

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL (GES) BİLEŞENLERİNDE
ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Merve BEDELOĞLU

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

AĞUSTOS 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL (GES) BİLEŞENLERİNDE
ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Merve BEDELOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

AĞUSTOS 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL (GES) BİLEŞENLERİNDE ELEKTROMANYETİK
GİRİŞİMİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Merve BEDELOĞLU
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-
2022-5839 nolu proje ile desteklenmiştir.**

AĞUSTOS 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL (GES) BİLEŞENLERİNDE ELEKTROMANYETİK
GİRİŞİMİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Merve BEDELOĞLU
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 04/08/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)
Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN
Prof. Dr. Özlem COŞKUN
Doç. Dr. Süleyman BİLGİN
Doç. Dr. Övünç POLAT

ÖZET

GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL (GES) BİLEŞENLERİNDE ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Merve BEDELOĞLU

Doktora Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Ağustos 2023; 88 sayfa

Teknolojinin hızla ilerlemesi ve enerjiye olan gereksinimin artması ile birlikte güneş enerji santrallerinin (GES) kurulumu yaygınlaşmıştır. Bu da GES’lerde hâlihazırda yapılan çalışmalara ilaveten, enerji kalitesini arttırmaya yönelik olan çalışmaları da beraberinde getirmiştir.

Bu tez çalışmasında büyük ve küçük çaplı santrallerde oluşan gürültü karakterizasyonunun çevresel aygıtlara indüklenmesi üzerine analiz yapılması amaçlanmıştır. Polikristal ve perc monokristal güneş panelleri seçilerek, laboratuvar ortamında GES modeli kurulmuştur. Panel tipine ve çıkışa bağlanan yük karakteristiklerine bağlı olarak iletim yoluyla emisyon gürültüsü ve ısıma yoluyla emisyon gürültüsü ölçülmüştür. Buna ilaveten GES sistemi bileşenleri içinde oluşan ve sistemde dolaşan ortak mod ve diferansiyel mod akımlarının, frekans bileşenlerinde oluşturabilecekleri ısıma emisyonları için analizler anten yaklaşımları ile modellenerek elektromanyetik alanlar analiz edilmiştir. Ayrıca GES bileşenlerinde meydana gelebilecek gürültü akımlarının etkileri eşdeğer devre modelleri ile modellenerek benzetim modelleri üzerine analizler yapılmıştır. GES bileşenlerinde radyo frekansında ısıyan ya da çevresel kaynaklardan gelen gürültünün analizi için PV yapılarının ve kablolama sistemlerinin anten davranışları üzerinde durulmuş ve güneş paneli için ısıma karakteristiğine dair s-parametresi incelenmiştir. Ölçümler Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında yapılmıştır.

Model ve laboratuvar ortamı gürültü analizlerine ilave olarak, yüksek güçlü saha ve çatı tipi 2 adet (1 saha, 1 çatı) GES’in elektromanyetik alan seviyeleri belirlenmiştir. Sonuç olarak yapılan tez çalışmasında GES bileşenlerine ilişkin iletim, ısıma, ortak mod, diferansiyel mod ve elektromanyetik alan seviyelerine ilişkin gürültü analizleri yapılarak elde edilen bulgular tezde sunulmuştur. Yük karakteristiği değiştiği zaman bazı frekans noktalarında sınırların aşılabildiği gözlenmiştir. CM ve DM akımlarının ısıma analizlerinde, düşük değerli olsa bile CM mod akımlarının DM akımlarına göre daha yüksek değerli elektrik alan indüklemeye kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELE: Elektromanyetik girişim, elektromanyetik gürültü, elektromanyetik uyumluluk, güneş enerji sistemleri, güç elektroniği devreleri, diferansiyel mod, ortak mod.

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Prof. Dr. Özlem COŞKUN

Doç. Dr. Süleyman BİLGİN

Doç. Dr. Övünç POLAT



ABSTRACT

MODELING AND ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN SOLAR POWER PLANT (SPP) COMPONENTS

Merve BEDELOĞLU

PhD Thesis in Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

August 2023; 88 pages

With the rapid advancement of technology and the increasing demand for energy, the installation of solar power plants (SPP) has become widespread. This, in addition to the ongoing studies in SPPs, has also brought along endeavors aimed at enhancing energy quality.

In this thesis, the aim was to conduct an analysis on the induction of noise characterization in large and small-scale power plants onto environmental devices. Polycrystalline and perc monocrystalline solar panels were selected and the GES model was established in the laboratory environment. Depending on the panel type and the load characteristics connected to the output, conducted emission noise and radiated emission noise were measured. In addition, electromagnetic fields were analyzed through antenna approaches by modeling the common mode and differential mode currents circulating within the components of the PV system, which are generated and flow among the components of the SPP system, for the radiated emissions they might produce in their frequency components. In addition, the effects of noise currents that may occur in SPP components were modeled with equivalent circuit models and analyses were conducted on simulation models. The antenna behaviors of PV structures and cabling systems have been emphasized for the analysis of radiated emissions or ambient noise sources at radio frequency in SPP components, and the s-parameter of radiation characteristic for solar panel has been examined. Measurements were made in Akdeniz University Industrial and Medical Applications Microwave Application and Research Center laboratories.

In addition to model and laboratory environment noise analysis, electromagnetic field levels of 2 high-power field and roof type SPPs (1 plant, 1 roof) have been determined. As a result, in the thesis study, the findings obtained by conducting noise analyzes related to transmission, radiation, common mode, differential mode and electromagnetic field levels related to SPP components have been presented in the thesis. It has been observed that frequencies can be exceeded at some frequency points when the load characteristics change, and it has been observed that CM and DM currents have a higher electric field inducing capacity than DM currents, even though they have low values in the radiation analysis.

KEYWORDS: Common mode, differential mode, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, electromagnetic noise, power electronics circuits, solar energy systems.

COMMITTEE: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Prof. Dr. Özlem COŞKUN

Assoc. Prof. Dr. Süleyman BİLGİN

Assoc. Prof. Dr. Övünç POLAT



ÖNSÖZ

Enerji tedarikinde güneş enerji sistemlerinin popülarlığının artmasıyla birlikte bu sistemlerin neden olabileceği bazı teknik durumlar gündemde yer almıştır. Bu tez çalışmasının da konusu olan güneş enerji sistemlerinde elektromanyetik uyumluluk önem kazanmıştır.

Doktora tez çalışmalarım süresince değerli zamanını esirgemeyen, çalışmalarımın deneysel ve teorik aşamalarında bilgi ve tecrübeleri ile destek olan değerli danışmanım Prof. Dr. Şükrü ÖZEN'e teşekkür ederim.

Tez izleme komitemin jüri üyeleri olan Doç. Dr. Süleyman BİLGİN ve Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN'a değerli katkıları için teşekkür ederim.

EMUMAM müdürü Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e teşekkür ederim.

Her daim sevgilerini ve desteklerini hissettiğim, büyük emek ve fedakârlıklarıyla yanımda olan anneme ve babama sonsuz sevgi ve minnetlerimi sunar ve teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar	1
1.2. Maxwell Denklemleri	4
1.3. Elektromanyetik Dalga	4
1.4. Elektromanyetik Uyumluluk ve Girişim	6
1.4.1. Elektromanyetik gürültü modları.....	7
1.4.2. EMC ölçümleri	8
1.5. Güneş Enerjisi Sistemleri	9
1.5.1. Fotovoltaik sistem.....	9
1.5.2. Güneş hücre yapısı.....	10
1.5.3. Güneş hücresi elektrik devre modellemesi	10
1.5.4. Güneş paneli	12
1.5.5. Dönüştürücü devre.....	13
1.5.6. Güneş enerji sistemlerinde EMI	14
2. KAYNAK TARAMASI	16
3. MATERYAL VE METOT	22
3.1. Işıma Emisyonlarının Matematiksel Modellenmesi.....	22
3.1.1. CM Akımı için emisyon modeli	26
3.1.2. DM akımı için emisyon modeli	26
3.1.3. Frekans analizi	27
3.1.4. Işıma emisyon spektrumu	30
3.2. İletim Emisyonlarının Simülasyonu	31
3.3. İletim ve Işıma Ölçümleri.....	33
3.3.1. İletim yoluyla gürültü ölçümü	35
3.3.2. Işıma yoluyla gürültü ölçümü.....	38

3.4. Güneş Paneli S-parametre Ölçümü	41
3.5. GES Sahasında Elektromanyetik Alan Ölçümleri.....	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
4.1. CM ve DM Akım Işımaları Model Analizi	44
4.2. Simülasyon Sonuçları.....	48
4.3. İletim Gürültü Ölçüm Sonuçları.....	51
4.3.1. Laboratuvar ortamı polikristal panel ölçümleri	51
4.2.2. Laboratuvar ortamı perc monokristal panel ölçümleri	57
4.2.3. Açık alan polikristal panel ölçümleri.....	59
4.2.4. Açık alanda alınan perc monokristal panel ölçümleri	62
4.4. Işıma Gürültü Ölçüm Sonuçları	66
4.4.1. Polikristal panel ölçümleri.....	66
4.4.2. Perc monokristal panel ölçümleri	72
4.5. Güneş Paneli S-parametre Ölçüm Sonucu	78
4.6. Elektrik Alan ve Manyetik Alan Ölçüm Sonuçları	79
5. SONUÇLAR	83
6. KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Güneş Enerji Santral (GES) Bileşenlerinde Elektromanyetik Girişimin Modellenmesi Ve Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

04/08/2023

Merve BEDELOĞLU

İmza

X

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Değişimli idealite faktörü
A	: Anten Faktörü
d	: İdealite faktörü
d	: Gözlem noktasının orijine olan mesafesi
dB	: İletim Yoluyla Emisyon
E_{θ}	: θ yönündeki elektrik alanı
E_C	: Ortak mod akımının oluşturduğu alan
E_D	: Diferansiyel mod akımının oluşturduğu alan
f	: Frekans
G	: Işıma
G_{ref}	: STC'de ışıma
I	: Çıkış akımı
I_C	: Ortak mod akımı
I_D	: Diferansiyel mod akımı
I_d	: Diyot akımı
I_p	: Paralel dirençteki kaçak akım
I_{ph}	: Hücre tarafından üretilen akım
$I_{ph,ref}$	: STC'de hücre tarafından üretilen akım
I_0	: Diyotun ters saturasyon akımı
I_P	: Paralel iletkenin akan akım
I_N	: Paralel iletkenin akan akım
k	: Boltzman sabiti
L	: İletken uzunluğu
MHz	: Megahertz

M	: Anten tipi fonksiyonunu
q	: Elektron yükü
s	: Kablolar arası mesafe
N	: Seri bağlı fotovolttaik hücre sayısı
R_p	: Paralel direnç
R_s	: Seri direnç
r_1	: Gözlem noktasının iletkene olan mesafesi
r_2	: Gözlem noktasının iletkene olan mesafesi
T	: Periyot
T_c	: Hücre sıcaklığı
t_{on}	: Anahtarın kapalı olma süresi
V_T	: Termal gerilim
V_0	: Çıkış gerilimi
Z_0	: Dalga empedansı
μ_{sc}	: Kısa devre akımının katsayısı
μV	: Mikrovolt
τ	: Görev döngüsü
τ_r	: Yükselme zamanı
τ_f	: Düşme zamanı
λ	: Dalga boyu
η	: Dalga empedansı
β	: Ortamın faz sabiti
ω	: Açısal hız
c	: Işık hızı

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
AF	: Anten Faktörü
CE	: İletim Yoluyla Emisyon
CISPR	: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
CM	: Ortak Mod
DC	: Doğru Akım
DM	: Diferansiyel Mod
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik Girişim
EMTP	: Elektromanyetik Geçişler Programı
EMUMAM	: Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi
FCC	: Federal Communications Commission
FDTD	: Sonlu Fark Zaman Alanı
GEPA	: Güneş Enerji Potansiyel Atlası
GES	: Güneş Enerji Santrali
ICNIRP	: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ICWT	: Ters Sürekli Dalgacık Dönüşümü
IEC	: International Electrotechnical Commission
IGBT	: İzoleli Kapı, Bipolar, Transistör
LISN	: Hat Empedans Stabilizasyon Ağı
MOSFET	: Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
NF	: Near Field/Yakın Alan
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
RE	: Işıma Yoluyla Emisyon

RF : Radyo Frekansı
RFI : Radyo Frekansı Girişimi
TAC : Test Altındaki Cihaz
VNA : Vektör Ağ Analizörü

Tezde ondalık yazımlarda, ondalık ayırıcı olarak “21.01” stili kullanılmıştır.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Türkiye'nin ortalama radyasyon dağılım haritası.....	1
Şekil 1.2. Faraday indükleme yasası.....	3
Şekil 1.3. Elektromanyetik dalga	5
Şekil 1.4. Girişim alanları	6
Şekil 1.5. a) CM gerilimi; b) DM gerilimi; c) CM ve DM akımları	7
Şekil 1.6. GES sisteminde CM ve DM akımları.....	8
Şekil 1.7. İletim gürültü ölçümü deney düzeneği	9
Şekil 1.8. Işıma gürültü ölçümü deney düzeneği.....	9
Şekil 1.9. Güneş hücresi kesiti (Prajapati 2019).....	10
Şekil 1.10. Güneş hücresi tek diyot devre modelleri a) İdeal model; b) Basit model; c) Standart model	11
Şekil 1.11. Güneş paneli katmanları	13
Şekil 1.12. Anahtarlama elemanına uygulanan pals sinyali	14
Şekil 1.13. Tam köprü invertör devresi	14
Şekil 1.14. GES'lerde EMI	15
Şekil 1.15. GES sisteminde CM ve DM akımları.....	15
Şekil 3.1. Akım taşıyan paralel kablo çifti.....	22
Şekil 3.2. İletim yoluyla emisyonların neden olduğu ışıma emisyonları; a) cm akımlarının ışıma emisyonları; b) dm akımlarının ışıma emisyonları	23
Şekil 3.3. Uzak alan ışıması.....	23
Şekil 3.4. Kare dalga formu	28
Şekil 3.5. Trapezoidal dalga formu.....	28
Şekil 3.6. Trapezoidal darbe dizisinin spektrum zarfı	29
Şekil 3.7. CM ışıma emisyonu	30
Şekil 3.8. CM ışıma alan spektrumu.....	30
Şekil 3.9. DM ışıma emisyonu.....	31

Şekil 3.10. DM ışıma alan spektrumu.....	31
Şekil 3.11. GES modelinde gürültü simülasyonu (DC LISN)	32
Şekil 3.12. GES modelinde gürültü simülasyonu (AC LISN)	32
Şekil 3.13. CISPR22 sınır değerleri	33
Şekil 3.14. Yapay güneş ışığı sistemi	35
Şekil 3.15. Spektrum analizör	36
Şekil 3.16. LISN'nin topraklanması	36
Şekil 3.17. Zayıflatıcı.....	36
Şekil 3.18. Solar metre.....	37
Şekil 3.19. Polikristal güneş paneli.....	37
Şekil 3.20. Açık alanda polikristal güneş paneli.....	38
Şekil 3.21. Açık alanda perc monokristal güneş paneli	38
Şekil 3.22. Bikonik anten.....	39
Şekil 3.23. Log-periyodik anten	39
Şekil 3.24. Bikonik anten yatay polarizasyon.....	40
Şekil 3.25. Bikonik anten dikey polarizasyon	40
Şekil 3.26. Log-periyodik anten; a) yatay polarizasyon; b) dikey polarizasyon	41
Şekil 3.27. S-parametre ölçümü.....	41
Şekil 3.28. GES santrali	42
Şekil 3.29. Çatı GES	43
Şekil 3.30. Çatı GES konumlandırma.....	43
Şekil 4.1. CM akımlarının neden olduğu EA.....	48
Şekil 4.2. DM akımlarının neden olduğu EA	48
Şekil 4.3. LISN DC tarafta iken (yüksüz).....	49
Şekil 4.4. LISN DC tarafta iken (1 mH-0.001Ω yük).....	49
Şekil 4.5. LISN AC tarafta iken (yüksüz).....	50

Şekil 4.6. LISN AC tarafta iken (1 mH-0.001Ω yük).....	50
Şekil 4.7. LISN DC tarafta iken.....	51
Şekil 4.8. İnvertör kapalı, panel bağlantısız.....	52
Şekil 4.9. İnvertör kapalı, panel bağlı, aydınlatma sistemi açık	52
Şekil 4.10. Sistem açık, 9 W yük bağlı	53
Şekil 4.11. Sistem açık, 40 W yük bağlı	53
Şekil 4.12. Sistem açık, floresan lamba bağlı	54
Şekil 4.13. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan kademesinde	54
Şekil 4.14. Sistem açık, saç kurutma makinesi 2. fan kademesinde.....	55
Şekil 4.15. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan ve ısı kademesinde	55
Şekil 4.16. Sistem açık, saç kurutma makinesi 2. fan ve 1. ısı kademesinde	56
Şekil 4.17. Sistem açık, saç kurutma makinesi 2. fan ve 2. ısı kademesinde	56
Şekil 4.18. İnvertör kapalı, panel bağlı	58
Şekil 4.19. Sistem açık, floresan lamba bağlı	58
Şekil 4.20. Sistem açık, 40 W yük bağlı	59
Şekil 4.21. İnvertör kapalı, panel bağlı	59
Şekil 4.22. İnvertörün açılış anı	60
Şekil 4.23. Sistem açık, 9 W yük bağlı	60
Şekil 4.24. Sistem açık, 40 W yük bağlı	61
Şekil 4.25. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan kademesinde.....	61
Şekil 4.26. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan ve ısı kademesinde	62
Şekil 4.27. İnvertör kapalı, perc monokristal panel bağlı	63
Şekil 4.28. İnvertörün açılış anı	63
Şekil 4.29. Sistem açık, floresan lamba bağlı	64
Şekil 4.30. Sistem açık, 9 W yük bağlı	64
Şekil 4.31. Sistem açık, 40 W yük bağlı	65

Şekil 4.32. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan kademesinde	65
Şekil 4.33. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan ve ısı kademesinde	66
Şekil 4.34. Sistem kapalı.....	67
Şekil 4.35. Sistem açık, 9 W yük bağlı	67
Şekil 4.36. Sistem açık, 40 W yük bağlı	68
Şekil 4.37. Saç kurutma makinesi bağlı.....	68
Şekil 4.38. Filtre kahve makinesi bağlı.....	69
Şekil 4.39. 9 W yük bağlı	70
Şekil 4.40. 40 W yük bağlı	70
Şekil 4.41. Saç kurutma makinesi bağlı.....	71
Şekil 4.42. Filtre kahve makinesi bağlı.....	71
Şekil 4.43. Log-periyodik anten, filtre kahve makinesi bağlı.....	72
Şekil 4.44. Panel bağlantısız, invertör açık (9 W)	72
Şekil 4.45. Panel bağlantılı, invertör açık (9 W)	73
Şekil 4.46. Panel bağlantısız, invertör açık (40 W)	73
Şekil 4.47. Panel bağlantılı, invertör açık (40 W)	74
Şekil 4.48. Sistem açık, saç kurutma makinesi bağlı.....	74
Şekil 4.49. Sistem açık, ısıtıcı bağlı (125 - 600 W)	75
Şekil 4.50. Sistem açık, 9 W yük bağlı	76
Şekil 4.51. Sistem açık, 40 W yük bağlı	76
Şekil 4.52. Sistem açık, saç kurutma makinesi bağlı.....	77
Şekil 4.53. Sistem açık, ısıtıcı bağlı (125 - 600 W)	77
Şekil 4.54. S-parametre ölçüm sonucu	78
Şekil 4.55. Elektrik alan ölçüm sonuçları (X. sıra).....	79
Şekil 4.56. Manyetik alan ölçüm sonuçları (X. sıra)	79
Şekil 4.57. Elektrik alan ölçüm sonuçları (Y. sıra).....	80

Şekil 4.58. Manyetik alan ölçüm sonuçları (Y. sıra)	80
Şekil 4.59. Çatı GES elektrik alan ölçüm sonuçları.....	81
Şekil 4.60. Çatı GES manyetik alan ölçüm sonuçları.....	81



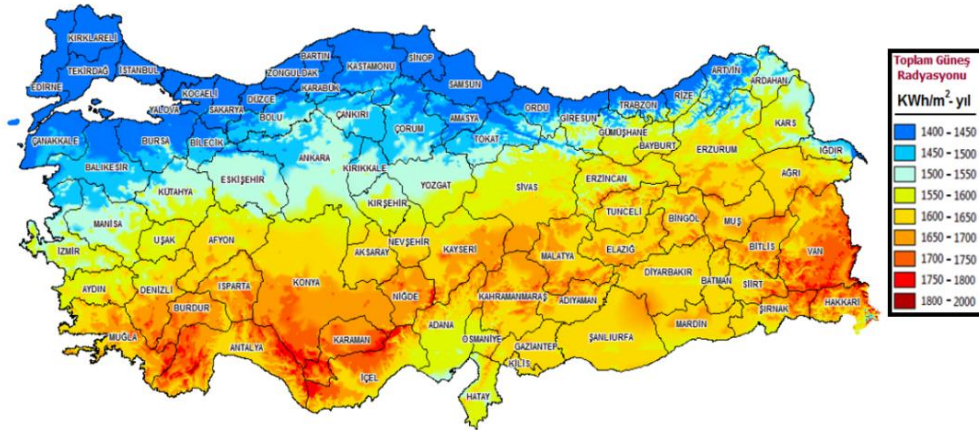
ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Maxwell denklemleri	4
Çizelge 1.2. Temel EMC birimleri	8
Çizelge 3.1. Polikristal güneş paneli teknik parametreleri	32
Çizelge 3.2. Monokristal güneş paneli teknik parametreleri	33
Çizelge 3.3. İnvertör teknik parametreleri	33
Çizelge 4.1. CM ve DM gerilim değerleri	45
Çizelge 4.2. CM ve DM gerilim değerleri	46
Çizelge 4.3. CM ve DM akım değerleri.....	46
Çizelge 4.4. CM ve DM akım değerleri.....	46
Çizelge 4.5. CM ve DM gerilim değerleri	47
Çizelge 4.6. CM ve DM akım değerleri.....	47
Çizelge 4.7. Çatı GES manyetik alan sonuçları.....	81

1. GİRİŞ

Enerji tarih boyunca insanların yaşam mücadelesinde önemli etmenlerden biri olmuştur. Nüfus artışı ve teknolojik ilerlemeler neticesinde gereksinim duyulan ihtiyaçların değişmesi enerjiye olan talebi arttırmıştır. Bunun akabinde alternatif kaynak arayışı başlamıştır. Kömür, doğalgaz, petrol gibi tükenbilir (yenilenemeyen) enerji kaynaklarının sonlu miktarda olması, çoğu ülkelerin dışa bağımlı olması, küresel ısınma, sera etkisi ve iklim değişikliği gibi çevreye olumsuz etkilerinin olması gibi dezavantajları yenilenebilir enerji kaynaklarını ön plana çıkarmıştır. Dolayısıyla dünyada enerji kaynakları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Bunlar arasında ise güneş enerjisi oldukça popülerdir. Güneş enerji sistemleri temiz enerji olmakla birlikte, bu sistemlerde güneş hücrelerinin düşük verimliliği, elektromanyetik girişim gibi bazı teknik sorunlar mevcuttur. Münferit sistemlerde enerji networküne çok sayıda santralin/sistemin bağlanması yeni problemleri getirmektedir. Bu çalışmada GES sistemlerinde elektromanyetik gürültü bileşenlerine ilişkin iletim, ısıma, ortak mod, diferansiyel mod ve elektromanyetik alan seviyeleri hakkında yapılan araştırma sonuçları sunulacaktır.

