

## Sonlu Elemanlar Analizi Yazılımı ile IPM Mil Motor Performans Analizi Üzerine Karşılaştırmalı Bir Benzetim Çalışması

Büşra Aslan<sup>1\*</sup>, Selami Balcı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yunus Emre Yerleşkesi, Karaman, Türkiye, ORCID:0000-0002-0313-0172

<sup>2</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yunus Emre Yerleşkesi, Karaman, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3922-4824

\*Sorumlu Yazar: [busraaslan.0070@gmail.com](mailto:busraaslan.0070@gmail.com)

Geliş tarihi:10.12.2021

Kabul tarihi:25.12.2021

### Özet

Kalıcı tip mıknatıslı senkron motorlar, günümüzde sabit güç ve değişken hız gereksinimi olan bazı otomasyon sistemlerinde, beyaz eşyalarda, savunma sanayii uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. CNC tezgâhları, ahşap tornaları, metal tornaları gibi ağır tork ve yüksek devir gerektiren uygulamalarda ise mil motorlar tercih edilir. Küçük bir hacme sahip olmalarına rağmen mil motorları, buldukları sistemlerin daha yoğun ve verimli çalışmasını sağlarlar. Son yıllarda popüler konu haline gelen sonlu elemanlar analizi (SEA) yaklaşımı ile elektrik motorlarının performans incelemeleri, elektromanyetik modelleme ve benzetim çalışmaları kolaylıkla yapılabilmektedir. Böylece, farklı yapı ve özelliklerde tasarlanabilen elektrik motorlarının akım, gerilim, güç, tork ve hız karakteristikleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, SEA yazılımı kullanılarak kalıcı tip mıknatıslı motorların (IPM) ve IPM mil motorların çalışma performanslarının karşılaştırması üzerine bir benzetim örneği verilmiştir. Böylece, mekatronik uygulama alanlarında sıkça kullanılan mil motorların tasarımı üzerine elde edilen performans verileri elde edilmiştir. Elektrik makinelerinin tasarımı konularına ilgi duyan araştırmacılar için örnek bir karşılaştırmalı SEA benzetim çalışması sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kalıcı tip mıknatıslı motorlar, IPM, mil motorlar, SEA.

### A Comparative Study on IPM Spindle Motor Performance Analysis with Finite Element Analysis Software

#### Abstract

Permanent magnet synchronous motors are used in many areas such as some automation systems, white goods, defense industry applications, which require constant power and variable speed. Spindle motors are preferred in applications that require heavy torque and high revolutions such as CNC machines, wood lathes, metal lathes. Although they have a small volume, spindle motors enable the systems they are in to work more intensively and efficiently. With the finite element analysis (FEA) approach, which has become a popular subject in recent years, performance studies of electric motors, electromagnetic modeling and simulation studies can be done easily. Thus, current, voltage, power, torque and speed characteristics of electric motors that can be designed with different structures and features can be obtained. In this study, a simulation example is given on the comparison of operating performances of permanent magnet motors (IPM) and IPM spindle motors using FEA software. Thus, the performance data obtained on the design of spindle motors, which are frequently used in mechatronics application areas, are obtained. An exemplary comparative FEA simulation study is presented for researchers interested in the design of electrical machines.

**Key Words:** Permanent magnet motors, IPM, spindle motors, FEA.

#### 1. GİRİŞ

İnsanlar ilk çağdan bu güne günlük hayatı kolaylaştırmak amacıyla birçok buluş gerçekleştirmişlerdir. İlk çağlarda daha çok insan gücüne dayanan buluşlar yapılsa da, 18. yüzyılda Endüstri 1.0 buhar makinelerinin geliştirilmesi ile sanayi sektörü makineleşmeye başlamış, 1836 yılında elektrikliğin ve elektrik motorlarının keşfinden sonra yeni bir buluş sayfası açılmıştır. Böylece, Endüstri 2.0 ile teknolojik gelişmelerin yaşandığı ülkeler hızla kalkınmışlar ve bu süreci elektronik yarıiletken teknolojisi ile birlikte Endüstri 3.0 takip etmiştir. Endüstri 4.0 olarak günümüzde bilişim sistemleri ile donatılmış akıllı sistemlerin geliştirilmesi olarak devam etmektedir. Bu bağlamda, mekatronik mühendisliği alanı hem elektrik motorlarının tasarım tiplerinin geliştirilmesinde hem de sürücü devrelerinin algılayıcılar ile bilişim tabanlı sistemler kullanılarak kontrol edilmesinde büyük rol oynamaktadır.

Mekatronik mühendisliği alanında sıklıkla kullanılan servo motor tiplerinden olan fırçasız D.A. motorları elektrik, elektronik, makine ve kontrol mühendisliği dahil olmak üzere çok disiplinli alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Bu motorların yanı sıra kalıcı tip mıknatıslı senkron motorlar servo sistemlerin temel bileşenleridir. Eksenel ve radyal olarak farklı tip ve yapıda (dış motor ve iç motor gibi) tasarlanabilmektedirler. İç kalıcı mıknatıslı motorlar (Interior Permanent Magnet-IPM) rotor bünyesine gömülmüş kalıcı mıknatıslar ile yapısal olarak klasik rotor yüzeyine yerleştirilen kalıcı mıknatıslı motorlardan farklı bir yapıdadır. Bu tasarım biçimi özellikle yüksek hızlı uygulamalarda, rotorun dönüş hızına bağlı olarak kalıcı mıknatısların, merkezkaç kuvveti etkisiyle mekanik zorlanma riskini ortadan kaldırmaktadır. IPM'ler çeşitli uygulamalar için mil motor olarak da tasarlanabilmekte ve yüksek tork gereksinimlerini dişli kutusu ve kasnak sistemi kullanmaksızın karşılayabilmektedirler. Bu avantajlara sahip mil motorların verimini arttırmaya yönelik tasarım çalışmaları üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları son yıllarda yoğunluk kazanmıştır.

