

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI MOTORUN STATOR OLUK
PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ESEN

MAYIS - 2023

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI MOTORUN STATOR OLUK
PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ESEN

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Engin HÜNER

Mayıs – 2023

“EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI MOTORUN STATOR OLUK PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması adlı tez çalışması **Onur ESEN** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Engin HÜNER

Kırklareli Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Mustafa Caner AKÜNER

Marmara Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Hayrettin TOYLAN

Kırklareli Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 31/05/2023

Doç. Dr. H. Hale KARAYER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Onur ESEN
31/05/2023

ÖZET

EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI MOTORUN STATOR OLUK PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU

Onur ESEN

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Doç. Dr. Engin HÜNER

Mayıs 2023, 79 sayfa

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerji sistemlerinde de kullanılan eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) motorlar yüksek güç momenti ve değişken rüzgar hızına uyum sağlamasıyla uygulamalarda öne çıkan motorlardan biridir. Bu çalışmada kullanılan bu motor tipinin tasarımı yapılırken Ansys Maxwell programının içinde bulunan Rmxprt modülünden referans motor parametre değerleri girilerek sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) nümerik analizleri yapılmıştır. Analiz sonucu tasarlanan motorun stator oluk parametreleri değiştirilerek Taguchi tasarım yöntemiyle birlikte beş faktör dört düzeyli L-16 ortogonal dizisini kullanarak 16 deney gerçekleştirilmiştir. Motorun en düşük vuruş momenti, en yüksek güç ve verim değeri için Minitab programı yardımıyla optimizasyon değerleri belirlenip yeniden Ansys Maxwell programında analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan optimizasyonu yapılan motorun değiştirilen stator oluk parametrelerinin farklı kombinasyonlarına göre motorun en iyi olduğu değerler bulunmuştur. Motorun vuruş momenti değerinde %57,07 oranında, güç değerinde %28,86 oranında ve verim değerinde %8,90 oranında iyileştirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ansys Maxwell, Taguchi, Eksenel akılı , Rmxprt, EASM

ABSTRACT

OPTİMİZATION OF STATOR GROOVE PARAMETERS OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR BY TAGUCHİ METHOD

Onur ESEN

PhD Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Doç. Dr. Engin HÜNER

May 2023, 79 pages

Axial flux permanent magnet (AFPM) motors, which are also used in wind energy systems, which are among renewable energy sources, are one of the motors that stand out in applications with their high power torque and adaptability to variable wind speed. While designing this motor type used in this study, reference motor parameter values were entered from the Rmxprt module in the Ansys Maxwell program and numerical analyzes were made using the finite element method (FEM). By changing the stator groove parameters of the designed motor as a result of the analysis, 16 experiments were carried out using the Taguchi design method and the L-16 orthogonal array with five factors and four levels. Optimization values were determined with the help of Minitab program for the lowest cogging torque, highest power and efficiency value of the engine and analyzes were made again in Ansys Maxwell program. From the results obtained, the best values of the motor were found according to the different combinations of the modified stator groove parameters of the optimized motor. The engine's cogging torque value was improved by 57.07%, power value by 28.86% and efficiency value by 8.90%.

KeyWords: Ansys Maxwell, Taguchi, Axial flux, Rmxprt, AFPM

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bana her konuda destek veren yardımlarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Engin HÜNER’e teşekkürü borç bilirim.

Yaşamım boyunca her zaman yanımda olan desteğini esirgemeyen canım anneme, babama, kardeşime ve yol arkadaşım sevgili eşim Serpil ESEN’e ayrıca “Veliköy OSB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi” makine bölümü öğretmeni alan şefi Himmet SEVİNÇ hocama da katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Literatür Araştırması	3
2.2. Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı (EASM) Motorlar	10
2.3. Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı (EASM) Motor Çeşitleri	11
2.3.1. Tek stator tek rotor eksenel akıllı sabit mıknatıslı motor.....	12
2.3.2. Tek stator çift rotor eksenel akıllı sabit mıknatıslı motor (TORUS)	13
2.3.3. Çift stator tek rotor eksenel akıllı sabit mıknatıslı motor (AFIR)	14
2.3.4. Çoklu stator çoklu rotor eksenel akıllı sabit mıknatıslı motor	15
2.4. Rüzgar Enerjisi.....	15
2.4.1 Rüzgar enerjisinde kullanılan eksenel akıllı sabit mıknatıslı makineler.....	16
3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM.....	19
3.1. Ansys Maxwell Programı	19
3.2. Taguchi Yöntemi.....	20
3.2.1. Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerinin seçimi	22
3.2.2. Faktör düzeylerinin seçimi	22
3.2.3. Uygun ortogonal dizinin seçilmesi	23
3.2.4. Faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması.....	24
3.2.5. Testlerin yapılması.....	24
3.2.6. Sonuçların analiz edilmesi	25
3.2.7. Doğrulama deneylerinin yapılması.....	28
3.3. EASM Motorun Tasarım Parametreleri	28
3.3.1. Motor parametreleri	28

3.3.2. Stator tasarım parametreleri	29
3.3.3. Oluk tasarım parametreleri.....	30
3.3.4. Rotor tasarım parametreleri.....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Referans EASM Motorun Ansys Maxwell Rmxprt ile Modelin Oluşturulması ve Analizi.....	33
4.2. EASM Motorun Oluk Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu	36
4.2.1. A1B1C1D1E1 kombinasyonuna ait deney sonucu	38
4.2.2. A1B2C2D2E2 kombinasyonuna ait deney sonucu	39
4.2.3. A1B3C3D3E3 kombinasyonuna ait deney sonucu	41
4.2.4. A1B4C4D4E4 kombinasyonuna ait deney sonucu	42
4.2.5. A2B1C2D3E4 kombinasyonuna ait deney sonucu	44
4.2.6. A2B2C1D4E3 kombinasyonuna ait deney sonucu	45
4.2.7. A2B3C4D1E2 kombinasyonuna ait deney sonucu	47
4.2.8. A2B4C3D2E1 kombinasyonuna ait deney sonucu	48
4.2.9. A3B1C3D4E2 kombinasyonuna ait deney sonucu	50
4.2.10. A3B2C4D3E1 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	51
4.2.11. A3B3C1D2E4 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	53
4.2.12. A3B4C2D1E3 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	54
4.2.13. A4B1C4D2E3 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	56
4.2.14. A4B2C3D1E4 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	57
4.2.15. A4B3C2D4E1 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	59
4.2.16. A4B4C1D3E2 kombinasyonuna ait deney sonucu.....	60
4.2.17. Deney sonuçları ve ANOVA analizi	62
4.3. Optimizasyonu Yapılan EASM Motorun Analizi.....	67
4.3.1. A2B2C2D2E1 en iyi verim kombinasyonu için analiz	67
4.3.2. A4B4C2D4E4 en iyi güç kombinasyonu için analiz	69
4.4. Referans Motorla Optimizasyonu Yapılan Motorun Karşılaştırılması	71
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 3.1. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu	23
Çizelge 3.2. $L_{16}(4^5)$ Taguchi ortogonal dizi matrisi.....	24
Çizelge 3.3. Motor parametreleri	29
Çizelge 3.4. (a) Stator parametreleri (b) Stator sargı parametreleri.....	30
Çizelge 3.5. Oluk parametreleri.....	31
Çizelge 3.6. Rotor parametreleri.....	31
Çizelge 4.1. Motorun performans sonuçları	33
Çizelge 4.2. Dizide kullanılan parametreler ve seviyeler	36
Çizelge 4.3. Stator oluk parametreleri için belirlenen L_{16} ortogonal dizisi.....	37
Çizelge 4.4. Deneylerde elde edilen değerler	62
Çizelge 4.5. Vuruntu momenti için parametrelerin S/N oran değerleri	62
Çizelge 4.6. Vuruntu momenti için ANOVA analizi.....	63
Çizelge 4.7. Verim için parametrelerin S/N oran değerleri.....	64
Çizelge 4.8. Verim için ANOVA analizi	65
Çizelge 4.9. Güç için parametrelerin S/N oran değerleri	65
Çizelge 4.10. Güç için ANOVA analizi.....	66
Çizelge 4.11. Referans motorla optimizasyonu yapılan motorun karşılaştırılması	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı motorun yapısı	11
Şekil 2.2. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı (EASM) motor çeşitleri.....	11
Şekil 2.3. Tek stator tek rotor EASM motor	12
Şekil 2.4. (a) Oluklu tek stator tek rotor yapısı (b) Oluksuz tek stator tek rotor yapısı ..	12
Şekil 2.5. Tek stator çift rotor EASM	13
Şekil 2.6. (a) Oluklu tek stator çift rotor yapısı (b) Oluksuz tek stator çift rotor yapısı .	13
Şekil 2.7. Çift stator tek rotor EASM motor	14
Şekil 2.8. (a) Oluklu çift stator tek rotor yapısı (b) Oluksuz çift stator tek rotor yapısı .	14
Şekil 2.9. Çoklu stator çoklu rotor EASM motor	15
Şekil 2.10. Rüzgar enerji sistemi blok diyagramı.....	16
Şekil 2.11. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı makinenin 3 boyutlu modeli.....	17
Şekil 3.1. Motor tasarım aşamaları	20
Şekil 3.2. Taguchi deneysel tasarım aşamaları.....	21
Şekil 3.3. İki parametre arasında etkileşim	22
Şekil 3.4. 3 boyutlu EASM motorun yapısı	28
Şekil 3.5. (a) Stator geometrisi (b) Stator sargıları.....	29
Şekil 3.6. Oluk tipi.....	30
Şekil 3.7. Rotor geometrisi.....	32
Şekil 4.1. Motorun akım grafiği	34
Şekil 4.2. Motorun gerilim grafiği	34
Şekil 4.3. Motorun vuru mu momenti grafiği	35
Şekil 4.4. Motorun verim grafiği	35
Şekil 4.5. Motorun güç grafiği.....	36
Şekil 4.6. A1B1C1D1E1 kombinasyonu vuru mu momenti grafiği.....	38
Şekil 4.7. A1B1C1D1E1 kombinasyonu verim grafiği	38
Şekil 4.8. A1B1C1D1E1 kombinasyonu güç grafiği.....	39
Şekil 4.9. A1B2C2D2E2 kombinasyonu vuru mu momenti grafiği.....	39
Şekil 4.10. A1B2C2D2E2 kombinasyonu verim grafiği	40
Şekil 4.11. A1B2C2D2E2 kombinasyonu güç grafiği.....	40
Şekil 4.12. A1B3C3D3E3 kombinasyonu vuru mu momenti grafiği.....	41
Şekil 4.13. A1B3C3D3E3 kombinasyonu verim grafiği	41
Şekil 4.14. A1B3C3D3E3 kombinasyonu güç grafiği.....	42
Şekil 4.15. A1B4C4D4E4 kombinasyonu vuru mu momenti grafiği.....	42
Şekil 4.16. A1B4C4D4E4 kombinasyonu verim grafiği	43
Şekil 4.17. A1B4C4D4E4 kombinasyonu güç grafiği.....	43
Şekil 4.18. A2B1C2D3E4 kombinasyonu vuru mu momenti grafiği.....	44
Şekil 4.19. A2B1C2D3E4 kombinasyonu verim grafiği	44
Şekil 4.20. A2B1C2D3E4 kombinasyonu güç grafiği.....	45
Şekil 4.21. A2B2C1D4E3 kombinasyonu vuru mu momenti grafiği.....	45
Şekil 4.22. A2B2C1D4E3 kombinasyonu verim grafiği	46

Şekil 4.23. A2B2C1D4E3 kombinasyonu güç grafiği.....	46
Şekil 4.24. A2B3C4D1E2 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	47
Şekil 4.25. A2B3C4D1E2 kombinasyonu verim grafiği	47
Şekil 4.26. A2B3C4D1E2 kombinasyonu güç grafiği.....	48
Şekil 4.27. A2B4C3D2E1 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	48
Şekil 4.28. A2B4C3D2E1 kombinasyonu verim grafiği	49
Şekil 4.29. A2B4C3D2E1 kombinasyonu güç grafiği.....	49
Şekil 4.30. A3B1C3D4E2 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	50
Şekil 4.31. A3B1C3D4E2 kombinasyonu verim grafiği	50
Şekil 4.32. A3B1C3D4E2 kombinasyonu güç grafiği.....	51
Şekil 4.33. A3B2C4D3E1 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	51
Şekil 4.34. A3B2C4D3E1 kombinasyonu verim grafiği	52
Şekil 4.35. A3B2C4D3E1 kombinasyonu güç grafiği.....	52
Şekil 4.36. A3B3C1D2E4 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	53
Şekil 4.37. A3B3C1D2E4 kombinasyonu verim grafiği	53
Şekil 4.38. A3B3C1D2E4 kombinasyonu güç grafiği.....	54
Şekil 4.39. A3B4C2D1E3 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	54
Şekil 4.40. A3B4C2D1E3 kombinasyonu verim grafiği	55
Şekil 4.41. A3B4C2D1E3 kombinasyonu güç grafiği.....	55
Şekil 4.42. A4B1C4D2E3 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	56
Şekil 4.43. A4B1C4D2E3 kombinasyonu verim grafiği	56
Şekil 4.44. A4B1C4D2E3 kombinasyonu güç grafiği.....	57
Şekil 4.45. A4B2C3D1E4 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	57
Şekil 4.46. A4B2C3D1E4 kombinasyonu verim grafiği	58
Şekil 4.47. A4B2C3D1E4 kombinasyonu güç grafiği.....	58
Şekil 4.48. A4B3C2D4E1 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	59
Şekil 4.49. A4B3C2D4E1 kombinasyonu verim grafiği	59
Şekil 4.50. A4B3C2D4E1 kombinasyonu güç grafiği.....	60
Şekil 4.51. A4B4C1D3E2 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	60
Şekil 4.52. A4B4C1D3E2 kombinasyonu verim grafiği	61
Şekil 4.53. A4B4C1D3E2 kombinasyonu güç grafiği.....	61
Şekil 4.54. Vuruñtu momenti için faktörlerin S/N oranı etki grafikleri.....	63
Şekil 4.55. Verim için faktörlerin S/N oranı etki grafikleri	64
Şekil 4.56. Güç için faktörlerin S/N oranı etki grafikleri.....	66
Şekil 4.57. A2B2C2D1E1 kombinasyonu verim grafiği	67
Şekil 4.58. A2B2C2D2E1 kombinasyonu verim grafiği	68
Şekil 4.59. A2B2C2D2E1 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	68
Şekil 4.60. A2B2C2D2E1 kombinasyonu güç grafiği.....	69
Şekil 4.61. A4B4C3D4E4 kombinasyonu güç grafiği.....	69
Şekil 4.62. A4B4C2D4E4 kombinasyonu güç grafiği.....	70
Şekil 4.63. A4B4C2D4E4 kombinasyonu vuruñtu momenti grafiği.....	70
Şekil 4.64. A4B4C2D4E4 kombinasyonu verim grafiği	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar

Açıklamalar

ANOVA

Varyans analizi

EASM

Eksenel akıllı sabit mıknatıslı

SE

Sonlu elemanlar

SEY

Sonlu elemanlar yöntemi

1. GİRİŞ

Günümüzde rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretmede ve benzeri daha bir çok yerde kullanılan eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler avantajlı yapıları, performansı, düşük hızlarda yüksek moment ve sessiz çalışma gibi bir çok özelliğinden dolayı tercih edilme sebebi olmuştur. Ancak EASM makineler yapısı disk şeklinde olduğundan dolayı üretiminde zorluklar olması sebebiyle üretime geçilmeden önce modelleme yapılarak analizlerinin iyi yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada EASM motorlarda yüksek düzeyde performans elde edebilmek için çeşitli tasarım çalışmaları yapılmış ve bu çalışmalar neticesinde vuru momentinin azaltılması, verimin ve gücün artırılması amaçlanmıştır. Referans bir eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun Ansys Maxwell motor tasarım ve analiz programıyla motor stator oluk parametreleri değiştirilerek nümerik analizleri yapılmıştır. Motorun en iyi vuru momenti, güç ve verim sağlayan parametre değerlerini bulmak için Taguchi tasarım yöntemi ve Minitab analiz programı kullanılmıştır. Optimizasyonu yapılan motorun Ansys Maxwell programında tekrar analizi yapılmış motorun farklı durumlardaki sonuçları karşılaştırılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Araştırması

Günümüzde enerji en önemli ihtiyaçlarımızdan biridir. Enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi çeşitli olumsuz yönlerinin yanında fosil kaynakların tükenecek olması ve enerji maliyetlerinin artmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Yenilenebilir enerji dünyada ve ülkemizde de kullanılan son zamanlarda enerji üretimindeki payını da arttıran bir enerji türüdür. Son yıllarda yapılan çalışmalarla yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi üzerine yapılan araştırma sayısı artmıştır. Literatür araştırmasında çeşitli amaçlar için kullanılan eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makinenin yapısal özellikleri, tasarımları, analizleri ve optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Aydin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler yapılarını, çalışma ilkelerini, temel farklılıklarını, avantajlarını ve özelliklerini açıklamışlardır (Aydin, Huang, & Lipo, 2004).

Aydin yaptığı bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlar için vuruş momenti azaltma teknikleri üzerinde çalışmış ve bu tekniklerin etkilerini 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır (Aydin, 2007).

Hwang ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayanan dahili çekirdeksiz bir statora ve ikiz harici sabit mıknatıslı rotorlara sahip eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makine tasarımını incelemişlerdir. Moment dalgalanmasını en aza indirmek için Taguchi yöntemini kullanarak minimum moment dalgalanması ve maksimum moment dalgalanması ile ortalama moment arasındaki oranı optimize etmişlerdir (Hwang, Li, Chuang, Liu, & Huang, 2009).

Kurt ve Önbilgin yaptıkları bu çalışmada bir eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makine optimizasyonunu incelemişlerdir. Taguchi tasarım yöntemini kullanarak yaptıkları bu optimizasyonda için beş faktör dört düzeyli L-16 ortogonal dizisini kullanarak on altı deney yapmışlardır. 16 deneyin sonuçlarını varyans analizi (ANOVA) ile analiz etmişlerdir. Son olarak ANOVA analizi her bir faktör için en iyi seviye ve regresyon denklemi belirlemişlerdir (Kurt & Önbilgin, 2009).

Mahmoudi ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada elektrikli araç kullanımına uygun çift taraflı oluklu TORUS eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) motorun tasarım sürecini incelemişlerdir. En yüksek momentle motorun ilk tasarım parametrelerini elde etmek için EASM' nin temel teorisi ve boyutlandırma denklemini uygulamışlardır. Vektör alanı için Opera-3D 14.0 ticari yazılımı kullanılmış tasarım parametrelerinin doğruluğunu değerlendirerek ve geliştirerek motor tasarımını sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak çalıştırılmıştır (Mahmoudi, Abd Rahim, & Ping, 2012).

Benlamine ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineden oluşan bir tasarım önermişlerdir. Bu tasarım, bir genetik algoritma ile basitleştirilmiş bir analitik modele dayanmaktadır. Bununla birlikte model karmaşık ve çoklu fizik (elektromanyetik, termal ve mekanik modeller) olduğundan 3 boyutlu sonlu elemanlar (SE) yöntemini kullanarak bir tasarım yapmışlardır (Benlamine, Dubas, Randi, Lhotellier, & Espanet, 2013).

Davila-Vilchis ve Mishra yaptıkları çalışmada bir hidrokinetik enerji sisteminden geliştirilmiş güç üretimi, düşük maliyetli yatay eksenli bir hidrokinetik türbinin basit bir elektro-mekanik tasarımını kullanarak yapmışlardır. Bu tasarım başlatma momentini hızlandırıp, titreşimi azaltıp ve küçük ölçekli uygulamalar için daha az bakım gerektirmiştir. Sisteme eksenel akılı generatörün eklenmesi ile sistem performansı artmıştır. Bir dizi parametreyi iyileştirerek minimum bakım, bobinlerin içinde ısınma sorunu olmaması, iki kat güç üretimi ve daha yüksek dönüş hızlarına ihtiyaç duyan radyal generatör kullanımına kıyasla elektrik üretim maliyetini iyileştirmişlerdir (Davila-Vilchis & Mishra, 2014).

Yang, Lee ve Hung bu çalışmada elektrikli scooterlar için eksenel akılı sabit mıknatıslı bir motorun çok amaçlı optimum tasarımını yapmışlardır. Optimum tasarım sürecinde hava aralığı dağıtım fonksiyonuna sahip bir manyetik devre modeli kullanırken moment yoğunluğu ve moment dalgalanması gibi motor performansını etkileyen bir dizi motor parametresi kullanmışlardır. Ortaya çıkan prototip motor, 8,94 Nm/kg'lık yüksek moment yoğunluğuna ve %57 verim artışına sahiptir (Yang, Lee, & Hung, 2014).

Kalender ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yeni bir eksenel akı kalıcı mıknatıs senkron generatör tasarımı yapmışlar ve prototip üzerinde çalışmışlardır. Prototip aynı şaft üzerinde bir dizi rotor-stator bloğundan oluşan ve değişen rüzgar hızlarında rotor dönüş hızı sınırları içinde elektrik enerjisi üretebilen eksenel akılı kalıcı mıknatıslara dayalı dört alternatörden oluşturmuşlardır. Generatörün verimliliği farklı yük ve hız koşullarında test edilmiş, yükün sadece bir statora bağlanması durumunda hız düşüken 200 rpm'in üzerinde olduğunda verimin yüksek olduğunu görmüşlerdir (Kalender ve diğerleri, 2015).

Ahmad ve Amin yaptıkları bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) generatörlü küçük ölçekli dikey eksenli rüzgar türbini tasarlamışlar. Ayrıca, dişli mekanizması olmadan kolayca tahrik edilebilen bu basit generatör tasarımı, tahrik bileşenlerinin miktarını azaltarak maliyetini ve sistemin karmaşıklığını azaltmıştır. Önerilen prototipin performansı deneysel olarak da test edilmiş ve tasarlanan rüzgar türbininin, geliştirilen tasarım süreci tarafından verimli performans gösterdiğini bulmuşlardır (Ahmad & Amin, 2017).

Laxminarayan ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada değişken hızlı rüzgar uygulamaları için uygun bir eksenel akılı sabit mıknatıslı generatör tasarımını incelemişlerdir. Tasarım ve analiz için etiket değerleri 2000 VA, 240 V, 3 fazlı, 10 kutuplu, 5 rpm tek statorlu çift rotorlu bir generatör kullanılmıştır. Tüm sistem modeli MATLAB/Simulink platformunda uygulanmış ve çeşitli rüzgâr koşulları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Laxminarayan, Singh, Saiffee, & Mittal, 2017).

Cetin ve Daldaban yaptıkları bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı makinelerin farklı rotor kutuplarının karakteristiklerinin performanslarını analiz etmeyi amaçlamıştır. Önerilen rotorların mıknatıs kutupları, sonlu elemanlar analizi kullanılarak moment dalgalanma azaltma, elektromanyetik kuvvet (EMK) dalga biçimleri ve akı yoğunluğu dağılımı açısından dört farklı tasarım 3D SEY analiziyle incelemişlerdir (Cetin & Daldaban, 2017).

Bouaziz ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 550 W'lık bir rüzgar türbini uygulamasında aynı çıkış gücünde ve aynı rotor hızında eksenel akılı ve radyal akılı iki tane sabit mıknatıslı senkron makinenin karşılaştırmalı bir performans analizini incelemişlerdir. Her iki motor tipi için de dış çap gibi ortak parametreler ve stator, rotor, sargılar ve kalıcı mıknatıs için farklı parametreler dahil olmak üzere ANSYS programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile 3 boyutlu modelleme yapmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre eksenel akılı makine için moment, radyal akılı makineden daha iyi değere ve daha az dalgalanmaya sahip olduğunu görmüşlerdir (Bouaziz, Jaafar, & Ammar, 2018).

Seadati ve Niasar yaptıkları çalışmada motor tasarımının analitik ilişkilerine dayanarak motorun parametreleri istenilen momenti, minimum akım ve bakır kayıpları ile karşılayacak şekilde tasarlanan motoru genetik algoritma kullanarak optimize etmişlerdir. Optimizasyon algoritması optimum hava aralığı değeri, kalıcı mıknatıs akı yoğunluğu, akım yoğunluğu ve stator sargılarının dönüş sayısı Maxwell yazılımıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonunu yapmışlardır. Analitik tasarım ve optimizasyon sonuçları arasında iyi bir uyum olduğunu doğrulamışlardır (Seadati & Niasar, 2018).

Talay ve Erkan yaptıkları bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı motorların tasarımı ve analizi ANSYS Maxwell programıyla gerçekleştirmişlerdir. ANSYS Maxwell programının ve yapay sinir ağı sisteminin tasarım parametreleri MATLAB ortamında oluşturulmuş, en verimli tasarım parametrelerini bulmuşlardır. Maxwell programının sonuçları yapay sinir ağlarının sonuçları karşılaştırılıp optimum çalışma tasarımı parametreleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu tasarım parametrelerini tekrar ANSYS Maxwell programını kullanarak vuru momentini azaltmak için çalışmalar yapmışlardır (Talay & Erkan, 2019).

Tarek ve Sozer yaptıkları bu çalışmada eksenel akılı kalıcı mıknatıslı senkron relüktans motorun moment dalgalanmasını en aza indirirken hacim başına momenti optimize etmek için Taguchi yöntemine dayalı bir yaklaşım yürütölmüşlerdir. Bu motorun elektromanyetik ve akı zayıflatma performansları potansiyel olarak uygun maliyetli bir çözüm olabileceğini göstermişlerdir (Tarek & Sozer, 2019).

Tak ve Ro yaptıkları bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı motor tasarlarken yeni bir analiz yöntemi önermişlerdir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun geliştirilmesinde zaman ve maliyet faktörlerini azaltmak için uyguladıkları bu analiz yönteminde manyetik doygunluk ve yuva açma etkisi analiz ve tasarım aşaması doğrusal olmamaları nedeniyle analiz edilmesi son derece zor olduğundan bir manyetik doygunluk gibi doğrusal olmayan etkileri dikkate alabilen analitik yöntem, algoritma ve yuva açılması önerilmektedir (Tak & Ro, 2020).

Hüner yaptığı bu çalışmada açık oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makinenin hava aralığı ve manyetik akı yoğunluğunun optimizasyonunu yapmıştır. Daha sonra optimum değerler belirlenmiş ve ortalama manyetik akı yoğunluğu ANSYS Maxwell programı ile yüklü ve yüksüz koşullar altında hava aralığı ve demir çekirdek için değerler hesaplamıştır. Taguchi deney tasarım yöntemi kullanarak 6 faktör ve 5 seviye belirlenerek L25 ortogonal dizisi kullanarak analizler yapmıştır. Sonuç olarak Taguchi yönteminden elde edilen parametreleri ANSYS Maxwell programıyla yeniden analiz etmiş ve ilk tasarıma göre optimize edilmiş değerler hava aralığı için %65,7 manyetik akı yoğunluğu için %173,26 oranında iyileştirme sağlamıştır (Hüner, 2020).

Polat ve Akıncı bu çalışmasında eksenel akılı çift rotorlu sabit mıknatıslı senkron motor için analitik bir model oluşturmuşlar ve bu modelin genetik algoritma yöntemi ile optimizasyonunu yapmışlardır. Yapılan optimizasyon sonuçlarından faydalanarak oluşturulan bu motor parametrelerini Ansys Maxwell-3D programı yardımıyla analiz ederek modelin doğrulamasını yapmışlar ve %93.0460 verimle çalışan bir motor elde etmişlerdir (Polat & Akıncı, 2020).

Pirzad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada rüzgar enerji sistemlerinde kullanılan eksenel akıllı kalıcı mıknatıslı (EASM) generatörün dinamik modeliyle birlikte hem hatve açısını hem de aktif stator modüllerinin sayısını kontrol giriş sinyalleri olarak birleştirmek için karma tam sayılı doğrusal olmayan programlamaya dayalı bir kontrol stratejisi tasarlamışlardır. Bu kontrol sinyallerinde sistem verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve farklı rüzgar hızlarında elektrik yüklerinde çıkış voltajını düzenlemek için kullanmışlardır (Pirzad, Ghadimi, Abolmasoumi, Jabbari, & Bagheri, 2021).

Ouldhamrane ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eksenel akıllı sabit mıknatıslı (EASM) makinelerinin elektromanyetik performansını karşılaştırmak için 3 boyut modelleme yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemi doğrulamak için, iç çekirdeksiz rotora ve büyük değişken hava aralığına sahip bir çift stator prototipi kullanmışlardır. Genel nicelikleri (elektromotor kuvveti, vuru moment) ve yerel nicelikleri (hava aralığındaki manyetik akı yoğunlukları) ölçmek için deneysel bir düzenek kurmuşlardır. Hesaplanan sonuçlar yerel alan yoğunluğu, elektromotor kuvveti (EMK) ve vuru moment gibi deneysel ölçümlerden elde edilenlere yakın sonuçlar elde etmişlerdir (Ouldhamrane ve diğerleri, 2022).

Premaratne ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada eksenel akıllı generatörlerde tasarımlar kapsamlı bir incelenmiş ve ardından bobin şekillerinin, mıknatıs şekillerinin ve bu bobinler ile mıknatıslar arasındaki boşlukların matematiksel bir analizi yapılmıştır. Daha önce analiz edilmemiş birçok parametreyi optimize ederek çok sayıda kapsamlı bir elektromanyetik simülasyon sunulmuştur (Premaratne, Kadhim, Abdullah, Halloran, & Vial, 2022).

Wirtayasa ve Hsiao yaptıkları bu çalışmada rüzgar türbininde eksenel akıllı sabit mıknatıslı generatörün uygulanmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Eksenel akıllı makineler tek taraflı, çift taraflı, çok aşamalı topolojiler ve demir çekirdekli veya çekirdeksiz olarak üretildiği açıklanmıştır. Bu çalışmada demir çekirdekli ve tek taraflı ve çift taraflı topolojiler arasında dokuz olası model analitik yardımıyla incelenmiştir. En nitelikli eksenel akıllı sabit mıknatıslı generatörü elde etmek için kullanılan altı parametre; akı yoğunluğu dağılımı, yük voltajı, voltaj regülasyonu, harmonikler, çıkış gücü ve verimlilik Maxwell 3D yazılımıyla analiz edilmiştir (Wirtayasa & Hsiao, 2022).

Zhang ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada çift yedekli eksenel akı sabit mıknatıslı senkron motor topolojisi ve manyetik bağlantı özellikleri için analitik bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemle göre manyetik özellikler 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir (Zhang, ve diğerleri, 2022).

Hao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eksenel akı kalıcı mıknatıslı (EASM) motorların topolojik yapıları, tasarım, optimizasyon yöntemleri ve kontrol teknikleri üzerinde durarak EASM motorları analiz etmişlerdir. Bu analizlere dayanarak ulaştıkları sonuçları şu şekilde sıralamışlardır. Boyunduruksuz ve segment armatür tipi motorların gelişim için büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve EASM motorların tasarımını optimize etmek için çok amaçlı optimizasyon tasarım teorileri ortaya koymuşlardır (Hao, Ma, Wang, Luo, & Chen, 2022).

Wu ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada eksenel akı sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorundan daha iyi bir elektromanyetik performans elde etmek için, yay şeklindeki mıknatıslara sahip çok amaçlı optimizasyon tasarımını araştırmışlardır. Motoru Taguchi tasarım yöntemine göre optimize etmek için kutup arkı katsayısı, kalıcı mıknatıs kalınlığı, kalıcı mıknatıs ark yarıçapı ve hava aralığı uzunluğu olmak üzere dört faktör seçmişlerdir. Son olarak optimize edilmiş model oluşturulup optimum tasarımı doğrulamak için bazı simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Araştırma sonucuna optimize edilmiş motor hava aralığı akı yoğunluğu %31,8, toplam harmonik oranı %7,5 ve moment dalgalanması %4,3 azaltılmıştır (Wu, Xu, Zhang, Gu, & Wang, 2022).

Literatür araştırmasında yapılan çalışmaları şu şekilde sıralayabiliriz.

- EASM makinelerin farklı alanlarda kullanılması
- EASM makinelerin özellikler, yapısı, çeşitleri, avantaj ve dezavantajları
- Vuruntu momentinin azaltılması
- Çeşitli tasarımlar yaparak motorun verimini, gücünü arttırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak
- Farklı tip EASM makinelerin incelenmesi

- Taguchi ve genetik algoritma gibi tasarım yöntemlerini kullanarak EASM makinelerin optimizasyonu
- EASM makinelerin modellenmesi, simülasyon ve analizlerin yapılması şeklinde özetleyebiliriz.

Bu çalışmanın giriş bölümünde konu kısaca açıklanmıştır.

İkinci bölümünde literatürdeki çalışmalar özetlenmiş ve eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) motorların özellikleri, çeşitleri ve genel yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Rüzgar enerjisi ve bu enerji yönteminde kullanılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümünde Ansys Maxwell programı ve Taguchi tasarım yöntemi anlatılmış, yapılan çalışmada kullanılan tek stator tek rotor eksenel akılı sürekli mıknatıslı referans motorun tasarım parametreleri verilmiştir.

