik riskini çözmez.** Fe₁₆N₂ (demir nitritür) mıknatıslar ise özellikleri ferrit ile Nd-Fe-B arasında olan, yalnızca demir ve azottan oluşan ve ticarileşmeye çalışılan bir seçenektir [13, 16].



Şekil 5. Başlıca ticari kalıcı mıknatıs sınıflarının yaklaşık maksimum enerji çarpımı aralıkları (kaynak: [3, 4] ve DOE verilerinden derlenen tipik değerler).

Tablo 2. Kalıcı mıknatıs malzemelerinin karşılaştırması (yaklaşık, tipik değerler [3, 4, 7, 13])

Malzeme	(BH)max (kJ/m³)	Curie sıcaklığı (°C)	Avantaj	Sınırlama
Nd-Fe-B	250–440	≈ 310–330	En yüksek güç/tork yoğunluğu, kompakt motor	Sıcaklık duyarlılığı; Dy/Tb gereksinimi; tedarik riski
Ferrit	25–40	≈ 450	Çok ucuz, nadir toprak içermez, korozyona dayanıklı	Düşük enerji çarpımı; büyük hacim, düşük tork yoğunluğu
SmCo	200–260	≈ 800	Yüksek sıcaklık kararlılığı	Pahalı; Sm ve Co kritik hammadde
AlNiCo	40–70	≈ 800–860	Mükemmel sıcaklık kararlılığı	Düşük koersivite; çekiş motoru için uygun değil
Fe ₁₆ N ₂ (demir nitritür)	Ferrit–Nd-Fe-B arası	—	Yalnızca Fe ve N; nadir toprak yok	Ticari üretim ölçeği henüz sınırlı

4.2 Motor topolojisi düzeyinde alternatifler

En köklü çözüm mıknatısı tamamen ortadan kaldırmaktır. Harici uyarımlı senkron motorlarda (EESM) rotor akısı, fırçalı veya endüktif bir sargıyla elektriksel olarak üretilir; bu motorlarda tepe verim yaklaşık %95, güç yoğunluğu 3,5–5 kW/kg düzeyine ulaşabilmektedir [14]. Asenkron (indüksiyon) motorlar mıknatıs içermeyen, sağlam ve kanıtlanmış bir referanstır; anahtarlı relüktans (SRM) ve senkron relüktans (SynRM) motorlar da mıknatıssız adaylardır, ancak titreşim, gürültü ve güç yoğunluğu konusunda sınırlamaları vardır [11, 12, 14]. Mıknatıssız motorların bedeli, rotor uyarım kayıpları (yaklaşık 1–3 puan verim etkisi) ve daha karmaşık güç elektroniğidir [9].

4.3 Disprosyum azaltma yöntemleri

Mıknatıstan vazgeçmeden nadir toprak bağımlılığını azaltmanın yollarından biri tane sınırı difüzyonudur: Dy veya Tb yalnızca tane sınırlarına işlenerek koersivite artırılır ve kalıntı manyetizasyon korunur [4, 13]. Bu yöntem, mıknatıs gövdesi boyunca eşit dağıtılan klasik Dy katkısına göre ağır nadir toprak tüketimini belirgin biçimde düşürür.

5. Uygulamadan Örnekler

Tablo 3. Üreticilerin nadir toprak bağımlılığını azaltma yaklaşımları

Örnek	Motor tipi	Mıknatıs durumu	Kaynak
Orta sınıf hibrit otomobil	IPM, Nd-Fe-B	≈ 532 g Nd + 130 g Dy, büyük bölümü çekiş motorunda	[10]
Tesla	Model 3 (2017) arka motoru kalıcı mıknatıslı; erken Model S/X asenkron	2023'te nadir toprak içermeyen sürücü hedefi açıklandı	[15, 16]
BMW iX3, i4	Harici uyarımlı senkron (EESM)	Mıknatıs ve nadir toprak yok; $\sim 95\%$ verim	[14, 15]
Renault (ZOE, 2012–)	Harici uyarımlı senkron (EESM)	Ticari kullanımda nadir toprak içermeyen motor	[15, 16]
ZF (I2SM), Valeo–Renault	Mıknatıssız çekiş mimarileri	Geliştirme/seri üretim hazırlığı aşamasında	[15, 16]
Niron Magnetics	Fe ₁₆ N ₂ mıknatıs	Nadir toprak içermeyen mıknatıs; ölçek büyüme aşamasında	[15, 16]

