



# Raylı Sistemler için Asenkron Cer Motor Tasarımı ve Performans Analizi

Enes Ulu<sup>1</sup>, Kamuran Nur Bekiroğlu<sup>2</sup>, Fatma Keskin Arabul<sup>3</sup>, Ahmet Yiğit Arabul<sup>4\*</sup>,

<sup>1</sup> ELK Motor, Tekirdağ, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-6006-8638), [uluenes95@gmail.com](mailto:uluenes95@gmail.com)

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3814-7684), [nbekir@yildiz.edu.tr](mailto:nbekir@yildiz.edu.tr)

<sup>3</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-9573-8440), [fkkeskin@yildiz.edu.tr](mailto:fkkeskin@yildiz.edu.tr)

<sup>4\*</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-2058-6742), [arabul@yildiz.edu.tr](mailto:arabul@yildiz.edu.tr)

(İlk Geliş Tarihi 28 Ocak 2022 ve Kabul Tarihi 25 Mart 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1064303)

**ATIF/REFERENCE:** Ulu, E., Bekiroğlu, K.N., Keskin Arabul, F. & Arabul, A.Y. (2022). Raylı Sistemler için Asenkron Cer Motor Tasarımı ve Performans Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 243-251.

## Öz

Asenkron motorlar geçmişten günümüze kadar birçok farklı alanda kullanılan; basit yapıları, ucuz maliyetleri ve bakım masraflarının az olması sebebiyle her daim kullanıcı tarafından sıklıkla tercih edilen bir motor tipidir. Sektörde asenkron motorlar kompresör, asansör, yürüyen merdiven, pompa, vinç ve konveyör uygulamaları gibi birçok farklı alanda kullanılmış, raylı sistem uygulamaları da asenkron motorların bu kullanım alanlarından biri olmuştur. Bu çalışmada, daha düşük bir giriş gücüyle daha yüksek bir performans sergileyen, azalan motor işletim maliyetleriyle kullanıcıya ekonomik yönden avantaj sağlayan, yerli ve milli imkânlarla üretilebilecek olan üç fazlı sincap kafesli yüksek verimli bir asenkron cer motorunun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım başlangıcında ilk olarak bir referans asenkron cer motoru belirlenmiştir. Belirlenen referans motor öncelikle bilgisayar destekli tasarım programlarından biri olan ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir. Ardından seçilen referans motor için en uygun sac tipi, stator ve rotor parametreleri ile hava aralığı uzunluğunun belirlenip motorda maksimum verim değerine ulaşılabilmesi için tasarım ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizi yapılan her bir tasarımda sadece bir parametre değiştirilmiş ve diğer parametreler sabit tutularak değiştirilen parametrenin motor verimine olan etkisi net bir şekilde gözlemlenmiştir. Sonuç olarak seçilen referans motor ile iyileştirmeler yapılmış nihai motorun analiz çıktıları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde asenkron cer motorunda kullanılan sac tipi; motorun stator, rotor ve hava aralığı gibi tasarım parametrelerinde yapılacak iyileştirmeler ile motor veriminin artırılabilceği görülmüştür. Sonuç olarak, uygulanan tasarım yaklaşımlarıyla yüksek enerji verimliliğine ve düşük motor kayıplarına sahip yeni bir üç fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru tasarımı elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Raylı Sistemler, Asenkron Motor, Cer Motor, Motor Tasarımı.

## Induction Traction Motor Design and Performance Analysis for Railways

### Abstract

Induction motors have been used in many different areas from past to present. It has always been one of the most preferred motor types by users due to their simple structure, low price and low maintenance costs. Induction motors have been used in many areas such as compressor, elevator, escalator, pump, crane and conveyor applications in the industry. Railway system applications are also one of these usage areas of induction motors. In this study, a three phase squirrel cage high efficiency induction traction motor, which exhibits a higher performance with a lower input power, provides economic advantages to its user with reduced motor operating costs, and can be produced with domestic and national resources, has been designed. At the beginning of the design, a reference induction traction

\* Sorumlu Yazar: [arabul@yildiz.edu.tr](mailto:arabul@yildiz.edu.tr)

motor was determined. The determined reference motor was modeled using the ANSYS program, which is one of the computer aided design programs. Designs and analyzes were carried out in order to reach the maximum efficiency value in the motor. The most suitable sheet type, the stator parameters, rotor parameters and the air gap length were determined subsequently. Only one parameter was changed in each analyzed design. And by keeping the other parameters constant, the effect of the changed parameter on the motor efficiency has been clearly observed. As a result, the final motor design were compared with the first determined reference motor design. When the results obtained are examined, it has been seen that the motor efficiency can be increased and losses can be minimized with improvements to be carried out in the design parameters of the motor such as sheet type, stator, rotor and air gap. As a result, a new three phase squirrel cage induction traction motor design with high energy efficiency and low motor losses has been obtained with the applied design approaches.

**Keywords:** Railways, Induction motor, Traction motor, Motor Design.

## 1. Giriş

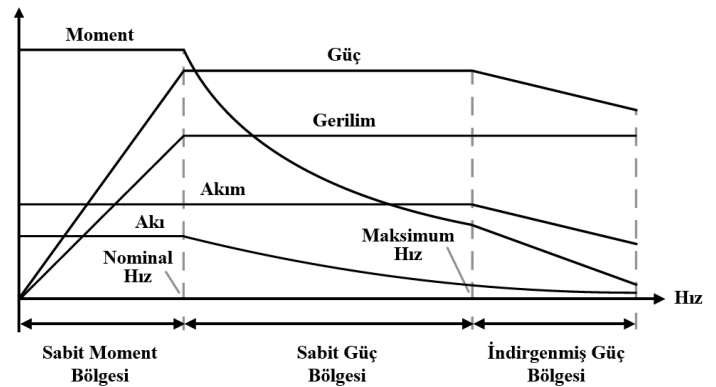
Geride bıraktığımız son yüz yıllık dönemde dünya hiç olmadığı kadar hızlı bir kalkınma süreci yaşamıştır. Gelişmekte olan ülkelerde nüfusun hızlı bir şekilde giderek artması, kırsal kesimlerden kentlere yaşanan göçler beraberinde büyük şehirlerde ulaşım problemlerini ortaya çıkarmıştır. Bu yüzden günümüzde, hem şehir içindeki hem de şehirlerarasındaki ulaşım ihtiyacı giderek artmaktadır. Ayrıca ulaşımın hızlı, güvenilir, ekonomik ve olabildiğince konforlu bir şekilde gerçekleştirilmesi istenmektedir. Bu da tren, tramvay ve metro gibi raylı ulaşım sistemlerine olan ihtiyacı öne çıkarmaktadır (Acar et al., 2018; Gürdal, 2015; Kuci et al., 2020; Manoharan et al., 2009). Geçmişten günümüze demiryolu taşımacılığı çeşitli süreçlerden geçmiş ve demiryolu taşıma araçlarında birçok değişim yaşanmıştır. Önceleri yük ve yolcu taşımacılığında sırasıyla buharlı ve dizel çekiş sistemleri kullanılırken günümüzde bunlar yerini giderek hibrit ve elektrikli çekiş sistemlerine bırakmaktadır (Kang et al., 2021).