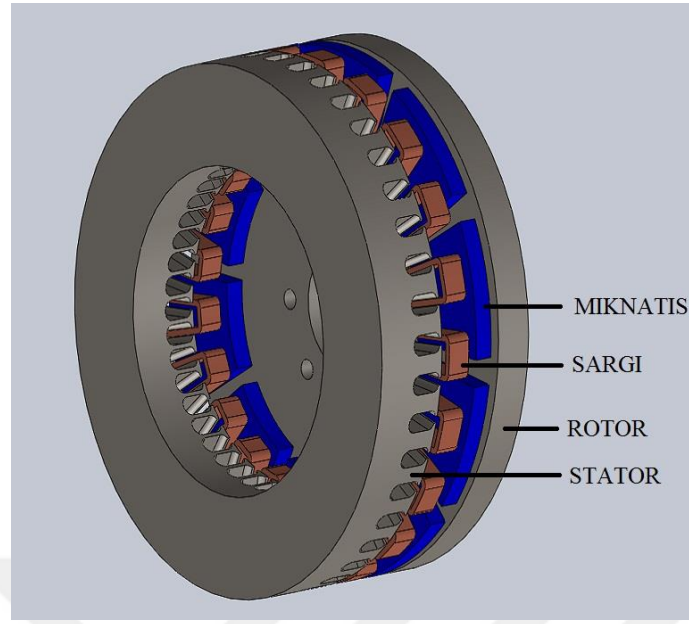
Dördüncü bölümünde referans motorun tasarımı ve 3D Maxwell sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi, motorun oluk parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu sonucu elde edilen analiz sonuçlarına ve karşılaştırmalara yer verilmiştir.

Beşinci bölümünde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2.2. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı (EASM) Motorlar

Sürekli mıknatıslı eksenel akılı motorlar rotor sargısı olmaması sebebiyle verimi ve moment yoğunluğu yüksektir. Ayrıca ses gürültüsünün düşük olması ve hacminden dolayı ağırlıklarının az olması gibi birçok avantajı vardır. Bu tip motorlar disk şeklinde olduğundan geometrik yapısında kullanılan hava aralığı ayarlanabilir. Radyal parça değiştirilmeden eksenel akılı motorda kutup sayısı arttırılabilir. Böylelikle bu motorlarda eksenel uzaklık azalır, güç yoğunluğu arttığı için düşük devirlerde yüksek moment sağlanabilir. Bu tür motorlarda mıknatısların monte edildiği rotor diskleri fan gibi hareket eder ve stator sargılarının daha iyi soğutulmasını sağlar. Bu sayede eksenel akılı motorların tasarımı daha basittir (Ayçiçek, 2012).

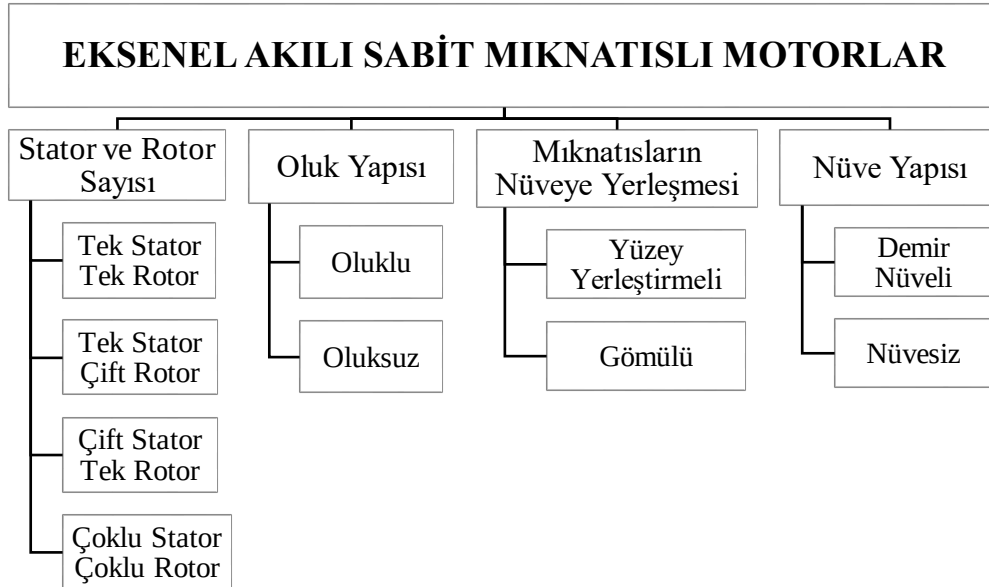
Şekil 2.1’ de EASM motorun tek stator tek rotordan oluşan yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun yapısı (Bouaziz ve diğerleri, 2018)

2.3. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı (EASM) Motor Çeşitleri

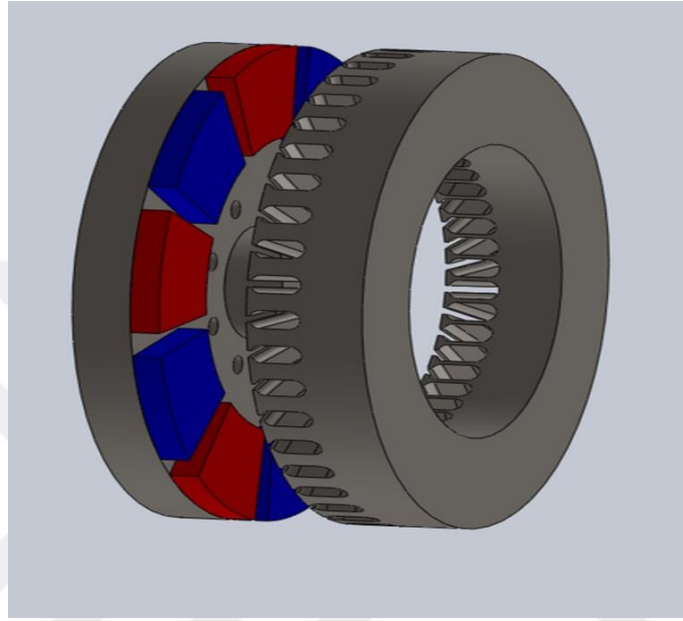
Eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlar şekil 2.2’ de gösterildiği gibi stator ve rotor sayısına, mıknatısların nüveye yerleştirilmesine, oluk yapısına ve statorun nüve yapısına göre sınıflandırılırlar (Hüner, 2017).



Şekil 2.2. Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) motor çeşitleri

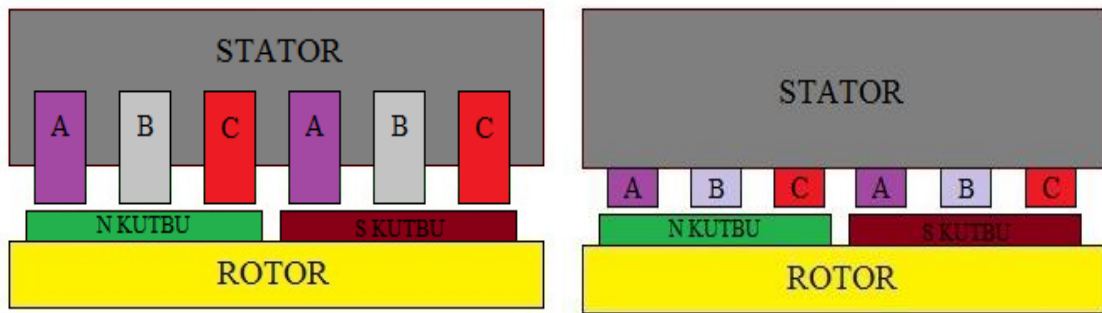
2.3.1. Tek stator tek rotor eksenel akılı sabit mıknatıslı motor

Bu tip EASM motorlar yapısı en basit motorlar olup moment kapasiteleri düşüktür. Rotor ve stator arasında dengesiz eksenel kuvvete sahiptir. Bu nedenle dengeli eksenel kuvvetlere sahip yapıların aksine daha karmaşık yatak düzenlemeleri ve daha kalın rotor diskine ihtiyaç duyar. (Mahmoudi, Rahim, & Hew, 2011). Şekil 2.3’ de tek rotor tek stator yapılı EASM motorun yapısal görünümü verilmiştir.



Şekil 2.3. Tek stator tek rotor EASM motor (Parviainen, 2005)

Genellikle asansör sistemlerinde kullanılan bu tip motorlarda stator oluklu (Şekil 2.4. (a)) veya oluksuz (Şekil 2.4. (b)) olabilmektedir. Oluksuz statorda eksenel kuvvet daha azdır, çünkü kuvvet bakır sargılardan ziyade demire uygulanır.



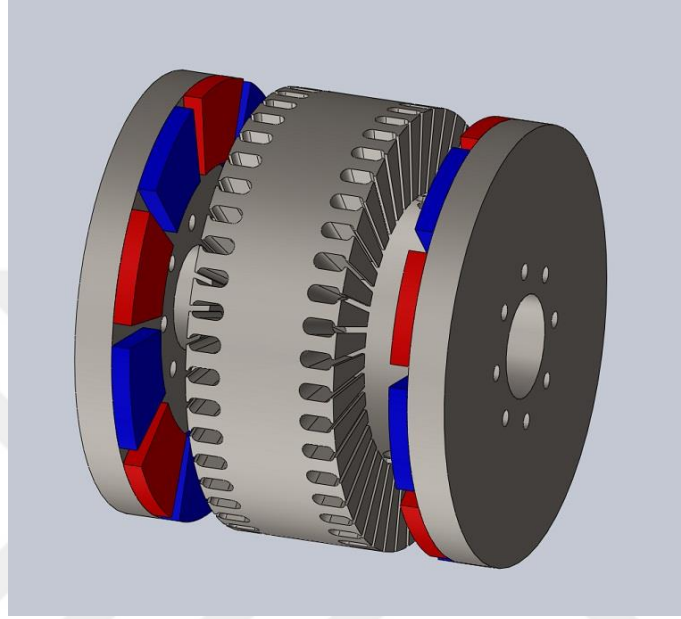
(a)

(b)

Şekil 2.4. (a) Oluklu tek stator tek rotor yapısı (b) Oluksuz tek stator tek rotor yapısı
(Mahmoudi ve diğerleri, 2011)

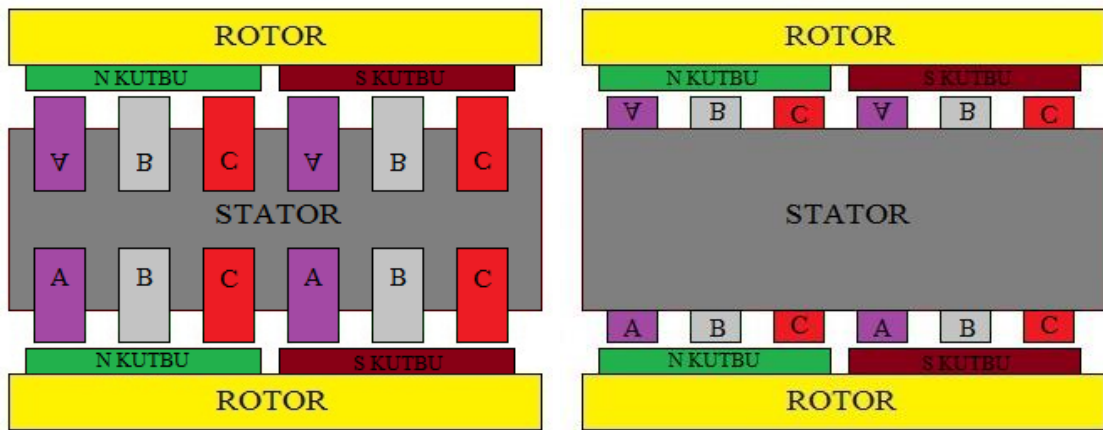
2.3.2. Tek stator çift rotor eksenel akılı sabit mıknatıslı motor (TORUS)

Tek stator çift rotor eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlarda Şekil 2.5’ de gösterildiği gibi iki rotor arasında iki taraflı bir stator kullanılmıştır. Bu motorların bir diğer ismi de TORUS olarak geçer (Girgin, 2020). Moment kapasitesi yüksek bu tip motorlarda her iki tarafta da kuvvet olduğundan daha dengeli bir yapıya sahiptir. Böylece motorun ömrünün uzun olması sağlanır (Gör, 2014).



Şekil 2.5. Tek stator çift rotor EASM (Parviainen, 2005)

Oluksuz motorlarda (Şekil 2.6. (b)) hava boşluklu sargılarda kaçak endüktans daha düşüktür ve motorun oluklu (Şekil 2.6. (a)) olmasından kaynaklanan etkiler yani akı dalgalanması, vuruş momenti ve yüksek frekanslı rotor kayıpları ortadan kaldırılır.



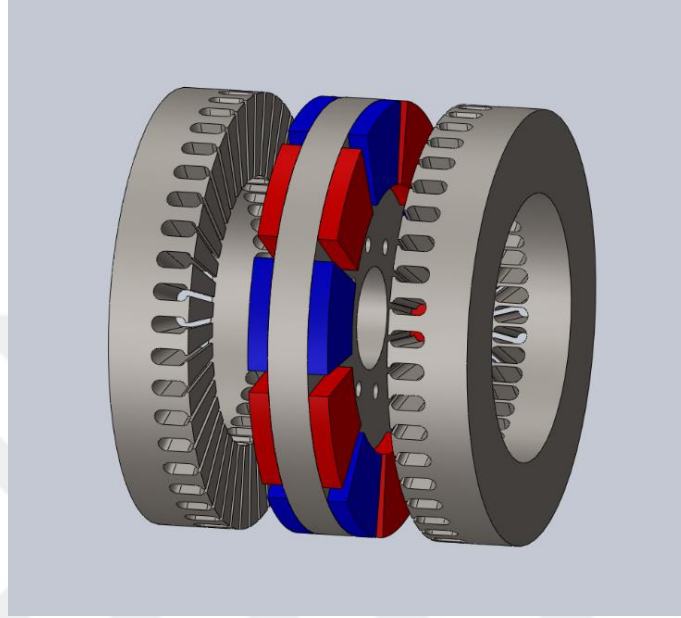
(a)

(b)

Şekil 2.6. (a) Oluklu tek stator çift rotor yapısı (b) Oluksuz tek stator çift rotor yapısı (Mahmoudi ve diğerleri, 2011)

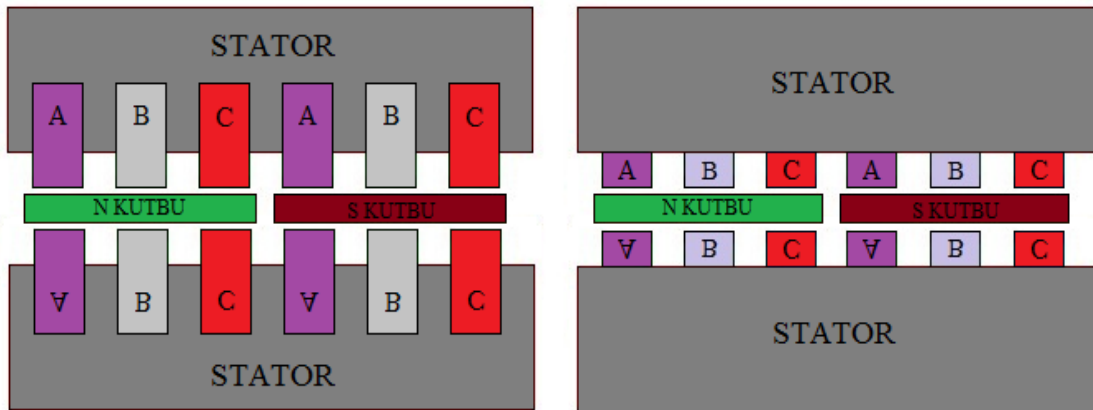
2.3.3. Çift stator tek rotor eksenel akılı sabit mıknatıslı motor (AFIR)

Şekil 2.7’ de gösterilen AFIR diye de isimlendirilen çift stator tek rotor EASM motor yapıları iki adet stator arasında iki taraflı tek bir rotordan oluşmaktadır. AFIR yapısı rotorunda demir olmadığı için çok yüksek güç-atalet oranına sahiptir. Bu nedenle küçük atalet gerektiren uygulamalarda AFIR yapısı tercih edilir (Mahmoudi ve diğ, 2011)



Şekil 2.7. Çift stator tek rotor EASM motor (Parviainen, 2005)

AFIR oluklu (Şekil 2.8. (a)) motorlarda bakır kayıpları, AFIR uç sargılarının kısa olması nedeniyle oluksuz (Şekil 2.8. (b)) tiplerine göre daha azdır.



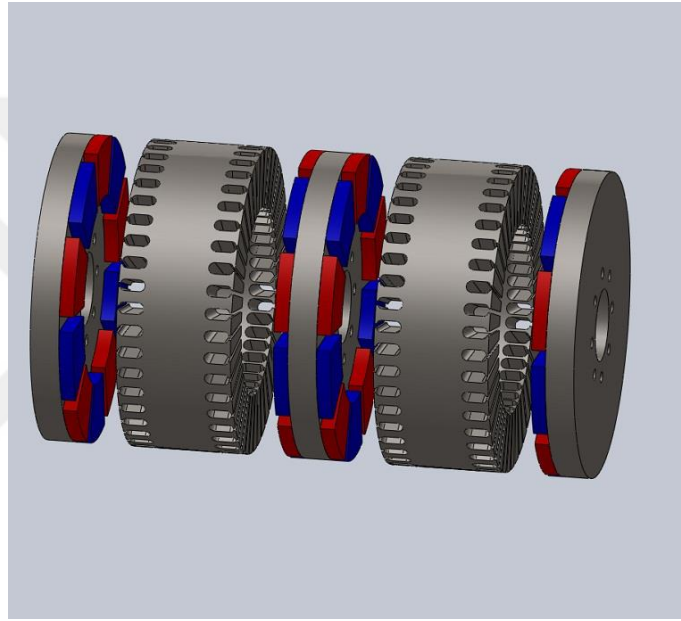
(a)

(b)

Şekil 2.8. (a) Oluklu çift stator tek rotor yapısı (b) Oluksuz çift stator tek rotor yapısı (Mahmoudi ve diğerleri, 2011)

2.3.4. Çoklu stator çoklu rotor eksenel akılı sabit mıknatıslı motor

Şekil 2.9’ da çok statorlu ve çok rotorlu EASM makinenin yapısı gösterilmiş olup bu motorlarda stator ve rotor sayıları artırılarak moment ve güç değeri iyileştirilebilir. Stator ve rotor sayısının artması motor dizaynında kompakt yapıyı bozduğu için tasarım yaparken olumsuz bir durumla karşılaşmamak için dikkat etmek gerekir. Motorun gücü arttırırken motor çapının büyümesi yerine stator ve rotor sayısının arttırılması eksenel kuvvetlerin azalmasına sebep olmaktadır. Böylece sistemin kurulması daha kolaylaşır (Gör, 2014). Bu tür motorlar genel olarak gemilerde, pompa ve jeneratör uygulamalarında kullanılır.



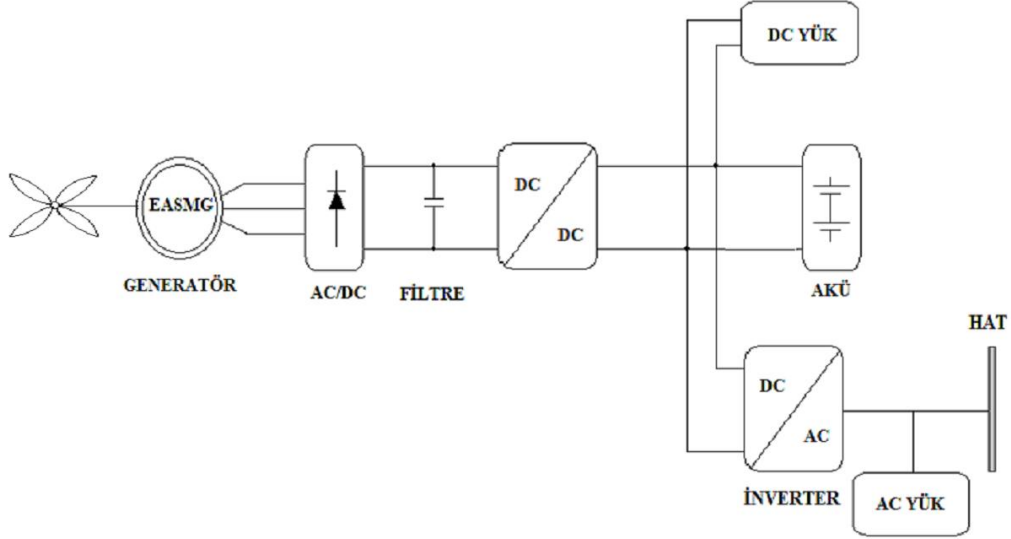
Şekil 2.9. Çoklu stator çoklu rotor EASM motor (Parviainen, 2005)

Çok kademeli EASM motorlar genellikle N stator ve $N + 1$ rotor diski bulunur (kademe veya stator sayısı N). Stator sargısı paralel veya seri bağlı olabilir. İster TORUS ister AFIR yapısı olsun EASM motorlar oluklu veya oluksuz statorlu çok kademeli olabilir (Mahmoudi ve diğerleri, 2011).

2.4. Rüzgar Enerjisi

Yenilenebilir enerji rüzgar, güneş, dalga, jeotermal ve biyokütle gibi kaynaklardan elde edilen enerjidir. Rüzgar enerjisi kullanıldığı zaman kullanılabilirliği azalmaz. Yenilenebilir enerjinin birçok türü vardır ve bunlardan biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi kullanılarak elektrik üretimi son yıllarda dünya çapında hızla artmaktadır.

Elektrik şebekesinin bulunmadığı uzak bölgelerde, yüksek verimlilikleri ve yüksek güç yoğunlukları nedeniyle rüzgar enerjisi kullanılabilir (Wirtayasa & Hsiao, 2022). Şekil 2.10’ da rüzgar enerji sistemiyle elektrik üretiminin blok diyagramı görülmektedir.

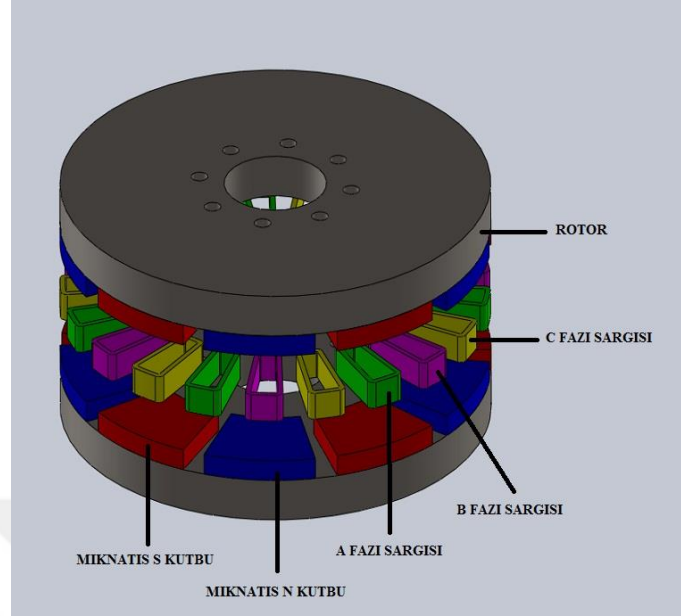


Şekil 2.10. Rüzgar enerji sistemi blok diyagramı (Pirzad ve diğerleri, 2021)

2.4.1 Rüzgar enerjisinde kullanılan eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler

Eksenel akılı makineler dişli kutuları olmadan çok sayıda kutup kullanarak çok düşük hızlarda güç üretme yetenekleri ve yapılarının disk şeklinde olması sebebiyle rüzgar enerji sistemlerinde tercih edilmektedirler. Rüzgardan elektrik üretirken iki farklı eksenel akılı makine tipi tercih edilir. Bunlardan biri tek rotorlu tek statorlu eksenel akılı makine diğeri ise çift rotorlu tek statorlu eksenel akılı makinedir (Premaratne ve diğerleri, 2022).

Şekil 2.11’ de rüzgar enerji sisteminde kullanılan tek stator çift rotor EASM makinenin 3 boyutlu modeli verilmiştir.



Şekil 2.11. Eksenel akılı sabit mıknatıslı makinenin 3 boyutlu modeli (Premaratne ve diğerleri, 2022)



3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

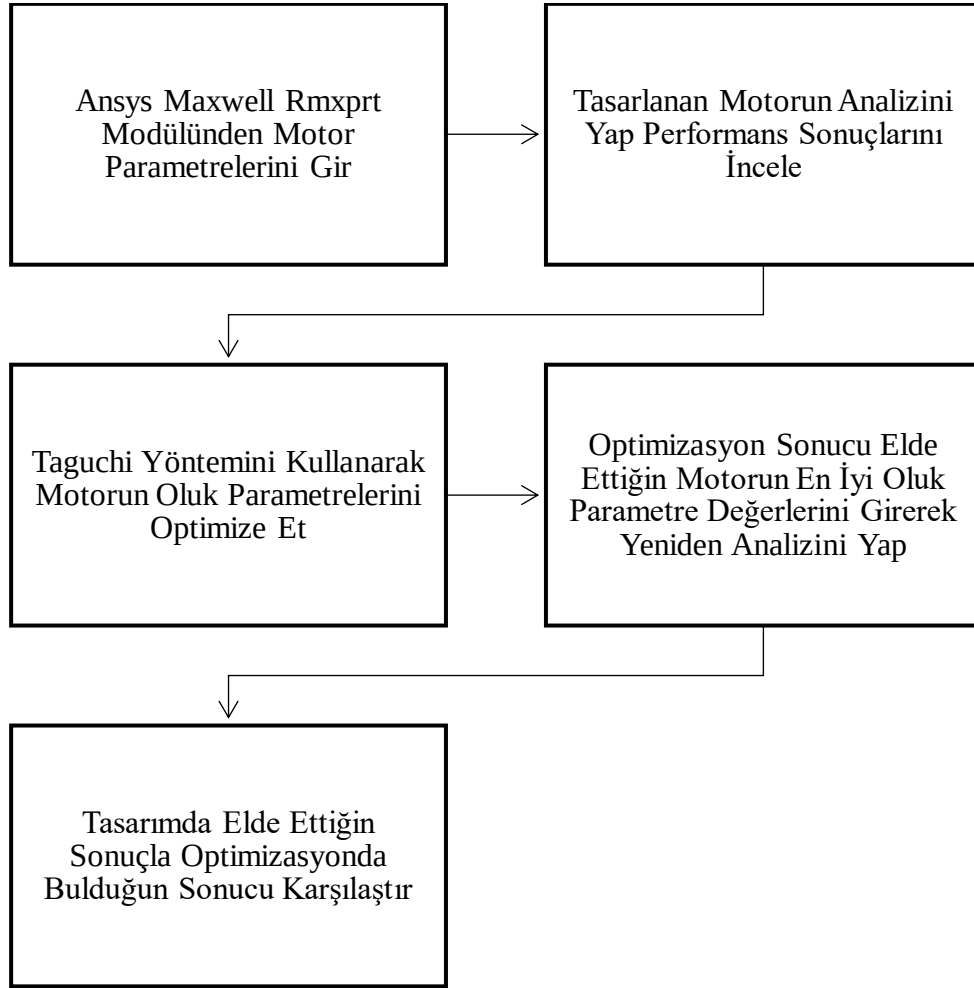
Bu bölümde Ansys Maxwell programı ile Taguchi analiz yöntemi anlatılmış ve referans olarak seçilen EASM motorun parametre değerleri verilmiştir.

3.1. Ansys Maxwell Programı

Elektrik makinesi üretirken tasarım aşamasında manyetik analizin düzgün yapılması önemlidir. Motor parametrelerinin hesaplanmasında karmaşık geometri ve doğrusal olmayan manyetik malzemeler kullanılması manyetik analizi zorlaştırmaktadır. Bu parametrelerin ve karışık diferansiyel denklemlerin çözümünü kolaylaştırmak için kullanılan yöntemlerden biride sonlu elemanlar yöntemidir (Turhan, 2014).

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansys Maxwell programı analizleri Maxwell denklemlerini kullanarak yapmaktadır. Program geçici manyetik çözüm, elektromanyetizma, manyeto statik, elektrostatik, kuvvet, moment, indüktans, empedans, kapasitans ve direnç gibi parametreler için geçici çözüm hesaplamaları yapar. Ansys Maxwell'de tasarım yaparken üç farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar; Rmxprt, Maxwell 2D ve 3D'dir. Maxwell'de 2D ve 3D çizim kısmını kullanarak ölçülendirmeyi kendimiz yaparak geometrilerimizi oluşturabileceğimiz gibi, Maxwell içinde Rmxprt modülünden tanımlı olan elektrik motorlarından birini seçerek makineye ait stator, rotor, sargı, mıknatıs, oluk, şaft ve çalışma özelliklerine ait parametre değerleri de girilerek makinemizi Maxwell ortamında kolaylıkla oluşturabilme imkânı sunmaktadır (Geyik, 2018). Modeli oluşturduktan sonra kısa süre içinde analizini yaparak makinenin akım, gerilim, güç, verim, moment vb. performans sonuçları hesaplanabilir. Daha sonra bu sonuçlara göre makinenin 2 ve 3 boyutlu manyetik performans analizi de yapılabilir.

Bu tez çalışmasında referans olarak seçilen EASM motor programının Rmxprt modülü kullanılarak tasarımı ve analizi yapılmıştır. Şekil 3.1’ de motorun tasarım aşamaları verilmiştir.



Şekil 3.1. Motor tasarım aşamaları

3.2. Taguchi Yöntemi

Kacker ve diğerlerinin yapmış olduğu bu çalışmada Taguchi ortogonal dizilerin yapısını incelemiştir ve bu dizileri oluştururken dikkat edilecek hususları ifade etmişlerdir (Kacker, Lagergren, & Filliben, 1991).

Aydın yaptığı çalışmada Taguchi deneysel tasarım yöntemini anlatmış ve anlattığı bu yöntemi bir uygulama üzerinde izah etmiştir (Aydın, 1994).

Taylan yapmış olduğu bu çalışmada bir fabrikada yakılan üç kimyasal maddenin günlük miktarını belirlemek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Taguchi yönteminde uygun ortogonal dizileri kullanarak deneyler yapmıştır. Deney sonuçlarını Taguchi yöntemini kullanarak analiz etmiş ve böylelikle uygulamada yaptığı deney sayısının azaltarak zamandan ve maliyetten tasarruf sağlamıştır (Taylan, 2009).

Taguchi daha az deneme ile iyi sonuçlar elde edebilmek için ortogonal dizileri geliştirmiştir. Bu dizilerin amacı denetlenemeyen parametrelerin etkisini azaltmaktır. Taguchi yöntemi farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasından en iyi eşleşmeyi sağlamak için bir yöntem geliştirmiştir. Ortogonal diziler, yapılacak deney tasarımı çalışmalarında her bir deneyde parametre seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirmiştir. Böylelikle bir deneyle birden fazla sayıda parametrenin ve seviyenin etkisi ölçülebilmektedir (Yıldırım, 2014).

Taguchi yönteminde klasik yöntemle göre yapılacak deney sayısı azaldığı için birçok avantaj sağlamıştır. Bu yöntemin avantajları; yöntemin kolay uygulanabilir olması, zamanın verimli kullanılması ve maliyeti düşürmesidir. Yöntemin dezavantajı deney sayısı azaldığı için ortogonal dizide etkisi olan parametreler arasında oluşabilecek bazı etkileşim parametrelerinin etkisi yok sayıldığı için az da olsa bir hata olasılığı vardır (Yıldırım, 2014).

Taguchi'nin deneysel tasarım adımları şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Taguchi deneysel tasarım aşamaları (Taylan, 2009)

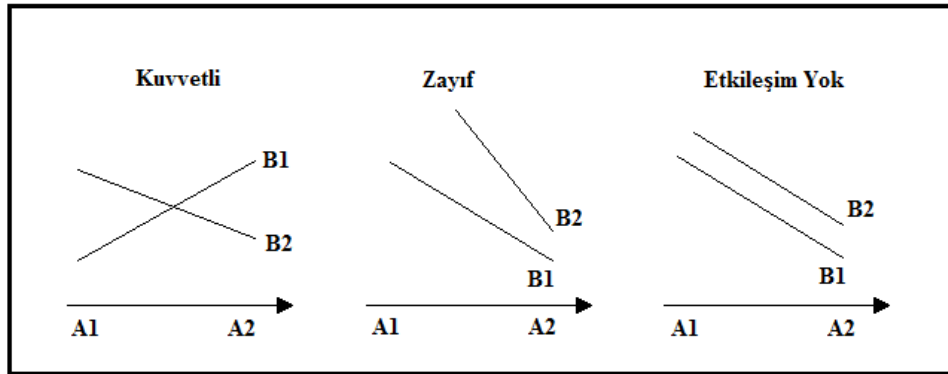
3.2.1. Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerinin seçimi

Taguchi faktörleri kontrol edilebilen ve edilemeyen (bozucu) olmak üzere iki şekilde belirlemiştir. Tasarım yapılırken kontrol edilebilen faktör sayısı belirlenip denemeler buna göre yapılmaktadır (Taylan, 2009).

3.2.2. Faktör düzeylerinin seçimi

Performansı etki eden faktörler belirlendikten sonra bunların düzey sayısı belirlenmektedir. Bu seviyeler farklı sayılarda olabilmektedir. Faktörlerin tek etkilerinin yanı sıra faktörler arası oluşan etkiler de belirlenir (Taylan, 2009).

