

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ SENKRON GENERATÖRLERDE**  
**HARMONİK BOZULMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

**OKTAY KARAKAYA**  
**DOKTORA TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2023**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ SENKRON  
GENERATÖRLERDE HARMONİK  
BOZULMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

**OKTAY KARAKAYA**  
**DOKTORA TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU**

**II. DANIŞMANI**  
**PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI**

**GEBZE**  
**2023**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**IMPROVEMENT OF HARMONIC  
DISTORTION IN GRID INDEPENDENT  
SYNCHRONOUS GENERATORS**

**OKTAY KARAKAYA**

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR  
PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU**

**II. THESIS SUPERVISOR  
PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI**

**GEBZE**

**2023**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/06/2023 tarih ve 2023/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/07/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Oktay KARAKAYA'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Prof. Dr. Bora ALBOYACI

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

**İMZA/MÜHÜR**

## ÖZET

Güç elektroniği devreleriyle kontrol edilen yükler, günümüz elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yükler, sinüzoidal olmayan dalga formuna, diğer bir deyişle harmonik bozulmaya sahip akımlar çektikleri için kendilerini besleyen senkron generatörlerin (SG'lerin) terminal gerilimlerinde harmonik bozulmaya yol açarlar. Pasif, aktif veya hibrit harmonik filtreler terminal gerilimindeki harmonik bozulmayı azaltmak için kullanılır. Filtrenin türüne bağlı olarak, rezonans problemleri veya maliyette artışla karşılaşılabilir. Literatürdeki bazı çalışmalar, SG'nin terminal gerilimindeki harmonik bozulmayı (THD<sub>v</sub>) iyileştirmek için uyartım akımının modülasyonu yöntemini önermiştir. Ancak bu çalışmalar, uyartım akımı modülasyon yönteminin yüklenme koşulları altında performansını analiz etmemiştir. Ayrıca yöntemin uygulanması için herhangi bir pratik araç geliştirmemiştir. Bu tez çalışmasında, ilk olarak, modüle edilmiş uyartım akımının doğrusal olmayan yüklenme altında SG'nin terminal gerilimi harmonik bozulmasına etkisini incelemek için, Maxwell yazılım ortamında sonlu elemanlar yöntemi temelli parametrik analizler yapılmıştır. İkinci olarak, elde edilen simülasyon sonuçları kullanılarak, doğrusal olmayan yüklenme koşulları altında SG'nin terminal gerilimi harmonik bileşenleri ile modüle edilmiş uyartım akımı arasındaki ilişkiyi ifade etmek için yapay sinir ağı (YSA)'na dayalı bir model geliştirilmiştir. Son olarak, Ansys Maxwell, Simplorer ve Matlab/Simulink entegrasyonu ile oluşturulan test sisteminde geliştirilen YSA modeli kullanılarak THD<sub>v</sub>'yi en aza indirmek için optimal uyartım akımı modülasyonu yöntemi uygulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Senkron Generatör, Uyartım Akımı, Yapay Sinir Ağları, Sonlu Elemanlar Analizi, Harmonik Eliminasyon, Harmonik Kompanzasyon.

## SUMMARY

Loads controlled by power electronic circuits are widely used in today's Electric power systems. Since these kinds of loads draw non-sinusoidal or harmonically distorted currents, they cause harmonically distorted terminal voltages on synchronous generators (SGs) supplying them. Passive, active or hybrid harmonic filters can be used to reduce the harmonic distortion in their terminal voltage. Depending on the type of filter, resonance problems or increased costs may be encountered. Some studies in the literature have suggested the modulation of the excitation current method to improve the harmonic distortion (THD<sub>v</sub>) in the terminal voltage on SGs. However, in these studies, the performance of the excitation current modulation method is not analyzed under loading conditions. Moreover, they do not develop a practical tool for the implementation of the method. In this thesis, firstly, to examine the effect of modulated excitation current on the SG's terminal voltage harmonic distortion under non-linear loading, the parametric analysis based on the finite element method is performed in Maxwell software environment. Secondly, using the obtained simulation results, a model based on artificial neural network (ANN) is developed to express the relation between the terminal voltage harmonic components on the SG and the modulated excitation current for the nonlinear loading conditions. Finally, in the test system created with the integration of Ansys Maxwell, Simpler and Matlab/Simulink, the optimal excitation current modulation method is implemented to minimize THD<sub>v</sub> by using the developed ANN model.

**Key Words:** Synchronous Generator, Excitation Current, Artificial Neural Networks, Finite Elements Analysis, Harmonic Elimination, Harmonic Compensation.

## TEŞEKKÜR

Başta, doktora eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU'na ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Murat Erhan BALCI'ya,

Önerileriyle katkı sunan tez izleme jürisindeki değerli hocalarım Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI ve Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ'a ve manevi desteklerinden dolayı sevgili eşime ve kızıma teşekkürlerimi sunarım.



# İÇİNDEKİLER

|                                                                                         | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                                    | v                   |
| SUMMARY                                                                                 | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                                | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                             | viii                |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ                                                          | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                                         | xii                 |
| TABLolar DİZİNİ                                                                         | xv                  |
| <br>                                                                                    |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                                | 1                   |
| 1.1. Literatür Taraması                                                                 | 8                   |
| 1.2. Arka Plan                                                                          | 11                  |
| 1.3. Tezin Amacı                                                                        | 12                  |
| 1.4. Tezin Sınırları                                                                    | 13                  |
| 1.5. Tezin İçeriği                                                                      | 13                  |
| 2. SENKRON GENERATÖRLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜK ALTINDA<br>HARMONİK DAVRANIŞININ ANALİZİ | 15                  |
| 2.1. Üç Fazlı Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Modellenmesi                            | 15                  |
| 2.1.1. Rmxprt’de Senkron Generatörün Modellenmesi                                       | 16                  |
| 2.1.2. Maxwel 2d’de Senkron Generatörün Modellenmesi                                    | 21                  |
| 2.2. Senkron Generatörün D.A. Uyarımı Altında Davranışı                                 | 23                  |
| 2.3. Senkron Generatörün Modüle Edilmiş Alan Akımı Altındaki Davranışı                  | 24                  |
| 2.4. Sonuç ve Değerlendirme                                                             | 39                  |
| 3. YSA TEMELLİ THD <sub>v</sub> TAHMİN MODELİ                                           | 41                  |
| 3.1. Yapay Sinir Ağları                                                                 | 41                  |
| 3.2. THD <sub>v</sub> Tahmin Modeli İçin YSA Eğitimi                                    | 45                  |
| 3.3. Önerilen YSA Ağ Mimarisi                                                           | 58                  |
| 3.4. Sonuç ve Değerlendirme                                                             | 61                  |
| 4. YSA TEMELLİ BİREYSEL HARMONİK TAHMİNİ                                                | 63                  |
| 4.1. Bireysel Harmonik Genlik Tahmini İçin YSA Eğitimi                                  | 63                  |
| 4.2. Bireysel Harmonik Faz Açısı Tahmini İçin YSA Eğitimi                               | 67                  |

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| 4.3. Sonuç ve Değerlendirme        | 71     |
| 5. ÖNERİLEN MODELLERİN UYGULANMASI | 73     |
| 5.1. Test Sistemi                  | 73     |
| 5.2. Analizler                     | 75     |
| 5.3. Sonuç ve Değerlendirme        | 77     |
| 6. SONUÇ                           | 78     |
| <br>KAYNAKLAR                      | <br>80 |
| ÖZGEÇMİŞ                           | 88     |
| EKLER                              | 89     |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler ve</u></b> | <b><u>Açıklamalar</u></b>                                                |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b><u>Kısaltmalar</u></b> |                                                                          |
| $\alpha_h$                | : h. harmonik bileşenin faz açısı.                                       |
| a.a.                      | : Alternatif akım.                                                       |
| BFG                       | : BFGS Quasi-Newton geri yayılım algoritması.                            |
| BFGS                      | : Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno.                                      |
| CGB                       | : Powell-Beale eşlenik gradyan geri yayılım algoritması.                 |
| CGF                       | : Fletcher-Powell eşlenik gradyan geri yayılım algoritması.              |
| CGP                       | : Polak-Ribiere eşlenik gradyan geri yayılım algoritması.                |
| ÇKSG                      | : Çıkık kutuplu senkron generatör.                                       |
| d.a.                      | : Doğru akım.                                                            |
| $f_1$                     | : Şebeke frekansı.                                                       |
| $f_h$                     | : h. harmonik bileşenin frekansı.                                        |
| GD                        | : Gradyan iniş geri yayılım algoritması.                                 |
| GDA                       | : Adaptif öğrenme oranı ile gradyan iniş geri yayılım algoritması.       |
| GDM                       | : Momentumlu gradyan iniş geri yayılım algoritması.                      |
| GDX                       | : Adaptif öğrenme oranı ile momentumlu gradyan geri yayılım algoritması. |
| $I_1$                     | : Akımın temel bileşeni.                                                 |
| $I_{fdc}$                 | : Uyarım akımının doğru akım bileşeninin genliği.                        |
| $I_{fh}$                  | : Uyarım akımının h. harmonik genliği.                                   |
| $I_h$                     | : Akımın h. harmonik bileşeni.                                           |
| LA, LB, LC                | : Sargı endüktansları.                                                   |
| LM                        | : Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması.                          |
| logsig                    | : Lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu.                                |
| MAE                       | : Ortalama mutlak hata.                                                  |
| MAPE                      | : Mutlak ortalama yüzdesel hata.                                         |
| MPE                       | : Ortalama yüzdesel hata.                                                |
| MSE                       | : Ortalama karesel hata.                                                 |
| OBN                       | : Ortak bağlantı noktası.                                                |
| OSS                       | : Tek adım sekand geri yayılım algoritması.                              |

|                  |                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------|
| purelin          | : Lineer aktivasyon fonksiyonu.                     |
| R                | : Korelasyon katsayısı.                             |
| $R^2$            | : Determinasyon katsayısı.                          |
| RA, RB, RC       | : Sargı dirençleri.                                 |
| RMSE             | : Hata kareler ortalamasının karekökü.              |
| RP               | : Esnek geri yayılım algoritması.                   |
| SCG              | : Dengeli eşlenik gradyan geri yayılım algoritması. |
| SEA              | : Sonlu elemanlar analizi.                          |
| SEY              | : Sonlu elemanlar yöntemi.                          |
| SG               | : Senkron Generatör.                                |
| tansig           | : Hiperbolik tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu. |
| THD              | : Toplam harmonik distorsiyon.                      |
| THD <sub>i</sub> | : Akımdaki toplam harmonik distorsiyon.             |
| THD <sub>v</sub> | : Gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon.          |
| $V_1$            | : Gerilimin temel bileşeni.                         |
| $V_h$            | : Gerilimin h. harmonik bileşeni.                   |
| $X_i$            | : Tahmin verisi.                                    |
| $\hat{X}_i$      | : Hedef verisi.                                     |
| YSA              | : Yapay sinir ağları.                               |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                                                                                                      | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1.1: Doğrusal olmayan yüklerin gerilim dalga şeklinin bozulmasına etkisi.                                                                                                    | 1                   |
| 1.2: Temel (50 Hz), 5. (250 Hz), 7. (350 Hz), 11. (550 Hz) ve 13. (650 Hz) harmonikli dalgalar ile bozuk dalganın gösterimi.                                                 | 2                   |
| 1.3: Frekansa göre harmonik çeşitleri.                                                                                                                                       | 3                   |
| 1.4: Pasif filtrelere ait eşdeğer devreler ve empedans-frekans karakteristikleri.                                                                                            | 6                   |
| 1.5: a) Seri ve b) paralel aktif filtrelerin enerji nakil hatlarına bağlanması.                                                                                              | 7                   |
| 2.1: RMXprt elektrik makinaları tasarım akış şeması.                                                                                                                         | 16                  |
| 2.2: Stator nüve malzemesinin B-H karakteristiği.                                                                                                                            | 17                  |
| 2.3: Senkron generatörün stator sargı dağılımı.                                                                                                                              | 18                  |
| 2.4: Rotor nüve malzemesinin B-H karakteristiği.                                                                                                                             | 20                  |
| 2.5: Senkron generatöre ait 2 boyutlu model.                                                                                                                                 | 21                  |
| 2.6: Modellenen generatörün 2 boyutlu ağ örüntüsü (mesh).                                                                                                                    | 22                  |
| 2.7: Maxwell Circuit Editor’de oluşturulan eşdeğer devre.                                                                                                                    | 22                  |
| 2.8: SG’nin terminal geriliminin yüksüz durumdaki harmonik spektrumu.                                                                                                        | 24                  |
| 2.9: SG’nin tam yüklenme durumundaki terminal gerilimi ve faz akımının harmonik spektrumu.                                                                                   | 24                  |
| 2.10: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 100 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 26                  |
| 2.11: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 200 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 27                  |
| 2.12: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 300 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 28                  |
| 2.13: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 400 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 29                  |

|       |                                                                                                                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.14: | Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 500 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 30 |
| 2.15: | Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 600 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 31 |
| 2.16: | Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 700 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 32 |
| 2.17: | Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 800 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 33 |
| 2.18: | Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 900 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi. | 34 |
| 2.19: | D.a. üzerine bindirilmiş sinüzoidal akım uygulanması durumunda farklı senaryolar için hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> 'si.                                         | 35 |
| 2.20: | D.a. üzerine bindirilmiş sinüzoidal akım uygulanması durumunda farklı senaryolar için faz gerilimlerinin THD <sub>V</sub> 'si.                                         | 35 |
| 2.21: | %10-%60 yüklenme oranları için 300 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi.              | 37 |
| 2.22: | %70-%120 yüklenme oranları için 300 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD <sub>V</sub> değerlerinin değişimi.             | 38 |
| 3.1:  | Sinir hücresi (biyolojik nöron) ve yapay nöronun yapısı.                                                                                                               | 42 |
| 3.2:  | Çok katmanlı ileri beslemeli ağ.                                                                                                                                       | 43 |
| 3.3:  | YSA'da yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları a) purelin, b) logsig ve c) tansig.                                                                           | 44 |
| 3.4:  | a) LM, b) GDX, c) GDM ve d) GDA eğitim algoritmalarında nöron sayısına göre MSE değerleri.                                                                             | 55 |
| 3.5:  | a) GD, b) CGP, c) CGF ve d) CGB eğitim algoritmalarında nöron sayısına göre MSE değerleri.                                                                             | 56 |

|       |                                                                                                                                                            |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6:  | a) OSS, b) SCG, c) BFG ve d) RP eğitim algoritmalarında nöron sayısına göre MSE değerleri.                                                                 | 57 |
| 3.7:  | THD <sub>V</sub> tahmini için önerilen YSA modelin ağ mimarisi.                                                                                            | 58 |
| 3.8:  | THD <sub>V</sub> tahmini için önerilen YSA modelin performansı.                                                                                            | 59 |
| 3.9:  | THD <sub>V</sub> tahmini için önerilen YSA modelinin regresyon grafikleri.                                                                                 | 60 |
| 3.10: | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin THD <sub>V</sub> için karşılaştırılması.                                                                                | 60 |
| 4.1:  | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A fazı gerilimi a) temel bileşen, b) 3. harmonik, c) 5. harmonik ve d) 7. harmonik genlikleri için karşılaştırılması.   | 65 |
| 4.2:  | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A fazı gerilimi a) 9. harmonik, b) 11. harmonik, c) 13. harmonik ve d) 15. harmonik genlikleri için karşılaştırılması.  | 66 |
| 4.3:  | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A fazı gerilimi a) 17. harmonik ve b) 19. harmonik genlikleri için karşılaştırılması.                                   | 67 |
| 4.4:  | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A fazı gerilimi a) temel bileşen, b) 3. harmonik, c) 5. harmonik ve d) 7. harmonik faz açıları için karşılaştırılması.  | 69 |
| 4.5:  | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A fazı gerilimi a) 9. harmonik, b) 11. harmonik, c) 13. harmonik ve d) 15. harmonik faz açıları için karşılaştırılması. | 70 |
| 4.6:  | SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A fazı gerilimi a) 17. harmonik ve b) 19. harmonik faz açıları için karşılaştırılması.                                  | 71 |
| 5.1:  | Matlab/Simulink ara yüzünde önerilen modelin uygulanması.                                                                                                  | 74 |
| 5.2:  | Test sisteminin Simplorer ara yüzü.                                                                                                                        | 75 |
| 5.3:  | SEA verileri ile YSA verilerinin a) %20, b) %50 c) %100 ve d) %120 yüklenme durumlarında karşılaştırılması.                                                | 76 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                                                  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1.1: Harmonik sıra bileşenler.                                                                           | 3                   |
| 1.2: Gerilim bozulma sınırları.                                                                          | 5                   |
| 1.3: Maksimum harmonik akım bozulması ( $I_L$ 'nin yüzdesi cinsinden).                                   | 5                   |
| 2.1: Senkron generatörün etiket değerleri.                                                               | 16                  |
| 2.2: Stator nüvesinin boyutları, malzeme tipi ve stator oyuk boyutları.                                  | 17                  |
| 2.3: Stator sargısı parametreleri.                                                                       | 18                  |
| 2.4: Stator bobinlerinin dağılımı.                                                                       | 19                  |
| 2.5: Rotor nüvesinin boyutları ve malzeme tipi.                                                          | 19                  |
| 2.6: Rotor kutbunun boyutları ve malzeme tipi.                                                           | 20                  |
| 2.7: Damper çubukları ile ilgili parametreler.                                                           | 20                  |
| 2.8: Alan sargısı parametreleri.                                                                         | 21                  |
| 3.1: LM eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.  | 48                  |
| 3.2: GDX eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 49                  |
| 3.3: GDM eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 49                  |
| 3.4: GDA eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 50                  |
| 3.5: GD eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.  | 50                  |
| 3.6: CGP eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 51                  |
| 3.7: CGF eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 51                  |
| 3.8: CGB eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 52                  |
| 3.9: OSS eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 52                  |

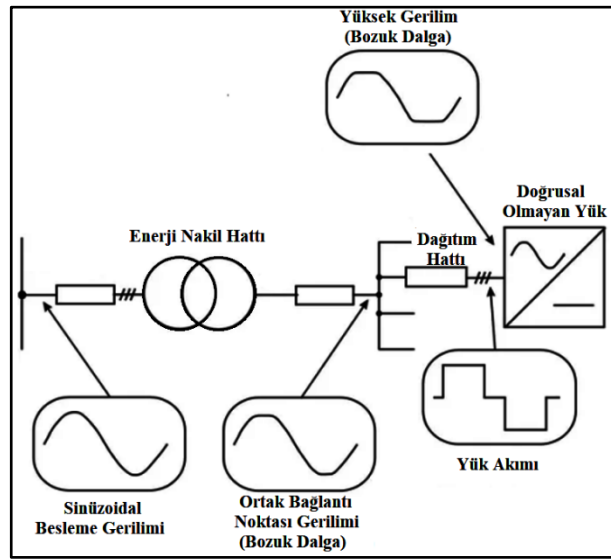
|       |                                                                                                     |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10: | SCG eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 53 |
| 3.11: | BFG eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri. | 53 |
| 3.12: | RP eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.  | 54 |
| 3.13: | Eğitim algoritmalarına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.   | 54 |
| 4.1:  | A faz geriliminin genliğine ait gizli katman nöron sayısı ve performans parametreleri.              | 64 |
| 4.2:  | A faz geriliminin faz açısına ait gizli katman nöron sayısı ve performans parametreleri.            | 68 |

# 1.GİRİŞ

Alternatif akım elektrik tesislerinde, azami performans ve uzun yaşam ömrünü sağlamak için üretim birimleri, tüketici yükler, enerji nakil elemanları, kompanzasyon elemanları gibi güç sistem bileşenleri, belirli bir etkin değerde (anma değerinde) ve belirli bir frekansta (anma frekansında) sinüzoidal dalga formuna sahip gerilimler ve akımlar altında çalışmak üzere tasarlanırlar.

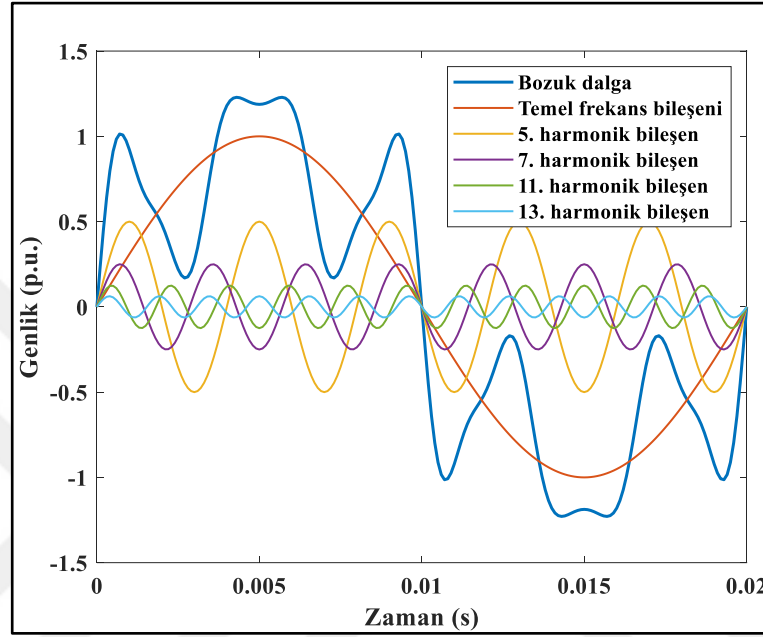
Ancak, günümüzde, iç mekan ve dış mekan aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan deşarj lambaları, endüstriyel üretim tesislerinde ana yüklerden biri olan evirici devreli elektrik motorları, doğru akım temelli uygulamalar ve elektrikli araç bataryalarının şarjı için kullanılan doğrultucular, fotovoltaik ve rüzgar temelli dağıtık üretim birimlerini şebekeye bağlayan güç elektroniği devreleri ile bilgisayarlarda bulunan anahtarlamalı güç kaynakları ise sinüzoidal olmayan akım dalga formlarına sahiptirler [1], [2].

Literatürde, sinüzoidal akım çeken güç sistem elemanları doğrusal elemanlar olarak, yukarıda çeşitli örnekler verilen sinüzoidal olmayan akım çeken elemanlar ise doğrusal olmayan elemanlar olarak isimlendirilmiştir [3]. Doğrusal olmayan yüklerin sayısı ve güçleri arttığı durumda, hat empedansları üzerinde düşen gerilimler dolayısıyla da bara gerilimleri sinüzoidal dalga formundan uzaklaşırlar (Şekil 1.1 [4]).



Şekil 1.1: Doğrusal olmayan yüklerin gerilim dalga şeklinin bozulmasına etkisi.

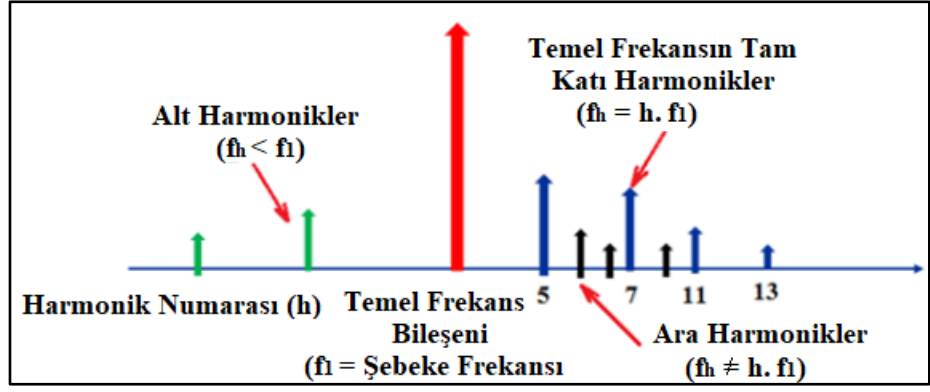
Bu sinüzoidal olmayan gerilimlere ve akımlara, Fourier analizi uygulandığında, şebeke frekansının ( $f_1$ ) katları frekanslara sahip sinüzoidal bileşenler elde edilir. Buna göre sinüzoidal olmayan bir gerilim veya akımın zaman tanım bölgesindeki ifadesi ( $y(t)$ ); ortalama değer veya d.a. bileşeni ( $Y_{da}$ ), h. harmonik efektif değeri ( $Y_h$ ), h. harmonik faz açısı ( $\phi_h$ ) ve  $f_1$  cinsinden elde edilebilir.



Şekil 1. 2: Temel (50 Hz), 5. (250 Hz), 7. (350 Hz), 11. (550 Hz) ve 13. (650 Hz) harmonikli dalgalar ile bozuk dalganın gösterimi.

Bu bileşenler, sahip oldukları frekanslar dikkate alınarak (Şekil 1.3),

- Alt harmonikler (Sub harmonics): Temel frekansın altında frekanslardaki bileşenler,
- Harmonikler (Harmonics): Temel frekansın tam katı frekanslara sahip bileşenler,
- Ara harmonikler (Inter harmonics): Temel frekansın tam katı olmayan frekanslara sahip bileşenler,
- Üst harmonikler (Supra harmonics): Temel frekansın çok üstünde 2 kHz ile 150 kHz arasında frekanslara sahip bileşenler, olarak literatürde sınıflandırılmıştır [5].



Şekil 1.3: Frekansa göre harmonik çeşitleri.

Bununla birlikte, harmonik bileşenler, faz açıları bakımından ise;

- Pozitif sıra harmonikler: Temel frekans (şebeke frekansı) gerilim/akım bileşeniyle aynı yönde döner alan meydana getiren bileşenler,
- Negatif sıra harmonikler: Temel frekans (şebeke frekansı) gerilim/akım bileşeniyle ters yönde döner alan meydana getiren bileşenler,
- Sıfır sıra harmonikler: Döner alan meydana getirmeyen bileşenler,

olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 1.1'den pozitif, negatif ve sıfır sıra harmonik bileşen numaraları görülmektedir [6].

Tablo 1.1: Harmonik sıra bileşenler.

| Harmonik Numarası                       | Sıra    |
|-----------------------------------------|---------|
| 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 = $(3k+1)^{th}$ | Pozitif |
| 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 = $(3k-1)^{th}$ | Negatif |
| 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 = $(3k)^{th}$   | Sıfır   |

Harmoniklerin güç sistemlerinde en olumsuz etkilerinden biri rezonans durumudur [3]. Rezonans durumu, seri ve paralel rezonans olmak üzere ikiye ayrılır. Seri rezonans durumunda bir rezonans frekansında enerji iletim/dağıtım elemanlarının toplam endüktansı ile sistemde bulunan bir kondansatörün (genellikle kompanzasyon kondansatörü) eşdeğer reaktansı sıfır olur. Bu durumda, rezonans frekansına sahip gerilim harmonikleri altında sistemden aşırı büyüklükte harmonik akımı akar. Diğer

taftan, paralel rezonans durumunda, rezonans frekansında enerji iletim/dağıtım elemanlarının toplam endüktansı ile sistemde bulunan bir kondansatörün eşdeğer reaktansı sonsuza yaklaşır. Böylece, rezonans frekansına sahip akım harmonikleri altında sistemde aşırı büyüklükte gerilim harmoniği meydana gelir [7].

Harmoniklerin güç sistemleri üzerindeki bir başka olumsuz etkisi, enerji iletim/dağıtım hatlarının, transformatörlerin ve hareketli elektrik makinelerinin (motorlar ve generatörlerin) sargı dirençlerinin büyüklüğündeki frekansa bağlı artış sebebiyle bu elemanların harmonik bozulmaya bağlı kayıplarındaki artıştır [8], [9]. Diğer taraftan, elektrik makineleri alt harmonikler altında nüvelerinin B-H eğrisinin pozitif veya negatif alternansta ötelenmesi sonucu doyma bölgesine girerler ve aşırı uyarım akımları çekerler [10], [11]. Bu kayıp ve uyarım akımı artışları, güç sistemlerinin veriminde azalmaya yol açarken bahsedilen elektrik güç sistem elemanlarının azami yüklenme kapasitesinde düşüşe sebep olur. Ayrıca, yıldız noktası topraklı sistemlerde her bir faza ait sıfır sıra akım harmonikleri birbiri üzerine eklenerek nötr iletkenlerinden aktıkları için bu iletkenlerin sinüzoidal şartlara kıyasla daha büyük kesitlerde boyutlandırılması gerekir.

Diğer önemli bir husus ise gerilim ve akım harmonikleri neticesinde, güç sistem elemanları aynı aktif güç üretimi/tüketimi için daha büyük görünür güç değerlerine sahip olurlar. Bu ise güç faktörlerinin de düşüşe yol açar.

Buraya kadar sunulan olumsuz etkilere ilaveten, harmonikler;

- Elektronik devrelerin hatalı çalışmasına,
- Kablolar aşırı ısınarak taşıma kapasitelerinin düşmesine [12]-[15],
- Doğrultucularda çıkış geriliminde dalgalanmanın artışına [2],
- Koruma rölelerinin hatalı çalışmasına [16]-[18],
- Ölçü transformatörlerinin kalibre edildikleri frekans değerinin dışında çalışması ve doyuma girmesine bağlı olarak hatalı ölçüm sonuçlarına [19]-[21],
- Kondansatörlerin yüksek frekanslı gerilim harmonikleri altında aşırı akım çekmesine bağlı ömür kaybına [22], [23],
- Dönen elektrik makinelerinde negatif sıra harmoniklerinin meydana getirdiği burulma etkisi sebebiyle moment dalgalanmaları oluşmasına dolayısıyla ömür kaybına yol açar [24].

Buraya kadar özetlenen olumsuz etkilerin azaltılması için harmonik bozulmanın kompanze edilmesi gereklidir. Bu gereklilik doğrultusunda, çeşitli uluslararası organizasyonlar tarafından harmonik sınır değerlerin tanımlandığı standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlardan Kuzey Amerikan bakış açısı olan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (IEEE) hazırladığı IEEE standart 519'de ortak bağlantı noktasında (OBN) ölçülen gerilim ve akım, bireysel ve toplam harmonik bozulmalar sınırlama altına alınmıştır. Bu standartta, gerilim harmonik sınır değerler tanımlanırken sistemin gerilim seviyesi dikkate alınarak bir derecelendirme yapılmıştır. Akım harmonik sınır değerleri derecelendirilirken ise sistemin tam yük akımının kısa devre akımına oranı dikkate alınmıştır. IEEE standart 519'da belirlenmiş gerilim ve akım harmonik sınırlamalarına ilişkin tablolar aşağıda sunulmuştur Tablo 1.2 ve Tablo 1.3). Bu standardın yanında, Avrupa bakış açısı olan Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun (IEC) düzenlediği IEC 61000-3-2, 3-4 ve 3-6 standartlarında çeşitli akım seviyelerinde ve tiplerinde yükler için her bir harmonik akımı için sınırlama tanımlanmıştır [25].

Tablo 1.2: Gerilim bozulma sınırları.

| Bara Gerilimi<br>(OBN)                  | Bireysel<br>Harmonik (%) | Toplam Harmonik<br>Bozulma (THD) |
|-----------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| $V \leq 1 \text{ kV}$                   | 5.0                      | 8.0                              |
| $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$   | 3.0                      | 5.0                              |
| $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ | 1.5                      | 2.5                              |
| $161 \text{ kV} < V$                    | 1.0                      | 1.5                              |

Tablo 1.3: Maksimum harmonik akım bozulması ( $I_L$ 'nin yüzdesi cinsinden).

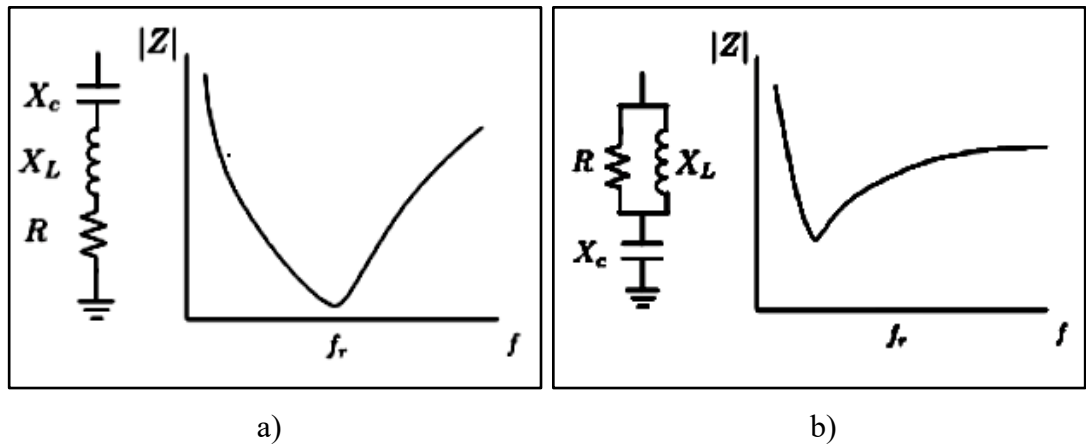
| Bireysel Harmonik Sırası (tek harmonikler) |                 |                  |                  |                  |                  |      |
|--------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|
| $I_{sc} / I_L$                             | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h < 50$ | TDD  |
| $< 20$                                     | 4.0             | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3              | 5.0  |
| $20 < 50$                                  | 7.0             | 3.5              | 2.5              | 1.0              | 0.5              | 8.0  |
| $50 < 100$                                 | 10.0            | 4.5              | 4.0              | 1.5              | 0.7              | 12.0 |
| $100 < 1000$                               | 12.0            | 5.5              | 5.0              | 2.0              | 1.0              | 15.0 |
| $> 1000$                                   | 15.0            | 7.0              | 6.0              | 2.5              | 1.4              | 20.0 |

Standartlarda tanımlı harmonik sınırlamalarına uygunluğun sağlanması ve dolayısıyla güç sistemlerindeki harmoniklere bağlı olumsuz etkilerin önlenmesi

amacıyla pasif ve aktif filtreler ile bu iki filtrenin kombinasyonu olan hibrit filtreler kullanılmaktadır [26]-[29].