Elektrikli çekiş sistemini meydana getiren tüm bileşenler, sistemin genel verimliliği dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Tasarımlar sırasında demiryolu aracının kullanılacağı hat, aracın sahip olduğu toplam yolcu kapasitesi ve sistemin gerektirdiği cer gücü ihtiyacına dikkat edilmelidir. Demiryolu taşıtında kullanılacak olan elektrikli cer motorunun tasarımı ise sistem verimliliği açısından oldukça önemlidir. Elektrik motorları demiryolu araçlarında 100 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır (De Pancorbo et al., 2015). Elektrikli demiryolu taşıtlarının tahrik edilmesi için kullanıldıklarından dolayı cer (traksiyon) motorları olarak da adlandırılmaktadır. Elektrikli çekiş sistemi uygulamalarında kullanılan bir cer motorunun sahip olduğu karakteristiğın aracın ivmelenmesi, yokuş çıkma kabiliyeti ve ulaşabileceği maksimum hız limiti üzerinde büyük bir etkisi vardır (Zhao & Schofield, 2016). Bu nedenle, elektrikli çekiş sistemlerinde en iyi performansı ve en iyi verimi alabilmek için birçok farklı elektrik motoru tipiyle denemeler yapılmıştır (Kobelev et al., 2020). Doğru akım motorları (DAM), sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), relüktans motorları (RM) ve asenkron motorlar (ASM) piyasada kullanılan cer motoru tiplerindedir (Enache et al., 2020; Ikeda et al., 2019; Murthy et al., 2006). Elektrikli çekiş sistemlerinde kullanılacak cer motorunun belirlenmesi için yapılan araştırmalardan bazıları şu şekilde sıralanabilir.

R.S. Figueiredo yaptığı araştırmanın bir bölümünde genel olarak traksiyon uygulamalarında kullanılan doğru akım motorları ile asenkron motorları karşılaştırmıştır. Yapılan karşılaştırmada güç elektroniği kontrol yöntemlerinin gelişmesi ve asenkron motorların daha verimli ve kompakt bir yapı kazanması sayesinde doğru akım motorlarına göre daha avantajlı bir duruma geldiğinden bahsedilmiştir (Figueiredo, 2015). Nategl

ve arkadaşları tarafından cer motorları hakkındaki eğilimleri konu alan araştırmanın sonucunda düşük maliyetleri, gelişmiş teknolojileri ve yüksek güvenilirlikleri göz önünde bulundurulduğunda asenkron motorların, en azından önümüzdeki on yılda hâkim motor topolojisi olmaya devam edeceğini öne sürmüştür (Nategl et al., 2018). Pancorbo ve arkadaşları tarafından cer motorlarının karşılaştırılması konu alan araştırmada, asenkron motorlar hem motor işletim güvenilirliği hem de tek bir inverter kullanılarak iki motorun birden kontrol edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı sürekli mıknatıslı senkron motorlara ve senkron relüktans motorlara (SRM) kıyasla daha tercih edilebilir bulunmuştur (De Pancorbo et al., 2015). Popescu ve arkadaşları tarafından elektrikli taşıtların çekiş sistemlerinde kullanılan cer motoru tipleri hakkında yapılan araştırmadaysa, sürekli mıknatıslı senkron motorlardan daha düşük bir verimlilik ve tork yoğunluğu sunsa bile asenkron cer motorlarının ulaşım ve taşıma sektöründe kullanılan araçlar için hala cazip bir seçenek olduğundan bahsedilmektedir (Popescu et al., 2019). Monoharaun ve arkadaşları tarafından yapılan farklı bir araştırmada ise motorda alüminyum bara ve uç halkası içeren rotor yapısı yerine bakır bara ve uç halkası içeren rotor yapısının kullanılması halinde rotor kayıplarının %35.4 oranında azaltılabileceği ifade edilmiştir (Manoharan et al., 2009).

Cer motorları çekiş uygulamalarında kullanılacakları için sistemin anlık yüksek güç ihtiyacını karşılayabilmeli, düşük hızlarda yüksek moment sağlayabilmeli, geniş bir hız-moment aralığında yüksek verimlilikte çalışabilmelidir (Polat & Akıncı, 2020). Ayrıca kullanılan motorun düşük maliyetli, güvenilir ve sağlam bir yapıya sahip olması da istenmektedir. Bir cer motorunun sahip olması gereken hız moment karakteristiği Şekil 1'dekine benzer olmalıdır (Masuku et al., 2019).



Şekil 1. Örnek bir cer motoru hız moment karakteristiği (Murthy et al., 2006)

Yapılan tüm bu literatür araştırmaları sonucunda, cer motorlarının tasarımı yapılırken aşağıda sıralanan hususlara

dikkat edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır (Abouzeid et al., 2020; Calin et al., 2012; Polat & Akıncı, 2020).

- Uygun çekiş karakteristiği
- Güç ve moment yoğunluğu
- Düşük boyut/ağırlık/hacim (kompakt yapı)
- Verimlilik
- Üretilbilirlik
- Kolay kontrol
- Geniş hız moment aralığı
- Düşük üretim maliyeti
- Düşük bakım ve işletme maliyeti
- Uzun çalışma ömrü
- Dayanıklı/sağlam yapı
- Kısa süreli aşırı yüklenme kapasitesi
- Düşük gürültü/titreşim/moment dalgalanması
- Tasarım uygunluğu
- Geliştirilebilirlik
- Termal dayanım

Günümüzde demiryolu taşıtlarında kullanılacak olan cer motorunun tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar dikkatlice incelendiğinde bu temel gereksinimlerinin çoğunu karşılayan, mevcut raylı sistem uygulamalarında sıklıkla kullanılan, yerli ve milli imkânlarla üretilebilecek olan motor tiplerinin başında asenkron cer motorlarının geldiği söylenebilmektedir.

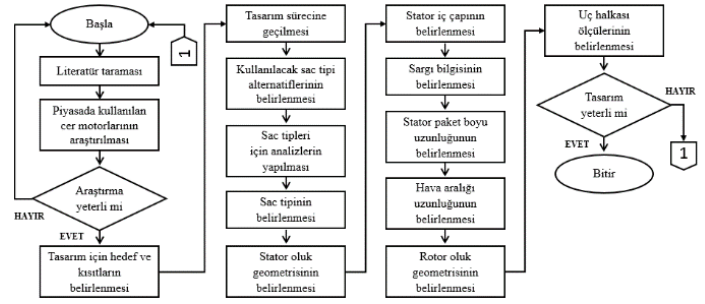
Bu çalışma kapsamında, tramvay araçlarında kullanılan ve referans olarak seçilen bir asenkron cer motorunun sac malzemesi, stator parametreleri, hava aralığı uzunluğu ve rotor parametreleri gibi tasarım değerlerinin bilgisayar destekli tasarım programlarından biri olan ANSYS programı yardımıyla optimize edilerek asenkron cer motoru verim değerinin artırılması amaçlanmıştır. Böylece daha düşük bir giriş gücüyle daha yüksek bir performans sergileyen, azalan motor işletim maliyetleriyle kullanıcıya ekonomik yönden avantaj sağlayan, yerli ve milli imkânlarla üretilebilecek olan üç fazlı sincap kafesli asenkron cer motorunun tasarımı gerçekleştirilecektir.

Çalışma sırasında motorun çıkış gücü değeri, nominal gerilimi, frekansı, stator dış çapı, stator ve rotor oluk sayısı, mil çapı, havalandırma kanallarının sayısı ve ölçüleri sabit tutulacaktır. Sırasıyla analizleri gerçekleştirilecek her bir tasarımda sadece bir parametre değiştirilecek ve diğer parametreler sabit tutularak değiştirilen parametrenin motor verimine ve motor toplam kayıplarına olan etkisi net bir şekilde gözlemlenecektir. Yapılan tasarımlar arasından motor verimini maksimize edecek en uygun değerler belirlenecektir. Çalışma sonucunda belirlenen referans motora kıyasla daha yüksek bir verim değerinde olan, yüksek performanslı, azalan motor işletim maliyetleri sayesinde kullanıcıya ekonomik yönden avantaj sağlayacak bir asenkron cer motoru tasarımının elde edilmesi hedeflenmektedir.