Etkileşim, bir parametrenin (A), etkisinin diğer bir parametreye (B) bağlı olduğu durumlardır. Bu durum $A \times B$ biçiminde gösterilir. Deneyler yapılmadan önce parametreler arasında bir etkileşim olup olmadığına dikkat etmek gerekir. Çünkü hesaba katılmayan önemli bir parametre deney sonuçlarını olumsuz yönde etkileyecektir. İki parametre arasında bir etkileşim olup olmadığını yapılacak bir deneyle anlamak mümkündür. Şekil 3.3' de iki parametre arasındaki etkileşim grafiksel gösterim metodunda gösterilmiştir (Yıldırım, 2014).



Şekil 3.3. İki parametre arasında etkileşim

3.2.3. Uygun ortogonal dizinin seçilmesi

Taguchi yönteminde, belirlenen bağımsız faktörler ve seviyeleri için ideal ortogonal dizi seçimi çizelge 3.1’ den faydalanılarak yapılır. Örneğin yaptığımız tasarımda 4 seviye 5 parametre (oluk değerleri) için en uygun dizi $L_{16}(4^5)$ olanıdır. Bu dizide 16 sayısı deney sayısını, 4 rakamı her sütundaki seviyenin sayısı ve 5 rakamı ortogonal dizideki sütunların sayısını gösterir. Tam faktöriyel tasarımına göre $4^5=1024$ adet deneme yapılması gerekirken bu dizi sayesinde deneme sayısı 16’ ya düşmüştür.

Çizelge 3.1. Taguchi ortagonal dizi seçim tablosu (Gökçe & Taşgetiren, 2009)

Seviye Sayısı								
Parametre Sayısı	2		3		4		5	
	P=2,S=2	L4	P=2,S=3	L9	P=2,S=4	L16	P=2,S=5	L25
	P=3,S=2		P=3,S=3		P=3,S=4		P=3,S=5	
	P=4,S=2		P=4,S=3		P=4,S=4		P=4,S=5	
	P=5,S=2	L8	P=5,S=3	L18	P=5,S=4	L32	P=5,S=5	L50
	P=6,S=2		P=6,S=3		P=6,S=4		P=6,S=5	
	P=7,S=2		P=7,S=3		P=7,S=4		P=7,S=5	
	P=8,S=2	L11	P=8,S=3	L27	P=8,S=4	L36	P=8,S=5	L50
	P=9,S=2		P=9,S=3		P=9,S=4		P=9,S=5	
	P=10,S=2		P=10,S=3		P=10,S=4		P=10,S=5	
	P=11,S=2	L16	P=11,S=3	L36		L36	P=11,S=5	L50
	P=12,S=2		P=12,S=3				P=12,S=5	
	P=13,S=2		P=13,S=3					
	P=14,S=2	L32	P=14,S=3	L36		L36		L50
	P=15,S=2		P=15,S=3					
	P=16,S=2		P=16,S=3					
	P=17,S=2	L32	P=17,S=3	L36		L36		L50
	P=18,S=2		P=18,S=3					
	P=19,S=2		P=19,S=3					
	P=20,S=2	L32	P=20,S=3	L36		L36		L50
	P=21,S=2		P=21,S=3					
	P=22,S=2		P=22,S=3					
	P=23,S=2	L32	P=23,S=3	L36		L36		L50
	P=24,S=2							
	P=25,S=2							
	P=26,S=2	L32		L36		L36		L50
	P=27,S=2							
	P=28,S=2							
	P=29,S=2	L32		L36		L36		L50
	P=30,S=2							
	P=31,S=2							
	P=32,S=2	L32		L36		L36		L50

3.2.4. Faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması

Faktör veya etkileşimlerin seçilen ortogonal sıraya göre kolonlara atanmasında, Taguchi tarafından geliştirilen lineer grafikler ve üçgen şeklinde tablolar kullanılmaktadır.

Lineer grafikler, faktörlerin atanacağı sütunları ve hangi sütunların bu faktörlerin etkileşimini kullanılacağını, üçgen şeklinde tablolar ise faktörler arasında gerçekleşen etkileşimleri içermektedir (Taylan, 2009).

Çizelge 3.2’ de $L_{16}(4^5)$ dizi matrisi gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. $L_{16}(4^5)$ Taguchi ortogonal dizi matrisi

	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

3.2.5. Testlerin yapılması

Seçilen ortogonal diziye göre, 16 deney yapılmıştır. Ortogonal diziye yerleştirilen parametre ve seviyelere göre, hangi deneyde hangi parametrenin hangi seviyesinin kullanılacağı belirlenir. Bu şartlara göre deneyler yapılır ve sonuçlar tabloya kaydedilir (Yıldırım, 2014).

3.2.6. Sonuçların analiz edilmesi

Motorun statorunun oluk parametrelerinde performansa etki eden faktörler ve düzeyler belirlendikten sonra etkili olan faktör veya etkileşimler yer alacak şekilde bir model oluşturulur ve bu modelin analizleri yapılır. Analiz sonucunda değerlerin yorumlanmasında varyans analizi, faktör etkilerinin grafiksel gösterimi, hesap tablosu gibi metotlar kullanılmaktadır (Taylan, 2009). Bu yöntemlerden en çok tercih edilenlerden biri de varyans (ANOVA) analizidir. Bu analizde kullanılan formüller aşağıda verilmiştir (Gökçe & Taşgetiren, 2009).

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.1)$$

K_A = A parametresinin seviye sayısı

A_i = A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı

n_{A_i} = A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı

SS_A = A parametresine ait kareler toplamı

$$SS_{AxB} = \left[\sum_{i=1}^C \left(\frac{(AxB)_i^2}{n_{AxB_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \quad (3.2)$$

C = Etkileşimli parametrelerin kombinasyon sayısı

AxB = Etkileşimli parametrelerin i koşul altındaki verilerin toplamı

$$SS_T = SS_{AxB} + SS_A + SS_B \quad (3.3)$$

SS_T = Toplam kareler toplamı

SS_{AxB} = AxB etkileşimine ait kareler toplamı

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.4)$$

y_i = i . gözlem

T = Tüm gözlemlerin toplamı

N = Gözlemlerin toplam sayısı

$$\begin{aligned}
v_A &= k_A - 1 \\
v_B &= k_B - 1 \\
v_{AxB} &= (v_A).(v_B)
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

v_A = A parametresinin serbestlik derecesi

v_B = B parametresinin serbestlik derecesi

v_{AxB} = AxB etkileşiminin serbestlik derecesi

$$\begin{aligned}
v_T &= v_A + v_B + v_{AxB} \\
v_T &= N - 1
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

N = Toplam deneme sayısı

$$V_e = \frac{SS_E}{v_e} \tag{3.7}$$

V_e = Hata varyansı

v_e = Hatanın serbestlik derecesi

SS_E = Hatanın kareleri toplamı

$$\begin{aligned}
V_A &= \frac{SS_A}{v_A} \\
V_B &= \frac{SS_B}{v_B} \\
V_{AxB} &= \frac{SS_{AxB}}{v_{AxB}}
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

V_A = A parametresinin varyansı

V_B = B parametresinin varyansı

V_{AxB} = AxB etkileşiminin varyansı

$$\begin{aligned}
F_A &= \frac{V_A}{V_e} \\
F_{\alpha, v_1, v_2}
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

F_A = A parametresine ait F değeri

α = Risk

$1-\alpha$ = Güven aralığı

v_1 = Payın serbestlik derecesi

v_2 = Paydanın serbestlik derecesi

$$SS'_A = SS_A - (V_e) \cdot (V_A)$$

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \quad (3.10)$$

SS'_A = A parametresine göre kareler toplamının beklenen değeri

P = Deneye katkı yüzdesi

Taguchi, kayıp fonksiyonu olarak ismi geçen ve bir başka adı da gurultu oranı (S/N) fonksiyonu olarak ifade edilen 3 fonksiyon çeşidi vardır. Bunlar verilen sonucun en düşük olanının en iyi olduğu zaman:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.11)$$

En büyük değer en iyi olduğu zamanda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.12)$$

Nominal değer en iyi olduğu zamanda:

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3.13)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.14)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.15)$$

Burada;

y_i = Performans karakteristiğinin i. gözlem değeri

n = Bir denemedeki test sayısı

$\bar{y}$ = Gözlem değerlerinin ortalaması

S^2 = Gözlem değerlerinin varyansı

3.2.7. Doğrulama deneylerinin yapılması

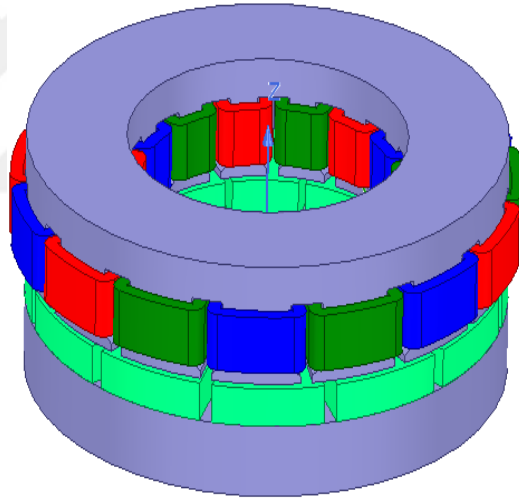
Deney sonuçlarına göre seçilen en iyi durum altında tekrar etmekte ve bu şekilde uygulanan deneylere doğrulama deneyi denir. Deneyler sonucunda bulunan faktör seviye olasılığı en iyi performans değerine gelirse istenen şartlar gerçekleşmiş ve deney amacı sağlanmış olur (Taylan, 2009).

3.3. EASM Motorun Tasarım Parametreleri

Bu kısımda referans alınan eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun motor çalışma, stator, oluk ve rotor parametre değerleri Ansys Rmxprt modülünden girilerek modelleme yapılmıştır. Daha sonra motorun analizleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

3.3.1. Motor parametreleri

Şekil 3.4’ de verilen referans motor tek stator tek rotora sahip eksenel akılı sabit mıknatıslı bir motordur.



Şekil 3.4. 3 boyutlu EASM motorun yapısı

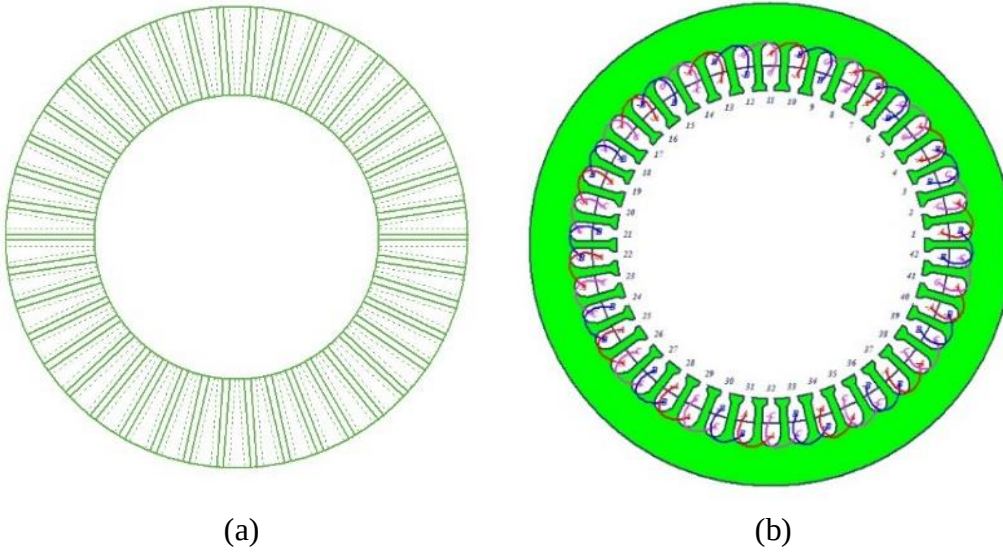
Çizelge 3.3’ de 220 volt gerilime, 1000 watt güce ve 428 rpm hıza sahip referans motorun çalışma özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Motor parametreleri

	Parametre	Değer
Motor	Kaynak Tipi	AC
	Yapı	Eksenel Akılı Rotor
	Sürtünme Kaybı (W)	12
	Rüzgar Kaybı (W)	12
	Hız (rpm)	428
	Çıkış Gücü (W)	1000
	Gerilim (V)	220
	Frekans (HZ)	50

3.3.2. Stator tasarım parametreleri

Referans motor 42 oluk, dış çapı 210 mm, iç çapı 130 mm ölçülerine sahip bir statordur (Şekil 3.5. (a), (b)).



Şekil 3.5. (a) Stator geometrisi (b) Stator sargıları

Çizelge 3.4. (a)' da statorun değerleri ve çizelge 3.4. (b)' de tam kalıp sarılan bakır sargıların özellikleri; 3 faz yıldız bağlantı, oluk başına düşen iletken sayısı 142 ve tel boyutu 0,683 mm olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. (a) Stator parametreleri (b) Stator sargı parametreleri

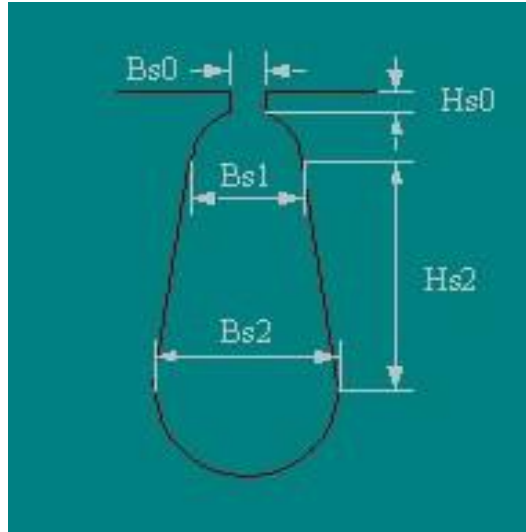
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Kutup Sayısı	14	Sargı Katmanı	2
Oyuk Sayısı	42	Paralel Kol	1
Dış Çap (mm)	210	Oluk Başına İletken	142
İç Çap (mm)	130	Sargı Tipi	Tam Kalıp
Kalınlık (mm)	30	Tel Boyutu (mm)	0,683
Saç Tipi	steel_1010	İletken Tipi	copper_75C
Oluk Tipi	1	Bobin Aralığı	1
Devre Tipi	Y3	Tel Sayısı	1

(a)

(b)

3.3.3. Oluk tasarım parametreleri

Referans motorun oluk tipi stator parametrelerini girerken 1 olarak seçilmiştir. Şekil 3.6' da görüldüğü gibi seçilen oluk tipinin Hs0, Hs2, Bs0, Bs1 ve Bs2 kısımları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Oluk tipi

Çizelge 3.5’ de referans motorun oluklarının parametre değerleri gösterilmiştir. Taguchi yönteminde bu 5 parametrenin değerleri değiştirilerek analizler yapılmıştır.

Çizelge 3.5. Oluk parametreleri

	Parametre	Değer
Oluk	Hs0 (mm)	1,5
	Hs2 (mm)	13
	Bs0 (mm)	3
	Bs1 (mm)	8
	Bs2 (mm)	8

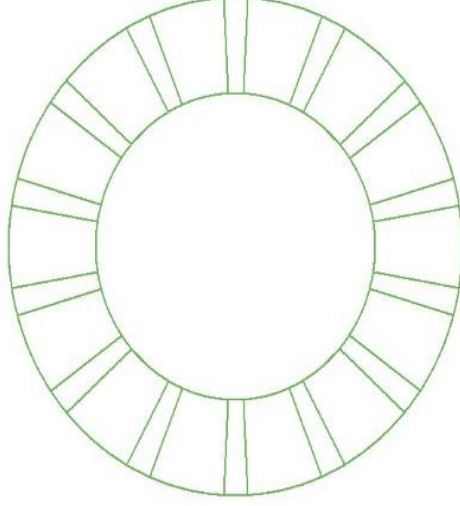
3.3.4. Rotor tasarım parametreleri

Çizelge 3.6’ da değerlerde görüldüğü gibi referans motor rotor yapısının dış ve iç çapının ölçüleri stator yapısıyla aynıdır.

Çizelge 3.6. Rotor parametreleri

	Parametre	Değer
Rotor	Kutup Sayısı	14
	Dış Çap (mm)	210
	İç Çap (mm)	130
	Kalınlık (mm)	15
	Saç Tipi	steel_1010
	Mıknatıs Tipi	NdFe35
	Mıknatıs Uzunluğu (mm)	40
	Mıknatıs Kalınlığı (mm)	10

Şekil 3.7’ de gözüktüğü gibi referans motorun rotoruna kutup sayısı kadar 14 adet mıknatıs yerleştirilmiştir. Mıknatıslar uzunluğu 40 mm, genişliği 20 mm ve kalınlığı 10 mm ölçülerindedir.



Şekil 3.7. Rotor geometrisi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

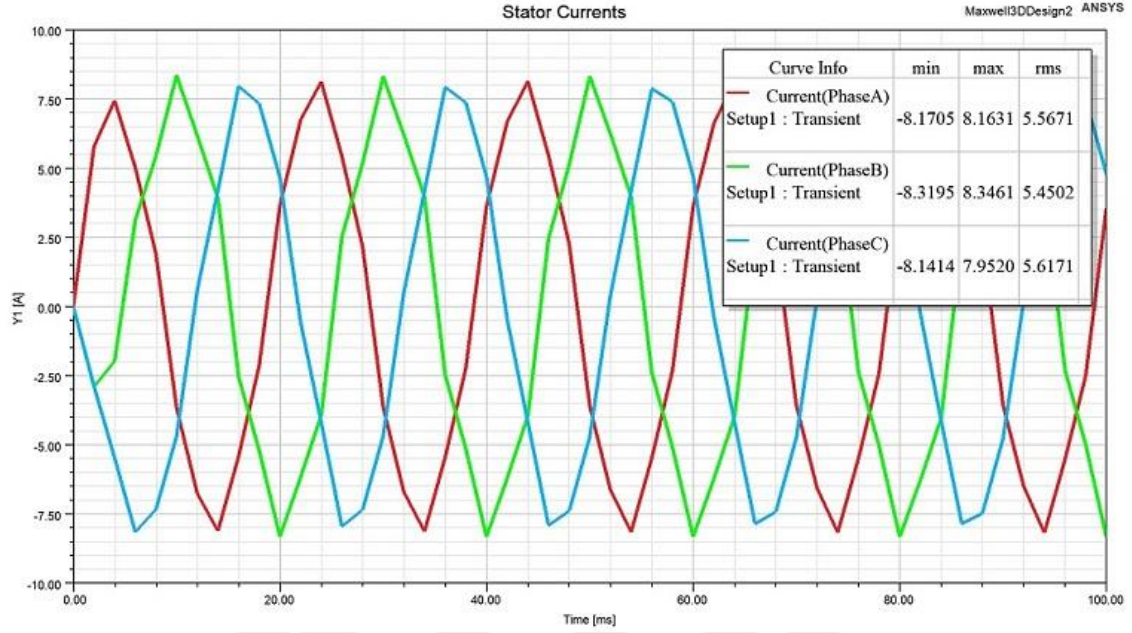
4.1. Referans EASM Motorun Ansys Maxwell Rmxprt ile Modelin Oluşturulması ve Analizi

Ansys Maxwell programının Rmxprt modülüyle 3. bölümde parametre değerleri verilen referans EASM motorun değerleri girilerek elde edilen modelin tam yükteki performans sonuçları çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Motorun performans sonuçları

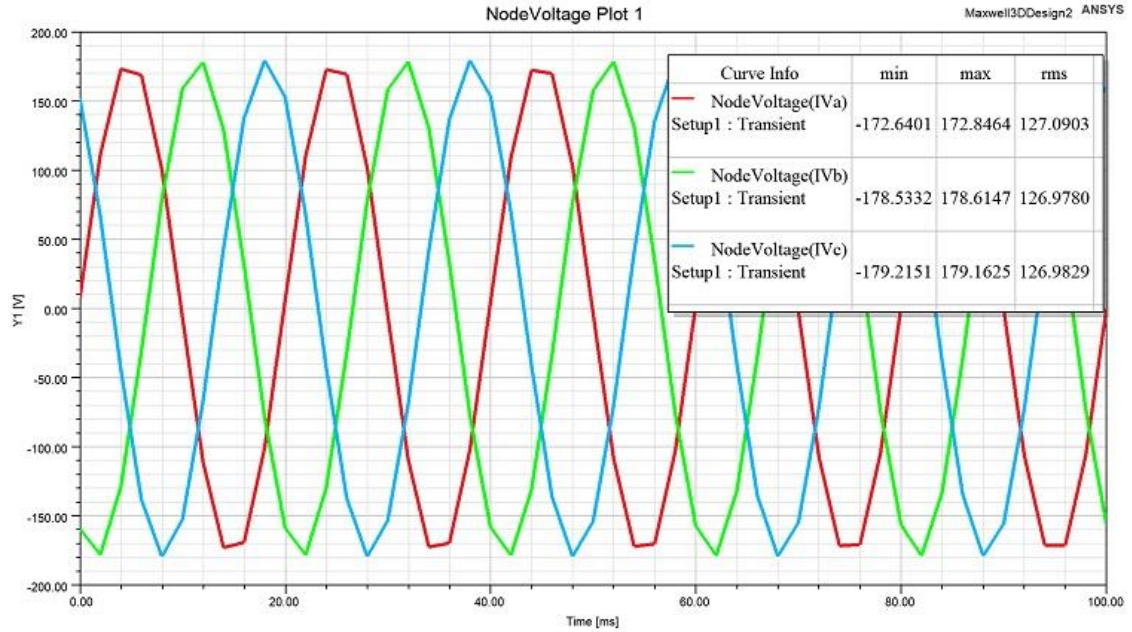
Performans	Parametre	Değer
	Rms Akım (A)	3,4804
	Sürtünme ve Rüzgar Kayıpları (W)	24
	Bakır Kayıpları (W)	251,34
	Çıkış Gücü (W)	1000,5
	Giriş Gücü (W)	1275,8
	Verim (%)	78,4189
	Hız (rpm)	428
	Moment (NewtonMetre)	22,3227
	Rms Faz Gerilimi (V)	109,94

Şekil 4.1’ de motorun 3 boyutlu analizi sonucunda elde edilen akım grafiğinde görüldüğü gibi 3 faz akımının maksimum değeri, minimum değeri ve rms değeri verilmiştir.



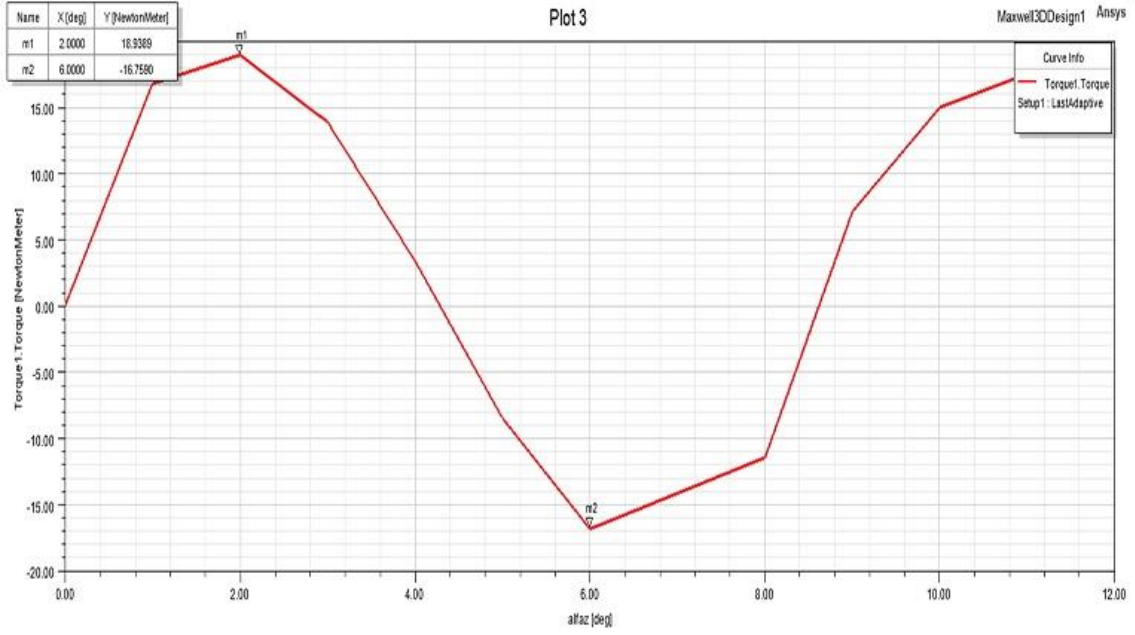
Şekil 4.1. Motorun akım grafiği

Motorun 3 boyutlu analizi sonucu elde edilen gerilim grafiği şekil 4.2’ de gösterildiği gibi 3 fazlı gerilimin maksimum değeri, minimum değeri ve rms değeri verilmiştir.



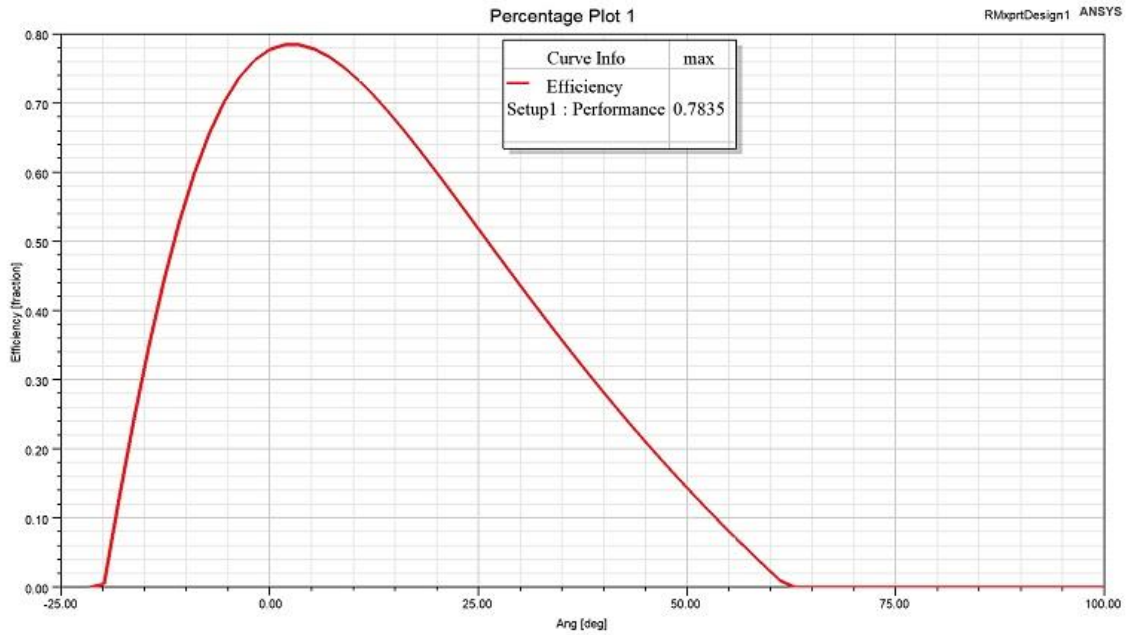
Şekil 4.2. Motorun gerilim grafiği

Motorun 3 boyutlu analizi sonucu elde edilen vurunu momenti grafiği şekil 4.3' de gösterildiği gibi maksimum değeri 18,9389 Nm olarak bulunmuştur.



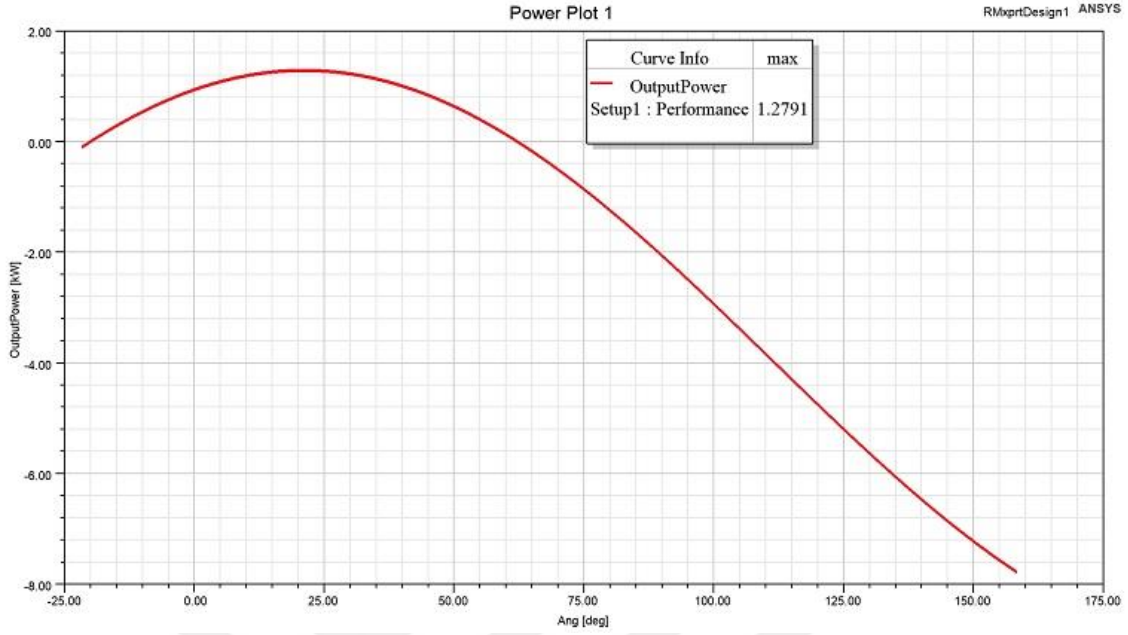
şekil 4.3. Motorun vurunu momenti grafiği

şekil 4.4' de motorun Ansys Rmxprt modülünden yapılan performans analizi sonucu verimi %78,35 olarak grafikte gösterilmiştir.



şekil 4.4. Motorun verim grafiği

Şekil 4.5’ de motorun Ansys Rmxprt modülünden yapılan performans analizi sonucu gücün değeri 1279,1 W olarak grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Motorun güç grafiği

4.2. EASM Motorun Oluk Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu

Taguchi metodunda stator oluk parametrelerini optimize etmek için daha öncede bahsedildiği gibi $L_{16}(4^5)$ dizi matrisi kullanılmıştır. Bu ortogonal diziye göre çizelge 4.2’ de tasarımda kullanılan parametreler ve seviyeler gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Dizide kullanılan parametreler ve seviyeler

Parametreler		Seviyeler			
		1	2	3	4
A	HS0 (Oluk ağzı yüksekliği)	1	1,5	2	2,5
B	HS2 (Oluk yüksekliği)	9	11	13	15
C	BS0 (Oluk ağzı genişliği)	3	4	5	6
D	BS1 (Üst oluk genişliği)	6	7	8	9
E	BS2 (Alt oluk genişliği)	6	7	8	9

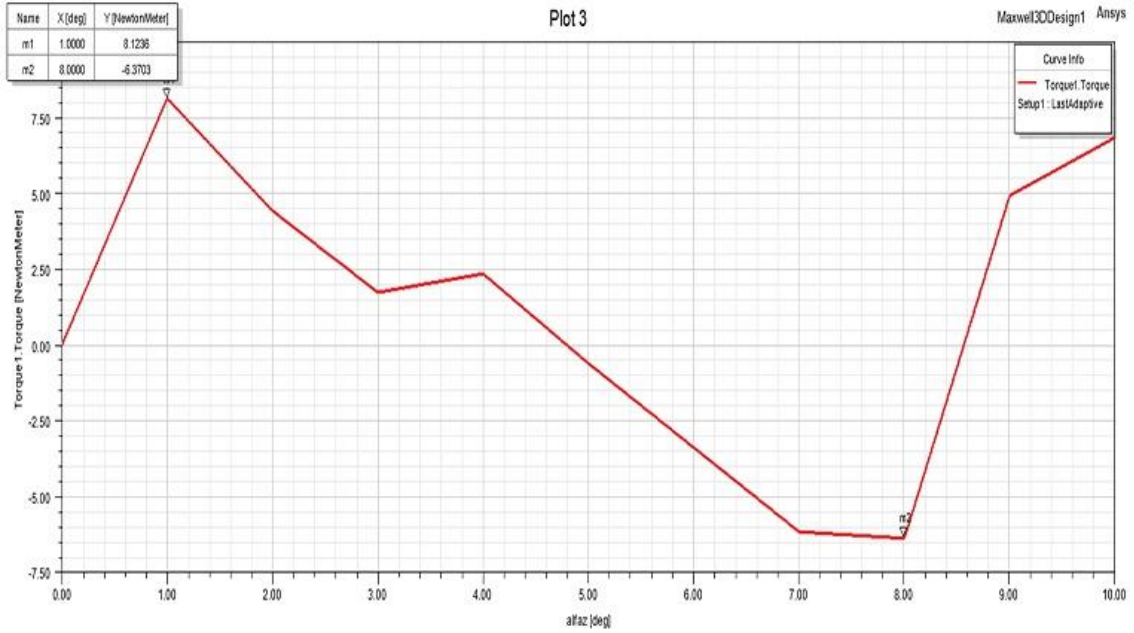
Eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun Taguchi deney tasarımında kullanılacak stator oluk parametreleri HS0(oluk ağzı yüksekliği), HS2(oluk yüksekliği), BS0(oluk ağzı genişliği), BS1(üst oluk genişliği), BS2(alt oluk genişliği) ve kullanılacak seviyeler belirlendikten sonra L_{16} ortogonal dizisine ait 16 deney kombinasyona uygun olarak çizelge 4.3’ de gösterildiği her satırdaki değerler sırayla Ansys Rmxprt modülünde yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Stator oluk parametreleri için belirlenen L_{16} ortogonal dizisi

	A(HS0)	B(HS2)	C(BS0)	D(BS1)	E(BS2)	Kombinasyon
1	1	9	3	6	6	A1B1C1D1E1
2	1	11	4	7	7	A1B2C2D2E2
3	1	13	5	8	8	A1B3C3D3E3
4	1	15	6	9	9	A1B4C4D4E4
5	1,5	9	4	8	9	A2B1C2D3E4
6	1,5	11	3	9	8	A2B2C1D4E3
7	1,5	13	6	6	7	A2B3C4D1E2
8	1,5	15	5	7	6	A2B4C3D2E1
9	2	9	5	9	7	A3B1C3D4E2
10	2	11	6	8	6	A3B2C4D3E1
11	2	13	3	7	9	A3B3C1D2E4
12	2	15	4	6	8	A3B4C2D1E3
13	2,5	9	6	7	8	A4B1C4D2E3
14	2,5	11	5	6	9	A4B2C3D1E4
15	2,5	13	4	9	6	A4B2C2D4E1
16	2,5	15	3	8	7	A4B4C1D3E2

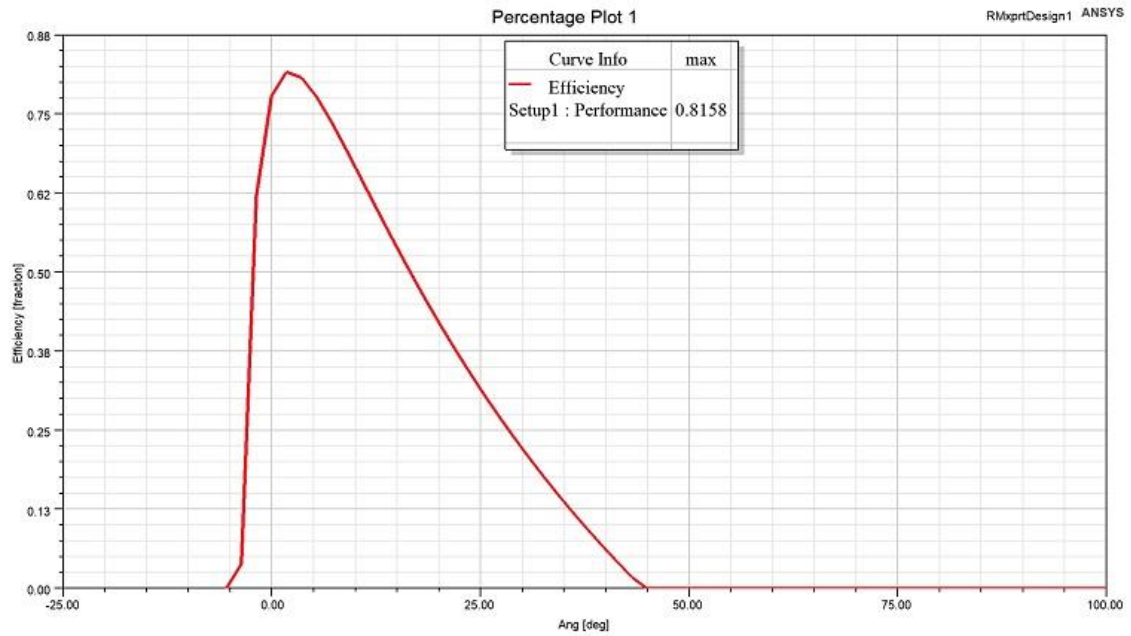
4.2.1. A1B1C1D1E1 kombinasyonuna ait deney sonucu

A1B1C1D1E1 satırı için yapılan deneyin vurunu momenti grafiği maksimum 8,1236 Nm olarak şekil 4.6’ da gösterilmiştir.