Geçmiş literatürde, yüksek hızlı kalıcı tip mıknatıslı bir mil motorun yapısal özellikleri ve tasarım gereksinimleri için harmonik bastırma ve tork dalgalanmasını azaltma yöntemini kullanılan bir çalışmada stator ve rotor arasındaki hava boşluğu optimize edilmiştir. Bu amaçla, kalıcı mıknatısların harici manyetik alan dağılımını değiştirmek için rotor boyunduruğunun her iki ucunda relüktans (manyetik direnç) olukları önerilmektedir. Ayrıca, manyetik akı yoğunluğunun dalga formunu sinüzoidal dağılıma yakın olan ve yol alma anında kalıcı mıknatısları tahrip etmeyen hava aralığı akı yoğunluğu dalga formları elde etmek hedeflenmiştir. Sinüzoidal dağılımı elde etmek amacıyla rotor boyunduruğunun iki ucunda düzenlenmiş farklı genişlik ve derinliklere sahip birkaç relüktans yarığı kullanılmıştır. Yapılan tasarım değişikliklerine göre, harmonik elektromotor kuvvetinin (EMK) harmonik bastırılmasının etkileri ve tork dalgalanmasındaki azalmalar da rapor edilmiştir. Böylece, yüksek hızlı kalıcı mıknatıslı iş mili motorunun ek güç kaybı ve tork dalgalanmasının uygun bir tasarımla azaltılabileceği de vurgulanmıştır [1].

Mekanik güç kaynaklarının önemli bir parçası olan mil motorlar, büyük arızaların ortaya çıkması nedeniyle ve pahalı üretim maliyetinin azaltılması amacıyla yüksek kaliteli bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) takım tezgâhlarında üretilebilir. Hatasız bir mil motor üretimi için uygun bir model kurularak motorlu iş milinin başlangıç hatalarının tespit edilmesi oldukça önemlidir. Bu konuda yapılan bir çalışmada, motorize iş milindeki motor sisteminin stator sargısının başlangıç kısa devre arızasını tespit etmek için bir şematik metot sunulmaktadır [2]. Diğer taraftan, elektrik motor yapılarındaki termal hataların sebebi, motor yapısındaki ısıl bozulmalardır. Termal hata, makine kontrol döngüsüne bir kompanzasyon algoritması uygulanarak etkin bir şekilde azaltılabilir. Telafi algoritması, bir bozulma modelinden veya termal hatanın matematiksel temsilinden türetilen bir çalışmada, bir iş mili motor düzeneğindeki termal hata, bozulma modeli kullanılarak sıcaklık ölçümünden tahmin edilmektedir. Ayrıca, model çıktısı üzerinde en az etkiye sahip olan sıcaklık sensörü (algılayıcısı) kullanımını ortadan kaldırmak için model indirgeme tekniği kullanılmıştır [3].

Hong, Choi ve diğerleri çalışmalarında, yüksek hızlı ve yüksek verimli 10 kW, 30 000 rpm klasik bir asenkron motorun analiz tekniklerini ele almışlardır. Asenkron motoru zamanla değişen manyetik sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişler ve elde ettikleri test sonuçlarını sunmuşlardır. Böylece, test sonuçlarından elde edilen verilere göre asenkron motor yüksek hızlı bir iş mili sistemi uygulamalarında kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir ve bir örnek motor üretmişlerdir [4].

Eksenel akılı olarak tasarlanan mil motorlar, bilgisayar donanımında sabit disk sürücüsünün (HDD) performansı için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Ultra yüksek alan yoğunluğuna sahip yeni nesil sabit disk sürücüsünün, gereksinimlerini karşılamak için optimum elektromanyetik tasarım, mekanik sistem geliştirme ve gelişmiş güç sürücüsünün entegrasyonu yoluyla iş mili motor sisteminin titreşim ve akustik gürültü gibi sorunları giderebilir. Böylece, titreşim ve akustik gürültüsündeki harmonik vuruntuları etkin bir şekilde en aza indirilerek motor performansı iyileştirilebilir [5-7].

Diğer taraftan, [8]'de yapılan deneysel bir çalışmada, mekanik olarak rotorun kilitlenmesine ihtiyaç duyulmadan bir mil motorunun endüktans profilinin çıkarılabilmesi için özgün bir yöntem tanıtılmıştır. Bu yöntem, endüktans ölçümü gerçekleştirebilmek için bir darbe ölçüm sinyali ile üst üste yerleştirilmiş bir DA elektriksel kilitleme sinyalinin kullanılması tekniklerini içermektedir. DA kilitleme sinyali daha sonra motorun mikro adımlamasına izin vermek için darbe sinyali olarak uygulanır. Böylece, bir elektrik motorunun dinamik endüktans profili tüm rotor pozisyonlarında yakalanabilir.

Sonlu elemanlar analizi yaklaşımına göre Ocak, Gulec [9]'da, bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) freze makinesi uygulaması için bir mil motoru olarak, gelecek vadeden altı kutuplu rotor yüzeyine gömülmüş kalıcı mıknatıslı (IPM) motor tasarlanmıştır. Temel motor için CNC'deki mevcut bir yüzeye monte edilmiş kalıcı mıknatıslı (SPM) motor seçilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalar için en iyi performans parametrelerine sahip tasarım yüksüz ve yükte testlerden geçirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçları karşılaştırılmış ve büyük oranda uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ve eşdeğer devre analizi ile doğrulaması yapılmış olan çalışmada, yüksek hızlı mil motor uygulamalarında kullanılması amacıyla stator oluk geometrisi için en uygun tasarım açıklanmaktadır [10].

Bu çalışmada, 0,55 kW gücünde 4 kutuplu üç fazlı bir IPM için, yüksek hızlı bir mil motor olarak performans incelemeleri klasik yapıdaki düşük hızlı IPM'ye göre karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Böylece, mil motorların elektromanyetik modellemesi ile yapısal farklılıkları üzerinde durulmuştur. Mekatronik mühendisliği alanında elektrik motorlarının tasarımı anlayışında SEA yazılımı kullanılarak deneysel çalışmalar öncesinde elektrik motorlarının modelleme ve benzetim çalışmalarına ilişkin olarak örnek modelleme ile araştırmacılar için eğitici bilgiler sunulmuştur.