Söz konusu güneş enerjisi olduğunda, Türkiye bulunduğu lokasyonunun getirdiği avantaja sahiptir. Buna göre GEPA yıl bazında Türkiye'nin ortalama olarak yıllık toplam güneşlenme süresini 2.741 saat ve yine yıl bazında toplam ışıınım değerini 1.527,46 kWh/m² olarak belirtmektedir (Anonim). Türkiye'nin ortalama radyasyon dağılım haritası Şekil 1.1'de verilmektedir. 2022 yılı ilk yarıyıl sonu istatistiklerine göre kurulu güç 8,479 MW'tır ve diğer enerji kaynakları arasındaki oranı ise %8.35'dir (Anonim).



Şekil 1.1. Türkiye'nin ortalama radyasyon dağılım haritası (Anonim)

1.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar

Aşağıda temel elektromanyetik alan nicelikleri verilmiştir.

E (V/m) Elektrik Alan Şiddeti

D (C/m²) Elektrik Akı Yoğunluğu

B (Wb/m²) Manyetik Akı Yoğunluğu

H (A/m) Manyetik Alan Şiddeti

Temel sabitler:

ϵ_0 :Boşluğun elektrik geçirgenliği

μ_0 :Boşluğun manyetik geçirgenliği

c :EM dalganın boşlukta hızı (ışık hızı= 3×10^8 m/s)

μ_0 ve ϵ_0 sırasıyla Denklem 1.1 ve Denklem 1.2’de yer almaktadır.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (1.1)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c} \cong \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \cong 8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)} \quad (1.2)$$

E ve **D** statik yükler tarafından oluşturulan statik elektrik alanlarda (elektrostatik) incelenirken, **H** ve **B** sabit hızla hareket halindeki yükler tarafından oluşturulan statik manyetik alanlarda ele alınmaktadır. Elektrostatik alanda, alan ifade hesaplamalarında elektrostatik’in temel yasaları olan Coulomb ile Gauss Yasalarından yararlanılırken, manyetostatikte ise alan hesaplamalarında yine temel yasalar olan Biot Savart ile Amper Yasalarından yararlanılmaktadır (Ozen ve Helhel 2022). Coulomb Yasası ve Biot Savart Yasası temel yasalarlardır. Gauss Yasası ve Amper Yasası ise bu yasaların özel durumlarıdır ve sırasıyla simetrik yük dağılımları ve simetrik akım dağılımlarında kullanılır.

Coulomb Yasası: Durgun yüklerin neden olduğu elektrostatik kuvvettir ve Denklem 1.3 ile ifade edilir.

$$\mathbf{F} = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \mathbf{a}_R \quad (1.3)$$

k sabiti Denklem 1.4’te verilmiştir.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2 \quad (1.4)$$

Gauss Yasası: Elektrik yükü ve elektrik alan dağılımı ile ilgilidir. Buna göre, kapalı bir yüzeyden çıkan elektrik akısı aynı yüzey tarafından kapsanan elektrik yüküne eşittir. Gauss Yasası ile ilgili ifadeler Denklem (1.5), Denklem (1.6) ve Denklem (1.7) ile verilmiştir. Elektrik alan belirlenirken simetrik yük dağılımları için Gauss Yasası, belirli yük dağılımları için Coulomb Yasası kullanılır.

$$\Phi = \int_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E \cdot S = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = (4\pi R^2) = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{a}_R \text{ (V/m)} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{a}_R \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (1.7)$$

Biot-Savart Yasası ile herhangi bir noktada bir diferansiyel akım elemanının oluşturduğu manyetik alan ifadesi açıklanır. Biot-Savart Yasası ile ilgili ifadeler Denklem 1.8 ve Denklem 1.9'da verilmiştir.

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_b^a \frac{Id\mathbf{l}' \times \mathbf{a}_R}{|r - r'|} \text{ (Wb/m}^2\text{)} \quad (1.8)$$

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 Idl \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} \quad (1.9)$$

Amper Yasası: Manyetik akı yoğunluğunun ya da manyetik alanın kapalı yol üzerinden çizgi integrali, aynı yolun çevrelediği yüzeyden geçen akıma eşittir. Amper Yasası ile ilgili ifadeler Denklem (1.10), Denklem (1.11), Denklem (1.12) ve Denklem (1.13)'te verilmiştir. Manyetostatikte de simetrik akım dağılımlarında Amper Yasası uygulanabilir.

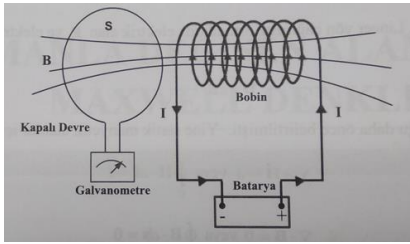
$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{s} = I \quad (1.10)$$

$$\mathbf{I} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.11)$$

$$\int_s (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{s} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.13)$$

Faraday Yasası: Faraday bir akımın manyetik alan oluşturmasından yola çıkarak bunun tersinin de doğru olabileceği hipotezini ileri sürmüştür. Zamanla değişen manyetik alan kapalı bir devrede elektromotor kuvvet (V_{emk}) olarak adlandırılan bir gerilim indükler (statik manyetik alanda akım akışı olmaz). V_{emk} kapalı devrede gerçekleşen manyetik akının artış hızının eksisine eşittir. Bu ise Faraday Yasası olarak adlandırılır.



Şekil 1.2. Faraday indükleme yasası (Ozen ve Helhel 2022)

Şekilde 1.2'de görülen düzenekte bobinden akım aktığı zaman, bir manyetik alan oluşur. Manyetik alan çizgileri kapalı devrenin yüzeyini (S) kesmekte ve dairesel kapalı devrede Denklem 1.14'te yer alan manyetik akı indüklemektedir.

$$\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \text{ (Wb)} \quad (1.14)$$

N sarımlı kapalı devrede indüklenen ve Denklem 1.15'te yer alan V_{emk} ;

$$V_{emk} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.15)$$

Eşitlikteki (-) işareti manyetik akının değişimine karşı bir akım akacağını ifade etmekte ve bu da Lenz Yasası olarak adlandırılmaktadır.

V_{emk} yerine $\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l}$ yazılırsa (Denklem 1.16) ve eşitliğe Stokes teoremi uygulanırsa (Denklem 1.17), Denklem 1.18 elde edilir.

$$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.16)$$

$$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_s (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{s} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.17)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.18)$$

1.2. Maxwell Denklemleri

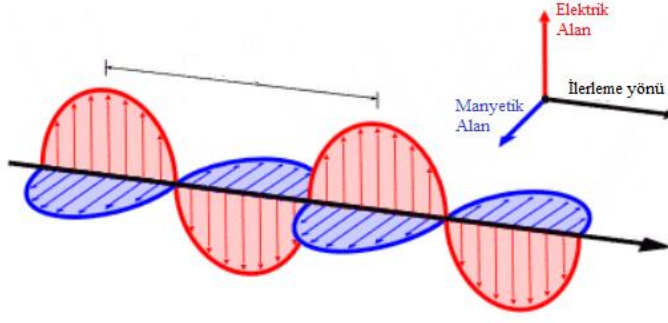
İskoç fizikçi ve matematikçi olan James Clerk Maxwell Amper, Faraday, Coulomb ve Gauss yasaları ile elektrik ve manyetizmayı ilişkilendiren ve elektromanyetiğin temel prensiplerini oluşturan Maxwell denklemlerini ifade etmiştir. Maxwell denklemlerinin integral ve diferansiyel formları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Maxwell denklemleri

Diferansiyel Form	İntegral Form	
$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (- \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{s}$	Faraday Yasası
$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{s}$	Amper Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_v \rho d\mathbf{v} = Q$	Gauss Yasası (Elektrik alan)
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	Gauss Yasası (Manyetik alan)

1.3. Elektromanyetik Dalga

Sabit olmayan bir manyetik alan elektrik alan oluşturur ve aynı şekilde sabit olmayan elektrik alan bir manyetik alan oluşturur. Zamanla değişen elektrik ve manyetik alanlar elektromanyetik dalgayı oluşturur. Elektromanyetik dalgada $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{H}$ bileşenleri birbirine dik olup yayılma yönü de bunlara diktir.



Şekil 1.3. Elektromanyetik dalga (Anonymous)

Ortamda yük olmadığı varsayılarak ($\rho_v = 0$) elde edilen Maxwell denklemleri Denklem (1.19), Denklem (1.20), Denklem (1.21) ve Denklem (1.22)'de verilmiştir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.19)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.22)$$

Faraday Yasasına dönel işlemi uygulanırsa Denklem 1.23'te yer alan dalga denklemi (elektrik alan için) elde edilir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.23)$$

Amper Yasasına dönel işlemi uygulanırsa Denklem 1.24'te yer alan dalga denklemi (manyetik alan için) elde edilir.

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.24)$$

İletken olmayan ve kaynaksız bir ortam ($\sigma = 0$, $\rho_v = 0$) için dalga denklemleri düzenlenirse ve $\mu\varepsilon$ yerine $1/u_p^2$ yazılırsa, Denklem 1.25 ve Denklem 1.26'da verilen dalga denklemleri elde edilir.

Burada u_p dalga hızıdır ve $\sqrt{\mu\varepsilon}$ 'ye eşittir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{u_p^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.25)$$

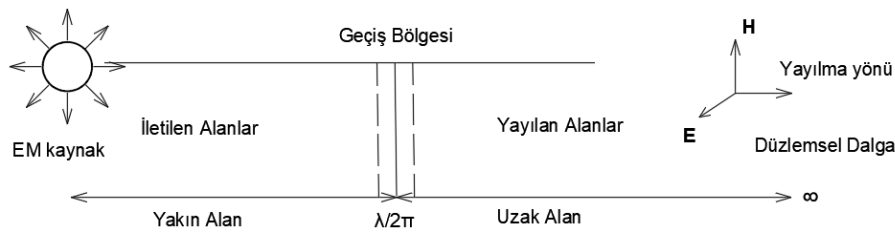
$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{1}{u_p^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.26)$$

1.4. Elektromanyetik Uyumluluk ve Girişim

Elektromanyetik uyumluluk (EMC), elektronik ve/veya elektrikli bir aygıt ya da sistemin içinde bulunduğu elektromanyetik çevrede, çalışması sırasında diğer aygıt ya da sistemlerin performansını olumsuz etkileyecek düzeylerde elektromanyetik gürültü oluşturmadan güvenli bir şekilde kendisinden beklenen performansı gerçekleştirme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır (Ari ve Ozen 2008). Burada sözü geçen elektromanyetik çevre ile o ortamdaki elektromanyetik olaylar kastedilmektedir (Redl 1996). Elektromanyetik girişim (EMI) ise, bir elektromanyetik ortamda mevcut elektromanyetik enerjinin herhangi bir cihaz veya ekipmanın işlevinde meydana getirebileceği olumsuz etkileşim olarak ifade edilmektedir. Bu sorunun var olabilmesi için aynı ortamda, aynı anda üç bileşenin olması gerekmektedir. Aksi takdirde EMI'dan söz edilemez. Bu bileşenler gürültüyü oluşturan EMI kaynağı, etkilenen aygıt ya da sistem ve bu iki bileşen arasındaki iletim (kuplaj) yoludur.

Birbirlerine dik olarak uzanan elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri elektromanyetik alanı oluşturmaktadır. Doğal ya da insan yapımı olan bir kaynak tarafından oluşturulan ve çevreye yayılan elektromanyetik enerji olarak bilinen elektromanyetik emisyonlar, istenen ve istenmeyen etkiler olarak sınıflandırılmaktadır. Bir radyo vericisi ele alınırsa, kullanım amacına hizmet etmesinin bir gereği olarak belirli frekanslarda emisyon yaymaktadır. Bu istenen yayıcıya bir örnektir. Ancak birçok cihaz çevreye amaçlanmadığı halde elektromanyetik enerji yaymaktadır. Bu ise istenmeyen bir durumdur.

Uzak alan/yakın alan: Bir kaynağın neden olduğu alan karakteristiği mesafeye göre yakın ve uzak alan olarak sınıflandırılmaktadır. Mesafe $\lambda / 2\pi$ 'den küçükse yakın alan, $\lambda / 2\pi$ 'den büyük ise uzak alan olarak değerlendirilmektedir. Şekil 1.4'te girişim alanları verilmektedir.



Şekil 1.4. Girişim alanları

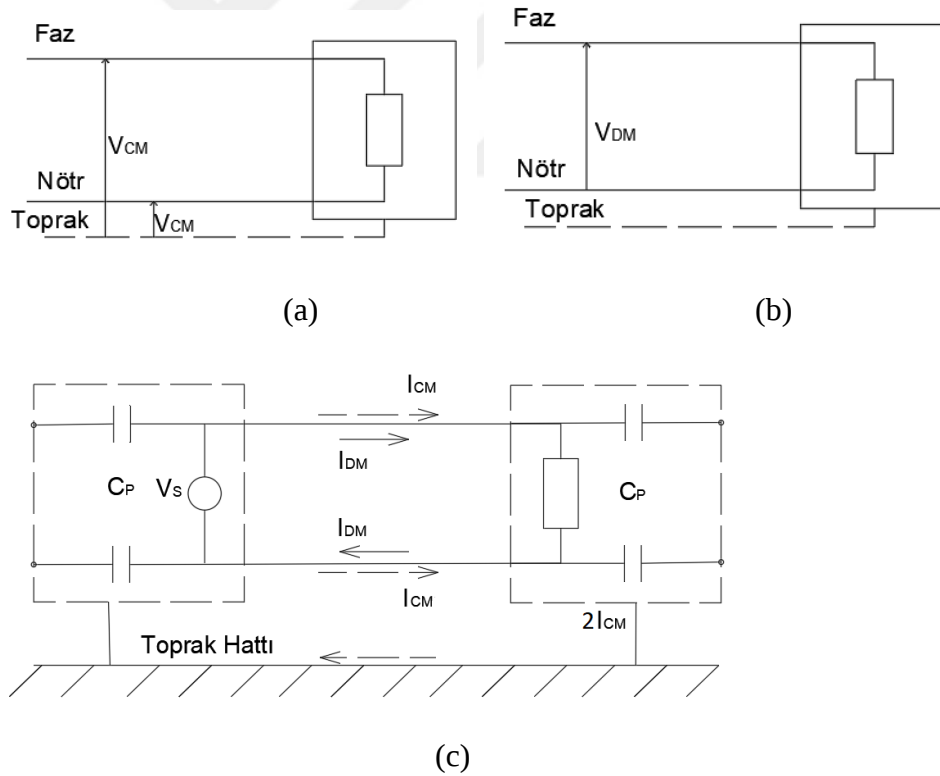
Dalga empedansı (Z_0), elektrik alanın (E) manyetik alana (H) oranı olarak tanımlanmakta ve Denklem 1.27'de yer almaktadır. Uzak alan bölgesinde dalga empedansı, ortamın karakteristik empedansını vermektedir.

$$Z_0 = \frac{E}{H} = 120\pi = 377\Omega \quad (1.27)$$

1.4.1. Elektromanyetik gürültü modları

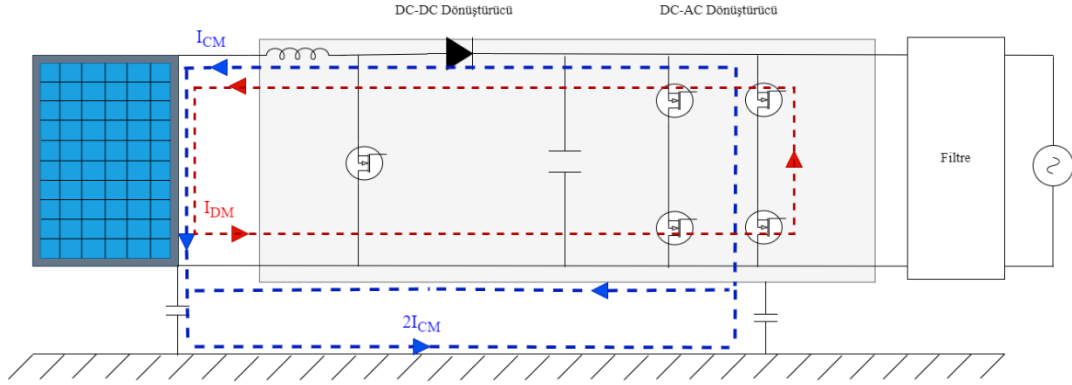
Girişim nedeniyle sistemde oluşan istenmeyen akım ve gerilimler elektromanyetik enerji olarak hedef cihaza ulaşmakta ve etki edebilmektedir. Bu etkiler kaynağın ürettiği elektromanyetik enerjinin hedef sisteme olan kuplaj biçimine göre iki şekilde olabilmektedir: iletim yoluyla emisyonlar (CE) ve/veya ışıma yoluyla emisyonlar (RE). Kuplaj metalik yollar veya kablolar vasıtasıyla gerçekleşirse iletim yoluyla girişim, hava gibi metalik olmayan yollarla gerçekleşirse de ışıma yoluyla girişim olarak adlandırılmaktadır. CE ölçümleri 150 kHz - 30 MHz frekans aralığında gerçekleştirilirken, RE ölçümleri 30 MHz - 1 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmektedir.

İletim yoluyla emisyonlar da kendi içinde akımın akış yönüne göre ortak mod (CM) ve diferansiyel mod (DM) olarak sınıflandırılmaktadır. Devre iletkenlerindeki CM akımları eşit büyüklükte ve aynı yöndedir. CM emisyonları devre hatları ile toprak arasında oluşan kaçak kapasitansların neden olduğu gerilim dalgalanmasından kaynaklanmaktadır. Devre iletkenlerindeki DM akımları ise, eşit büyüklükte ve zıt yöndedir. DM emisyonları yarıiletken anahtarlama elemanlarının yüksek dv/dt ve di/dt geçişlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 1.5'te hatlar üzerinde oluşan CM gerilimi, DM gerilimi, CM akımı ve DM akımı yer almaktadır.



Şekil 1.5. a) CM gerilimi; b) DM gerilimi; c) CM ve DM akımları

Şekil 1.6'da sistemde dolaşan gürültü bileşenlerini göstermek için basit bir GES sistemi verilmiştir. Bölüm 1.5.6'da bahsedildiği gibi sistemdeki temel gürültü kaynağı güç devrelerinde bulunan anahtarlama elemanlarıdır.



Şekil 1.6. GES sisteminde CM ve DM akımları

EMC Birimleri: Desibel (dB) güç kaybını, güç kazancını ifade etmek için oldukça yaygın kullanılan ölçüm birimlerinden biridir. Desibelin verileri sıkıştırma özelliğine sahip olması ve EMC'nin de geniş frekans bandında incelenmesi nedeniyle EMC birimleri desibel cinsinden ifade edilmektedir. Çizelge 1.2.'de EMC'de kullanılan bazı temel ifadeler yer almaktadır.

Çizelge 1.2. Temel EMC birimleri

Nicelik	Birim	dB Formu
Elektrik Alan Şiddeti	V/m	dBmV/m, dB μ V/m
Manyetik Alan Şiddeti	A/m	dBmA/m, dB μ A/m
Gerilim	V	dBmV, dB μ V
Akım	A	dBmA, dB μ A

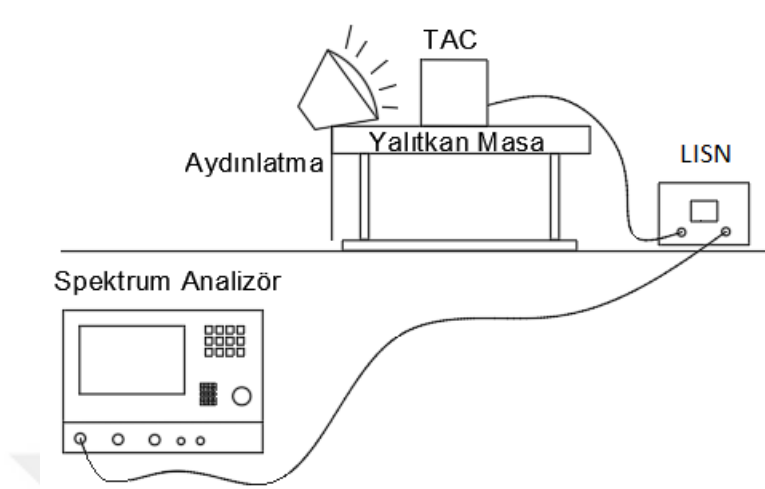
1.4.2. EMC ölçümleri

İlgili ekipman veya sistemin elektromanyetik olarak uyumlu olup olmayacağına sınırları ulusal ya da uluslararası pek çok kuruluş tarafından belirlenmektedir. International Electrotechnical Commission (IEC), Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR), Federal Communications Commission (FCC), European Normalization Commission (CENELEC) vb. kuruluşlar tarafından yayınlanan sınır değerleri referans alınarak ilgili ekipmanın olması gerektiği gibi performans sergilemesi ve aynı zamanda etrafındaki sistemlere zarar vermeden çalışması sağlanır.

Bir ürün ya da sistemin elektromanyetik emisyon seviyeleri standart elektromanyetik emisyon ölçümleri yapılarak tespit edilebilir. Bu emisyon ölçümleri CE ve RE ölçümlerini kapsamaktadır.