Direnç, bobin ve kondansatör elemanlarından oluşan pasif filtreler, enerji nakil hattına seri veya tüketiciye paralel şekilde bağlanabilirler. Dolayısıyla, bağlantı şekline göre seri ve paralel olmak üzere ikiye ayrılırlar. Seri pasif filtreler, şebeke ve tüketici arasında harmonik akımlarını tıkmak için ayarlandıkları harmonik numarasında yüksek değerde empedansa sahip olacak şekilde tasarlanırlar. Paralel pasif filtreler ise, yük akımı harmoniklerinin şebekeye geçişini engellemek için ayarlandıkları harmonik numarasında çok düşük değerde empedansa sahip olurlar. Böylece, yük akımı harmoniklerini toprağa akmasını sağlarlar. Paralel pasif filtreler, harmonik iyileştirmesine ilaveten güç faktörü kompanzasyonuna katkısı sebebiyle uygulamada seri tiplere göre daha yaygın kullanılmaktadır.

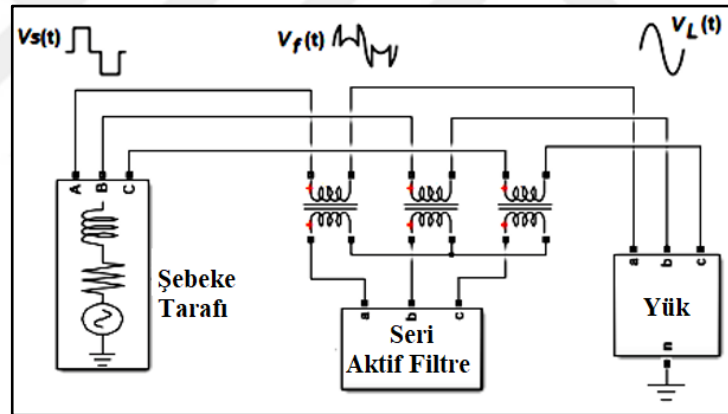
Bununla birlikte, frekans cevabı bakımından paralel pasif filtreler, ayarlı, sönümlü ayarlı ve yüksek geçiren olmak üzere üç ana tipe sahiptir. Ayrıca, ayarlı filtreler, tek ayarlı, çift ayarlı ve üç ayarlı alt tiplere sahip olmaktadır. Pratik uygulamada genellikle baskın akım harmoniklerinin kompanze edilmesi için bir ya da birkaç tek ayarlı filtre ile yüksek geçiren filtreler birlikte kullanımı mevcuttur. Ayrıca, C tipi filtreler gibi tek ayarlı ve yüksek geçiren filtre niteliklerini bünyesinde birlikte barındıran filtreler mevcuttur. Tek ayarlı ve yüksek geçiren pasif filtrelere ait eşdeğer devreler ve empedans-frekans karakteristikleri Şekil 1.4’de sunulmuştur [30].



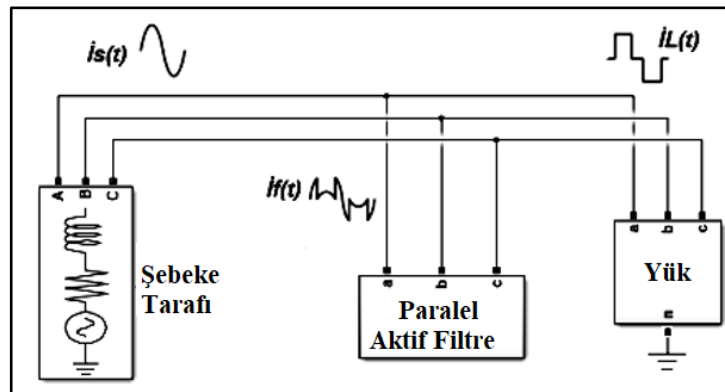
Şekil 1.4: Pasif filtrelere ait eşdeğer devreler ve empedans-frekans karakteristikleri.

Diğer seçenek olan aktif filtreler ise güç elektroniği (evirici) temelli aktif devrelerdir. Bu aktif devreler, tam kompanzasyon, seçici harmonik eliminasyon ve saf

sinüzoidal gerilim/akım yaklaşımlarına göre kontrol edilirler. Ancak, saf sinüzoidal akım/gerilim yaklaşımına göre uygulama yaygın olarak kabul görmüştür. Aktif filtreler, Şekil 1.5 [4]'de izah edildiği üzere enerji nakil hattına bağlantısı bakımından seri ve paralel olarak tasarlanırlar [31]. Seri aktif filtreler, şebeke ile tüketici arasında enerji transferini sağlayan hatta seri olarak bağlanırlar. Bu elemanlar, şebeke tarafındaki gerilim harmoniklerini süzerek tüketici geriliminin saf sinüzoidal olmasını sağlayacak şekilde kontrol edilen harmonik gerilim kaynağı şeklinde çalışırlar. Paralel aktif filtreler ise tüketiciye paralel bir şekilde hatta bağlanırlar. Bu elemanlar, harmonik akımlarını kompanze edecek şekilde kontrol edilen bir harmonik akım kaynağı olarak çalışırlar. Böylece tüketiciye ait bozulmuş akım dalga şeklinin harmonik bileşenleri, aktif filtre tarafından uygun akım dalga şekli şebekeye enjekte edilerek süzülür ve şebeke tarafında saf sinüzoidal akım dalga şekli sağlanmış olur. Aktif filtreler, harmoniklerin filtre edilmesinin yanı sıra temel frekans reaktif güç kompanzasyonunu da gerçekleştirir [32].



a)



b)

Şekil 1.5: a) Seri ve b) paralel aktif filtrelerin enerji nakil hatlarına bağlanması.

Pasif filtreler, aktif filtrelerle kıyasla, harmonik azaltma ve reaktif güç kompanzasyonu yönünden daha düşük yeteneğe sahiptir. Ayrıca, pasif filtreler değişken sistem şartlarında rezonansa sebep olabilirler. Ancak, aynı güç seviyesi için, aktif filtrelerin pasif filtrelerle göre yüksek maliyeti önemli bir dezavantajdır. Bu dezavantaj sebebiyle, pasif filtreler, günümüzde endüstride hala kullanılmaktadır. Bununla birlikte, her iki filtre tipinin avantajlarından faydalanmak amacıyla aktif ve pasif filtrelerin birlikte kullanıldığı hibrit filtreler literatürde önerilmiştir [29].

Filtre kullanımı önleminin yanı sıra harmoniklerin güç sistem elemanlarının üzerindeki olumsuz etkilerinin önlenmesi için güç sistem elemanlarının tasarımında da bazı düzenlemelere gidilmektedir. Doğrusal olmayan yükleri besleyen transformatörlerin akım harmonikleri neticesinde sargılardaki kayıp artışının diğer bir deyişle aşırı ısınmasının ve ömür kaybının önüne geçilmesi için yeniden boyutlandırılması ve transformatörlerin kapasitelerin yük türüne göre indirgenmesi (derating) bu uygulamalara örnek olarak verilebilir [33]-[35]. Yine bu amaçla, harmonikli akımlar altında çalışan transformatörlerde sargılar transpoze edilmiş yassı iletkenlerden üretilir. Güç elektroniği doğrultucularında darbe sayısı artırılarak darbe sayısına bağlı olarak harmonik bileşenler iptal edilebilir [30]. Kapasitörlere seri reaktans ve direnç eklenerek belirli bir harmonik filtrelenebilir. Generatör ve transformatörlerden kaynaklanan harmoniklerin güç sistemine akışını önlemek için üçgen bağlantı tercih edilebilir [30]. Doğrusal olmayan yüklere özel tasarlanmış K-oranlı transformatörler bu tür yüke sahip sistemlerde kullanılabilir [36].

## 1.1. Literatür Taraması

Dönen elektrik makinelerinin genelinde olduğu gibi, harmonikli şartlar senkron makinelerde ekstra sargı kayıplarına ve negatif sıra harmoniklerine bağlı moment dalgalanmalarına sebep olur. Buna ilaveten, harmonik bozulma senkron makinelerin generatör çalışma durumu için rotor alan sargılarında ve stator sargılarında bozuk formda akım ve gerilim dalga şekillerinin oluşmasının neticesinde sargılar ve nüvede ısınma [37], [38], damper çubuklarında kayıpların artması ve rotor açısının değişmesi [39], [40] etkilerine sahiptir.

Senkron generatörler (SG), harmoniklerden olumsuz etkilenirken, uygun tasarıma sahip olmadığı takdirde kendileri de harmonik kaynağı olabilir. SG’lerde,

stator ve rotor sargılarının dağılımı, oyuk sayısı, oyuk şekli, oyuk açıklığı ve rotor kutuplarının şeklinden kaynaklı düzgün olmayan hava aralığı, stator ve rotordaki manyetik malzemenin doygunluğu terminal geriliminin harmonik bozulmasına etki eden tasarım parametreleridir [41]. Damper sargılarının sayısı ve yerleştirilmesi, terminal harmonik bozulmasını etkileyen diğer faktörlerdir [3].

Nuzzo ve arkadaşları, çıkık kutuplu senkron generatör (ÇKSG)'lerin damper çubuklarında meydana gelen omik kayıpları azaltmak için yaptıkları çalışmada [42], damper çubuğunun geometrisinin çıkış gerilimi toplam harmonik bozulmasını (THDv'sini) etkilediğini göstermişlerdir. Bu çalışmanın devamında, aynı araştırmacılar, ÇKSG'lerde birbirini takip eden iki kutupta asimetrik şekilde damper çubuklarını yerleştirerek toplam harmonik bozulmayı %54 oranında iyileştirmişlerdir [43].

Perin ve arkadaşları, ÇKSG'lerde terminal gerilimindeki THD'yi iyileştirmek için damper çubukları arasındaki açıyı, damper çubuğu grupları arasındaki açıyı ve damper çubuklarının çapını gri kurt (grey wolf) optimizasyon algoritması [44] ve çekirge (grasshopper) optimizasyon algoritması [45] yöntemlerini kullanarak optimize etmişlerdir.

Nuzzo ve arkadaşları, ÇKSG'nin üretim maliyetini ve üretim süresini düşüren eğimsiz stator oyuk yapısıyla, generatörün performansından ödün vermeden stator oyuklarının eğimlendirilerek inşasını ortadan kaldırıp, damper çubuklarının optimal bir şekilde asimetrik konumlandırmışlardır. Bunun sonucunda THDv, eğimli stator oyuk yapılı modele göre %3'ün altında kalacak şekilde artış gösterirken eğimsiz stator oyuk yapılı modele göre yarıdan daha fazla düşüş göstermiştir [46].

Elez ve arkadaşları [47]'de, senkron generatörün damper çubuklarından kaynaklanan kayıpları düşürmek amacıyla yaptıkları çalışmada hem stator oyuk eğimlendirmesi ve hem de damper çubuklarının konumunun birlikte optimize edilmesiyle senkron generatörün terminal geriliminin daha iyi dalga formuna sahip olabileceğini göstermişlerdir.

Wang ve arkadaşları [48]'de, havacılık uygulamalarında kullanılan ÇKSG'lerde özellikle yüksek hızlarda geleneksel damper çubuklarının yerine asenkron makinalarda kullanılan kısa devre çubukları kullanılarak ve kısa devre çubuklarında kullanılan malzemenin 17-4PH H900 tipi paslanmaz çelikten seçilmesi ile damper çubuklu senkron generatöre göre azda olsa THDv'de iyileşme sağlamışlardır.

Diğer taraftan, yüksek güçlü senkron generatörlerde, stator oyuk açıklığı, senkron generatörün gücü arttıkça daha geniş olabilir. Bu durum ise hava aralığı akısında, dolayısıyla terminal geriliminde harmonik bozulmada artışla sonuçlanır. Bunu önlemek için stator oyuk açıklığında hava boşluğunu azaltan manyetik takozlar kullanılır [49], [50].

Spargo ve arkadaşları, ÇKSG'lerin eğimsiz stator oyuk yapısında rotor kutupları ile stator arasındaki hava aralığının orta noktada ve kutup uçlarında sabit olmaması durumunda optimal kutup ucu hava aralığı mesafesi ile eğimsiz stator oyuk yapılı modele göre terminal gerilimi THDv'sini iyileştireceğini belirtmişlerdir [51].

Bramerdorfer ve arkadaşları, ÇKSG'nin rotor kutup yüzeylerine optimal noktalarda çentikler ekleyerek terminal gerilimi THD'sini yarı yarıya düşürmüşlerdir [52].

Woo ve arkadaşı [53]'da, ÇKSG'nin dört parametresini (rotor kutup genişliği, rotor boyunduruk genişliği, rotor kutup yüksekliği ve rotor boyunduruk yüksekliği) genetik algoritma ile optimize ederek terminal gerilimi THDv'sini iyileştirmişlerdir.

Gündoğdu çalışmasında [54], ÇKSG statorunun çift katmanlı konsantre sargı ve kesirli oluklu sargı ile sarılması sonucunda terminal gerilimindeki toplam harmonik bozulmayı karşılaştırmıştır. Kesirli oluklu sargının THDv'yi önemli oranda iyileştirdiği görülmüştür.

Asgharpour-Alamdari ve arkadaşları [55]'deki çalışmalarında çıkık kutuplu SG'lerin statorunda bir katmanlı sargı yerine üç katmanlı sargı kullanılması durumunda indüklenen gerilimin THD'sini yüksüz, omik yük, omik-endüktif ve omik-kapasitif yük durumunda önemli oranda azalttığını göstermişlerdir. Bununla birlikte, Asgharpour-Alamdari [56]'deki çalışmasında [55]'de önerdikleri yöntemi kullanarak SG'lerin doğrusal olmayan yükleri beslemesi durumunda sahip oldukları THDv'yi düşürmüştür.

Dajaku ve arkadaşları [57]'de, kesirli dış-konsantre sargılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerde stator boyunduruğu üzerine manyetik akı bariyerleri kullanarak, düşük dereceli harmonikleri %60 oranında iyileştirdiklerini ifade etmişlerdir.

Abdel-Khalik ve arkadaşları [58], çift çok fazlı (dual multiphase winding) ve çift katmanlı kesirli oluk sargısı kullanarak kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerde hat gerilimindeki THDv'yi %14,73 seviyesinden %3,28 seviyesine indirmişlerdir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda [59-61], SG'lerin gerilim harmonik bozulmasının azaltılması için harmonik kompanzasyon sargıları kullanılmıştır. Bu çalışmalardan [59]'de, stator oyuklarına yerleştirilen ekstra sargı ile 3. harmonik bileşenin ve terminal gerilimindeki THDv'nin azaltılabileceği gösterilmiştir. Yao ve arkadaşları ise [60], [61]'de hem rotor hem de statora yardımcı sargılar yerleştirmişlerdir. Bu sistemde, stator uçlarından alınan gerilim doğrultularak statorda bulunan stator harmonik sargısına verilmekte, devamında stator harmonik sargısı sayesinde rotor harmonik sargısında gerilim indüklenmektedir. Son olarak, rotordaki harmonik sargıda indüklenen gerilim doğrultularak rotor ana uyarım sargısına verilmektedir. Böylece, harmonikli uyarım sargısı ile THDv'nin azaltılması sağlanmaktadır.

## 1.2. Arka Plan

Yukarıda özetlenen çalışmalardan görüleceği üzere, SG'lerin tasarımsal kaynaklı çıkış gerilimindeki harmonikler, stator veya rotor oyuklarının eğimlendirilmesiyle, stator oyuğunun yapısıyla, rotor kutuplarının biçimlendirilmesi, manyetik malzemeler kullanılmasıyla, damper çubuklarının konumlandırılması, sargının uygun şekilde dağıtılmasıyla ve harmonik sargılarının eklenmesiyle azaltılabilir.

Diğer taraftan, literatürdeki bazı çalışmalarda, SG'lerin terminal gerilimi veya şebeke gerilimi harmonik bozulmasının azaltılması için alan sargısına modüle edilmiş uyarım akımının uygulanması yöntemi önermişlerdir. Bunlardan biri olan, Abolhassani ve arkadaşları [62], [63]'de önerdikleri çalışmada, geleneksel SG'nin alan sargısına 2., 4. ve 6. harmonik bileşen bindirilmiş doğru akım uygulanarak aktif filtre olarak çalıştırılmış ve böylece şebekedeki 5. ve 7. harmonik bileşenleri minimize edilebileceği gösterilmiştir.

Fallows ve arkadaşları [64]'de, çıkık kutuplu tek fazlı senkron generatörlerde modüle edilmiş alan sargısı geriliminin yüksüz durumda çıkış gerilimindeki harmonik bileşenleri minimize edeceğini göstermiştir.

Kimpara ve arkadaşları [65]'de ki çalışmalarında, çıkık kutuplu üç fazlı senkron generatörlerin alan sargısına optimal olarak modüle edilmiş akım uygulayarak, bu generatörlerin yüksüz durumda terminal gerilimi harmoniklerini minimize etmeyi

amaçlamışlardır. Bu çalışmada, benzetim temelli analiz sonuçlarıyla faz geriliminin THDv'sinde iyileşme olduğunu göstermişlerdir.

Evestedt ve arkadaşları [66]'deki çalışmalarında, üç fazlı çıkık kutuplu SG'nin alan sargısına, d.a. üzerine akım harmoniğinin eklenmesiyle yüksüz durumda hava aralığı akısını kontrol ederek diğer bir ifadeyle uyarım akımını modüle ederek, faz gerilimlerindeki THDv'yi düşürmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, 3. ve 5. harmonik bileşenlerin genliklerini azaltmak için 4. harmonik bileşenli d.a. uyarım akımı alan sargısına uygulanmıştır. Bu çalışmada sunulan sonlu elemanlar analizi (SEA) temelli benzetim ve ölçüm temelli analiz sonuçlarından 3. harmonik bileşeninin minimizasyonunda THDv'nin bir fazda düşerken diğer fazlarda arttığı ifade edilebilir.

[65] ve [66]'deki çalışmalarda sunulan yöntemler, anlık rotor pozisyonunun ve manyetik akı yoğunluğunun ölçümü için ekstra ölçme elemanlarına ihtiyaç duyarlar. Ayrıca bu yöntemler zaman tanım bölgesinde ifadeler içerdiklerinden uygulanmaları için gerekli hesap yükleri yüksektir.

Bununla birlikte, yukarıda özetlenen çalışmalardan, literatürde, yüksüz veya doğrusal yüklenme durumlarında SG'lerin terminal gerilimi harmonik bozulmasının minimize edilmesine yönelik çalışmalar olduğu görülmektedir. Ancak, aynı çalışmalardan, SG'lerin doğrusal olmayan yükleri beslemesi durumunda, senkron generatörlerin terminal gerilimi harmonik bozulma davranışını analiz etmek ve uyarım akımının modülasyonu yoluyla gerilim harmonik bozulmasını minimize etmek için hesap verimli ve pratik uygulamaya müsait bir aracın literatürde önerilmediği sonucuna varılmaktadır.

### **1.3. Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan yüklenme koşulları altında çalışan SG'lerin terminal gerilimi harmonik bozulmasını analiz etmek ve uyarım akımının modülasyonu yoluyla bu gerilim harmonik bozulmasını minimize etmek için hesap verimli ve pratik uygulamaya müsait bir aracın önerilmesi amaçlanmıştır. Bu aracın, SEA temelli ANSYS Maxwell yazılımından gerçekleştirilen çok sayıda benzetim sonucu yapay sinir ağı (YSA) ile işlenerek elde edilmesi hedeflenmiştir.

Bu aracın avantajlarından biri, uygulanmasında literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan araçların uygulanması için gerekli olan rotor konumu ve manyetik akı yoğunluk sensörleri gibi ekstra donanımlara ihtiyaç duymamasıdır.

Çalışmanın sonuçları, senkron generatörler tarafından beslenen mikro şebekelerde gerilim harmonik bozulmasının düşürülmesi ve böylece şebekede bulunan harmonik bozulma hassas yüklerin performansının korunması bakımından önemlidir.

## 1.4. Tezin Sınırları

Bu tez çalışmasında,

- Ansys Maxwell de gerçekleştirilen analizler, iki boyut ve 6 da 1 oranındaki model üzerinde ve 0.0002 saniye çözünürlükte 0.3 saniye süresince gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan SG'nin sargılarının eşit dağıtıldığı varsayılmış ve deri etkisi ihmal edilmiştir.
- YSA temelli THD<sub>v</sub> modelin oluşturulmasında THD<sub>v</sub> hesaplanırken 50. harmoniğe kadar olan harmonikler dikkate alınmıştır.
- YSA temelli bireysel harmonik modelinin oluşturulmasında 19. harmoniğe kadar tek harmonik bileşenler dikkate alınmıştır.
- Her bir YSA eğitimi 10 kez tekrarlanmış ve ağ mimarisi seçilirken en iyi eğitim MSE performans parametresi dikkate alınarak seçilmiştir.
- YSA eğitimde, 12 eğitim algortiması, 3 aktivasyon fonksiyonu, 10'ar adımlık artışlarla maksimum 200 gizli katman nöron sayısı kullanılmıştır.
- YSA temelli model, sadece tez çalışmasında kullanılan generatör ve yük türünde optimal uyartım akım parametrelerin bulunmasında kullanılabilir.

## 1.5. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması, giriş bölümü ve aşağıda kısaca özetlenen 6 bölümden oluşmaktadır:

İkinci bölümde, harmonikli uyartım akımıyla ÇKSG'nin terminal gerilimdeki toplam harmonik bozulmayı iyileştirmeyi amaçlayan model Ansys Maxwell ortamında, RMxp<sub>rt</sub> ve devamında iki boyutlu olarak oluşturularak, doğrusal olmayan yük tanımlanması yapılmış, farklı frekanslarda SG'nin THD<sub>v</sub>'ye etkisi

değerlendirilerek uygun frekans seçilmiş ve yüklenme oranları da dikkate alınarak  $THD_V$ 'yi minimum yapacak harmonikli uyartım akımı parametreleri parametrik analizle belirlenmiştir.

Üçüncü bölümde. YSA hakkında genel bilgi verilerek, ikinci bölümde yapılan analizlerden elde edilen verilerle YSA eğitimi, eğitim algoritması, aktivasyon fonksiyonu, nöron sayısı dikkate alınarak optimal ağ mimarisi belirlenmiştir.

Dördüncü bölümde, ikinci bölümden yapılan analizlerden elde edilen verilerle YSA eğitimi, üçüncü bölümde belirlenen eğitim algoritması, aktivasyon fonksiyonuna göre optimal nöron sayısına sahip ağ mimarisi ile YSA temelli bireysel harmonik model oluşturulmuştur.

Beşinci bölümde, üçüncü bölümde elde edilen YSA temelli  $THD_V$  modeli ile modüle edilmiş uyartım akımının harmonikli bileşen genliği ile faz açısı bulunarak dördüncü bölümde elde edilen YSA temelli bireysel harmonik model test edilmiş ve devamında Matlab/Simulink, Ansys Maxwell ve Simplorer etkileşimiyle YSA temelli  $THD_V$  modelinin test sonuçları sunulmuştur.

Son bölümde ise, bölümlerden elde edilen sonuçlar özetlenerek, tezin davamı niteliğinde olacak çalışmalar özetlenmiştir.

## **2.SENKRON GENERATÖRLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜK ALTINDA HARMONİK DAVRANIŞININ ANALİZİ**

Bu bölümde, SG'lerin doğrusal olmayan yüklenme altında analizi için Ansys Maxwell ortamında modellenmesi üzerine detaylı bilgi verilmiştir. Devamında, tez kapsamında modellenen 538 kVA gücünde ve 400 V anma geriliminde üç fazlı ÇKSG'nin doğrusal olmayan yüklenme altında saf d.a. uyarım akımı ve modüle edilmiş uyarım akımları altında terminal geriliminin harmonik davranışı analiz edilmiştir.

### **2.1. Üç Fazlı Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Modellenmesi**

Elektrik makinelerinin analizi için literatürde elektriksel eşdeğer devre modelleri, relüktans (elektrik-manyetik eşdeğer devre) tabanlı modeller ve sonlu elemanlar yönteminin yaygın olarak kullanıldığı ifade edilebilir. Bununla birlikte, tez çalışmaları kapsamında d.a. bileşeninin yanı sıra farklı frekanslarda a.a. bileşen içeren sentezlenmiş uyarım akımları dikkate alındığından ve bu uyarım akımları altında SG'nin analizi için ilk iki modelin revize edilmesine ihtiyaç duyulduğundan, yapılan analizlerde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Kısaca tarif etmek gerekirse, SEY, elektrik ve manyetik alan büyüklüklerin sonlu bir alanda, uygun sınır ve başlangıç koşulları dikkate alınarak Maxwell denklemlerinin çözümüyle bulunmasını sağlayan bir analiz yöntemidir.

SEY analizleri için literatürdeki çalışmalarda çeşitli ticari yazılımlar kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında, bu yazılımlardan ANSYS Maxwell tercih edilmiştir. Ansys Maxwell, ANSYS Electronics Desktop yazılımının bir modülüdür. ANSYS Electronics Desktop, çeşitli elektrik ve elektronik bileşenleri tasarlamak ve simülasyonunu gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. HFSS, Q3D, Circuit, Icepak, Maxwell ve Simplorer modüllerinde oluşmaktadır. Maxwell modülü ise RMXprt, Maxwell 2D, Maxwell 3D ve Maxwell Circuit alt modüllerini içermektedir. Çalışmada, RMXprt, Maxwell 2D, Maxwell Circuit modüllerinden faydalanılmıştır.

### 2.1.1. Rmxprt’de Senkron Generatörün Modellenmesi

RMxprrt, elektrik makinalarının SEY analizleri öncesinde analitik ifadeler yardımıyla pratik bir şekilde ön tasarımının yapıldığı bir modüldür. Bu modülde, optimizasyon yöntemleri de uygulanabilmektedir. Bu modülde elde edilen ön tasarım, daha detaylı ve hassas analizler için 2 boyutlu ve 3 boyutlu SEY’in uygulandığı Maxwell 2D ve Maxwell 3D modüllerine aktarılabilir. Böylece, kullanıcılar 2 ve 3 boyutlu tasarımı pratik bir şekilde oluşturabilmektedir. RMxprrt’de elektrik makine tasarım adımlarının akış şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: RMxprrt elektrik makinaları tasarım akış şeması.

RMxprrt’de çıkık kutuplu ve yuvarlak rotorlu olmak üzere iki çeşit sargılı uyarımlı üç fazlı senkron makine tanımlıdır. Bu modülde, senkron makine, motor ve generatör çalışmak üzere tasarlanabilmektedir. RMxprrt, generatör tasarımı için sonsuz güçlü baraya bağlı ve tek başına çalışma olmak üzere iki farklı seçeneği sunmaktadır. Bu tez çalışmasında, tek başına veya şebekeden bağımsız seçeneği için üç fazlı ÇKSG tasarımı dikkate alınmıştır.

RMxprrt’de, ÇKSG tasarımı stator ve rotor ana kısımlarını kapsamaktadır. Stator kısmı için nüve ve sargılar, rotor kısmı için nüve, sargı ve damper çubuklarına ilişkin tasarım parametreleri mevcuttur.

Bu tez çalışmasında modellenen senkron generatörün etiket değerleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

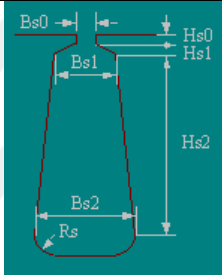
Tablo 2.1: Senkron generatörün etiket değerleri.

| Parametre               | Değer    |
|-------------------------|----------|
| Kutup Sayısı            | 6        |
| Anma Gücü (Görünür Güç) | 538 kVA  |
| Anma Gerilimi           | 400 V    |
| Anma Hızı               | 1000 rpm |

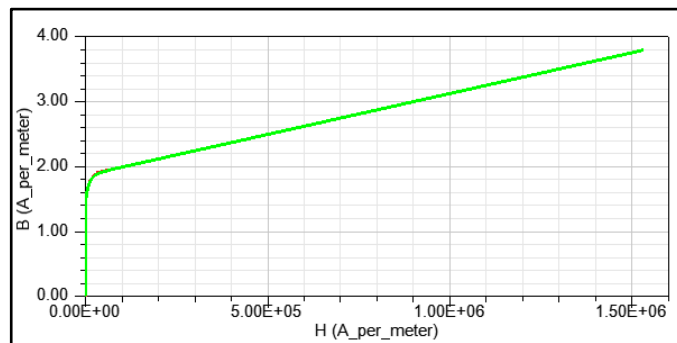
Stator, stator nüvesi ve üç fazlı sargılardan oluşmaktadır. Stator nüvesi, üç fazlı sargıların yerleştirilmesi için stator oyukları bulunan, bir tarafı yalıtılmış silisyum saclardan oluşan bir yapıya sahiptir.

Buna göre, modellenen generatöre ait stator nüvesi boyutları, stator manyetik malzeme tipi ve stator oyuk boyutları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Stator nüvesinin boyutları, malzeme tipi ve stator oyuk boyutları.

| Parametre                                                                          | Değer    |         |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|
| Stator Dış Çap                                                                     | 736.6 mm |         |
| Stator İç Çap                                                                      | 558.8 mm |         |
| Stator Nüve Uzunluğu                                                               | 395 mm   |         |
| Paketleme Faktörü                                                                  | 0.9      |         |
| Stator Oyuk Sayısı                                                                 | 72       |         |
| Stator Nüve Malzemesi                                                              | M19_24G  |         |
|  | Hs0      | 0.76 mm |
|                                                                                    | Hs1      | 2.17 mm |
|                                                                                    | Hs2      | 29.4 mm |
|                                                                                    | Bs0      | 3.9 mm  |
|                                                                                    | Bs1      | 11.4 mm |
|                                                                                    | Bs2      | 15 mm   |
|                                                                                    |          |         |
| Stator Oyuk Boyutları                                                              |          |         |

Tablo 2.2’de verilen M19\_24G stator nüve malzemesi tipi, yazılımın kütüphanesinde bulunmaktadır ve bu malzemenin B-H karakteristik eğrisi Şekil 2.2’de verilmiştir.



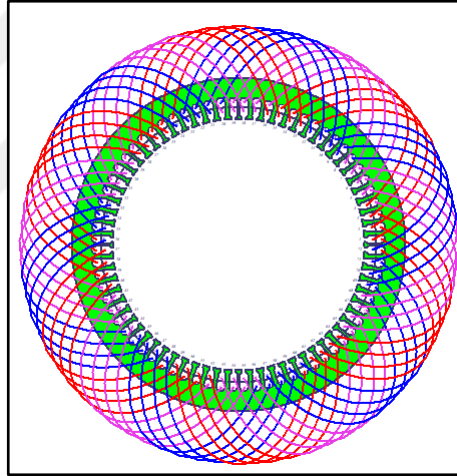
Şekil 2.2: Stator nüve malzemesinin B-H karakteristiği.

Stator sargılarında istenilen büyüklükte ve sinüzoidal forma yakın bir gerilim dalga şekli indüklenmesi için bu sargıların stator oyuklarına en uygun şekilde

dağıtılarak yerleştirilmesi gereklidir. RMXprt’de stator sargıları tasarlanırken, sargı türü (yarım kalıp, tam kalıp, el tipi ve özel sarım), katman sayısı, bobin adımı, iletken çapı, bobin sayısı, paralel kol sayısı, oyuk başına iletken sayısı ve oyuk doluluk faktörü parametre seçimleri yapılır. Analizlerde kullanılacak senkron generatör için bu stator sargı parametreleri Tablo 2.3’de ve sargı dağılımları da Tablo 2.4’de verilmiştir. Tablo 2.4’de verilen stator bobinlerinin dağılımının görsel hali Şekil 2.3’de sunulmuştur.

Tablo 2.3: Stator sargısı parametreleri.

| Parametre                  | Değer     | Parametre            | Değer   |
|----------------------------|-----------|----------------------|---------|
| Katman Sayısı              | 2         | Bobin Adımı          | 11      |
| Sargı Tipi                 | Tam Kalıp | İletken Çapı         | 1.63 mm |
| Paralel Kol Sayısı         | 6         | Oyuk Doluluk Faktörü | 0.75    |
| Oyuk Başına İletken Sayısı | 10x9      |                      |         |



Şekil 2.3: Senkron generatörün stator sargı dağılımı.

Tablo 2.4: Stator bobinlerinin dağılımı.