## 2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE ELEKTROMANYETİK MODELLEME METODU

Elektrik makinelerinin çalışmalarının temelinde elektromanyetizma denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemler James Clerk Maxwell tarafından 1861-1862 yıllarında yayınlamış ve elektromanyetik alan teorisi üzerine Eş. 1-4 ile verilen Gauss, Faraday ve Ampere yasalarına dayandırılmış olan Maxwell denklemleridir [11]. Sonlu elemanlar analizi için geliştirilmiş olan yazılımlar (Ansys-Maxwell, Comsol, Jmag gibi) temel olarak manyetostatik, elektrik, elektrostatik ve elektromanyetik geçici durum analizi gibi çözücü tiplerine göre bu denklemleri esas alarak hesaplama yapmaktadırlar.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

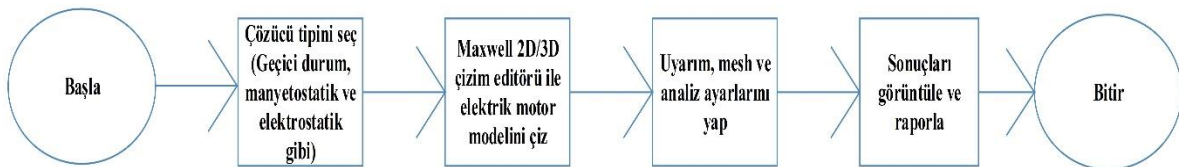
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Bu denklemlerde, Tesla cinsinden manyetik akı yoğunluğu (B), Volt/cm olarak elektrik alanı (E), A/mm<sup>2</sup> olarak akım yoğunluğu (J), siemens olarak iletkenlik ( $\rho$ ),  $4\pi 10^{-7}$  H/m olarak boşluğun geçirgenliği ( $\mu_0$ ) ve son olarak 8,854 pF/m ise boşluğun yalıtkanlık katsayısı ( $\epsilon_0$ ) olarak ifade edilmektedir [12].

Sonlu elemanlar yazılımı ile indüktör, transformator, elektrik motoru ve jeneratör gibi elektrik makinelerinin tasarımı ve benzetim çalışmalarını yapabilmek için basit olarak takip edilen adımlar Şekil 1'de görülen elektromanyetik modelleme için temel akış diyagramıdır.



Şekil 1. Elektromanyetik modelleme için temel akış diyagramı.

Elektromanyetik modellemede ilk adım tercih edilen SEA yazılımın çözücü ayarlarının yapılmasıdır. Bu çözücü tipleri manyetostatik, elektrostatik ve geçici durum gibi performans incelemesinin ayrıntısına göre belirlenmektedir. Örneğin, bir elektrik motoru evirici devresi ile dış devreden bir uyarım alacak ise genel olarak geçici durum elektromanyetik çözücü ayarları kullanılmaktadır. İkinci adımda, elektrik motorunun boyutlandırılması için iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) olarak geometrik çizim işlemi tamamlanır, bu süreç elektrik motorunun sanal bir fabrikada üretim anlayışına benzer niteliktedir. Bu aşamada, motorun çekirdek ve sargı materyalleri yazılımın materyal kütüphanesinden seçilerek atamaları yapılır. Eğer uygun bir materyal yok ise kullanıcı tarafından ilgili materyalin teknik özellikleri ve verileri tanımlanabilir. Üçüncü adımda uyarım, mesh (sonlu eleman ağları), zaman aralıkları ve diğer analiz sınırları belirlenir. SEA yazılımı ile benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçların görüntülenmesi ve rapor edilmesi için 2D/3D grafikler, akım, gerilim, endüktans, güç kayıpları, tork, hız gibi birçok parametre izlenebilmektedir. Ayrıca, motorun stator ve rotor kısımlarında akı dağılımları da görsel olarak belirlenebilmektedir [13].

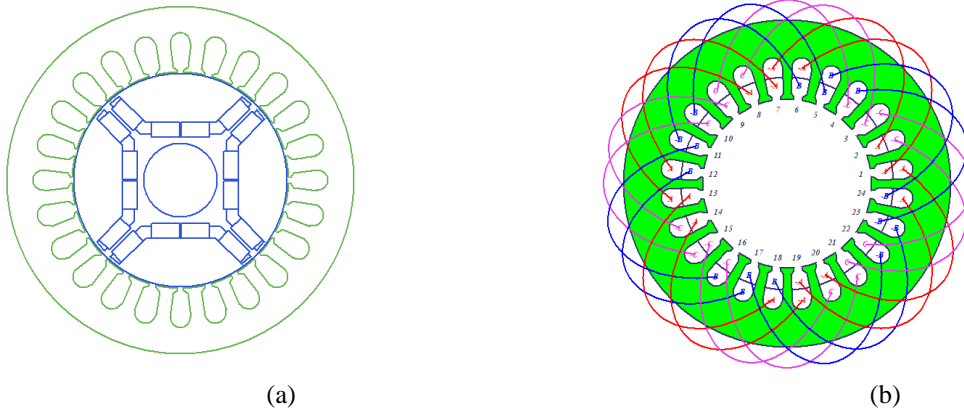
### 3. SEA YAZILIMI İLE BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada modellenen IPM için teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Stator ve rotor çekirdek materyali olarak Ansys-Electronics R19 yazılımında modelleme yapabilmek için M19\_24G yönlendirilmemiş %3 oranında silikon çelik alaşım kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Elektromanyetik modellemesi yapılan IPM motor teknik özellikleri.