## 2. Motor Tasarım Süreci

Motor tasarım sürecinde teorik yaklaşımlara dayalı olan metodoloji kullanılır. Bu kapsamda yapılan hesaplama, analiz ve benzetim çalışmalarında Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) sıklıkla tercih edilmektedir (Smith, 2000). Böylece karmaşık geometriler, makinada oluşan girdap akımları ve lineer olmayan malzeme yapıları gibi parametrelerin dikkate alınması sağlanmaktadır. Ayrıca tasarım sonunda hedeflenen çıktılara en doğru ve en kısa

sürede ulaşmak için ise uygun bir akış diyagramı oluşturulmalı ve izlenmelidir. Çalışma boyunca izlenen süreçler Şekil 2'deki akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 2. Tasarım sürecinde izlenen adımlar

Gerçekleştirilen çalışması süresince her bir tasarım parametresinin belirlenmesi sırasında öncelikle tasarım hedeflerine ve kısıtlarına dikkat edilmiştir. Belirlenen tasarım stratejisi doğrultusunda analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları tasarım hedefleri ve kısıtları açısından değerlendirildikten sonra uygun bulunursa nihai tasarım parametrelerine karar verilmiştir. Tasarım parametrelerinin nihai değerini belirlerken sıklıkla yinelemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Uygun tasarım metodolojisinin kullanılması olası zaman gecikmelerinin önüne geçerek tasarım sürecini hızlandırmaktadır.

### 2.1. Cer Motoru Tasarım Kriterleri

Motor ağırlığını minimize ederek yapılan bir tasarım sayesinde, aks ağırlığı dolayısıyla demiryolu aracı toplam kütlesi azalmaktadır. Aracı hareket ettirmek için gerekli olan moment ve güç ihtiyacı düşmektedir. Farklı bir açıdan bakıldığında ise güç ve moment yoğunluğu daha düşük bir sisteme göre aynı güç tüketimiyle daha fazla yolcu veya yük taşınabilmektedir. Ayrıca motorun ağırlığının minimize edilmesi motor imalatında daha az ham madde kullanımı demektir. Böylece motor imalatı daha ekonomik bir hale gelmektedir.

Raylı sistem uygulamalarında kullanılan ekipmanlar araç üzerinde kısıtlı çalışma alanına sahiptir. Ekipman ve motor hacimlerinin en aza indirilmesi araçtaki yolcu taşıma kapasitesinin artırılmasına, araç boyutlarının küçülmesine veya araç güzergâhlarında daha küçük çaplı tünellerin kullanılabilmesine olanak tanımaktadır (Kreuawan, 2008). Bu yüzden tünel içi veya yeraltı demiryolu sistemleri gibi inşaat maliyeti yüksek olan projelerde kompakt bir yapıya sahip, güç ve moment yoğunluğu yüksek olan daha düşük hacimli cer motorlarının tercihi sistemin inşaat maliyetini olumlu yönde etkilemektedir.

Demiryolu sisteminde kullanılan ekipmanların güvenilirliği yüksek olmalıdır (Kreuawan, 2008). Yolculuk veya nakliyat işlemleri sırasında araçta beklenilmedik herhangi bir arıza olması istenmemektedir. Bu olası zaman kayıplarına ve mağduriyetlere yol açabilmektedir. Ayrıca demiryolu trafiğini de olumsuz etkilemektedir. Demiryolu aracı üzerinde fazla bakım gerektirmeyen, kolay arızalanmayan, dayanıklı ve sağlam ekipmanların kullanımı bu yüzden önemlidir. Sistemin güvenilirliği açısından acil durumlara karşı her zaman alternatif bir plan bulundurulmalıdır.

Demiryolu taşıtı, kalkış yaparken veya yokuş çıkarken düşük hızda yüksek momente ihtiyaç duymaktadır. Yüksek hızlara çıkılan uzun mesafeli hatlarda ise cer motorunun sistemin yüksek

güç ihtiyacını karşılaması beklenmektedir. Bu yüzden cer motorundaki sabit güç ve sabit moment bölgelerinin, geniş bir hız aralığına sahip olması beklenmektedir.

Demiryolu sistemleri için sıralanan tüm bu sebeplerden dolayı motor tasarımı kullanıcılar ve işletmeler açısından büyük bir öneme sahiptir. Motor tasarımı sırasında verim değerini arttırmak, motor üretim maliyetini düşürmek, harmoniklerin neden olduğu titreşim ve gürültüleri minimize etmek, moment dalgalanmasını azaltmak amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar esnasında dikkat edilen başlıca hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Keskin Arabul et al., 2020; Mushid & Dorrell, 2017).

- Stator ve rotor konfigürasyonları
- Stator ve rotor oluk yapıları
- Stator sargı yapısı
- Rotor bara ve uç halkası yapısı
- Soğutma kanallarının konumu, ölçüleri ve sayısı
- Materyal seçimi
- Hava aralığı uzunluğu

Sıralanan tüm bu tasarım parametreleri birlikte motor karakteristiğini ortaya çıkarmaktadır. Yüksek verimli bir asenkron cer motoru tasarlayabilmek ve böylece motorun işletme maliyetlerini minimize edebilmek için ise motor tasarımı sırasında en uygun sac malzemesi, stator ve rotor parametreleri ile motorun hava aralığı uzunluğu belirlenmelidir.

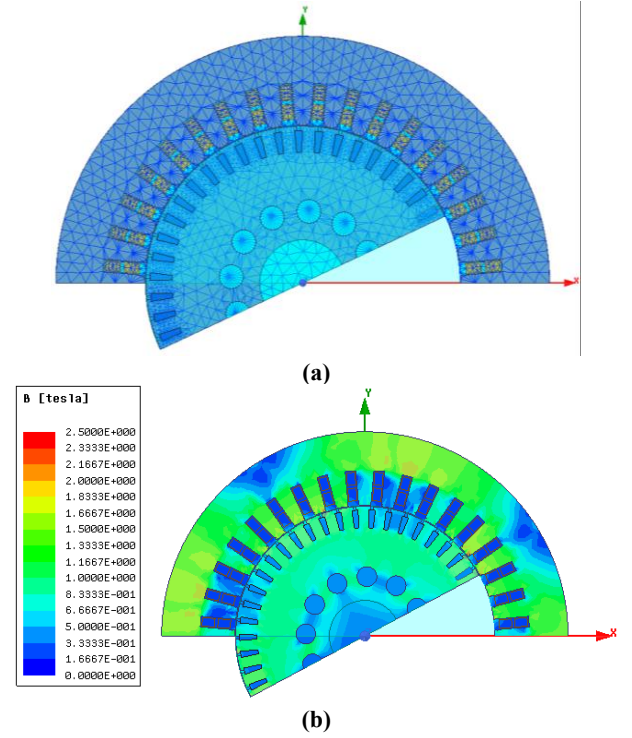
### 3. Benzetim Çalışmaları

Tasarlanan motorun sayısal (nümerik) analizleri için çözümlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanan ANSYS Maxwell 2D modülünden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında, ilk olarak bir referans asenkron cer motoru belirlenmiştir. Belirlenen referans motor ANSYS Maxwell 2D modülü kullanılarak modellenmiştir. Ardından seçilen referans motorunun çıkış gücü değeri, nominal gerilimi, frekansı, stator dış çapı, stator ve rotor oluk sayısı, mil çapı, havalandırma kanallarının sayısı ve ölçüleri sabit tutularak motor için en uygun sac tipi, stator ve rotor parametreleri ile hava aralığı uzunluğunun belirlenip motorda maksimum verim değerine ulaşılabilmesi için tasarım ve analizler yapılmıştır. Analizler sırasında öncelikle sac malzemesi için ardından ise sırasıyla motorun stator, hava aralığı ve rotor parametreleri için motor verimini maksimize edecek en uygun değerler belirlenmiştir.