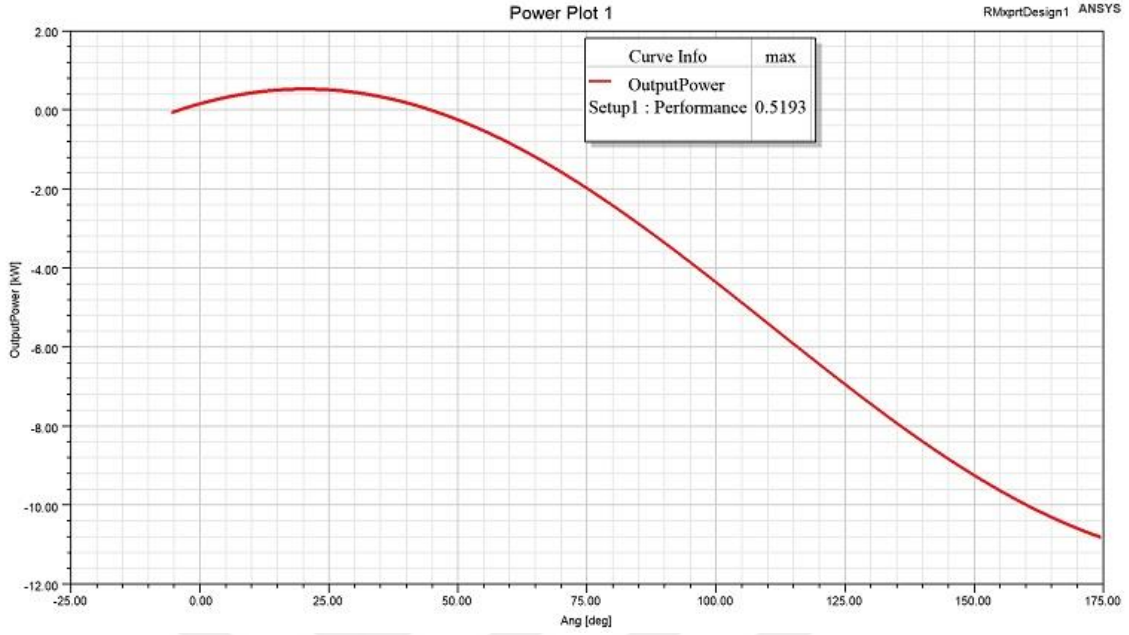
Şekil 4.6. A1B1C1D1E1 kombinasyonu vurunu momenti grafiği

Şekil 4.7’ de A1B1C1D1E1 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %81,58 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. A1B1C1D1E1 kombinasyonu verim grafiği

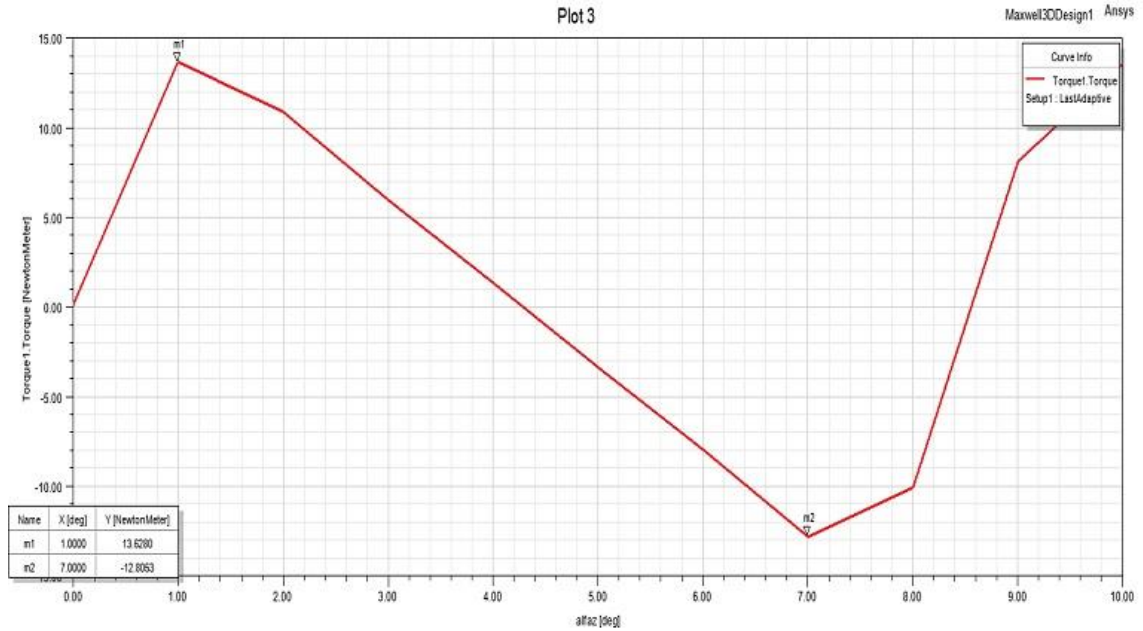
Şekil 4.8’ de A1B1C1D1E1 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 519,30 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.8. A1B1C1D1E1 kombinasyonu güç grafiği

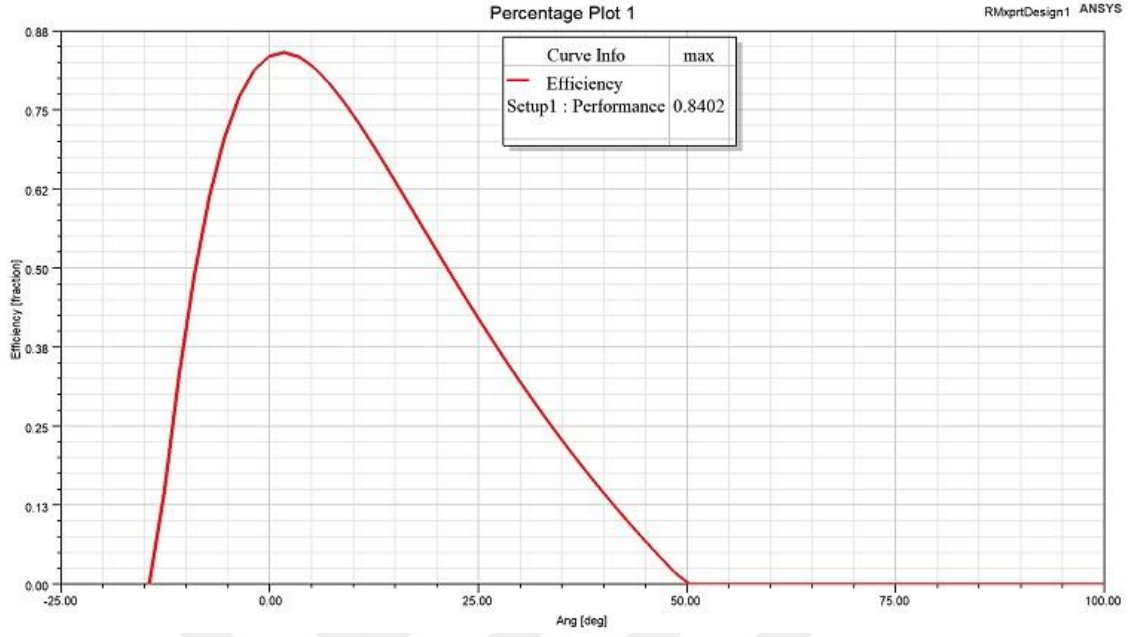
4.2.2. A1B2C2D2E2 kombinasyonuna ait deney sonucu

A1B2C2D2E2 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 13,6280 Nm olarak şekil 4.9’ da gösterilmiştir.



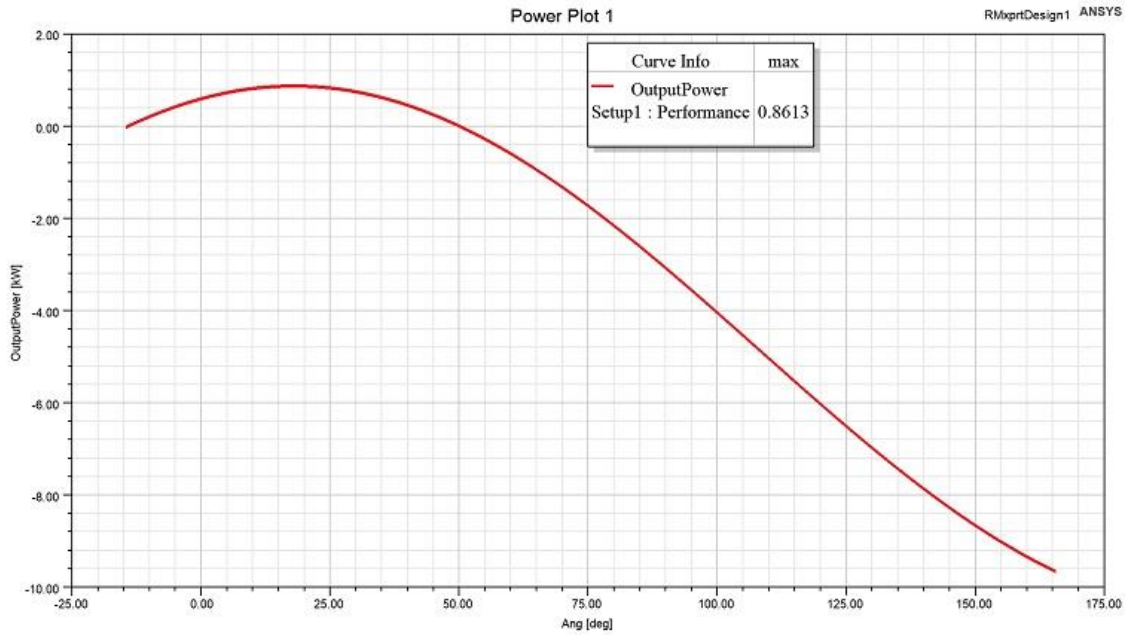
Şekil 4.9. A1B2C2D2E2 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.10' da A1B2C2D2E2 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %84,02 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.10. A1B2C2D2E2 kombinasyonu verim grafiği

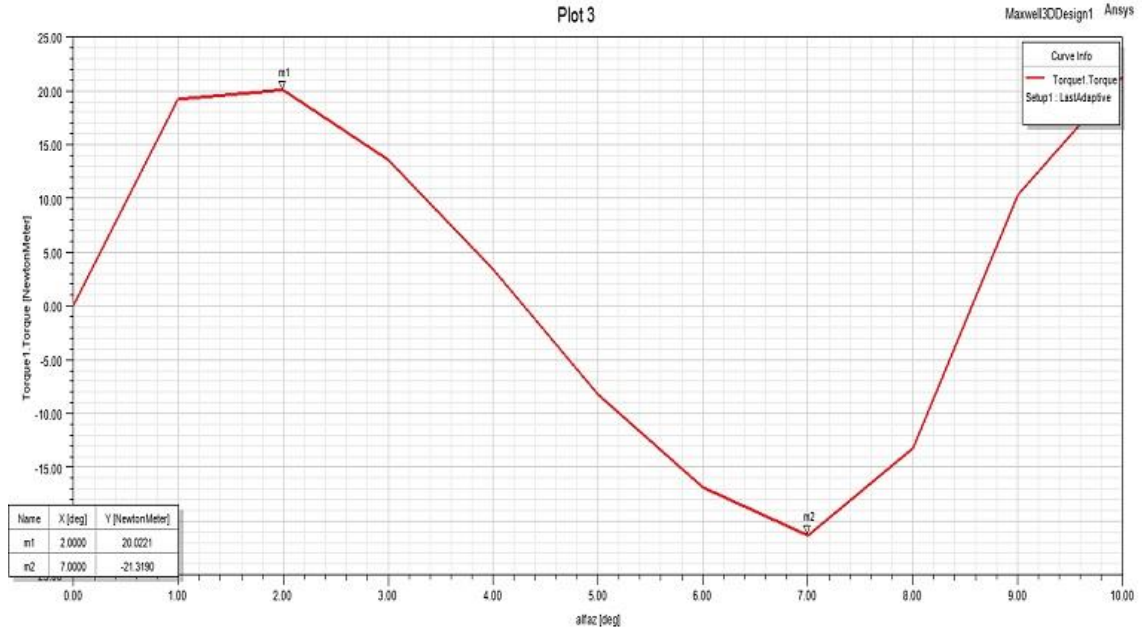
Şekil 4.11' de A1B2C2D2E2 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 861,30 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.11. A1B2C2D2E2 kombinasyonu güç grafiği

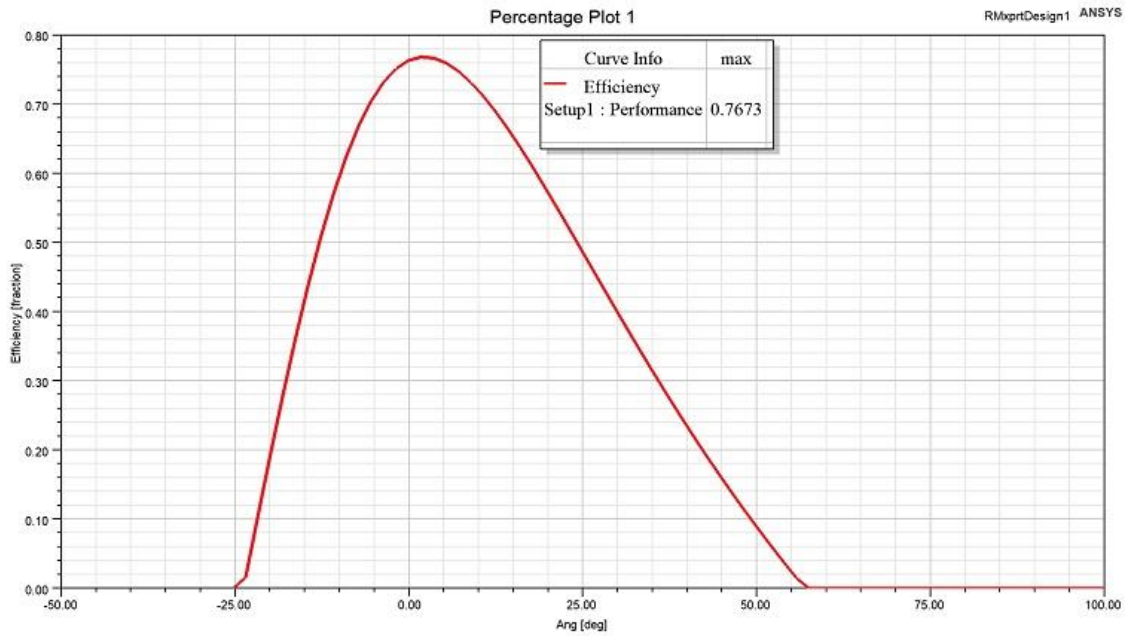
4.2.3. A1B3C3D3E3 kombinasyonuna ait deney sonucu

A1B3C3D3E3 satırı için yapılan deneyin vurunu momenti grafiği maksimum 20,0221 Nm olarak Şekil 4.12’ de gösterilmiştir.



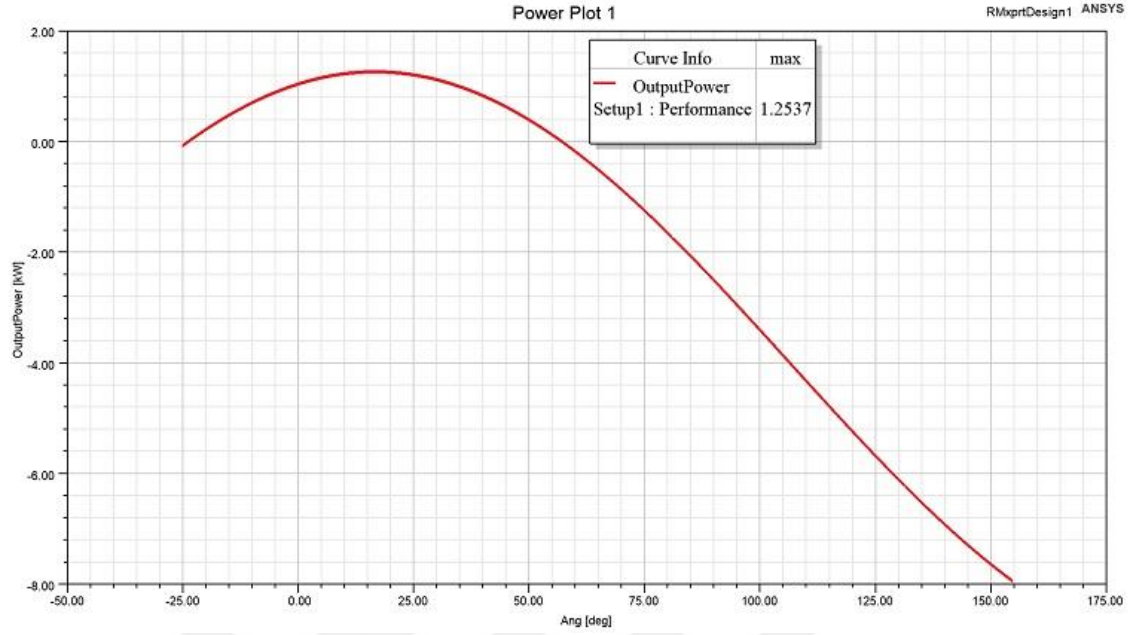
Şekil 4.12. A1B3C3D3E3 kombinasyonu vurunu momenti grafiği

Şekil 4.13’ de A1B3C3D3E3 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %76,73 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13. A1B3C3D3E3 kombinasyonu verim grafiği

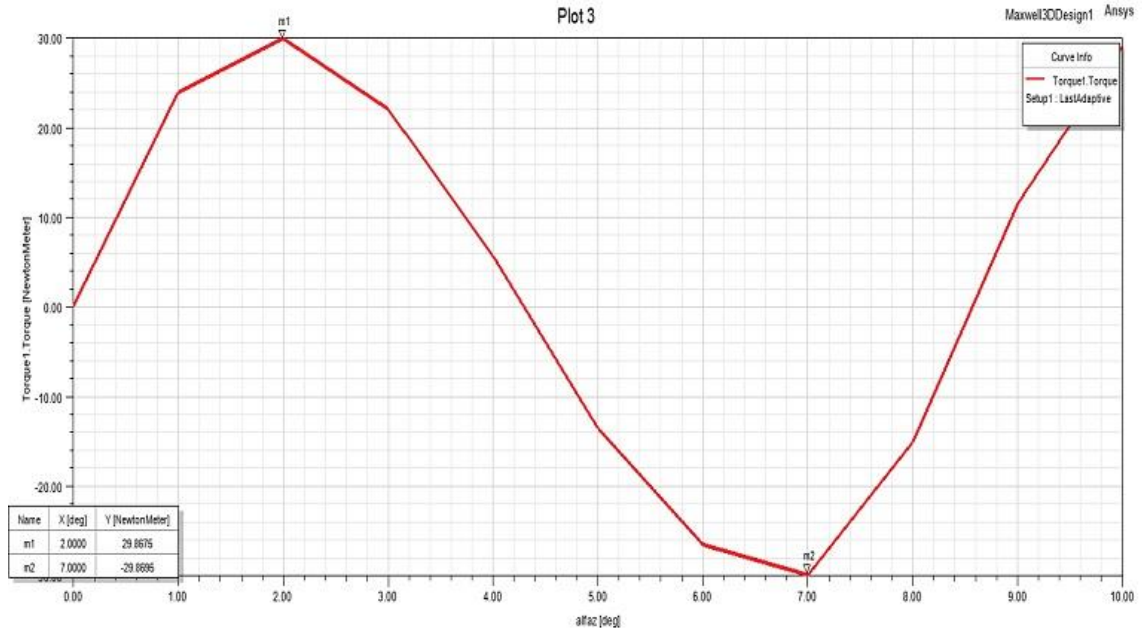
Şekil 4.14’ de A1B3C3D3E3 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1253,70 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.14. A1B3C3D3E3 kombinasyonu güç grafiği

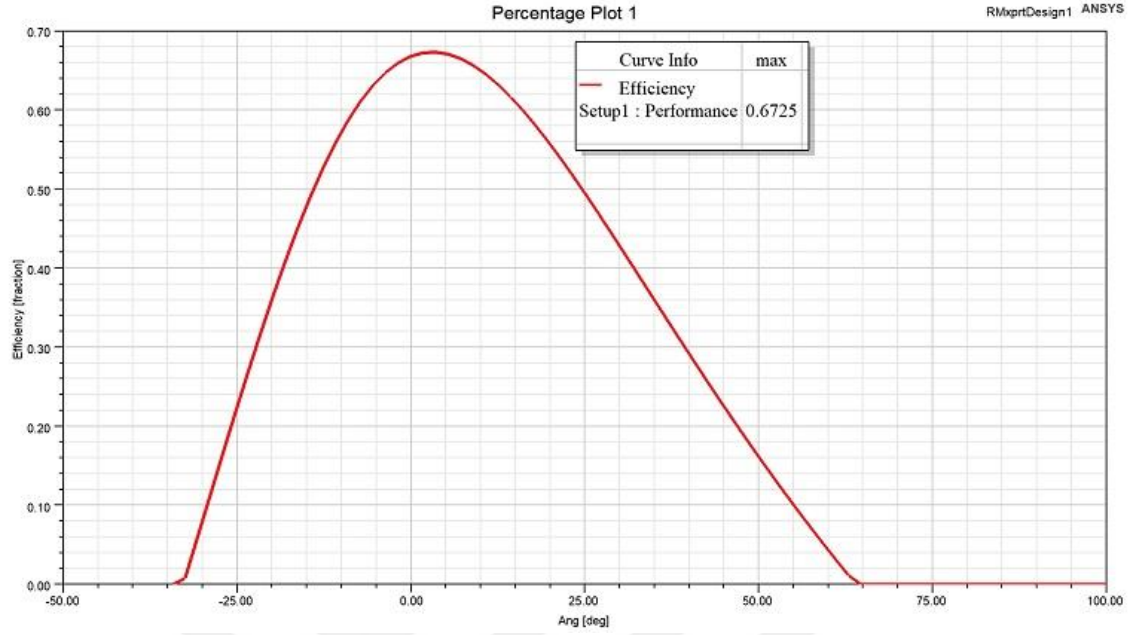
4.2.4. A1B4C4D4E4 kombinasyonuna ait deney sonucu

A1B4C4D4E4 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 29,8675 Nm olarak şekil 4.15’ de gösterilmiştir.



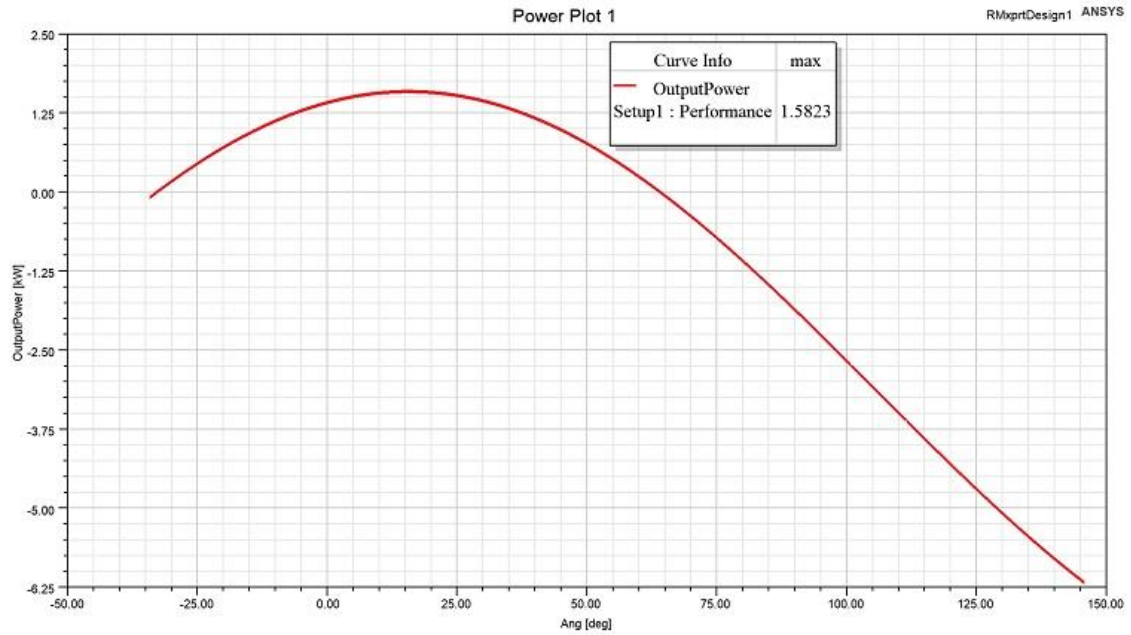
Şekil 4.15. A1B4C4D4E4 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.16' da A1B4C4D4E4 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %67,25 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.16. A1B4C4D4E4 kombinasyonu verim grafiği

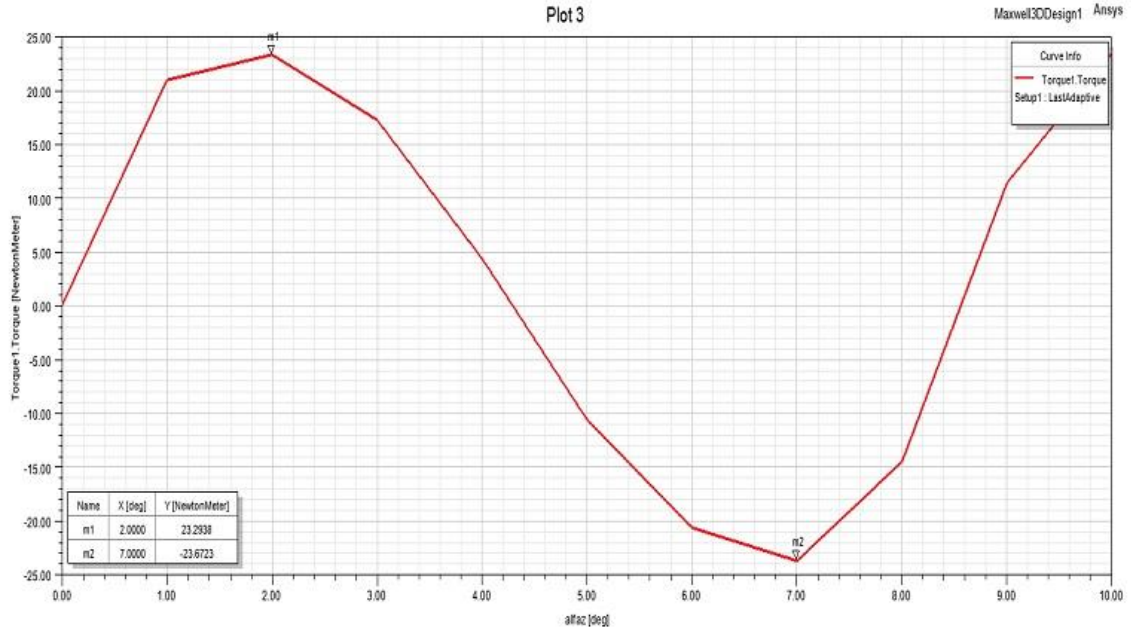
Şekil 4.17' de A1B4C4D4E4 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1582,30 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.17. A1B4C4D4E4 kombinasyonu güç grafiği

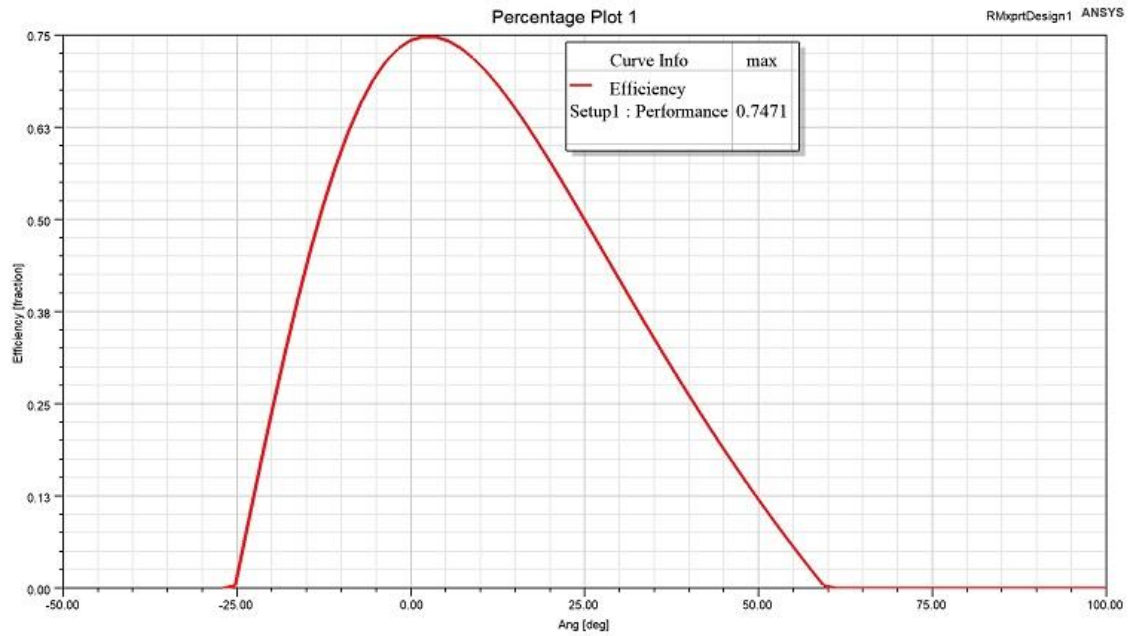
4.2.5. A2B1C2D3E4 kombinasyonuna ait deney sonucu

A2B1C2D3E4 satırı için yapılan deneyin vuru moment grafiği maksimum 23,2938 Nm olarak şekil 4.18’ de gösterilmiştir.