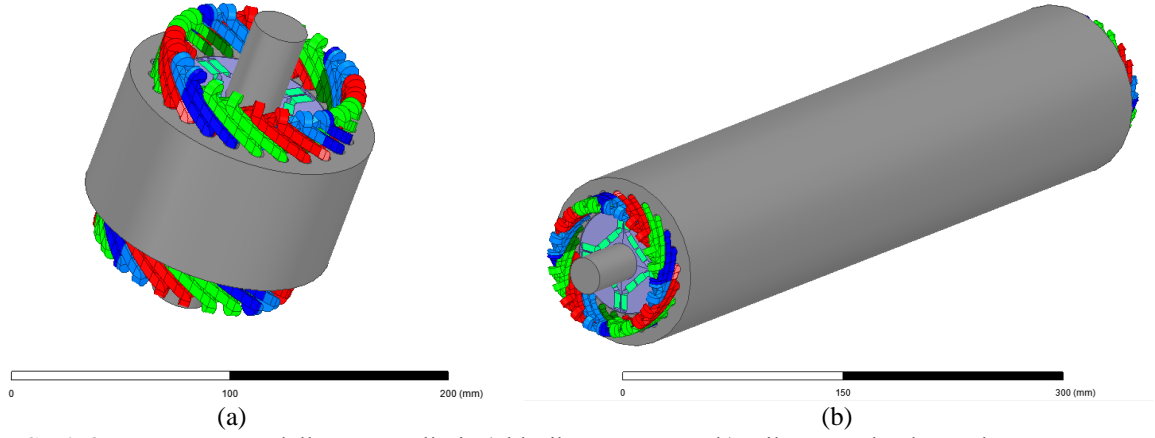
Anma çıkış gücü	0,55 kW
Çalışma frekansı	120 Hz
Anma hızı	3600 rpm
Kutup sayısı	4
Stator dış çapı	120 mm
Stator iç çapı	75 mm
Stator çekirdek boyu	65 mm
Çekirdek paket faktörü	0,95
Çekirdek materyali	M19_24G
Stator oluk sayısı	24
Faz sayısı	3
Stator sargı bağlantı tipi	Yıldız
Bobin adımı	5
Kalıcı mıknatıs kalınlığı	5 mm
Kutup başına mıknatıs genişliği	40 mm
Kalıcı mıknatıs tipi	XG196/96 (NdFeB)

Modellemesi gerçekleştirilen motorun Ansys-Rmxprt modülündeki 2D görünümü Şekil 2’de verilmiştir. Böylece, dönen makinelerin boyutlarına göre performans belirlemeleri ve stator sargılarının oluklara dağılımları da ayrıntılı olarak görülebilmektedir.



**Şekil 2.** IPM motorun 2D görünümü, a) stator ve kutup mıknatısları gömülmüş rotor yapısı, b) stator faz sargıları

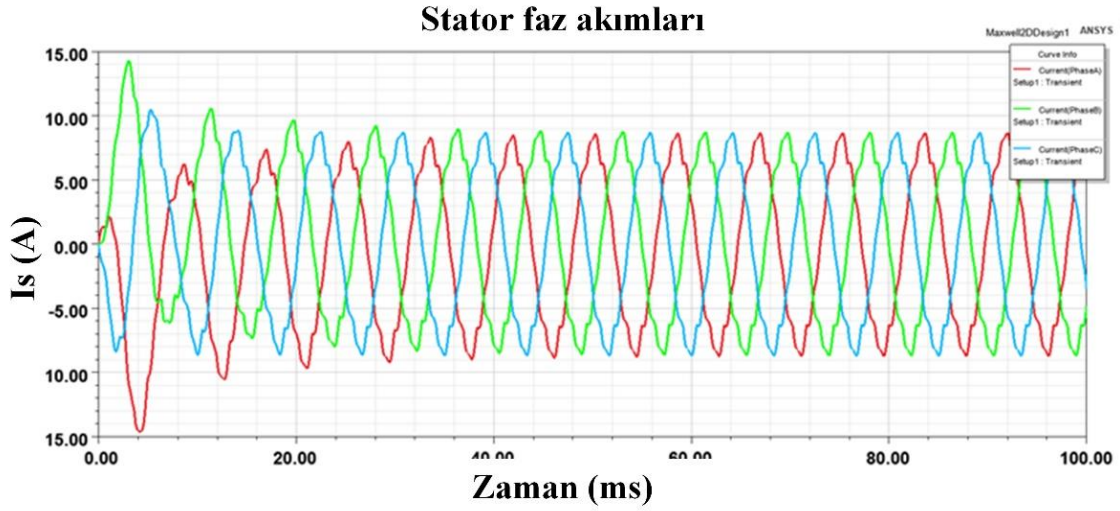
Bu aşamadan sonra istenilen boyutlarda planlanan tasarımların Maxwell yazılımına link verilmesi sağlanmakta ve modellenen elektrik motorunun 2D veya 3D olarak benzetim çalışmaları yapılabilmektedir. Böylece tasarlanan IPM motor ve mil motorunun 3D görünümleri Şekil 3'te verilmiştir.



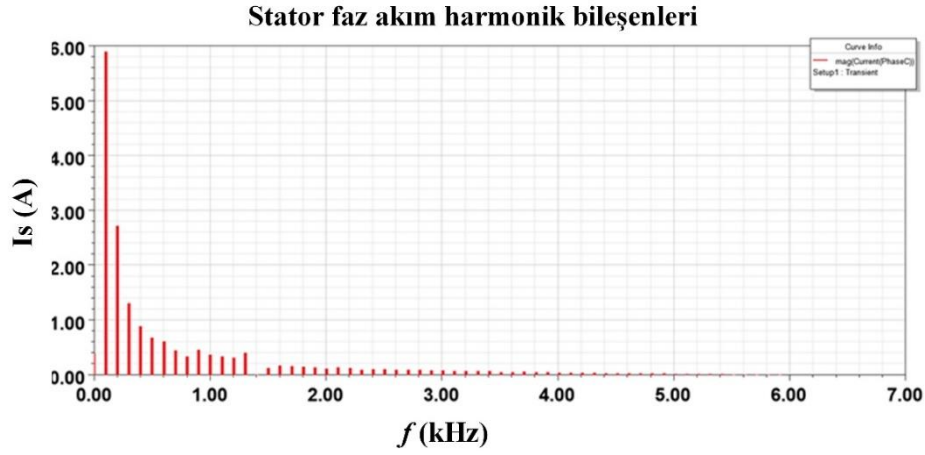
Şekil 3. IPM motor modelleme görselleri, a) klasik tasarım IPM b) mil motor olarak tasarlanan IPM