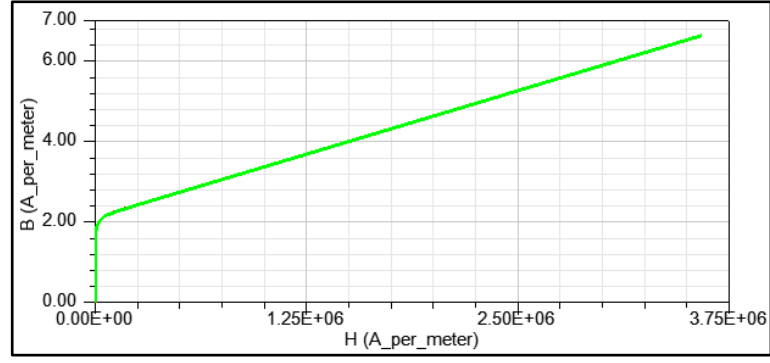
|       |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Bobin | 1. Kat  | -C | -C | -C | B  | B  | B  | B  | -A | -A | -A | -A | C  |
|       | 2. Kat  | A  | A  | A  | A  | -C | -C | -C | -C | B  | B  | B  | B  |
|       | Oyuk No | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| Bobin | 1. Kat  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B | A  | A  | A  | A  | -C |
|       | 2. Kat  | -A | -A | -A | -A | C  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B |
|       | Oyuk No | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Bobin | 1. Kat  | -C | -C | -C | B  | B  | B  | B  | -A | -A | -A | -A | C  |
|       | 2. Kat  | A  | A  | A  | A  | -C | -C | -C | -C | B  | B  | B  | B  |
|       | Oyuk No | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| Bobin | 1. Kat  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B | A  | A  | A  | A  | -C |
|       | 2. Kat  | -A | -A | -A | -A | C  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B |
|       | Oyuk No | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| Bobin | 1. Kat  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B | A  | A  | A  | A  | -C |
|       | 2. Kat  | A  | A  | A  | A  | -C | -C | -C | -C | B  | B  | B  | B  |
|       | Oyuk No | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| Bobin | 1. Kat  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B | A  | A  | A  | A  | -C |
|       | 2. Kat  | -A | -A | -A | -A | C  | C  | C  | C  | -B | -B | -B | -B |
|       | Oyuk No | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |

Dikkate alınan generatörün rotoru; nüve, alan sargıları ve damper çubuklarından (sargılarından) oluşmaktadır. Rotor nüvesinin ana boyutları ve kutup boyutları sırasıyla Tablo 2.5 ve Tablo 2.6’da sunulmuştur.

Tablo 2.5: Rotor nüvesinin boyutları ve malzeme tipi.

| Parametre             | Değer      |
|-----------------------|------------|
| Rotor dış çap         | 551.7 mm   |
| Rotor iç çap          | 160 mm     |
| Rotor nüve uzunluğu   | 395 mm     |
| Paketleme faktörü     | 0.96       |
| Stator nüve malzemesi | Steel 1008 |

Tablo 2.5’de belirtilen steel\_1008 tipi rotor nüve malzemesi yazılımın kütüphanesinde bulunmaktadır. Bu malzemenin B-H karakteristik eğrisi Şekil 2.4’de verilmiştir.



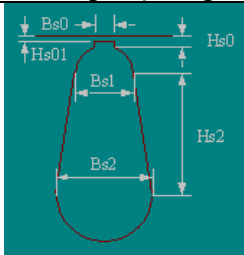
Şekil 2.4: Rotor nüve malzemesinin B-H karakteristiği.

Tablo 2.6: Rotor kutbunun boyutları ve malzeme tipi.

| Parametre              | Değer    |
|------------------------|----------|
| Kutup ayak genişliği   | 189.5 mm |
| Kutup ayak yüksekliği  | 36.6 mm  |
| Kutup gövde genişliği  | 110 mm   |
| Kutup gövde yüksekliği | 99.1 mm  |

Rotor kutuplarında bulunan damper sargıları ile ilgili parametreler Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7: Damper çubukları ile ilgili parametreler.

| Parametre                                                                           | Değer        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Oyuklar arası açı                                                                   | 4.57 derece  |
| Oyukla merkez arası açı                                                             | 13.71 derece |
| Kutup başına damper çubuğu sayısı                                                   | 6            |
|  | Hs0 1.5 mm   |
|                                                                                     | Bs0 2.5 mm   |
|                                                                                     | Bs1 10 mm    |
|                                                                                     | Bs2 10 mm    |
| Damper Çubukları Oyuk Boyutları                                                     |              |

Son olarak, modellenen generatörün uyarım veya alan sargılarıyla ilgili parametreler ise Tablo 2.8’de sunulmuştur.

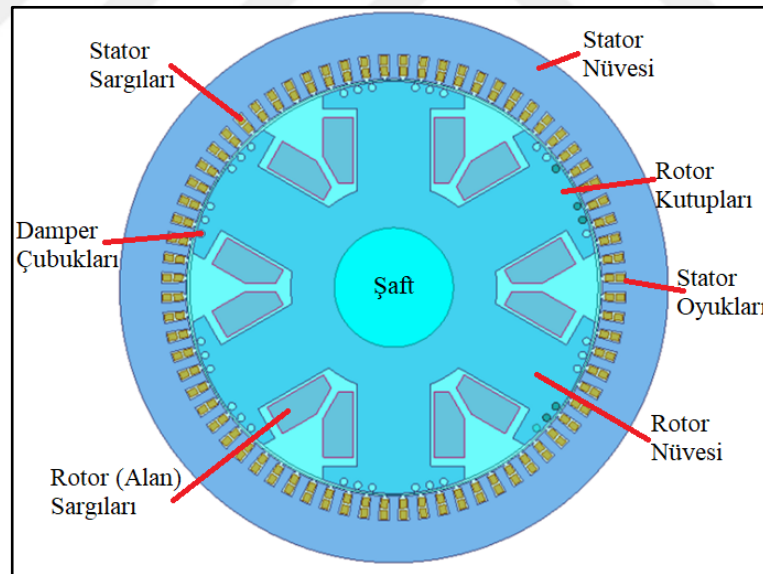
Tablo 2.8: Alan sargısı parametreleri.

| Parametre                   | Değer   | Parametre          | Değer  |
|-----------------------------|---------|--------------------|--------|
| Sargı Yüksekliği            | 104 mm  | Paralel Kol Sayısı | 1      |
| Sargı Genişliği             | 43.2 mm | İletken Çapı       | 5x3 mm |
| Kutup Başına İletken Sayısı | 380     |                    |        |

### 2.1.2. Maxwel 2d’de Senkron Generatörün Modellenmesi

Maxwell 2D modülünde, elektrik makinelerinin manyetik ve elektriksel simülasyonlar uygulanarak 2 boyutlu analizler gerçekleştirilebilmektedir. Manyetostatik, Eddy Akımı ve Geçici Hal Manyetik analizleri, manyetik çözücü başlığı altında yer alan analiz tipleridir. Elektrostatik, D.A. İletim, A.A. İletim ve Geçici Hal Elektrik analiz tipleri ise elektriksel çözücü başlığı altında yer almaktadır.

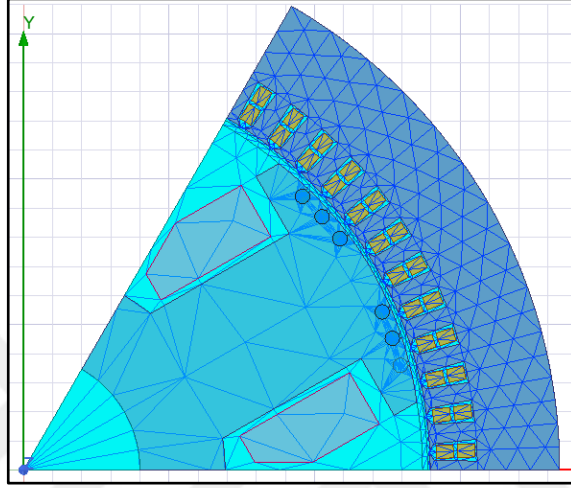
Bu tez çalışmasında, RMXprt modülünde oluşturulan senkron generatör modeli, 2 boyutlu olarak Maxwell ortamına aktarılmıştır. Maxwell 2D’ye aktarılan senkron generatörün 2 boyutlu modeli Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5: Senkron generatöre ait 2 boyutlu model.

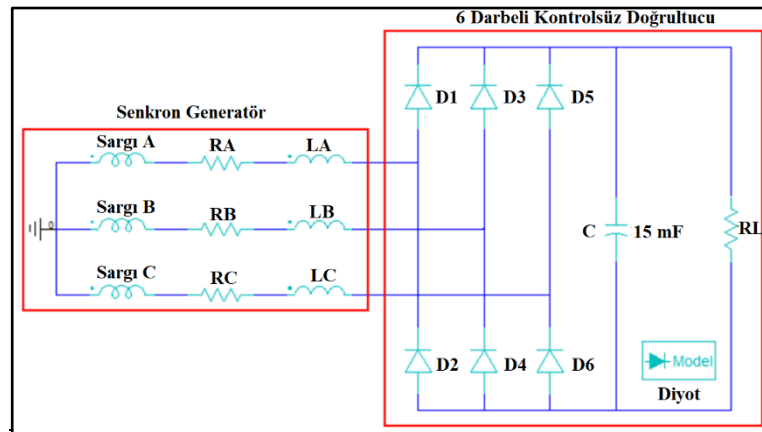
Analiz süresinin kısa tutulması ve bilgisayar yükünün azaltılması amacıyla 2 boyutlu modelin altıda biri analizlerde kullanılmıştır. 2 boyutlu modelin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılabilmesi için ağ örüntüsü (mesh) işleminin yapılması gereklidir. Maxwell 2D’de iki çeşit ağ oluşturma yapısı bulunmaktadır. Bunlar klasik

ağ örüntüsü oluşturma ve TAU (Triangular Adaptive Uniform) ağ örüntüsü oluşturmaktır. TAU ağ örüntüsü oluşturma klasik ağ örüntüsü oluşturmaya göre daha gelişmiş ve doğru sonuçlar vermektedir [67]. Bu nedenle modellediğimiz generatörde TAU ağ örüntüsü oluşturma seçeneği tercih edilmiştir. Modellenen generatörün 2 boyutlu ağ örüntüsü 1428 elemandan oluşturulmuştur. Ağ örüntüsünün görünümü Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6: Modellenen generatörün 2 boyutlu ağ örüntüsü (mesh).

Generatörün sargı ve yük tanımlaması Maxwell Circuit Editor de yapılmıştır. Circuit Editördeki eşdeğer devre görünümü Şekil 2.7’de sunulmuştur.



Şekil 2.7: Maxwell Circuit Editor’de oluşturulan eşdeğer devre.

Bu şekilden görüldüğü üzere, modellenen generatörün doğrusal olmayan yüklenme durumu, çıkışında saf direnç bağlı 6 darbeleri kontrolsüz bir doğrultucu ile

gerçekleştirilmiştir. Burada, 6 darbeli kontrolsüz doğrultucunun modern güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan bir yük tipi olduğunun altı çizilmelidir [68], [69].

Şekil 2.7’de RA, RB ve RC sargı dirençlerini ifade ederken, LA, LB ve LC ise sargı endüktanslarını ifade etmektedir. Doğrultucu çıkışındaki 15 mF’lık kondansatör, çıkış dalga gerilimindeki dalgalanmayı %0.5 civarında tutacak değerde seçilmiştir. 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu çıkışına bağlı RL yük direncinin değeri tam yükte (%100) 0.5  $\Omega$ ’dur.

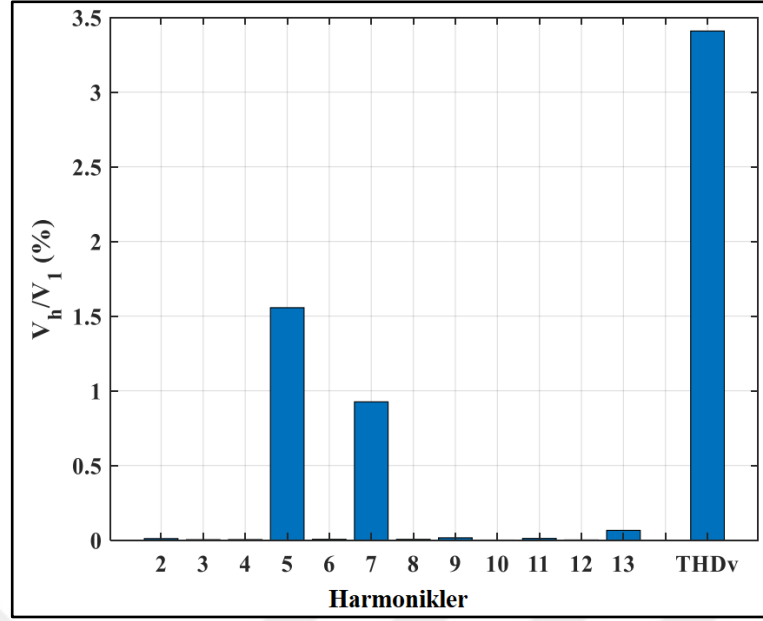
## 2.2. Senkron Generatörün D.A. Uyarımı Altında Davranışı

Modellenen generatörün, d.a. uyarım akımı için boşa çalışma durumunda terminal hat gerilimlerinin harmonik spektrumu Şekil 2.8’de, tam yüklenme durumunda terminal gerilimleri ve faz akımlarının harmonik spektrumu Şekil 2.9’da sunulmuştur. Ayrıca bu şekiller üzerinde akım ve gerilim için denklem (2.1) ve (2.2) dikkate alınarak hesaplanmış toplam harmonik bozulma (THD<sub>V</sub> ve THD<sub>I</sub>) miktarları verilmiştir. Şekillerdeki  $V_h / V_1$ , terminal hat gerilimlerinin h. harmonik bileşenlerinin temel harmonik bileşene göre bağlı değerlerini,  $I_h / I_1$  ise faz akımlarının h. harmonik bileşenlerinin temel harmonik bileşene göre bağlı değerlerini ifade etmektedir [70].

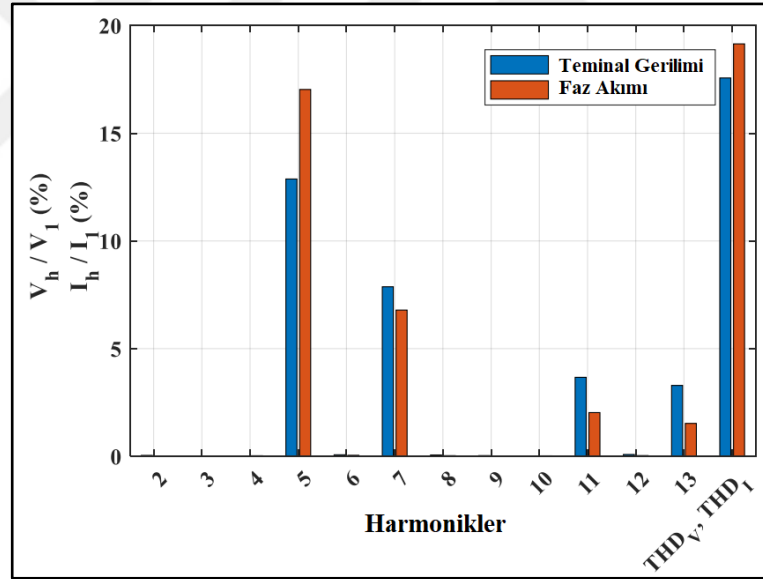
$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1}, \quad (2.1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1}, \quad (2.2)$$

Bu şekillerden, generatörün yüksüz durumdaki THD<sub>V</sub> değerinin yaklaşık %3.5 olduğu, ayrıca gerilime ait baskın harmonik bileşenlerinin 5. ve 7. harmonikler olduğu belirtilebilir. 5. harmonik bileşenin değeri yaklaşık olarak %1.5 iken 7. harmonik bileşenin değeri %1’in altındadır. Şekil 11’de, anma yüklenme durumunda THD<sub>I</sub> değeri yaklaşık %20 ve THD<sub>V</sub> değeri yaklaşık %18 olduğu görülmektedir. Anma yüklenme durumunda hem akım hem de gerilim için baskın harmonik numaraları 5, 7, 11 ve 13’dür.



Şekil 2.8: SG'nin terminal geriliminin yüksüz durumdaki harmonik spektrumu.



Şekil 2.9: SG'nin tam yüklenme durumdaki terminal gerilimi ve faz akımının harmonik spektrumu.

### 2.3. Senkron Generatörün Modüle Edilmiş Alan Akımı Altındaki Davranışı

Bu kısımda, modüle edilmiş uyarım akımının, doğrusal olmayan yüklenme altında generatörün terminal gerilimi THD değerine ve harmonik bileşenlerine etkisinin analizi amaçlanmıştır. Bu amaçla, generatörün tam yüklenme (%100), yarı

yüklenme (%50) ve çeyrek yüklenme (%25) durumlarında, alan sargısına d.a. uyarımı üzerine bir sinüzoidal akım bindirilerek Maxwell 2D ortamında simülasyonlar yapılmıştır. Buna göre, simülasyonlarda dikkate alınan modüle edilmiş uyarım akımının ifadesi,

$$i_f(t) = I_{fdc} + \sqrt{2} \cdot I_{fh} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot t + \alpha_h) , \quad (2.3)$$

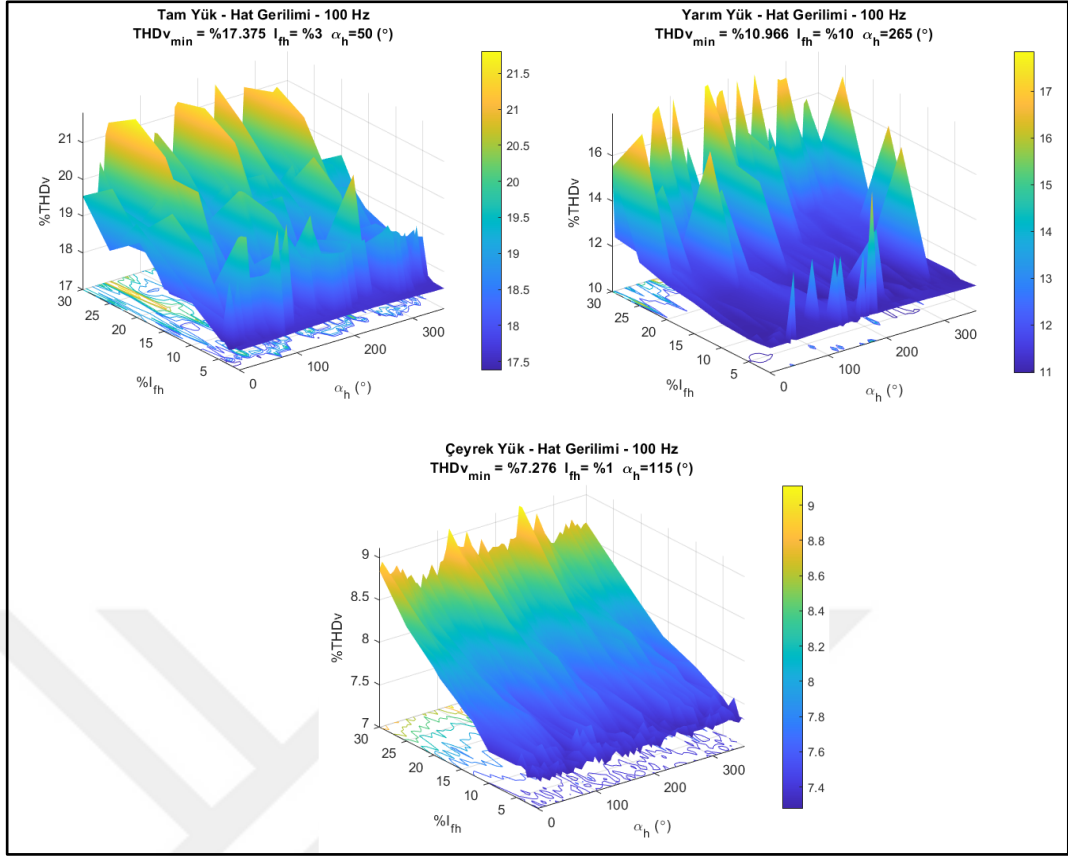
olarak yazılabilir. Bu ifadede,  $I_{fdc}$  d.a. bileşeninin genliğini,  $I_{fh}$  d.a. bileşeninin yüzdesi cinsinden h. harmonik bileşeninin etkin değerini,  $f_h$  ve  $\alpha_h$  ise sırasıyla h. harmonik bileşeninin frekansını ve faz açısını ifade etmektedir.

Uyarım akımı modülasyonunda, d.a. bileşen anma değerinde sabit tutulmuş, sinüzoidal bileşeninin genliği ise d.a. bileşeninin genliğinin %1, %2, %3, %4, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30'u oranlarında seçilmiştir. Ayrıca her bir genlik değeri için sinüzoidal bileşeninin frekansı 100 Hz ile 900 Hz arasında 100'er Hz'lik adımlarla değiştirilmiş, faz açısı ise  $0^\circ$  ile  $355^\circ$  arasında  $5^\circ$ 'er derecelik adımlarla değiştirilmiştir.

Böylece, 10 genlik, 9 frekans, 72 açı ve 3 yüklenme oranı ile toplamda 19440 analiz yapılmıştır.

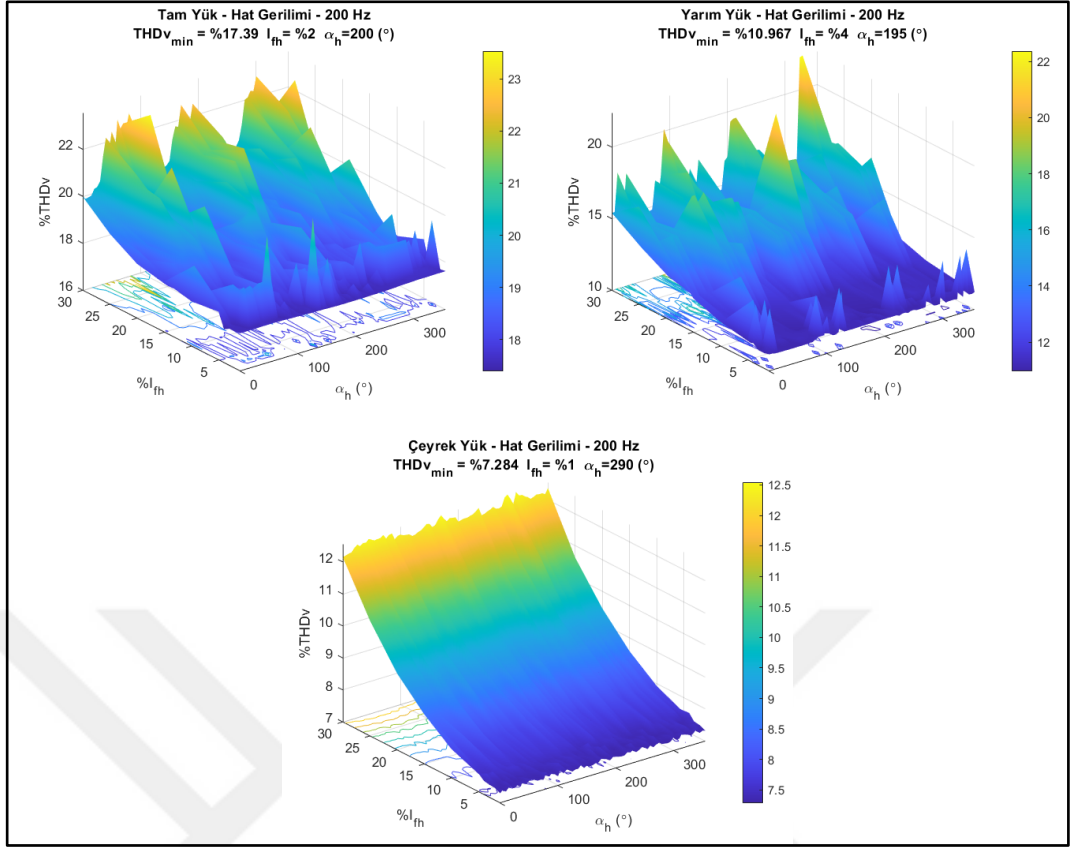
Analizler 0.3 s süre için 0.0002 s örnekleme adımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz, Ryzen 9 3900X işlemcili, 32 GB ram özellikli bir bilgisayarda yaklaşık 21.5 dakika sürmüştür. THD<sub>v</sub>'ler hesaplanırken son periyotlar ve 50. harmoniğe kadar olan harmonikler dikkate alınmıştır.

Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için uyarım akımının sinüzoidal bileşeninin genliği ve faz açısına bağlı olarak terminal hat gerilimlerine ait THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimleri Şekil 2.10-2.18 arasında çizdirilmiştir. Grafiklerde uyarım akımının genliği d.a. bileşeninin yüzdesi cinsinden verilmiştir. Grafikler üzerinde her yüklenme oranı için hesaplanan minimum THD<sub>v</sub> değerleri belirtilmiştir.



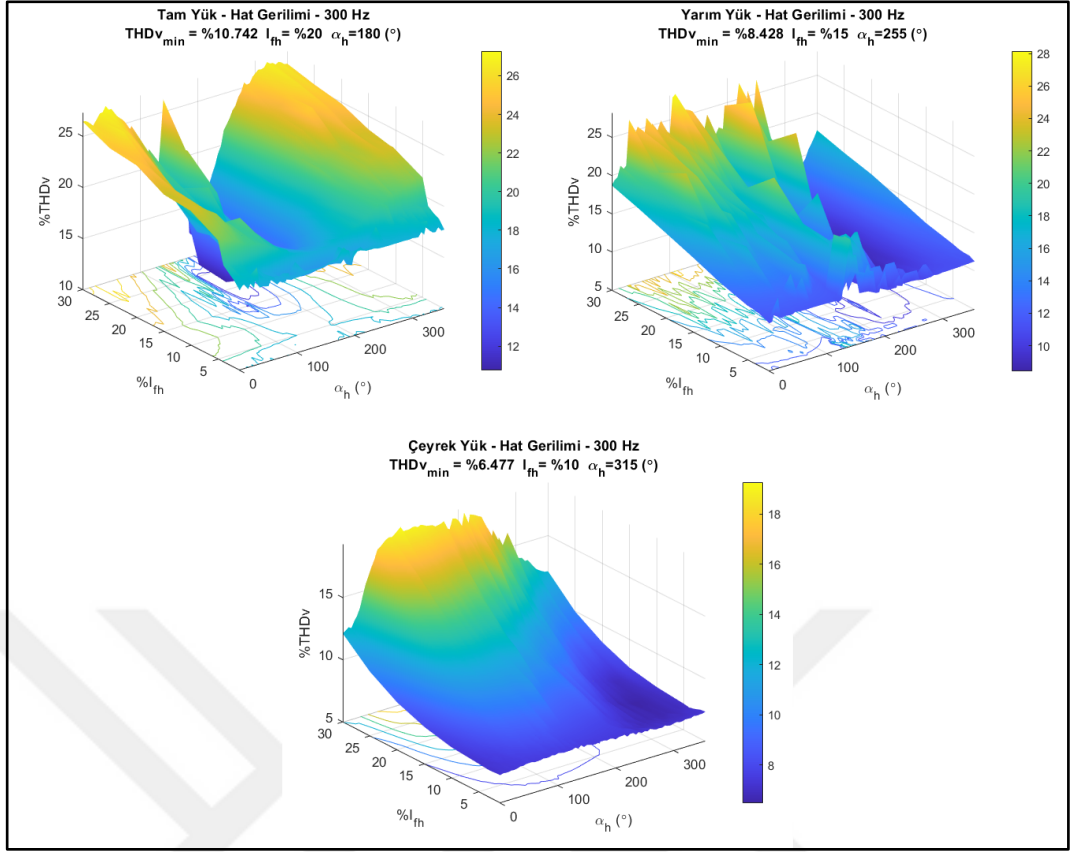
Şekil 2.10: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 100 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimi.

100 Hz frekanslı sinüzoidal bileşenin d.a. üzerine bindirildiği modüle edilmiş uyarım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında hesaplanan minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin sırasıyla %17.38, %10.97 ve %7.28 olduğu Şekil 2.10'dan görülmektedir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %3-50<sup>0</sup>, %10-265<sup>0</sup> ve %1-115<sup>0</sup>'dir. Ayrıca uygulanan modülasyon akımında, saf d.a. uyarım akımına kıyasla, THD<sub>v</sub>'deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %0.91, %2.23 ve %0.95'dir.



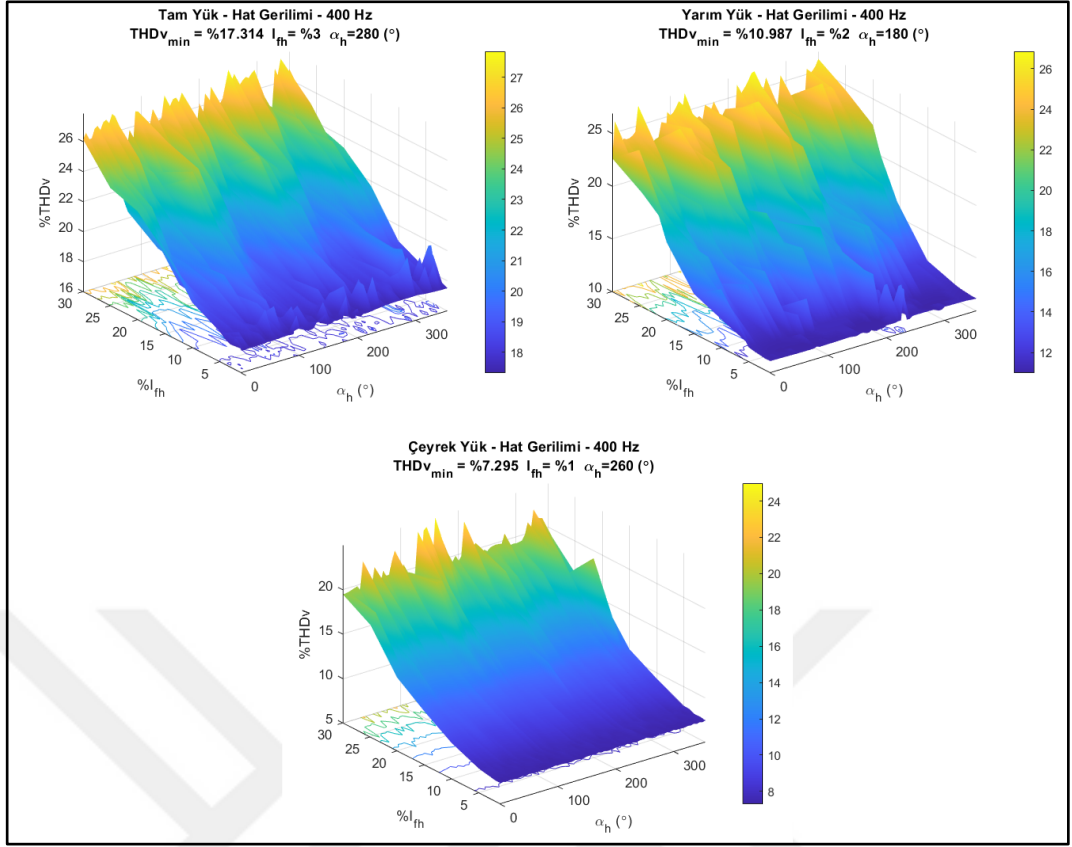
Şekil 2.11: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 200 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimi.

200 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin sırasıyla %17.39, %10.97 ve %7.28 olduğu Şekil 2.11'den görülmektedir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %2-200°, %4-195° ve %1-290°'dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla, THD<sub>v</sub>'deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %0.86, %2.23 ve %0.95'dir.



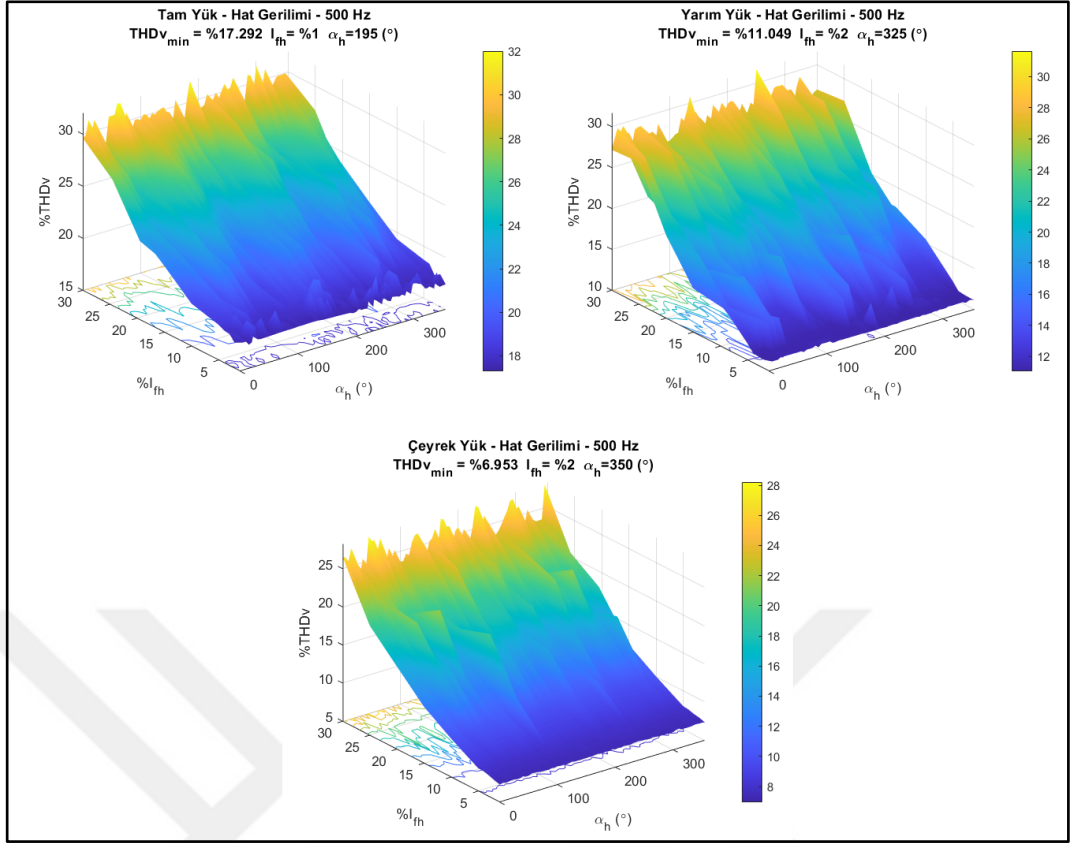
Şekil 2.12: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 300 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimi.