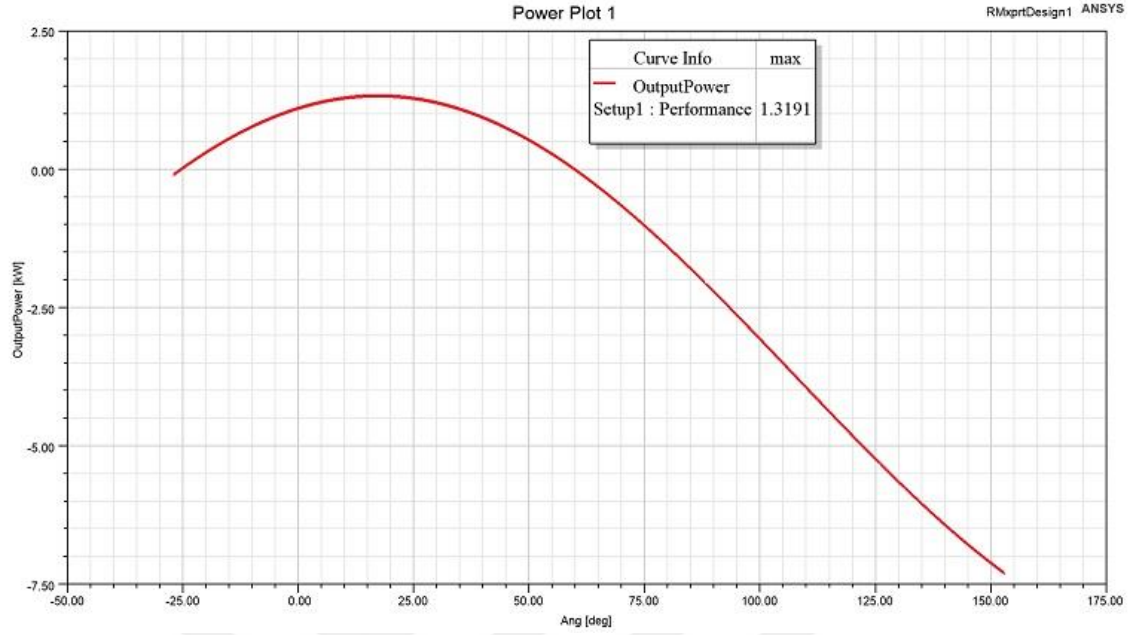
Şekil 4.18. A2B1C2D3E4 kombinasyonu vuru moment grafiği

Şekil 4.19’ da A2B1C2D3E4 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %74,71 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.19. A2B1C2D3E4 kombinasyonu verim grafiği

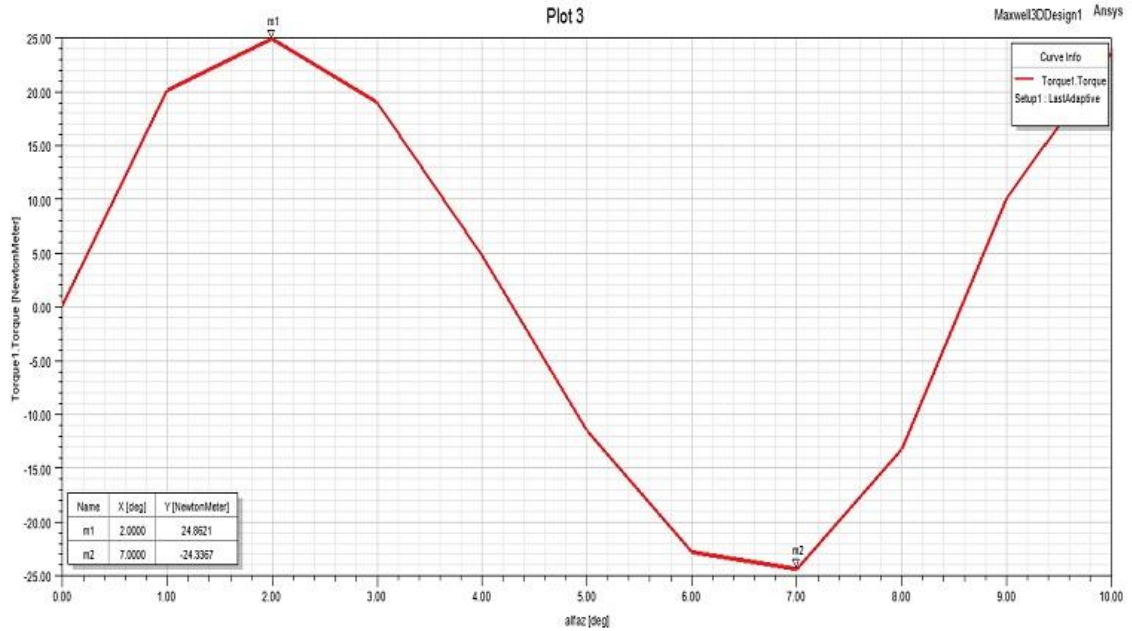
Şekil 4.20’ de A2B1C2D3E4 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1319,10 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.20. A2B1C2D3E4 kombinasyonu güç grafiği

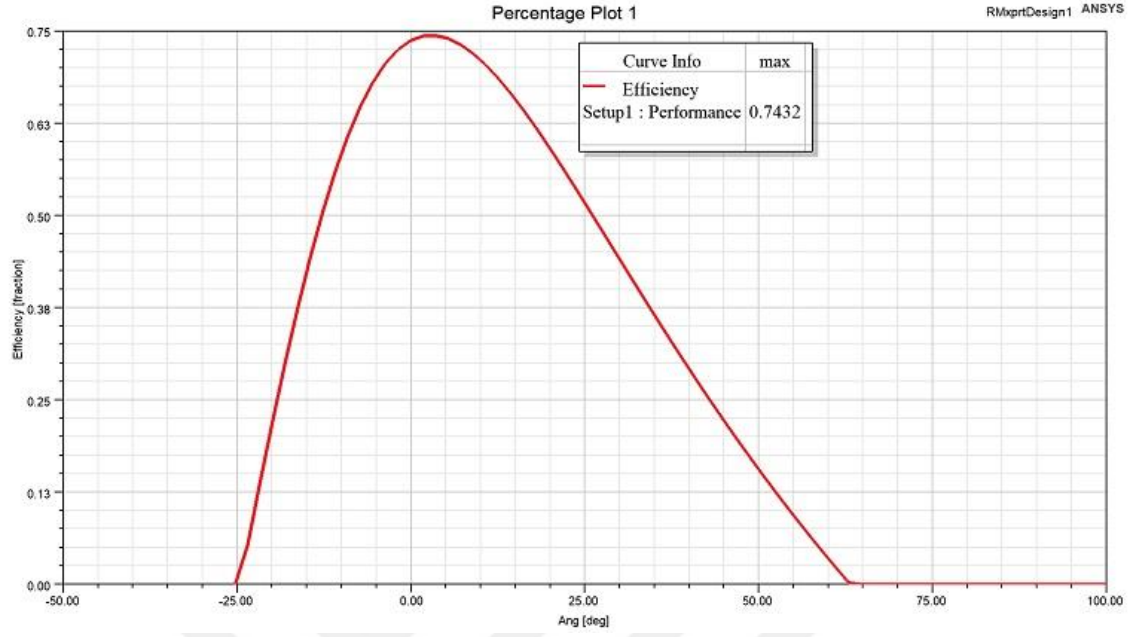
4.2.6. A2B2C1D4E3 kombinasyonuna ait deney sonucu

A2B2C1D4E3 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 24,8621 Nm olarak şekil 4.21’ de gösterilmiştir.



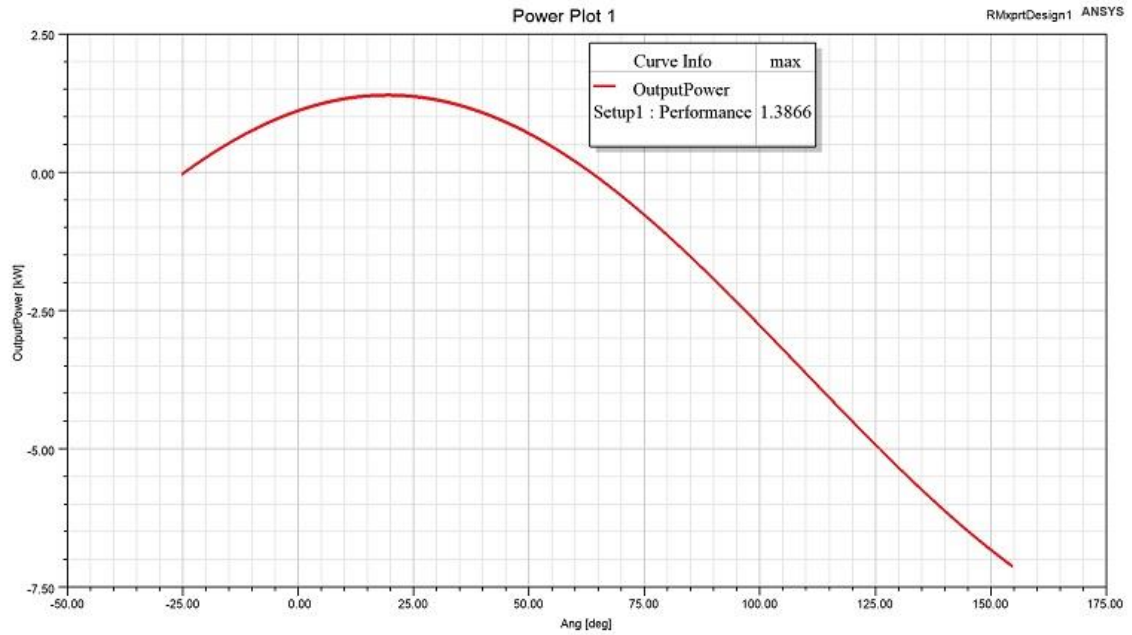
Şekil 4.21. A2B2C1D4E3 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.22’ de A2B2C1D4E3 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %74,32 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.22. A2B2C1D4E3 kombinasyonu verim grafiği

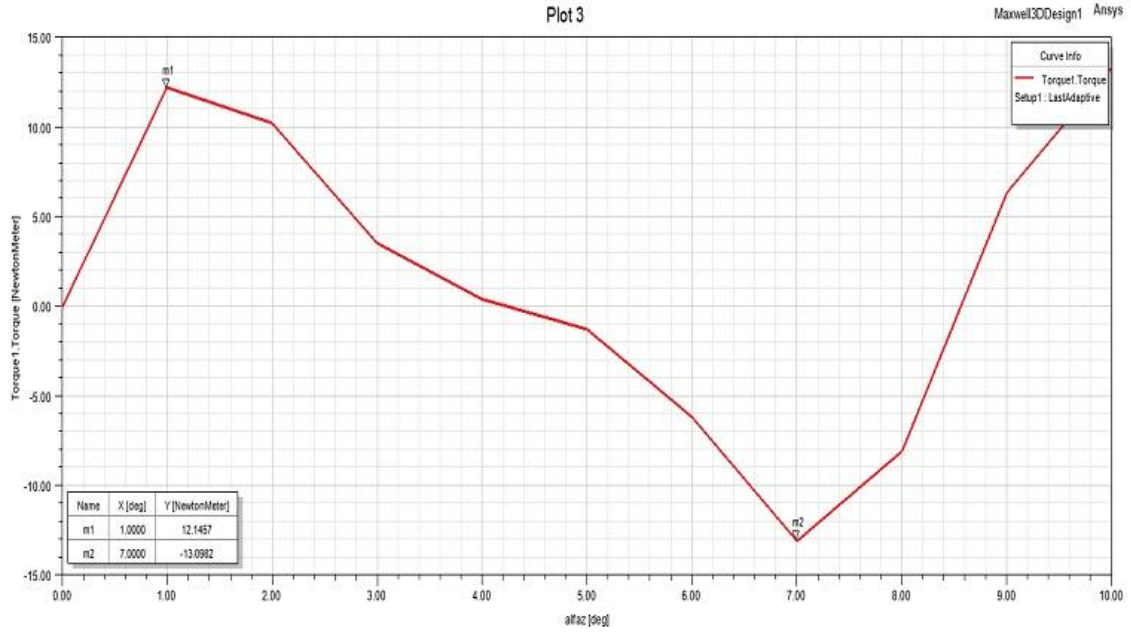
Şekil 4.23’ de A2B2C1D4E3 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1386,60 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.23. A2B2C1D4E3 kombinasyonu güç grafiği

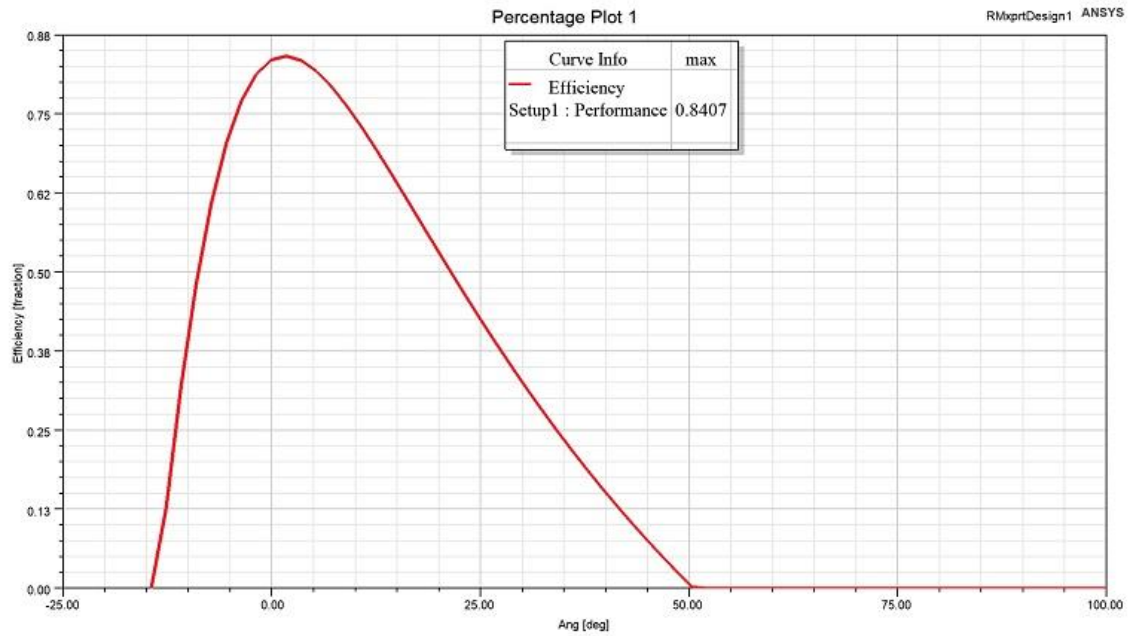
4.2.7. A2B3C4D1E2 kombinasyonuna ait deney sonucu

A2B3C4D1E2 satırı için yapılan deneyin vuruntu momenti grafiği maksimum 12,1457 Nm olarak şekil 4.24’ de gösterilmiştir.



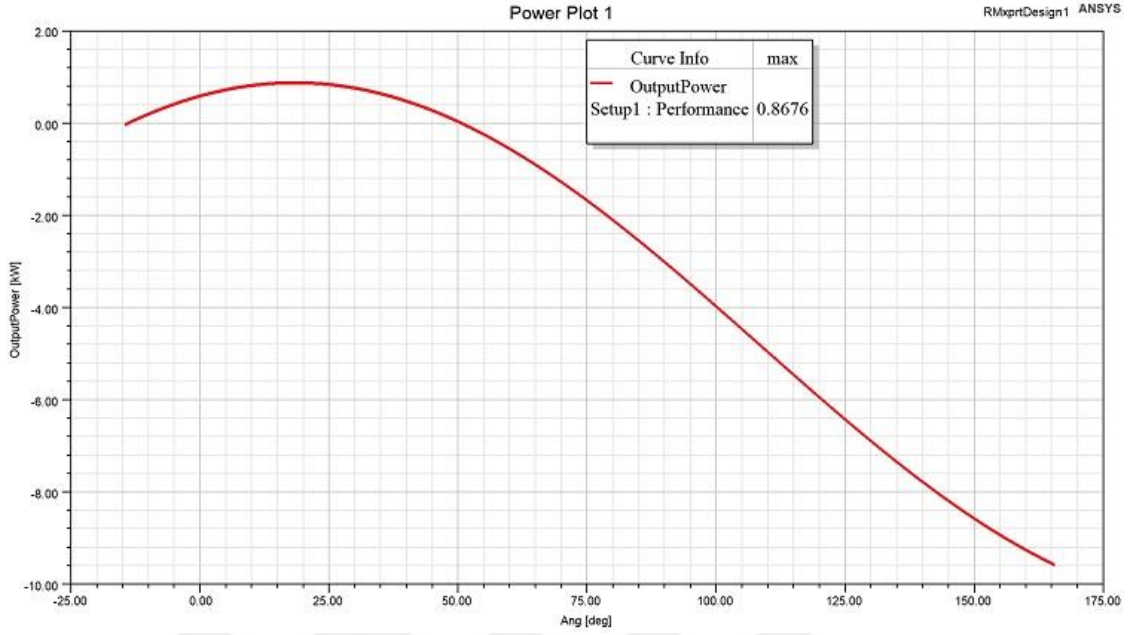
Şekil 4.24. A2B3C4D1E2 kombinasyonu vuruntu momenti grafiği

Şekil 4.25’ de A2B3C4D1E2 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %84,07 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.25. A2B3C4D1E2 kombinasyonu verim grafiği

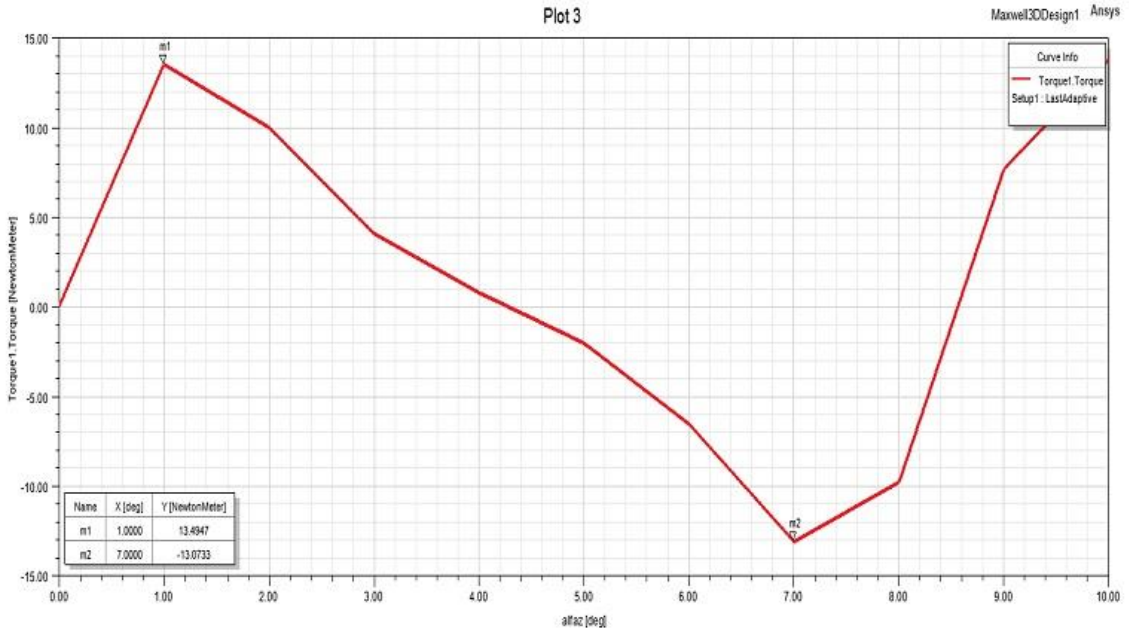
Şekil 4.26' da A2B3C4D1E2 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 867,60 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.26. A2B3C4D1E2 kombinasyonu güç grafiği

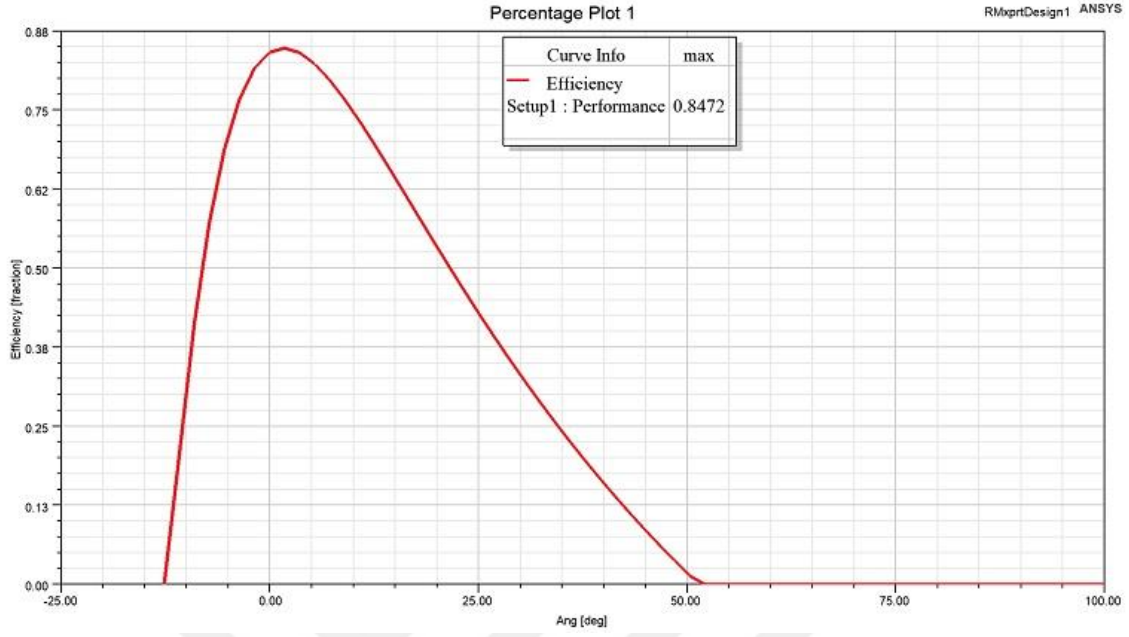
4.2.8. A2B4C3D2E1 kombinasyonuna ait deney sonucu

A2B4C3D2E1 satırı için yapılan deneyin vuru momentini grafiği maksimum 13,4947 Nm olarak şekil 4.27' de gösterilmiştir.



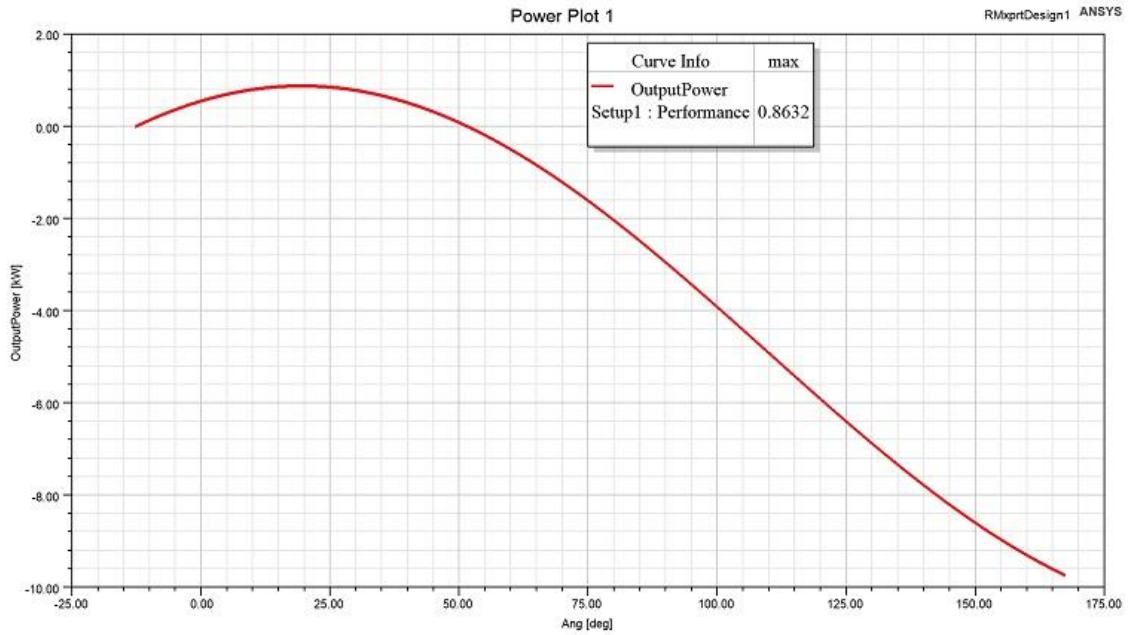
Şekil 4.27. A2B4C3D2E1 kombinasyonu vuru momentini grafiği

Şekil 4.28’ de A2B4C3D2E1 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %84,72 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.28. A2B4C3D2E1 kombinasyonu verim grafiği

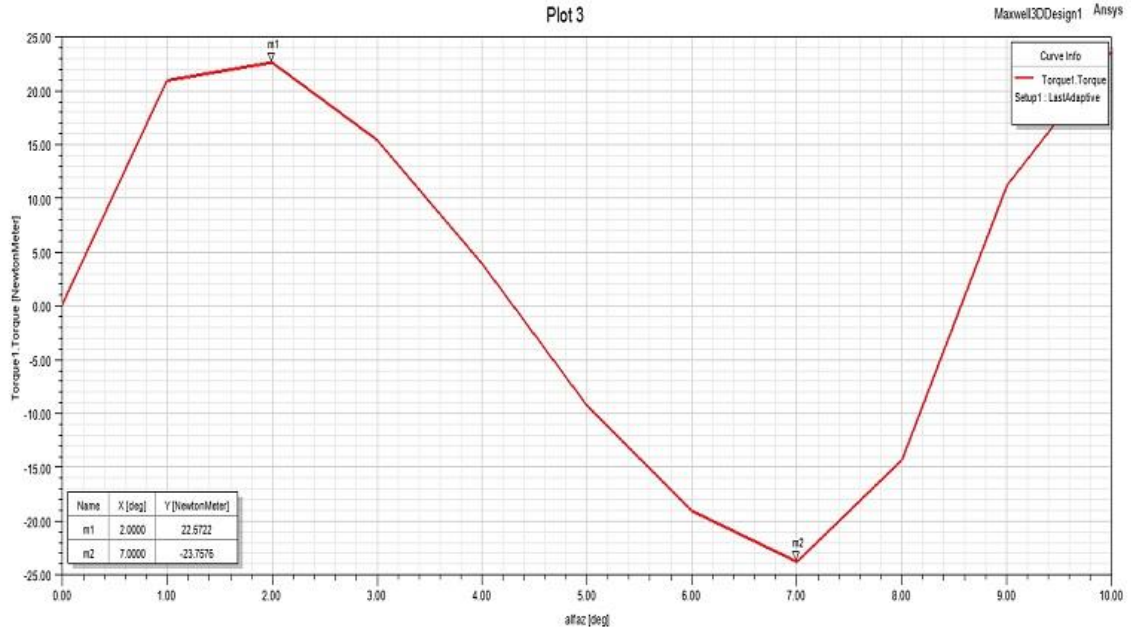
Şekil 4.29’ da A2B4C3D2E1 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 863,20 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.29. A2B4C3D2E1 kombinasyonu güç grafiği

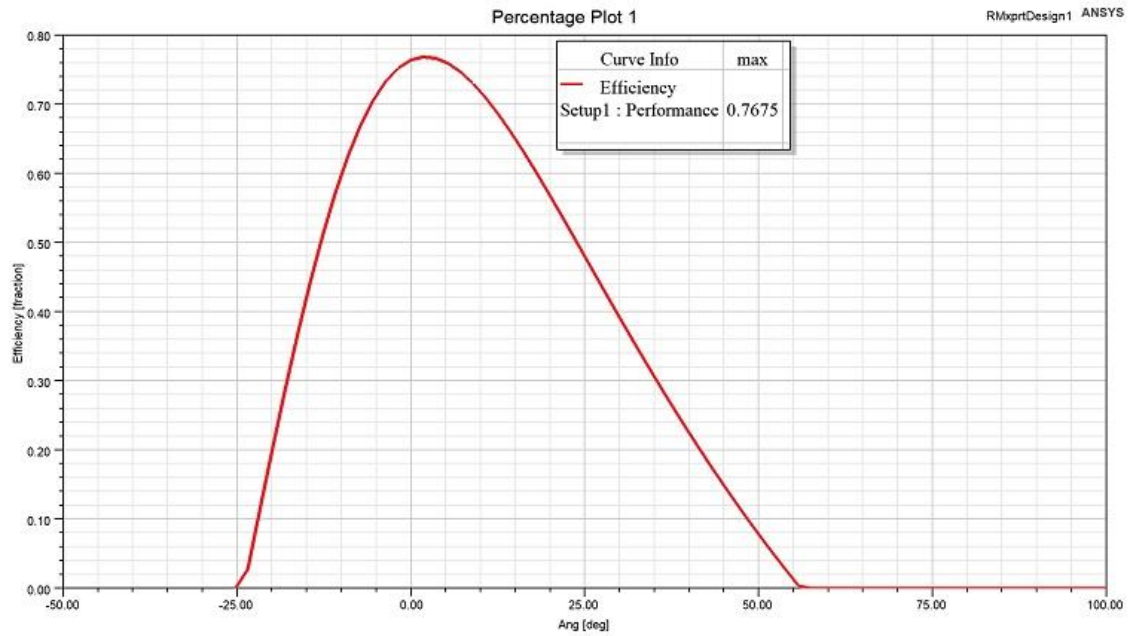
4.2.9. A3B1C3D4E2 kombinasyonuna ait deney sonucu

A3B1C3D4E2 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 22,5722 Nm olarak Şekil 4.30' da gösterilmiştir.



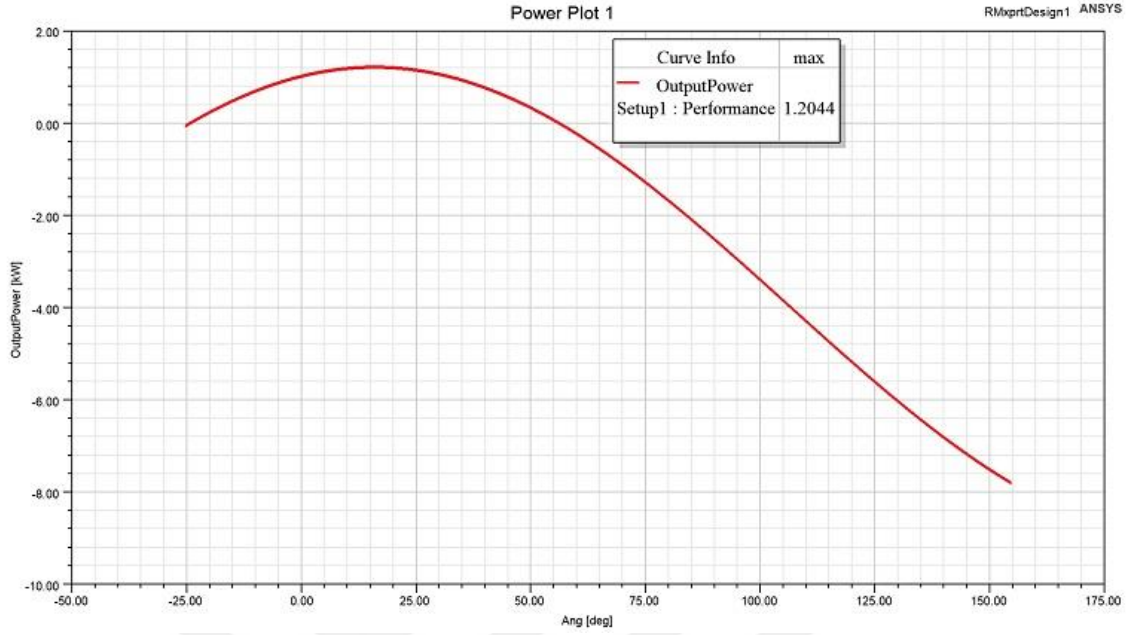
Şekil 4.30. A3B1C3D4E2 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.31' de A3B1C3D4E2 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %76,75 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.31. A3B1C3D4E2 kombinasyonu verim grafiği

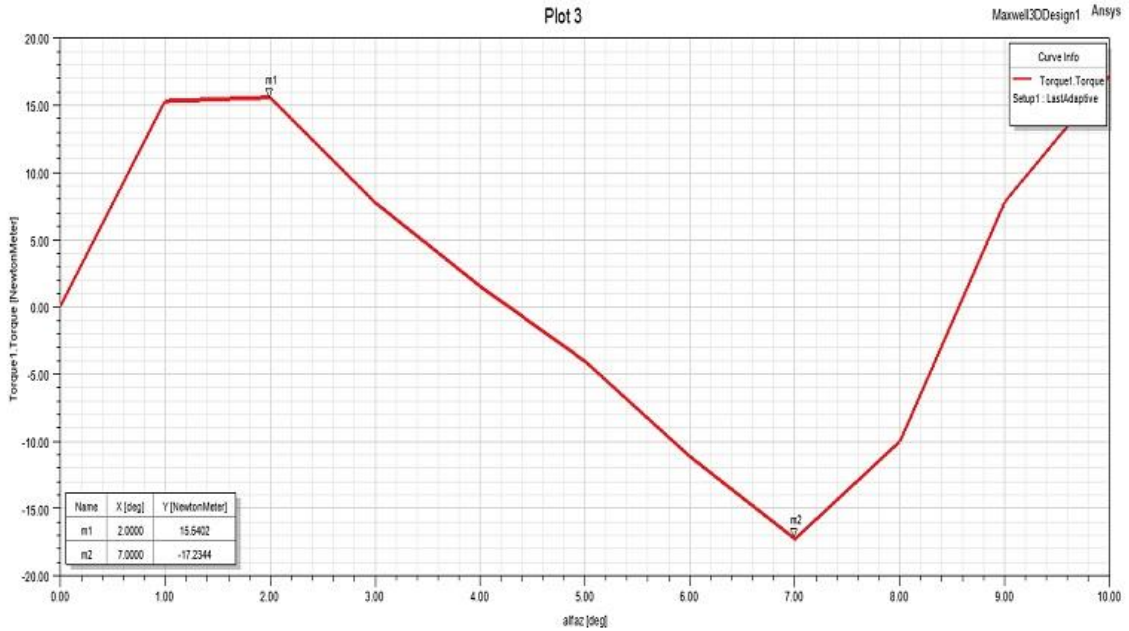
Şekil 4.32’ de A3B1C3D4E2 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1204,40 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.32. A3B1C3D4E2 kombinasyonu güç grafiği

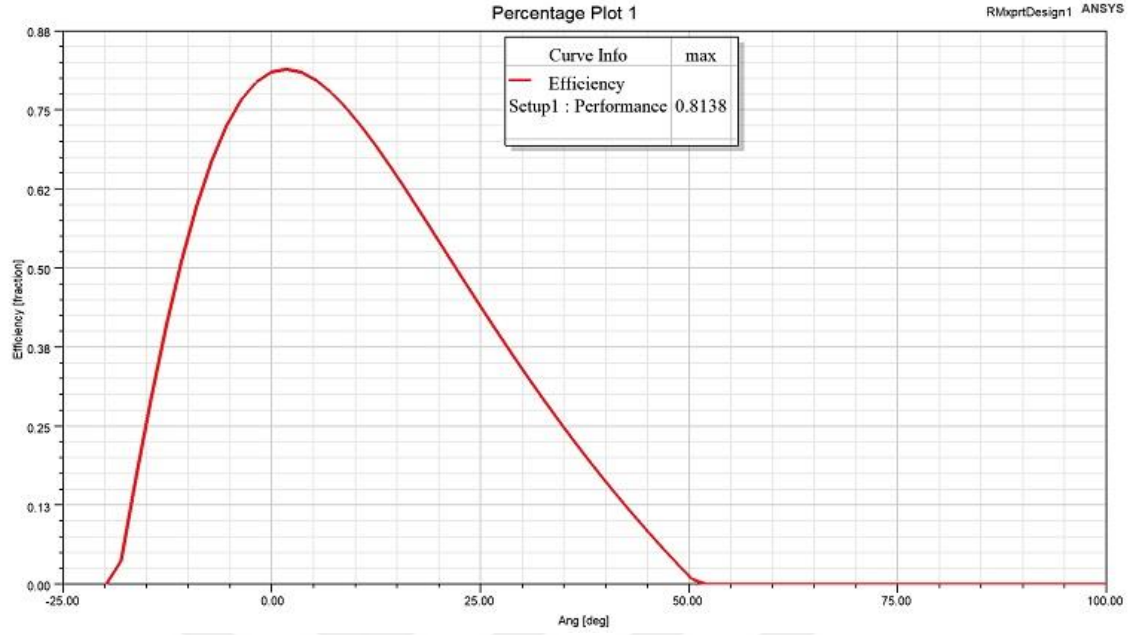
4.2.10. A3B2C4D3E1 kombinasyonuna ait deney sonucu

A3B2C4D3E1 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 15,5402 Nm olarak şekil 4.33’ de gösterilmiştir.