#### 3.1. Referans Motor Detayları

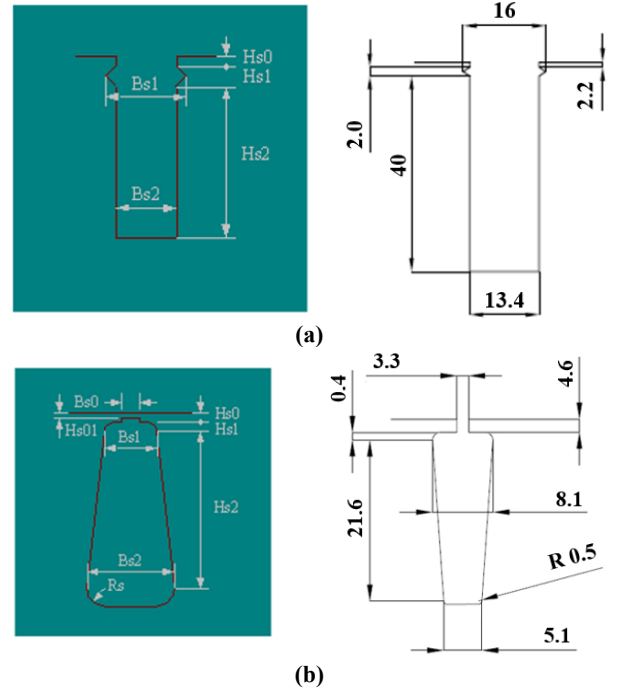
Tasarım çalışmasında referans noktası olarak raylı sistem uygulamalarında kullanılan bir sincap kafesli asenkron cer motoru seçilmiştir (Koushan, 2020). Verim iyileştirmesi yapılacak olan referans motorun ANSYS Maxwell 2D modülünde modellendiğinde programdan elde edilen tasarım çıktıları Tablo 1'de gösterildiği gibidir. Ayrıca referans motorun ANSYS Maxwell 2D modülü ile modellendiğinde mesh yapısı Şekil 3(a)'da ve motorun yüklü durumda çalışırken sahip olduğu manyetik akı yoğunluğu dağılımı ise Şekil 3(b)'de gösterilmiştir.

Referans motorun stator ve rotor laminasyonlarında 1.5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değeri 6.00W/kg olan 0.50mm kalınlığındaki 50JN600 kodlu silisli çelik sac malzemesi kullanılmıştır. Motorda, şaftta monte edilmiş bir fan vasıtasıyla kendinden havalandırmalı bir soğutma sistemi tercih edilmiştir.



Şekil 3. Referans motor (Rev.00); (a) ağ atılmış geometri, (b) manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Belirlenen referans motorun stator oluk geometrisi Şekil 4(a)'da ve rotor oluk geometrisi Şekil 4(b)'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Referans motor; (a) stator oluk geometrisi, (b) rotor oluk geometrisi

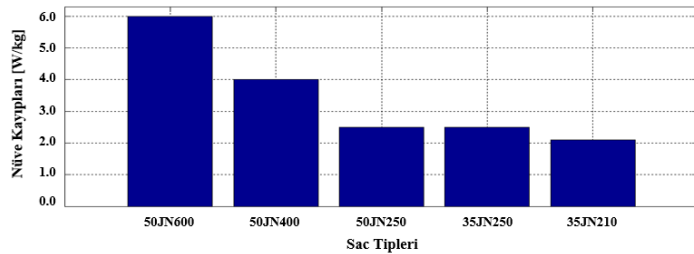
Belirlenen referans motorun; bilgisayar destekli modelleme, tasarım ve analiz çalışmaları için tasarımcılar tarafından sıklıkla tercih edilen ANSYS firması tarafından geliştirilen ANSYS Maxwell 2D tasarım modülünde modellendiğinde ortaya çıkan tasarım değerleri Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Referans motorun (Rev.00) ANSYS Maxwell 2D modülünde modellendiğinde elde edilen tasarım parametreleri

| Motor Parametreleri | Değer   | Birim |
|---------------------|---------|-------|
| Çıkış Gücü          | 100     | kW    |
| Nominal Gerilim     | 360 (Y) | V     |
| Nominal Akım        | 206.8   | A     |
| Güç Faktörü         | 0.83    |       |
| Devir Sayısı        | 1475    | d/d   |
| Moment              | 649.4   | Nm    |
| Verim               | %93.21  |       |
| Toplam Kayıplar     | 7285    | W     |
| Frekans             | 50      | Hz    |
| Hava Aralığı        | 1.2     | mm    |
| Sac Tipi            | 50JN600 |       |
| Toplam Demir Kaybı  | 1701    | W     |

### 3.2. Sac Tipi Analizi

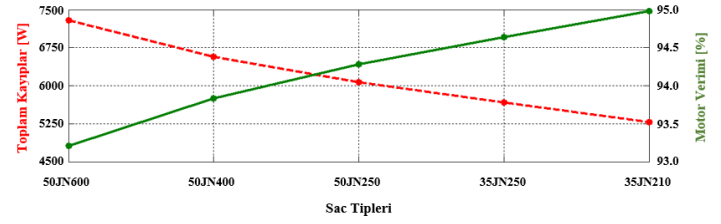
Tablo 1’de motor parametreleri verilen referans motorun tasarımı incelenmiş, toplam kayıplar içerisinde nüve (demir) kayıplarının %23.35’lük bir paya sahip olduğu görülmüştür. Yapılan tasarım çalışması kapsamında, ilk olarak mevcut motorda (Rev.00) kullanılan 1.5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değeri 6.00W/kg ve sac kalınlığı 0.50mm olan 50JN600 kodlu sac tipinin yerine motor performans değerlerini iyileştirecek ideal bir sac tipi belirlenecektir. ANSYS Maxwell 2D modülü kullanılarak yapılan çalışma sırasında, aralarında referans motorda kullanılan 50JN600 sac tipinin de dâhil olduğu toplamda 5 farklı sac tipi için analizler yapılmıştır. Analizler sırasında, kullanılan sac tipinin haricindeki diğer mevcut motor parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Sac paketi boyu da dâhil olmak üzere diğer parametreler sabit tutulmuştur. Böylece sac tipi değişiminin motor verim değeri ve motor kayıpları üzerindeki etkisinin daha net bir şekilde anlaşılabilmesi amaçlanmıştır. Analizi yapılan sac tiplerinin 1.5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki imalatçı firma tarafından beyan edilen maksimum nüve kaybı değeri Şekil 5’te gösterildiği gibidir. Şekil 5’teki grafikte belirtilen nüve kaybı değerleri JFE Steel Corporation firmasının yayınladığı teknik katalogdan alınmıştır (Steel Corporation, n.d.).