300 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin sırasıyla %10.74, %8.43 ve %6.48 olduğu Şekil 2.12’den görülmektedir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %20-180<sup>0</sup>, %15-255<sup>0</sup> ve %10-315<sup>0</sup>’dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla, THD<sub>v</sub>’deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %38.77, %24.87 ve %11.84’dür.



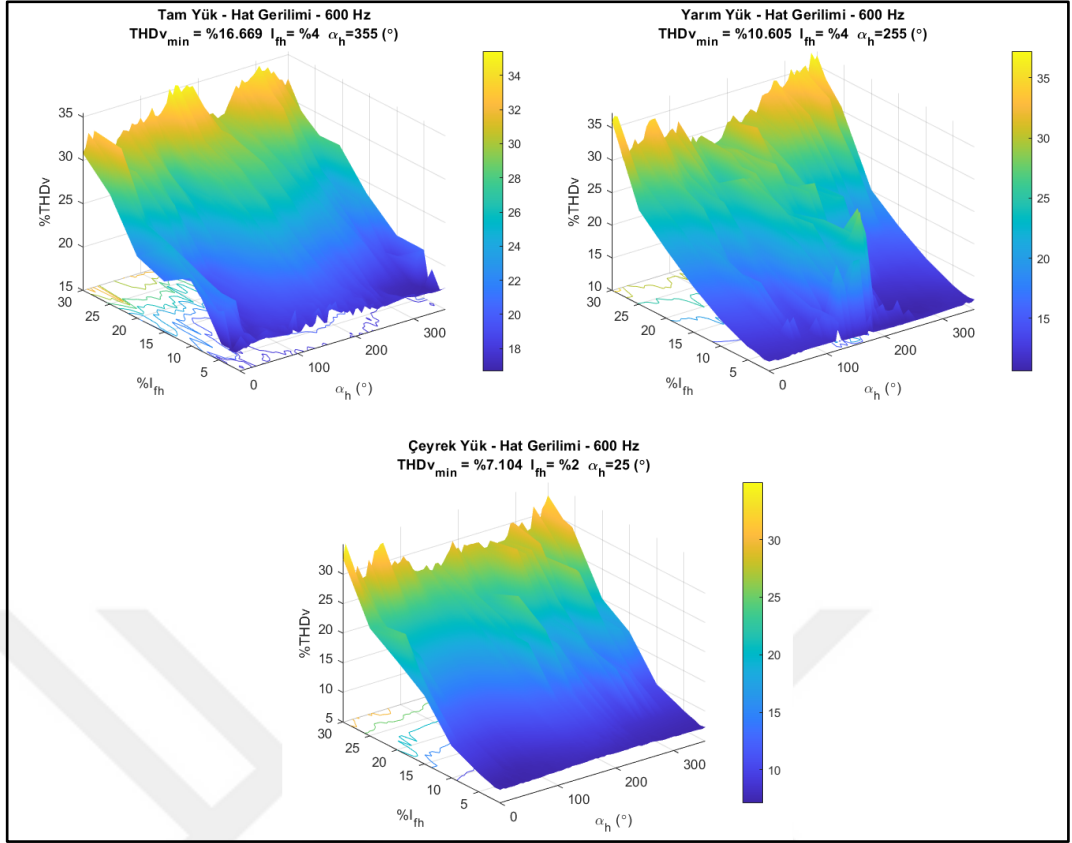
Şekil 2.13: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 400 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin  $THD_v$  değerlerinin değişimi.

400 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum  $THD_v$  değerlerinin sırasıyla %17.31, %10.99 ve %7.3 olduğu Şekil 2.13'den görülmektedir. Minimum  $THD_v$  değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %3-280°, %2-180° ve %1-260°'dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla,  $THD_v$ 'deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %1.31, %2.05 ve %0.82'dir.



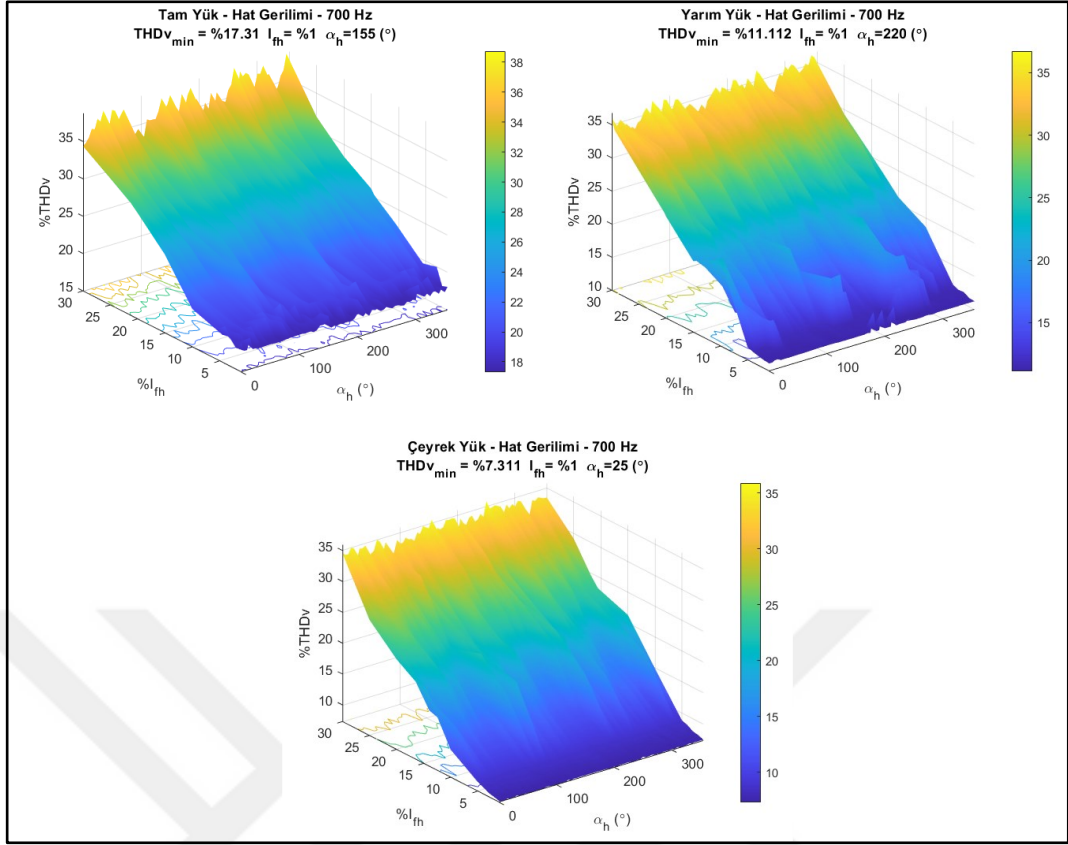
Şekil 2.14: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 500 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimi.

500 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin sırasıyla %17.29, %11.05 ve %6.95 olduğu Şekil 2.14'den görülmektedir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %1-195<sup>0</sup>, %2-325<sup>0</sup> ve %2-350<sup>0</sup>'dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla, THD<sub>v</sub>'deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %1.43, %1.52 ve %5.44'dür.



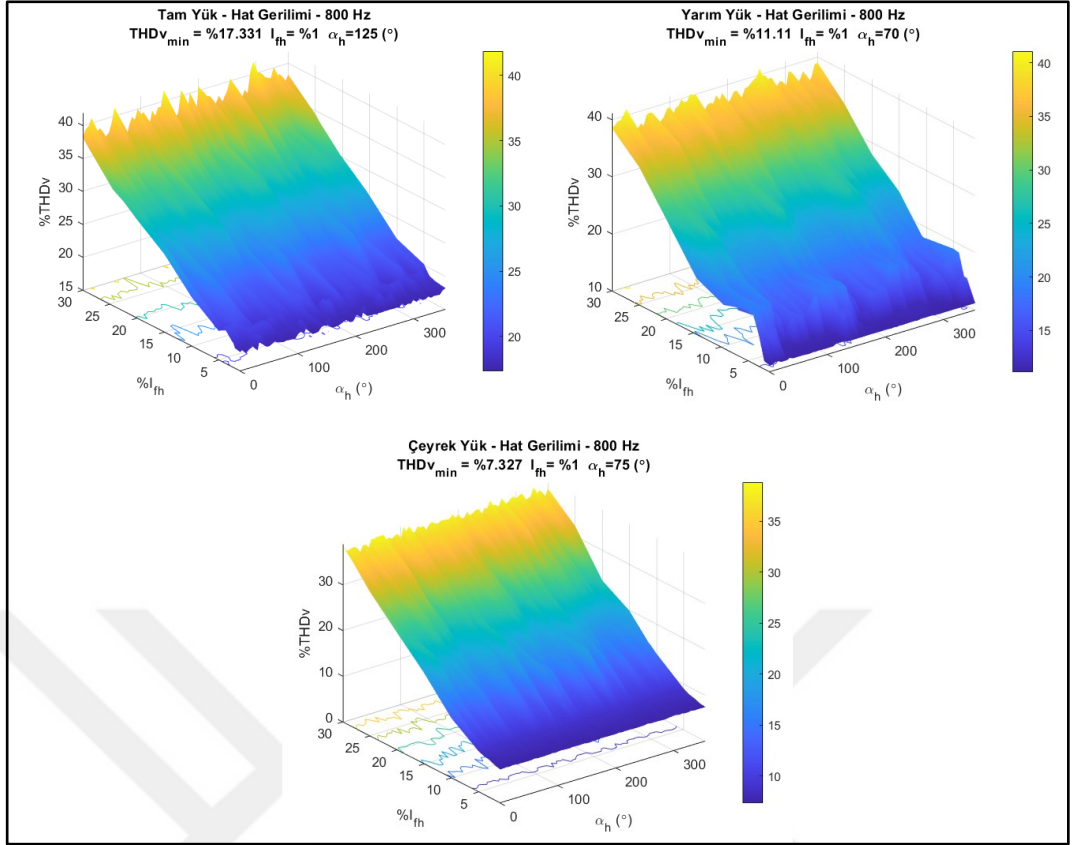
Şekil 2.15: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 600 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimini.

600 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin sırasıyla %16.67, %10.61 ve %7.1 olduğu  ekil 2.15'den görülmektedir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten k   ge yüklenme oranları için sırasıyla %4-355<sup>0</sup>, %4-255<sup>0</sup> ve %2-25<sup>0</sup>'dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla, THD<sub>v</sub>'deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %4.96, %5.44 ve %3.4'd r.



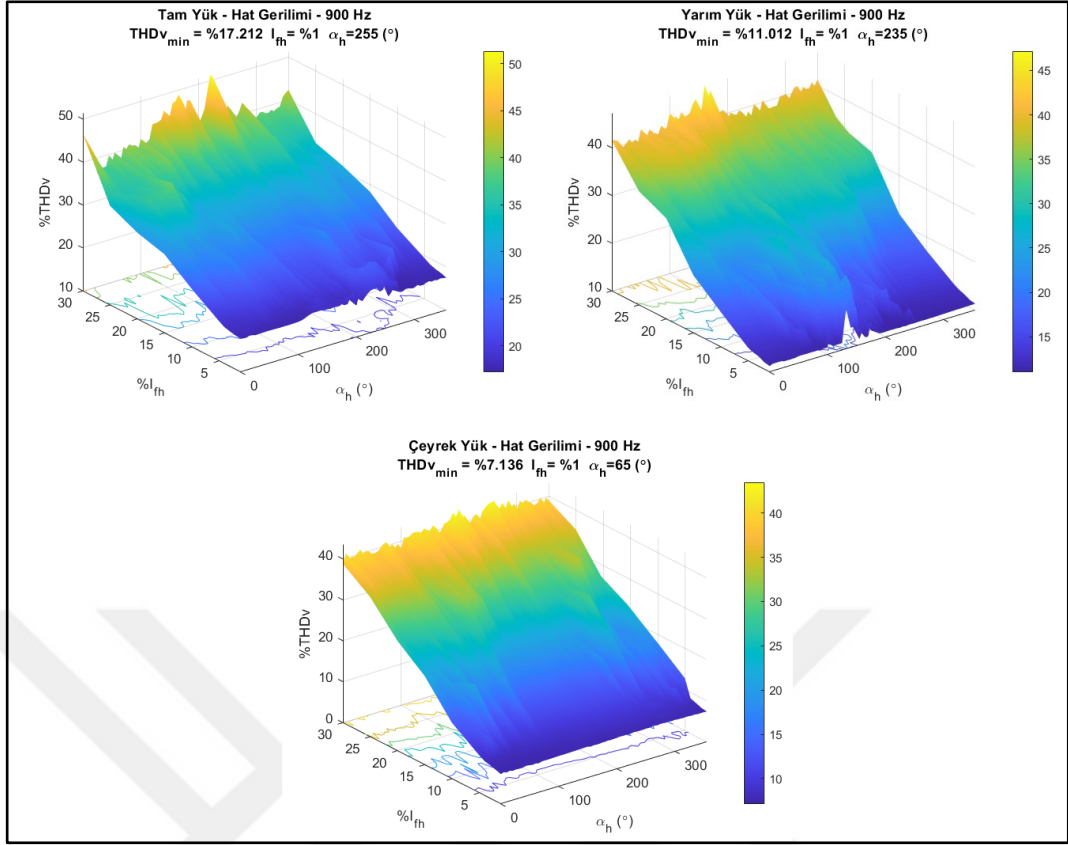
Şekil 2.16: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 700 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin  $THD_v$  değerlerinin değişimi.

700 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum  $THD_v$  değerlerinin sırasıyla %17.31, %11.11 ve %7.31 olduğu Şekil 2.16'dan görülmektedir. Minimum  $THD_v$  değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %1-155°, %1-220° ve %1-25°'dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla,  $THD_v$ 'deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %1.31, %0.98 ve %0.54'dür.



Şekil 2.17: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 800 Hz frekanslı uyartım akım bileşenin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin  $THD_v$  değerlerinin değişimi.

800 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum  $THD_v$  değerlerinin sırasıyla  $\%17.33$ ,  $\%11.11$  ve  $\%7.33$  olduğu Şekil 2.17’den görülmektedir. Minimum  $THD_v$  değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla  $\%1-125^\circ$ ,  $\%1-70^\circ$  ve  $\%1-75^\circ$ ’dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla,  $THD_v$ ’deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla  $\%1.2$ ,  $\%0.98$  ve  $\%0.27$ ’dir.

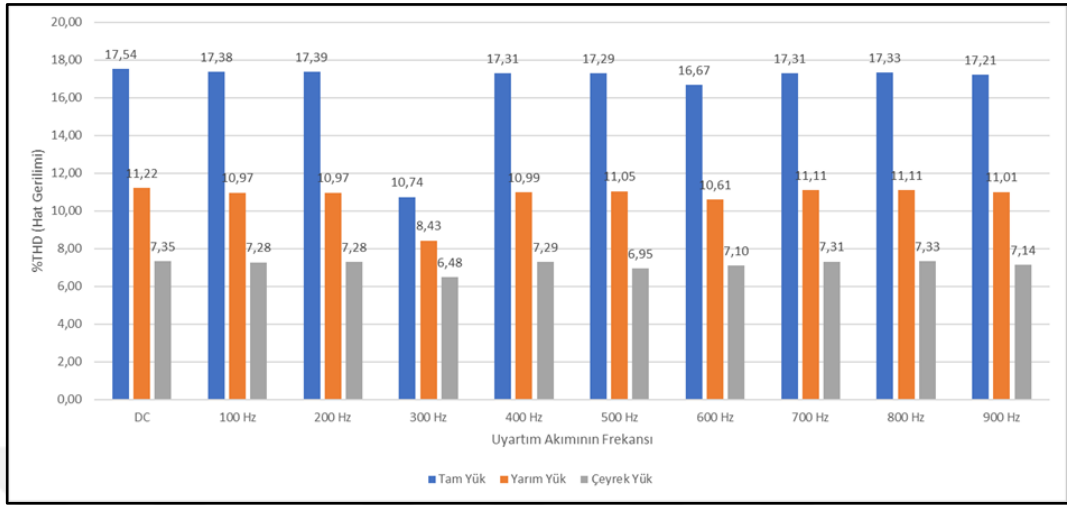


Şekil 2.18: Tam, yarım ve çeyrek yüklenme oranları için 900 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimi.

900 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen ve d.a. bileşen içeren uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin sırasıyla %17.21, %11.01 ve %7.14 olduğu Şekil 2.18’den görülmektedir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %1-255<sup>0</sup>, %1-235<sup>0</sup> ve %1-65<sup>0</sup>’dir. Bu modülasyon akımında, saf d.a. uyartım akımına kıyasla, THD<sub>v</sub>’deki iyileşme oranı ilgili yüklenme oranları için sırasıyla %1.88, %1.87 ve %2.86’dır.

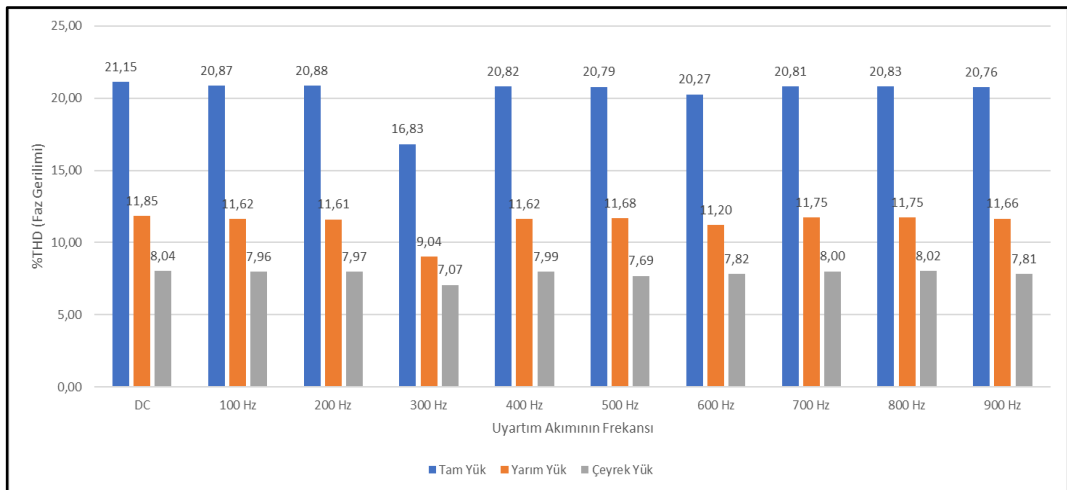
Buraya kadar sunulan sonuçlardan, saf d.a. ve modüle edilmiş uyartım akımları için elde edilen hat gerilimlerinin minimum THD<sub>v</sub> değerlerinin karşılaştırması Şekil 2.19’da sunulmuştur. Bu şekilden, THD<sub>v</sub>’yi en fazla iyileştiren modüle uyartım akımının 300 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen veya 6. harmonik bileşen içeren uyartım akımı olduğu görülmektedir. Böylece, bu uyartım akımı için tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumunda elde edilen THD<sub>v</sub> iyileştirme oranlarının %38,76 , %24,86 ve %11,83 en yüksek iyileştirme oranları olduğu ifade edilebilir. Burada, yüklenme oranı

azaldıkça, modüle uyarım akımlarının minimum  $THD_V$  değerleri ile saf d.a. uyarımdaki  $THD_V$  değeri arasındaki farkın azaldığının altı çizilmelidir.



Şekil 2.19: D.a. üzerine bindirilmiş sinüzoidal akım uygulanması durumunda farklı senaryolar için hat gerilimlerinin  $THD_V$ 'si.

Ayrıca, analizler sırasında test edilen modüle edilmiş uyarım akımları için elde edilen faz gerilimlerinin minimum  $THD_V$  değerlerinin karşılaştırması Şekil 2.20'de verilmiştir.



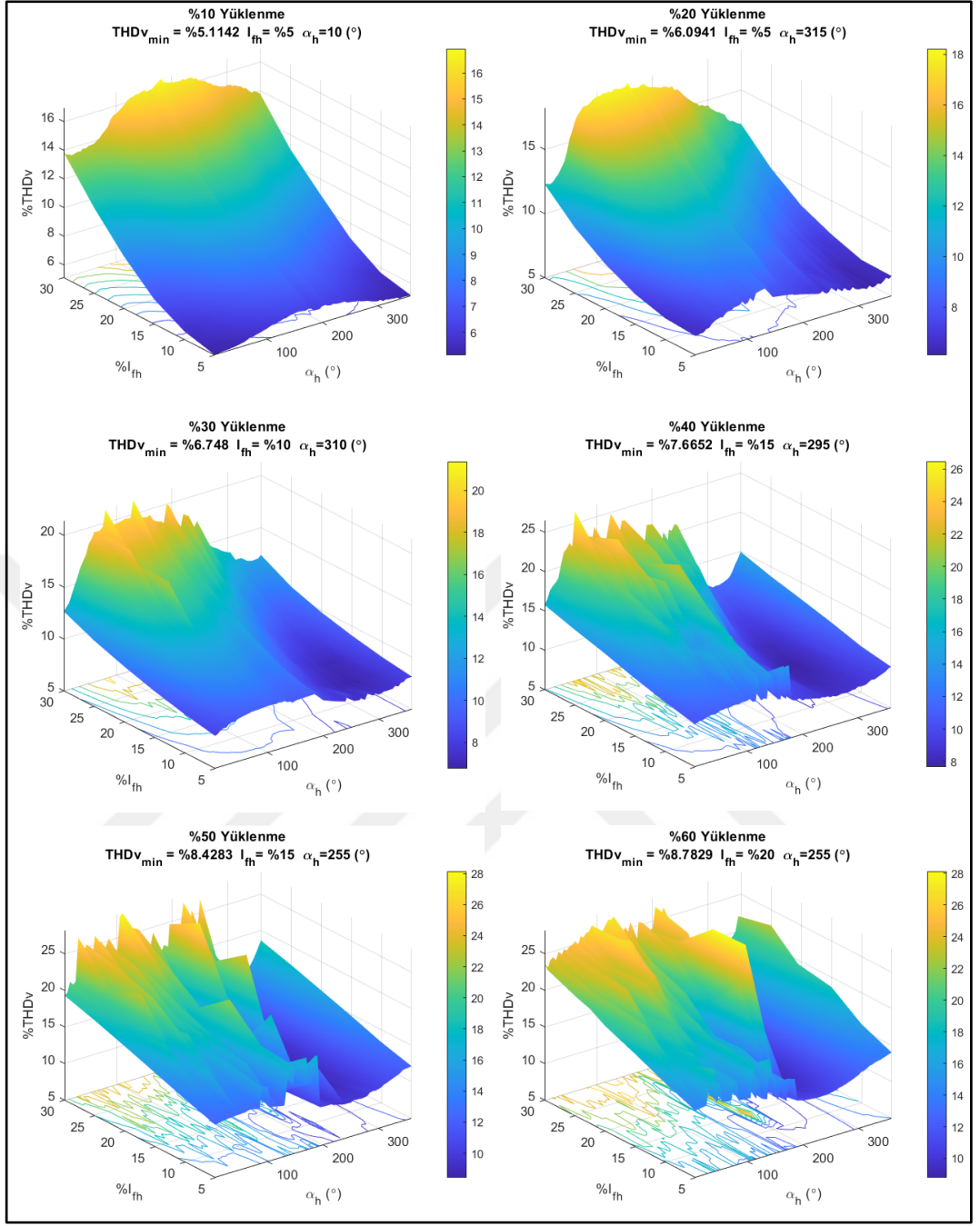
Şekil 2.20: D.a. üzerine bindirilmiş sinüzoidal akım uygulanması durumunda farklı senaryolar için faz gerilimlerinin  $THD_V$ 'si.

Şekil 2.20 incelendiğinde hat gerilimlerinde olduğu gibi faz gerilimlerinin  $THD_V$  değerinin de 300 Hz frekansa sahip sinüzoidal bileşenli modüle uyarım akımı için tüm

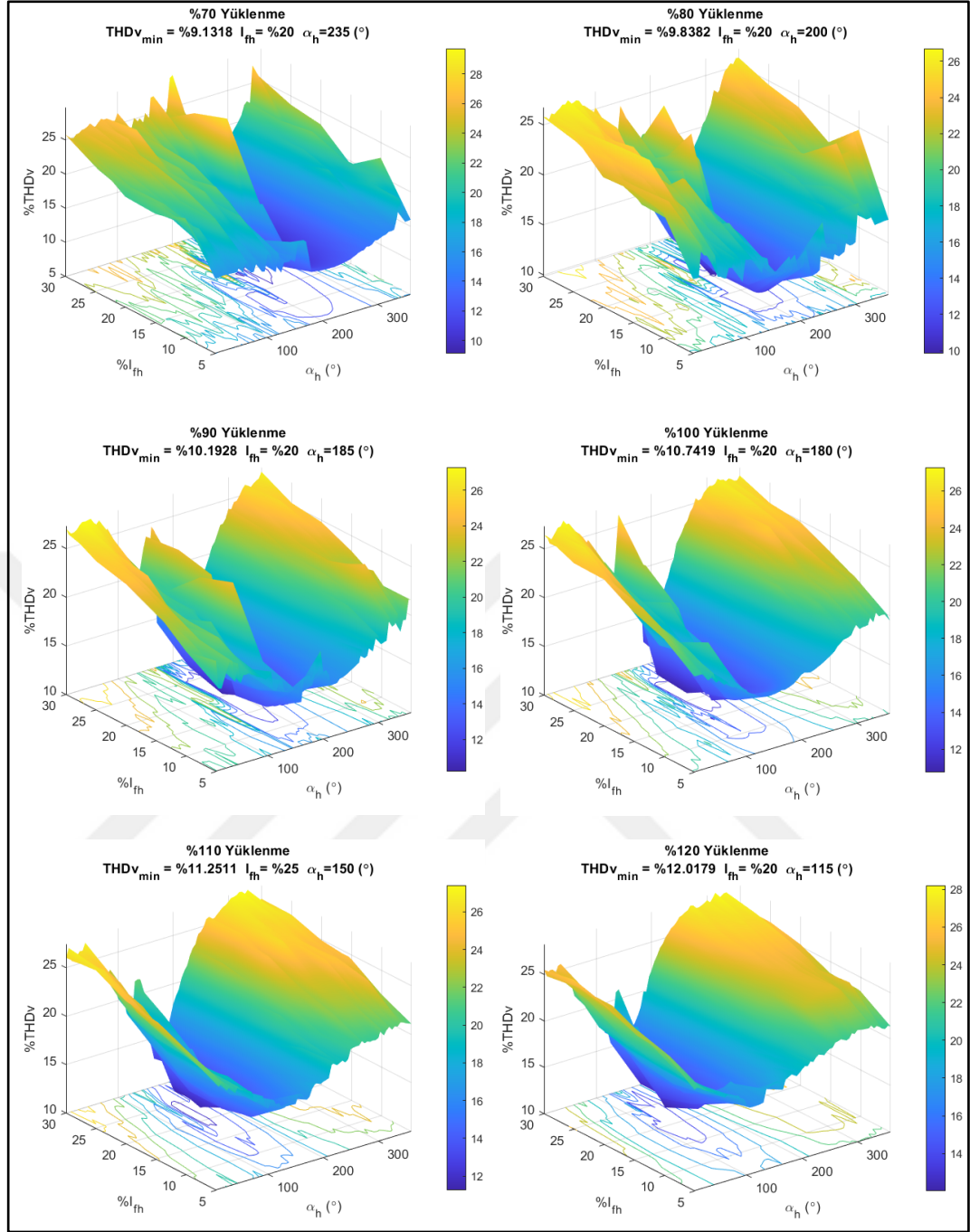
yüklenme oranlarında minimum değere ulaştığı görülmüştür. Bu minimum THD<sub>v</sub> değerleri, tam yüklenme durumunda %16.83, yarı yüklenme oranında %9.04 ve çeyrek yüklenme durumunda %7.07'dir. Bu değerler, saf d.a. uyarımdaki faz gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değeriyle karşılaştırıldığında, tam yüklenme durumunda %20,42 oranında, yarı yüklenme durumunda %23,71 oranında, çeyrek yüklenme durumunda ise %12,06 oranında iyileşmeye sahip olduğu ifade edilebilir. Minimum THD<sub>v</sub> değerlerine karşılık gelen 300 Hz sinüzoidal bileşen genlik ve açıları ise büyükten küçüğe yüklenme oranları için sırasıyla %20-180<sup>0</sup>, %15-255<sup>0</sup> ve %10-315<sup>0</sup> değerlerindedir.

Şekil 2.19 ve Şekil 2.20'ye göre 300 Hz frekanslı sinüzoidal bileşenli modüle uyarım akımı için daha çok sayıda yüklenme oranı dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Böylece, anma yükün %10'u ile %120'si arasında %10'luk artışlarla 12 farklı yüklenme oranında analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu analizlerde, alan sargısına uygulanacak olan 6. harmonik akımın genliği düşük genliklerin THD<sub>v</sub> iyileştirmesine etkisinin ihmal edilebilir olduğu dikkate alınarak %5, %10, %15, %20, %25 ve %30, faz açısı ise 5'er derecelik adımlarla 0° ile 355° arasında uygulanmıştır. Böylece, 12 yüklenme oranında, 6 genlikte ve 72 faz açısında 5184 analiz yapılmıştır. Analizlerde hesaplanan faz ve hat gerilimi THD<sub>v</sub> grafikleri sırasıyla Şekil 2.21 ve Şekil 2.22'de çizdirilmiştir.

Şekil 2.21 ve Şekil 2.22'den yüklenme oranına göre minimum THD<sub>v</sub>'nin %5.11 ile %12.02 arasında değiştiği, minimum THD<sub>v</sub>'yi sağlayan 300 Hz'lik uyarım akımı sinüzoidal bileşeni genliğinin d.a. uyarım akımının genliğinin %5 ile %25 arasında değiştiği, faz açısının ise 10 derece ile 315 derece arasında değiştiği sonucuna varılabilir.



Şekil 2.21: %10-%60 yüklenme oranları için 300 Hz frekanslı uyarım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THDv değerlerinin değişimi.



Şekil 2.22: %70-%120 yüklenme oranları için 300 Hz frekanslı uyartım akım bileşeninin genlik ve faz açısıyla hat gerilimlerinin THD<sub>v</sub> değerlerinin değişimi.

## 2.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde, SG'lerin doğrusal olmayan yüklenme altında analizi için Ansys Maxwell ortamında modellenmesi üzerine detaylı bilgi verilmiştir. Devamında, tez kapsamında modellenen 538 kVA gücünde ve 400 V anma geriliminde üç fazlı ÇKSG'nin doğrusal olmayan yüklenme altında saf d.a. uyarım akımı ve modüle edilmiş uyarım akımları altında terminal geriliminin harmonik davranışı analiz edilmiştir.

Analizlerde, doğrusal olmayan yük olarak, endüstride yaygın kullanılan 6 darbeli doğrultucu kullanılmıştır. 6 darbeli doğrultucunun d.a. tarafına saf direnç bağlanmıştır.

Uyarım akımı modülasyonunda, d.a. bileşen üzerine bir sinüzoidal dalga bindirilmiştir. Modülasyon için d.a. bileşen anma değerinde sabit tutulmuş, sinüzoidal bileşenin genliği ise d.a. bileşenin genliğinin %30'una varan değerlere kadar artırılmıştır. Ayrıca her bir genlik değeri için sinüzoidal bileşenin frekansı 100 Hz ile 900 Hz arasında ve faz açısı ise  $0^\circ$  ile  $355^\circ$  arasında değiştirilmiştir.

Analizler neticesinde, modellenen çıkık kutuplu üç fazlı senkron generatör için;

Yüksüz durumdaki terminal hat gerilimlerinin toplam harmonik bozulma değerinin ( $THD_V$ ) yaklaşık %3.5 ve baskın harmonik bileşenlerinin 5. ve 7. harmonikler olduğu,

Anma gücünde 6 darbeli doğrultucu yükünü beslerken faz akımlarının toplam harmonik bozulma değerinin ( $THD_I$ ) yaklaşık %20 ve  $THD_V$  değerinin yaklaşık %18 olduğu, ayrıca hem akım hem de gerilim baskın harmonik numaralarının 5, 7, 11 ve 13 olduğu,

6 darbeli doğrultucu yük tipi tam, yarım ve çeyrek yüklenme için  $THD_V$ 'yi en fazla iyileştiren modüle uyarım akımının 300 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen veya 6. harmonik bileşen içeren uyarım akımı olduğu,

Harmonik bozulmayı en fazla iyileştiren modüle uyarım akımının, saf d.a. uyarım akımına kıyasla tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumunda elde edilen  $THD_V$  iyileştirme oranlarının %38,76 , %24,86 ve %11,83 olduğu,

Yüklenme oranı azaldıkça, modüle uyarım akımlarının minimum  $THD_V$  değerleri ile saf d.a. uyarımdaki  $THD_V$  değeri arasındaki farkın azaldığı,

Yüklenme oranının %10 ile %120 arasında değerleri için minimum  $THD_v$ 'yi sağlayan 300 Hz'lik uyartım akımı sinüzoidal bileşeni genliğinin d.a. uyartım akımının genliğinin %5 ile %25 arasında değiştiği, faz açısının ise 10 derece ile 315 derece arasında değiştiği, çıktılarına ulaşılmıştır.