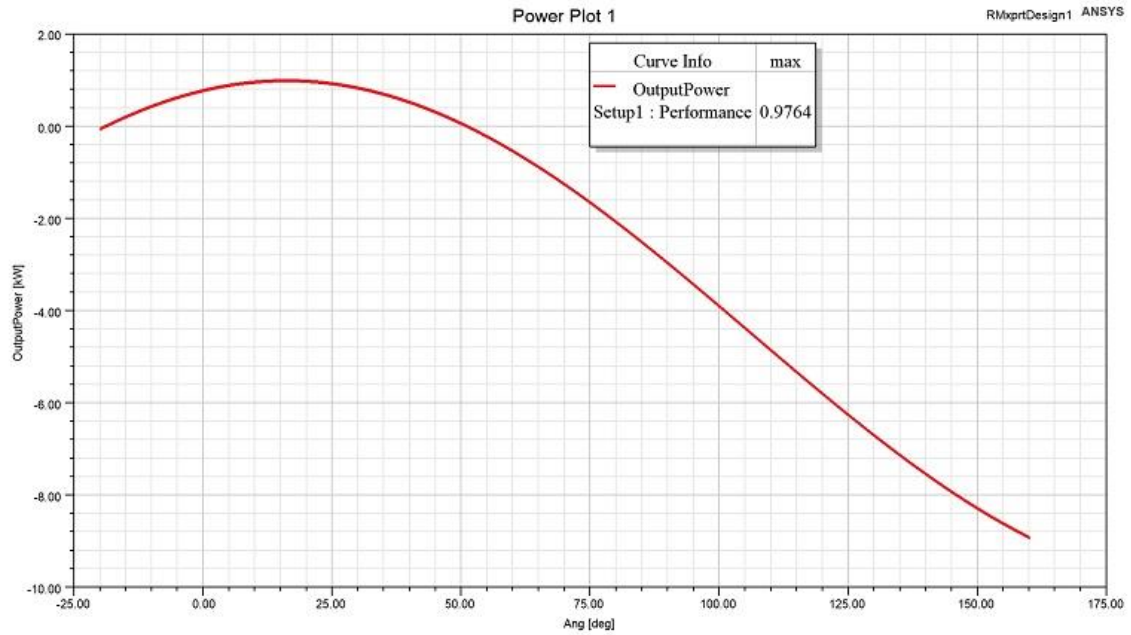
Şekil 4.33. A3B2C4D3E1 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.34’ de A3B2C4D3E1 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %81,38 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.34. A3B2C4D3E1 kombinasyonu verim grafiği

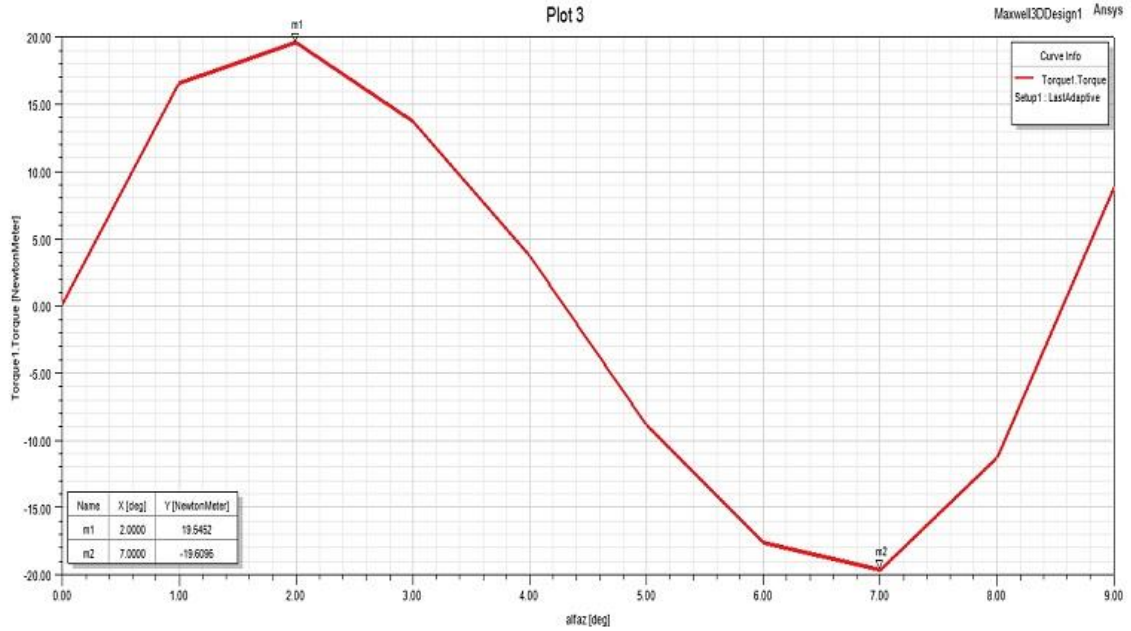
Şekil 4.35’ de A3B2C4D3E1 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 976,40 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.35. A3B2C4D3E1 kombinasyonu güç grafiği

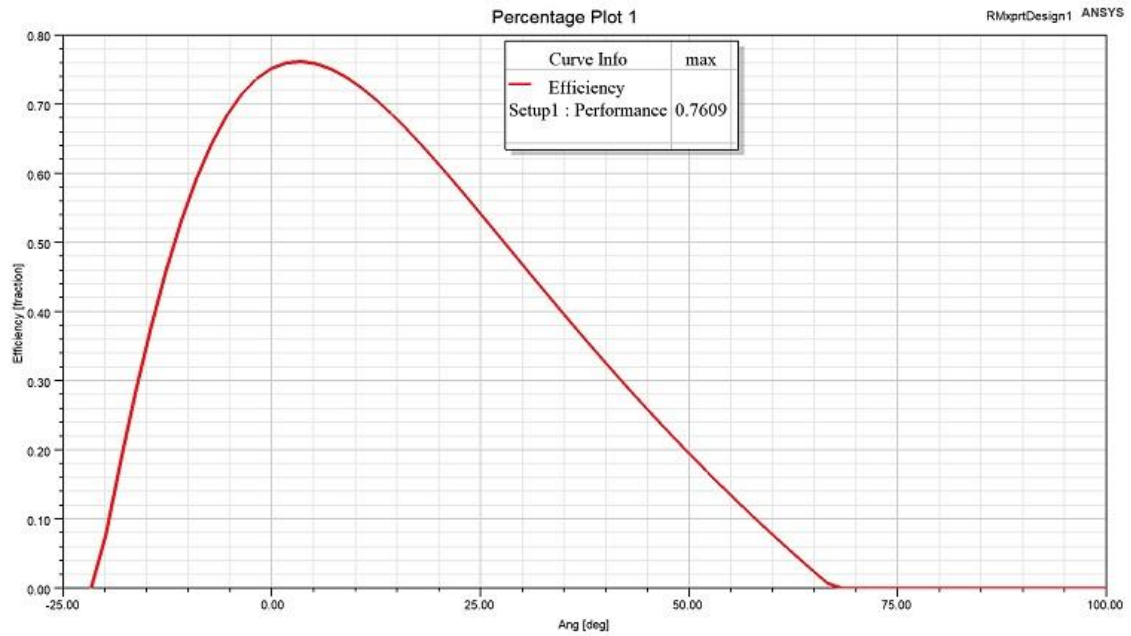
4.2.11. A3B3C1D2E4 kombinasyonuna ait deney sonucu

A3B3C1D2E4 satırı için yapılan deneyin vuruntu momenti grafiği maksimum 19,5452 Nm olarak şekil 4.36’ da gösterilmiştir.



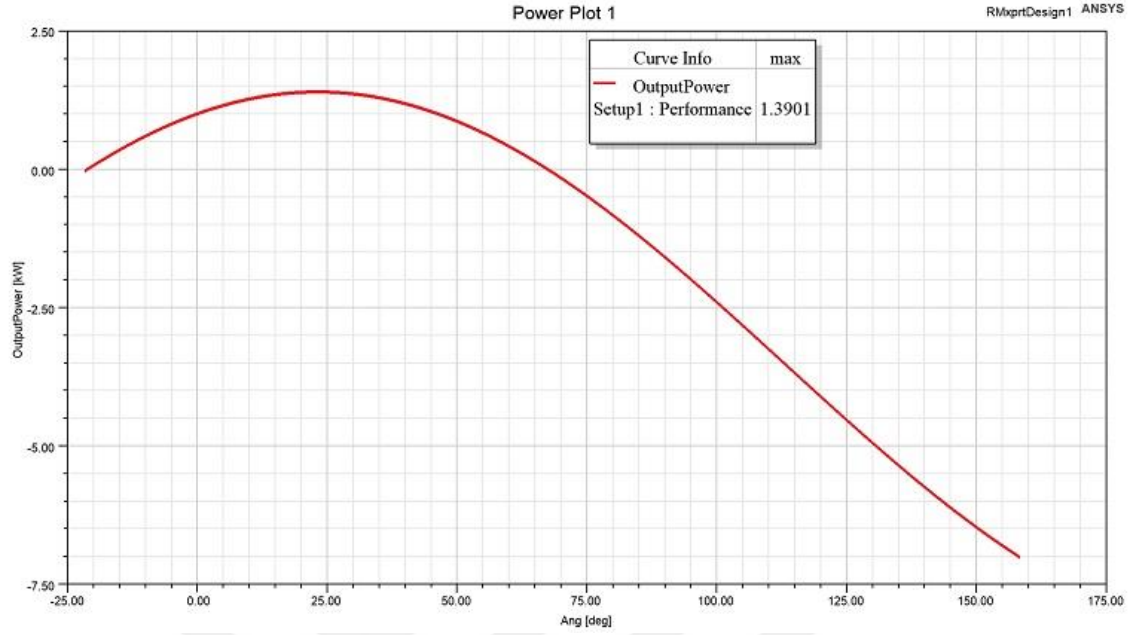
Şekil 4.36. A3B3C1D2E4 kombinasyonu vuruntu momenti grafiği

Şekil 4.37’ de A3B3C1D2E4 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %76,09 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.37. A3B3C1D2E4 kombinasyonu verim grafiği

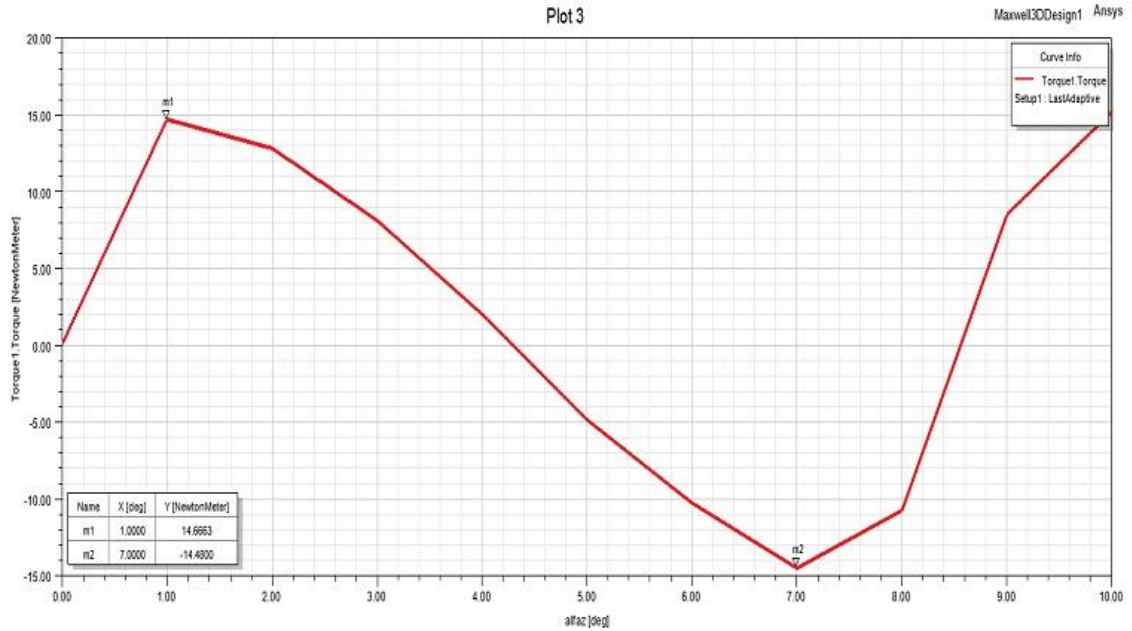
Şekil 4.38’ de A3B3C1D2E4 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1390,10 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.38. A3B3C1D2E4 kombinasyonu güç grafiği

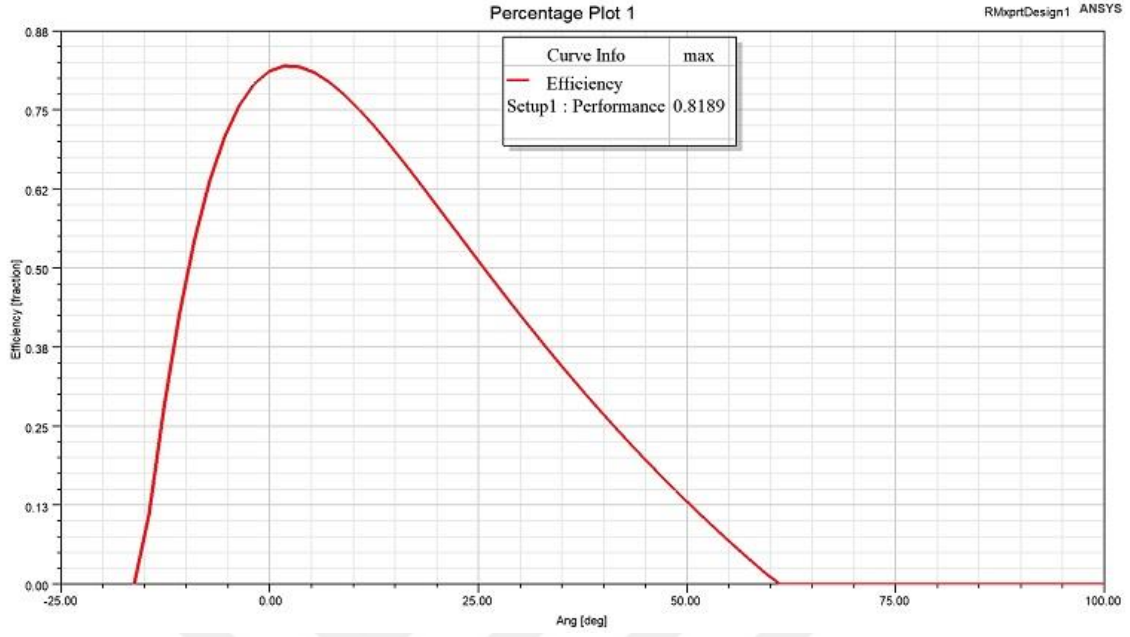
4.2.12. A3B4C2D1E3 kombinasyonuna ait deney sonucu

A3B4C2D1E3 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 14,6663 Nm olarak şekil 4.39’ da gösterilmiştir.



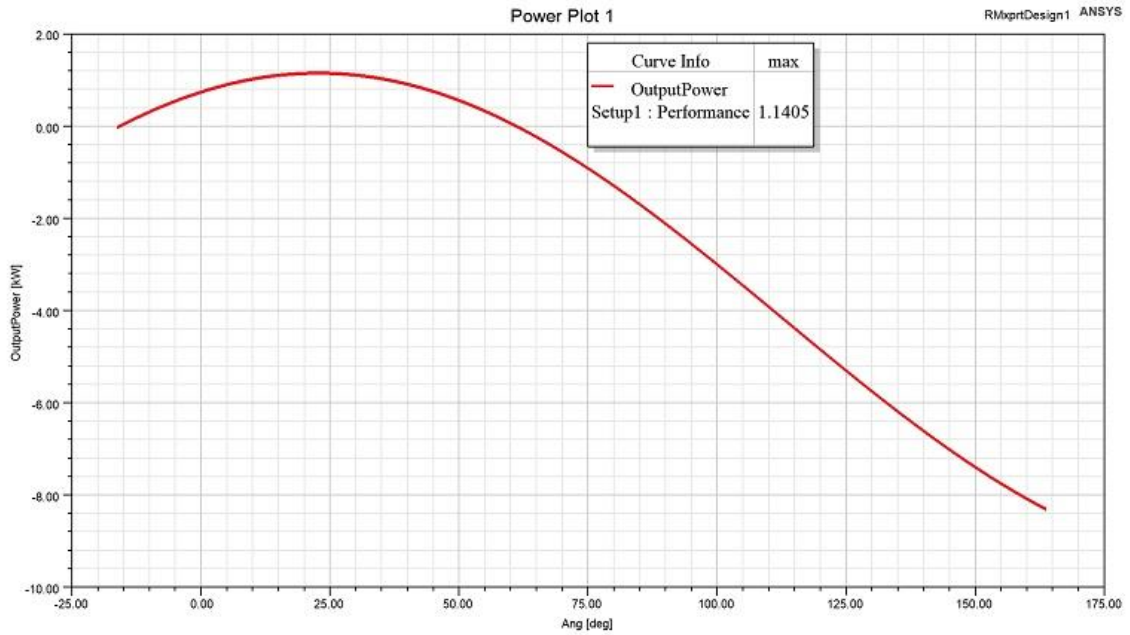
Şekil 4.39. A3B4C2D1E3 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.40' da A3B4C2D1E3 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %81,89 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.40. A3B4C2D1E3 kombinasyonu verim grafiği

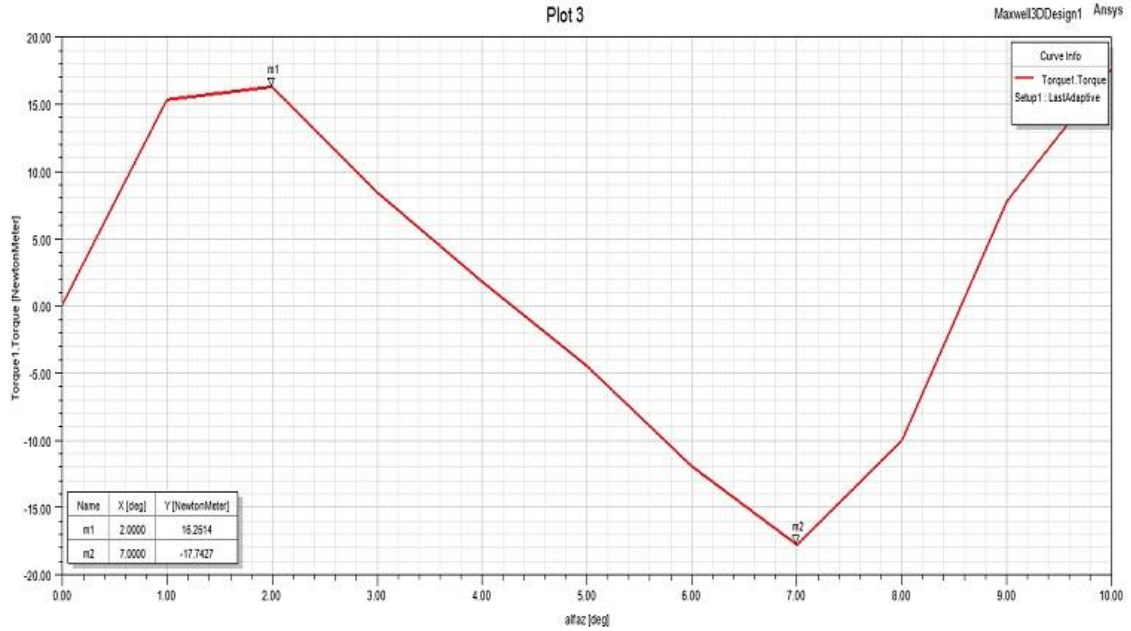
Şekil 4.41' de A3B4C2D1E3 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1140,50 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.41. A3B4C2D1E3 kombinasyonu güç grafiği

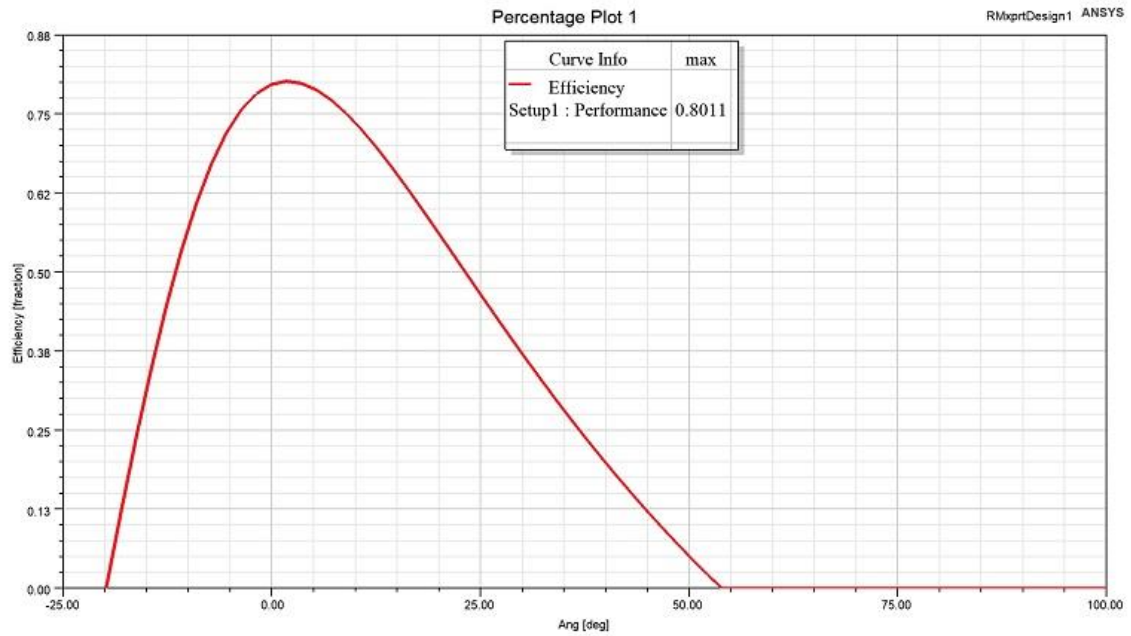
4.2.13. A4B1C4D2E3 kombinasyonuna ait deney sonucu

A4B1C4D2E3 satırı için yapılan deneyin vuruntu momenti grafiği maksimum 16,2514 Nm olarak şekil 4.42’ de gösterilmiştir.



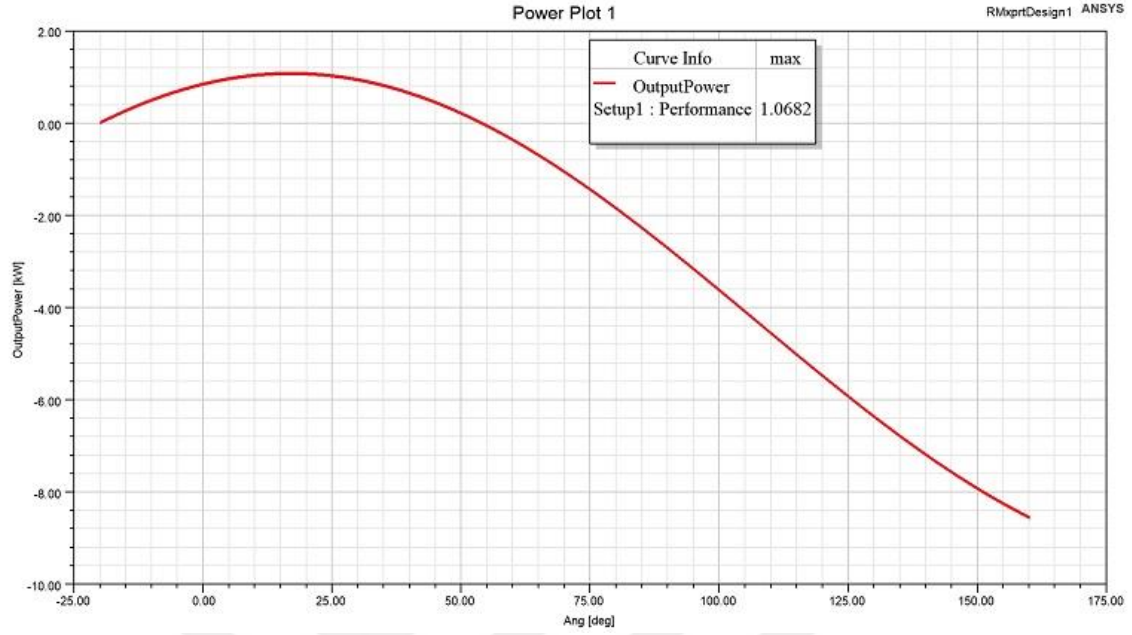
Şekil 4.42. A4B1C4D2E3 kombinasyonu vuruntu momenti grafiği

Şekil 4.43’ de A4B1C4D2E3 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %80,11 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.43. A4B1C4D2E3 kombinasyonu verim grafiği

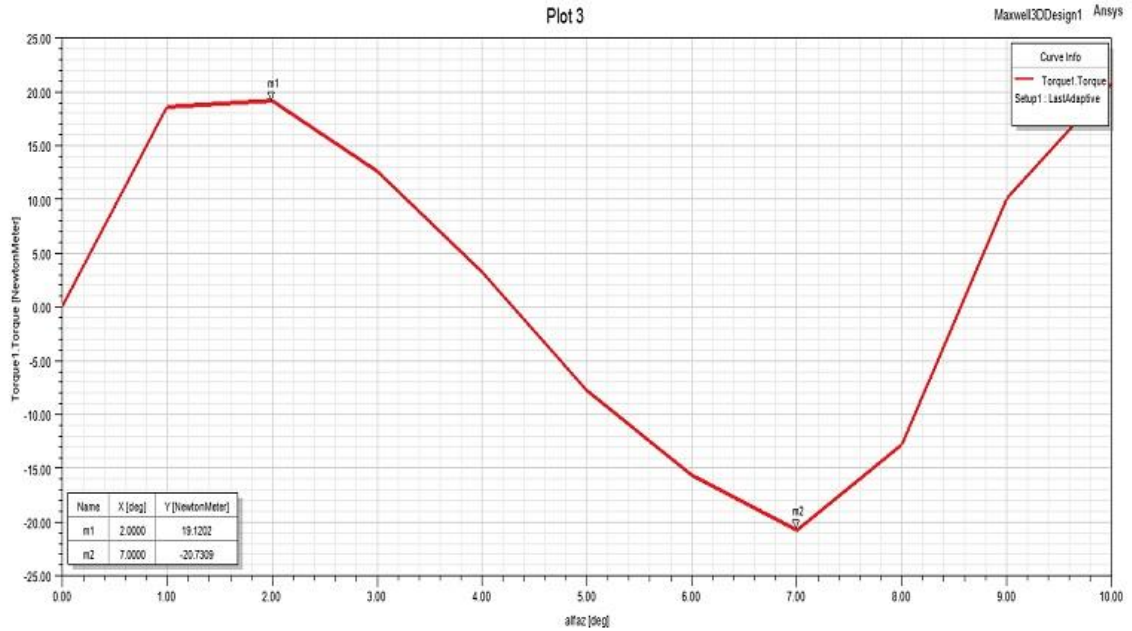
Şekil 4.44’ de A4B1C4D2E3 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1068,20 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.44. A4B1C4D2E3 kombinasyonu güç grafiği

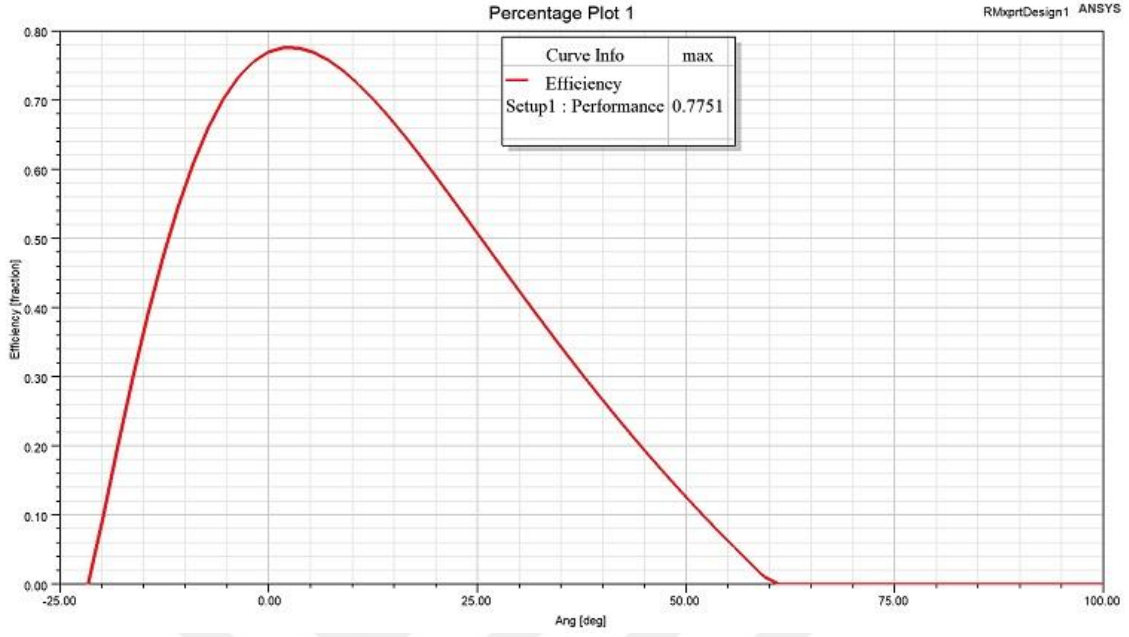
4.2.14. A4B2C3D1E4 kombinasyonuna ait deney sonucu

A4B2C3D1E4 satırı için yapılan deneyin vuruğu momenti grafiği maksimum 19,1202 Nm olarak şekil 4.45’ de gösterilmiştir.