### 3.1. Klasik IPM motorun performans incelemeleri

Elde edilen SEA analiz sonuçlarına göre motorun stator faz akımları Şekil 4'te verilmiştir. Faz akımlarının harmonikler sebebiyle sinüzoidal dalga formundan uzak olduğu görülebilmektedir. Bu yüksek frekanslı harmonik bileşenler hem güç kayıplarını artırmakta hem de tork üretiminde gürültülere sebep olmaktadır (Şekil 5).

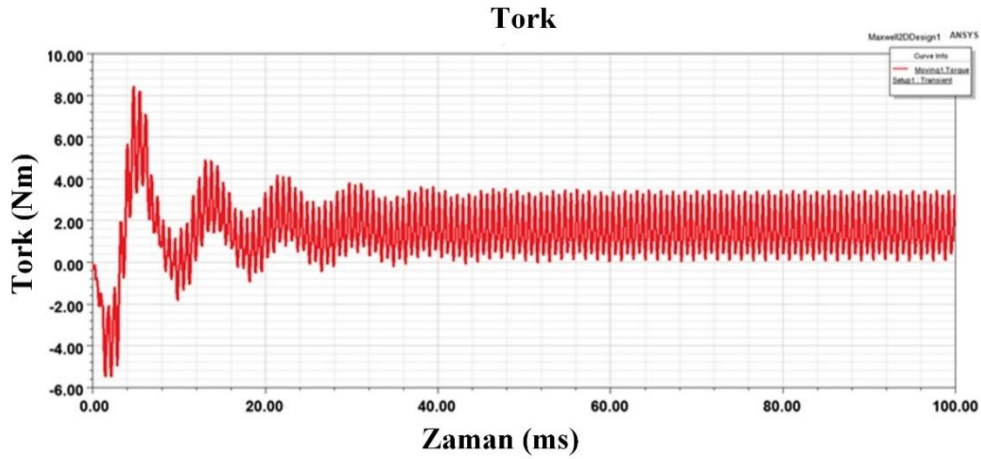


Şekil 4. IPM motor stator faz akım dalga formları.



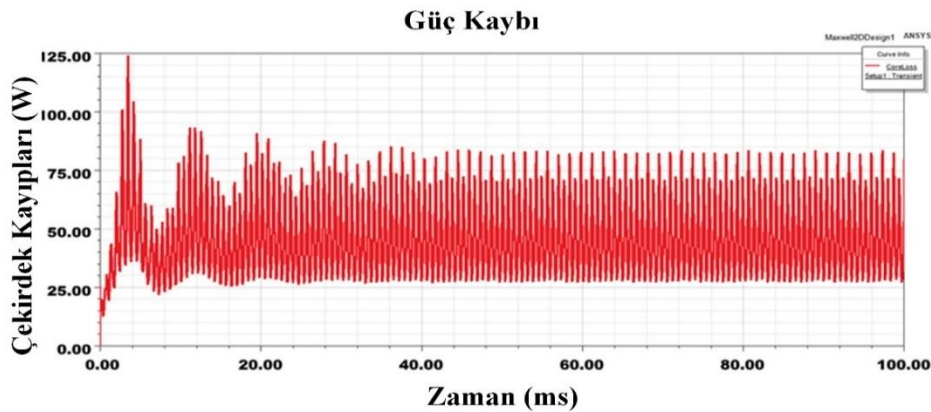
Şekil 5. IPM motor stator faz akımı harmonik bileşenleri.

Klasik IPM motorun tork eğrisi Şekil 6'da görülebileceği gibi kararlı durum çalışma rejiminde oldukça dalgalanmalı bir davranış göstermektedir. Bu durum motorun yük altında iken doğası gereği göstermiş olduğu bir davranıştır.



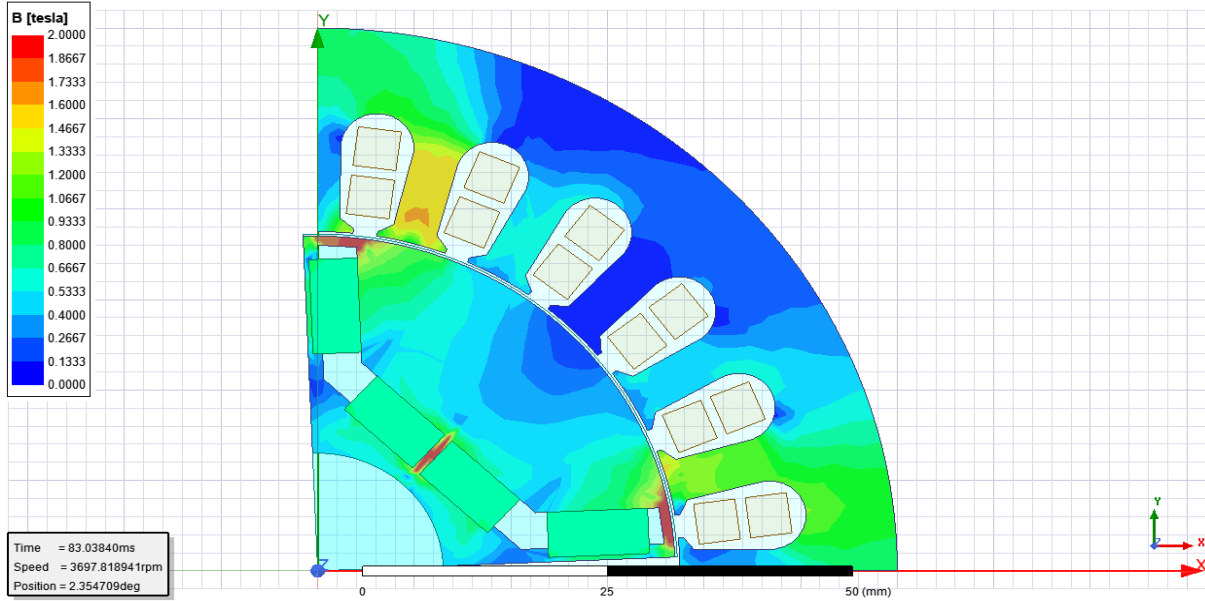
Şekil 6. IPM motor tork eğrisi.