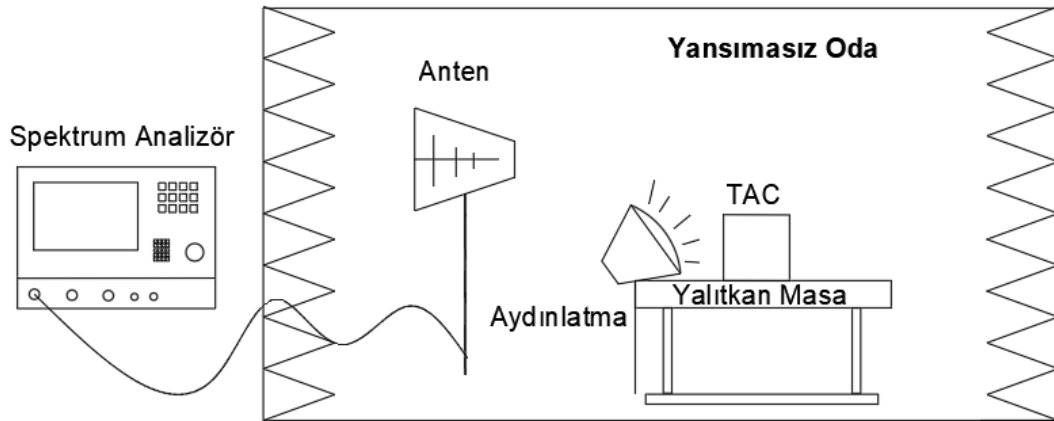
CE ölçümünde, ölçüm düzeneğinde bulunan test altındaki cihazın (TAC) içyapısından ya da çalışmasından kaynaklanan gürültüler güç kablolarında ölçülmektedir. Ölçülen sinyaller EMI alıcı, spektrum analizör veya osiloskopta görüntülenmektedir.

Şekil 1.7’de iletim yoluyla gürültü ölçüm deney düzeneği görülmektedir. Bu çalışmada yapılan CE ölçümü ile ilgili detaylar Bölüm 3.3.1 ‘de yer almaktadır.



Şekil 1.7. İletim gürültü ölçümü deney düzeneği

RE ölçümünde TAC’ın ortama yaydığı emisyonlar düzeneğin içerdiği alıcı anten aracılığıyla ölçülmektedir. Yine bu ölçümde de ölçülen sinyaller yukarıda belirtilen ölçüm cihazları ile görüntülenmektedir. Şekil 1.8’de ışıma yoluyla gürültü ölçüm deney düzeneği görülmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen RE ölçümü ile ilgili detaylar Bölüm 3.3.2 ‘de yer almaktadır.



Şekil 1.8. Işıma gürültü ölçümü deney düzeneği

1.5. Güneş Enerjisi Sistemleri

1.5.1. Fotovoltaik sistem

Fotovoltaik etkinin bulunuşu 1839 yılına dayanmaktadır ve bu fizikçi Edmond Becquerel tarafından bulunmuştur. Deneysel olarak elektrik akımı, bir eriyikteki iki platin elektrotta güneş ışığının gelmesiyle beraber üretilmiştir. 1954 yılında ise silisyum fotovoltaik hücre ilk olarak Bell laboratuvarlarında üretilmiştir. Enerji verimliliğinin

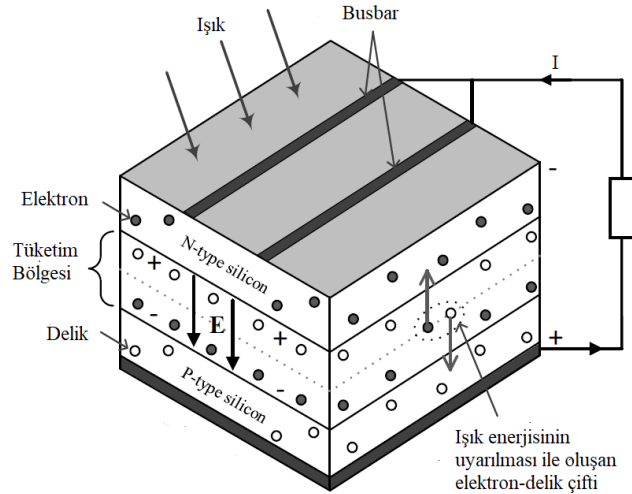
düşük olması, maliyetli olması gibi nedenlerden dolayı, o zamanlarda uzay çalışma ve uygulamalarında kullanım alanı olarak yer bulmuştur. Geçen zamanla birlikte teknolojik ve yenilikçi gelişmelerin beraberinde getirdiği daha fazla enerji gereksinimi sonucunda alternatif enerji kaynakları gündeme gelmiş ve fotovoltaik teknoloji ilgi odağı olmaya başlamıştır. Oluşan fotovoltaik piyasa, temiz enerji olması, sürdürülebilir olması, fosil ve nükleer enerji kaynaklarının sınırsız olması ve içinde yaşadığımız atmosfere zararlı etkilerinin olması gibi sebeplerden dolayı diğer enerji kaynaklarıyla rekabet edebilir hale gelmiştir.

1.5.2. Güneş hücre yapısı

Güneş enerjisi doğrudan elektrik enerjisi olarak kullanılamadığı için, fotovoltaik hücreler güneş ışınımı ile elektrik enerjisi arasındaki dönüşümü sağlamaktadır.

Bir yarıiletken olan silisyum elementinin n katkılanmış ve p katkılanmış katmanları birleştirilerek p-n eklemi elde edilir. Burada katkılanmış katmanlar kullanmadaki amaç saf örüntü yapısını bozarak güneş hücresinin (p-n yarıiletkeni) güneş ışığıyla teması halinde elektrik akım üretimini artırmaktır (Haselhuhn ve Hemmerle 2005). Şekil 1.9'da güneş hücresi ara kesiti görülmektedir.

Fotovoltaik piyasasındaki gelişmelerle birlikte farklı yapıda güneş hücreleri üretilmektedir. Bu çalışmada kullanılan polikristal ve perc (passivated emitter and rear contact) monokristal güneş panellerinin üretiminde kullanılan polikristal ve perc monokristal güneş hücrelerinin ana malzemeleri silisyum olmasına rağmen üretim prosesleri aşamasındaki farklılıklara göre isimlendirilmiştir (Haselhuhn ve Hemmerle 2005). Alan başına perc monokristal güneş hücresinden elde edilen verim polikristal güneş hücresinden elde edilen verimden yüksektir.

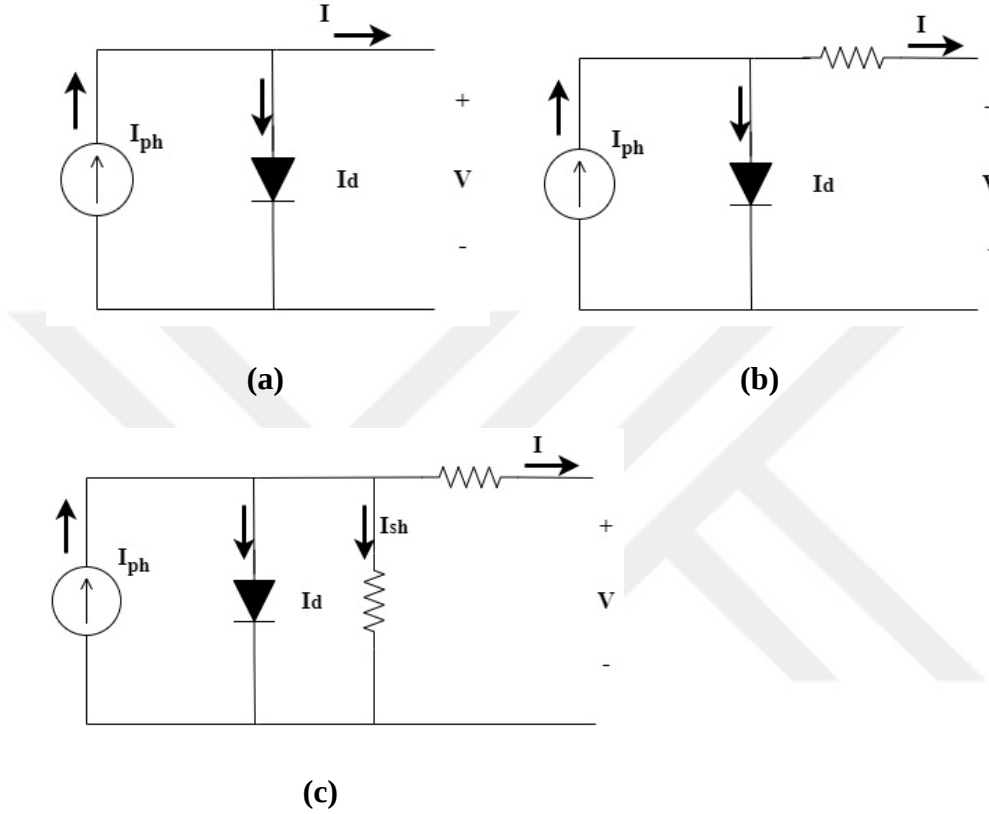


Şekil 1.9. Güneş hücresi kesiti (Prajapati 2019)

1.5.3. Güneş hücresi elektrik devre modellemesi

Literatürde güneş hücresinin farklı elektriksel devre modelleri mevcuttur. Bunlardan en yaygın kullanılanlardan birisi tek diyot devre modelidir. Bu model bir akım

kaynağına anti-paralel bağlanmış diyot ve kayıpları ifade eden paralel ve seri dirençlerden oluşur. Seri direnç elektronların hareketi ile meydana gelen gerilim düşümünü temsil ederken, paralel direnç kaçak akımları temsil eder. Bazı çalışmalar analizde basitlik açısından paralel direnci ihmal ederken (Chenni vd. 2007), bazı çalışmalar ise iki parametreyi de dikkate almıştır (Villalva vd. 2009). Şekil 1.10'da kayıpların ihmal edilip edilmemesine göre tek diyot modelinin varyasyonları verilmiştir (Bellia vd. 2014).



Şekil 1.10. Güneş hücresi tek diyot devre modelleri **a)** İdeal model; **b)** Basit model; **c)** Standart model

Standart tek diyot devre modeli için, Kirchoff yasası yardımıyla elde edilen matematiksel model eşitlikleri Denklem 1.28 ve 1.33 arasında verilmiştir.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.28)$$

$$V_T = kT_c/q \quad (1.29)$$

$$a = \frac{N_s \cdot A \cdot k \cdot T_c}{q} = N_s \cdot A \cdot V_T \quad (1.30)$$

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] \quad (1.31)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1.32)$$

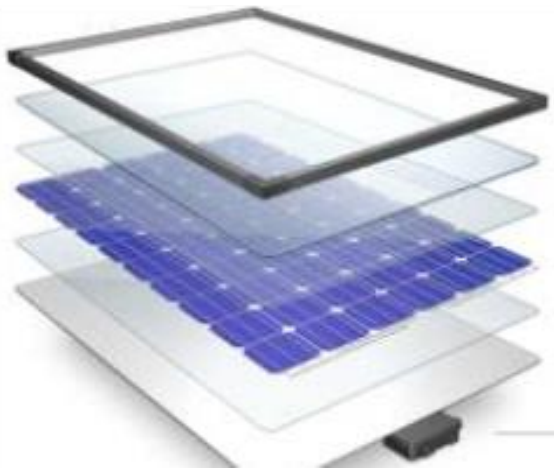
I_{ph} ışıma ve sıcaklığa bağlıdır.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{sc} \cdot \Delta T) \quad (1.33)$$

Yukarıda yer alan eşitliklerde I çıkış akımını, I_{ph} hücre tarafından üretilen akımı, I_d diyot akımını, I_{sh} paralel dirençteki kaçak akımı, V_T termal gerilimi, k Boltzmann sabitini, T_c hücre sıcaklığını (K), q elektron yükünü ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$), N_s seri bağlı fotovoltaik hücre sayısını, A idealite faktörünü, a değişimli idealite faktörünü (Chouder vd. 2012), I_0 diyotun ters saturasyon akımını, R_s seri direnci, R_p paralel direnci, G ışımayı (W/m^2), G_{ref} STC’de ışımayı (1000 W/m^2), $I_{ph,ref}$ STC’de hücre tarafından üretilen akımı ve μ_{sc} kısa devre akımının katsayısını (üretici tarafından sağlanır) ifade etmektedir.

1.5.4. Güneş paneli

Tek bir güneş hücresinin sağladığı enerji çoğu zaman ihtiyacı karşılamayacağı için yeterli sayıda hücreler genellikle seri, bazen de seri, paralel şeklinde bağlanarak güneş panelleri üretilir. Bağlantılardaki bu farklılıklar panellerdeki yapısal çeşitliliği artırmaktadır. Otomasyon tekniklerindeki gelişmelerle birlikte panel üretimi hızlanmakta ve farklı yapıda paneller üretilmektedir. Ayrıca panellerin de seri ya da paralel bağlanmasıyla artırılabilen toplam elektrik enerjisi, özellikle şebeke bağlantısız sistemlerde düşük güçlü ve yüksek güçlü birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Sistemin çıkış akımını artırmak için güneş panelleri paralel bağlanmaktadır, çıkış gerilimini artırmak için ise güneş panelleri seri bağlanmaktadır. Eğer hem akım hem de gerilim artırılmak isteniyorsa güneş panelleri hibrit (seri-paralel) bağlanmaktadır. Seri ya da paralel bağlanmış bir grup panel, PV dizileri de denilen panel dizilerini oluşturmaktadır. Standart güneş paneli katmanları Şekil 1.11’de görülmektedir.



Şekil 1.11. Güneş paneli katmanları

Bölüm 1.5.3'te verilen matematiksel modelden de görüleceği üzere güneş panellerinin performansları ışık ve sıcaklık gibi atmosfer koşullarından etkilenmektedir.

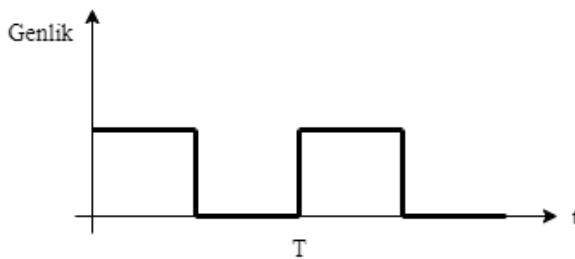
GES'ler kurulumlarına göre şebeke bağlantısız sistemler ve şebeke bağlantılı sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Enerji üretimi, şebeke bağlantısız sistemde genelde anlık kullanılan enerji miktarından az ya da çoktur. Bu zamansal farkı ortadan kaldırmak için depolama birimleri kullanılmaktadır. Şebeke bağlantılı sistemlerde ise bu işlev şebeke tarafından sağlanmaktadır. Yani şebeke bağlantısız sistemlerde üretilen elektrik enerjisi akülerde depolanırken, şebeke bağlantılı sistemlerde üretilen enerji şebeke hattına iletilmektedir.

GES'lerin modüler yapıda olması nedeniyle kullanım alanına göre kurulacak yere kolay entegre edilebilmesi, çevreye zararlı salınımlarının olmaması, güneş enerjisinin sınırsız ve sürekli olması gibi avantajları vardır. Hücre verimlerinin düşük, kurulum maliyetinin yüksek olması ise dezavantajlarıdır.

1.5.5. Dönüştürücü devre

Güneş panelleri dc akım ürettikleri için, kullanılacak olan bu enerjinin endüstride ve evlerimizde alternatif akımla çalışan birçok cihaz ve sistem için uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Burada ise devreye güç dönüştürücü devreleri girmektedir. Çıkıştaki DC gerilim seviyesinin değiştirilmesi için DC-DC dönüştürücü devreleri kullanılmaktadır. DC formda olan çıkışın AC forma dönüştürülmesi için ise DC-AC dönüştürücü devresi (invertör) kullanılmaktadır. Dönüştürücü devrelerinde yarıiletken anahtarlama elemanları (IGBT, MOSFET vb.) kullanılmaktadır. Bu elemanlar yüksek frekansta açma kapama (anahtarlama) mantığına göre çalışmaktadırlar. Kapalı olma sürelerinin periyoda oranı görev döngüsü (duty cycle) olarak adlandırılmaktadır. Görev döngüsü ifadesi Denklem 1.34'te ve pals sinyali Şekil 1.12'de verilmiştir.

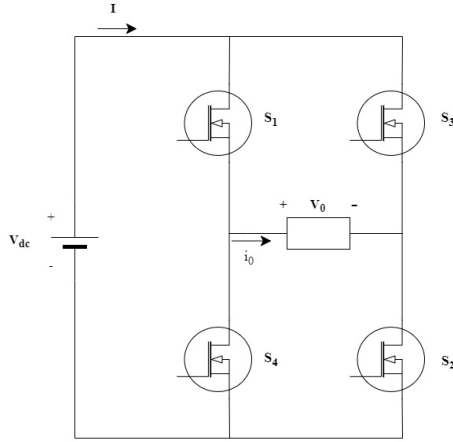
$$\tau = \frac{t_{on}}{T} \quad (1.34)$$



Şekil 1.12. Anahtarlama elemanına uygulanan pals sinyali

Tam köprü dönüştürücü devresi Şekil 1.13'te verilmiştir. Devrede yer alan dört anahtarlama elemanının kapatılıp açılma sürelerine ve kombinasyonlarına göre AC çıkış gerilimi elde edilmektedir. Elemanların kapalı ve açık olma süreleri ayarlanarak çıkış sinyali frekansı değiştirilebilmektedir. S_1 ve S_2 iletimdeyken çıkış gerilimi $+V_0$, S_3 ve S_4 iletimdeyken çıkış gerilimi $-V_0$ ve S_1, S_3 ya da S_2, S_4 kapalı iken çıkış sıfır gerilim değerini

almaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, devrenin kısa devre olmaması için, S_1 ve S_4 ya da S_3 ve S_2 anahtarlarının aynı anda kapatılmamasıdır. Ayrıca anahtarlama geçişlerinde kısa devre olmaması için gecikme zamanları olmalıdır.

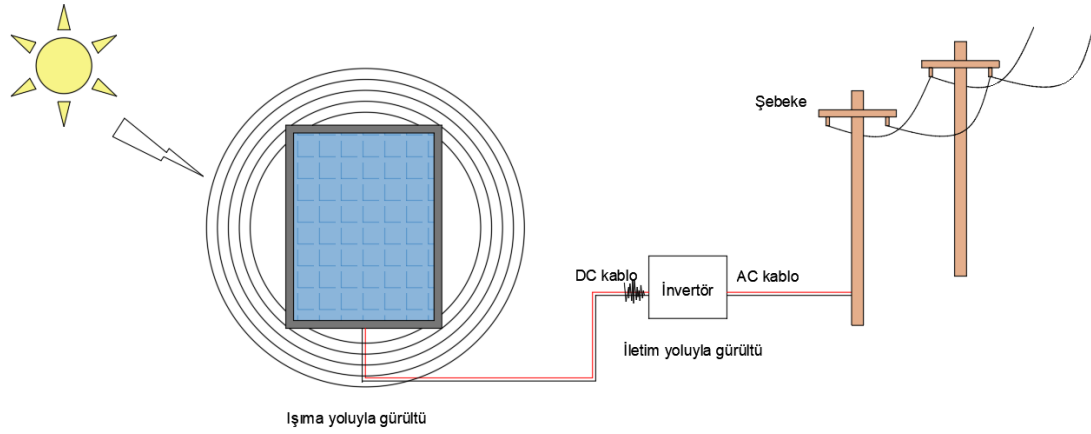


Şekil 1.13. Tam köprü invertör devresi

1.5.6. Güneş enerji sistemlerinde EMI

Diğer elektrikli ve elektronik cihaz ve sistemlerde olduğu gibi fotovoltaik sistemlerde de EMC önemli bir husustur. Özellikle endüstriyel ürünlerin pazarda yer alması için bu ürünler kuruluşlar tarafından belirlenen sınır değerlerini aşmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Güç elektroniği devreleri GES’lerde EMI’nın temel kaynağı olmakla birlikte güneş hücreleri ve kablolar da bu bağlamda değerlendirilmektedir (Smirnov 2011). Bölüm 1.5.5’te bahsedildiği gibi güç dönüştürücü devrelerinin yapısında bulunan yarıiletken anahtarların, enerji verimliliğini artırmak amacıyla, yüksek frekanslarda çalışmaları nedeniyle iletim yoluyla gürültü oluşmaktadır. Yani bir başka deyişle, darbe genişlik modülasyonu (PWM) ya da anahtarlama moduna göre çalışan dönüştürücü devreler gürültünün ana kaynağıdır. Burada üretilen iletim gürültüleri, güç dönüştürücünün yük ya da şebekenin bağlı olduğu çıkış tarafına ve panellerin bağlı olduğu giriş tarafına kablolar aracılığıyla iletilmektedir. Bu gürültüler Şekil 1.14’te görüldüğü gibi uygun koşullarda istenmeyen anten gibi davranan kablo ve güneş panellerinden ışıma yaparak ışıma yoluyla gürültülere dönüşebilir.



Şekil 1.14. GES’lerde EMI

Bu tezde global dünya pazarında oldukça önemli yer edinen fotovoltaik sistemler ele alınmıştır. GES’lerde elektromanyetik analiz çalışması yapılmıştır. Bu bağlamda modelleme ve ölçüm çalışması yapılmıştır. Elektromanyetik gürültü nedenleri açıklanmıştır. GES sistemlerinde elektromanyetik girişim problemlerinin frekans ve zaman domaininde bir bütün olarak ele alınması, GES bileşenlerine ilişkin ortak mod ve diferansiyel mod gürültü akımlarının oluşturabileceği ışıma emisyonları ve anten davranışı yaklaşımının incelenmesi ile bu alanda literatüre özgün katkı yapıldığı değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Literatürde GES’lerde elektromanyetik analiz ile ilgili çalışmalar bulunsa da bu sistemler bir bütün olarak ele alınmamıştır. Konu ile ilgili literatür incelemesi bu bölümde verilmiştir.

Araneo vd. (2009) yüksek güçlü şebekeye bağlı GES’lerde DC ile AC tarafı arasında ortak mod girişim akımları için yollar sağlayabilecek olası kuplaj mekanizmalarına odaklanmışlardır. Yüksek güçlü PV (fotovoltaik) santralinin radyo frekansı davranışını incelemişlerdir. CM gürültü akımlarının PV panelin ac tarafı ve dc tarafı arasındaki iletileceği kuplaj mekanizmalarına değinmişler ve yerinde ölçümler almışlardır. PV santral tasarımında EMC açısından daha güvenilir tasarım önerilerinde bulunmuşlardır.

Wu vd. (2015a) 150 kHz ile 30 MHz frekans aralığında güneş enerjisi sisteminin DC tarafında ortak mod gürültüsünün neden olduğu ısıma mekanizması üzerine yoğunlaşmışlardır. Güneş paneli ve 2 m uzunluğundaki dc kablounun ölçümü karma mod s parametresi yöntemiyle yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre ısıma gürültüsü için benzetim modelleri önermişlerdir. Çerçeve kablosunun düzeni gürültü seviyesini etkilemektedir. Çerçeve kablosunun ve panel sayısının artmasının ısıma gürültüsü üzerine etkisini incelemişlerdir.