### 3.YSA TEMELLİ THD<sub>V</sub> TAHMİN MODELİ

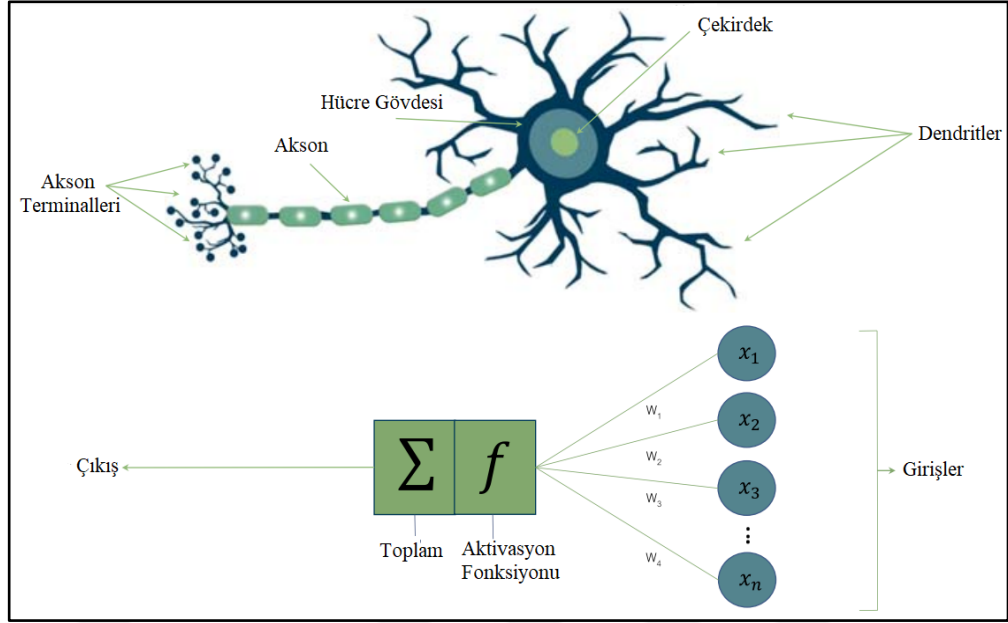
Bu bölümde, modellenen senkron generatörün çeşitli doğrusal olmayan yüklenme oranları ve uyarım akımı modülasyon durumları altında terminal gerilimi THD<sub>V</sub> değerinin tahmini için bir araç geliştirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre, ilk olarak YSA hakkında genel bir bilgi verilmiştir. İkinci olarak, bir önceki bölümde SEA'den elde edilen THD<sub>V</sub> verileri dikkate alınarak 12 farklı eğitim algoritması, 3 aktivasyon fonksiyonu kombinasyonunun oluşturduğu 9 aktivasyon fonksiyonu çifti ve farklı nöron sayıları için yapay sinir ağları (YSA) eğitimi gerçekleştirilmiştir. Böylece, THD<sub>V</sub> tahmini için araç olarak kullanılmak üzere en uygun YSA mimarisi belirlenmiştir.

#### 3.1. Yapay Sinir Ağları

YSA, 1943 yılında McCulloch ve Pitts [71], yapay nöronların matematiksel modelini tanıtan çalışma fikrinin ortaya atılmasıyla başlamıştır. YSA düşüncesi devamında yıllar içinde gelişimini sürdürmüş ve günümüzde sistem tanımlama, tahmin, örüntü tanıma, sınıflandırma ve süreç kontrolü gibi çeşitli alanlarda kullanılan bir makine öğrenme yöntemi haline almıştır.

YSA, giriş ile çıkış verileri arasında ilişki kurulamadığı, kara kutu olarak tabir edilen ve doğrusal olmayan ilişkilerin olduğu sistemlerin, modellenmesinde kullanılan insan beyninin öğrenme sürecinden esinlenen ve sinir sisteminin yapısını taklit eden bir araçtır [72], [73].

Sinir sisteminin en küçük birimi nöronlar olup nöronun yapısı Şekil 3.1'de [74] verilmektedir. Bir biyolojik nöron, hücre gövdesi, çekirdek, dendritler, akson ve akson terminalleri kısımlarından meydana gelir. Bu kısımlardan hücre gövdesi, bir işlemci görevi görür. Dendritler tarafından alınan bilgi, hücre gövdesinde işlenerek akson terminalleri vasıtasıyla başka bir nörona iletilir. Biyolojik nörondaki dendritler, yapay nörondaki girişlerdir. Biyolojik nöronun akson terminalleri ise yapay nörondaki çıktılarıdır [74].



Şekil 3.1: Sinir hücresi (biyolojik nöron) ve yapay nöronun yapısı.

Şekil 3.1'in alt kısmı, nöron adı verilen yapay sinir hücresini temsil etmektedir. Her bir nörona bağlı olan her bağlantı için ağırlıklar (  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ) olarak adlandırılan sayısal değerler bulunmaktadır. Bu değerler girişi uyarır. Bir aktivasyon fonksiyonu, nöronun uyarılmasını kontrol etmek için kullanılır. Yapay sinir hücresi, ilişkili ağırlıklarla birlikte net giriş sinyalini hesaplayarak gelen sinyalleri toplar. Bu net giriş sinyalleri, aktivasyon fonksiyonuna girer ve yapay sinir hücresinin çıkış sinyali hesaplanır [75].

YSA modellerinin, katman sayısına göre tek katmanlı ve çok katmanlı modeller [76], sinyalin akış yönüne göre ileri beslemeli ve geri beslemeli modeller, öğrenme algoritmasına göre denetimli (danışmanlı), denetimsiz (danışmansız) ve takviyeli öğrenmeli modeller, öğrenme zamanına göre statik ve dinamik öğrenmeli modeller olmak üzere çeşitli tipleri vardır.

Tek katmanlı ağ yapısı, girdi ve çıktı katmanından oluşmakta, genellikle doğrusal problemlerde tercih edilmektedir. Çok katmanlı ağ yapısı ise, birer giriş ve çıkış katmanından, bir veya birden fazla gizli katmandan oluşmakta ve doğrusal olmayan problemlerde tercih edilmektedir. Problemin karmaşıklığına göre gizi katman sayısı artırılabilir.

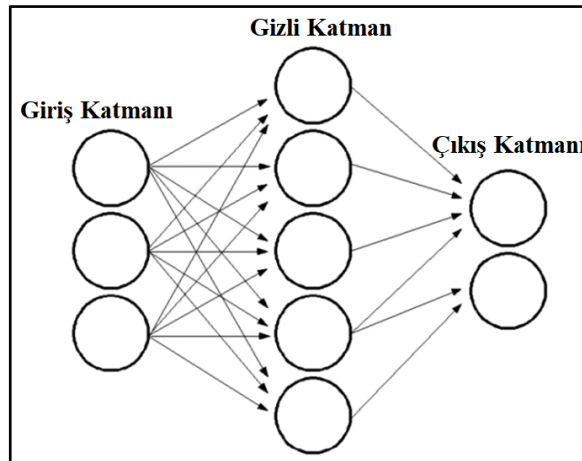
İleri beslemeli ağ yapısında, katmandaki nöronların çıkışları ağırlıklar üzerinden sonraki katmana aktarılmakta ve girdiler hiçbir değişikliğe uğramadan gizli katmana

iletilmektedir. Geri beslemeli ağ yapısında ise, nöronun çıkışı kendisine veya diğer nöronlara aktarılmaktadır.

Denetimli öğrenme, etiketli veri setinin kullanıldığı, eğitimde kullanılmayan verilerin ağa verildiği durumda tahmin edebilme yetisine sahip, veri setine ve öğrenme algoritmalarına göre öğrenmeyi gerçekleştirebilen, genellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan öğrenme algoritması türüdür. Denetimsiz öğrenme, etiketsiz verilerin kullanıldığı, genellikle gerçek zamanlı tahminlerde kullanılan, veri setine ve verilerin sınıflandırılmasına göre öğrenmeyi gerçekleştirebilen, ilişkilendirme problemlerinde tercih edilen öğrenme algoritması türüdür. Takviyeli öğrenme, çevre ile etkileşim neticesinde deneme yanılma yoluyla öğrenmenin gerçekleştiği, deneyime dayalı optimal öğrenme stratejilere göre öğrenmeyi gerçekleştirebilen, genellikle yapay zeka problemlerinde kullanılan davranışsal öğrenme algoritması türüdür [77].

Statik öğrenme, geri besleme öğelerin bulunmadığı ve gecikmenin olmadığı, çıktının doğrudan girdiden alınan verinin ileri beslemeyle hesaplandığı öğrenme türüdür. Dinamik öğrenme ise, çıkışın sadece ağın anlık girişine bağlı olmayan aynı zamanda önceki girişlere, çıktılara ve ağın durumuna bağlı olan öğrenme türüdür [78].

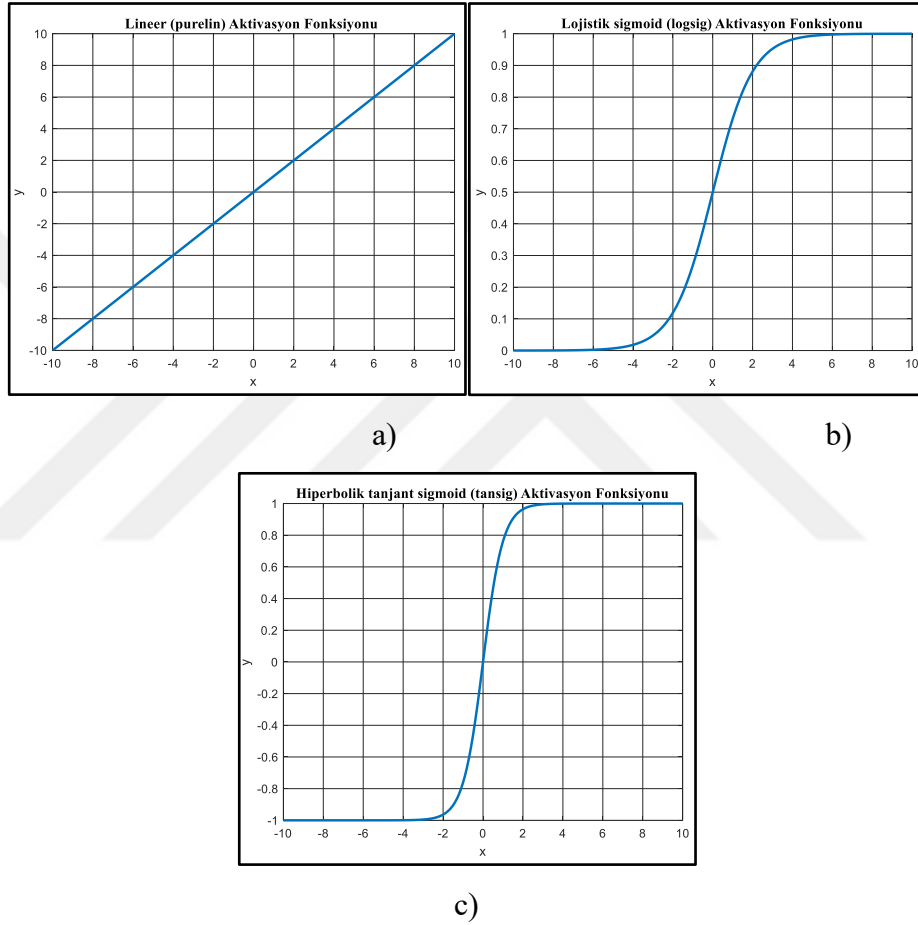
Bu tez çalışmasında da kullanılacak olan çok katmanlı ileri beslemeli ağ mimarisi Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu ağ mimarisi, giriş katmanı, çıkış katmanı ve gizli katmanlardan oluşmaktadır. Tez çalışmasında tek gizli katmanlı ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 3.2: Çok katmanlı ileri beslemeli ağ.

Çok katmalı ağlar, üç ayırt edici özelliğe sahiptir [79];

Ağıdaki her nöron modeli bir aktivasyon fonksiyonu içerir. Matematiksel olarak kullanımı kolay olduğundan yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları [80] Şekil 3.3’de verilmiştir. Bunlar Lineer (purelin), lojistik sigmoid (logsig) ve hiperbolik tanjant sigmoid (tansig) aktivasyon fonksiyonlarıdır. Aktivasyon fonksiyonları, gizli ve çıkış katmanındaki nöronlar üzerinde çalışırlar. Nöronlar, giriş sinyalini çıkış sinyaline dönüştürür.



Şekil 3.3: YSA’da yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları a) purelin, b) logsig ve c) tansig.

Purelin aktivasyon fonksiyonu, sorunu doğrusal olarak çözmek için kullanılan, pozitif eğime sahip bir aktivasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyon, kararsız ve normalleştirilemediğinden sadece yapay sinir ağlarının çıkış katmanına uygulanabilir [81], [82].

Logsig ve tansig aktivasyon fonksiyonları, purelin aktivasyon fonksiyonundan daha karmaşık verilerle başa çıkabilir [83].

Tansig aktivasyon fonksiyonunu, daha kısa eğitim süresinde logsig aktivasyon fonksiyonundan daha iyi tahmin doğruluğuna sahiptir [84].

Ağ mimarisi, karmaşık görevlerin öğrenilmesini sağlayan bir veya daha fazla gizli nöron katmanını içerir.

Ağıdaki bir değişiklik, ağırlıklarının popülasyonunun değişmesine sebep olabilir.

### 3.2. THD<sub>v</sub> Tahmin Modeli İçin YSA Eğitimi

ANSYS Maxwell yazılımında elde edilen veriler kullanılarak hat gerilimindeki toplam harmonik distorsiyonu (THD<sub>v</sub>) tahmin edilmesi için YSA modeli geliştirilmiştir. Model geliştirilirken Matlab Sinir Ağ Aracı (Neural Network Toolbox) kullanılmıştır. THD<sub>v</sub> eğitiminde, benzetim süresi ve hassasiyet kriterleri dikkate alınarak üç katmanlı sinir ağı yapısı tasarlanmıştır.

Giriş katmanında yüklenme oranı, d.a. uyarım akım bileşeninin yüzdesi cinsinden 300 Hz frekanslı bileşenin genliği ve 300 Hz frekanslı bileşenin derece cinsinden faz açısı olmak üzere 3 giriş parametresi tanımlanmıştır. Çıkış parametresi ise tahmin edilen THD<sub>v</sub> değeridir. YSA modeli tasarlanırken Maxwell 2D ortamında elde edilen 5184 veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti rastsal olarak üçe ayrılmıştır. Buna göre 3628 adet (toplam verinin %70'i) eğitim verisi, 778 adet (toplam verinin %15'i) doğrulama verisi ve 778 adet (toplam verinin %15'i) test verisi kullanımı şeklinde bir ayırma işlemi yapılmıştır. Eğitim verisi, geri yayılma ile hatayı en aza indirerek YSA'nın eğitilmesi, doğrulama verisi, hatayı bağımsız olarak ölçerek eğitilmiş YSA'nın performansını değerlendirmek, test verisi ise, YSA'nın eğitim veri setinde olmayan girdiler olduğunda, hedef veriyi ne ölçüde doğru tahmin ettiğini öngörmek için kullanılmıştır [73].

Katmanlardaki nöron sayıları problemlere göre farklılıklar gösterdiğinden genellikle problem özelinde deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır. Bu çalışmada optimal gizli katman nöron sayıları bulunurken 10 ile 200 nöron arasında 10'ar nöronluk artışlarla analizler yapılmıştır. Benzetim süresini kısa tutmak amacıyla nöron sayısı üst sınırı 200 olarak seçilmiştir.

YSA mimarilerinin performansının değerlendirilmesinde literatürde genellikle ortalama karesel hata (MSE), hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama yüzdesel hata (MPE), mutlak ortalama yüzdesel hata

(MAPE), korelasyon katsayısı (R) ve determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) ölçüm indislerinin bir veya birkaçı birlikte kullanılmaktadır [85]. Bu tez çalışmasında, THDV'yi tahmin etmek için performans indisleri olarak ortalama karesel hata (MSE) ve korelasyon katsayısı (R) tercih edilmiştir. MSE'ye ait denklem Eşitlik 3.1'de, R'ye ait denklem Eşitlik 3.2'de verilmiştir [86]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2, \quad (3.1)$$

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left\{ X_i - \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \right) \right\}^2}, \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2'de,  $X_i$  ve  $\hat{X}_i$  sırasıyla SEY'den elde edilen veriler ile YSA'dan tahmin edilen verileri, N ise veri sayısını ifade etmektedir.

Diğer taraftan, önerilen YSA modelinin 12 farklı eğitim algoritması ile ağ yapısı test edilmiştir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

Levenberg-Marquardt Algoritması:

- LM - Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması (trainlm)

Gradyan İniş Algoritmaları:

- GD – Gradyan iniş geri yayılım algoritması (traingd)
- GDM - Momentumlu gradyan iniş geri yayılım algoritması (traingdm)
- GDA- Adaptif öğrenme oranı ile gradyan iniş geri yayılım algoritması (traingda)
- GDX - Adaptif öğrenme oranı ile momentumlu gradyan geri yayılım algoritması (traingdx)

Konjugat Gradyan Algoritmaları:

- CGP - Polak-Ribiere eşlenik gradyan geri yayılım algoritması (traincgp)
- CGB - Powell-Beale eşlenik gradyan geri yayılım algoritması (traincgb)
- CGF - Fletcher-Powell eşlenik gradyan geri yayılım algoritması (traincgf)
- SCG - Dengeli eşlenik gradyan geri yayılım algoritması (trainscg)

Quasi-Newton Algoritmaları:

- BFG - BFGS quasi-Newton geri yayılım algoritması (trainbfg)
- OSS- Tek adım sekand geri yayılım algoritması (trainoss)

Esnek Geri Yayılım Algoritması:

- RP - Esnek geri yayılım algoritması (trainrp)

YSA'nın gizli ve çıkış katmanı için purelin (doğrusal), logsig (logaritmik sigmoid) ve tansig (hiperbolik tanjant sigmoid) aktivasyon fonksiyonlarının her biri denenerek en iyi performansı gösteren çift seçilmiştir. Toplamda 108 durum 20 farklı nöron (10 ile 200 arası 10'arlık artışlarla) ve 10 iterasyonla YSA eğitimleri yapılmıştır. Yapılan analizlerden MSE (eğitim) değerlerine göre en iyi performans gösteren nöron sayısı belirlenmiştir. En iyi MSE değerlerine göre 108 duruma ait sonuçlar her eğitim algoritması için ayrı ayrı sunulmuştur.

Yukarıda belirtilen 12 eğitim algoritmasına göre gizli ve çıkış katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonları kullanılması durumunda ağıın eğitim ve test performans parametreleri Tablo 3.1-3.12'de verilmiştir. Tablolar oluşturulurken dikkate alınan nöron sayıları değişkenlik göstermekte olup bu nöron sayıları eğitim algoritmalarının her bir aktivasyon fonksiyon çifti için MSE değerleri dikkate alınarak bulunan optimal değerleridir. Bu tablolara göre, Tablo 3.13'de ise her bir eğitim algoritması için en iyi MSE sonuçlarını veren aktivasyon fonksiyon çiftleri (Tablo 3.1-3.12'de gri renkle taranmış çiftler) ve bunlara ait optimal nöron sayıları, eğitim / test verilerine göre hesaplanan MSE değerleri ile eğitim / test verilerine göre hesaplanan R değerleri toplu halde sunulmuştur. Sunulan bu en iyi durumlarda nöron sayıları ile MSE değişimleri Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'da çizdirilmiştir.

Bu tablo ve şekillere göre, eğitim algoritmalarının en iyi performans gösterdikleri aktivasyon fonksiyon çifti durumlarıyla birlikte MSE bakımından iyiden (küçükten) kötüye (büyüğe) doğru, LM (tansig-tansig), BFG (logsig-tansig), RP (logsig-tansig), SCG (tansig-purelin), CGB (tansig-tansig), CGP (tansig-tansig), CGF (tansig-purelin), OSS (tansig-purelin), GDX (tansig-tansig), GDA (tansig-tansig), GD (purelin-tansig) ve GDM (purelin-tansig) sıralandığı ifade edilebilir. Ayrıca, bu algoritmalara ait eğitim / test MSE değerleri sırasıyla 0.7063/1.3028, 0.9975/1.7642, 1.1858/1.9151, 1.6382/2.1775, 1.6646/2.2478, 1.6857/2.0497, 1.6866/2.6676, 1.6962/2.3988, 3.3746/3.2958, 4.7358/5.2803, 13.0389/13.3759 ve 18.7544/18.0638, eğitim / test R değerleri sırasıyla 0.9889/0.9803, 0.9844/0.9716, 0.9812/0.9708, 0.9743/0.9647, 0.9738/0.9636, 0.9732/0.9668, 0.9730/0.9582, 0.9728/0.9640, 0.9462/0.9485, 0.9247/0.9160, 0.7688/0.7694 ve 0.6469/0.6458, nöron sayıları sırasıyla 180, 180, 180, 180, 180, 140, 200, 160, 90, 40, 50 ve 90'dır. 12 eğitim algoritmasının optimal aktivasyon fonksiyonu ve nöron sayılarında eğitim verilerinde

MSE değerinin 0.7063 ile 18.7544 arasında, test verilerinde ise MSE değerinin 1.3028 ile 18.0638 arasında değıştiği, R değerlerinin eğitim verilerinde 0.6469 ile 0.9889 arasında, test verilerinde ise 0.6458 ile 0.9803 arasında değıştiği görölmektedir. Gizli katman nöron sayıları ise eğitim algoritması ve optimal aktivasyon çiftine göre 40 ile 200 arasında değışmektedir. Böylece, R değerlerinin 1'e yakın olması ve MSE değerlerinin diğerlerine göre en küçük olması göz önüne alındığında, THD<sub>v</sub> tahmini için YSA modelinde kullanılmak üzere gizli ve çıkış katmanlarında tansig fonksiyonları bulunan LM eğitim algoritmasının en uygun olduğu görölmektedir.

Tablo 3.1: LM eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katman Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                            | purelin                             | 180          | 12.1165       | 14.2552       | 0.7895        | 0.7437        |
| purelin                            | logsig                              | 180          | 28.1856       | 31.9198       | 0.4783        | 0.4152        |
| purelin                            | tansig                              | 190          | 12.4703       | 14.2379       | 0,7852        | 0,7487        |
| logsig                             | purelin                             | 170          | 0.7084        | 1,6594        | 0,9892        | 0.9736        |
| logsig                             | logsig                              | 120          | 21.5258       | 24.7953       | 0.8325        | 0.8233        |
| logsig                             | tansig                              | 200          | 0.7217        | 1.3991        | 0.9887        | 0.9784        |
| tansig                             | purelin                             | 140          | 0.7975        | 1.4802        | 0.9874        | 0.9778        |
| tansig                             | logsig                              | 140          | 21.6852       | 24.8823       | 0.8355        | 0.8250        |
| <b>tansig</b>                      | <b>tansig</b>                       | <b>180</b>   | <b>0.7063</b> | <b>1.3028</b> | <b>0.9889</b> | <b>0.9803</b> |

Tablo 3.2: GDX eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 100          | 12.2313       | 13.2149       | 0.7885        | 0.7581        |
| purelin                             | logsig                              | 110          | 28.3343       | 31.1588       | 0.4811        | 0.4619        |
| purelin                             | tansig                              | 190          | 12.5078       | 14.1879       | 0.7852        | 0.7489        |
| logsig                              | purelin                             | 30           | 5.2731        | 5.5073        | 0.9169        | 0.9037        |
| logsig                              | logsig                              | 40           | 23.7777       | 24.5014       | 0.7751        | 0.7788        |
| logsig                              | tansig                              | 60           | 4.9290        | 5.0219        | 0.9235        | 0.9237        |
| tansig                              | purelin                             | 10           | 3.8614        | 3.7001        | 0.9373        | 0.9444        |
| tansig                              | logsig                              | 10           | 22.9780       | 22.1722       | 0.8076        | 0.8116        |
| <b>tansig</b>                       | <b>tansig</b>                       | <b>90</b>    | <b>3.3746</b> | <b>3.2958</b> | <b>0.9462</b> | <b>0.9485</b> |

Tablo 3.3: GDM eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)   | MSE (Test)     | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 10           | 108.3701       | 109.0353       | 0.4177        | 0.3875        |
| purelin                             | logsig                              | 20           | 29.4383        | 31.1964        | 0.5437        | 0.4972        |
| <b>purelin</b>                      | <b>tansig</b>                       | <b>90</b>    | <b>18.7544</b> | <b>18.0638</b> | <b>0.6469</b> | <b>0.6458</b> |
| logsig                              | purelin                             | 10           | 31.6680        | 33.3035        | 0.6093        | 0.5886        |
| logsig                              | logsig                              | 100          | 24.2010        | 24.1235        | 0.7363        | 0.7440        |
| logsig                              | tansig                              | 30           | 24.8634        | 25.5688        | 0.6985        | 0.6746        |
| tansig                              | purelin                             | 10           | 89.8150        | 85.2376        | 0.3575        | 0.3265        |
| tansig                              | logsig                              | 10           | 23.6940        | 22.2515        | 0.8045        | 0.8039        |
| tansig                              | tansig                              | 110          | 31.4835        | 32.0053        | 0.4708        | 0.4574        |

Tablo 3.4: GDA eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 70           | 12.4034       | 13.3862       | 0.7871        | 0.7626        |
| purelin                             | logsig                              | 50           | 28.2980       | 30.9576       | 0.4862        | 0.4544        |
| purelin                             | tansig                              | 110          | 12.5853       | 14.4214       | 0.7813        | 0.7452        |
| logsig                              | purelin                             | 10           | 7.1508        | 6.6479        | 0.8862        | 0.8917        |
| logsig                              | logsig                              | 20           | 24.7920       | 25.5126       | 0.7077        | 0.6874        |
| logsig                              | tansig                              | 60           | 7.7174        | 7.6773        | 0.8784        | 0.8738        |
| tansig                              | purelin                             | 20           | 7.4396        | 8.8874        | 0.8846        | 0.8544        |
| tansig                              | logsig                              | 10           | 23.3220       | 26.7141       | 0.7767        | 0.7887        |
| <b>tansig</b>                       | <b>tansig</b>                       | <b>40</b>    | <b>4.7358</b> | <b>5.2803</b> | <b>0.9247</b> | <b>0.9160</b> |

Tablo 3.5: GD eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)   | MSE (Test)     | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 10           | 27.4088        | 27.4826        | 0.6788        | 0.6890        |
| purelin                             | logsig                              | 130          | 28.3277        | 30.2268        | 0.4807        | 0.4614        |
| <b>purelin</b>                      | <b>tansig</b>                       | <b>50</b>    | <b>13.0389</b> | <b>13.3759</b> | <b>0.7688</b> | <b>0.7694</b> |
| logsig                              | purelin                             | 10           | 46.0667        | 43.5926        | 0.6051        | 0.6241        |
| logsig                              | logsig                              | 100          | 22.7090        | 24.1857        | 0.7858        | 0.7987        |
| logsig                              | tansig                              | 30           | 27.2713        | 28.1070        | 0.5646        | 0.5386        |
| tansig                              | purelin                             | 10           | 78.9017        | 79.9143        | 0.6604        | 0.6681        |
| tansig                              | logsig                              | 100          | 22.5333        | 23.7868        | 0.8096        | 0.8172        |
| tansig                              | tansig                              | 10           | 19.3165        | 20.9068        | 0.7831        | 0.7725        |

Tablo 3.6: CGP eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 30           | 12.2847       | 14.5097       | 0.7829        | 0.7544        |
| purelin                             | logsig                              | 100          | 27.8958       | 31.8999       | 0.4687        | 0.4705        |
| purelin                             | tansig                              | 150          | 12.4595       | 14.1021       | 0.7824        | 0.7526        |
| logsig                              | purelin                             | 140          | 1.8703        | 2.0741        | 0.9708        | 0.9680        |
| logsig                              | logsig                              | 120          | 21.9680       | 23.7004       | 0.8130        | 0.8142        |
| logsig                              | tansig                              | 170          | 1.8927        | 2.7782        | 0.9702        | 0.9570        |
| tansig                              | purelin                             | 200          | 1.7097        | 2.0094        | 0.9733        | 0.9673        |
| tansig                              | logsig                              | 130          | 21.9868       | 25.8671       | 0.8146        | 0.7893        |
| <b>tansig</b>                       | <b>tansig</b>                       | <b>140</b>   | <b>1.6857</b> | <b>2.0497</b> | <b>0.9732</b> | <b>0.9668</b> |

Tablo 3.7: CGF eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 200          | 12.2695       | 14.2554       | 0.7886        | 0.7440        |
| purelin                             | logsig                              | 150          | 28.4412       | 30.0333       | 0.4681        | 0.4461        |
| purelin                             | tansig                              | 200          | 12.4696       | 13.8482       | 0.7871        | 0.7495        |
| logsig                              | purelin                             | 130          | 1.7059        | 2.6024        | 0.9730        | 0.9607        |
| logsig                              | logsig                              | 130          | 22.7077       | 25.3736       | 0.7900        | 0.7768        |
| logsig                              | tansig                              | 130          | 2.1681        | 2.9041        | 0.9650        | 0.9566        |
| <b>tansig</b>                       | <b>purelin</b>                      | <b>200</b>   | <b>1.6866</b> | <b>2.6676</b> | <b>0.9730</b> | <b>0.9582</b> |
| tansig                              | logsig                              | 100          | 22.3180       | 23.1807       | 0.8092        | 0.8070        |
| tansig                              | tansig                              | 40           | 1.8208        | 2.3502        | 0.9713        | 0.9627        |

Tablo 3.8: CGB eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 20           | 12.2949       | 13.2339       | 0.7834        | 0.7685        |
| purelin                             | logsig                              | 70           | 28.2634       | 31.4846       | 0.4787        | 0.4499        |
| purelin                             | tansig                              | 140          | 12.3775       | 15.0214       | 0.7848        | 0.7355        |
| logsig                              | purelin                             | 200          | 1.7307        | 2.6970        | 0.9726        | 0.9550        |
| logsig                              | logsig                              | 140          | 22.0694       | 23.6238       | 0.8214        | 0.8285        |
| logsig                              | tansig                              | 190          | 1.6905        | 1.6220        | 0.9733        | 0.9744        |
| tansig                              | purelin                             | 140          | 1.7290        | 1.7832        | 0.9727        | 0.9710        |
| tansig                              | logsig                              | 160          | 21.8311       | 23.7542       | 0.8261        | 0.8136        |
| <b>tansig</b>                       | <b>tansig</b>                       | <b>180</b>   | <b>1.6646</b> | <b>2.2478</b> | <b>0.9738</b> | <b>0.9636</b> |

Tablo 3.9: OSS eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 180          | 12.1231       | 14.2439       | 0.7894        | 0.7436        |
| purelin                             | logsig                              | 40           | 28.4454       | 29.2233       | 0.4660        | 0.4781        |
| purelin                             | tansig                              | 110          | 12.4838       | 14.5631       | 0.7835        | 0.7474        |
| logsig                              | purelin                             | 190          | 2.0795        | 2.4720        | 0.9674        | 0.9599        |
| logsig                              | logsig                              | 10           | 23.3394       | 24.1310       | 0.8067        | 0.7999        |
| logsig                              | tansig                              | 200          | 2.1164        | 2.1282        | 0.9667        | 0.9679        |
| <b>tansig</b>                       | <b>purelin</b>                      | <b>160</b>   | <b>1.6962</b> | <b>2.3988</b> | <b>0.9728</b> | <b>0.9640</b> |
| tansig                              | logsig                              | 10           | 22.6149       | 24.1602       | 0.7976        | 0.7739        |
| tansig                              | tansig                              | 200          | 1.8940        | 2.4623        | 0.9701        | 0.9600        |

Tablo 3.10: SCG eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 100          | 12.2101       | 13.2168       | 0.7884        | 0.7579        |
| purelin                             | logsig                              | 170          | 28.2994       | 30.2223       | 0.4672        | 0.4873        |
| purelin                             | tansig                              | 190          | 12.4948       | 14.2661       | 0.7856        | 0.7489        |
| logsig                              | purelin                             | 190          | 1.7588        | 2.6144        | 0.9725        | 0.9569        |
| logsig                              | logsig                              | 130          | 21.8626       | 25.3616       | 0.8204        | 0.8272        |
| logsig                              | tansig                              | 150          | 1.6768        | 2.5900        | 0.9737        | 0.9573        |
| <b>tansig</b>                       | <b>purelin</b>                      | <b>180</b>   | <b>1.6382</b> | <b>2.1775</b> | <b>0.9743</b> | <b>0.9647</b> |
| tansig                              | logsig                              | 100          | 22.0007       | 26.2841       | 0.8144        | 0.8122        |
| purelin                             | purelin                             | 100          | 12.2101       | 13.2168       | 0.7884        | 0.7579        |

Tablo 3.11: BFG eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

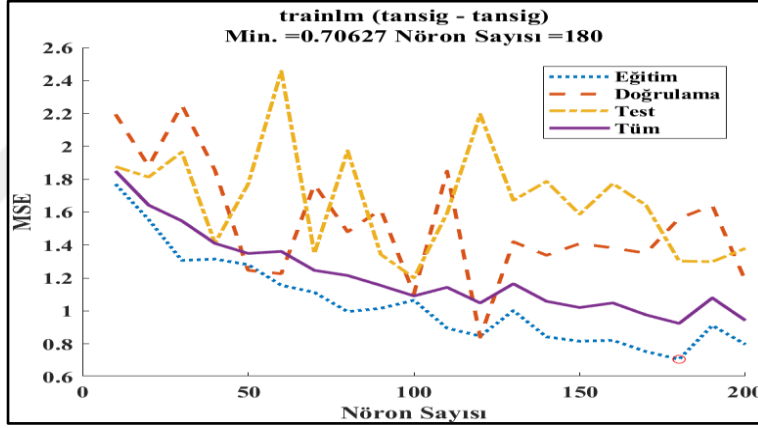
| Gizli Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                             | purelin                             | 100          | 12.2068       | 13.2085       | 0.7885        | 0.7582        |
| purelin                             | logsig                              | 80           | 28.3103       | 30.3785       | 0.4779        | 0.4727        |
| purelin                             | tansig                              | 120          | 12.4328       | 14.2910       | 0.7806        | 0.7672        |
| logsig                              | purelin                             | 190          | 1.1810        | 1.5958        | 0.9812        | 0.9763        |
| logsig                              | logsig                              | 40           | 32.5457       | 33.9053       | 0.0000        | 0.0000        |
| <b>logsig</b>                       | <b>tansig</b>                       | <b>180</b>   | <b>0.9975</b> | <b>1.7642</b> | <b>0.9844</b> | <b>0.9716</b> |
| tansig                              | purelin                             | 50           | 1.5354        | 1.8072        | 0.9758        | 0.9705        |
| tansig                              | logsig                              | 50           | 22.1844       | 22.7105       | 0.8207        | 0.8026        |
| tansig                              | tansig                              | 180          | 1.0947        | 1.7022        | 0.9828        | 0.9726        |

Tablo 3.12: RP eğitim algoritmasına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

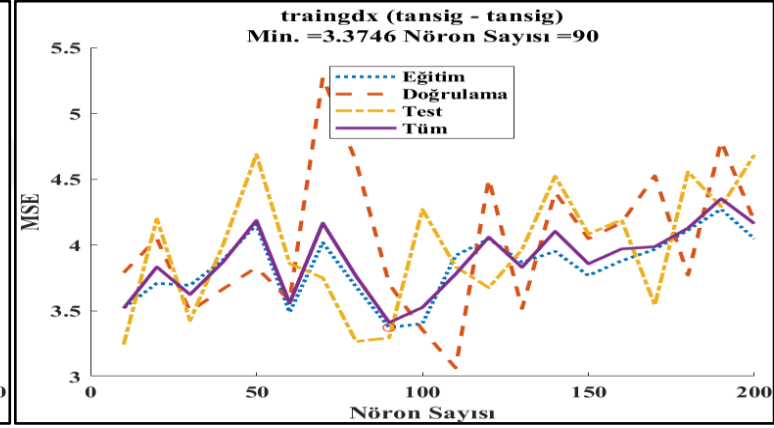
| Gizli Katman Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| purelin                            | purelin                             | 100          | 12.2288       | 13.1750       | 0.7884        | 0.7586        |
| purelin                            | logsig                              | 180          | 28.1928       | 31.9109       | 0.4796        | 0.4176        |
| purelin                            | tansig                              | 120          | 12.4098       | 14.2350       | 0.7801        | 0.7669        |
| logsig                             | purelin                             | 190          | 1.3821        | 2.6803        | 0.9780        | 0.9590        |
| logsig                             | logsig                              | 190          | 21.8741       | 23.8573       | 0.8275        | 0.8324        |
| <b>logsig</b>                      | <b>tansig</b>                       | <b>180</b>   | <b>1.1858</b> | <b>1.9151</b> | <b>0.9812</b> | <b>0.9708</b> |
| tansig                             | purelin                             | 80           | 1.6358        | 2.2296        | 0.9739        | 0.9659        |
| tansig                             | logsig                              | 50           | 21.7921       | 25.5651       | 0.8236        | 0.8226        |
| tansig                             | tansig                              | 200          | 1.2788        | 1.7066        | 0.9801        | 0.9726        |

Tablo 3.13: Eğitim algoritmalarına göre aktivasyon fonksiyonları, nöron sayıları ve performans parametreleri.