Şekil 5. Manyetik sac tiplerinin 1.5 Tesla ve 50 Hz’deki nüve kayıpları

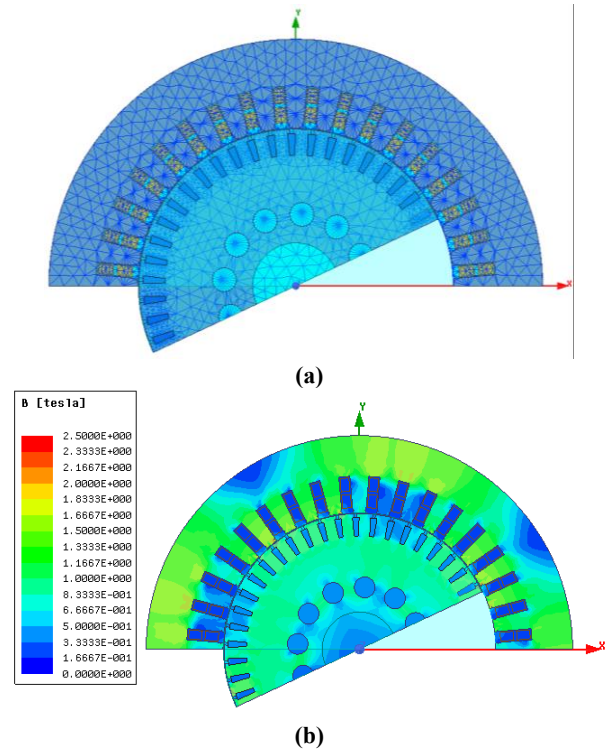
Sac imalatı yapan firmaların yayınladığı teknik kataloglarda beyan edilen 50JN600, 50JN400, 50JN250, 35JN250, 35JN210 gibi kodlama ifadeleri sacın teknik özelliklerinden faydalanılarak belirlenmiştir. Kodlamadaki ilk iki karakter sac malzemesinin milimetre cinsinden kalınlığını göstermektedir. Kodlamadaki son üç karakter ise sacın 1.5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değerini belirtmektedir. Nüve kayıpları beyan edilen 5 farklı sac tipi için ANSYS Maxwell 2D modülü

kullanılarak yapılan analizlerde referans motorunun verim değerinde ve motor toplam kayıplarındaki değişimler Şekil 6’da gösterilen grafikteki gibidir.



Şekil 6. Kullanılan sac tipinin motor verimine etkisi

Yapılan analiz çalışmasında 1.5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değeri 2.10W/kg olan 0.35mm kalınlığındaki 35JN210 sac tipinin kullanılmasıyla en yüksek verim ve en düşük kayıp değerine ulaşılmıştır. Referans motorda sac kalınlığı daha ince ve nüve kaybı daha düşük bir sac tipi kullanıldığında nüve kaybında %44.68, toplam kayıplarda ise %27.45 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Referans motorun verim değeri ise %93.21 değerinden %94.98 değerine yükselmiştir. Motor veriminde yaklaşık %1.90 oranında bir artış yaşanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yapılan yüksek verimli asenkron motor tasarımı çalışmasında sac tipi olarak 1.5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değeri 2.10W/kg olan 0.35mm kalınlığındaki 35JN210 sac tipinin kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca analizler sonucunda ortaya çıkan Rev.01 tasarımının mesh yapısı Şekil 7(a)’da ve motorun yüklü durumda çalışırken sahip olduğu manyetik akı yoğunluğu dağılımı ise Şekil 7(b)’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Referans motor; (a) ağ atılmış geometri, (b) manyetik akı yoğunluğu dağılımı

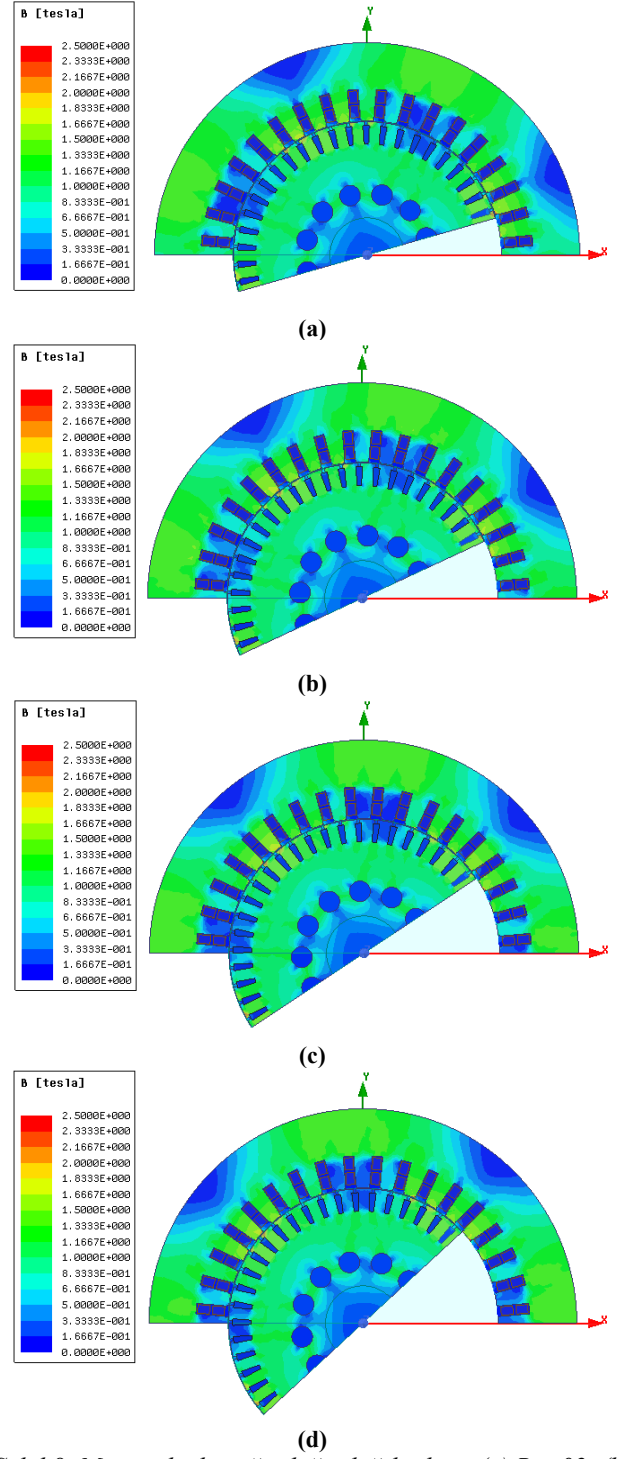
### 3.3. Stator Parametrelerinin Analizi

Stator parametrelerinin belirlenmesi için yapılan çalışma sırasında referans motorun stator dış çapı, kutup sayısı ve stator oluk sayısı parametreleri sabit tutulmuştur. Sırasıyla oluk

geometrisi, stator iç çapı, sargı bilgisi ve stator paket boyu uzunluğu parametrelerinin belirlenmesi için analizler yapılmıştır. Analizi yapılan parametre için bir değer belirlendiğinde bu değer artık kalıcı olmuş ve akabinde diğer parametreler için yapılan analizler boyunca sabit tutulmuştur.