Murad vd. (2017) 10 panelden (2x5) oluşan fotovoltaik sistemden ışıyan manyetik alanın hesaplanması için Sonlu Fark Zaman Alanı (FDTD) yöntemi kullanarak çalışma koşullarında 100 kHz ila 10 MHz frekans bölgesindeki elektromanyetik emisyonlara odaklanmışlardır. Güneş paneli toplu eşdeğer devre ile ve kablo dağıtılmış bir parametre devresi ile gösterilmiştir. Devre analizi Elektromanyetik Geçişler Programı (EMTP) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bir başka çalışmada güneş hücresinin anten etkisini anlamak için, hücrenin indüksiyon karakteristiğini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir (Tomisawa ve Tokuda 2008a, 2009). Amorphous Si hücresindeki indüklenmiş gerilim NEC2 kullanılarak momentler yöntemi ile hesaplanmıştır. Güneş panelinin sınırlı elektrik iletkenliğine sahip bir iletken kablo ile modellenmesi ve hesaplanması önerilmiştir. Tomisawa ve Tokuda (2008b) bir başka çalışmalarında ise güneş panellerinden ışıyan elektromanyetik dalgaları azaltmak için geliştirdikleri yöntemlerde panellerden akan akım yönünü dikkate almışlardır. Yüzey akım yönünün ters diziliminin elektrik alanı üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, her biri iki panelden oluşan iki sütun ile üç farklı bağlantı yöntemi geliştirmişlerdir. Güneş hücresini sınırlı iletkenliğe sahip metal kablo olarak modelleyerek, hücreden kaynaklanan ısıma karakteristiğini incelemişlerdir. Yine bir diğer çalışmada oluşturulan bir loop anteninden yayılan elektromanyetik alanı ölçülmüş ve ölçüm için gerekli olan balun modelini elde etmek için hesaplanan değerle karşılaştırılmıştır (Wada vd. 2005). Çalışmada amorf bir Si güneş panelinin, poli-kristal Si güneş paneliyle aynı modelde uygulanabileceği gösterilmiştir.

Chen vd. (2016) güneş panellerinin ısıma emisyonu üreten kaynak olduğunu belirtmişler ve güneş panellerinin yakın alan ısımasına odaklanmışlardır. Frekans aralığına göre ısıma emisyonlarını düzlemsel anten modelinden türeyen MHz seviyesi düşük frekans emisyonu ve mikroşerit anten modelinden türeyen GHz seviyesi yüksek

frekans seviyesi olmak üzere ikiye ayırmışlardır. Güneş hücresi benzetiminde geri dönüş kaybı GHz seviyesinde iken panel benzetiminde MHz seviyesindedir. Yakın alan dağılımı için anten denklemlerini kullanmışlardır.

Juswardy vd. (2011) ve güneş panelinin elektromanyetik davranışını ve solar şarj cihazından ışıyan elektromanyetik girişim emisyonunu incelemişlerdir. 5 güneş hücresinden oluşan 54 x 85 mm boyutundaki panelin elektromanyetik davranışının simülasyonunu iki şekilde gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle iletkenleri dikkate almışlardır, sonra ise modele 5 dikdörtgen yapı eklemişlerdir. İki modelinde geri dönüş kaybı (S11) benzer olmakla beraber 4 GHz'den düşük frekansta bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. Buradan elektrik hatlarının panel elektromanyetik davranışı üzerine daha fazla etkisi olduğu görülmektedir. Panel karakteristiğini ölçmek için VNA bağlanmıştır. Ayrıca panelin radyo frekansı girişi (RFI) yayıp yaymadığını belirlemek için, panele sinyal jeneratörü bağlanmış ve 50 mm yakınına anten yerleştirilmiştir. Belirli koşullar altında panelin EMI emisyonu yayabileceği görülmüştür. Solar şarj cihazının ışıma emisyonu emc odasında ölçülmüştür. Panel aktifken ve değilken sonuçlarda önemli bir fark olmamıştır. Bu da gürültünün dönüştürücüden kaynaklandığını göstermektedir.

Ali (2017) bir fotovoltaik sistemin dc tarafında cm ve dm akımlar nedeniyle anten gibi davranan güneş panelinden ışıyan emisyonları incelemiştir. Güneş panelinin anten etkisini açıklamak için dm gürültü devresini temsil eden dikdörtgen loop anten ve cm gürültü devresini temsil eden monopol anten modelini benimsemiştir. Güneş panelindeki akım yollarını modelleyerek panelden ışıyan alan şiddetini 10 metre uzaklıkta hesaplamıştır.

Saidi vd. (2016) pv sistemlerde emc'yi incelemek için 1130 x 524 x 34 mm boyutundaki güneş panelini bir verici anten olarak kabul etmişler ve güneş panelinden ışıyan yakın alan için NF (near field) tekniğini önermişlerdir. Güneş panelinden ışıyan manyetik yakın alan 5MHz frekansta değerlendirilmiştir.

Boyuan vd. (2016) yeni üretilmiş ve 15 yıllık, farklı çıkış gücüne sahip monokristal güneş panelleri için ışıyan ve 10 KVA tek fazlı statik bir senkron kompensatör için iletilen gürültülerin EMC analizini gerçekleştirmişlerdir. Güneş modüllerinin bir elektromanyetik kaynağa yakinken iyi antenler gibi davranabileceğini tespit etmişlerdir. Işıma gürültü enjeksiyon testlerinde basitlik için iki frekans seçmişlerdir. İletilen emisyon testi ise 150 kHz ila 30 MHz frekans aralığında, CISPR 22 ye göre üç farklı durum için gerçekleştirmişlerdir. Arka plan ölçümü, güç kaynağı gürültü ölçümü ve güç devresi iletim emisyon ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Ölçümlerden panellerin geniş bir spektrumda RF'yi emen mükemmel antenler olarak çalıştığı sonucuna varmışlardır.

Hamza ve Jain (2010) bina şebekesine bağlı PV sistemin neden olduğu iletilen elektromanyetik girişimlerini araştırmışlardır. Girişim kaynağı olarak bina elektrik şebekesi ve invertörün AC tarafını gösterirken PV tarafını da etkilenen devre olarak göstermişlerdir. Empedans değişiminin EMI filtresinin performansı üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Sistemde PV sistemin farklı lokasyonlarında yerinde ölçüm gerçekleştirmişler ve invertörün DC tarafına doğru ilerleyen EMI gürültüsünü gözlemlemişlerdir.

Linder ve Wiklundh (2022) güneş panellerinde girişime neden olabilen optimizier bulunan üç GES santralinde iletim ve ısıma ölçümleri almışlardır. İletim ölçümlerini 10 kHz - 200 MHz arasında ve ısıma ölçümlerini ve 10 kHz - 1 GHz arasında gerçekleştirmişlerdir. Farklı frekans aralığı ölçümlerinde loop anten, bikonik anten ve log-periyodik anten kullanmışlardır. Ortam gürültüsü ölçümünü inverter kapalıyken gerçekleştirmişler ve gürültü gözlemlemişlerdir.

Andersson vd. (2021) İsveç'te bahar mevsiminde ortalama 5°C sıcaklığında, bulutlu açık havada, fotovoltaik kurulumların EMI analizini gerçekleştirmek için bir pv sistemde saha ölçümleri almışlardır. İnvertör ve dc/dc optimize edicilere odaklanmışlardır. İnvertörün açık ve kapalı durumlarında ölçüm almışlar ve bu sırada pv sisteme 3m mesafede bir ölçüm Rohde & Schwarz HE300 anteni kullanılmıştır. Ölçümler girişimin dc/ac ve dc/dc de olabileceğini göstermiştir. İlk ölçümler en çok gürültü raporu alınan 30–87 MHz, 3–30 MHz, 108–200 MHz ve 200–500 MHz frekans aralıklarında yapılmıştır. Sonuçlar Avrupa ve İsveç yönetmeliklerine göre değerlendirilmiştir.

Wu vd. (2015b) GES bileşenlerinden biri olan çerçeve kablosunun ısıma gürültüsü üzerine etkisine odaklanmışlardır. Önce iki panelli bir ölçüm modelindeki ısıma gürültüsü bir simülasyon modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonra, 150 kHz ila 30 MHz frekans aralığında yer düzlemi ile güneş panelleri arasına monte edilen bir çerçeve kablosunun çeşitli kurulum konumlarının, bir fotovoltaik sistemin DC tarafından gelen ısıma gürültüsü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çerçeve kablosu panellerin köşesi ile yer düzlemi arasına monte edildiğinde ısıma gürültüsünün arttığı, çerçeve kablosu güç hatları boyunca monte edildiğinde ise ısıma gürültüsünün düşük frekanslarda bastırılabilceği bulunmuştur.

Lgarashi ve Suenaga (2005) güneş panellerinin elektromanyetik gürültü yaydığını ve bir anten gibi davrandığını doğrulamış ve panellerden yayılan elektromanyetik gürültünün ihmal edilemez olduğunu göstermişlerdir. Güneş paneline yapay gürültü uyguladıktan sonra, panellerden yayılan elektromanyetik gürültü yankısız odada ölçmüşlerdir. Çerçeve topraklaması ile ölçüm için, çıkış kablosuna yüksek frekanslı bir sinyal jeneratörü bağlanmış ve yatay, dikey ve eksenel olmak üzere üç yön için elektromanyetik gürültü ısıma özellikleri ölçülmüştür.

Loschi vd. (2017) şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız fotovoltaik sistem bileşenlerinde iletim yoluyla ve ısıma yoluyla gürültülerin elektromanyetik uyumluluk üzerine etkisini araştırmışlardır. Şebeke bağlantısız ölçüm sonuçları için iletilen EMI gürültüsünün 150 kHz ila 5 MHz frekans spektrumu aralığında ve ısıyan EMI gürültüsünün 30 MHz ila 200 MHz frekans spektrumu aralığında daha baskın olduğu görülmüştür. Pv invertörün çalışma moduna bağlı olarak gürültü frekansı artmıştır.

Prajapati (2019)fotovoltaik sistemde DC tarafın ölçüm tabanlı EMI modelini geliştirmiştir. Gerçek çalışma koşullarında, PV panellerinin empedansı (Prajapati ve See 2018) ve güç dönüştürücülerinin gürültü kaynağı modelini (Prajapati ve See 2019) çıkarmıştır. Bunun için devre içi ölçüm yaklaşımı kullanmıştır. Sistemin gürültü kaynağını, eşdeğer Thevenin gerilimi veya Norton akım kaynağı ile temsil etmiştir. Sonra sistemin CM ve DM iletilen gürültü modelleri geliştirmiştir. Gürültü spektrumunda CM emisyonlarının baskın olduğu ve bunu azaltmak için CM filtrelerinin etkili olduğu görmüştür.

Prajapati vd. (2021) 150 kHz – 30 MHz frekans aralığında pv sistemden ışıyan emisyonları öngörmek için kara kutu yaklaşımını önermişlerdir. Pv sistemden ışıyan emisyonları öngörmek için dc kablolarıyla birlikte PV panelini güç dönüştürücüsünden yayılan emisyonları ve gürültü akımını ilişkilendiren bir transfer fonksiyonla temsil edecek "radyasyon kara kutusu" olarak ve güç dönüştürücüyü ise kaynak empedansına sahip eşdeğer bir gürültü kaynağı ile temsil edecek bir "radyo frekansı (RF) gürültü kaynağı kara kutusu" olarak modellemişlerdir. Deney düzeneği 3 x 1 m boyutlarında bakır toprak düzlemi üzerine yerleştirilmiştir. Yer düzlemi ile cihazlar (PV panel ve güç dönüştürücü) arasındaki parazitik kapasitansın bulunmasından dolayı, cihazlar zemin düzleminden 5 cm yukarıya yerleştirilmiştir. Aydınlatma için halojen lambalar kullanılmıştır. Işıyan emisyonların frekansla azaldığı gözlemlenebilir.

Rucinski vd. (2015) PV sisteminin DC tarafındaki iletim yoluyla gürültü emisyonlarını ve elektromanyetik gürültü yayılma yollarını incelemişlerdir. Şebeke bağlantılı PV sistem on adet güneş paneli ve darbe genişlik modülasyon (PWM) kontrollü tek fazlı invertörden oluşmaktadır. Panel çerçeveleri bina topraklamasına bağlanmıştır. EMI simülasyon modeli LTspice programı ile gerçekleştirilmiş ve empedans analizör ile kaçak akım yolu empedansı ölçülmüştür. CM ve DM yol empedans spektrumları karşılaştırıldığında, 10 MHz'nin altındaki frekans alanındaki ölçümlere ve simülasyonlara göre, kaçak akım ve onun kuplaj mekanizması hakkında bilgi sağlayarak karşılaştırılabilir olduğu gözlemlenmiştir.

Anand ve Jeevananthan (2010) tek fazlı darbe genişlik modülasyonlu (PWM) invertörden iletim yoluyla elektromanyetik girişimin (EMI) analizi için matematiksel model benimsemişlerdir. İletim yoluyla EMI matematiksel modeli 40 kHz anahtarlama frekansında Pspice programı için doğrulanmıştır. Ayrıca IsSpice (Intusoft, ABD) ve Orcad simülasyon programları aracılığıyla farklı koşullar altında SPWM invertörün simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır.

Khamphakdi vd. (2006) tek fazlı şebekeye bağlı bipolar SPWM ile kontrol edilen invertörden, güç sistemine iletilen iletim yoluyla EMI emisyonları ve harmonik bozulmaları incelemişlerdir. EMI ölçümü CISPR 16 standardına uygun EMC analizörü ile ve gerçekleştirmişler ve sınır değeri için CISPR 11 standardı referans almışlardır. Şebeke bağlantılı ve bağlantısız olma durumu için, farklı güçlerde, değişen anahtarlama frekanslarda ve modülasyon indekslerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmadan ma'nın iletilen EMI ile doğru orantılı, fs'nin iletilen EMI ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Rajkumar vd. (2015) şebeke bağlantısız ve şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerde güç elektroniği devrelerinde bulunan anahtarlama elemanlarının çalışma mekanizmasının neden olduğu elektromanyetik girişimleri ele almışlardır. İletim yoluyla gürültü nedenlerine, ölçüm tekniğine, ilgili standartlara ve bu gürültüleri baskılama yöntemlerine değinmişlerdir.

Literatürde ayrıca elektromanyetik analizi için çatı üstüne kurulan GES'lerde elektrik ve manyetik alan ölçümleri alınmıştır (Safigianni 2013). Ölçümler farklı zamanlarda, farklı güneş ışınlamalarında güneş panelleri üzerinde ve invertörlerin bulunduğu yerlerde alınmıştır. Elektrik ve manyetik alan ölçüm verilerinin ICNIRP'nin

belirlediği sınırların oldukça altında olduğu görülmüştür.

Ceaki vd. (2015) fotovoltaik sistemlerin elektrik şebekesinin güç kalitesi üzerine olan etkilerini incelemek için ETAP 11 aracılığıyla gerçek bir elektrik dağıtım sistemini dikkate alarak örnek bir çalışma modellemiştir. Öncelikle fotovoltaik sistemler bağlanmadan elektrik şebekesini modellemiştir. Sonrasında ise elektrik santraline bir fotovoltaik sistem eklemişler ve harmonik spektrum seviyesinde yüksek değerlere sahip harmonikler gözlemlemiştir. Santrale ikinci fotovoltaik sistemi ekleyerek harmonik spektrumunu elde etmişlerdir.

Alam vd. (2016) güç elektroniği elemanlarında elektromanyetik girişimi azaltmak için 3 ila 30 MHz frekans bandındaki gürültü sinyalinin eşzamanlı zaman-frekans lokalizasyonunu kullanan bir dalgacık dönüşüm tabanlı yaklaşım önermişlerdir. EMI gürültüyü önlemek için, gürültü sinyali ile zıt fazlı, aynı genliğe sahip olan bir gürültü önleme sinyali üretmişlerdir. Dönüştürücü terminal geriliminden, 250 MHz örnekleme frekansı üzerinde çalışan bir ADC yardımıyla dijital formda kaydedilen sinyal, bir gürültü önleme sinyalinin yeniden yapılandırılması için Morlet dalgacık dönüşümüne tabi tutulmuştur. Zaman alanındaki gürültü sinyallerini yeniden oluşturmak için ise dalgacık katsayıları ters sürekli dalgacık dönüşümüne (ICWT) tabi tutulmuştur.

Faiz ve Shahgholian (2007) PWM invertörlerde elektromanyetik girişim analizini gerçekleştirmişlerdir. CM, DM eşdeğer devre modelleri verilerek EMI girişimin nedenleri, sınıflandırılması incelenmiştir. Ayrıca gürültü baskılama yöntemlerine değinilmiştir.

Kapusta (2012) elektromanyetik kirliliğe yol açan fotovoltaik dönüştürücülerin sebep olduğu iletim yoluyla emisyonlarını analizini azaltmak için EMI filtre uygulamıştır. Güç dönüştürücülerinin neden olduğu gürültüyü engellemek, şebeke ve pv panele girişimi önlemek için güç dönüştürücüsüne panel tarafında ve şebeke tarafında olmak üzere iki EMI filtresi eklenmiştir. Bu filtreler ölçüm sonuçlarına ve datasheet verilerine göre tasarlanmış ve simule edilmiştir.

Drapalik vd. (2010) fotovoltaik hücrelerin 10 Hz ila 1 GHz frekans aralığında harici elektromanyetik alanlara tepkisi araştırılmıştır. Ortamdan alınan RF gürültüsü dış ortam kayıtları, farklı güneş hücreleri ve modülleri için örneklenmiş ve elektromanyetik alanlar için bir tek kutup oluşturan basit bir whip anten kabulü ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvarında sinyaller üretilmiş ve bunların alımı, yönelim, boyut ve mesafe gibi hücrelerin geometrik faktörlerine bağlı olarak araştırılmıştır. İki anten modeli, dipol ve patch konfigürasyonu, deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Modüle edilmiş sinyallerin güneş hücreleri üzerindeki etkisine yönelik simülasyonlar yapılmıştır.

GES sisteminde oluşan iletim yoluyla gürültü yük/şebeke tarafına iletilebilir yükün çalışma performansını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca güneş panellerinin bağlı olduğu dc tarafa da iletilebilir. İletilen gürültünün yoğun olması durumunda PV sistemden ısıma yoluyla emisyonlar olabilir (Juswardy vd. 2011; Prajapati 2019; Wada vd. 2005). Ayrıca Kharanaq vd. (2020) güç dönüştürücü devrelerinde iletim yoluyla gürültü için farklı modelleme yöntemlerinden bahsetmiştir.

Bu bölümde yenilenebilir enerji alanında önem arz eden fotovoltaik sistemlerin

özellikle de dönüştürücü devrelerin EMI gürültü ve modellemeleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Bu tezde gürültü karakterizasyon analizi yapılmıştır. İletim ve ısıma gürültü analizlerine ilişkin yapılan model ve laboratuvar çalışmalarına ilaveten yüksek güçlü çatı ve saha tipi GES’lerde elektromanyetik alan analizleri gerçekleştirilmiştir.

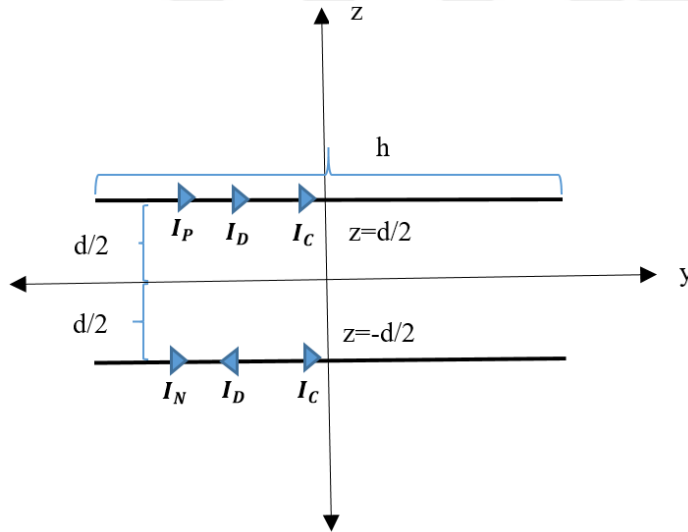


3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, GES’lerde elektromanyetik girişim problemlerinin analizi ve çözüm önerilerinin değerlendirmesi ile sistemin ışıma karakteristiğinin ortaya konularak CM ve DM akımlarının neden olduğu ışıma alanlarının matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. GES bileşenlerinde meydana gelebilecek gürültü, eşdeğer devre modelleri ile modellenerek benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sistemin neden olduğu gürültüyü belirlemek amacıyla gerçekleştirilen iletim ve ışıma ölçümleri, paneller üzerinde alınan elektrik alan ve manyetik alan ölçümleri ve güneş paneli s-parametre ölçümü bu bölümde yer almaktadır.

3.1. Işıma Emisyonlarının Matematiksel Modellenmesi

Sistemin ışıma karakteristiğini anlamak ve modellemek için ışıyan emisyonlara ve EMI’ya neden olabilecek akımlar ve özellikleri incelenmiştir. Hatlarda oluşan CM, DM akımları gibi iletim yoluyla emisyonların neden olduğu ışıma yoluyla emisyonların matematiksel modellenmesi yapılmıştır. DM akımı işlevsel, CM akımı işlevsel performans için gerekli değildir (Paul 2022). Işıma modelini oluşturmak için akım taşıyan bir çift paralel kablo (iletken) geometrisi yaklaşımı benimsenmiştir. y eksenine paralel olarak yz düzlemine yerleştirilen h uzunluğundaki paralel kablo çifti Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Birinci kablodan akan akım I_P ve ikinci kablodan akan akım I_N olarak isimlendirilmiş ve kablolar, aralarında d mesafesi olacak şekilde konumlandırılmıştır.