IPM motorun çekirdek kayıpları için stator faz akımlarındaki harmonik bileşenlerin etkisiyle güç kayıplarında artış görülmektedir (Şekil 7). Çekirdek kayıpları elektrik motorlarının stator ve rotor yapılarında sıcaklık artışı gibi olumsuz özellikleri barındırmaktadır.



Şekil 7. IPM motor çekirdek kayıpları.

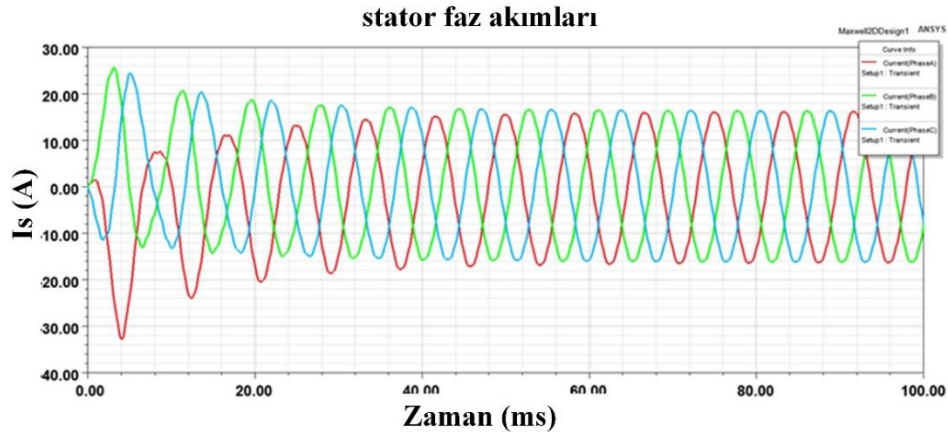
Elektrik motorlarının stator ve rotor aksamlarının yapıldığı çekirdek materyallerin mıknatıslanma kabiliyetleri ve doyma akı değerleri tasarım için en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada, stator ve rotor çekirdek paketleri için M19\_24G kullanılmıştır. Bu materyalin 50 Hz çalışma frekansı ve 1.7 T akı yoğunluğu değerlerinde spesifik nüve kaybı değeri yaklaşık olarak 3,5 W/kg'dır. Böylece, kararlı durumda stator ve rotor yüzeyindeki akı dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Stator oluklarının dışlarında yaklaşık 1.65 T akı yoğunluğu ile çekirdek materyalinin doyma akı yoğunluğu değeri aşılmamıştır. Ancak rotorda gömülü olan kalıcı tip mıknatısların olduğu kısımlarda stator manyetik akısı ile etkileşime giren manyetik devre yolunun bazı bölgelerinde akı değeri 2 T'ya yaklaşmıştır. Burada, rotor bünyesine gömülü olan kalıcı tip mıknatısların etkileşimi de yaklaşık 0,8 T olarak görülebilmektedir. Bu bağlamda, kalıcı tip mıknatısların hem manyetik performansları hem de geometrik biçimleri önemli olmakla birlikte rotor yüzeyinde yerleşim ve boyutları da tasarım için önemlidir.



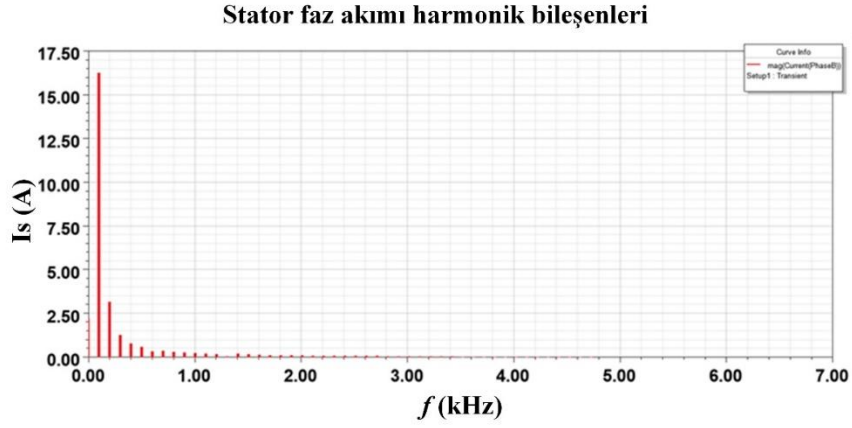
Şekil 8. IPM motor stator ve rotor yüzeyindeki akı dağılımları.

### 3.2. IPM mil motorun performans incelemeleri

Klasik yapıdaki IPM'nin 65 mm stator paket boyu 300 mm olarak uzatılmış ve basit bir IPM tip mil motoru tasarlanmıştır. Böylece, diğer boyutlar değiştirilmeden benzer yapıdaki klasik IPM'ye göre performans karşılaştırması daha kolay yapılabilmektedir. Mil motorun stator faz akımları için Şekil 9 ile verilen dalga formlarının saf sinüzoidal forma daha yakındır ve Şekil 10'da görülebileceği gibi stator akımı harmonik bileşenleri temel dalga bileşene göre daha küçük genliklerdedir.