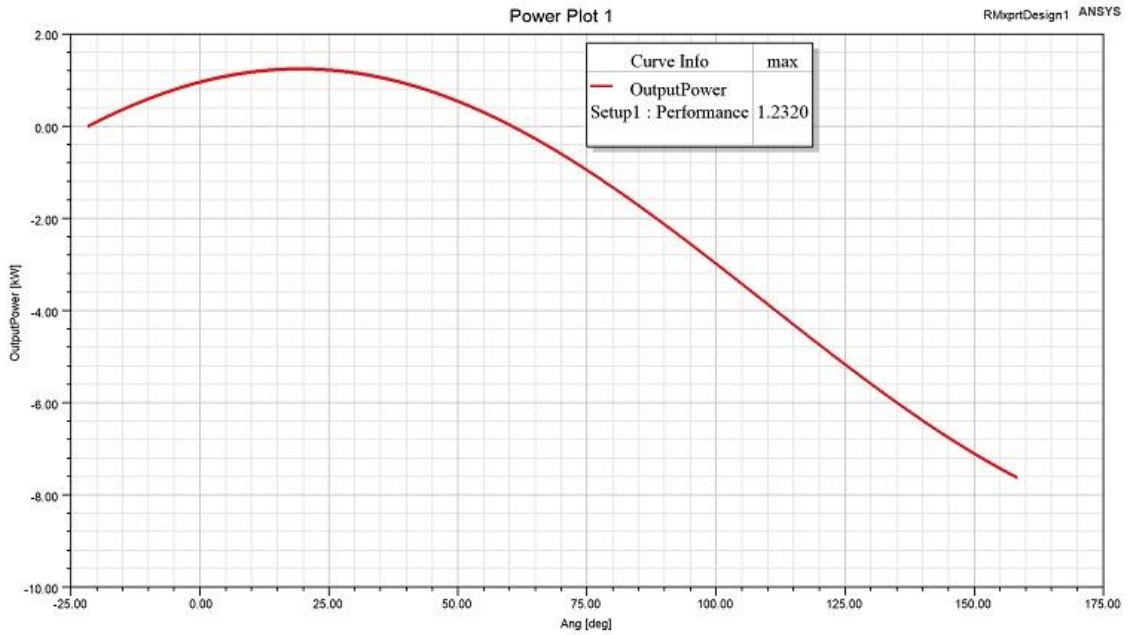
Şekil 4.45. A4B2C3D1E4 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.46' da A4B2C3D1E4 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %77,51 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.46. A4B2C3D1E4 kombinasyonu verim grafiği

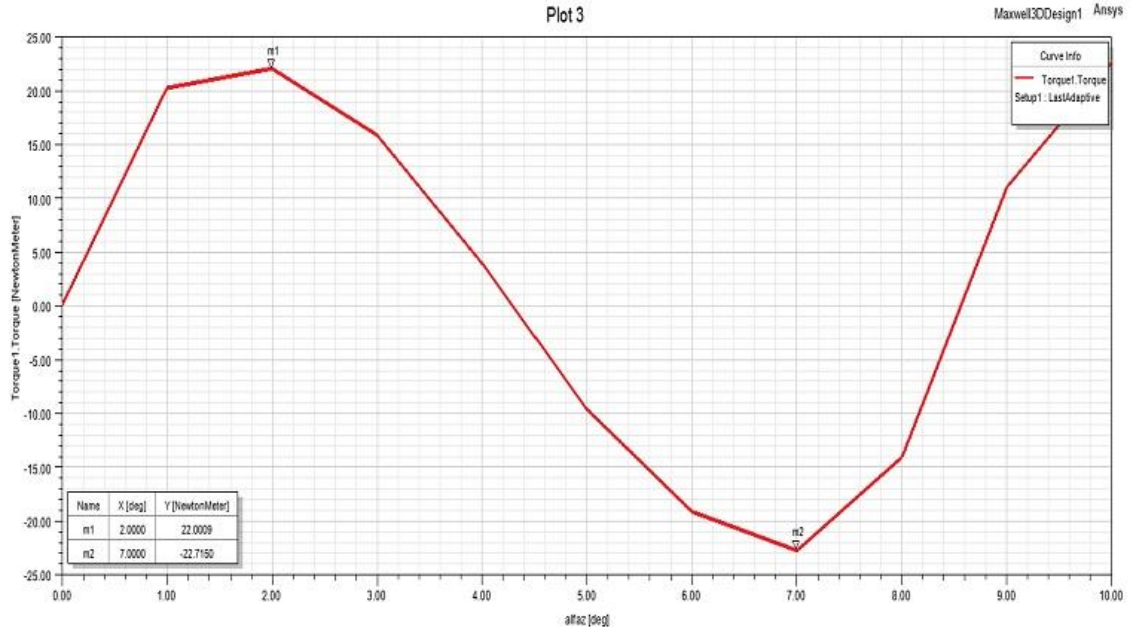
Şekil 4.47' de A4B2C3D1E4 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1232,00 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.47. A4B2C3D1E4 kombinasyonu güç grafiği

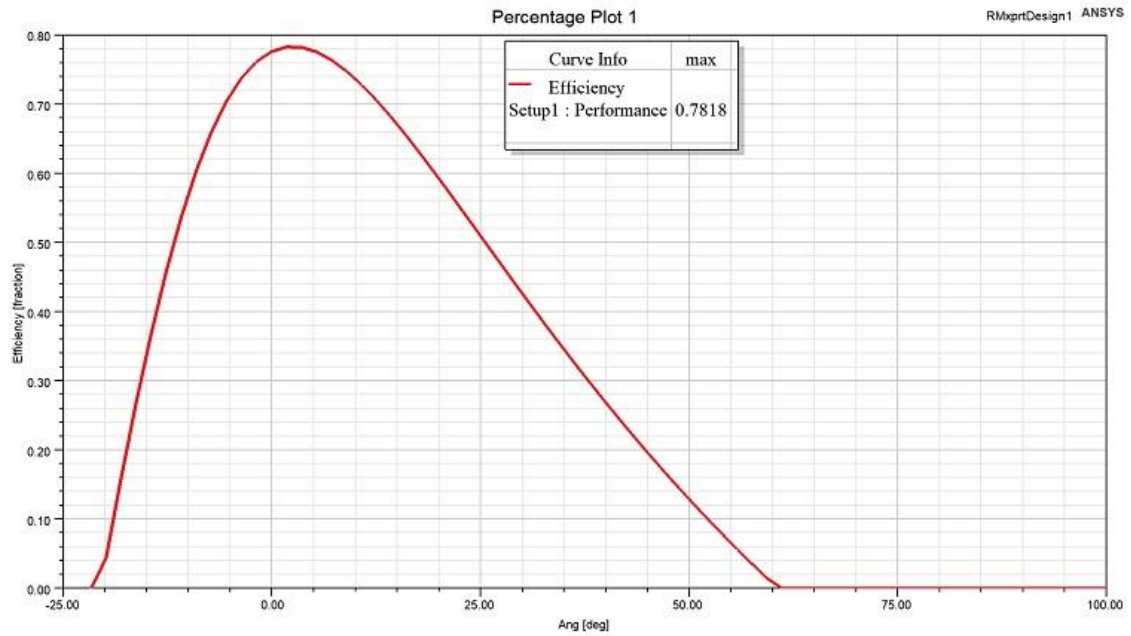
4.2.15. A4B3C2D4E1 kombinasyonuna ait deney sonucu

A4B3C2D4E1 satırı için yapılan deneyin vuruntu momenti grafiği maksimum 22,0009 Nm olarak şekil 4.48’ de gösterilmiştir.



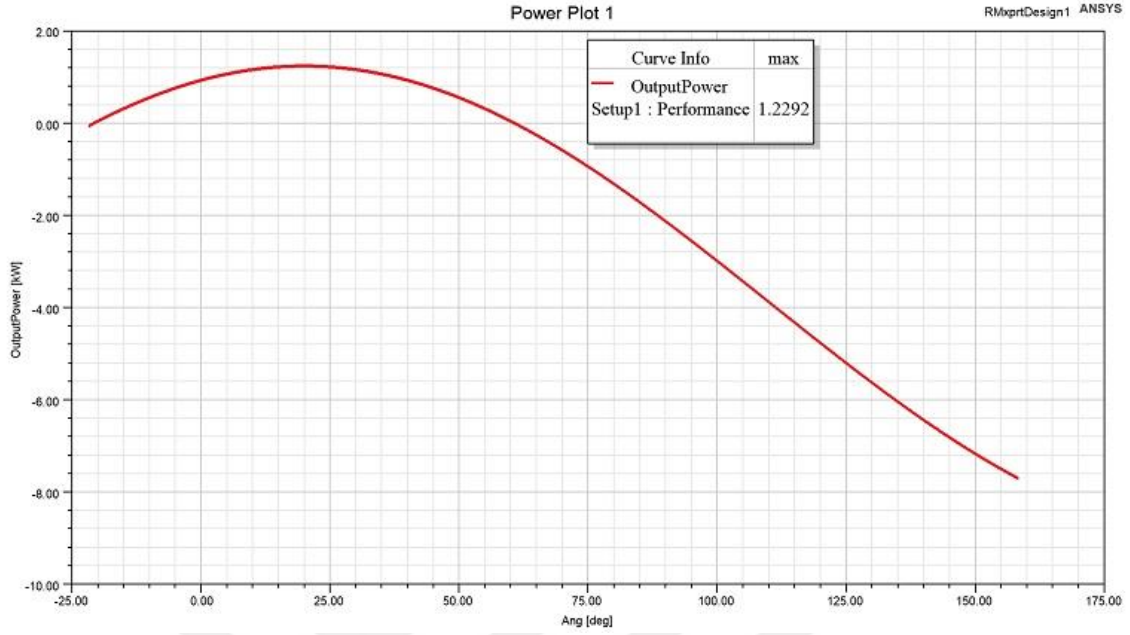
Şekil 4.48. A4B3C2D4E1 kombinasyonu vuruntu momenti grafiği

Şekil 4.49’ da A4B3C2D4E1 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %78,18 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.49. A4B3C2D4E1 kombinasyonu verim grafiği

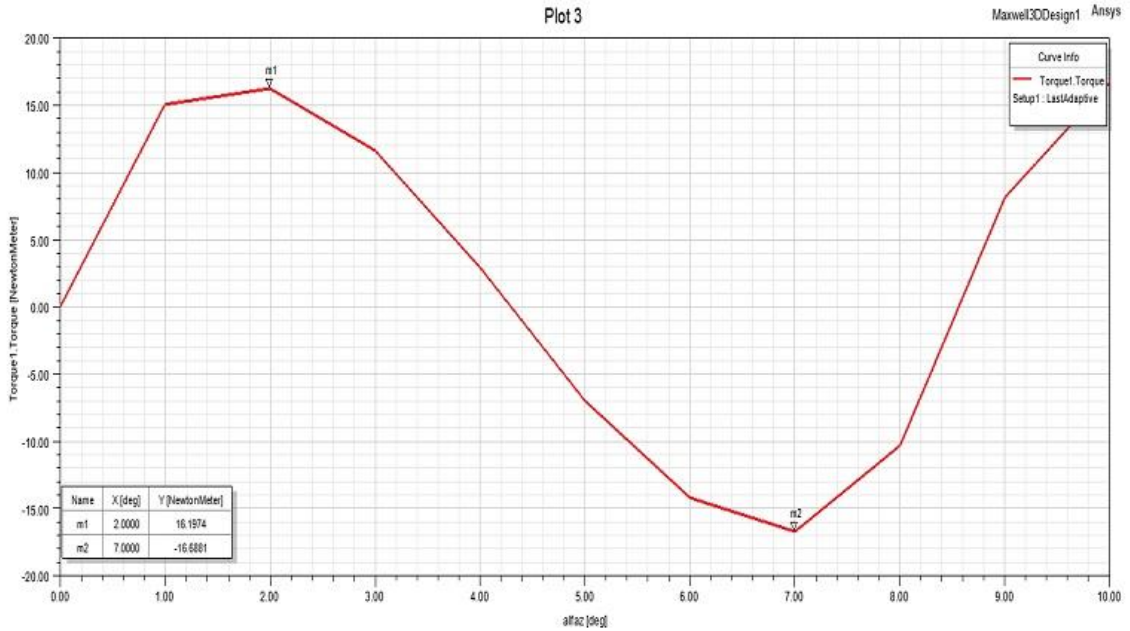
Şekil 4.50’ de A4B3C2D4E1 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1229,20 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.50. A4B3C2D4E1 kombinasyonu güç grafiği

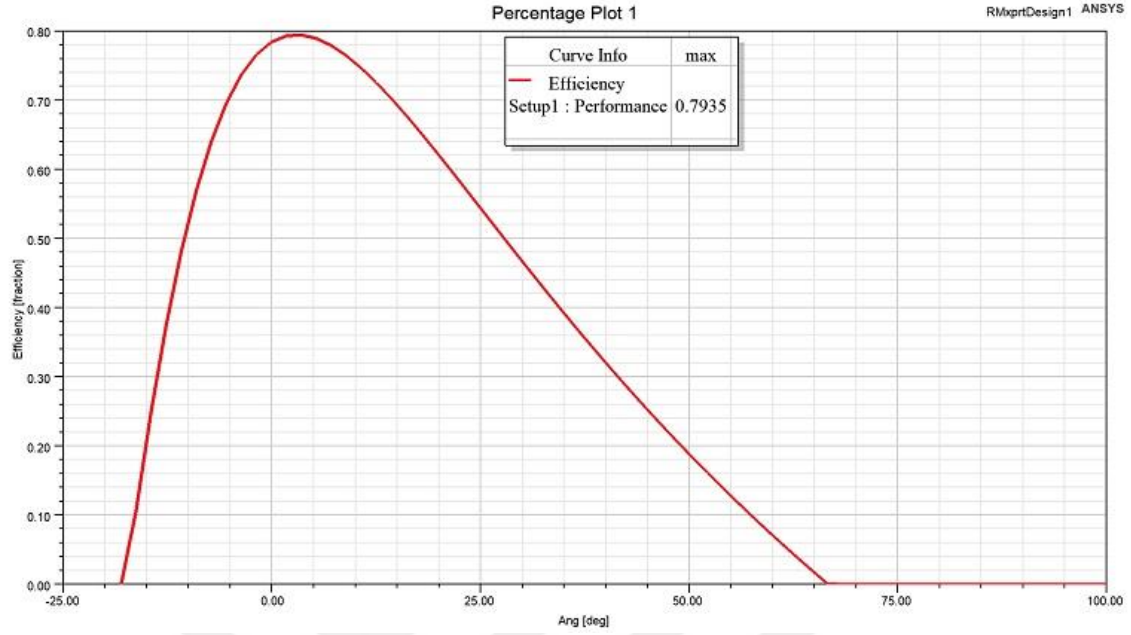
4.2.16. A4B4C1D3E2 kombinasyonuna ait deney sonucu

A4B4C1D3E2 satırı için yapılan deneyin vuru moment grafiği maksimum 16,1974 Nm olarak şekil 4.51’ de gösterilmiştir.



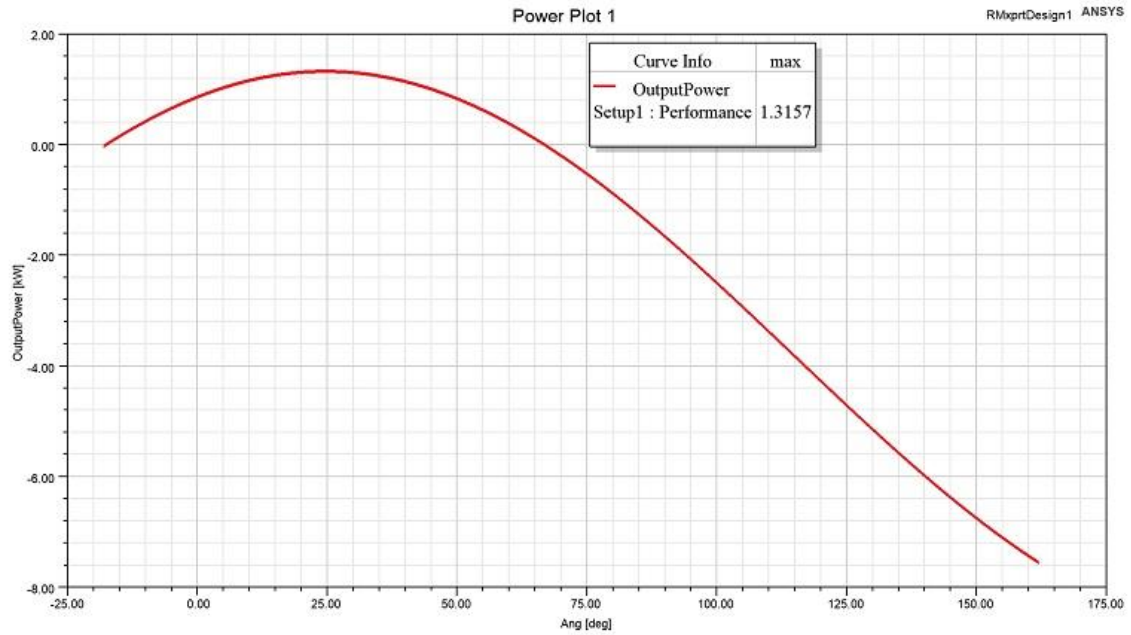
Şekil 4.51. A4B4C1D3E2 kombinasyonu vuru moment grafiği

Şekil 4.52’ de A4B4C1D3E2 satırı için yapılan deneyde motorun verimi %79,35 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.52. A4B4C1D3E2 kombinasyonu verim grafiği

Şekil 4.53’ de A4B4C1D3E2 satırı için yapılan deneyde motorun çıkış gücü maksimum 1315,70 W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.53. A4B4C1D3E2 kombinasyonu güç grafiği

4.2.17. Deney sonuçları ve ANOVA analizi

Deney sonuçlarında elde edilen vuruñtu momenti, verim ve güç değerleri çizelge 4.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Deneylerde elde edilen değerler

Deney No	Parametreler					Sonuçlar		
	A	B	C	D	E			
	HS0 (mm)	HS2 (mm)	BS0 (mm)	BS1 (mm)	BS2 (mm)	Vuruñtu Momenti (Nm)	Verim (%)	Güç (W)
1	1	9	3	6	6	8,1236	81,58	519,30
2	1	11	4	7	7	13,6280	84,02	861,30
3	1	13	5	8	8	20,0221	76,73	1253,70
4	1	15	6	9	9	29,8675	67,25	1582,30
5	1,5	9	4	8	9	23,2938	74,71	1319,10
6	1,5	11	3	9	8	24,8621	74,32	1386,60
7	1,5	13	6	6	7	12,1457	84,07	867,60
8	1,5	15	5	7	6	13,4947	84,72	863,20
9	2	9	5	9	7	22,5722	76,75	1204,40
10	2	11	6	8	6	15,5402	81,38	976,40
11	2	13	3	7	9	19,5452	76,09	1390,10
12	2	15	4	6	8	14,6663	81,89	1140,50
13	2,5	9	6	7	8	16,2514	80,11	1068,20
14	2,5	11	5	6	9	19,1202	77,51	1232,00
15	2,5	13	4	9	6	22,0009	78,18	1229,20
16	2,5	15	3	8	7	16,1974	79,35	1315,70

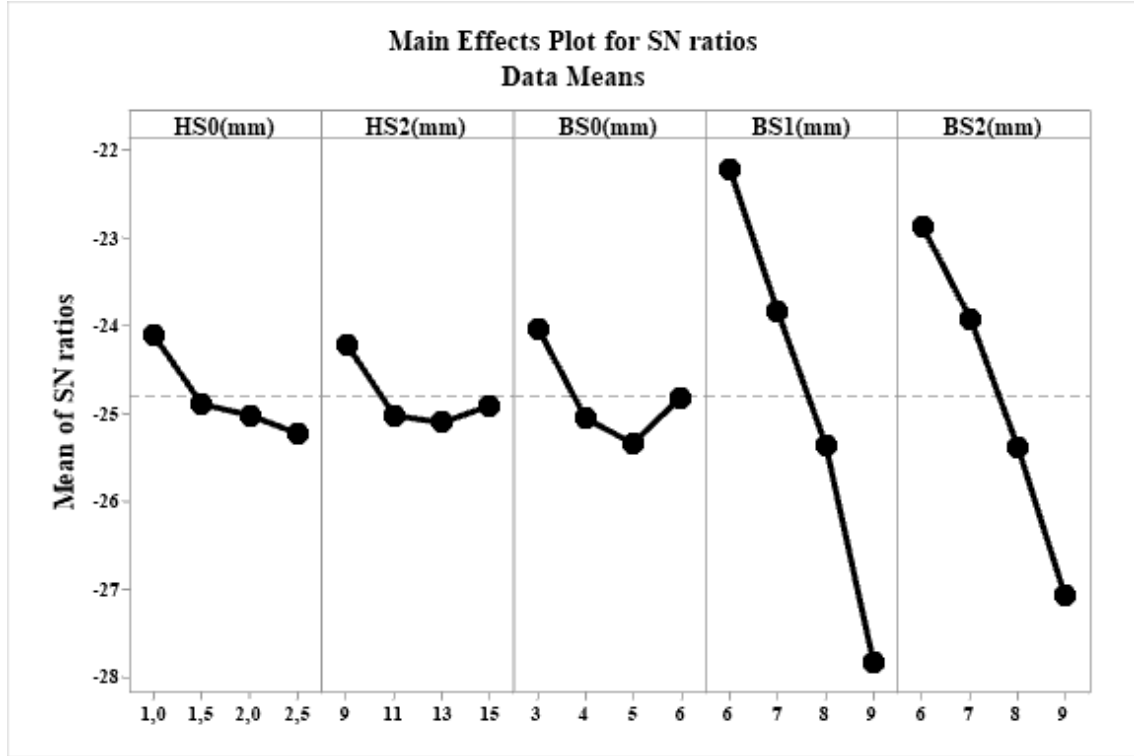
Deneyler sonucu elde edilen vuruñtu momenti, verim ve güç değerleri sırasıyla Minitab programının Taguchi analiz kısmı kullanılarak S/N (sinyal/gürültü) değerleri ve ANOVA analizleri yapılmıştır.

Vuruñtu momenti için her bir parametrenin S/N oranı çizelge 4.5’ de görölmektedir. Çizelge incelendiğinde en büyük etkiye sahip parametrenin BS1 olduğu görölmektedir.

Çizelge 4.5. Vuruñtu momenti için parametrelerin S/N oran değerleri

Level	HS0(mm)	HS2(mm)	BS0(mm)	BS1(mm)	BS2(mm)
1	-24,10	-24,21	-24,03	-22,21	-22,87
2	-24,89	-25,01	-25,05	-23,83	-23,91
3	-25,01	-25,10	-25,33	-25,35	-25,37
4	-25,22	-24,91	-24,81	-27,83	-27,07
Delta	1,12	0,89	1,30	5,62	4,21
Rank	4	5	3	1	2

Vuruntu momenti için parametreler ve faktörler S/N oranı en küçük en iyi etki grafiği şekil 4.54' te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde vuruntu momenti değerine en çok etki eden kombinasyon A1B1C1D1E1 olmuştur.



Şekil 4.54. Vuruntu momenti için faktörlerin S/N oranı etki grafikleri

Çizelge 4.6' da vuruntu momentine etkisi en az olan HS2 parametresi çıkarılarak elde edilen ANOVA (varyans analizi) analiz sonuçları görülmektedir. Bu analize göre vuruntu momenti için BS1 %63,60 ile etkili parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca P değerine de bakarak %95 güven aralığında $P < 0.05$ (%5 önem değeri) etkisi en büyük parametre BS1 olmuştur.

Çizelge 4.6. Vuruntu momenti için ANOVA analizi

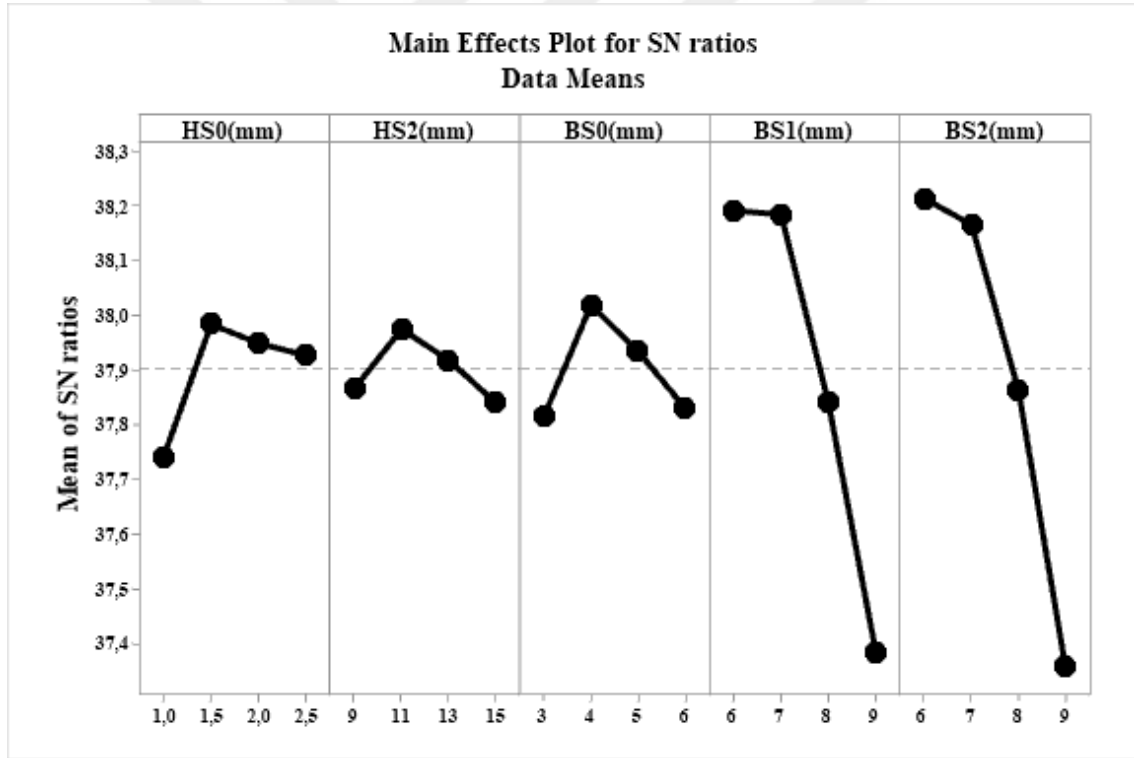
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
HS0(mm)	3	0,788	0,17%	0,788	0,2625	0,3304	0,8063
BS0(mm)	3	6,003	1,32%	6,003	2,0009	2,5181	0,2341
BS1(mm)	3	289,110	63,60%	289,110	96,3700	121,2783	0,0013
BS2(mm)	3	156,315	34,39%	156,315	52,1051	65,5725	0,0031
Error	3	2,384	0,52%	2,384	0,7946		
Total	15	454,600	100,00%				

Verim için her bir parametrenin S/N oranı çizelge 4.7’ de görülmektedir. Çizelge incelendiğinde en büyük etkiye sahip parametrenin BS2 olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7. Verim için parametrelerin S/N oran değerleri

Level	HS0(mm)	HS2(mm)	BS0(mm)	BS1(mm)	BS2(mm)
1	37,74	37,87	37,82	38,19	38,22
2	37,99	37,98	38,02	38,19	38,17
3	37,95	37,92	37,94	37,84	37,86
4	37,93	37,84	37,83	37,38	37,36
Delta	0,24	0,13	0,20	0,81	0,86
Rank	3	5	4	2	1

Verim için parametreler ve faktörler S/N oranı en büyük en iyi etki grafiği şekil 4.55’ te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde verim değerine en çok etki eden kombinasyonlar A2B2C2D1E1 ve A2B2C2D2E1 olmuştur.



Şekil 4.55. Verim için faktörlerin S/N oranı etki grafikleri

Çizelge 4.8’ de verime etkisi en az olan HS2 parametresi çıkarılarak elde edilen ANOVA (varyans analizi) analiz sonuçları gözükmemektedir. Bu analize göre verim için BS2 %48,03 ile etkili parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca P değerine de bakarak %95 güven aralığında $P < 0.05$ (%5 önem değeri) etkisi en büyük parametre BS2 olmuştur.

Çizelge 4.8. Verim için ANOVA analizi

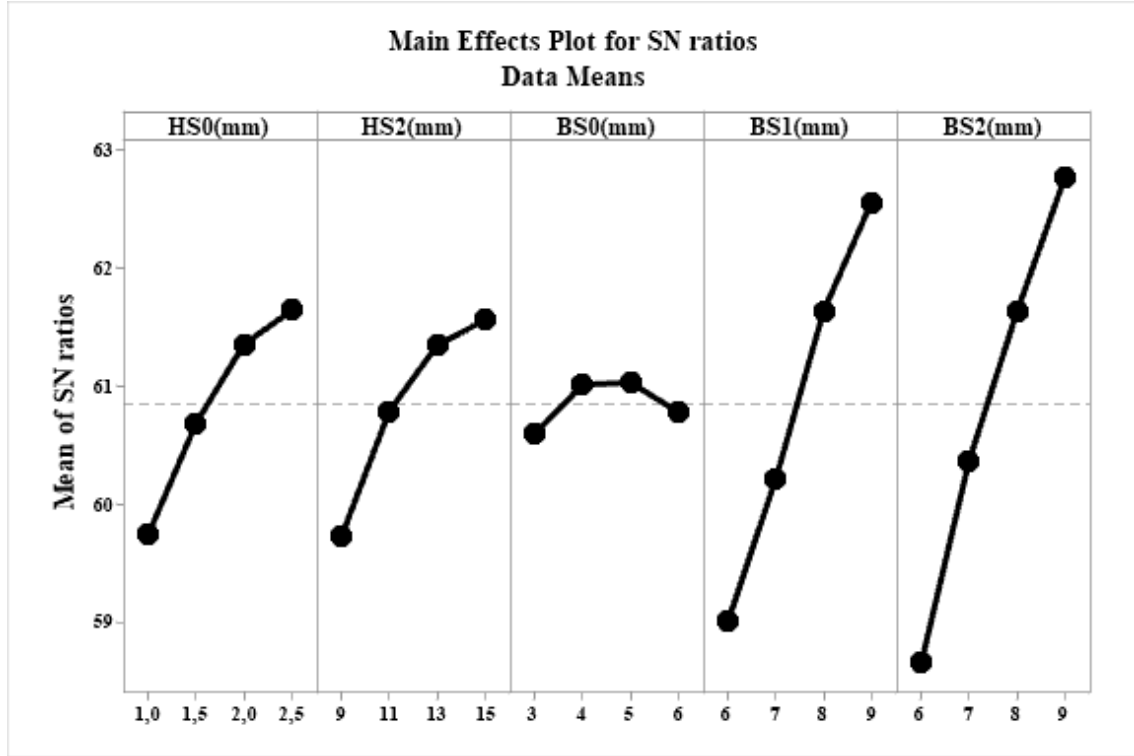
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
HS0(mm)	3	9,534	3,14%	9,534	3,1779	3,4184	0,1698
BS0(mm)	3	8,172	2,69%	8,172	2,7239	2,9301	0,2004
BS1(mm)	3	137,404	45,23%	137,404	45,8013	49,2686	0,0047
BS2(mm)	3	145,916	48,03%	145,916	48,6386	52,3206	0,0043
Error	3	2,789	0,92%	2,789	0,9296		
Total	15	303,814	100,00%				

Güç için her bir parametrenin S/N oranı çizelge 4.9’ da gözükmemektedir. Çizelge incelendiğinde en büyük etkiye sahip parametrenin BS2 olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.9. Güç için parametrelerin S/N oran değerleri

Level	HS0(mm)	HS2(mm)	BS0(mm)	BS1(mm)	BS2(mm)
1	59,74	59,73	60,60	59,01	58,65
2	60,68	60,79	61,01	60,21	60,37
3	61,35	61,35	61,03	61,64	61,63
4	61,64	61,56	60,78	62,56	62,77
Delta	1,90	1,83	0,43	3,55	4,11
Rank	3	4	5	2	1

Güç için parametreler ve faktörler S/N oranı en büyük en iyi etki grafiği şekil 4.56' da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde güç değerine en çok etki eden kombinasyonlar A4B4C3D4E4 ve A4B4C2D4E4 olmuştur.



Şekil 4.56. Güç için faktörlerin S/N oranı etki grafikleri

Çizelge 4.10' da güce etkisi en az olan BS0 parametresi çıkarılarak elde edilen ANOVA (varyans analizi) analiz sonuçları gözükmemektedir. Bu analize göre güç için BS2 %48,37 ile etkili parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca P değerine de bakarak %95 güven aralığında $P < 0.05$ (%5 önem değeri) etkisi en büyük parametre BS2 olmuştur.