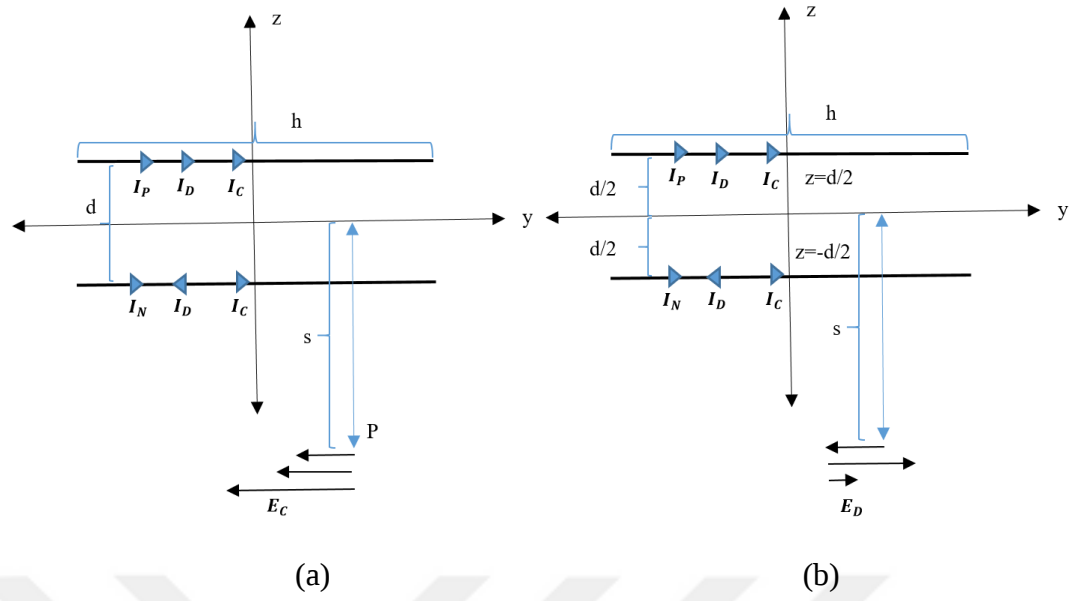


Şekil 3.1. Akım taşıyan paralel kablo çifti

Şekil 3.1’de verilen I_P ve I_N akımları sırasıyla Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 ile bulunur.

$$I_P = I_C + I_D \quad (3.1)$$

$$I_N = I_C - I_D \quad (3.2)$$



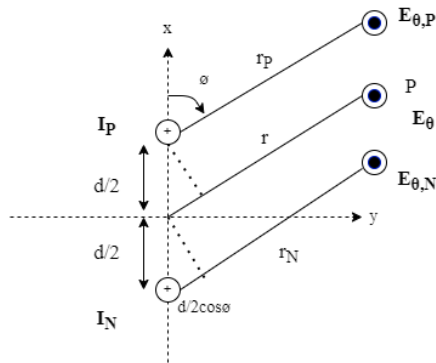
Şekil 3.2. İletim yoluyla emisyonların neden olduğu ışıma emisyonları; **a)** CM akımlarının ışıma emisyonları; **b)** DM akımlarının ışıma emisyonları

Bu iletkenlerde oluşan CM ve DM akımlarının ayrıştırılması ise Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 ile elde edilir. CM akımlarının neden olduğu elektrik alan Şekil 3.2.a'da ve DM akımlarının neden olduğu elektrik alan ise Şekil 3.2.b'de yer almaktadır.

$$I_C = \frac{I_P + I_N}{2} \quad (3.3)$$

$$I_D = \frac{I_P - I_N}{2} \quad (3.4)$$

Burada matematiksel formülasyonda, benimsenen geometriden ve benzerliğinden dolayı dizi anten ışıma yönteminden yararlanılmıştır. Hattın kabloları doğrusal dizi anten olarak görülebileceği için, kabloların iki elemanlı dipol anten dizisini oluşturduğu varsayılmıştır. Bununla birlikte bir Hertz dipolü, iletkenlerdeki akım dağılımı açısından EMI sorununu daha doğru temsil etmektedir. Dolayısıyla hattın kabloları Hertz dipolü olarak modellenmiştir.



Şekil 3.3. Uzak alan ışıması

Emisyon modellemesi uzak alan ışıması için yapılmış ve paralel ışın yaklaşımı benimsenmiştir. Bu doğrultuda ölçüm noktasının (gözlem noktası) antenlere paralel olacak kadar uzakta olduğu ve iletken boylarının yeterince kısa olduğu varsayılmıştır.

Paralel kablo çiftinin neden olduğu toplam ışıyan alanları belirlemek için her bir kablonun oluşturduğu alanların toplam bileşkesi alınmıştır (Denklem 3.5).

$$\mathbf{E}_\theta = \mathbf{E}_{\theta,P} + \mathbf{E}_{\theta,N} \quad (3.5)$$

Antenin uzak alan ışıması Denklem 3.6'da verilmiştir.

$$\mathbf{E}_{\theta,i} = \mathbf{M} \mathbf{I}_i \frac{e^{-j\beta_0 r_i}}{r_i} F(\theta) \quad (3.6)$$

Denklemdeki $\mathbf{I}_i$ antenin merkezindeki akımı, $F(\theta)$ örüntü fonksiyonunu (anten örüntüsünün θ değişimini belirtir), $\mathbf{M}$ ise anten tipi fonksiyonunu ifade etmektedir.

Doğrusal antenlerin her birinin maksimum ışıması antene dik yönde meydana gelmektedir. Bu ise $\theta=\pi/2$ değeri ile sağlanmaktadır.

Hertz dipolü için $\mathbf{M}$ ve $F(\theta)$ eşitlikleri Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'de verilmiştir.

$$\mathbf{M} = j \frac{\eta_0 \beta_0}{4\pi} h \quad (3.7)$$

$$F(\theta) = \sin\theta \quad (3.8)$$

$\theta=\pi/2$ iken $F(\theta)=1$ olmaktadır.

Denklem 3.9'daki η dalga empedansını, Denklem 3.10'daki β ise ortamın faz sabitini ifade etmektedir.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \quad (3.9)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'da yer alan λ dalga boyu, ω açısal hız ve c ise ışık hızıdır. Işık hızı değeri ve dalga boyu bağıntısı sırasıyla Denklem 3.11 ve Denklem 3.12'de verilmiştir.

$$c = 3.10^8 \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.12)$$

Kablolar havada bulunursa, ortam μ_0 ve ε_0 ile karakterize edilir. Bu durumda Denklem 3.13'te $\mu = \mu_0$ ve $\varepsilon = \varepsilon_0$ olur. Bu parametreler yerine konulursa;

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \quad (3.13)$$

$$\mathbf{M} = j \frac{120\pi \cdot 2\pi}{4\pi\lambda} h = j \frac{60\pi f}{3 \cdot 10^8} h \quad (3.14)$$

$$\mathbf{M} = j2\pi \times 10^{-7} f h \quad (3.15)$$

Denklem 3.15'te verilen ifade elde edilir.

Şekil 3.3'te P ölçüm noktasından orijine (kabloların orta noktası) olan mesafe r uzunluğundadır. Paralel ışın yaklaşımında geometrik hesaplamaya göre r_P ve r_N mesafeleri Denklem 3.16 ve Denklem 3.17 ile elde edilir.

$$r_P = r - \frac{d}{2} \cos \varnothing \quad (3.16)$$

$$r_N = r + \frac{d}{2} \cos \varnothing \quad (3.17)$$

Her bir kablonun neden olduğu toplam ışıma etkisini elde etmek için ise Denklem 3.6 Denklem 3.5'te yerine konulmuştur.

$$\mathbf{E}_\theta = \left(\mathbf{M} \mathbf{I}_P \frac{e^{-j\beta_0 r_P}}{r_P} + \mathbf{M} \mathbf{I}_N \frac{e^{-j\beta_0 r_N}}{r_N} \right) F(\theta) \quad (3.18)$$

$$\mathbf{E}_\theta = \mathbf{M} \left(\mathbf{I}_P \frac{e^{-j\beta_0 r_P}}{r_P} + \mathbf{I}_N \frac{e^{-j\beta_0 r_N}}{r_N} \right) \quad (3.19)$$

İletkenler özdeş anten olarak kabul edildiği için Denklem 3.19'da paydada $r_P = r$ ve $r_N = r$ ifadeleri yerine konularak ve üstel ifadede ise Denklem 3.16 ve 3.17 yerine konularak toplam alan elde edilmiştir.

$$\mathbf{E}_\theta = \mathbf{M} \left(\mathbf{I}_P \frac{e^{-j\beta_0 \left(r - \frac{d}{2} \cos \varnothing\right)}}{r} + \mathbf{I}_N \frac{e^{-j\beta_0 \left(r + \frac{d}{2} \cos \varnothing\right)}}{r} \right) \quad (3.20)$$

$$\mathbf{E}_\theta = \mathbf{M} \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} \left(\mathbf{I}_P e^{j\beta_0 \frac{d}{2} \cos \varnothing} + \mathbf{I}_N e^{-j\beta_0 \frac{d}{2} \cos \varnothing} \right) \quad (3.21)$$

3.1.1. CM Akımı için emisyon modeli

Denklem 3.21 CM akımları için uyarlanırsa I_P ve I_N akımları yerine sırasıyla Denklem 3.22 ve Denklem 3.23 konulur.

$$I_P = I_C \quad (3.22)$$

$$I_N = I_C \quad (3.23)$$

İletkenler Hertz dipolleri olarak kabul edilmiş ve CM akımları için maksimum ışımanın iletkin düzleminde olduğu yani $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 180^\circ$ varsayılmıştır. Fakat uygulamada iletkinler arasındaki d mesafesi çok küçük olduğu için ($d \ll \lambda_0$) Denklem 3.21'deki ışıyan elektrik alan $\cos(\beta_0 \frac{d}{2} \cos \theta) = \cos(\pi \frac{d}{\lambda_0} \cos \theta)$ ile orantılıdır. $d \leq \lambda_0/100$ olduğu varsayılırsa $\cos$ ifadesi $\theta = 0^\circ$ için 0.9995 ve $\theta = 180^\circ$ için 1'e eşit olur. Buradan ise örüntünün CM akımları için iletkin düzleminde çok yönlü olduğu çıkarılmaktadır. Ölçüm mesafesi ise Şekil 3.3'te görüldüğü gibi iletkinlerin orta noktası ile ölçüm noktası arasındaki mesafedir ($s = r$).

Uzak alan yaklaşımı için sinüs ve kosinüs fonksiyonları küçük argümanlar için $\sin \alpha = \alpha$ ve $\cos \alpha = 1$ olur. Bu yaklaşım ile Denklem 3.24 elde edilmiştir. CM akımları için elektrik alanın akıma oranı Denklem 3.25 ile Denklem 3.29 arasındaki eşitlikler ile elde edilmiştir.

$$\cos(\frac{1}{2}\beta_0 d) \cong 1 \quad (3.24)$$

$$e^{j\alpha} + e^{-j\alpha} = 2 \cos \alpha \quad (3.25)$$

$$E_C = j2\pi \times 10^{-7} \frac{fh}{s} I_C e^{j\beta_0 s} (e^{j\beta_0 \frac{d}{2}} + e^{-j\beta_0 \frac{d}{2}}) \quad (3.26)$$

$$E_C = j4\pi \times 10^{-7} \frac{fh}{s} I_C e^{-j\beta_0 s} \cos(\frac{\beta_0 d}{2}) \quad (3.27)$$

$$|E_C| = \frac{1.257 \times 10^{-6}}{s} fh |I_C| \quad (3.28)$$

$$\frac{|E_C|}{|I_C|} = K_1 fh \quad (3.29)$$

3.1.2. DM akımı için emisyon modeli

Denklem 3.21 DM akımları için uyarlanırsa I_P ve I_N akımları yerine sırasıyla Denklem 3.30 ve Denklem 3.31 konulur.

$$I_P = I_D \quad (3.30)$$

$$I_N = -I_D \quad (3.31)$$

CM akımlarında varsayıldığı gibi hat iletkenlerine ve iletkenlerin bulunduğu düzleme dik olan bir ölçüm noktası için ışıyan alan (maksimum alan) modellenmesi yapılmıştır. Şekil 3.3'ten görüleceği üzere ölçüm mesafesi iletkenlerin orta noktasından ölçüm noktasına kadar olan s uzunluğundadır. Bu durumda $r = s$ ve $\theta = 0$ olarak alınmıştır. Denklem 3.32 ile Denklem 3.37 arasındaki denklem setleri ile Denklem 3.38 elde edilmiştir.

$$\sin\left(\frac{1}{2}\beta_0 d\right) \cong \frac{1}{2}\beta_0 d \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{2}\beta_0 d = \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{\pi df}{c} \cong 1.05 \times 10^{-7} \quad (3.33)$$

$$e^{j\alpha} - e^{-j\alpha} = 2j \sin \alpha \quad (3.34)$$

$$E_D = j2\pi \times 10^{-7} \frac{fh}{s} I_D e^{j\beta_0 s} (e^{j\beta_0 \frac{d}{2}} - e^{-j\beta_0 \frac{d}{2}}) \quad (3.35)$$

$$E_D = -4\pi \times 10^{-7} \frac{fh}{s} I_D e^{j\beta_0 s} \sin\left(\frac{\beta_0 d}{2}\right) \quad (3.36)$$

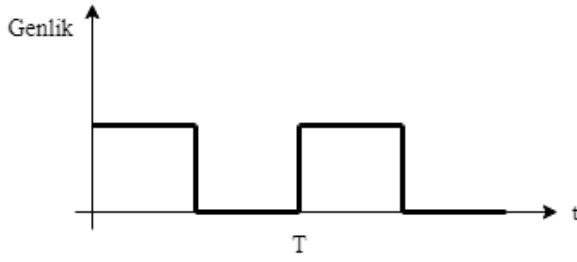
$$|E_D| = \frac{1.316 \times 10^{-14}}{s} f^2 h d |I_D| \quad (3.37)$$

$$\frac{|E_D|}{|I_D|} = K_2 f^2 h d \quad (3.38)$$

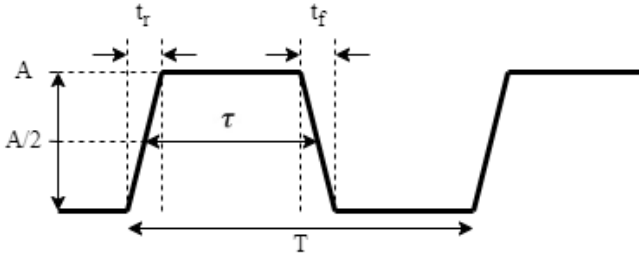
3.1.3. Frekans analizi

Fotovoltaik sistemlerde EMI analizi için gerçeğe yakın gürültü modelinin yapılabilmesi için gürültü kaynağının mekanizmasının anlaşılması gerekmektedir. Farklı topolojilerde olabilen DC-DC ve DC-AC dönüştürücüler burada öneme sahiptir. Dolayısıyla öncelikle bu devrelerde kullanılan yarıiletken anahtarlama elemanlarının dalga formlarının modellenmesi ve spektral içeriğinin anlaşılması gerekmektedir.

Güç elektroniği dönüştürücü devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanlarının dalga şekilleri idealde kare dalga formundadır (Şekil 3.4). Fakat pratikte durum böyle değildir. Yarıiletken anahtarlama elemanları hemen açılıp kapanamaz. Sinyalin düşük seviyeden yüksek seviyeye ulaşması için geçen yükselme zamanı ve yüksek seviyeden düşük seviyeye ulaşması için geçen düşme zamanı sıfır olamayacağı için trapezoidal dalga formu daha gerçekçi bir yaklaşımdır. Dolayısıyla bu çalışmada tetikleme sinyalleri trapezoidal dalga formulu darbelerin periyodik dizileri ile ifade edilmiştir.



Şekil 3.4. Kare dalga formu



Şekil 3.5. Trapezoidal dalga formu

Şekil 3.5'te verilen trapezoial darbeyi tanımlayan bazı parametreler bulunmaktadır. Bunlardan A genliği, f frekansı, T periyodu, τ darbe genişliğini ($A/2$ genliğindeki genişlik), τ_r yükselme zamanını (darbe genliğinin %10'dan %90'a erişmesi için gereken süre) ve τ_f ise düşme zamanını belirtmektedir.

Matematiksel modellemede karmaşıklığı azaltmak adına yükselme ve düşme zamanı eşit kabul edilmiştir ($\tau_r = \tau_f$). Sinyalin tek taraflı Fourier spektrumu yaklaşımı benimsenmiş ve Fourier katsayıları verilmiştir (Denklem 3.39). ω_0 , c_0 , ve c_n tanımlamaları ise sırasıyla Denklem 3.40, Denklem 3.41 ve Denklem 3.42'de verilmiştir.

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} 2c_n \cos(\omega_0 t + \theta_{cn}) \quad (3.39)$$

$$\omega_0 = 2\pi/T \quad (3.40)$$

$$c_0 = A \frac{\tau}{T} \quad (3.41)$$

$$|c_n^+| = |2c_n| = 2A \frac{\tau}{T} \left| \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{n\pi\tau/T} \right| \left| \frac{\sin(n\pi\tau_r/T)}{n\pi\tau_r/T} \right| \quad n \neq 0 \quad (3.42)$$

Görev döngüsü % 50 alınırsa $\tau_r = 1/2 T$ Denklem $|\sin(n\pi\tau/T)|/|n\pi\tau/T| = |\sin(n\pi/2)|/|n\pi/2|$ haline gelir ve bu da n 'nin çift değerleri için sıfırdır. Dolayısıyla çift harmonikler yoktur.

Ayrık spektrum sürekli zarfa dönüştürülür. Denklem 3.43, Denklem 3.42’de yerine konulursa, Denklem 3.44 elde edilir.

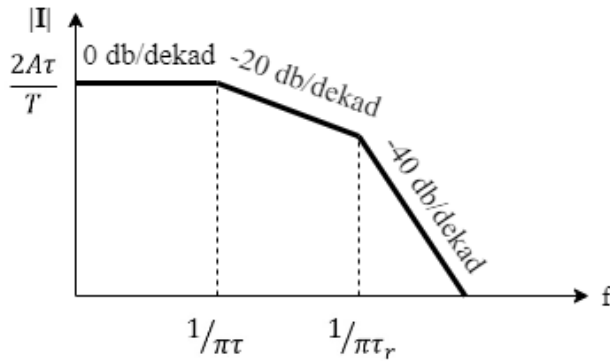
$$f = \frac{n}{T} \quad (3.43)$$

$$Zarf f = 2A \frac{\tau}{T} \left| \frac{\sin(\pi \tau f)}{\pi \tau f} \right| \left| \frac{\sin(\pi \tau_r f)}{\pi \tau_r f} \right| \quad (3.44)$$

Sinyal spektrumunun sınırlarını oluşturmak için spektral zarfın logaritması alınır (dB olarak ifade edilir). Bu ifade Denklem 3.45 ile gösterilmiştir.

$$20 \log_{10}(Zarf f) = 20 \log_{10} \left(2A \frac{\tau}{T} \right) + 20 \log_{10} \left| \frac{\sin(\pi \tau f)}{\pi \tau f} \right| + 20 \log_{10} \left| \frac{\sin(\pi \tau_r f)}{\pi \tau_r f} \right| \quad (3.45)$$

Darbe genişliği yükselme ve düşme zamanlarına eşit ya da bunlardan büyük olmalıdır. Şekil 3.6’da eğimleri 0 dB/dekad, -20 dB/dekad ve -40 dB/dekad olmak üzere üç zarf doğrusu ve iki köşe frekansı bulunmaktadır. $1/\tau$ noktasındaki (Denklem 3.44’teki birinci sinüs bileşeninin neden olduğu) köşe frekansı darbe genişliği ile alakalı, $1/\tau_r$ noktasındaki (Denklem 3.44’teki ikinci sinüs bileşeninin neden olduğu) köşe frekansı ise düşme ve yükselme zamanı ile alakalıdır. Yani burada darbe geçiş süresi ve darbe süresi frekans karakteristiğini belirlemekle birlikte EMI açısından önem arz etmektedir.

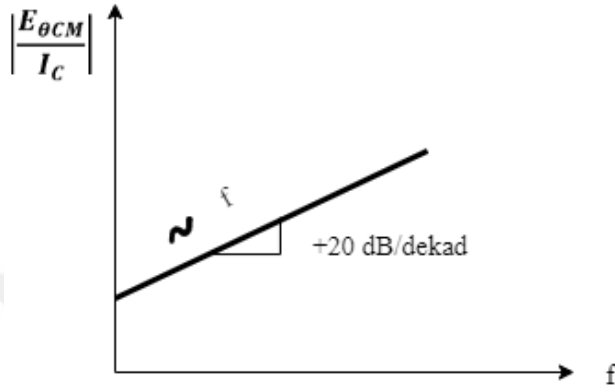


Şekil 3.6. Trapezoidal darbe dizisinin spektrum zarfı

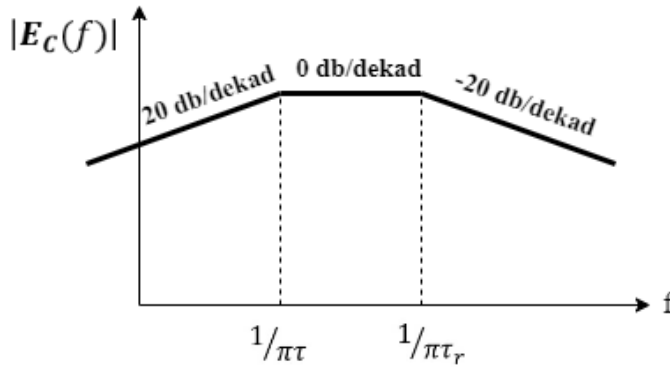
Şekil 3.6’daki frekans domeni davranışından görüleceği üzere yükselme ve düşme süreleri trapezoidal darbe dizisinin yüksek frekans bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu da demek oluyor ki darbe dizisinin yükselme ya da düşme sürelerinin azalmasıyla bir cihazın ya da sistemin emisyonları artmaktadır. Bileşenlerin $1/\tau$ noktasından $1/\tau_r$ noktasına kadar zayıflaması 20 dB/dekad darbe genişliğinin harmonik cevabını belirtirken $1/\tau_r$ noktasının üzerinde 40 dB/dekad ise geçiş zamanlarının harmonik cevabını göstermektedir. Genelde $1/\tau_r$ noktasına kadar olan harmonikler dikkate alınır (Sevgi 2006).

3.1.4. Işıma emisyon spektrumu

CM emisyonları Denklem 3.29'dan görüleceği üzere frekans ve hattın uzunluğu ile orantılı olduğu için, bu ifadenin frekans cevabı Şekil 3.7'de görüldüğü gibi logaritmik ölçekte +20db/dekad eğime sahip bir doğru ile gösterilir. Şekil 3.7'deki spektrum ile trapezoidal dalga formu frekans spektrumu (Şekil 3.6) çarpılırsa ışıma alanı spektrumu elde edilir.