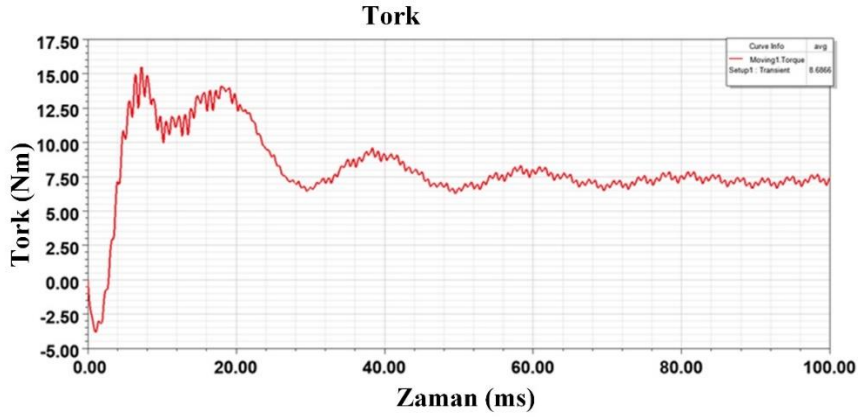


Şekil 9. IPM tip mil motor stator faz akım dalga formları



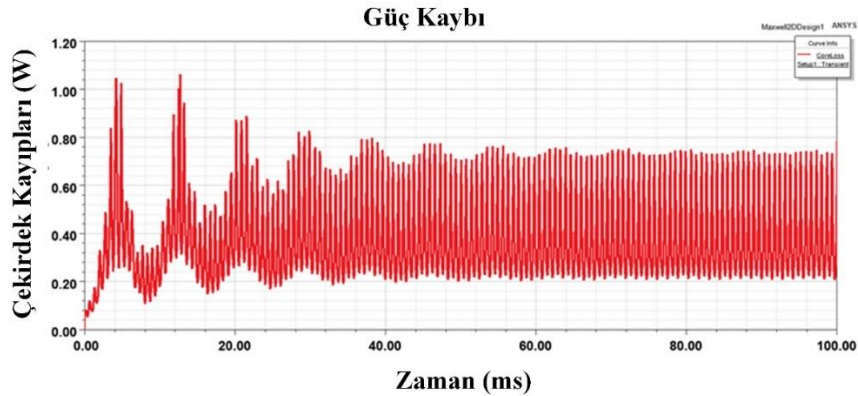
Şekil 10. IPM tip mil motor stator faz akımı harmonik bileşenleri.

IPM tip mil motorunun tork eğrisi Şekil 11'de görülebileceği gibi kararlı durum çalışma rejiminde klasik IPM'ye göre daha yüksek tork üretmektedir. Böylece, mil motor için gerekli gereksinimlerin karşılanabilmektedir. Ayrıca, tork eğrisindeki dalgalanmalar da azalmıştır.



Şekil 11. IPM tip mil motor tork eğrisi.

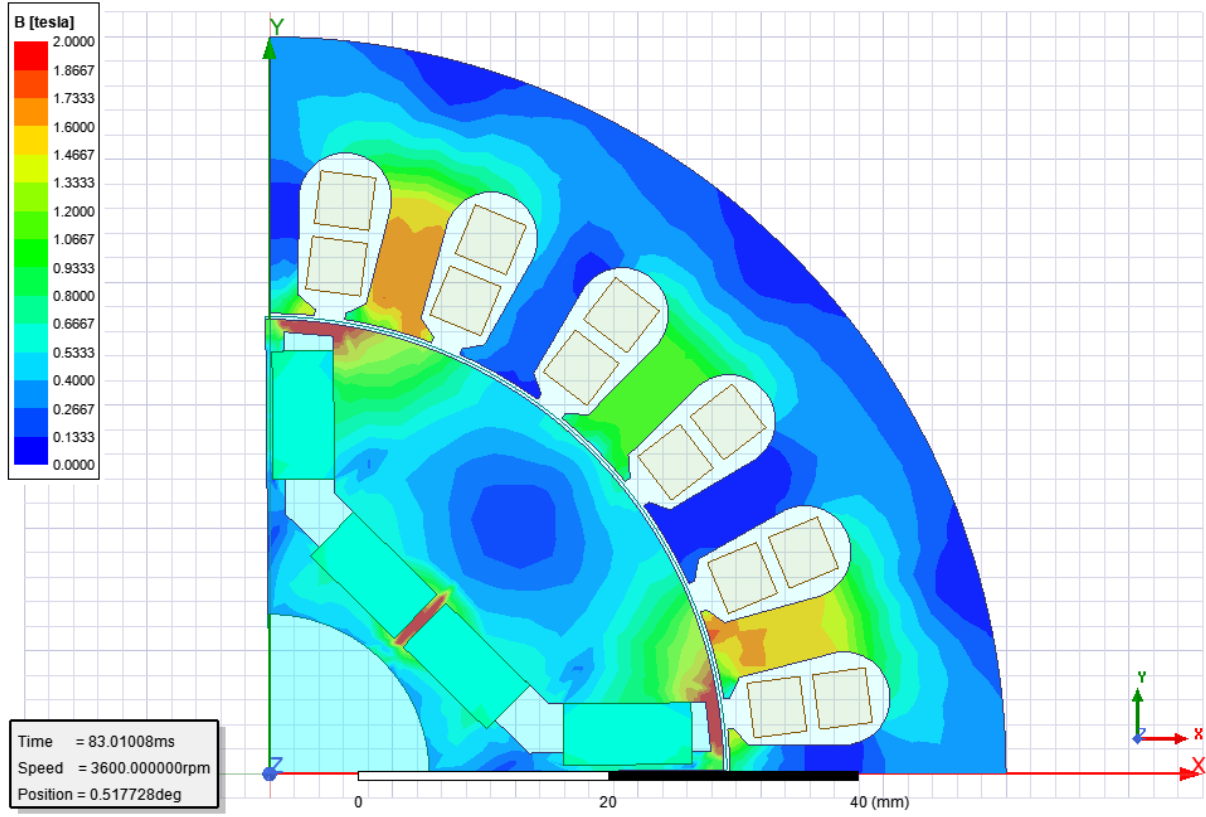
Stator ve rotor paket boyu arttığı için çekirdek kayıplarında artış söz konusu olmuştur (Şekil 12). Bu durumda daha yüksek akı yoğunluğu değerlerine sahip yüksek frekanslı uygulama alanlarında kullanılan çekirdek materyalleri ile mil motor boyutları küçültülerek güç kayıpları azaltılabilir.