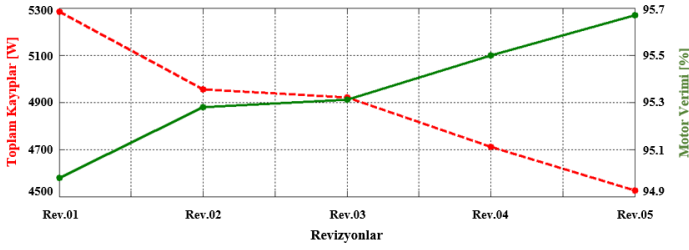
Tasarımlar arasından motor verim değerini maksimize eden stator oluk geometrisi ölçüleri seçilmiştir. Hs0, Hs1, Hs2, Bs1 ve Bs2 oluk geometrisi ölçüleri için belirlenen parametreler sırasıyla 1.00mm, 1.60mm, 36.0mm, 12.8mm ve 15.2mm değerleridir. Çalışma kapsamında stator oluk geometrisinin belirlenmesinin ardından ortaya çıkan tasarım Rev.02 tasarımı olarak adlandırılmıştır.

Tasarım için en uygun oluk geometrisinin belirlenmesinin ardından aynı yaklaşım tarzıyla stator iç çapı, sargı bilgisi ve stator paket boyu uzunluğu parametrelerinin her biri için analizler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen referans motorda stator iç çapı, sargı bilgisi ve stator paket boyu uzunluğu parametreleri için kullanılan ölçüler sırasıyla 330mm, 12.0mm/1.65mm ve 137mm değerleridir. Analizler sonucunda ortaya çıkan Rev.02, Rev.03, Rev.04 ve Rev.05 tasarımlarında motorun yüklü durumda çalışırken sahip olduğu manyetik akı yoğunluğu dağılımı sırasıyla Şekil 8(a), Şekil 8(b), Şekil 8(c) ve Şekil 8(d)'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Manyetik akı yoğunluğu dağılımları; (a) Rev.02, (b) Rev.03, (c) Rev.04, (d) Rev.05

Her bir stator parametresinin belirlenmesinin ardından elde edilen analiz sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'da alan Rev.02, Rev.03, Rev.04 ve Rev.05 revizyonları sırasıyla en uygun oluk geometrisi (Rev.02), stator iç çapı (Rev.03), sargı bilgisi (Rev.04) ve stator paket boyu uzunluğu (Rev.05) belirlendikten sonraki tasarımları ifade etmek için kullanılmıştır. Şekil 9'daki sonuçlardan da görülebileceği gibi stator parametreleri en uygun şekilde belirlendiğinde (Rev.05) toplam kayıplar değişikliğe öncesine (Rev.01) kıyasla %14.37 azalmış ve motor verimi %94.98 değerinden %95.67'ye çıkmıştır.

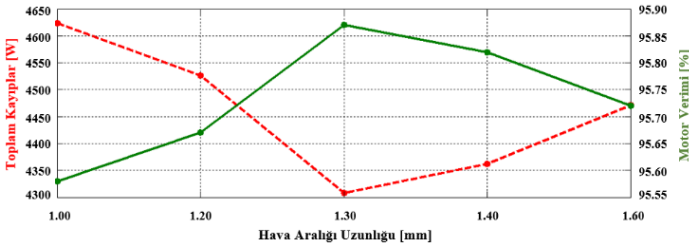


Şekil 9. Stator tasarımının motor verimine etkisi

### 3.4 Hava Aralığı Uzunluğunun Analizi

Hava aralığının, motorda bozucu etkilere karşı statorla rotor arasında bir filtre görevi gördüğü bilinmektedir. Hava aralığı uzunluğu olması gereken optimum değerinden daha küçük seçildiğinde hem motor harmonik kayıplarında bir artış yaşanmakta hem de mekanik kısıtlamalardan dolayı motorun imalatı zorlaşmaktadır. Hava aralığı uzunluğunun olması gereken optimum değerinden daha büyük seçilmesi durumunda ise aşırı yük kapasitesinde bir artış sağlanmasına, motorun soğutma performansının iyileşmesine ve akustik gürültü seviyesinin azalmasına rağmen motorun nominal ve boşa çalışma akımında bir artış ve güç faktörü değerinde ise bir düşüş meydana gelmektedir. Motorun yüksek akım çekmesi stator bakır kayıplarının ve dolayısıyla motor toplam kayıplarının artmasına ve motor verim değerinin düşmesine sebebiyet vermektedir. Yapılan tasarım çalışmasında hava aralığı uzunluğu belirlenirken yukarıda sıralanan hususlar dikkate alınmış ve tasarım süreci başında amaçlanan motor verimliliğinin artırılması ve motor performans değerlerinin iyileştirilmesi hedefi doğrultusunda analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizlerde hava aralığı uzunluğunun değişimiyle motor toplam kayıplarında ve motor veriminde meydana gelen değişimler Şekil 10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 10. Hava aralığı uzunluğunun motor toplam kayıplarına ve verime etkisi

Referans olarak seçilen motorda hava aralığı uzunluğu olarak 1.20 mm değeri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analiz çalışmasının ardından ise motor için en uygun hava aralığı olarak, motor verimi maksimize eden 1.30 mm değeri (Rev.06) belirlenmiştir. 1.00 mm hava aralığı uzunluğundan daha düşük değerler mekanik açıdan motor imalatından problem teşkil edeceğinden analizler sırasında daha küçük hava aralığı uzunlukları denenmemiştir. Belirlenen yeni hava aralığı değeri sayesinde motor kayıpları, değişiklik öncesine (Rev.05) kıyasla %4.28 oranında azalmış ve motor verimi %95.67 değerinden %95.87'ye çıkmıştır.

### 3.5. Rotor Parametrelerinin Analizi

Sac tipi seçiminin, stator parametrelerinin ve hava aralığı uzunluğunun belirlenmesinin ardından en uygun rotor parametreleri için analizler yapılmıştır. Yapılan tasarım çalışması sırasında rotor dış çapı, mil çapı, rotor oluk sayısı, hava

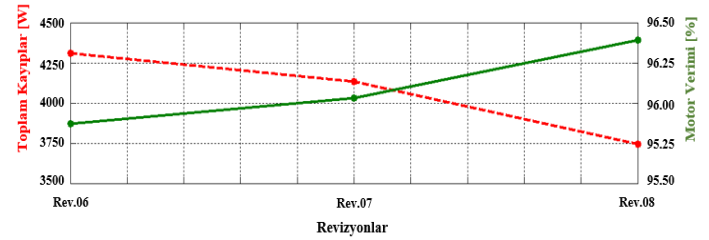
kanallarının sayısı ve ölçüleri sabit tutulmuş; sırasıyla en uygun oluk geometrisi ve uç halka ölçüleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Referans alınan motorun rotor oluk geometrisi Şekil 4(b)'de gösterildiği gibidir. Referans motorda rotor oluk geometrisini oluşturan Hs0, Hs1, Hs2, Bs0, Bs1 ve Bs2 oluk geometrisi ölçüleri için kullanılan parametreler sırasıyla 4.60mm, 0.40mm, 21.6mm, 3.30mm, 8.10mm ve 5.10mm değerleridir.

Uygun rotor oluk geometrisi belirlenirken Şekil 4(b)'de gösterilen Hs0, Hs1, Hs2, Bs0, Bs1 ve Bs2 ölçülerinin her biri için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar arasından motor verim değerini maksimize eden rotor oluk geometrisi ölçüleri seçilmiştir. Hs0, Hs1, Hs2, Bs0, Bs1 ve Bs2 oluk geometrisi ölçüleri için belirlenen parametreler sırasıyla 4.75mm, 0.40mm, 27.0mm, 3.30mm, 8.10mm ve 5.10mm değerleridir.