Şekil 3.7. CM ışıma emisyonu



Şekil 3.8. CM ışıma alan spektrumu

$\mu V/m$ elektrik alan birimi için K_C Denklem 3.46'da verilmiştir.

$$K_C = 1.257 \frac{h}{s} \quad (3.46)$$

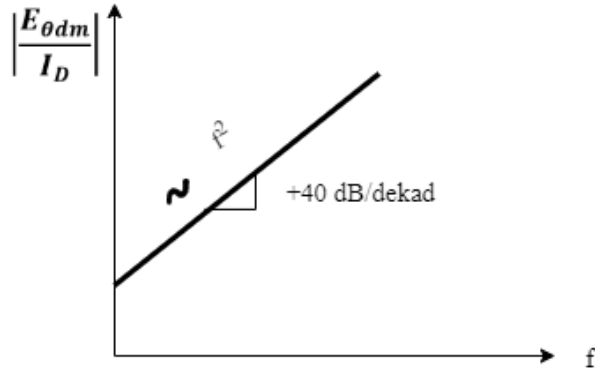
$$|E_C(f)| = K_C f |I_C(f)| \quad (3.47)$$

CM ışıma alanının dB olarak genliği Denklem 3.48 ile elde edilir.

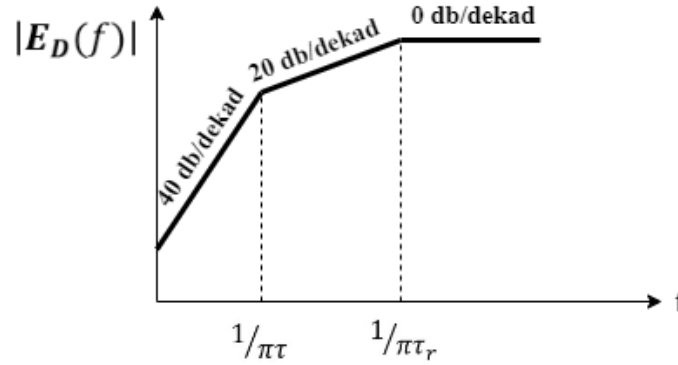
$$|E_{CM}(f)|_{dB\mu V/m} = 20 \log_{10} K_C + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} |I_C(f)| \quad (3.48)$$

DM emisyonları Denklem 3.38'den görüleceği üzere frekansın karesi ve iletkenlerin çevrelediği alanla (h ve d) orantılıdır. Bunun neticesinde bu ifadenin frekans

cevabı logaritmik ölçekte +40db/dekad eğime sahip bir doğru ile gösterilir. Şekil 3.9'daki spektrum ile trapezoidal dalga formu frekans spektrumu çarpılırsa ışıma alanı spektrumu elde edilir.



Şekil 3.9. DM ışıma emisyonu



Şekil 3.10. DM ışıma alan spektrumu

$\mu V/m$ elektrik alan birimi için K_D Denklem 3.49'da verilmiştir.

$$K_D = 1.316 \times 10^{-14} \frac{hd}{s} \quad (3.49)$$

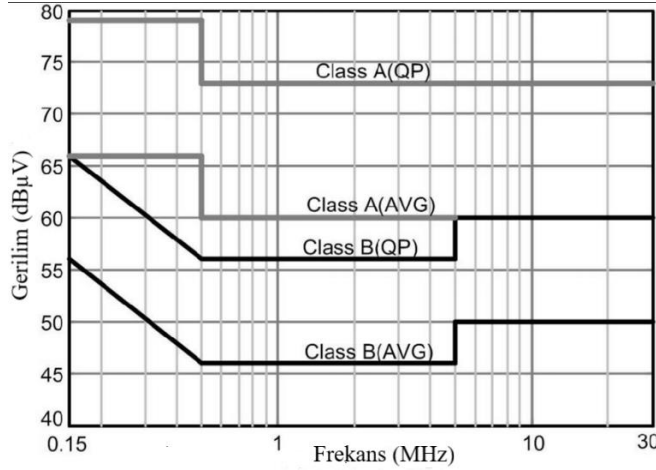
$$|E_D(f)| = K_C f^2 |I_D(f)| \quad (3.50)$$

DM ışıma alanının dB olarak genliği Denklem 3.51 ile elde edilir.

$$|E_{DM}(f)|_{dB\mu V/m} = 20 \log_{10} K_C + 40 \log_{10} f + 20 \log_{10} |I_D(f)| \quad (3.51)$$

3.2. İletim Emisyonlarının Simülasyonu

Çalışmada tek fazlı bir güneş enerji sistemi modellenmiş ve bu sistemde yüksek anahtarlama frekanslarının neden olduğu iletim yoluyla gürültü modları olan CM ve DM gürültüleri simule edilmiştir. Modellemede Simulink kütüphanesinde yer alan alfasolar M6L60-265 güneş paneli kullanılmıştır. Çıkış gerilimi 400 V, invertörün anahtarlama



Şekil 3.13. CISPR22 sınır değerleri (Kharanaq vd. 2020)

3.3. İletim ve Işıma Ölçümleri

Bir ürün için standartlar tarafından iletim ölçümü için sınır değerlerinin birimi dBμV olarak, ışıma testi için sınır değerlerinin birimi dBμV/m olarak verilmektedir. dBm - dBμV dönüşümü ve dBμV - dBμV/m dönüşümü sırasıyla Denklem 3.52 ve Denklem 3.53'te verilmiştir.

$$dB\mu V = dBm + 107 \quad (3.52)$$

$$dB\mu V/m = dB\mu V + AF \quad (3.53)$$

Ölçümlerde farklı model ve farklı çıkış gücüne sahip iki panel kullanılmıştır: 60 hücreli 5 busbar'lı polikristal güneş paneli ve 72 hücreli 5 busbar'lı perc monokristal güneş paneli. Kullanılan polikristal güneş panelinin teknik parametre değerleri Çizelge 3.1'de yer alırken, kullanılan perc monokristal güneş panelinin teknik parametre bilgileri Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Polikristal güneş paneli teknik parametreleri

Parametre	Değer
P_m (Maksimum güç, W)	265 W
Ölçüm toleransı (%)	0±4
V_{mp} (Maksimum güç gerilimi, V)	31.52 V
I_{mp} (Maksimum güç akımı, A)	8.49 A
V_{oc} (V) – Açık devre gerilimi	38.4 V
I_{sc} (A) – Kısa devre akımı	9.05 A
Maximum sistem gerilimi (V)	1000 V DC
Maksimum seri sigorta değeri	15 A/20 A

Çizelge 3.2. Monokristal güneş paneli teknik parametreleri

Parametre	Değer
P_m (Maksimum güç, W)	390 W
V_{mp} (Maksimum güç gerilimi, V)	40.88 V
I_{mp} (Maksimum güç akımı, A)	9.55 A
V_{oc} (V) – Açık devre gerilimi	49.32 V
I_{sc} (A) – Kısa devre akımı	10.13 A
Maximum sistem gerilimi (V)	1000 V/1500 V DC
Modül verimliliği	%16.09

Panellerin ürettiği akım formunu dönüştürmek için akıllı PWM invertör kullanılmış ve teknik parametreleri Çizelge 3.3'te yer almaktadır. Üretilen enerjiyi depolamak için 12 V 100 Ah akü kullanılmıştır. Panel invertör ve invertör akü arasında ise bağlantı kabloları kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. İnvertör teknik parametreleri

Parametre	Değer
Nominal güç	1000VA/1000W
DC giriş	12V, 95A
AC çıkış	230V, 50/60Hz, 1 ϕ

Literatürde yapılan çalışmalar ışığında laboratuvar ölçümlerinde yapay güneş ışığı benzetiminde halojen lamba kullanılmıştır. Bu çalışmada da iç mekan ölçümleri için yapay güneş ışığı yerine 500 W gücünde toplam sekiz adet halojen lamba kullanılmıştır.

Tam bir santral kurulum benzetim ortamı oluşturulması amacıyla, panellerin üzerine yerleştirilebileceği bir eğik düzlem yaptırılmıştır. Eğik düzlem, açısı 24°, hipotenüs uzunluğu 2 m, boyu 1.827 m ve yüksekliği 0.813 m uzunluğunda olacak şekilde yaptırılmıştır. Halojen lambaların tam eğik düzlemin üzerini aydınlatacak şekilde (90° açıyla) montajının yapılabilmesi için eğik düzleme L şeklinde yapılar eklenmiştir (Şekil 3.14). Daha sonra ise halojen lambalar eğik düzlem üzerine monte edilip bunların elektrik bağlantısı yapılmıştır. Halojen lambaların eğik düzleme olan uzaklığı ortalama 30 cm'dir.



Şekil 3.14. Yapay güneş ışığı sistemi

3.3.1. İletim yoluyla gürültü ölçümü

İletim yoluyla ölçüm, TAC'ın performansı nedeniyle üretilen istenmeyen sinyallere odaklanır.

İletim yoluyla gürültüler kablo ile diğer ekipmanlara ulaşarak ya da istenmeyen anten gibi davranan kablolarda ısıyan emisyonlara dönüşerek girişime neden olabilirler. CE ölçümü ile sistemdeki iletim yoluyla gürültüler ölçülmektedir. Hat empedans stabilizasyon ağı (LISN) gerçek gereksinimlere daha yakın cevap verdiği için genellikle ölçümlerde kaynak empedansı olarak kullanılır. Bununla birlikte LISN'nin ölçümde üç işlevi bulunmaktadır. Bunlar;

1. Sabit empedans sağlamaktadır. Bu aynı zamanda ölçümün tekrarlanabilir olmasını sağlamaktadır. Şöyle ki ölçüm sırasında ilgili frekans bölgesinde gerilim ölçülmektedir. Belirtilen frekans bölgesindeki şebeke empedansı değişken olabilmektedir. Farklı yerlerde yapılan ölçümlerde farklı empedansların olması gerilimi de etkileyeceğinden ölçüm stabilizasyonu sağlanmaz.

2. TAC'a güç kablosu aracılığıyla gelen RF sinyalleri önlemektedir. Buradaki amaç TAC'ın neden olduğu gürültüleri tespit etmek olduğu için, TAC'a gelen gürültülerin varlığı istenmez.

3. Gürültünün gözlenebilmesi için gerekli olan spektrum analizör, osiloskop ve EMI alıcı gibi ölçüm cihazlarının bağlantısı için gereken portu sağlamaktadır. Bu çalışmada Şekil 3.15'te yer alan GW Insteak GSP-730 spektrum analizör kullanılmıştır.



Şekil 3.15. Spektrum analizör

Ölçüm sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer durum ise LISN'in topraklanmasıdır. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi LISN' nin altına iletken düzlem yerleştirilmiş ve kaçak akım ve yüksek gerilim koruması için toprak bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 3.16. LISN'nin topraklanması

İletkenlik ölçümleri, Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü, Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında ölçüm düzeneği hazırlanmış ve TAC kurulmuştur. LISN'nin RF (radyo frekansı) çıkışı doğrudan spektrum analizöre bağlanmamıştır. LISN ile spektrum analizör arasına Şekil 3.17'de görülen 10 dB'lik zayıflatıcı bağlanmıştır. Spektrum analizör bağlantısı yapılmadan önce spektrum analizörü koruma amaçlı DC gerilim kontrolü yapılmıştır. Avometrenin DC gerilim kademesinde sıfır gerilim değeri görüldükten sonra bağlantı yapılmıştır.



Şekil 3.17. Zayıflatıcı



Şekil 3.18. Solar metre

Panel üzerine düşen ışıınıııı ölçmek için Şekil 3.18’de verilen Fluke FLK-IRR1-SOL solar metre kullanılmıştır.

Öncelikle polikristal güneş paneli kullanılarak ölçümler alınmıştır. Bu sırada invertör çıkışına farklı güçlerde yükler bağlanmıştır. Sonra ise perc monokristal güneş paneli kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19’da polikristal güneş paneli verilmiştir.



Şekil 3.19. Polikristal güneş paneli

Laboratuvar ölçümlerinden sonra deney düzeneği ve TAC dışarıya çıkarılmış ve açık alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20 ve Şekil 3.21).



Şekil 3.20. Açık alanda polikristal güneş paneli



Şekil 3.21. Açık alanda perc monokristal güneş paneli

3.3.2. Işıma yoluyla gürültü ölçümü

Fotovoltaik sistemin ısıma yoluyla gürültü ölçümleri karbon emdirilmiş süngerlerden oluşan yansımaz odada gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik uyumluluk analizi için CISPR 22 (Uluslararası Radyo Girişimleri Özel Komitesi) standardı sınır değerleri referans olarak alınmıştır.

30 MHz - 1 GHz aralığında 10 m mesafe için verilen sınır değerleri ters mesafe metodu ile 3 m mesafe sınır değerlerine dönüştürülmüştür. Ters mesafe yöntemi emisyon sınır değerlerini bir R mesafesinden diğer R mesafesine dönüştürmek için kullanılır.

$$\frac{E(R)}{E(R')} = \frac{1/R}{1/R'} = \frac{R'}{R} \quad (3.54)$$

$$E(R') = \frac{R}{R'} E(R) \quad (3.55)$$

$$[E(R')]_{dB} = [E(R)]_{dB} + 20 \log\left(\frac{R}{R'}\right) \quad (3.56)$$

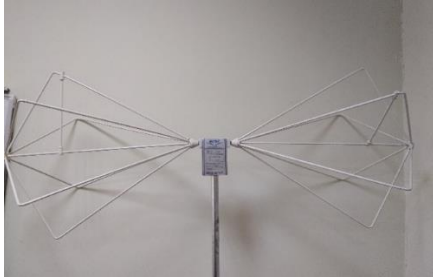
$$[E(3)]_{dB} = [E(10)]_{dB} + 20 \log\left(\frac{10}{3}\right) \quad (3.57)$$

$$[E(3)]_{dB} = [E(10)]_{dB} + 10.5 \quad (3.58)$$

CISPR 22 3m için sınır değerleri 30 - 230 MHz frekans aralığı için 40.5 dB μ V/m (30+10.5), 230-1000 MHz frekans aralığı için ise 47.5 (37+10.5) dB μ V/m'dir.

Işıma ölçümleri, Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü EMUMAM laboratuvarında yer alan yansısız oda gerçekleştirilmiştir.

30 MHz - 1 GHz aralığında gerçekleştirilen ölçümlerde, 30 - 200 MHz frekans aralığı için Şekil 3.22'de verilen bikonik anten kullanılırken 200 MHz - 1 GHz frekans aralığı için log-periyodik anten kullanılmıştır.

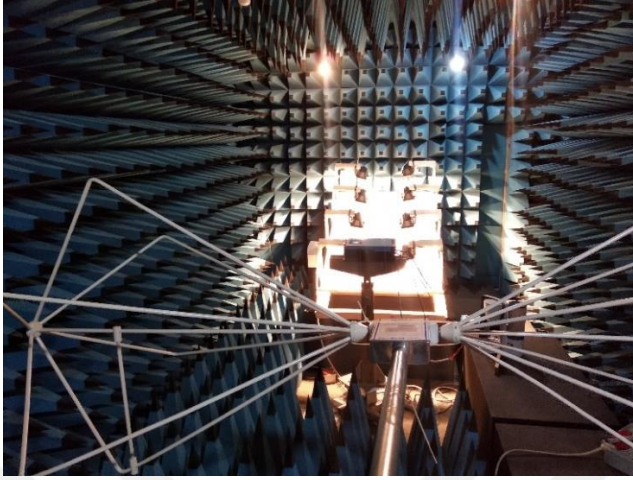


Şekil 3.22. Bikonik anten

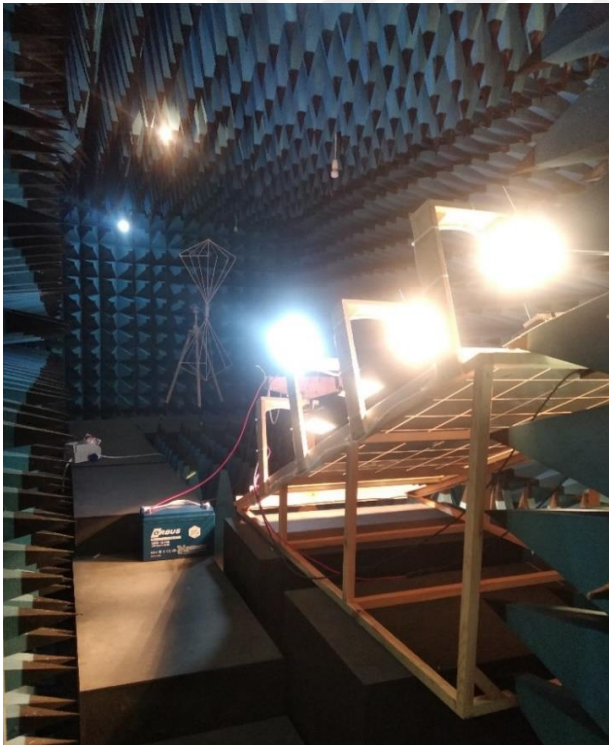


Şekil 3.23. Log-periyodik anten

Bikonik anten yatay (Şekil 3.24) ve dikey polarizasyondayken (Şekil 3.25) ölçümler alınmıştır.

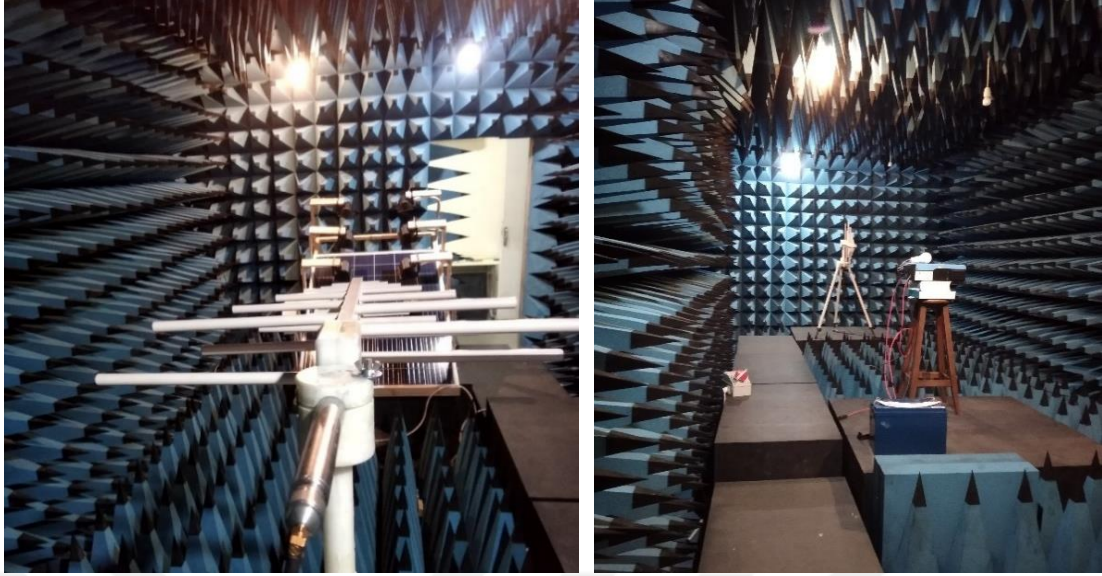


Şekil 3.24. Bikonik anten yatay polarizasyon



Şekil 3.25. Bikonik anten dikey polarizasyon

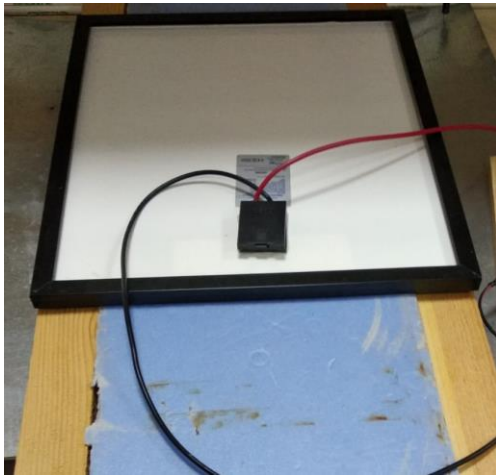
Log-periyodik anten için de yatay (Şekil 3.26.a) ve dikey (Şekil 3.26.b) konumda ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.26. Log-periyodik anten; a) yatay polarizasyon; b) dikey polarizasyon

3.4. Güneş Paneli S-parametre Ölçümü

Saılma (S) parametreleri elektrik mühendisliği, mikrodalga mühendisliği ve haberleşme sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. S-parametreleri frekansa bağlı olup daha çok mikrodalga frekanslarında ve RF’de çalışan devrelerde kullanılır. S-parametreleri ile yansıma katsayısı, geriye dönüş kaybı gibi elektriksel özellikler belirlenebilir. Burada gürültü akımlarının frekansa bağlı ışıma yapabileceği, panellerin dışardan gelen emisyonlara göre indüklemeye yapıp yapamayacağı, parametrik analizleri, panellerin anten davranışlarının incelenmesi adına analiz edilmiştir. 25 W çıkış gücüne sahip güneş paneli, Şekil 3.27’de görüldüğü gibi konumlandırılarak vektör ađ analizörüne (VNA) bağlanmıştır. RF ölçümünü gerçekleştirebilmek için panel terminallerine sma konnektör bağlanmıştır. Güneş panelinin anten karakteristiğini anlamak adına ve ışıma hakkında fikir vermesi açısından, yansıma katsayısı S_{11} ölçümü alınmıştır. Ölçümde Arinst VNA-DL 1-8800 kullanılmıştır.