Şekil 12. IPM tip mil motor çekirdek kayıpları.



Mil motorun stator ve rotor yüzeyindeki akı dağılımlarında klasik IPM motora göre artış söz konusudur. Şekil 13'te görüldüğü gibi stator oluk dışlarında yaklaşık olarak 1.73 T ile daha yüksek değerlerde akı dağılımları oluşmuştur. Bu durum çekirdek kayıplarını artırmakta ve fazladan sıcaklık artışlarına sebep olmaktadır.



Şekil 12. IPM tip mil motorun stator ve rotor yüzeyindeki akı dağılımları

Akı dağılımlarında ve çekirdek kaybındaki artışın sebebi Klasik IPM motor ile aynı boyutlar kullanılmasıdır. Böylece, IPM mil motor tasarımında sadece stator boyu artırılmış ve aynı hız değerinde mil motor olarak torq davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yüzden stator ve rotor paket ağırlığı arttığından çekirdek kaybında artış söz konusudur. Bu tür motorların klasik nüve materyalleri yerine yaklaşık 1.95 T akı yoğunluğu değeri olan %6,5 SiFe yumuşak çekirdek materyallerinin kullanılması hem boyutların küçültülmesi hem de güç kayıpları yönünden elverişli olabilir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, mil motorların uygulama yerleri ve önemi açıklanmış, klasik yapıdaki bir IPM'nin teknik özelliklerine göre Ansys-Electronics 2019R3 Rmxprt ve Maxwell 2D/3D yazılımının akademik versiyonu kullanılarak karşılaştırmalı SEA yaklaşımı önerilmiştir. 0,55 kW güç değerindeki üç fazlı IPM için Rmxprt ile benzetim yapıldıktan sonra Maxwell 2D yazılımına link verilmiş ve karşılaştırmalı olarak akım, torq, çekirdek kaybı ve akı dağılımları incelenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre mil motor stator faz akımlarının dalga formlarının sinüzoidal forma daha yakın ve harmonik bileşenlerinin daha küçük genlikte olduğu, torq değerinin klasik yapıdaki IPM'ye göre daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. Ancak, mil motor stator boyu arttığı için çekirdek kayıplarında fazlalık bulunmaktadır. Yeni nesil yüksek akı yoğunluğu değerleri olan %6,5 SiFe (JFE supercore) çekirdek materyali kullanılarak boyutlar küçültülebilir ve çekirdek kayıpları azaltılabilir. Böylece, mil motorunun tasarım örneği olarak elde edilen sonuçlar yüksek torq ve yüksek hız uygulamalarında IPM tip mil motorlarının da kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar olarak, modellenen bu mil motorunun değişik yük, hız ve torq değerleri için yapay zekâ tabanlı parametre tahminleri yapılabilir. Bu parametreler mil motorunun elektronik sürücü devre tasarımı için yapay zekâ destekli kontrol devresi algoritmalarında kullanılabilir. Son olarak, SEA yazılımı ile gerçekleştirilen bu benzetim çalışmasının mekatronik mühendisliği alanında araştırmacılar için dikkat çekici bir örnek teşkil etmesi öngörülmektedir.

## KAYNAKÇA

1. Zhao, H., Yu, S., Sun, F. Harmonic Suppression and Torque Ripple Reduction of a High-Speed Permanent Magnet Spindle Motor, *IEEE Access*, 9, 51695-51702, 2021.
2. Hou, M., Shi, H. Stator-winding incipient shorted-turn fault detection for motor system in motorized spindle using modified interval observers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-16, 2020.
3. Hey, J., Sing, T. C., Liang, T. J. Sensor selection method to accurately model the thermal error in a spindle motor, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14, 2925-2931, 2017.
4. Hong, D.-K. et al. Development of a high speed induction motor for spindle systems, *IEEE transactions on magnetics*, 49, 4088-4091, 2013.
5. Sung, S., Jang, G., Jang, J., Song, J., Lee, H. Vibration and noise in a HDD spindle motor arising from the axial UMF ripple, *IEEE transactions on magnetics*, 49, 2489-2494, 2013.
6. Phyu, H., Aung, N., Bi, C. Influence of winding structure and the effect of MMF harmonics to the spindle motor performance for ultrahigh TPI HDD, *IEEE transactions on magnetics*, 49, 2776-2781, 2013.
7. Chao, B. Hard disk drive spindle motor system design for data recording with ultrahigh TPI, *IEEE transactions on magnetics*, 45, 5123-5128, 2009.
8. Soh, C., Bi, C., Yong, Z., Lim, C. Contactless Measurement Method for Hard Disk Drive Spindle Motor Impedance, *IEEE transactions on magnetics*, 45, 5168-5171, 2009.
9. Ocak, O., Gulec, M., Aydin, M. *IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1-6, 2021.
10. Purwanto, W., Maksum, H., Sugiarto, T., Risfendra, R., Baharudin, A. 2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), 811-816, 2019.
11. Balcı, S. Senkron generatörlerde farklı stator oluk yapılarının uç gerilimine etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 8, 947-957, 2019.
12. Bastos, J. P. A., Sadowski, N. *Electromagnetic modeling by finite element methods*, CRC press, 2003.
13. Demir, N., Minaz, M. R., Kuncan, M. 3 Fazlı 37 kW'lık Asenkron Motorlarda Rotor Oluk Uzunluklarının Motor Verimine Etkilerinin Araştırılması, *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2, 18-28.