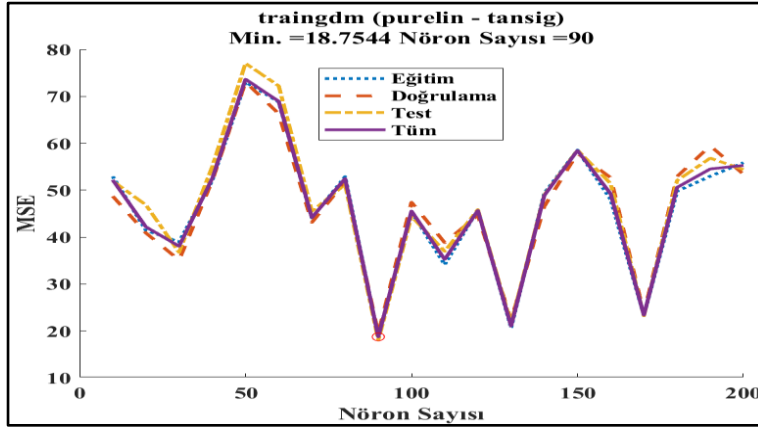
| Eğitim Algoritması | Gizli Katman Aktivasyon Fonksiyonu | Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonu | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)  | MSE (Test)    | R (Eğitim)    | R (Test)      |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>LM</b>          | <b>tansig</b>                      | <b>tansig</b>                       | <b>180</b>   | <b>0.7063</b> | <b>1.3028</b> | <b>0.9889</b> | <b>0.9803</b> |
| BFG                | logsig                             | tansig                              | 180          | 0.9975        | 1.7642        | 0.9844        | 0.9716        |
| RP                 | logsig                             | tansig                              | 180          | 1.1858        | 1.9151        | 0.9812        | 0.9708        |
| SCG                | tansig                             | purelin                             | 180          | 1.6382        | 2.1775        | 0.9743        | 0.9647        |
| CGB                | tansig                             | tansig                              | 180          | 1.6646        | 2.2478        | 0.9738        | 0.9636        |
| CGP                | tansig                             | tansig                              | 140          | 1.6857        | 2.0497        | 0.9732        | 0.9668        |
| CGF                | tansig                             | purelin                             | 200          | 1.6866        | 2.6676        | 0.9730        | 0.9582        |
| OSS                | tansig                             | purelin                             | 160          | 1.6962        | 2.3988        | 0.9728        | 0.9640        |
| GDX                | tansig                             | tansig                              | 90           | 3.3746        | 3.2958        | 0.9462        | 0.9485        |
| GDA                | tansig                             | tansig                              | 40           | 4.7358        | 5.2803        | 0.9247        | 0.9160        |
| GD                 | purelin                            | tansig                              | 50           | 13.0389       | 13.3759       | 0.7688        | 0.7694        |
| GDM                | purelin                            | tansig                              | 90           | 18.7544       | 18.0638       | 0.6469        | 0.6458        |



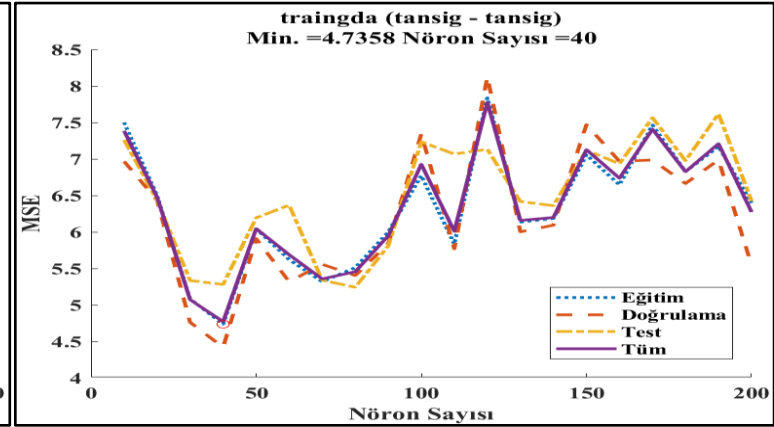
a)



b)

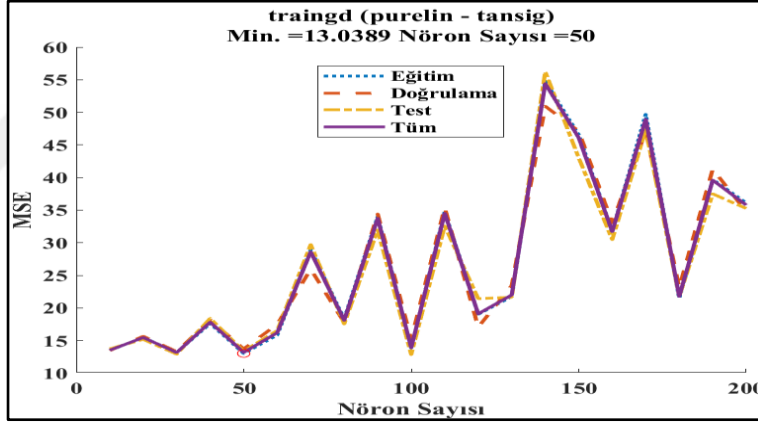


c)

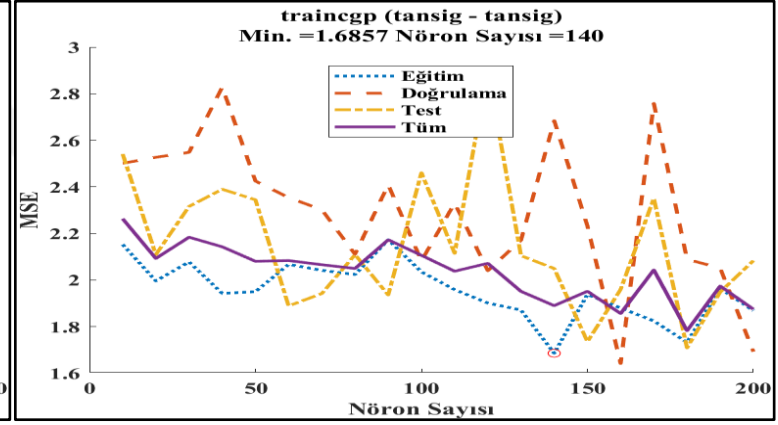


d)

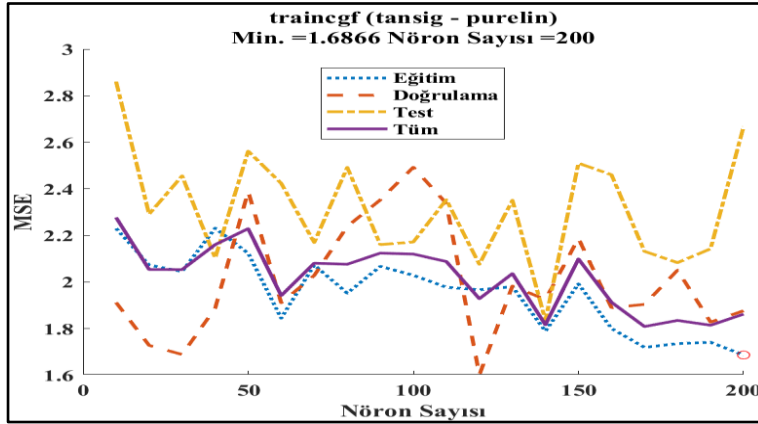
Şekil 3.4: a) LM, b) GDX, c) GDM ve d) GDA eğitim algoritmalarında nöron sayısına göre MSE değerleri.



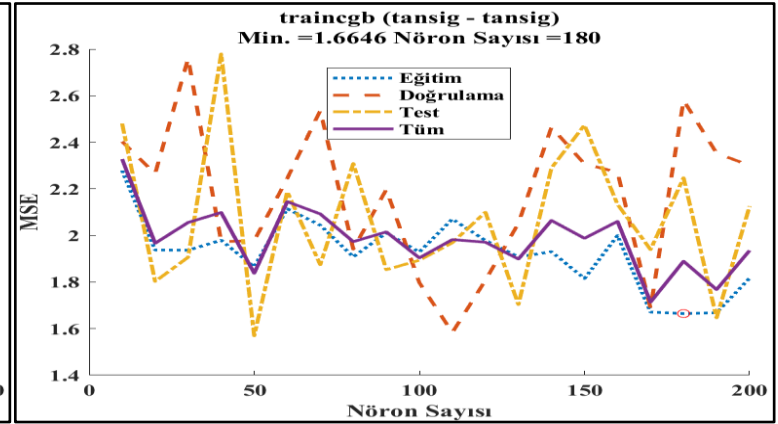
a)



b)

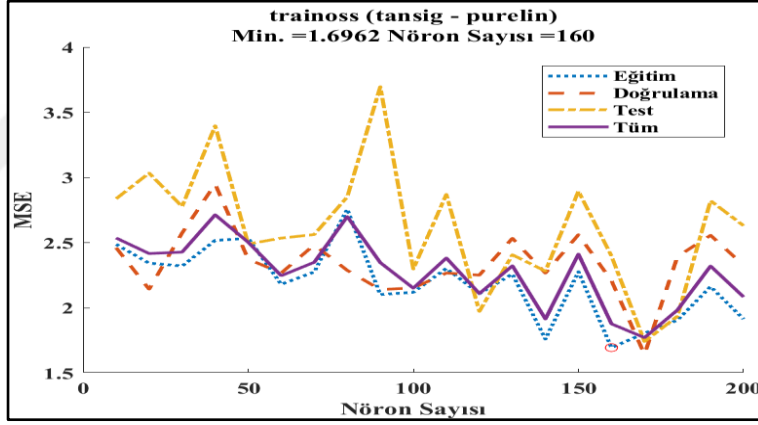


c)

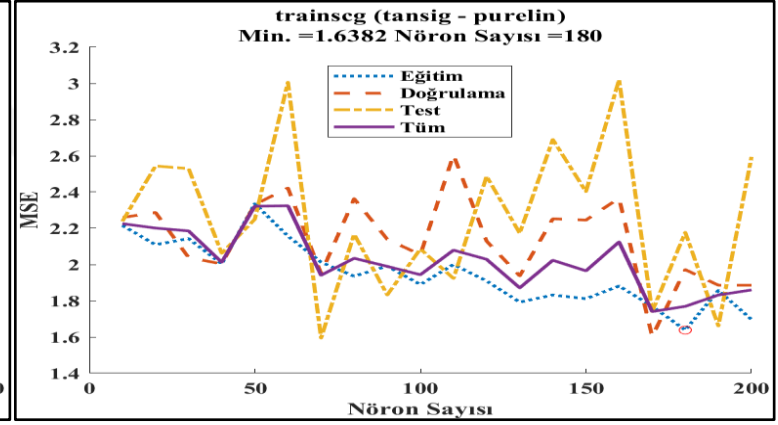


d)

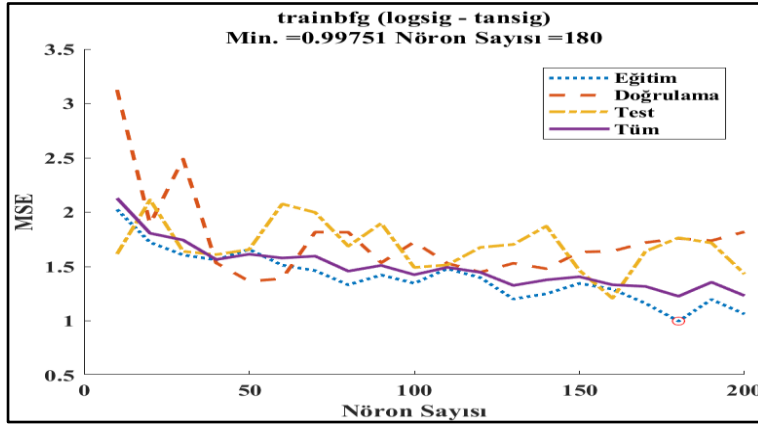
Şekil 3.5: a) GD, b) CGP, c) CGF ve d) CGB eğitim algoritmalarında nöron sayısına göre MSE değerleri.



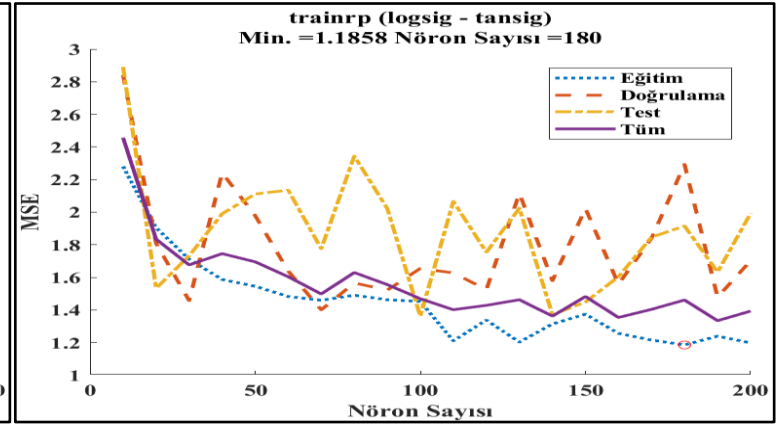
a)



b)



c)

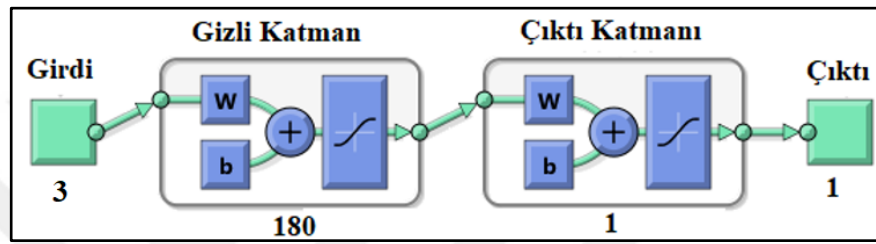


d)

Şekil 3.6: a) OSS, b) SCG, c) BFG ve d) RP eğitim algoritmalarında nöron sayısına göre MSE değerleri.

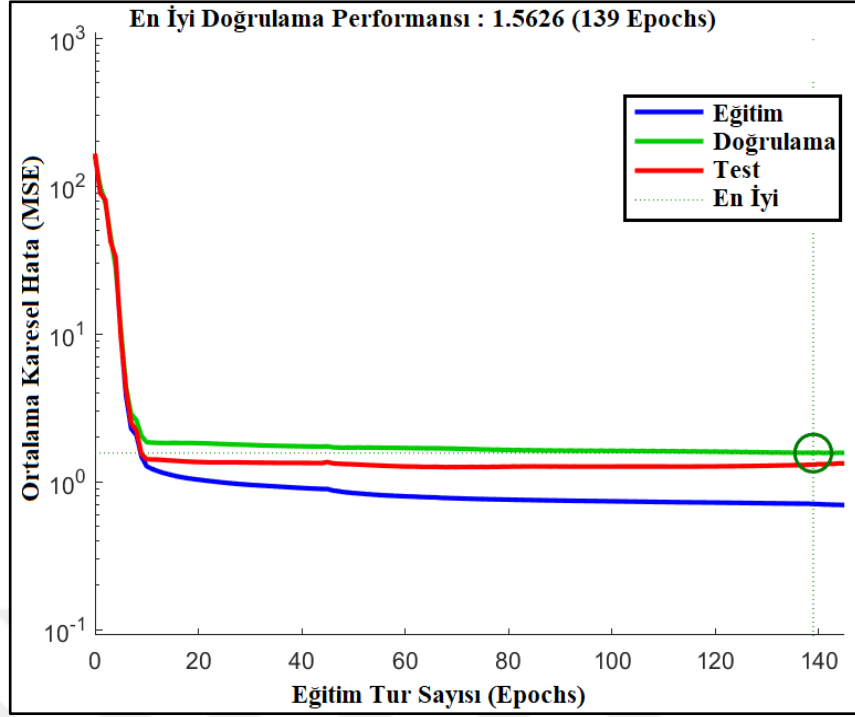
### 3.3. Önerilen YSA Ağ Mimarisi

Eğitim algoritmaları arasında bir önceki kısımda yapılan performans karşılaştırması neticesinde en iyi eğitim MSE değerine sahip olan tansig-tansig aktivasyon fonksiyonlu LM eğitim algoritması, önerilen modelde kullanılmak üzere seçilmiştir. LM eğitim algoritmasında seçilen model, 3 girdiye ve 1 çıktıya, gizli katmanında 180 nöron, gizli ve çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu tansig olan modeldir. Buna göre önerilen modelin ağ mimarisi Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7: THDv tahmini için önerilen YSA modelin ağ mimarisi.

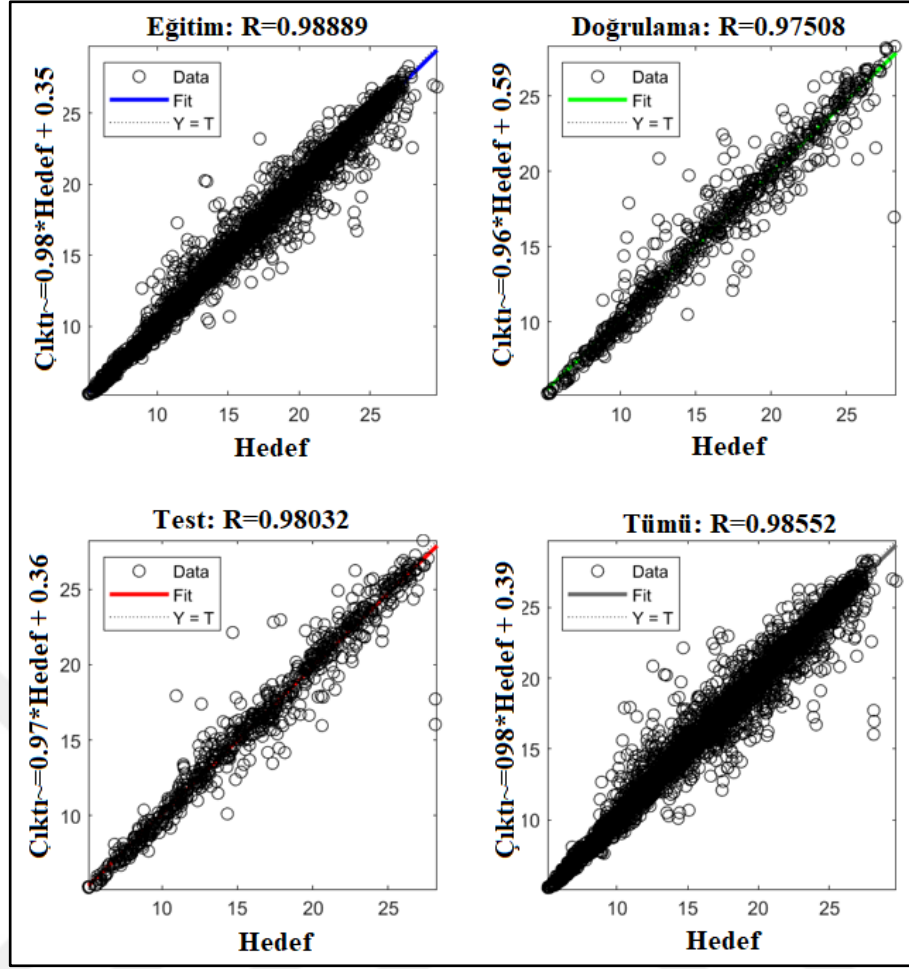
Şekil 3.7’deki YSA mimarisi ile eğitilen ağın eğitim tur sayısına göre MSE değeri eğitim, doğrulama ve test performansı Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Bu şekilden LM eğitim algoritmasında önerilen YSA modelin doğrulama performansının 1.5626 MSE değerini 139. eğitim turunda elde ettiği görülmektedir.



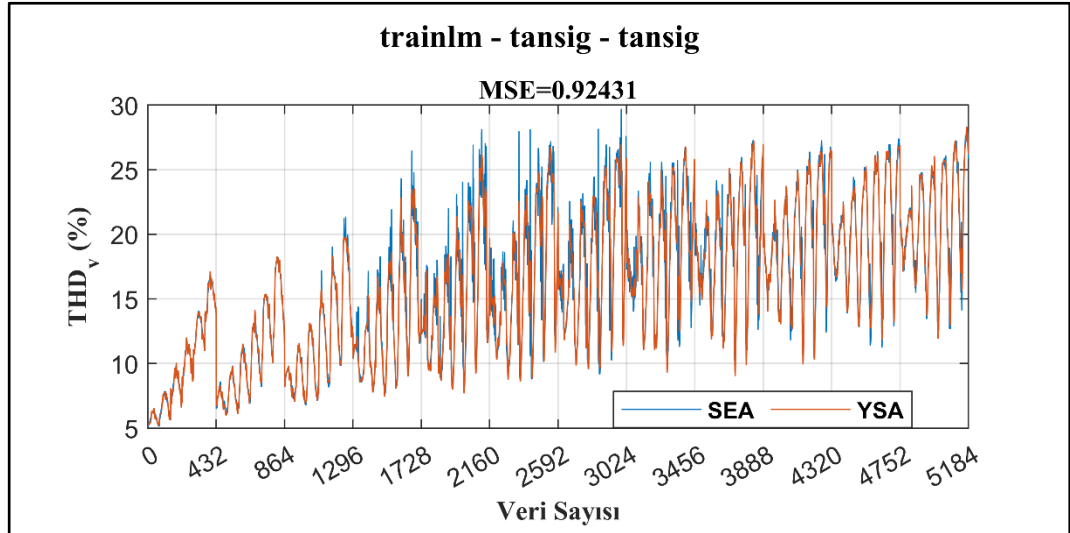
Şekil 3.8: THD<sub>v</sub> tahmini için önerilen YSA modelin performansı.

Önerilen ağ mimarisinin SEA'dan elde edilen verilerle tahmin edilen veriler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon grafiği Şekil 3.9'da çizdirilmiştir. Bu şekilden önerilen YSA modelinin eğitim, doğrulama ve test verileri için korelasyon katsayılarının yani R değerlerinin sırasıyla 0.98889, 0.97508 ve 0.98032 olduğu ifade edilebilir. Tüm veriler için elde edilen R değeri ise 0.98552'dir. Bu değerden, SEA'dan elde edilen değerlerle YSA'dan elde edilen tahmin değerleri arasında uyumun olduğu sonucuna varılabilir.

THD<sub>v</sub>'nin eğitimi sonucunda SEA verileri ile tahmin edilen YSA verilerinin karşılaştırılması Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekilde dikey kesikli çizgilerin her biri yüklenme oranını, mavi renk ile belirtilen SEA'dan elde edilen verileri, kırmızı renk ile belirtilen ise YSA'dan elde edilen tahmin verilerini göstermektedir. Mavi ile kırmızının üst üste bindiği yerlerde tahminin iyi gerçekleştiği, sadece mavi renk gözüken kısımlarda ise hatalar olduğu görülmektedir. YSA eğitiminde performans parametresi olarak kullanılan MSE değerinin tüm veriler için (eğitim + doğrulama + test) 0.9243 olduğu ve bu MSE değerinin kabul edilebilir büyüklükte olduğu söylenebilir.



Şekil 3.9: THD<sub>v</sub> tahmini için önerilen YSA modelinin regresyon grafikleri.



Şekil 3.10: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin THD<sub>v</sub> için karşılaştırılması.

### 3.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde, modellenen senkron generatörün çeşitli doğrusal olmayan yüklenme oranları ve uyarım akımı modülasyon durumları altında terminal gerilimi  $THD_V$  değerinin tahmini için bir araç geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Buna göre, ilk olarak YSA hakkında genel bir bilgi verilmiştir. İkinci olarak, bir önceki bölümde SEA'den elde edilen  $THD_V$  verileri dikkate alınarak 12 farklı eğitim algoritması, 3 aktivasyon fonksiyonu kombinasyonunun oluşturduğu 9 aktivasyon fonksiyonu çifti ve farklı nöron sayıları için yapay sinir ağları (YSA) eğitimi gerçekleştirilmiştir. Eğitim algoritmaları arasında yapılan karşılaştırma neticesinde,

- Eğitim algoritmalarının en iyi performans gösterdikleri fonksiyon çifti durumlarıyla birlikte MSE bakımından iyiden (küçükten) kötüye (büyüğe) doğru, LM (tansig-tansig), BFG (logsig-tansig), RP (logsig-tansig), SCG (tansig-purelin), CGB (tansig-tansig), CGP (tansig-tansig), CGF (tansig-purelin), OSS (tansig-purelin), GDX (tansig-tansig), GDA (tansig-tansig), GD (purelin-tansig) ve GDM (purelin-tansig) sıralandığı,
- Bu algoritmalara ait eğitim/test MSE değerleri sırasıyla 0.7063/1.3028, 0.9975/1.7642, 1.1858/1.9151, 1.6382/2.1775, 1.6646/2.2478, 1.6857/2.0497, 1.6866/2.6676, 1.6962/2.3988, 3.3746/3.2958, 4.7358/5.2803, 13.0389/13.3759 ve 18.7544/18.0638, eğitim/test R değerleri sırasıyla 0.9889/0.9803, 0.9844/0.9716, 0.9812/0.9708, 0.9743/0.9647, 0.9738/0.9636, 0.9732/0.9668, 0.9730/0.9582, 0.9728/0.9640, 0.9462/0.9485, 0.9247/0.9160, 0.7688/0.7694 ve 0.6469/0.6458, nöron sayıları sırasıyla 180, 180, 180, 180, 180, 140, 200, 160, 90, 40, 50 ve 90 olduğu,
- R değerlerinin 1'e yakın olması ve MSE değerlerinin diğerlerine göre en küçük olması göz önüne alındığında,  $THD_V$  tahmini için YSA modelinde kullanılmak üzere gizli ve çıkış katmanlarında tansig fonksiyonları bulunan LM eğitim algoritmasının en uygun olduğu,

sonuçlarına ulaşılmıştır.

Böylece, en iyi eğitim MSE değerine sahip olan tansig-tansig fonksiyonlu LM eğitim algoritması, önerilen modelde kullanılmak üzere seçilmiştir. Devamında,

uyartım akımı 300 Hz sinüzoidal bileşeninin d.a. bileşen cinsinden bağıl genliği, faz açısı ve yüklenme oranı olmak üzere 3 girdiye ve tahmin edilen  $THD_v$  değerini veren 1 çıktıya, gizli katmanında 180 nöron, gizli ve çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu tansig olan YSA modeli geliştirilmiştir.

Son olarak, YSA modelinin eğitim, doğrulama ve test verileri için korelasyon katsayılarının yani R değerleri değerlendirilmiştir. Değerlendirmede, ilgili R değerlerinin sırasıyla, 0.98889, 0.97508 ve 0.98032 olması, diğer bir ifadeyle 1'e çok yakın olması sebebiyle geliştirilen YSA modelinin  $THD_v$  tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



## 4.YSA TEMELLİ BİREYSEL HARMONİK TAHMİNİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde tespit edilen eğitim algoritması, aktivasyon fonksiyonu çiftine göre optimal gizli katman nöron sayıları bulunarak generatör terminal faz gerilimlerinin bireysel harmonik genlik ve faz açılarının tahmini için YSA modeli oluşturulmuştur.  $THD_V$  tahmin modelinde olduğu şekilde modelin girdileri senkron generatörün doğrusal olmayan yüklenme oranı ve d.a. uyartım akımı üzerine bindirilen 300 Hz'lik sinüzoidal bileşenin genliğinin d.a. bileşen genliği cinsinden bağıl değeri ve derece cinsinden faz açısıdır.

Yükün dengeli olması ve generatörde tasarımsal sebeplerle meydana gelebilecek terminal gerilimi dengesizliğinin ihmal edilebilir seviyede olduğu göz önüne alınarak, modelleme çalışmaları fazlardan biri (A fazı) için sunulmuştur.

### 4.1. Bireysel Harmonik Genlik Tahmini İçin YSA Eğitimi

YSA temelli  $THD_V$  tahmin modeli, LM eğitim algoritmasında gizli ve çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonları tansig olarak belirlenmiştir. En iyi eğitim MSE değerine göre önerilen bu modelin eğitim algoritması ve aktivasyon fonksiyonları YSA temelli bireysel harmonik modelde de korunmuştur. Bununla birlikte, bireysel harmonik tahmini için önerilen modelde nöron sayısı tekrardan belirlenmiştir. Bu belirleme işleminde, 10 ile 200 nöron arasında 10'ar nöronluk artışlarla yapılan analizlerden MSE eğitim değerlerine göre en iyi performans gösteren nöron sayıları seçilmiştir.

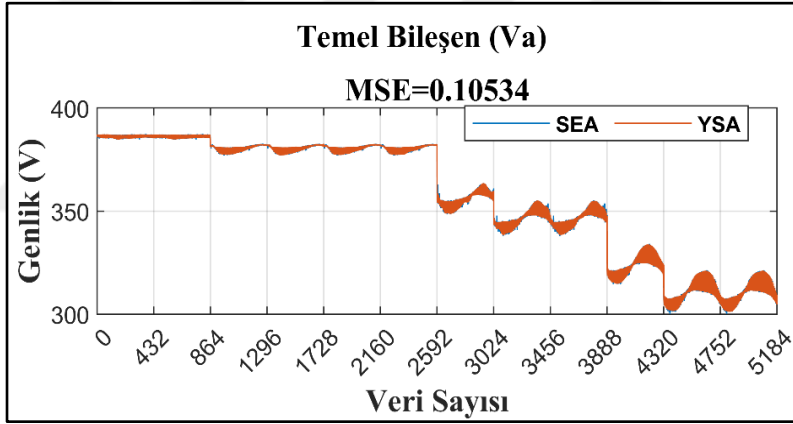
En iyi MSE değerlerine göre A faz geriliminin genliğine ait temel ve tek harmonik bileşenlerinin gizli katman nöron sayıları ve performans parametreleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 incelendiğinde, en iyi eğitim MSE ve R değerlerinin 0.06720 ve 0.99996 olduğu ve bu değerlerin temel harmonik bileşen için elde edildiği, dikkate alınan harmonik bileşenlerin tamamı için genel anlamda MSE ve R değerlerinin kabul edilebilir olduğu ifade edilebilir.