Çizelge 4.10. Güç için ANOVA analizi

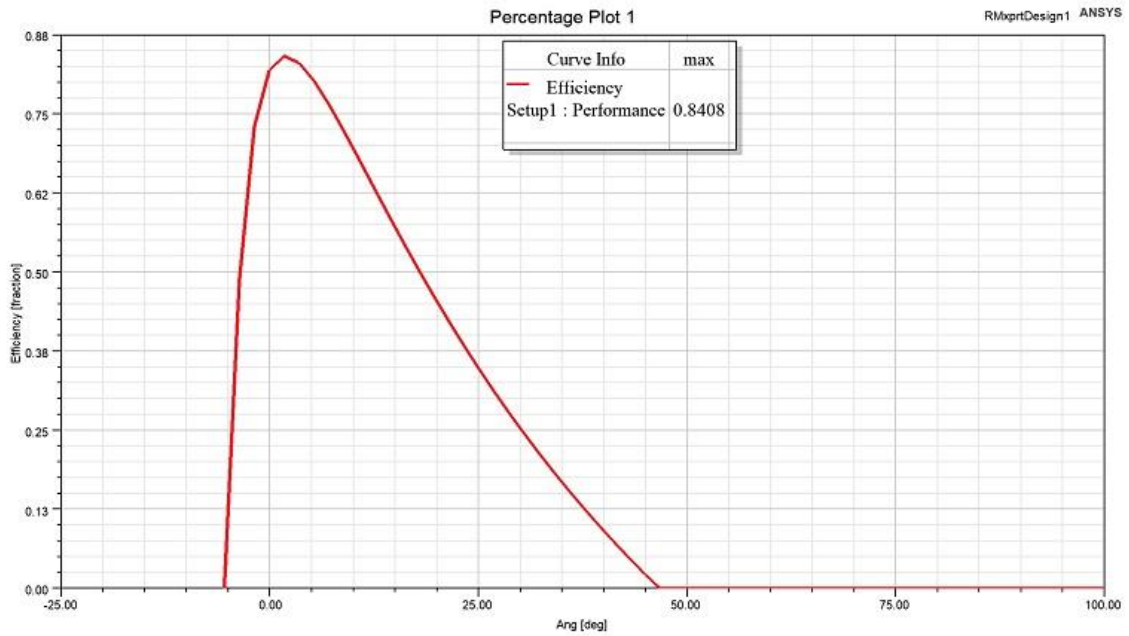
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
HS0(mm)	3	59287	5,59%	59287	19762	34,4944	0,0080
HS2(mm)	3	90375	8,52%	90375	30125	52,5817	0,0043
BS1(mm)	3	396445	37,36%	396445	132148	230,6588	0,0005
BS2(mm)	3	513233	48,37%	513233	171078	298,6084	0,0003
Error	3	1719	0,16%	1719	573		
Total	15	1061059	100,00%				

4.3. Optimizasyonu Yapılan EASM Motorun Analizi

Yapılan analizler sonucunda referans motorun en iyi vuruuntu momenti kombinasyon değeri A1B1C1D1E1, en iyi verim kombinasyon değeri A2B2C2D2E1 ve en iyi güç kombinasyon değeri A4B4C2D4E4 olarak bulunmuştur. En iyi vuruuntu momenti kombinasyonu için daha önce deney yapıldığı için tekrar analizi yapılmamıştır.

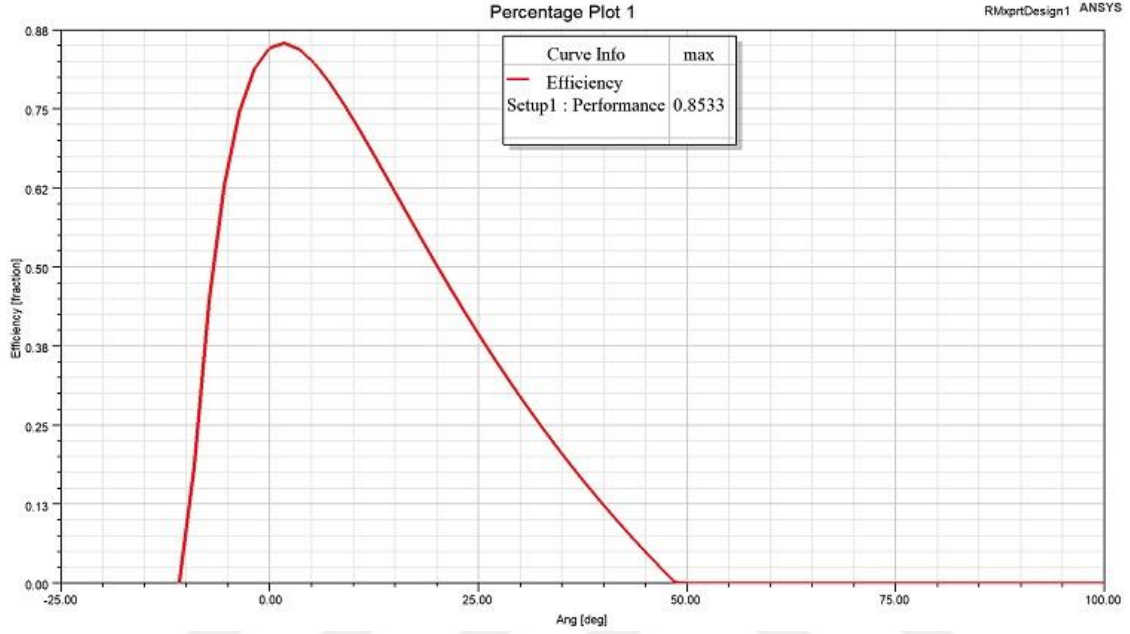
4.3.1. A2B2C2D2E1 en iyi verim kombinasyonu için analiz

Motorun verimi için iki tane en iyi performans kriteri belirlenmiş bunlardan birincisi olan A2B2C2D1E1 kombinasyonu ile yapılan analiz sonucu şekil 4.57’ de bulunan grafikte verim %84,08 olarak elde edilmiştir.



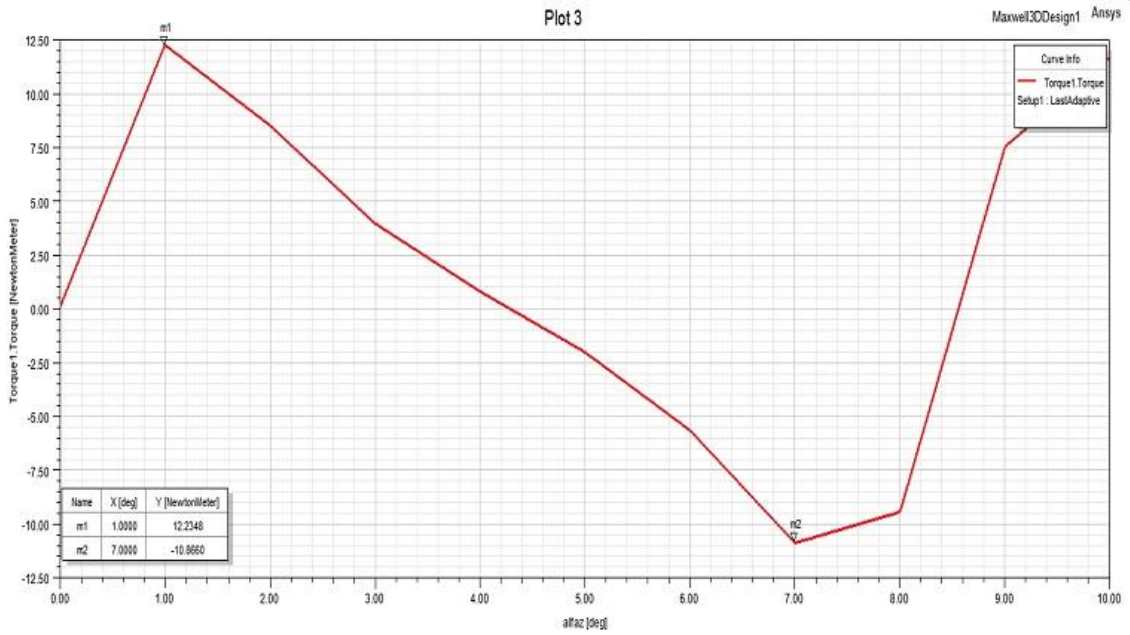
Şekil 4.57. A2B2C2D1E1 kombinasyonu verim grafiği

Verim için ikinci en iyi performans kriteri olan A2B2C2D2E1 kombinasyonu analiz sonucu şekil 4.58’ de bulunan grafikte verim %85,33 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en iyi verim değerine sahip A2B2C2D2E1 kombinasyonu seçilmiştir. Bu kombinasyon için stator oluk parametre değerleri HS0=1,5mm, HS2=11mm, BS0=4mm, BS1=7mm ve BS2=6mm olarak bulunmuştur.



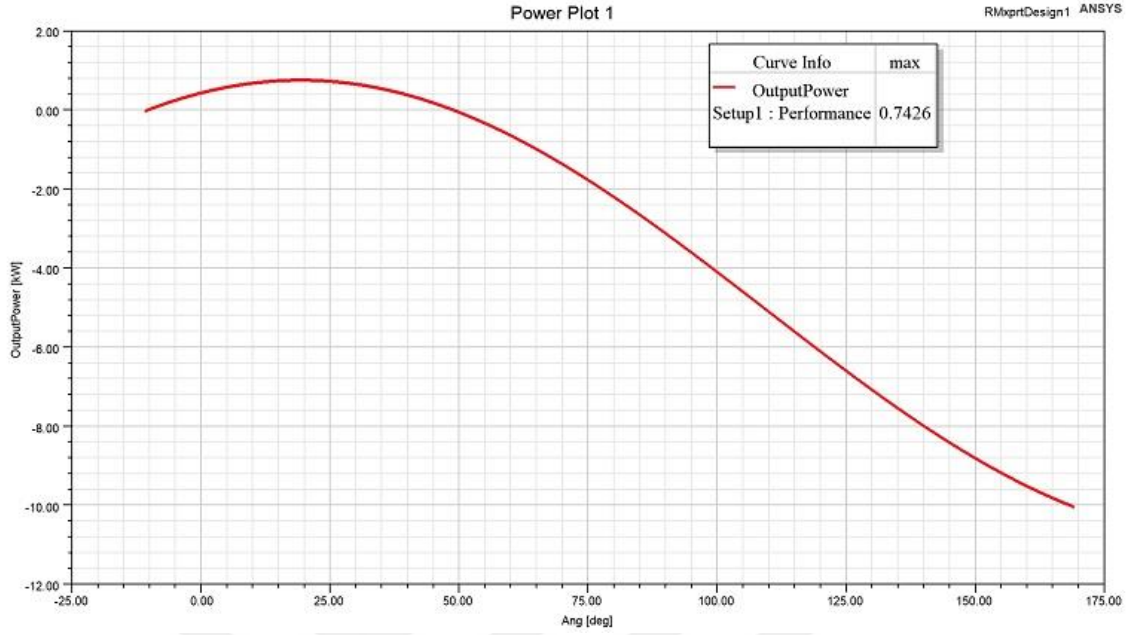
Şekil 4.58. A2B2C2D2E1 kombinasyonu verim grafiği

Şekil 4.59’ da A2B2C2D2E1 kombinasyonuna ait analiz sonucu elde edilen vuruğu momenti değeri maksimum 12,2348Nm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.59. A2B2C2D2E1 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

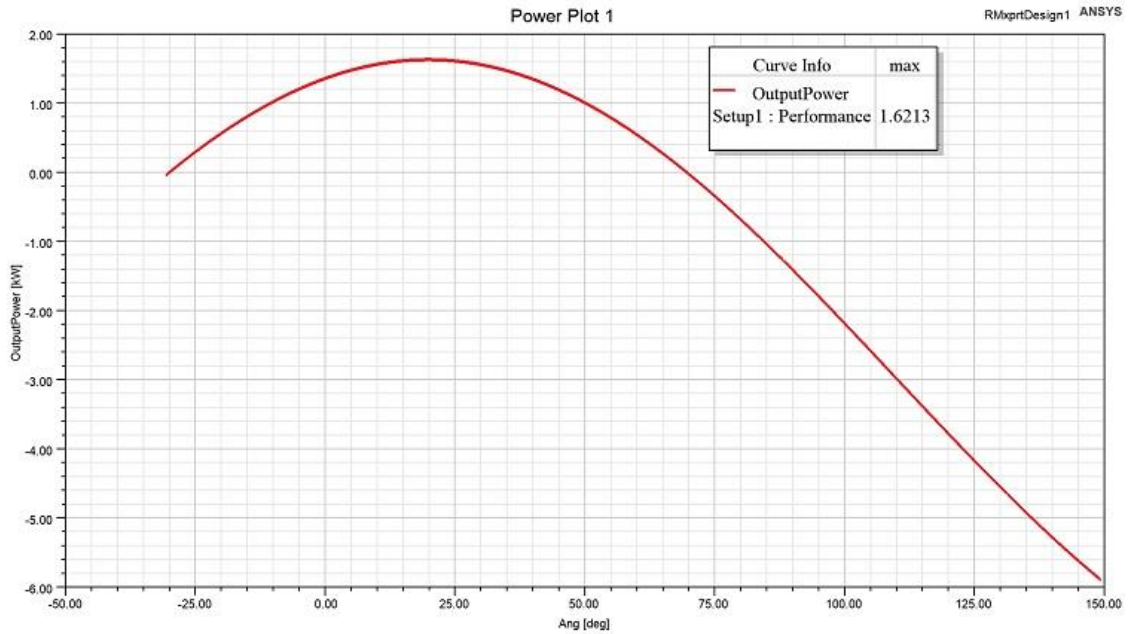
Şekil 4.60’ da A2B2C2D2E1 kombinasyonuna ait analiz sonucu elde edilen güç değeri 742,6W olarak bulunmuştur.



Şekil 4.60. A2B2C2D2E1 kombinasyonu güç grafiği

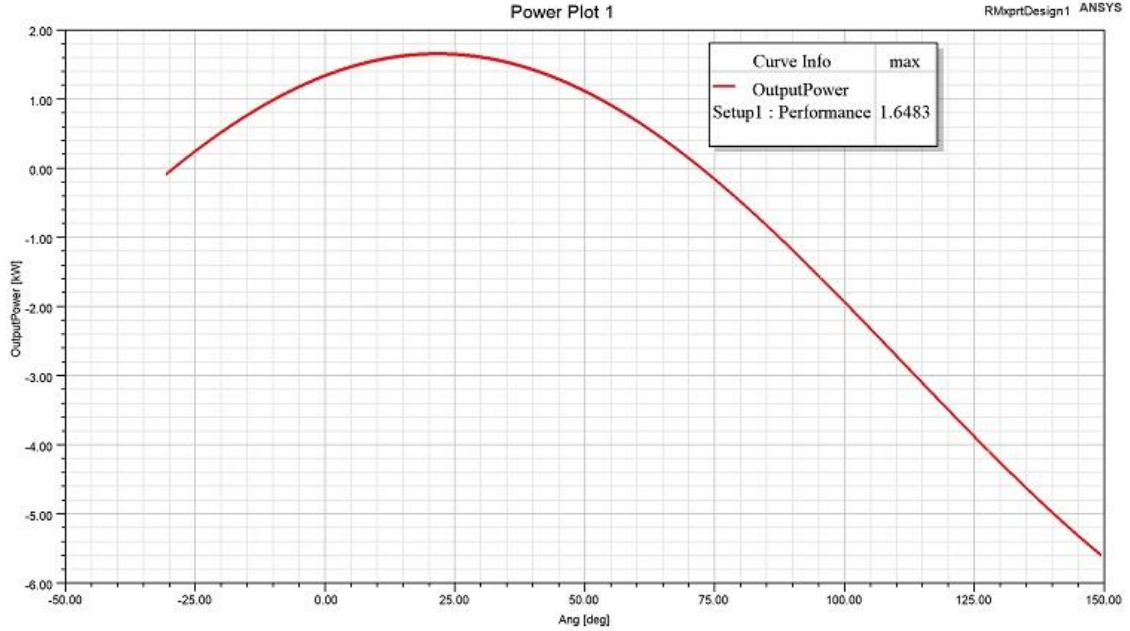
4.3.2. A4B4C2D4E4 en iyi güç kombinasyonu için analiz

Motorun gücü için iki tane en iyi performans kriteri belirlenmiş bunlardan birincisi olan A4B4C3D4E4 kombinasyonu ile yapılan analiz sonucun şekil 4.61’ de bulunan grafikte güç 1621,30W olarak elde edilmiştir.



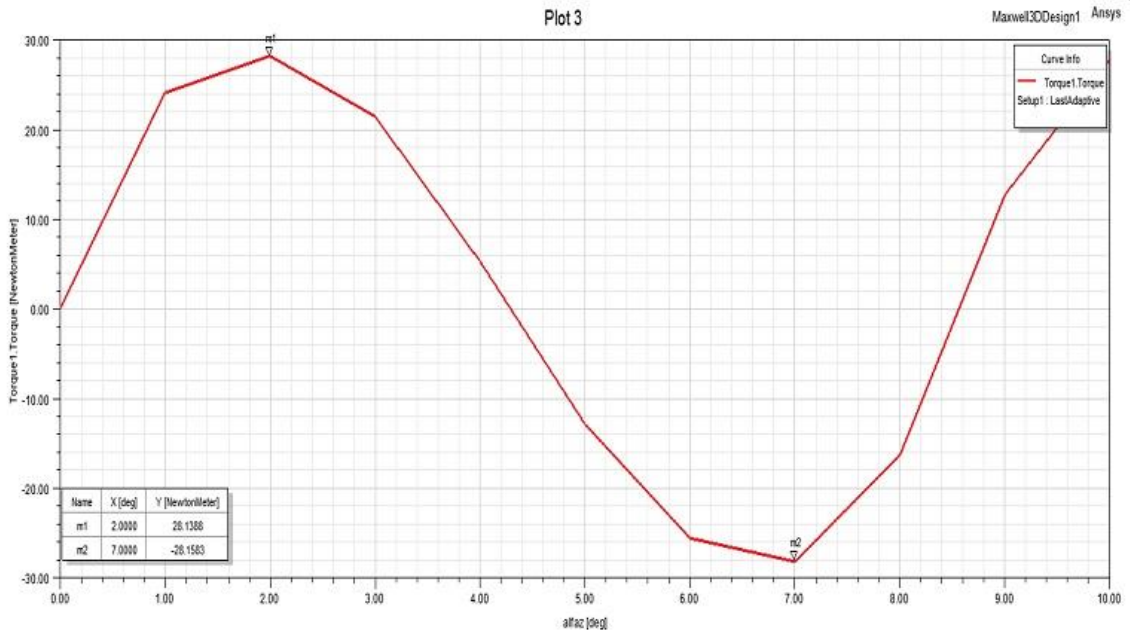
Şekil 4.61. A4B4C3D4E4 kombinasyonu güç grafiği

Güç için ikinci en iyi performans kriteri olan A4B4C2D4E4 kombinasyonu analiz sonucu şekil 4.62’ de bulunan grafikte güç 1648,30W olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en iyi güç değerine sahip A4B4C2D4E4 kombinasyonu seçilmiştir. Bu kombinasyon için stator oluk parametre değerleri HS0=2,5mm, HS2=15mm, BS0=4mm, BS1=9mm ve BS2=9mm olarak bulunmuştur.



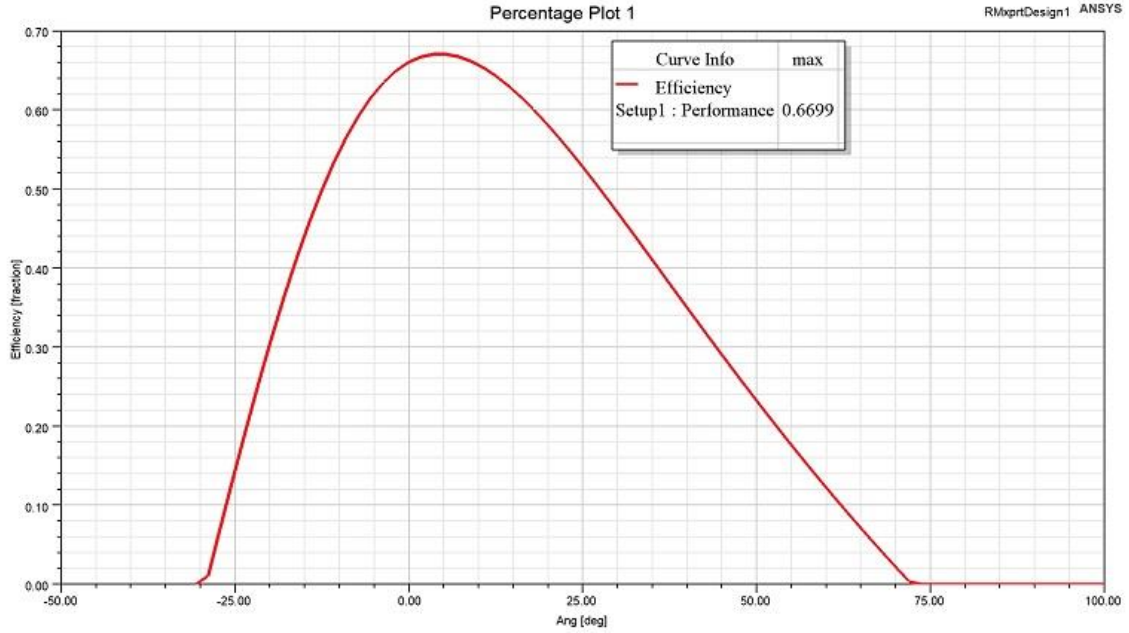
Şekil 4.62. A4B4C2D4E4 kombinasyonu güç grafiği

Şekil 4.63’ de A4B4C2D4E4 kombinasyonuna ait analiz sonucu elde edilen vuruğu momenti değeri maksimum 28,1388Nm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.63. A4B4C2D4E4 kombinasyonu vuruğu momenti grafiği

Şekil 4.64’ de A4B4C2D4E4 kombinasyonuna ait analiz sonucu elde edilen verim değeri %66,99 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.64. A4B4C2D4E4 kombinasyonu verim grafiği

4.4. Referans Motorla Optimizasyonu Yapılan Motorun Karşılaştırılması

Yapılan çalışmalar sonucunda eksenel akıllı sabit mıknatıslı referans motorla, optimizasyonu yapılan motor vuruğu momenti, verim ve güç yönünden karşılaştırılması çizelge 4.11’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Referans motorla optimizasyonu yapılan motorun karşılaştırılması

	Parametreler					Sonuçlar		
	A	B	C	D	E	Vuruğu Moment (Nm)	Verim (%)	Güç (W)
	HS0 (mm)	HS2 (mm)	BS0 (mm)	BS1 (mm)	BS2 (mm)			
Referans Motor	1,5	13	3	8	8	18,9389	78,35	1279,10
En İyi Vuruğu Momenti Değeri	1	9	3	6	6	8,1286	81,58	519,30
En İyi Verim Değeri	1,5	11	4	7	6	12,2348	85,33	742,60
En İyi Güç Değeri	2,5	15	4	9	9	28,1388	66,99	1648,30
Fark						10,8103	6,98	369,20
Değişim						%57,07	%8,90	%28,86

Referans motorun vuruuntu momentini düşürmek için analizler sonucu belirlenen A1B1C1D1E1 (HS0=1mm, HS2=9mm, BS0=3mm, BS1=6mm, BS2=6mm) kombinasyonu için elde edilen değer 18,9389Nm' den 8,1286Nm' ye düşmüştür. Böylece vuruuntu momentinde %57,07 oranında iyileştirme sağlanmıştır.

Referans motorun verimini yükseltmek için analizler sonucu belirlenen A2B2C2D2E1 (HS0=1,5mm, HS2=11mm, BS0=4mm, BS1=7mm, BS2=6mm) kombinasyonu için elde edilen değer %78,35' dan %85,33' e yükselmiştir. Böylece verimde %8,90 oranında iyileştirme sağlanmıştır.

Referans motorun gücünü yükseltmek için analizler sonucu belirlenen A4B4C2D4E4 (HS0=2,5mm, HS2=15mm, BS0=4mm, BS1=9mm ve BS2=9mm) kombinasyonu için elde edilen değer 1279,10W' tan 1648,30W' a yükselmiştir. Böylece güçte %28,86 oranında iyileştirme sağlanmıştır.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında son zamanlarda kullanım alanı genişleyen eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) motor çeşitlerinden biri olan tek statorlu tek rotorlu referans bir motorun Ansys Maxwell programını kullanarak tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan bu motorun stator oluk parametreleri değiştirilerek vuruuntu momenti, verim ve güç analizleriyle en optimum sonuçlara ulaşmak için Taguchi yöntemi kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bu deney sonuçları Minitab programıyla analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Vuruuntu momentinin düşürülmesi için etkisi en büyük olan stator oluk parametrelerinden biri %63,60 oranıyla BS1 (üst oluk genişliği) diğeri ise %34,39 oranıyla BS2 (alt oluk genişliği) olmuştur. Bu iki parametrenin ölçülerinin arttırılması vuruuntu moment değerini yükseltmiştir. Bu sebepten dolayı vuruuntu momentinin düşürülmesi isteniyorsa BS1 ve BS2 değerlerinin düşük olması gerektiği görülmüştür.

Verimin yükseltilmesi için etkisi en büyük olan stator oluk parametrelerinden biri %48,03 oranıyla BS2 (alt oluk genişliği) diğeri ise %45,23 oranıyla BS1 (üst oluk genişliği) olmuştur. Bu iki parametrenin ölçülerinin arttırılması verim değerini azaltmıştır. Bu sebepten dolayı verimin yükseltilmesi isteniyorsa BS1 ve BS2 değerlerinin düşük olması gerektiği görülmüştür.

Gücün yükseltilmesi için etkisi en büyük olan stator oluk parametrelerinden biri %48,37 oranıyla BS2 (alt oluk genişliği) diğeri ise %37,36 oranıyla BS1 (üst oluk genişliği) olmuştur. Bu iki parametrenin ölçülerinin arttırılması güç değerini arttırmıştır. Bu sebepten dolayı gücün yükseltilmesi isteniyorsa BS1 ve BS2 değerlerinin büyük olması gerektiği görülmüştür.

Referans motorun optimizasyonundan önce stator bakır ağırlığı 0,9453kg, stator saç ağırlığı 2,8055kg ve motorun toplam ağırlığı 7,3328kg olarak bulunmuştur. En iyi vuruuntu momenti değeriinde ise stator bakır ağırlığı 1,0025kg, stator saç ağırlığı 3,7316kg ve motorun toplam ağırlığı 8,3161kg olarak değışmiştir. En iyi verim değeriinde ise stator bakır ağırlığı 0,9863kg, stator saç ağırlığı 3,4211kg ve motorun toplam ağırlığı 7,9895kg olarak değışmiştir. En iyi güç değeriinde ise stator bakır ağırlığı 0,9193kg, stator saç ağırlığı 2,1876kg ve motorun toplam ağırlığı 6,6889kg olarak değıştiğı görölmüştür.

Optimizasyon sonucunda EASM motorun farklı kombinasyon deneylerinde elde edilen en iyi vuruuntu momenti değeri %57,07 oranında azalmış, en iyi verim değeri %8,90 oranında ve en iyi güç değeri %28,86 oranında artmıştır. Eğer bu üç parametrenin aynı anda değışmesi isteniyorsa 16. deneyde yapılan sonuçlara bakıldığında EASM motorun vuruuntu momentinde %14,47 oranında azalma, veriminde %1,27 oranında ve gücünde %2,86 oranında artış olmuştur.

KAYNAKLAR

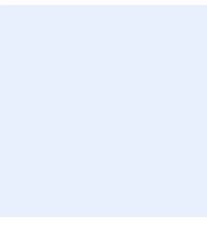
- Ahmad, G., & Amin, U.** (2017). Design, construction and study of small scale vertical axis wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator. *Renewable energy*, 101, 286-292.
- Ayçiçek, E.** (2012). *Vuruntu momenti azaltılmış eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı (doktora tezi)*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, M.** (1994). *Taguchi metodu ve bir uygulama (yüksek lisans tezi)*. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, M.** (2007). Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu. 12. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı*, (s. 14-18.).
- Aydın, M., Huang, S., & Lipo, T. A.** (2004). Axial flux permanent magnet disc machines: A review. *A review. In Conf. Record of SPEEDAM*, (s. Vol. 8, pp. 61-71).
- Benlamine, R., Dubas, F., Randi, S., Lhotellier, D., & Espanet, C.** (2013). Design by optimization of an axial-flux permanent-magnet synchronous motor using genetic algorithms. *In 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 13-17). IEEE.
- Bouaziz, O., Jaafar, I., & Ammar, F. B.** (2018). Performance analysis of radial and axial flux PMSM based on 3D FEM modeling. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(3), 1587-1598.
- Cetin, E., & Daldaban, F.** (2017). Analyzing distinctive rotor poles of the axial flux PM motors by using 3D-FEA in view of the magnetic equivalent circuit. *Engineering science and technology, an international journal*, 20(5), 1421-1429.
- Davila-Vilchis, J., & Mishra, R.** (2014). Performance of a hydrokinetic energy system using an axial-flux permanent magnet generator. *Energy*, 65, 631-638.
- Geyik, A.** (2018). *Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi)*. Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.
- Girgin, M.** (2020). *Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlarda vuruntu momentinin harmonik akım ekleme yöntemi ile azaltılması (yüksek lisans tezi)*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Gökçe, B., & Taşgetiren, S.** (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.

- Gör, H.** (2014). *Eksenel akıllı jeneratörlerin tasarımı ve uygulaması (doktora tezi)*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., & Chen, Y.** (2022). A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. *Machines*, 10(12), 1178.
- Hüner, E.** (2017). *Tübitak araştırma projesi geliştirme raporu, Proje No:115E964, Rapor No:1*.
- Hüner, E.** (2020). Optimization of axial flux permanent magnet generator by Taguchi experimental method. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 68(3).
- Hwang, C., Li, P., Chuang, F., Liu, C., & Huang, K.** (2009). Optimization for reduction of torque ripple in an axial flux permanent magnet machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1760-1763.
- Kacker, R., Lagergren, E., & Filliben, J.** (1991). Taguchi's orthogonal arrays are classical designs of experiments. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 96(5), 577.
- Kalender, O., Ege, Y., Eskidere, Ö., Karen, I., Gürdal, O., Ünal, C., Kabadayı, M.** (2015). A new axial flux permanent magnet synchronous alternator autonomously adapted to wind speeds. *Measurement*, 69, 87-94.
- Kurt, Ü., & Önbilgin, G.** (2009). Design and optimization of axial flux permanent magnet synchronous machines using Taguchi approach. In *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009 (pp. I-202)*. IEEE.
- Laxminarayan, S., Singh, M., Saifee, A., & Mittal, A.** (2017). Design, modeling and simulation of variable speed axial flux permanent magnet wind generator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 114-124.
- Mahmoudi, A., Abd Rahim, N., & Ping, H.** (2012). Axial-flux permanent-magnet motor design for electric vehicle direct drive using sizing equation and finite element analysis. *Progress In Electromagnetics Research*, 122, 467-496.
- Mahmoudi, A., Rahim, N., & Hew, W.** (2011). Axial-flux permanent-magnet machine modeling, design, simulation, and analysis. *Scientific Research and Essays*, 6(12), 2525-2549.
- Ouldhamrane, H., Charpentier, J., Khoucha, F., Zaoui, A., Achour, Y., & Benbouzid, M.** (2022). Development and experimental validation of a fast and accurate field calculation tool for axial flux permanent magnet machines. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 552, 169105.
- Parviainen, A.** (2005). Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines.
- Pirzad, S., Ghadimi, A., Abolmasoumi, A., Jabbari, A., & Bagheri, S.** (2021). Optimal mixed control of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous generator wind turbines with modular stator structure. *ISA transactions*, 115, 153-162.

- Polat, M., & Akıncı, R.** (2020). Elektrikli Araçlar İçin Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 345-358.
- Premaratne, P., Kadhim, I., Abdullah, M., Halloran, B., & Vial, P.** (2022). A survey on low speed low power axial flux generator design and optimization using simulation. *Neurocomputing*, 509, 272-289.
- Seadati, S., & Niasar, A.** (2018). Optimal design and finite element analysis of a high speed, axial-flux permanent magnet synchronous motor. In *2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 133-138). IEEE.
- Tak, B., & Ro, J.** (2020). Analysis and design of an axial flux permanent magnet motor for in-wheel system using a novel analytical method combined with a numerical method. *IEEE Access*, 8, 203994-204011.
- Talay, T., & Erkan, K.** (2019). Axial flux permanent magnet motor design and optimisation by using artificial neural networks.
- Tarek, M., & Sozer, Y.** (2019). Design of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. In *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 3004-3009). IEEE.
- Taylan, D.** (2009). *Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması (Yüksek Lisans Tezi)*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Turhan, E.** (2014). *Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment İyileştirmesi (Yüksek Lisans Tezi)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wirtayasa, K., & Hsiao, C.** (2022). Performances comparison of axial-flux permanent-magnet generators for small-scale vertical-axis wind turbine. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1201-1215.
- Wu, S., Xu, H., Zhang, T., Gu, Q., & Wang, B.** (2022). Multi-Objective Optimization of an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor with Arc-Shaped Magnets. *Applied Sciences*, 12(22), 11641.
- Yang, Y., Lee, C., & Hung, P.** (2014). Multi-objective optimal design of an axial-flux permanent-magnet wheel motor for electric scooters. *IET Electric Power Applications*, 8(1), 1-12.
- Yıldırım, E.** (2014). *Yel Enerjisinden Elektrik Enerjisine Dönüşüm İçin Yeni Bir Generatör Dizgesi Yapısı (Doktora Tezi)*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Zhang, Y., Gao, W., Meng, Q., Wu, Z., Zhou, Q., Du, G., & Cao, H.** (2022). Magnetic-coupling characteristics analysis of a dual redundancy axial flux permanent magnet synchronous motor. *Energy Reports*, 8, 151-159.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı		
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Doktora	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Program Adı	

Makale ve Bildiriler