Tasarım için en uygun oluk geometrisinin belirlenmesinin ardından aynı yaklaşım tarzıyla uç halkasını oluşturan uç halkası derinliği, uç halkası yüksekliği ve uç halkası genişliği parametrelerinin her biri için analizler yapılmıştır. Referans alınan motorda rotor uç halkası derinliği, uç halkası yüksekliği ve uç halkası genişliği ölçüleri için sırasıyla 33.0mm, 31.4mm ve 14.0mm değerleri kullanılmıştır.

Analizler arasından motor verim değerini maksimize eden ölçüler seçilmiştir. Rotor uç halkası derinliği, uç halkası yüksekliği ve uç halkası genişliği ölçüleri için belirlenen parametreler sırasıyla 0.00mm, 36.0mm ve 15.0mm değerleridir.

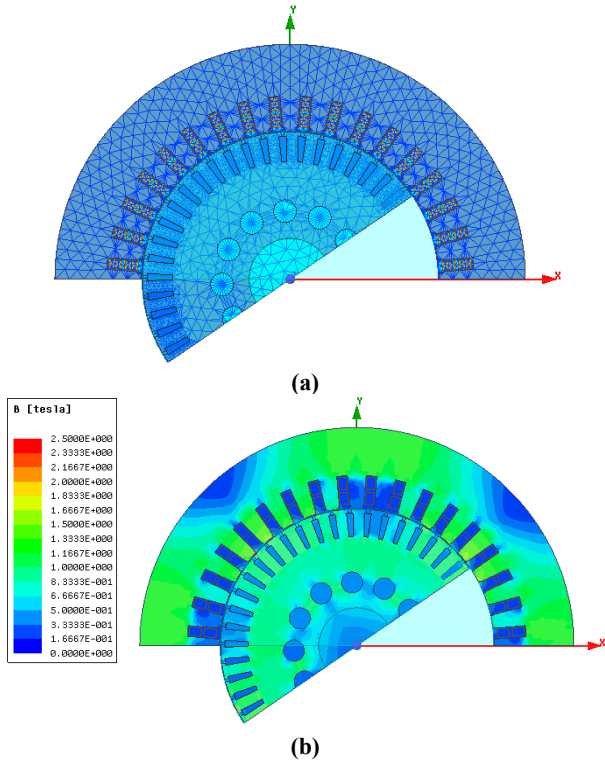
Tüm rotor parametresinin belirlenmesinin ardından elde edilen analiz sonuçlarına Şekil 11'de yer verilmiştir. Şekil 11'de yer alan Rev.07 ve Rev.08 revizyonları sırasıyla en uygun oluk geometrisi (Rev.07) ve uç halkası ölçüleri (Rev.08) belirlendikten sonraki tasarımları ifade etmek için kullanılmıştır. Şekil 11'de yer alan sonuçlardan da görülebileceği gibi belirlenen rotor parametreleri ve uç halkası ölçüleri sayesinde (Rev.08) yapılan değişiklik öncesine (Rev.06) kıyasla toplam kayıplar %13.06 azalmış ve motor verimi %95.87 değerinden %96.39'a çıkmıştır.



Şekil 11. Rotor tasarımının motor verimine etkisi

### 3.6. Nihai Tasarımın Analizi

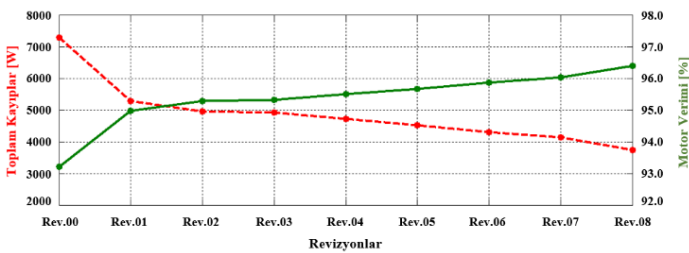
Yapılan analizler sırasında öncelikle sac malzemesi için ardından ise sırasıyla motorun stator, hava aralığı ve rotor parametreleri için motor verimini maksimize edecek ve toplam kayıpları minimize edecek en uygun değerler belirlenmiştir. Rev.08 tasarımı, ANSYS Maxwell 2D modülü kullanılarak yapılan analizler sonucu belirlenen nihai tasarımıdır. Belirlenen nihai tasarımın mesh yapısı Şekil 12(a)'da ve motorun yüklü durumda çalışırken sahip olduğu manyetik akı yoğunluğu dağılımı ise Şekil 12(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Nihai tasarım (Rev.08); (a) ağ atılmış geometri, (b) manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Motorda dış, boyunduruk veya hava aralığında meydana gelen manyetik doyma motorun verimliliğini etkileyen faktörlerden biridir (Gökhan YETGİN et al., 2012). Şekil 12(b)'de gösterilen Rev.08 tasarımının manyetik akı dağılımı incelendiğinde, stator ve rotor oluk geometrileri ile hava aralığı uzunluğunda yapılan değişikliklerin motorun dış, boyunduruk veya hava aralığında herhangi bir manyetik doymaya yol açmadığı görülmektedir.

Motor için en uygun sac tipi, stator parametreleri, hava aralığı uzunluğu ve rotor parametreleri belirlenirken elde edilen her bir revizyon sonucu motor toplam kayıplarında ve motor veriminde meydana gelen değişimler Şekil 13'te belirtilmiştir.



Şekil 13. ANSYS Maxwell 2D modülünde belirlenen her bir revizyonun motor verimine etkisi

Belirlenen referans motorun ANSYS Maxwell 2D ile analizi (Rev.00) ile yapılan çalışma sonucu elde edilen nihai tasarımın ANSYS Maxwell 2D analizi (Rev.08) karşılaştırıldığında verim değerinde %3.18'lik bir artış olduğu görülmektedir.

## 4. Sonuç

Kullanıcı ve imalatçı açısından bakıldığında motor performansının iyileştirilmesi ve işletim maliyetlerinin düşürülmesi oldukça önemlidir. Motor toplam maliyetinin büyük

bir bölümünü oluşturan işletme maliyeti ise ancak optimum şekilde tasarımı yapılmış yüksek performanslı motorların kullanılmasıyla azaltılabilir.

Belirlenen referans motor öncelikle ANSYS Maxwell 2D modülü kullanılarak modellenmiştir. Ardından seçilen referans motorun çıkış gücü değeri, nominal gerilimi, frekansı, stator dış çapı, stator ve rotor oluk sayısı, mil çapı, havalandırma kanallarının sayısı ve ölçüleri sabit tutularak motor için en uygun sac tipi, stator ve rotor parametreleri ile hava aralığı uzunluğunun belirlenip motorda maksimum verim değerine ulaşılabilmesi için tasarım ve analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda toplam motor kayıplarında ve motor veriminde meydana gelen değişimler verilen grafiklerle belirtilmiştir. ANSYS Maxwell 2D modülü kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen analiz çıktıları ve sonuçları aşağıda belirtildiği gibidir.