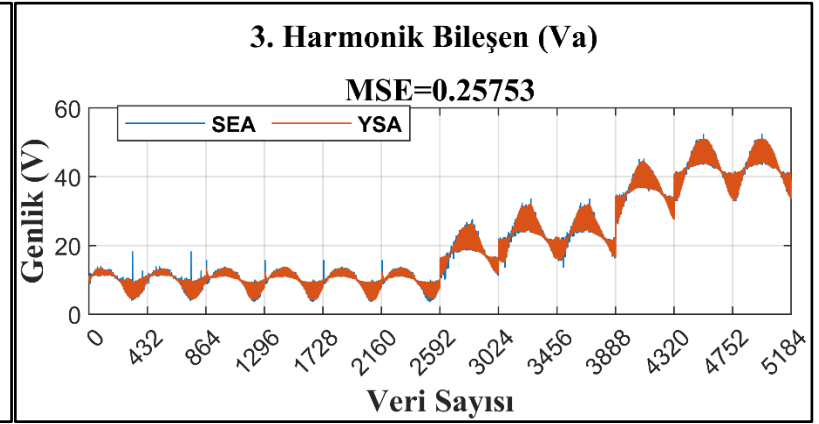
Tablo 4.1: A faz geriliminin genliğine ait gizli katman nöron sayısı ve performans parametreleri.

| Genlik (A Fazı) |              |              |            |            |          |
|-----------------|--------------|--------------|------------|------------|----------|
| h               | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim) | MSE (Test) | R (Eğitim) | R (Test) |
| Temel           | 170          | 0.06720      | 0.19956    | 0.99996    | 0.99988  |
| 3.              | 180          | 0.14578      | 0.73975    | 0.99957    | 0.99781  |
| 5.              | 200          | 0.22221      | 0.50210    | 0.99945    | 0.99883  |
| 7.              | 190          | 0.26424      | 0.55144    | 0.99909    | 0.99819  |
| 9.              | 190          | 0.37857      | 1.08400    | 0.99240    | 0.97827  |
| 11.             | 200          | 0.33225      | 1.03518    | 0.99672    | 0.98929  |
| 13.             | 170          | 0.40777      | 1.01831    | 0.99371    | 0.98490  |
| 15.             | 200          | 0.41339      | 0.88534    | 0.95857    | 0.85206  |
| 17.             | 200          | 0.53898      | 1.02854    | 0.96410    | 0.92936  |
| 19.             | 140          | 0.62565      | 1.93706    | 0.94221    | 0.83167  |

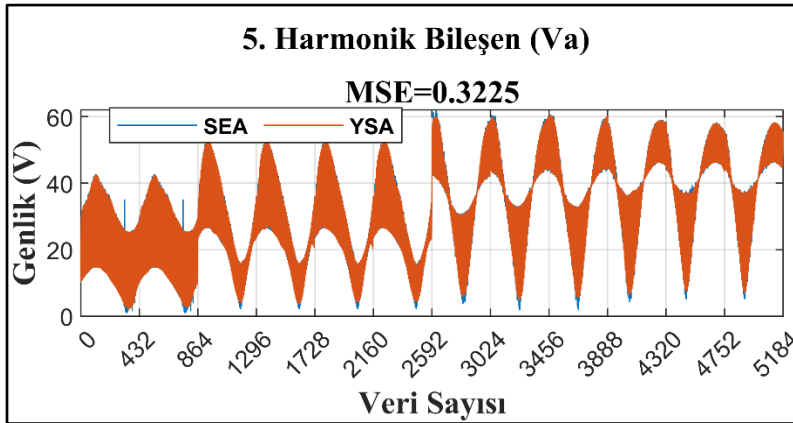
A faz gerilimine ait genlik eğitimi sonucunda SEA verileri ile tahmin edilen YSA verilerinin harmonik genliklerinin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 4.1-4.3’de verilmiştir. Şekillerde dikey kesikli çizgilerin her biri yüklenme oranını, mavi renk ile belirtilen SEA’dan elde edilen verileri, kırmızı renk ile belirtilen ise YSA’dan elde edilen tahmin verilerini göstermektedir. Mavi ile kırmızının üst üste bindiği yerlerde tahminin iyi gerçekleştiği, sadece mavi renk gözüken kısımlarda ise hatalar olduğu görülmektedir. YSA eğitiminde performans parametresi olarak kullanılan MSE değerlerinin temel bileşen, 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17. ve 19. harmonik bileşenler için sırasıyla 0.1053, 0.2575, 0.3225, 0.3314, 0.5665, 0.5434, 0.5367, 0.5506, 0.6999 ve 0.9185 olduğu ve bu MSE değerlerinin kabul edilebilir büyüklükte olduğu söylenebilir.



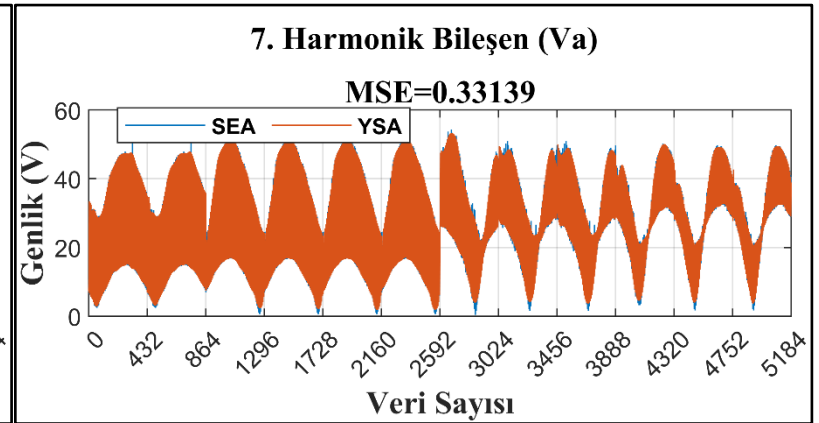
a)



b)

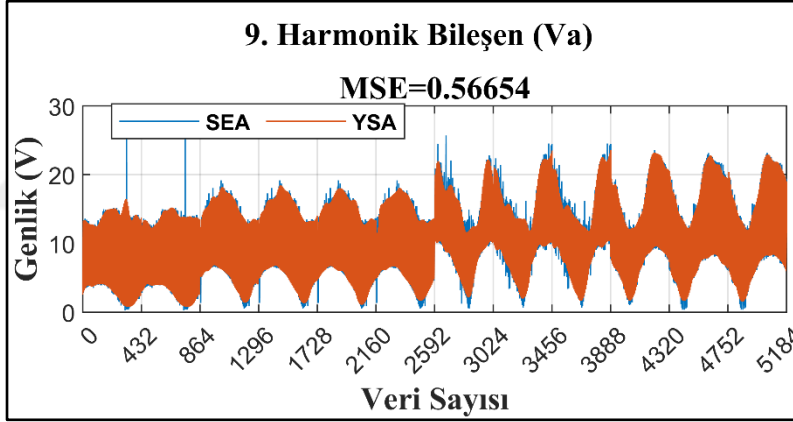


c)

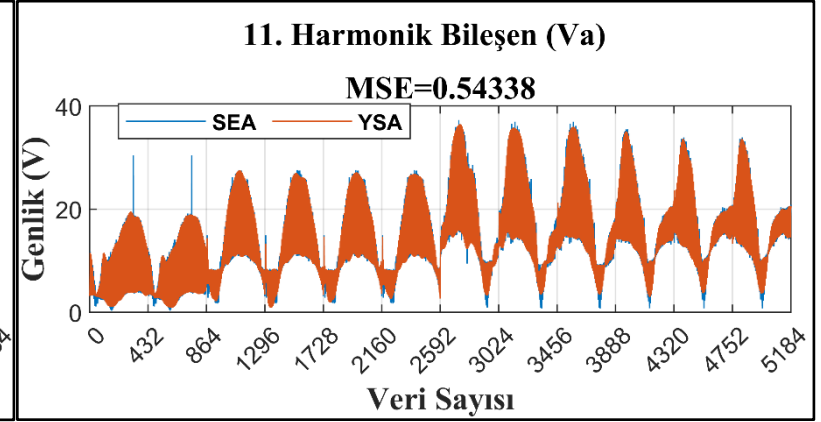


d)

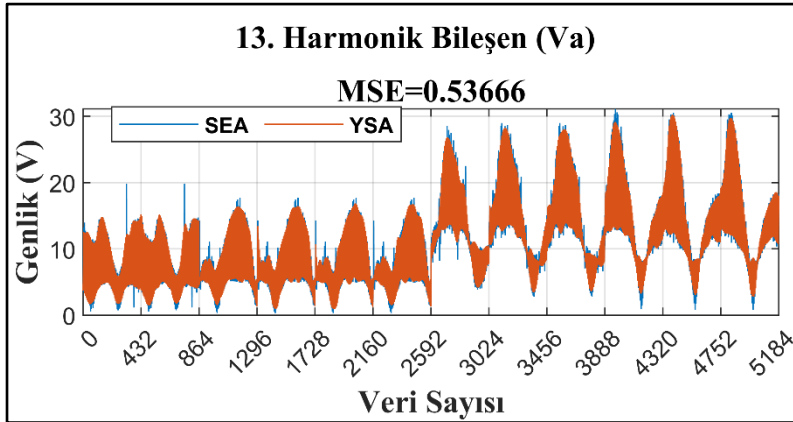
Şekil 4.1: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A faz gerilimi a) temel bileşen, b) 3. harmonik, c) 5. harmonik ve d) 7. harmonik genlikleri için karşılaştırılması



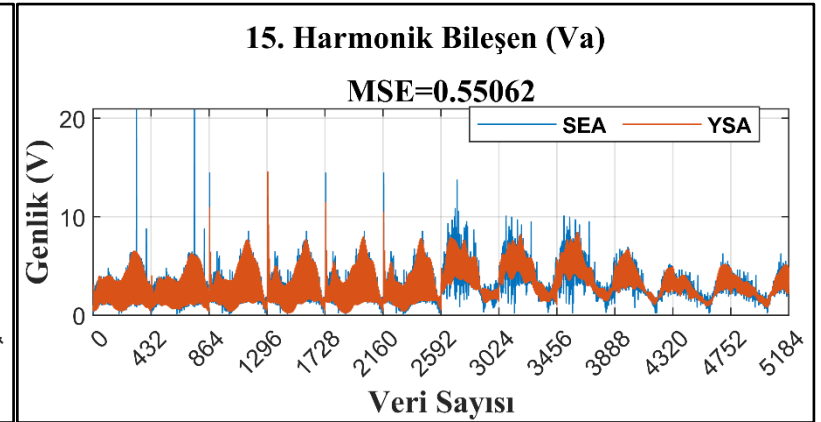
a)



b)

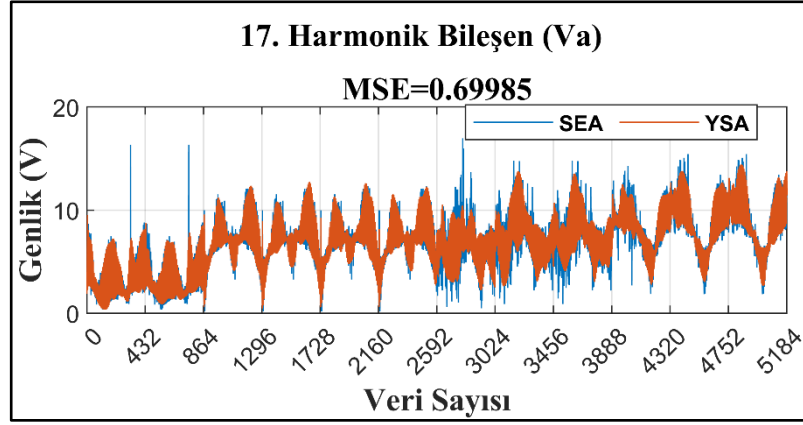


c)

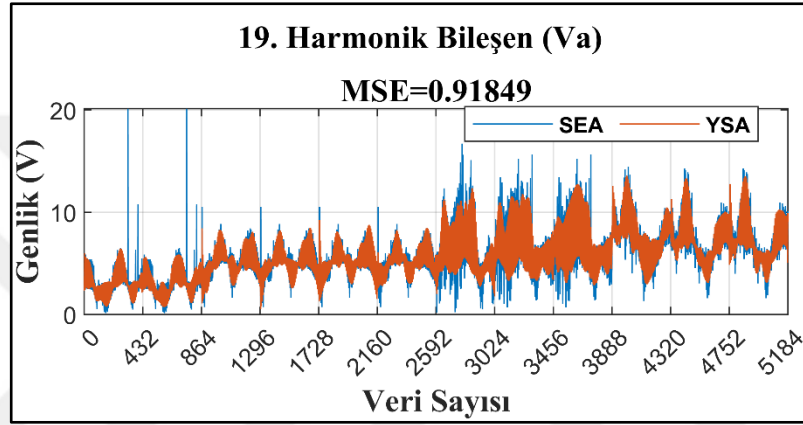


d)

Şekil 4.2: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A faz gerilimi a) 9. harmonik, b) 11. harmonik, c) 13. harmonik ve d) 15. harmonik genlikleri için karşılaştırılması.



a)



b)

Şekil 4.3: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A faz gerilimi a) 17. harmonik ve b) 19. harmonik genlikleri için karşılaştırılması.

## 4.2. Bireysel Harmonik Faz Açısı Tahmini İçin YSA Eğitimi

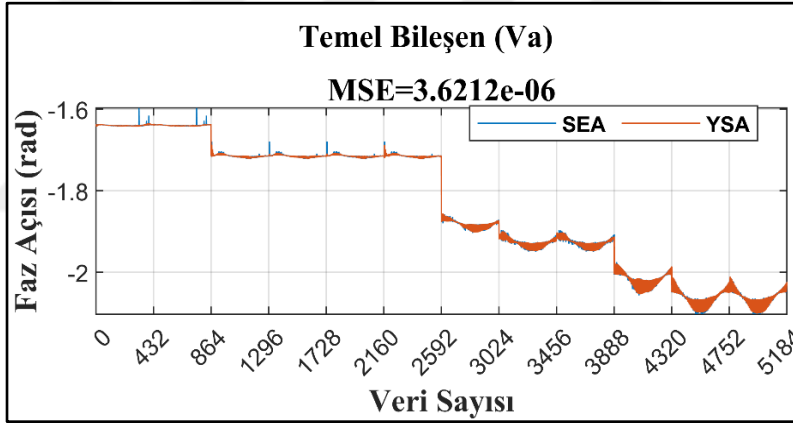
En iyi MSE değerlerine göre A faz geriliminin faz açısına ait temel ve tek harmonik bileşenlerinin gizli katman nöron sayıları ve performans parametreleri Tablo 4.2’de sunulmaktadır.

Tablo 4.2 incelendiğinde, en iyi eğitim MSE ve R değerlerinin  $1.69 \times 10^{-6}$  ve 0,99997 olduğu ve bu değerlerin temel harmonik bileşen için elde edildiği, dikkate alınan harmonik bileşenlerin tamamı için genel anlamda MSE ve R değerlerinin kabul edilebilir olduğu ifade edilebilir.

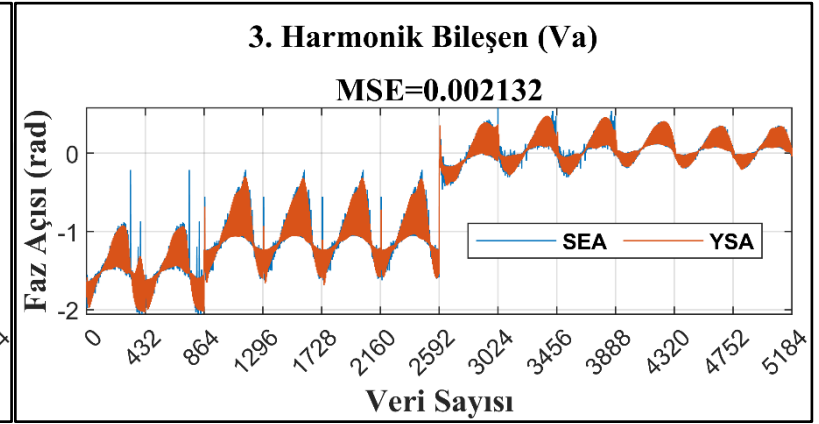
Tablo 4.2: A faz geriliminin faz açısına ait gizli katman nöron sayısı ve performans parametreleri.

| Faz Açısı (A Fazı) |              |                       |                       |            |          |
|--------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|------------|----------|
| Harmonik Bileşen   | Nöron Sayısı | MSE (Eğitim)          | MSE (Test)            | R (Eğitim) | R (Test) |
| Temel              | 190          | $1.69 \times 10^{-6}$ | $7.07 \times 10^{-6}$ | 0.99997    | 0.99985  |
| 3.                 | 160          | 0.00109               | 0.00368               | 0,99884    | 0.99617  |
| 5.                 | 190          | 0.14238               | 0.72898               | 0.98607    | 0.92719  |
| 7.                 | 150          | 0.10105               | 0.28000               | 0.98437    | 0.95550  |
| 9.                 | 190          | 0.14482               | 0.50260               | 0.98179    | 0.93330  |
| 11.                | 200          | 0.14292               | 0.49094               | 0.96851    | 0.89157  |
| 13.                | 200          | 0.12196               | 0.46455               | 0.97536    | 0.91305  |
| 15.                | 190          | 0.31958               | 0.66386               | 0.92872    | 0.85162  |
| 17.                | 190          | 0.29544               | 0.71312               | 0.95037    | 0.88154  |
| 19.                | 200          | 0.22042               | 0.51244               | 0.95574    | 0.89152  |

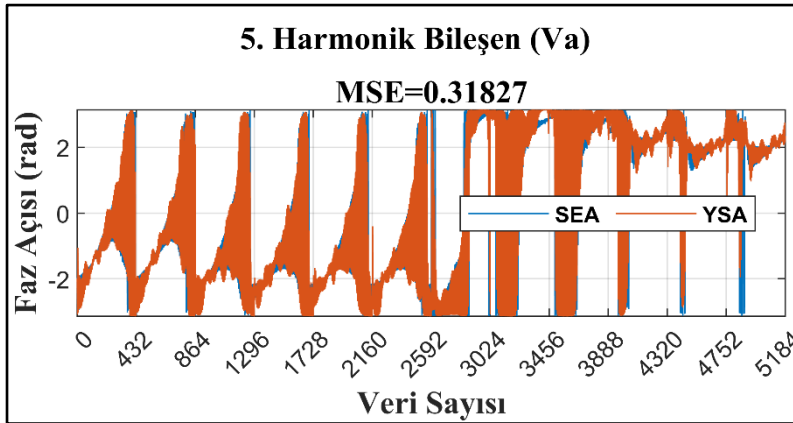
A faz gerilimine ait faz açısı eğitimi sonucunda SEA verileri ile tahmin edilen YSA verilerinin harmonik faz açılarının karşılaştırılması Şekil 4.4-4.6’da verilmiştir. Şekillerde dikey kesikli çizgilerin her biri yüklenme oranını, mavi renk ile belirtilen SEA’dan elde edilen verileri, kırmızı renk ile belirtilen ise YSA’dan elde edilen tahmin verilerini göstermektedir. Mavi ile kırmızının üst üste bindiği yerlerde tahminin iyi gerçekleştiği, sadece mavi renk gözüken kısımlarda ise hatalar olduğu görülmektedir. YSA eğitiminde performans parametresi olarak kullanılan MSE değerlerinin temel bileşen, 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17. ve 19. harmonik bileşenler için sırasıyla  $3.6212 \times 10^{-6}$ , 0.002132, 0.3183, 0.1719, 0.2534, 0.2339, 0.1937, 0.4298, 0.4466 ve 0.3149 olduğu ve bu MSE değerlerinin kabul edilebilir büyüklükte olduğu söylenebilir.



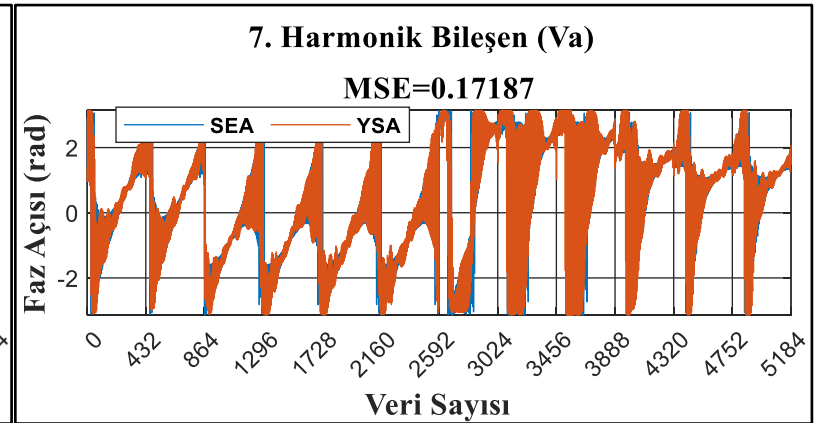
a)



b)

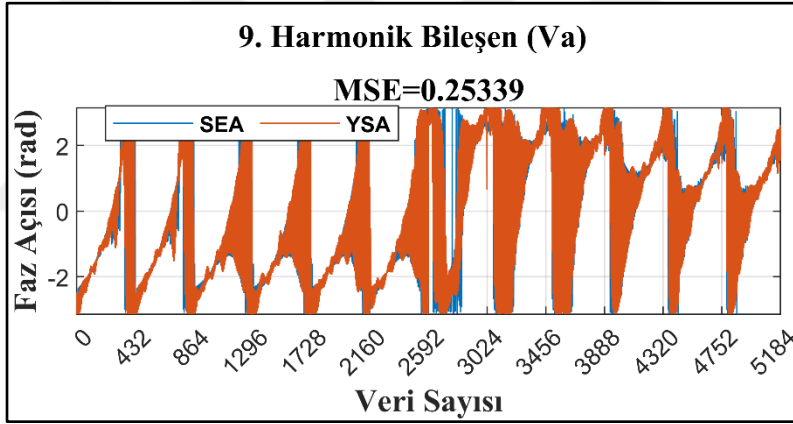


c)

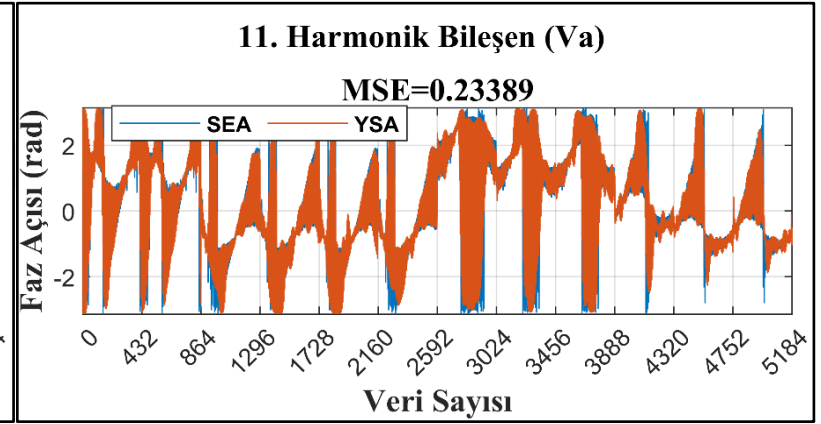


d)

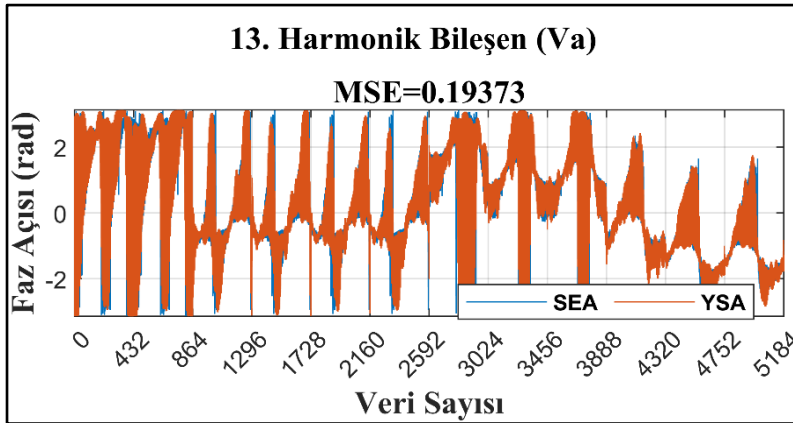
Şekil 4.4: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A faz gerilimi a) temel bileşen, b) 3. harmonik, c) 5. harmonik ve d) 7. harmonik faz açıları için karşılaştırılması.



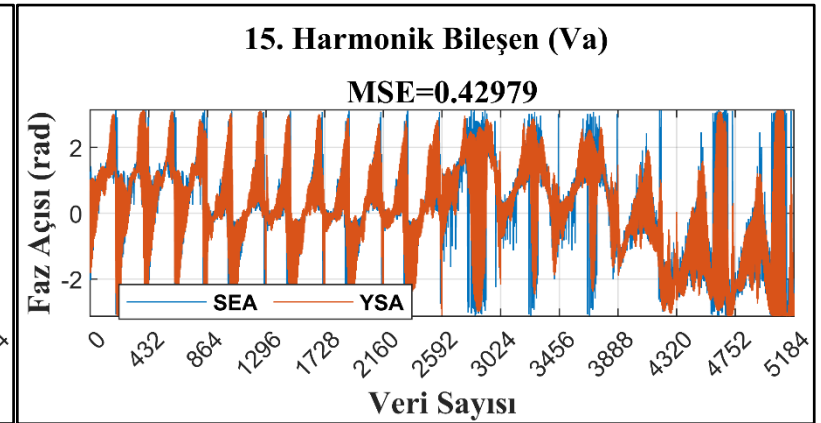
a)



b)

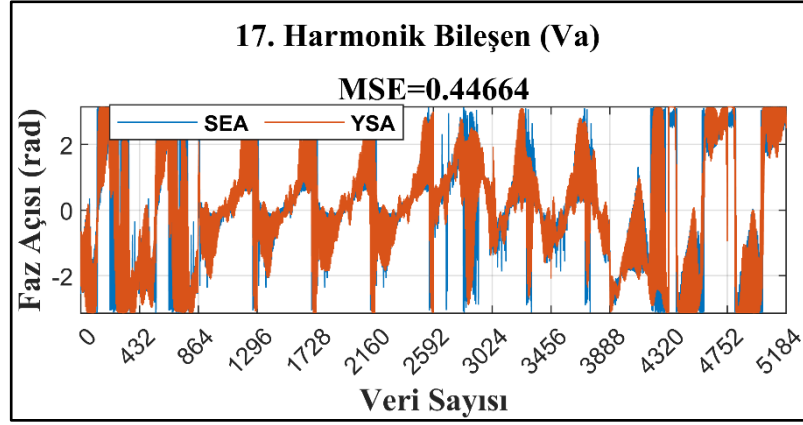


c)

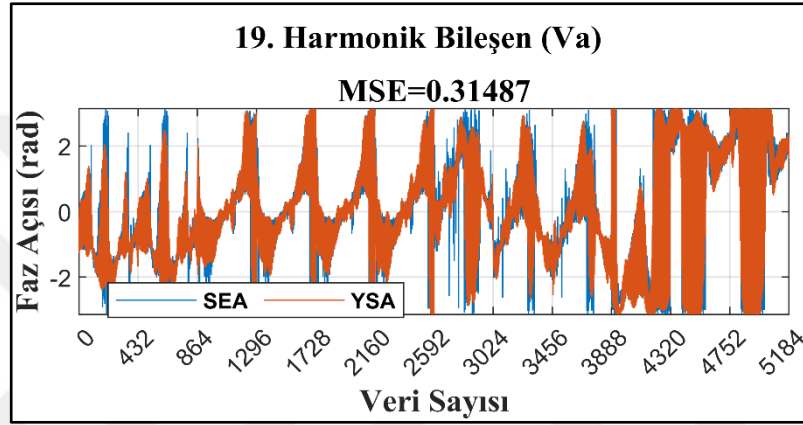


d)

Şekil 4.5: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A faz gerilimi a) 9. harmonik, b) 11. harmonik, c) 13. harmonik ve d) 15. harmonik faz açıları için karşılaştırılması.



a)



b)

Şekil 4.6: SEA verisi ve YSA tahmin verisinin A faz gerilimi a) 17. harmonik ve b) 19. harmonik faz açıları için karşılaştırılması.

### 4.3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde, bir önceki bölümde tespit edilen eğitim algoritması, aktivasyon fonksiyonu çiftine göre optimal gizli katman nöron sayıları bulunarak YSA temelli bireysel harmonik tahmin modeli oluşturulmuştur. THD<sub>v</sub> tahmin modelinde olduğu gibi modelin girdileri SG'nin doğrusal olmayan yüklenme oranı, d.a. uyarım akımı üzerine bindirilen 300 Hz'lik sinüzoidal bileşenin genliğinin d.a. bileşen genliği cinsinden bağıl değeri ve derece cinsinden faz açısıdır.

Modelin geçerliliğini göstermek için SEA verisi ve YSA tahmin verilerinin karşılaştırılmasında,

Faz geriliminin temel ve harmonik bileşenlerinin genliklerinin grafiklerinden MSE değerlerinin temel bileşen, 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17. ve 19. harmonik

bileşenler için sırasıyla 0.1053, 0.2575, 0.3225, 0.3314, 0.5665, 0.5434, 0.5367, 0.5506, 0.6999 ve 0.9185 olduğu,

Faz geriliminin temel ve harmonik bileşenlerinin faz açılarının grafiklerinden MSE değerlerinin temel bileşen, 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17. ve 19. harmonik bileşenler için sırasıyla  $3.6212 \times 10^{-6}$ , 0.002132, 0.3183, 0.1719, 0.2534, 0.2339, 0.1937, 0.4298, 0.4466 ve 0.3149 olduğu,

Her bir harmonik genliği ve faz açısı için YSA temelli modelin MSE değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Dolayısıyla önerilen modelin terminal faz gerilimi harmoniklerinin tahmininde kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.



## 5.ÖNERİLEN MODELLERİN UYGULANMASI

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan yüklenme koşulları altında çalışan SG'lerin terminal gerilimi harmonik bozulmasını analiz etmek ve uyartım akımının modülasyonu yoluyla bu gerilim harmonik bozulmasını minimize etmek için hesap verimli ve pratik uygulamaya müsait bir aracın önerilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda önceki bölümlerde YSA temelli modeller önerilmiştir.

Bu bölümde, önceki bölümlerde önerilen modellerin, tez kapsamında dikkate alınan ÇKSG'nin 6 darbeleri doğrultucu yük altında terminal gerilimi harmonik bozulmasının minimize edilmesi için uygulaması Ansys Maxwell ile Simplorer ve Matlab/Simulink yazılımları kullanılarak yapılmıştır.

### 5.1. Test Sistemi

Test sistemi oluşturulurken, Matlab/Simulink ara yüzü ve Simplorer ara yüzünden faydalanılmıştır. Matlab/Simulink ara yüzünde, öncelikle YSA modellerinin Simulink ortamına aktarımı gerçekleştirilmiştir. Simulink ortamında oluşturulan model Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.1, üç kısımdan oluşmaktadır;

Birinci kısımda, yüklenme oranına göre THD<sub>v</sub>'yi minimize edecek uyartım akımının genliğini ve faz açısını tahmin etmek için YSA temelli THD<sub>v</sub> bloğu kullanılmıştır. Matlab ortamında yazılan kod aracılığıyla parametrik analizlerle çalıştırılan bloktan elde edilen THD<sub>v</sub> değerlerinden minimumuna karşılık gelen genlik ve faz açısı çifti elde edilmiştir.