6. Sonuç

Nd-Fe-B mıknatıslar, çekiş motorlarına yüksek tork ve güç yoğunluğu ile verimi birlikte kazandırdığı için elektrikli ve hibrit araçlarda hâlâ baskın çözümdür. Tipik bir aracın çekiş motoru yaklaşık 1–2 kg (aralık 0–4 kg, yaklaşık 7,5–12 g/kW) Nd-Fe-B içerir; geleneksel araçlarda ise yalnızca yardımcı motorlarda birkaç yüz gramın altında kullanılır. **Alternatifler arasında kısa vadede en gerçekçi olanlar, Dy kullanımını azaltan tane sınırı difüzyonu, ferrit destekli hibrit tasarımlar ve zaten seri üretimde olan EESM motorlardır;** demir nitrür gibi yeni mıknatıslar ise orta vadeli bir olasılıktır. **Hiçbir alternatif Nd-Fe-B'nin güç yoğunluğunu verimle birlikte tam karşılamadığından, seçim araç sınıfına, maliyete ve tedarik riskine göre yapılmalıdır.** Bu yazımızda verilen sayılar tasarıma ve kaynağa göre değiştiğinden büyüklük mertebesi olarak yorumlanmalıdır.

Kaynakça

- [1] Sagawa, M., Fujimura, S., Togawa, N., Yamamoto, H., & Matsuura, Y. (1984). New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe. *Journal of Applied Physics*, 55(6), 2083–2087.
- [2] Croat, J. J., Herbst, J. F., Lee, R. W., & Pinkerton, F. E. (1984). Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets. *Journal of Applied Physics*, 55(6), 2078–2082.
- [3] Coey, J. M. D. (2020). Perspective and prospects for rare earth permanent magnets. *Engineering*, 6(2), 119–131.
- [4] Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011). Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*, 23(7), 821–842.
- [5] Fischbacher, J., ve ark. (2018). Micromagnetics of rare-earth efficient permanent magnets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(19), 193002. (arXiv:1903.11922)
- [6] Elwert, T. ve ark. (2016). Recycling of NdFeB magnets from electric drive motors of (hybrid) electric vehicles. Alman “Elektrikli sürüş motorlarının bileşen ve stratejik metallerinin geri dönüşümü” projesi çıktısı.
- [7] U.S. Department of Energy (2022). Neodymium Magnets Supply Chain Report (Rare Earth Permanent Magnets Supply Chain Deep Dive Assessment). [energy.gov](https://www.energy.gov).
- [8] Adamas Intelligence (2019). EV sales to hit 12.5M in 2025; 350% increase in demand for rare earths used in traction motors. *Green Car Congress*, 11 Kasım 2019.
- [9] Thunder Said Energy. Electric vehicles: motors and magnets? (veri dosyası). thundersaidenergy.com.
- [10] NdFeB content in ancillary motors of US conventional and hybrid vehicles. OSTI raporu no. 1485581, U.S. Department of Energy. [osti.gov](https://www.osti.gov).
- [11] Kimiabeigi, M. ve ark. (2015). Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Materials and Technologies*, 3, 7–13.
- [12] Riba, J.-R., López-Torres, C., Romeral, L., & Garcia, A. (2016). Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367–379.
- [13] Liu, Y., Li, D., & Li, X. (2026). A review of structural design for reduced-rare-earth permanent magnet motors in new energy vehicles. *Frontiers in Mechanical Engineering*. doi:10.3389/fmech.2026.1957624
- [14] Electric vehicle motors free of rare-earth elements—An overview (2025). *Machines*, 13(8), 702. MDPI. doi:10.3390/machines13080702
- [15] Interesting Engineering (2025). Why electric motor makers are moving away from rare-earth magnets (S&P Global Mobility verilerine atfla; sektör haberi).

- [16] Rare Earth Exchanges (2026). EV traction motor rare earth alternatives compared; EV motors rare earth substitution options explained (sektör analizi).