- Referans motorda kullanılan 1,5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değeri 6,00W/kg olan 0,50mm kalınlığındaki 50JN600 sac tipi de dâhil olmak üzere 5 farklı sac tipi için analizler yapılmıştır. Bu analizler arasından motor verim değerini maksimize eden 1,5T manyetik akı yoğunluğu ve 50Hz frekanstaki nüve kaybı değeri 1,20W/kg olan 0,35mm kalınlığındaki 35JN210 sac tipinin motorda kullanılmasına karar verilmiştir. Referans motorda sac kalınlığı daha ince ve nüve kaybı daha düşük bir sac tipi kullanıldığında nüve kaybında %44.68, toplam kayıplarda ise %27.45 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Referans motorun verim değeri ise %93.21 değerinden %94.98 değerine yükselmiştir. Motor veriminde yaklaşık %1.90 oranında bir artış yaşanmıştır.
- Stator parametrelerinde yapılan değişiklikler sonucunda toplam kayıplar değişiklik öncesine (Rev.01) kıyasla %14.37 azalmış ve motor verimi %94.98 değerinden %95.67'e çıkmıştır.
- Motor için en uygun hava aralığı olarak, motor verimi maksimize eden 1.30 mm değeri belirlenmiştir. Belirlenen hava aralığı ile değişiklik öncesine kıyasla toplam kayıplar %4.28 oranında azalmış ve motor verimi %95.67 değerinden %95.87'ye çıkmıştır.
- Rotor parametrelerinde yapılan değişiklikler sonucunda toplam kayıplar değişiklik öncesine (Rev.07) kıyasla %13.06 azalmış ve motor verimi %95.87 değerinden %96.39'a çıkmıştır.
- Belirlenen referans motorun ANSYS Maxwell 2D ile analizi (Rev.00) ile yapılan çalışma sonucu elde edilen nihai tasarımın ANSYS Maxwell 2D analizi (Rev.08) karşılaştırıldığında verim değerinde %3.18'lik bir artış olduğu görülmektedir.

Ayrıca Maxwell 2D ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kullanılan yeni sac tipi ile belirlenen yeni stator oluk geometrisi, rotor oluk geometrisi ve hava aralığı uzunluğu ölçülerine bağlı olarak motor nominal akım değerinde ve nominal moment değerinde azalma meydana gelmiştir. Motorun güç faktörü değeri ile nominal devir sayısında ise bir artış yaşanmıştır.

Benzetim çalışmaları yapılmış motorların prototipleri üretilerek sonuçların karşılaştırması ile farklı malzemeler kullanılarak bu malzemelerin motor verimine etkisinin incelenmesi ileride yapılabilecek çalışmalara örnek olarak söylenebilir.



## Kaynakça

- Abouzeid, A. F., Guerrero, J. M., Endemaño, A., Muniategui, I., Ortega, D., Larrazabal, I., & Briz, F. (2020). Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 700, 13(3), 700. <https://doi.org/10.3390/EN13030700>
- Acar, Ç., Soygenç, O. C., & Ergene, L. T. (2018). Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Asenkron Motorlarda IE2 Verim Sınıfından IE4 Verim Sınıfına Geçiş Amaçlı Bir Çalışma. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 59–65. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd/issue/39229/461952>
- Calin, M. D., Georgescu, M., & Lungoci, C. (2012). Influence of the magnetic materials on the behavior of traction motors for vehicle propulsion. *2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2012 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICATE.2012.6403417>
- De Pancorbo, S. M., Ugalde, G., Poza, J., & Egea, A. (2015). Comparative study between induction motor and Synchronous Reluctance Motor for electrical railway traction applications. *2015 5th International Conference on Electric Drives Production, EDPC 2015 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EDPC.2015.7323219>
- Enache, S., Campeanu, A., Enache, M. A., Vlad, I., & Popescu, M. (2020). New aspects in optimal design of asynchronous motors used in light railway traction. *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2020*, 606–611. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161847>
- Figueiredo, R. (2015). Simulation model for driving dynamics, energy use and power supply. In *undefined*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Gökhan YETGİN, A., Turan, M., & İhsan ÇANAKOĞLU, A. (2012). Asenkron Motorun Boyunduruk ve Dış Boyutlarının Motor Performansına Etkileri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 027, 79–88. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpufted/issue/35930/403327>
- Gürdal, O. (2015). *Elektrik Makinalarının Tasarımı*. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları. [https://www.researchgate.net/publication/335700632\\_Elektrik\\_Makinalarinin\\_Tasarimi](https://www.researchgate.net/publication/335700632_Elektrik_Makinalarinin_Tasarimi)
- Ikeda, R., Yusya, S., & Kondo, K. (2019). Study on design method for increasing power density of induction motors for electric railway vehicle traction. *2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2019*, 1545–1550. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785087>
- Kang, L., Jiang, D., Xia, C., Xu, Y., & Sun, K. (2021). Research and Analysis of Permanent Magnet Transmission System Controls on Diesel Railway Vehicles. *Electronics* 2021, Vol. 10, Page 173, 10(2), 173. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10020173>
- Keskin Arabal, F., Senol, I., & Oner, Y. (2020). Performance Analysis of Axial-Flux Induction Motor with Skewed Rotor. *Energies*, 13(19), 4991. <https://doi.org/10.3390/EN13194991>
- Kobelev, A., Rozanov, D., & Makarov, L. (2020, October 4). Performance Analysis of Traction Induction Motors of Various Designs for Low-Floor Light Rail Vehicles. *2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICEPDS47235.2020.9249357>
- Koushan, S. (2020). *High power density variable speed traction motor* [Middle East Technical University]. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/45587>
- Kreuawan, S. (2008). Modelling and optimal design in railway applications [Ecole Centrale de Lille]. In <http://www.theses.fr>. <http://www.theses.fr/2008ECLI0010>
- Kuci, E., Henrotte, F., Geuzaine, C., Dehez, B., Greef, C. De, Versele, C., & Friebel, C. (2020). Design optimization of synchronous reluctance machines for railway traction application including assembly process constraints. *Proceedings - 2020 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*, 117–123. <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270859>
- Manoharan, S., Devarajan, N., Deivasahayam, S. M., & Ranganathan, G. (2009). Review on efficiency improvement in squirrel cage induction motor by using DCR technology. *Journal of Electrical Engineering*, 60(4), 227–236.
- Masuku, T. M., Wang, R. J., Botha, M. C., & Gerber, S. (2019). Design Strategy of Traction Induction Motors. *Proceedings - 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa, SAUPEC/RobMech/PRASA 2019*, 316–321. <https://doi.org/10.1109/ROBOMECH.2019.8704761>
- Murthy, S. S., Singh, B., Bhuvaneswari, G., Naidu, K., & Siva, U. (2006). Design of squirrel cage induction motors for traction applications. *2006 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06*. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2006.344344>
- Mushid, F. C., & Dorrell, D. G. (2017). Review of axial flux induction motor for automotive applications. *Proceedings - 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2017*, 146–151. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2017.7947738>
- Nategl, S., Lindberg, D., Aglen, O., Brammer, R., & Boglietti, A. (2018). Review and Trends in Traction Motor Design: Electromagnetic and Cooling System Layouts. *Proceedings - 2018 23rd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2018*, 2600–2606. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506817>
- Polat, M., & Akıncı, R. (2020). Elektrikli Araçlar İçin Eksenel Akıllı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 345–358. <https://doi.org/10.35234/FUMBD.636890>
- Popescu, M., Riviere, N., Volpe, G., Villani, M., Fabri, G., & Di Leonardo, L. (2019). A Copper Rotor Induction Motor Solution for Electrical Vehicles Traction System. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2019*, 3924–3930. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912248>
- Smith, A. C. (2000). Integrating FE into induction motor design - A marriage of inconvenience? *IEE Colloquium (Digest)*, 13, 17–23. <https://doi.org/10.1049/IC:20000051>
- Steel Corporation, J. (n.d.). *JFE electrical steel sheets*. Retrieved January 28, 2022, from <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/flc-001.pdf>
- Zhao, N., & Schofield, N. (2016). An improved induction machine design procedure for electric vehicle traction. *IET Conference Publications*, 2016(CP684). <https://doi.org/10.1049/CP.2016.0127>