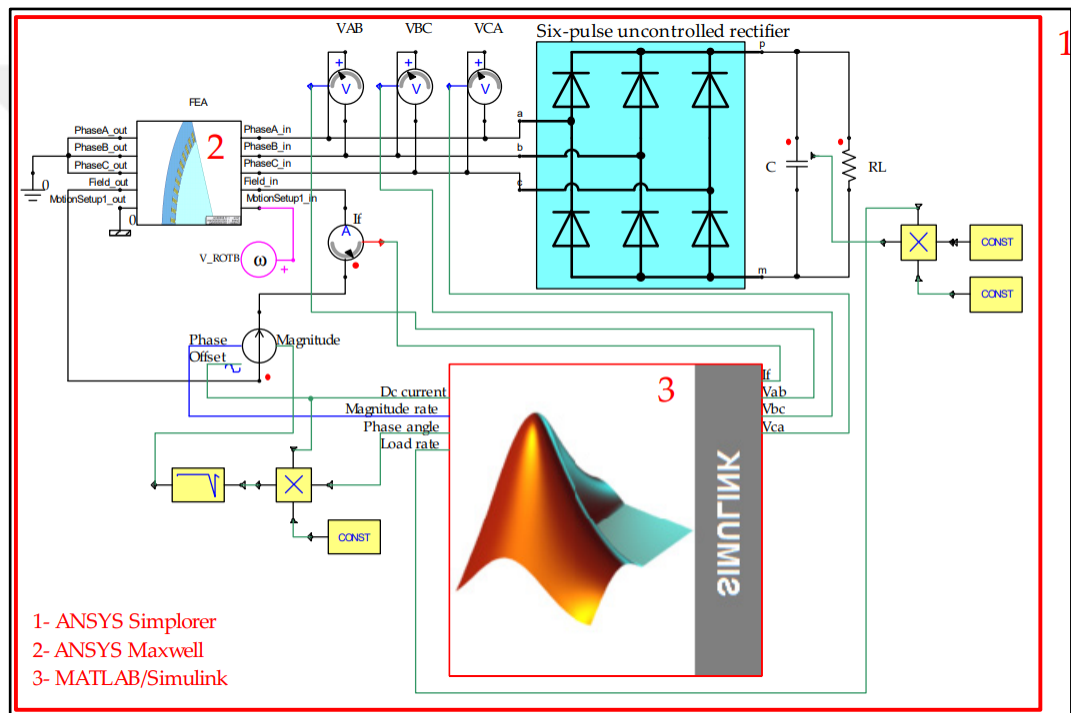
İkinci kısımda, YSA temelli THD<sub>v</sub> bloğundan elde edilen genlik ve faz açısı çifti “AnsoftSFunction” bloğu ile Simplorer ara yüzüne aktarılmıştır. Ayrıca bu blok vasıtasıyla uyartım akımının d.a. genliği, yüklenme oranı, harmonikli uyartım akımının d.a. uyartım akımı genliğinin yüzdesi cinsinden genliği ve faz açısı verileri Simplorer ortamına gönderilmiştir. Ayrıca bu blok vasıtasıyla Simplorer ortamından uyartım akımının ve hat gerilimlerinin Simulink ortamından görüntülenmesi sağlanmıştır. Alan akımının modülasyonu için, önerilen YSA tabanlı modelin uygulanması Matlab/Simulink, Ansys Maxwell ve Ansys Simplorer'ın entegrasyonu ile Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



uygulanmıştır. Optimal modüle edilmiş uyartım akımının aktarımı için şekilde görünen 3 nolu blok kullanılmıştır.

Uygulama sırasında, Şekil 5.2'deki sistemde, altı darbeli kontrolsüz doğrultucu terminal uçlarına bağlı saf direnç yükü değiştirilerek yüklenme oranı ayarlanmakta, Simulink'te belirlenmiş optimal uyartım akımı sentezlenerek SEA temelli SG'nin uyartım sargılarına verilmektedir.

Ayrıca, SEA modelinden hesaplanan terminal gerilimi  $THD_v$  ve bireysel harmonikleri simulink ortamına yine 3 nolu blok üzerinden aktararak YSA temelli modellerin sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır.



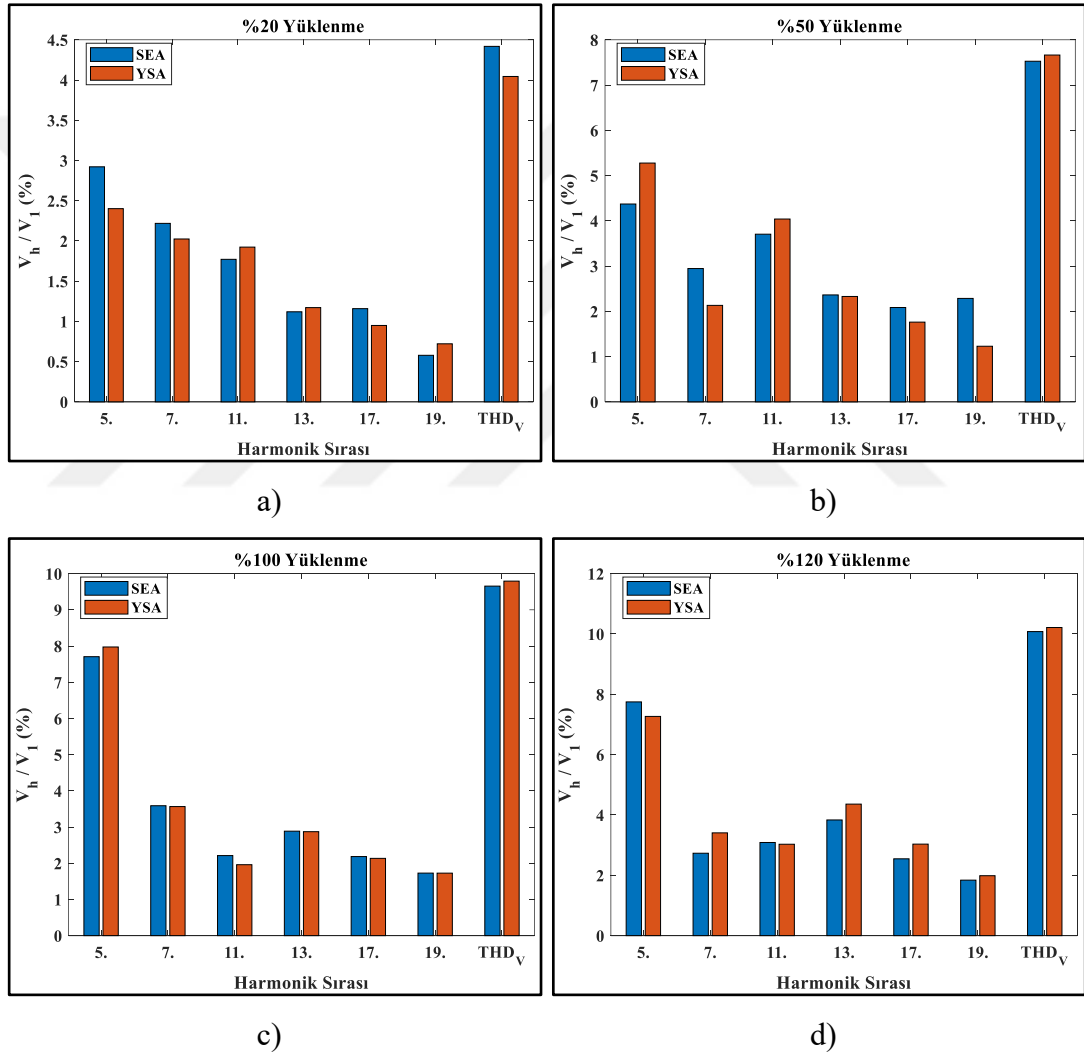
Şekil 5.2: Test sisteminin Simplorer ara yüzü.

## 5.2. Analizler

Analizlerde, Şekil 5.1'deki YSA temelli  $THD_v$  bloğunun girişine uygulanan yüklenme oranı, uyartım akımı 300 Hz'lik bileşen genlik oranı ve faz açısının parametrik taraması ile minimum  $THD_v$ 'ye karşılık gelen optimal uyartım akımı elde edilmiştir. Elde edilen optimal uyartım akımı hem YSA temelli bireysel harmonik

modele hem de Matlab/Simulink etkileşimi ile Simplorer ara yüzünden SG modelin alan sargısına uygulanmıştır.

Düşük (%20), yarım (%50), tam (%100) ve aşırı (%120) yüklenme durumlarına göre Matlab/Simulink etkileşimi ile Simplorer ara yüzünden Maxwell'de gerçekleştirilen SEA'dan elde edilen harmonik bileşenler ve THD<sub>V</sub> ile YSA temelli bireysel harmonik bloklarından elde edilen harmonik bileşenler ve THD<sub>V</sub> Şekil 5.3'de karşılaştırılmıştır. Şekillerde baskın harmonikler olan 5., 7., 11., 13., 17. ve 19. harmonik bileşenler ve THD<sub>V</sub> verilmiştir.



Şekil 5.3: SEA verileri ile YSA verilerinin a) %20, b) %50 c) %100 ve d) %120 yüklenme durumlarında karşılaştırılması.

Şekil 5.3'de yüklenme oranlarına göre küçükten büyüğe (%20, %50, %100, %120) doğru 5. harmonik bileşendeki farkın sırayla 0.520, 0.905, 0.268 ve 0.281, 7.

harmonik bileşendeki farkın sırayla 0.194, 0.814, 0.023 ve 0.425, 11. harmonik bileşendeki farkın sırayla 0.152, 0.335, 0.252 ve 0.058, 13. harmonik bileşendeki farkın sırayla 0.052, 0.034, 0.014 ve 0.525, 17. harmonik bileşendeki farkın sırayla 0.209, 0.323, 0.050 ve 0.487, 19. harmonik bileşendeki farkın sırayla 0.143, 1.057, 0.001 ve 0.147, THD<sub>v</sub>'deki fark ise sırayla 0.374, 0.137, 0.138 ve 0.040 olarak gerçekleşmiştir. THD<sub>v</sub> ve tüm yüklenme durumları için tüm bileşenlerdeki en yüksek farkın 0.905 ile %50 yüklenme oranında 5. harmonik bileşende olduğu görülmektedir. Hem harmonik bileşenlerde hem de THD<sub>v</sub>'de SEA ile YSA tahmin verileri arasında kabul edilebilir miktarda farklar olduğu görülmektedir. THD<sub>v</sub> seviyelerine bakıldığında genel olarak SEA'dan elde edilen değer ile YSA'dan elde edilen değer uyumlu olduğu söylenebilir. %100 yüklenme durumunda hem harmonik bileşenler hem de THD<sub>v</sub> değeri uyumlu olduğu Şekilden görülmektedir. Harmonik bileşenler açısından %50 yüklenme oranında özellikle 5. ve 7. harmonik bileşenlerde farklılıklar bulunmaktadır. SEA verisi ile YSA arasındaki farkın, YSA temelli THD<sub>v</sub> bloğu ve bireysel harmonik genlik ve açı bloklarının kaynaklanmaktadır. YSA'ların eğitiminde performans parametresi olarak kullanılan MSE değeri bunun göstergesidir. Buna ilaveten, bireysel harmonik bileşenlerin genlik ve faz açısının MSE değerinin tahmin üzerinde etkisi olduğu söylenebilir.

### 5.3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde, önceki bölümlerde önerilen modellerin, tez kapsamında dikkate alınan çıkık kutuplu senkron generatörün, 6 darbeleri doğrultucu yük altında terminal gerilimi harmonik bozulma değerinin (THD<sub>v</sub>) minimize edilmesi için uygulaması Ansys Maxwell, Simpler ve Matlab/Simulink yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Bununla birlikte, SG'nin terminal gerilimlerinin toplam harmonik bozulmasının yanı sıra bireysel harmoniklerinin de simüle edilebileceği ve SEA'ya göre zaman verimli YSA modelleri Simulink ortamında oluşturulmuştur.

Bu uygulamada, SEA ve önerilen YSA temelli modellerin THD<sub>v</sub> ve bireysel harmonik sonuçlarının karşılaştırmalı analizinden, önerilen modelin THD<sub>v</sub> değerini minimize eden optimal modüle edilmiş uyarım akımının belirlenmesi ve sentezlenmesinde bir araç olarak kullanılabileceği görülmüştür.

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan yüklenme koşulları altında çalışan SG'lerin terminal gerilimi harmonik bozulmasını analiz etmek ve uyarım akımının modülasyonu yoluyla bu gerilim harmonik bozulmasını iyileştirmek için hesap verimli ve pratik uygulamaya müsait bir aracın önerilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda ilk olarak, modellenen 538 kVA gücünde ve 400 V anma geriliminde üç fazlı ÇKSG'nin doğrusal olmayan yüklenme altında saf d.a. uyarım ve modüle edilmiş uyarım akımları altında terminal geriliminin harmonik davranışı analiz edilmiştir. Analizlerde, doğrusal olmayan yük olarak, endüstride yaygın kullanılan 6 darbeli doğrultucu kullanılmıştır. 6 darbeli doğrultucunun d.a. tarafına saf direnç bağlanmıştır. Uyarım akımı modülasyonunda d.a. bileşen üzerine bir sinüzoidal dalga bindirilmiştir. Modülasyon için d.a. bileşen anma değerinde sabit tutulmuş, sinüzoidal bileşenin genliği ise d.a. bileşenin genliğinin %30'una varan değerlere kadar artırılmıştır. Ayrıca her bir genlik değeri için sinüzoidal bileşenin frekansı 100 Hz ile 900 Hz arasında ve faz açısı ise  $0^\circ$  ile  $355^\circ$  arasında değiştirilmiştir.

Analizler neticesinde, modellenen üç fazlı ÇKSG için;

Yüksüz durumdaki terminal hat gerilimlerinin toplam harmonik bozulma değerinin ( $THD_V$ ) yaklaşık %3.5 ve baskın harmonik bileşenlerinin 5. ve 7. harmonikler olduğu,

Anma gücünde 6 darbeli doğrultucu yükünü beslerken faz akımlarının toplam harmonik bozulma değerinin ( $THD_I$ ) yaklaşık %20 ve  $THD_V$  değerinin yaklaşık %18 olduğu, ayrıca hem akım hem de gerilim baskın harmonik numaralarının 5, 7, 11 ve 13 olduğu,

6 darbeli doğrultucu yük tipi tam, yarım ve çeyrek yüklenme için  $THD_V$ 'yi en fazla iyileştiren modüle uyarım akımının 300 Hz frekanslı sinüzoidal bileşen veya 6. harmonik bileşen içeren uyarım akımı olduğu,

Harmonik bozulmayı en fazla iyileştiren modüle uyarım akımının, saf d.a. uyarım akımına kıyasla tam, yarım ve çeyrek yüklenme durumunda elde edilen  $THD_V$  iyileştirme oranlarının %38.76 , %24.86 ve %11.83 olduğu,

İkinci olarak, SEA'den elde edilen  $THD_V$  verileri dikkate alınarak 12 farklı eğitim algoritması, 3 aktivasyon fonksiyonu kombinasyonunun oluşturduğu 9

aktivasyon fonksiyonu çifti ve farklı nöron sayıları için yapay sinir ağları (YSA) eğitimi gerçekleştirilmiştir. Eğitim algoritmaları arasında yapılan karşılaştırma neticesinde,

Eğitim algoritmalarının en iyi performans gösterdikleri fonksiyon çifti durumlarıyla birlikte MSE bakımından iyiden (küçükten) kötüye (büyüğe) doğru, LM (tansig-tansig), BFG (logsig-tansig), RP (logsig-tansig), SCG (tansig-purelin), CCB (tansig-tansig), CGF (tansig-purelin), CGP (tansig-tansig), OSS (tansig-purelin), GDX (tansig-tansig), GDA (tansig-tansig), GD (purelin-tansig) ve GDM (purelin-tansig) sıralandığı,

R değerlerinin 1'e yakın olması ve MSE değerlerinin diğerlerine göre en küçük olması göz önüne alındığında, THD<sub>v</sub> tahmini için YSA modelinde kullanılmak üzere gizli ve çıkış katmanlarında tansig fonksiyonları bulunan LM eğitim algoritmasının en uygun olduğu,

YSA modelinin eğitim, doğrulama ve test verileri için korelasyon katsayılarının yani R değerlerinin analizi neticesinde geliştirilen YSA modelinin THD<sub>v</sub> tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Üçüncü olarak, YSA temelli THD<sub>v</sub> modelin oluşturulmasında tespit edilen eğitim algoritması, aktivasyon fonksiyonu çiftine göre optimal gizli katman nöron sayıları bulunarak bireysel harmonik tahmin modeli her bileşenin genlik ve faz açısında optimal nöron belirlenmiştir. Modelin geçerliliğini göstermek için SEA verisi ve YSA tahmin verilerinin karşılaştırılmıştır. Her bir harmonik genliği ve faz açısı için YSA temelli modelin MSE değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

Son olarak, önerilen modellerin, tez kapsamında dikkate alınan çıkık kutuplu senkron generatörün, 6 darbeli doğrultucu yük altında terminal gerilimi harmonik bozulma değerinin (THD<sub>v</sub>) minimize edilmesi için uygulaması Ansys Maxwell, Simplorer ve Matlab/Simulink yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Bu uygulamada, SEA ve önerilen YSA temelli modellerin THD<sub>v</sub> ve bireysel harmonik sonuçlarının karşılaştırmalı analizinden, önerilen modelin THD<sub>v</sub> değerini minimize eden optimal modüle edilmiş uyarım akımının belirlenmesi ve sentezlenmesinde bir araç olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Bu tez çalışmasının devamında, önerilen yöntem d.a. alan sargısına sahip döner elektrik makinalarına ve diğer doğrusal olmayan yükler için uygulanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Sainz L., Mesas J. J., Ferrer A., (2008), "Characterization of non-linear load behavior", *Electric Power Systems Research*, 78(10), 1773-1783.
- [2] Kalair A., Abas N., Kalair A. R., Saleem Z., Khan N., (2017), "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152-1187.
- [3] Kocatepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R., Karakaş A., Arıkan O. (2003). "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", 1. Baskı, Birsen Yayınevi.
- [4] Demircioğlu E. H., (2018), "Sinüzoidal olmayan şartlarda transformatör yüklenme kapasitesini maksimize etmek için pasif harmonik filtre tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi.
- [5] Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O., (2021), "A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems", *Energies*, 14(20), 6467.
- [6] Fuchs E. F., Masoum M. A. (2011). "Power quality in power systems and electrical machines", 2nd Edition, Academic press.
- [7] Shuai Z., Liu D., Shen J., Tu C., Cheng Y., Luo A., (2013), "Series and parallel resonance problem of wideband frequency harmonic and its elimination strategy", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(4), 1941-1952.
- [8] Canturk S., Balci M. E., Hocaoglu M. H., Koseoglu A. K., (2021), "Investigation of the Effects of DC Bias on Single-Phase Shell Type Transformers Using Frequency-Dependent Reluctance-Based Model", *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(9), 1-9.
- [9] Canturk S., Balci M. E., Hocaoglu M. H., Koseoglu A. K., (2022), "Performance analysis of three-phase five-leg transformers under DC bias using a new frequency-dependent reluctance-based model", *IET Generation, Transmission and Distribution*, 16(12), 2455-2465.
- [10] Dönük A., (2020), "A laboratory application for teaching the effect of harmonics on transformer core saturation", *The International Journal of Electrical Engineering and Education*, 57(3), 191-201.
- [11] Mezani S., Laporte B., Takorabet N., (2005), "Saturation and space harmonics in the complex finite element computation of induction motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(5), 1460-1463.

- [12] Palmer J. A., Degeneff R. C., McKernan T. M., Halleran T. M., (1993), "Pipe-type cable ampacities in the presence of harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, 8(4), 1689-1695.
- [13] Wang H., Zhou W., Qian K., Meng S., (2019), "Modelling of ampacity and temperature of MV cables in presence of harmonic currents due to EVs charging in electrical distribution networks", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 112, 127-136.
- [14] Caramia P., Carpinelli G., Russo A., Verde P., (2003), "Estimation of thermal useful life of MV/LV cables in presence of harmonics and moisture migration", IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 23-26 June.
- [15] Shazly J. H., Mostafa M. A., Ibrahim D. K., Abo El Zahab E. E., (2017), "Thermal analysis of high-voltage cables with several types of insulation for different configurations in the presence of harmonics", IET Generation, Transmission and Distribution, 11(14), 3439-3448.
- [16] Farzin H., Monadi M., Fotuhi-Firuzabad M., Savaghebi M., (2021), "A reliability model for overcurrent relays considering harmonic-related malfunctions", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 131, 1-10.
- [17] Masoum M. A. S., Islam S. M., Tan K., Tung N. X., (2007), "Impact of harmonics on tripping time of overcurrent relays", Australasian Universities Power Engineering Conference, Perth, WA, Australia, 09-12 December.
- [18] Benjamin A., Jain S. K., (2018), "A review of literature on effects of harmonics on protective relays", IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Singapore, 22-25 May.
- [19] Girgis A. A., Baldwin T. L., Makram E. B., Fortson H. S., (1990), "Testing the performance of three-phase induction watt-hour meters in the presence of harmonic distortion", IEEE Transactions on Industry Applications, 26(4), 689-695.
- [20] El-Sadek M. Z., Ibrahim E. N., Kamel R. M., (2004), "Watt-hour meters readings errors in presence of harmonics and active filters", International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, Cairo, Egypt, 5-7 September.
- [21] Barbaro P. V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S., (2006), "Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems", XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, 17-22 September.
- [22] Chattopadhyay S., Mitra M., Sengupta S., Chattopadhyay S., Mitra M., Sengupta S. (2011). "Electric Power Quality", 1st Edition, Springer.

- [23] Sonerud B., Bengtsson T., Blennow J., Gubanski S. M., (2009), "Dielectric heating in insulating materials subjected to voltage waveforms with high harmonic content", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(4), 926-933.
- [24] Yamazaki K., Utsunomiya K., Ohiwa H., (2021), "Mechanism of torque ripple generation by time and space harmonic magnetic fields in permanent magnet synchronous motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69(10), 9884-9894.
- [25] F Ii I., (1993), "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems", Technical Report No: IEEE Std-519-1992, IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, New York, USA.
- [26] Singh B., Verma V., Chandra A., Al-Haddad K., (2005), "Hybrid filters for power quality improvement", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 152(3), 365-378.
- [27] Nassif A. B., Xu W., Freitas W., (2009), "An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications", IEEE Transactions on Power Delivery, 24(3), 1710-1718.
- [28] Tali M., Obbadi A., Elfajri A., Errami Y., (2014), "Passive filter for harmonics mitigation in standalone PV system for non linear load", 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference, Ouarzazate, Morocco, 17-19 October.
- [29] Peng F. Z., Akagi H., Nabae A., (1990), "A new approach to harmonic compensation in power systems-a combined system of shunt passive and series active filters", IEEE Transactions on Industry Applications, 26(6), 983-990.
- [30] Wakileh G. J. (2019). "Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design", 1st Edition, Springer Nature.
- [31] Peng F. Z., (1998), "Application issues of active power filters", IEEE Industry Applications Magazine, 4(5), 21-30.
- [32] Salmeron P., Litran S. P., (2009), "Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters", IEEE Transactions on Power Delivery, 25(2), 1058-1067.
- [33] Hajipour E., Mohiti M., Farzin N., Vakilian M., (2017), "Optimal distribution transformer sizing in a harmonic involved load environment via dynamic programming technique", Energy, 120, 92-105.
- [34] Mikhak-Beyranvand M., Faiz J., Rezaeealam B., (2020), "Thermal analysis and derating of a power transformer with harmonic loads", IET Generation, Transmission and Distribution, 14(7), 1233-1241.

- [35] Arslan E., Balci M. E., Hocaoglu M. H., (2014), "An analysis into the effect of voltage harmonics on the maximum loading capability of transformers", 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Bucharest, Romania, 25-28 May.
- [36] Henderson R. D., Rose P. J., (1994), "Harmonics: the effects on power quality and transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, 30(3), 528-532.
- [37] Wang J. Q., Song P. C., Cui C. H., Li J. K., Yang T., (2012), "Analysis of operation of synchronous generator under the distortion of harmonic current", 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, China, 27-29 March.
- [38] Fan W., Liao Y., (2012), "Impacts of flickers, harmonics and faults on synchronous generator operations", 44th Southeastern Symposium on System Theory, Jacksonville, FL, USA, 11-13 March.
- [39] Ladjavardi M., Masoum M., Islam S., (2006), "Impact of time and space harmonics on synchronous generator load angle", IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 29 October - 01 November 2006.
- [40] Ladjavardi M., Masoum M. A., Islam S. M., (2008), "Operation of synchronous generator under the influence of time and space harmonics", Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 4(2), 179-189.
- [41] Kutt F., Michna M., Kostro G., Ronkowski M., Adamczyk D., (2014), "Synchronous generator model taking into account the non-uniform saturation of the pole shoes", International Conference on Electrical Machines Berlin, Germany, 2-5 September.
- [42] Nuzzo S., Degano M., Galea M., Gerada C., Gerada D., Brown N., (2016), "Improved damper cage design for salient-pole synchronous generators", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(3), 1958-1970.
- [43] Nuzzo S., Marfoli A., Papini L., Bolognesi P., Gerada C., Galea M., (2019), "The potential of exploiting non-symmetric structures in electrical machines", 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 14-17 October 2019.
- [44] Perin D., Karaoglan A. D., Yilmaz K., (2021), "Using grey wolf optimizer to minimize voltage total harmonic distortion of a salient-pole synchronous generator", Scientia Iranica, 1-29.
- [45] Karaoglan A. D., Perin D., (2022), "Rotor design optimization of a synchronous generator by considering the damper winding effect to minimize THD using grasshopper optimization algorithm", An International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications (IJOCTA), 12(2), 90-98.

- [46] Nuzzo S., Galea M., Bolognesi P., Vakil G., Fallows D., Gerada C., Brown N., (2018), "A methodology to remove stator skew in small-medium size synchronous generators via innovative damper cage designs", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(6), 4296-4307.
- [47] Elez A., Petrini C. M., Petrini C. M., Vaseghi B., Abasian A., (2018), "Salient pole synchronous generator optimization by combined application of slot skew and damper winding pitch methods", Progress in Electromagnetics Research M, 73, 81-90.
- [48] Wang Y., Nuzzo S., Gerada C., Zhang H., Zhao W., Galea M., (2021), "Integrated Damper Cage for THD Improvements of Variable Speed Salient-Pole Synchronous Generators for the More Electric Aircraft", IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8(3), 3618-3629.
- [49] Boldea I. (2015). "Synchronous generators", 2nd Edition, CRC Press.
- [50] Islam M. J., Moghaddam R. R., (2018), "Loss reduction in a salient pole synchronous machine due to magnetic slot wedge and semiclosed stator slots", XIII International Conference on Electrical Machines, Alexandroupoli, Greece, 3-6 September.
- [51] Spargo A., Ilie S., Chan J., (2017), "Salient-pole rotor optimisations for synchronous generators using FEA software", IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, Nottingham, UK, 20-21 April.
- [52] Bramerdorfer G., Marth E., Nuzzo S., Galea M., (2020), "Multi-Objective Optimization of Medium-Scale Wound-Field Electric Generators", IEEE 19th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation, Pisa, Italy, 16-18 November.
- [53] Woo H. M., Lee D.-H., (2021), "Rotor Shape Design of the 10kVA Synchronous Winding Generator Based on Genetic Algorithm for Power THD Reduction", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 70, 1173-1180.
- [54] Gündoğdu T., (2012), "Development Of Salient-Pole Synchronous Machines By Using Fractional Slot Concentrated Winding Technique and Additional Permanent Magnets", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [55] Asgharpour-Alamdari H., Alinejad-Beromi Y., Yaghobi H., (2017), "Reduction in distortion of the synchronous generator voltage waveform using a new winding pattern", IET Electric Power Applications, 11(2), 233-241.
- [56] Asgharpour-Alamdari H., (2021), "Analysis and Implementation of Harmonic Elimination of a Synchronous Generator Supplying Nonlinear Loads", Karafan Quarterly Scientific Journal, 18(3), 155-168.
- [57] Dajaku G., Xie W., Gerling D., (2013), "Reduction of low space harmonics for the fractional slot concentrated windings using a novel stator design", IEEE Transactions on Magnetics, 50(5), 1-12.

- [58] Abdel-Khalik A. S., Ahmed S., Massoud A. M., (2014), "Low space harmonics cancelation in double-layer fractional slot winding using dual multiphase winding", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(5), 1-10.
- [59] Jiji K. S., Jayadas N. H., Babu C. A., (2013), "FEM-based virtual prototyping and design of third harmonic excitation system for low-voltage salient-pole synchronous generators", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(3), 1829-1834.
- [60] Yao F., An Q., Sun L., Illindala M. S., Lipo T. A., (2017), "Optimization design of stator harmonic windings in brushless synchronous machine excited with double-harmonic-windings", *International Energy and Sustainability Conference*, Farmingdale, NY, USA, 19-20 October.
- [61] Yao F., An Q., Sun L., Lipo T. A., (2016), "Performance investigation of a brushless synchronous machine with additional harmonic field windings", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(11), 6756-6766.
- [62] Abolhassani M. T., Toliyat H. A., Enjeti P., (2001), "An electromechanical active harmonic filter", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Cambridge, MA, USA, 17-20 June.
- [63] Abolhassani M. T., Toliyat H. A., Enjeti P., (2001), "Harmonic compensation using advanced electric machines", *27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Denver, CO, USA, 29 November - 02 December.
- [64] Fallows D., Nuzzo S., Costabeber A., Galea M., (2017), "Power quality improvement by pre-computed modulated field current for synchronous generators", *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis*, Nottingham, UK, 20-21 April.
- [65] Kimpara M. L. M., Pinto J. O. P., Fahimi B., Ribeiro P., Godoy R. B., Silva L. E. B., (2013), "Field reconstruction method applied for harmonic voltage mitigation in salient pole synchronous generators", *Brazilian Power Electronics Conference*, Gramado, Brazil, 27-31 October.
- [66] Evestedt F., Pérez-Loya J. J., Abrahamsson C. J. D., Lundin U., (2021), "Controlling airgap magnetic flux density harmonics in synchronous machines using field current injection", *Electrical Engineering*, 103(1), 195-203.
- [67] Venna K. R., (2015), "A Simulation analysis to improve the dielectric strength inside High Voltage Vacuum Interrupters", *Yüksek Lisans Tezi*, Brandenburg Cottbus-senftenberg Üniversitesi.
- [68] Lian K. L., Perkins B. K., Lehn P. W., (2008), "Harmonic analysis of a three-phase diode bridge rectifier based on sampled-data model", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 1088-1096.

- [69] Arvindan A. N., Abinaya B., (2010), "THD Mitigation in line currents of 6-pulse diode bridge rectifier using the delta-Wye transformer as a triplen harmonic filter", *Proc. NPSC*, 10, 210-215.
- [70] Rashid M. H. (2017). "Power Electronics Handbook", 4th Edition, Butterworth-heinemann.
- [71] McCulloch W. S., Pitts W., (1943), "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.
- [72] Santin D., (2008), "On the approximation of production functions: a comparison of artificial neural networks frontiers and efficiency techniques", *Applied Economics Letters*, 15(8), 597-600.
- [73] Mjalli F. S., Al-Asheh S., Alfadala H. E., (2007), "Use of artificial neural network black-box modeling for the prediction of wastewater treatment plants performance", *Journal of Environmental Management*, 83(3), 329-338.
- [74] Elsheikh A. H., Abd Elaziz M. E. (2022). "Artificial Neural Networks for Renewable Energy Systems and Real-World Applications", 1st Edition, Academic Press.
- [75] Vui C. S., Soon G. K., On C. K., Alfred R., Anthony P., (2013), "A review of stock market prediction with Artificial neural network (ANN)", *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Penang, Malaysia, 29 November -01 December.
- [76] Werbos P. J., (1988), "Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market model", *Neural networks*, 1(4), 339-356.
- [77] Ullah Z., Xu Z., Zhang L., Zhang L., Ullah W., (2018), "RL and ANN based modular path planning controller for resource-constrained robots in the indoor complex dynamic environment", *IEEE Access*, 6, 74557-74568.
- [78] Wang H., Yan X., Chen H., Chen C., Guo M., (2015), "Chlorophyll-a predicting model based on dynamic neural network", *Applied Artificial Intelligence*, 29(10), 962-978.
- [79] Roy N. B., Bhattacharya K. (2021). "Application of Signal Processing Tools and Artificial Neural Network in Diagnosis of Power System Faults", 1st Edition, CRC Press.
- [80] Choudhary A., Ahlawat S., Rishi R., Dhaka V. S., (2010), "Performance analysis of feed forward MLP with various activation functions for handwritten numerals recognition", *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering*, Singapore, 26-28 February.
- [81] Yogitha R., Mathivanan G., (2018), "Performance analysis of transfer functions in an artificial neural network", *International Conference on Communication and Signal Processing*, Chennai, India, 3-5 April.

- [82] Raghu S., Sriraam N., (2017), "Optimal configuration of multilayer perceptron neural network classifier for recognition of intracranial epileptic seizures", *Expert Systems with Applications*, 89, 205-221.
- [83] Shen Y., He C., Cao J., Zhang B. (2018). "A relationship construction method between lifecycle cost and indexes of RMSST based on BP neural network". In: Zuo M. J., Ma L., Mathew J., Huang H. Z., Editors, "Engineering Asset Management 2016", Springer.
- [84] Abbas M. H., Norman R., Charles A., (2018), "Neural network modelling of high pressure CO<sub>2</sub> corrosion in pipeline steels", *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 36-45.
- [85] Elizabeth Michael N., Mishra M., Hasan S., Al-Durra A., (2022), "Short-term solar power predicting model based on multi-step CNN stacked LSTM technique", *Energies*, 15(6), 1-20.
- [86] Iqbal M., Naeem U. A., Ahmad A., Ghani U., Farid T., (2020), "Relating groundwater levels with meteorological parameters using ANN technique", *Measurement*, 166, 1-12.

## ÖZGEÇMİŞ

Oktaý KARAKAYA, 2005 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nde lisans eğitimini, 2011 yılında Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini ve 2021 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde mühendislik tamamlama eğitimini tamamladı. 2017 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı doktora programına kaydoldu. 2007 yılından beri Balıkesir Üniversitesi Bigadiç Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Aynı zamanda, 2019 yılından beri İşbir Elektrik A.Ş. Ar-Ge biriminde yarı zamanlı olarak elektrik makinaları alanında çalışmaktadır.

## EKLER

### Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Karakaya O., Balci M. E.,Hocaoglu M. H., (2023), "Minimization of Voltage Harmonic Distortion of Synchronous Generators under Non-Linear Loading via Modulated Field Current", *Energies*, 16(4), 1-17.

Karakaya O., Balci M. E.,Hocaoglu M. H., (2021), "An Approach To Improve Harmonic Distortion of Synchronous Generator Terminal Voltage Under Non-Linear Loading : ANN Based Synthesis of Excitation Current", 3. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, 22-24 October.