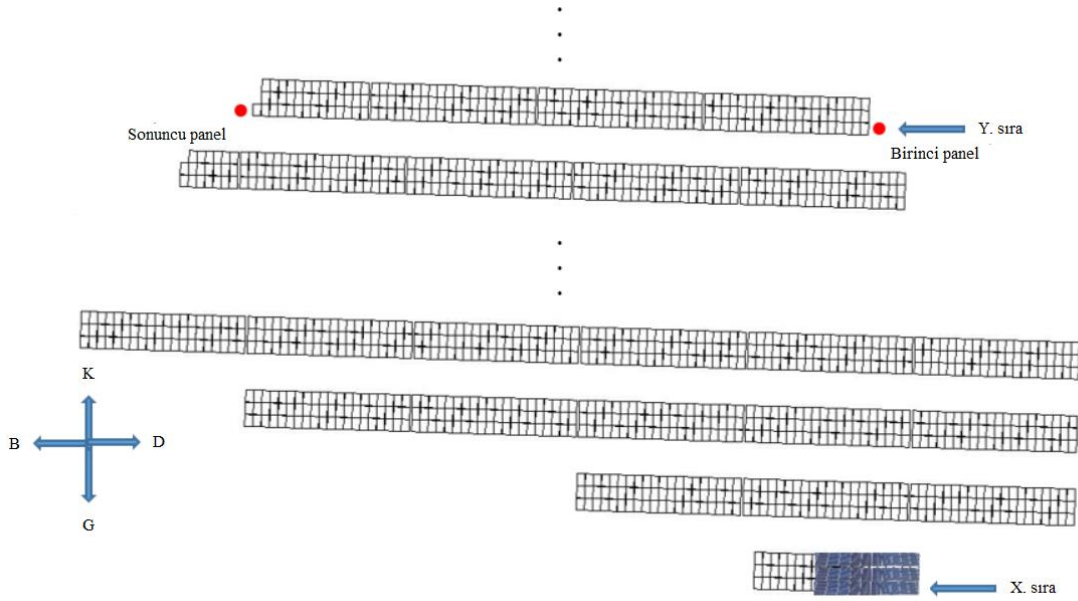


Şekil 3.27. S-parametre ölçümü

3.5. GES Sahasında Elektromanyetik Alan Ölçümleri

Buraya kadar olan kısımda GES bileşenlerine ilişkin CM, DM akımlarının neden olabileceği ışıma alanlarının hesaplanmalarına ve iletim, ışıma ölçümlerine dair bilgi verilmiştir. Bu bölümde ise GES sisteminin elektrik ve manyetik alan analizine ilişkin çalışmalar sunulmuştur. Elektrik ve manyetik alanların bir ekipman, sistem ya da çevreye olumsuz etkilerinin olmasının yanı sıra insan sağlığı üzerine de olumsuz etkileri olabilmektedir. Bu konu ile ilgili güç sistemlerinde, elektrik trafo merkezlerinde de mesleki maruziyet çalışmaları mevcuttur (Helhel ve Ozen 2008; Ozen 2008). Bu çalışmada gerçek zamanlı sahada kurulu bir ges ile çatı tipi bir ges seçilerek elektromanyetik alan seviyeleri ölçülmüştür. Bir GES santralinde ve çatı üstünde kurulu GES'te paneller üzerinde elektrik alan ve manyetik alan analizi yapılmıştır. Bunun için yük altında ölçüm alınmıştır. Narda EMR-300 ile elektrik alan ölçümleri alınırken, Hioki 3470 ile manyetik alan ölçümleri alınmıştır.

Antalya Elmalı'da yer alan ölçümlerin yapıldığı GES santrali 800 kW kurulu güce sahip 3200 adet polikristal güneş panelinden oluşmaktadır. Santralde üretilen enerji, 0.4/34.5 kV 1000 kVA gücünde trafo aracılığıyla enterkonnekte sisteme iletilmektedir. Çift yönlü sayaç ile de santralde üretilen enerjinin kontrolü yapılmaktadır. Ölçümler Şekil 3.28'de gösterilen X. ve Y. sırada bulunan her beş güneş panelinden birinde (sıradaki ilk ve son paneller dahil) yapılmıştır.



Şekil 3.28. GES santrali

Çatı üstünde kurulu olan panellerin bir kısmında ölçüm alınmıştır (Şekil 3.29). Ölçüm yapılan yerdeki panellerin kurulumu Şekil 3.30'da gösterildiği gibi doğu - batı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Ölçümler ise batıya bakan paneller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Burada 330 W çıkış gücüne sahip perc monokristal güneş panelleri kullanılmıştır. Yatay bir şekilde kurulumu gerçekleştirilen paneller 23 sıradan oluşmaktadır. Her sırada beş panel bulunmaktadır. Manyetik alan ölçümleri tek sayılı

sıradaki tüm paneller üzerinde alınırken elektrik alan ölçümleri tek sayılı sıradaki birinci ve beşinci paneller üzerinde alınmıştır.



Şekil 3.29. Çatı GES



Şekil 3.30. Çatı GES konumlandırma

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. CM ve DM Akım Işımaları Model Analizi

İstenmeyen anten karakteristiğini anlamak için, CM ve DM akımlarından kaynaklanan ışıma girişimleri modellenerek analiz edilmiştir.

CM akımları aynı yönlü eşit büyüklükte genliğe sahip iken, DM akımları zıt yönlü eşit büyüklükte genliğe sahiptir. İletkenlerin $\emptyset$ yönünde CM ışıma davranışları çok yönlü iken DM ışıma davranışları için böyle bir durum söz konusu değildir. DM akımları zıt yönlü oldukları için iletkenlerden eşit uzaklıktaki mesafelerde birbirini elimine etmektedirler ve bu akımlar için maksimum ışıma iletkenlerin yan düzleminde görülmektedir. CM akımları için, ışıma kablonun çevresinde sabit iken maksimum ışıma iletkenlerin yan tarafında görülmektedir. Bunun akabinde DM ışıyan emisyonlar kablonun yönüne duyarlı olmalarına rağmen, CM ışıma emisyonları ise kablonun yönüne duyarlı değildir.

Aynı elektrik alan değerini üreten CM ve DM akımlarının oranı belirlenmek istenirse, Bölüm 3.1.1’de yer alan Denklem 3.28 ile Bölüm 3.1.2’de yer alan Denklem 3.37 birbirine eşitlenir (Denklem 4.1).

$$\frac{1.257 \times 10^{-6}}{s} fh|I_C| = \frac{1.316 \times 10^{-14}}{s} f^2 hd|I_D| \quad (4.1)$$

Denklem 4.2 ile DM ve CM akım oranları elde edilir.

$$\frac{|I_D|}{|I_C|} = \frac{9.55 \times 10^7}{df} \quad (4.2)$$

$$20 \log 2507 = 67,98 \quad (4.3)$$

30 MHz sınır frekansında d 1.27 mm için bu oran 2507’ye ya da yaklaşık olarak 68 dB’ye (Denklem 4.3) eşit olur. Yani bu koşullar için aynı uzak alan değerini oluşturan CM akımları DM akımlarından yaklaşık 2500 kat daha küçüktür.

DM akımları CM akımlarına göre çok daha büyüktür. Buna rağmen CM akımlarının neden olduğu ışıma emisyonları daha büyüktür. Yani CM akımları DM akımlarına kıyasla çok daha etkili ışıma yaparlar. E_C , CM akımları aynı yönlü oldukları için her bir iletkenin neden olduğu elektrik alanın toplanması ile elde edilir. E_D ise DM akımları zıt yönlü olduğu için iletkenlerin neden olduğu alanların farkı alınarak bulunur. İletkenlerin P ölçüm noktasına (Şekil 3.3) uzaklığı eşit olmadığı için alanlar tamamen birbirini elimine etmez.

CM ve DM akımları için emisyonlar akım genliği azaltılarak düşürülebilir. Fakat bu çoğu zaman sistem gereksinimlerini karşılamayacağı için uygulanmaz. Bunun yerine ilgili frekansta periyodik trapezoidal darbe dizileri için kesim frekansları ayarlanarak spektrum içeriği azaltılabilir.

Sonuç olarak, CM akımlarının $1/\tau$ ve $1/\tau_r$ aralığında (Şekil 3.8) etkin bir şekilde ışıma yaptığı ve düşük ve yüksek frekans bölgelerinde zayıfladığı, DM akımlarının ise yüksek frekans bölgesinde ($>1/\tau_r$) ışıma yaptığı ve düşük frekans bölgesinde zayıfladığı gözlenmiştir (Şekil 3.10).

Şekil 4.1’de verilen grafikte 3.948 MHz frekans değerinde V_{CM} değeri 67.7340 dB μ V, V_{DM} değeri ise 71.5221 dB μ V olarak okunmuştur. Buradan 50 Ω empedans değeri için I_{CM} 48.7 μ A ve I_{DM} 75.4 μ A olarak elde edilir. Bölüm 3.1’de anten ışıma modelinde bahsedilen parametrelerden $h=1$ m, $d=1.27$ mm ve $s=3$ m alınarak ortak mod ve diferansiyel mod akımlarının oluşturacağı elektrik alanlar Denklem 4.4 ve Denklem 4.5’te hesaplanmıştır.

$$|E_C| = \frac{1.257 \times 10^{-6}}{s} f h |I_C| = 80.560 \mu V/m \quad (4.4)$$

$$|E_D| = \frac{1.316 \times 10^{-14}}{s} f^2 h d |I_D| = 6.5473 \times 10^{-3} \mu V/m \quad (4.5)$$

Yukarıda yapılan hesaplamalardan görüleceği üzere ortak mod akımı daha küçük olmasına rağmen, diferansiyel mod akımına kıyasla daha fazla elektrik alan üretmektedir. Bu bölümün başında da bahsedildiği gibi CM akımlarının elektrik alan ve ışıma etkisinde DM akımlarına göre daha yüksek öneme sahip olduğu görülmüştür. Buradan ise GES modeli bileşenlerinde CM akımlarının gürültü oluşturmada daha baskın olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilen sonuçlardaki bazı frekans noktalarındaki CM ve DM gürültü gerilimleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. CM ve DM gerilim değerleri

Frekans (MHz)	V_{CM} (dB μ V)	V_{DM} (dB μ V)
3.948	67.7340	71.5221
1	57.9728	83.2122
5	45.7412	67.4231
10	40.1766	64.6520
15	37.6792	58.7368
20	32.1341	23.8260
25	30.0340	55.8619

Çizelge 4.2. CM ve DM gerilim değerleri

Frekans (MHz)	V _{CM} (dB μ V)	V _{DM} (dB μ V)
1	84.5347	84.6727
5	67.9357	68.5788
10	65.0508	65.2898
15	58.9923	59.1273
20	30.9084	36.5493
25	56.3283	56.5995

50 Ω empedans değeri için μ A cinsinden elde edilen CM ve DM akımları ise sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. CM ve DM akım değerleri

Frekans (MHz)	I _{CM} (μ A)	I _{DM} (μ A)
3.948	48.7	75.4
1	15.8	289.5
5	3.9	47
10	2	34.2
15	1.5	17.3
20	808.6x10 ⁻³	310.7x10 ⁻³
25	634.9x10 ⁻³	12.4

Çizelge 4.4. CM ve DM akım değerleri

Frekans (MHz)	I _{CM} (μ A)	I _{DM} (μ A)
1	337.1	342.5
5	49.9	53.7
10	35.8	36.8
15	17.8	18.1
20	702.2x10 ⁻³	1.3
25	13.1	13.5

Şekil 4.3'te 30 MHz'deki V_{CM} değeri 37.1052 dB μ V ve V_{DM} değeri 58.7377 dB μ V'tur. Akım değerleri (50 Ω için) I_{CM} 1.4 μ A ve I_{DM} 17.3 μ A'dır. Bu akımların neden olabileceği elektrik alan E_C 17.598 μ V ve E_D 8.6742x10⁻² μ V olarak bulunmuştur. Bu değerler 30 MHz için sınır değeri yaklaşık olarak 106 μ V/m olan değerin altında kalmaktadır.

Şekil 4.4'te 30 MHz'deki V_{CM} değeri 59.73 dB μ V ve V_{DM} değeri 60.9604 dB μ V'tur. Akım değerleri (50 Ω için) I_{CM} 19.4 μ A ve I_{DM} 22.3 μ A'dır. Bu akımların neden olabileceği elektrik alan E_C 243.86 μ V/m ve E_D 0.1118 μ V olarak bulunmuştur. Burada E_C 30 MHz için yaklaşık olarak 106 μ V/m ($< E_C$ 243.86 μ V/m) olan sınır değerin aşıldığı görülmüştür.

Şekil 3.11'de verilen devrede frekans aralığı 0 - 50 MHz olarak ayarlanıp simülasyon yapılmıştır. Spektrum analizörden anlık alınan ekran görüntüsü ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'de verilen sonuçlardaki bazı frekans noktalarındaki CM ve DM gürültü gerilimleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

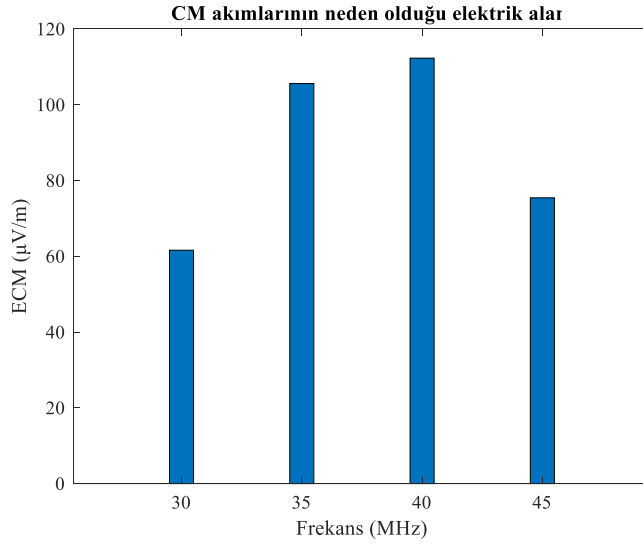
Çizelge 4.5. CM ve DM gerilim değerleri

Frekans (MHz)	V_{CM} (dB μ V)	V_{DM} (dB μ V)
30	47.7897	46.1392
35	51.0773	49.2629
40	50.5108	48.6964
45	46.0565	44.4059

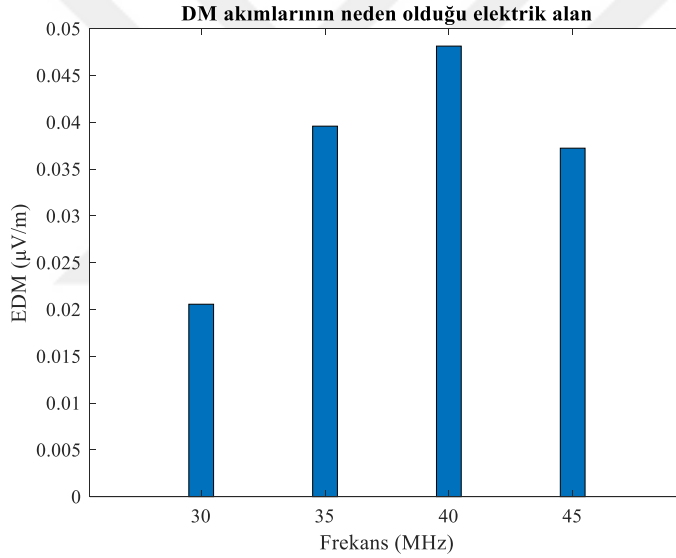
50 Ω empedans değeri için μ A cinsinden elde edilen CM ve DM akımları ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu akımların neden olabileceği elektrik alanlar ise Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de grafikte verilmiştir.

Çizelge 4.6. CM ve DM akım değerleri

Frekans (MHz)	I_{CM} (μ A)	I_{DM} (μ A)
30	4.9	4.1
35	7.2	5.8
40	6.7	5.4
45	4.0	3.3



Şekil 4.1. CM akımlarının neden olduğu EA



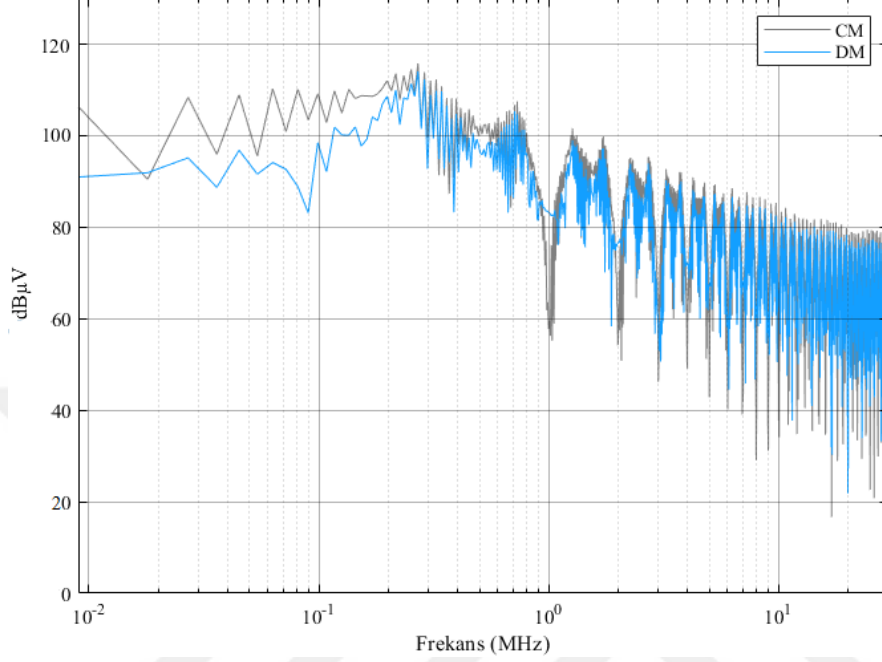
Şekil 4.2. DM akımlarının neden olduğu EA

Şekil 4.1’de görüleceği üzere, 40 MHz frekansta V_{CM} 112.29 $\mu V/m$ olarak bulunmuştur. Aynı akım değeri için sınır değeri yaklaşık olarak 106 $\mu V/m$ ($> E_C$) olan değeri aşmaması için s mesafesi minimum 3.18 m olmalıdır.

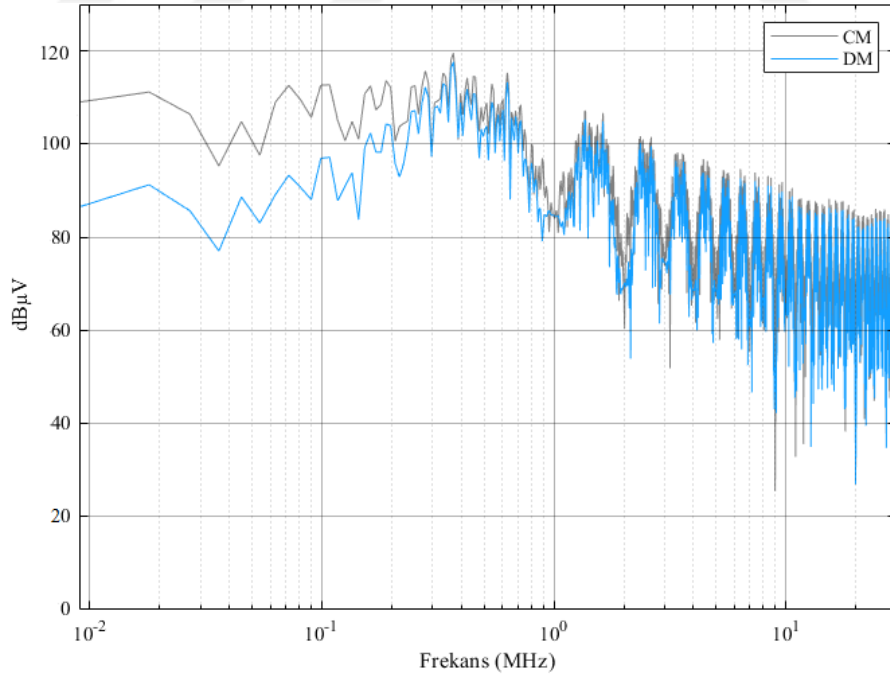
4.2. Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.11’de yer alan devrenin boşa ve invertör çıkışına 1 mH-0.001 Ω yük eklendiği durumdaki simülasyonlarının anlık olarak alınan kayıtları sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te verilmiştir. Şekil 3.12’de yer alan devrenin boşa ve invertör çıkışına 1 mH-0.001 Ω yük eklendiği durumdaki simülasyonlarının anlık olarak alınan kayıtları ise, sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere gürültü seviyelerinin Şekil 3.13’te verilen sınır değerlerini aştığı görülmektedir. LISN DC tarafta

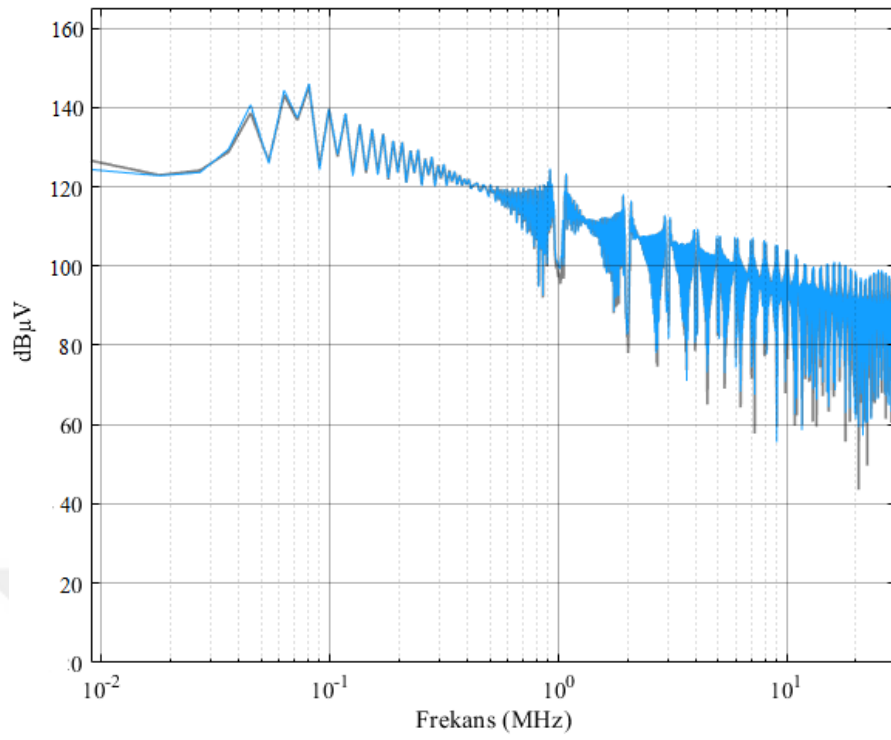
iken, devreye yük bağlandığında Şekil 4.4'ten de görüleceği üzere özellikle yüksek frekans bölgesinde gürültü genliğinde artış gözlenmiştir. LISN AC tarafta iken, devreye yük bağlandığında Şekil 4.6'dan da görüleceği üzere gürültü genliğinde artış ve gürültü karakteristiğinde değişim gözlenmiştir.



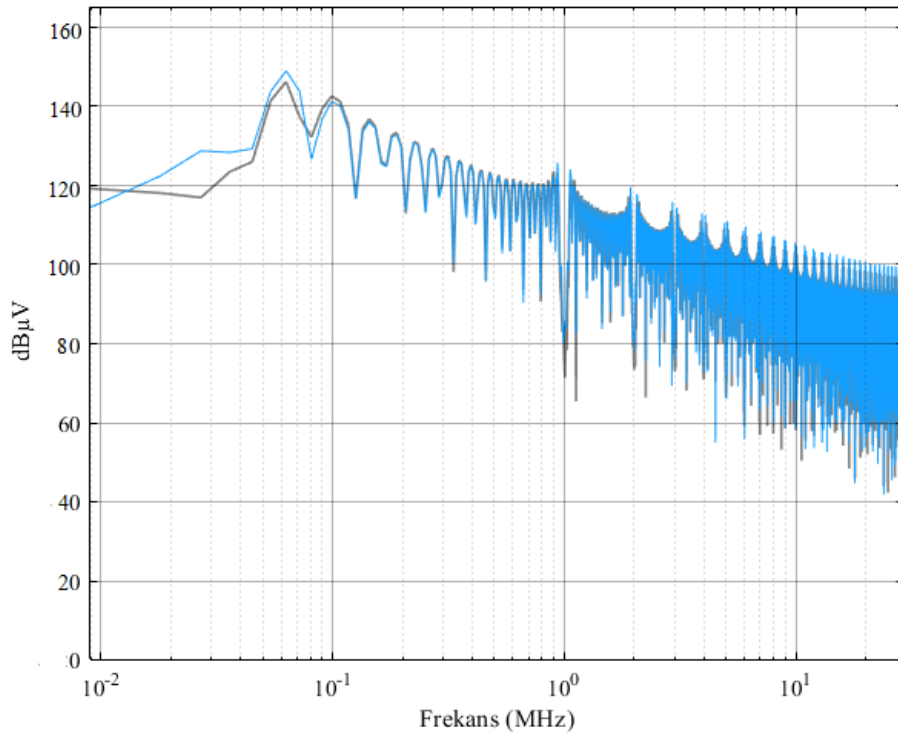
Şekil 4.3. LISN DC tarafta iken (yüksüz)



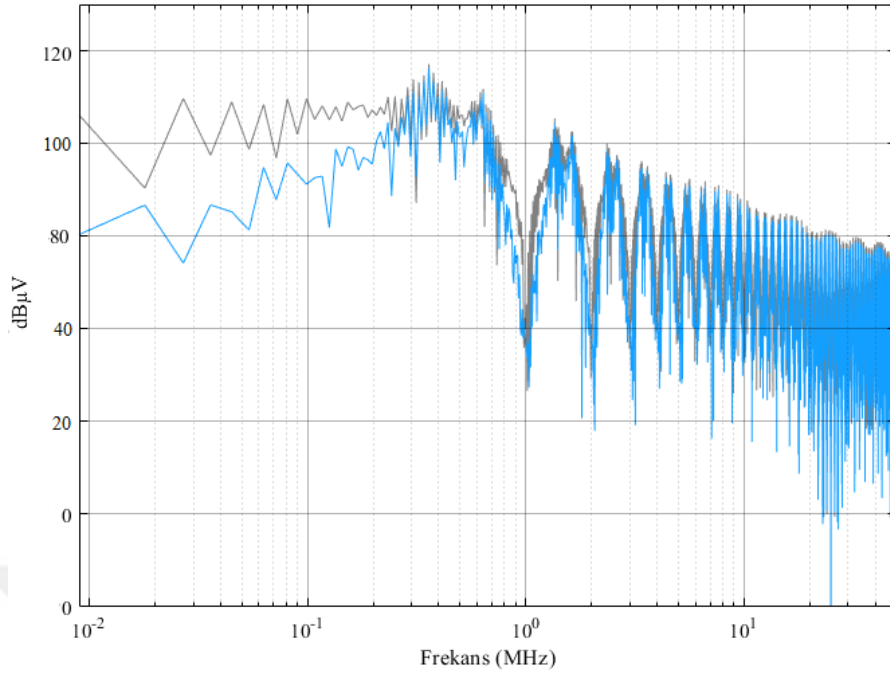
Şekil 4.4. LISN DC tarafta iken (1 mH-0.001Ω yük)



şekil 4.5. LISN AC tarafta iken (yüksüz)



şekil 4.6. LISN AC tarafta iken (1 mH-0.001Ω yük)



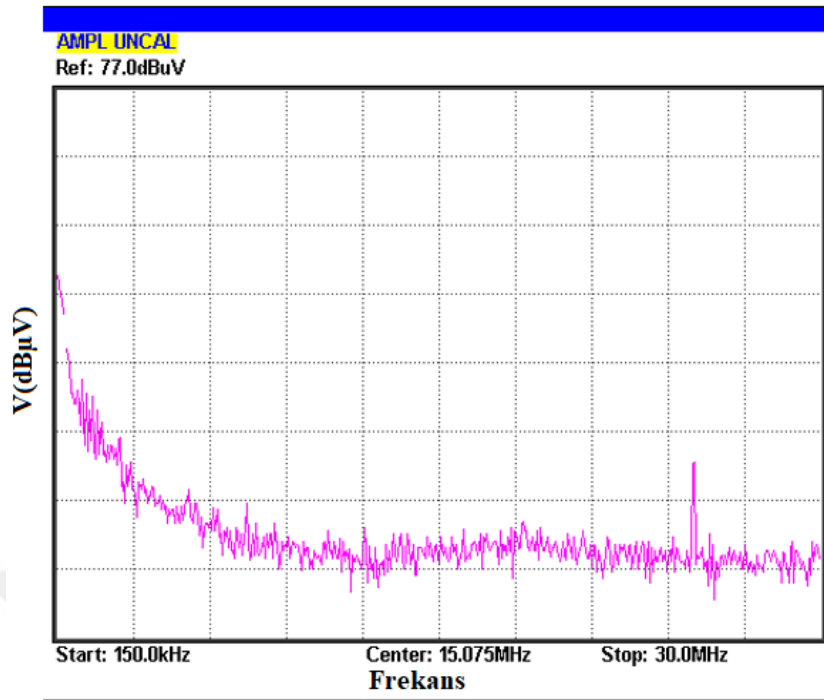
Şekil 4.7. LISN DC tarafta iken

4.3. İletim Gürültü Ölçüm Sonuçları

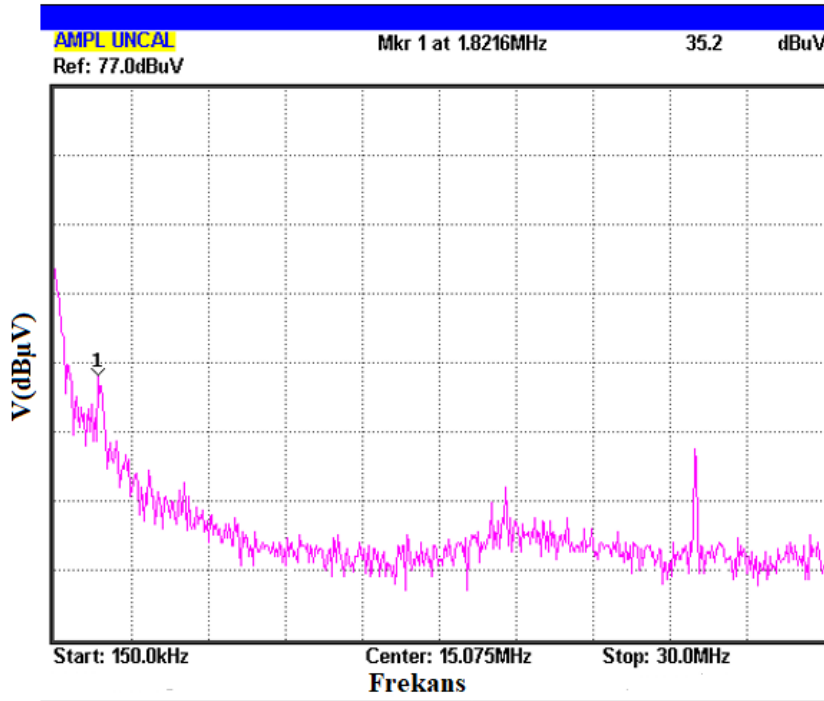
4.3.1. Laboratuvar ortamı polikristal panel ölçümleri

İletim yoluyla gürültü ölçümlerinde ortam gürültüsünü belirlemek adına, öncelikle sistem kurulu, invertör kapalı durumdayken ve polikristal güneş panel bağlantısı yapılmadan ölçüm alınmıştır. Ortam gürültüsü belirlendikten sonra ise yine invertör kapalı konumdayken panel bağlantısı yapılarak ve aynı zamanda halojen lambalardan oluşan yapay aydınlatma sistemi açılarak ölçüm alınmıştır. Sistem bu durumda iken alınan ölçümde panel etkisi gözlenmiştir. Daha sonra ise, invertör devreye alınarak (sistem açık) çıkışa farklı güçlerde ve karakteristiklerde yükler bağlanarak ölçüm yapılmıştır. Yük olarak 9 W değerinde akkor lamba, 40 W değerinde led lamba, 24 W değerinde floresan lamba ve 1900 W değerinde saç kurutma makinesi kullanılmıştır. Spektrum analizörde ölçülen iletim yoluyla gürültü sonuçlarına ait gerilimin frekansa göre değişimine ilişkin ekran görüntüleri aşağıda sıralı olarak sunulmuştur. Laboratuvar ortamında panel üzerine düşen ışıyım seviyesi solar metre ile ölçülmüş, panel üzerine düşen güç yoğunluğu değeri 800 - 950 W/m² değerleri arasında kaydedilmiştir.

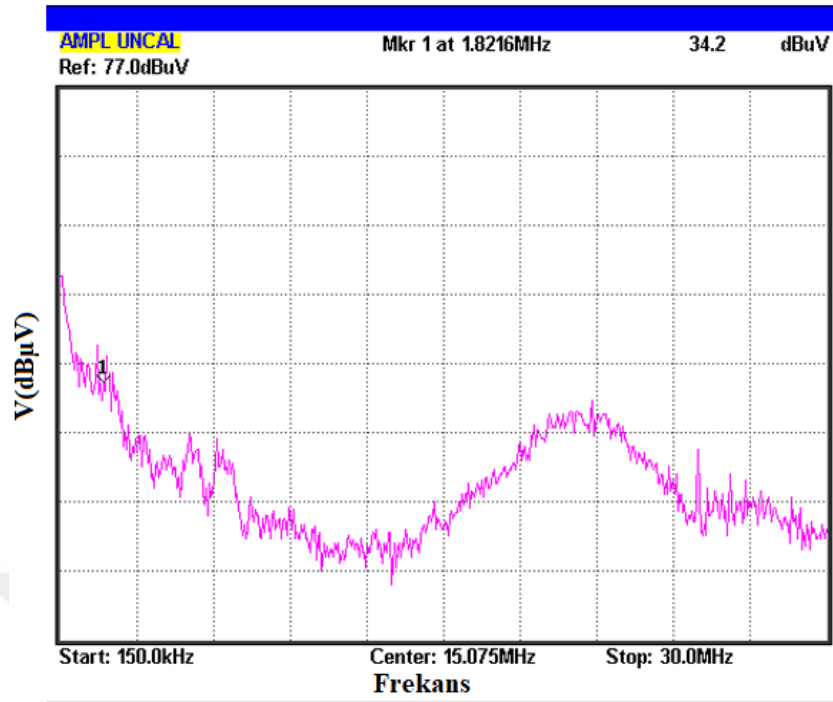
Şekil 4.8’de ortam gürültüsü verilmiştir. Sisteme polikristal güneş paneli bağlanarak elde edilen iletim yollu gürültü ölçümü sonucunda gözlenen panel etkisi ise Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi panel bağlı iken 15 MHz ve 21 MHz frekans aralığında gürültü seviyesinde hafif artışı olmaktadır.



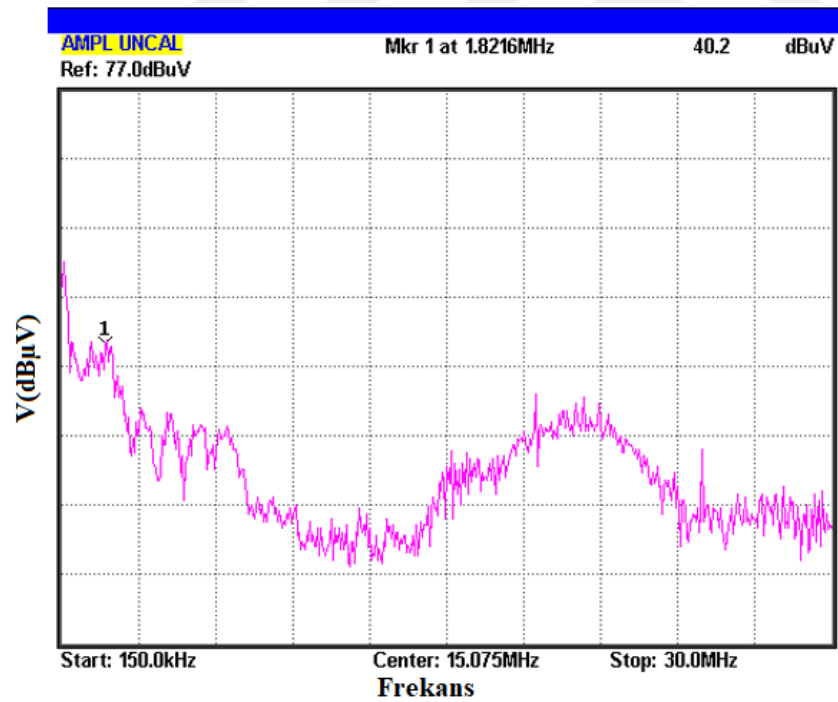
Şekil 4.8. İnvörtör kapalı, panel bağlantısız



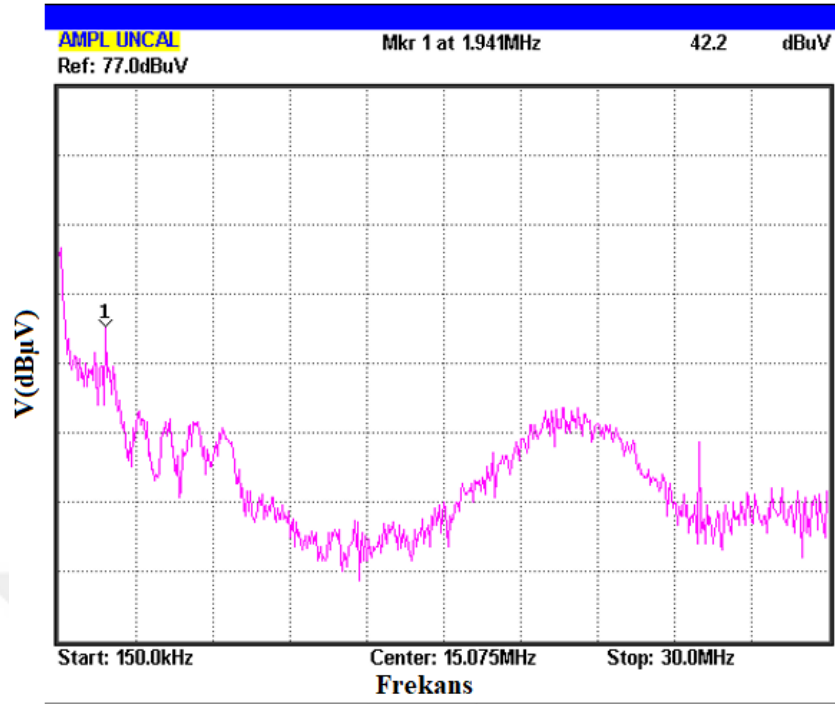
Şekil 4.9. İnvörtör kapalı, panel bağlı, aydınlatma sistemi açık



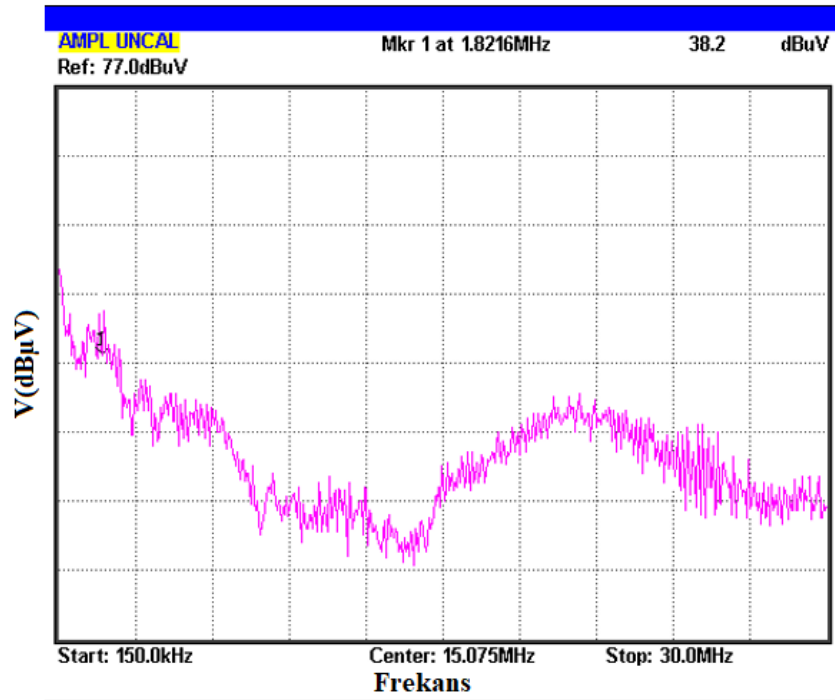
Şekil 4.10. Sistem açık, 9 W yük bağlı



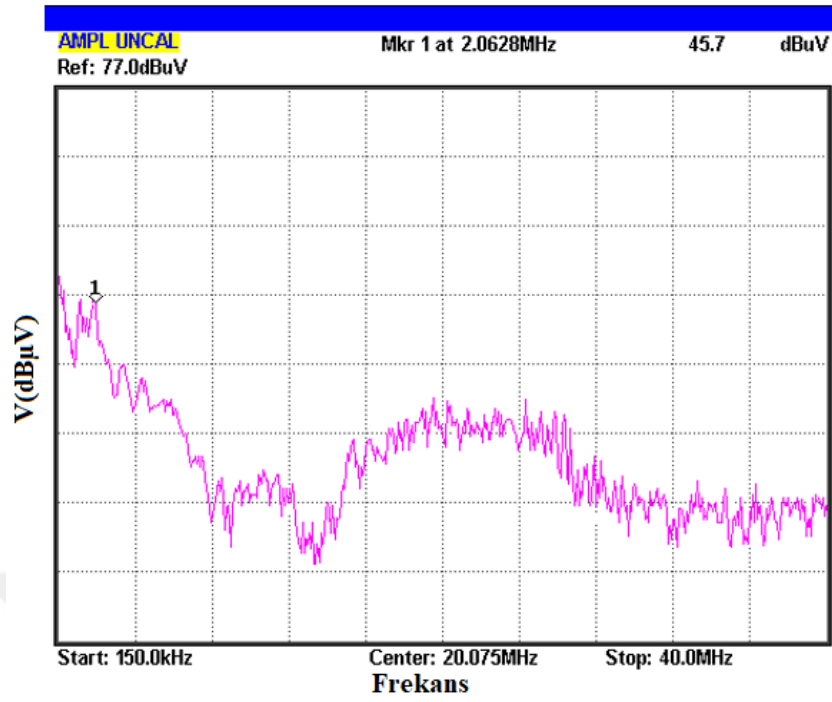
Şekil 4.11. Sistem açık, 40 W yük bağlı



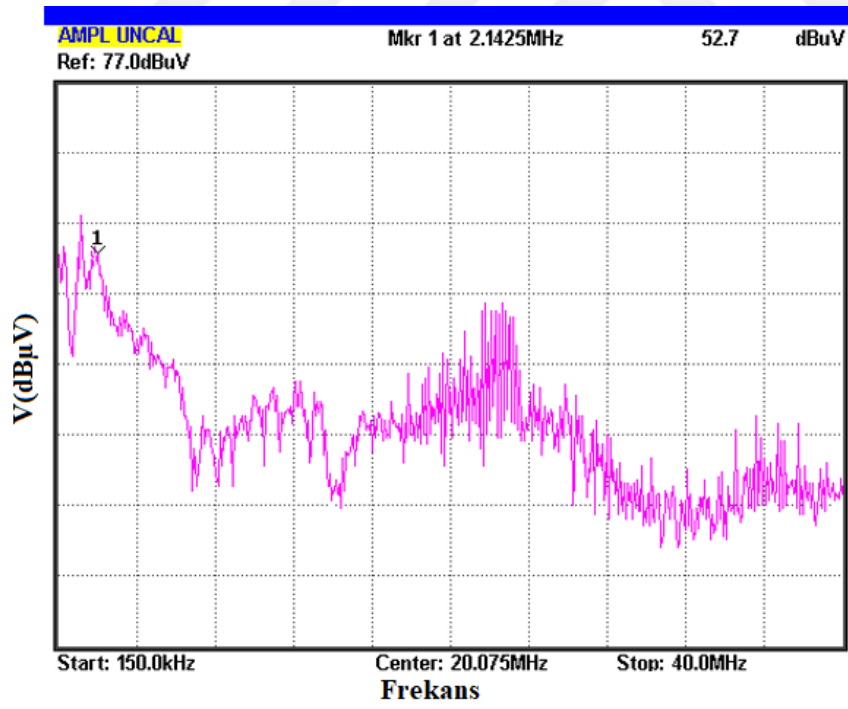
Şekil 4.12. Sistem açık, floresan lamba bağlı



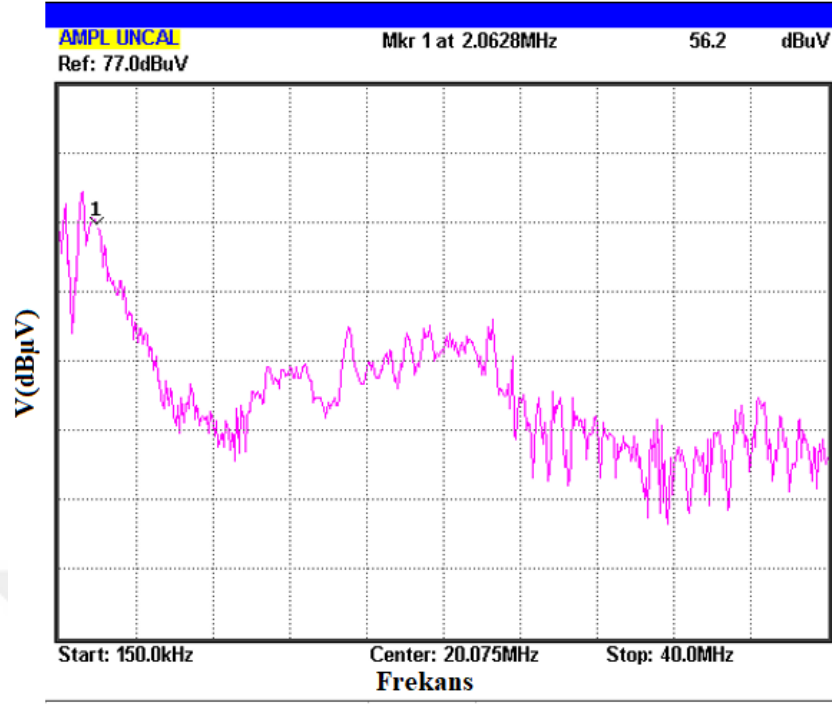
Şekil 4.13. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan kademesinde



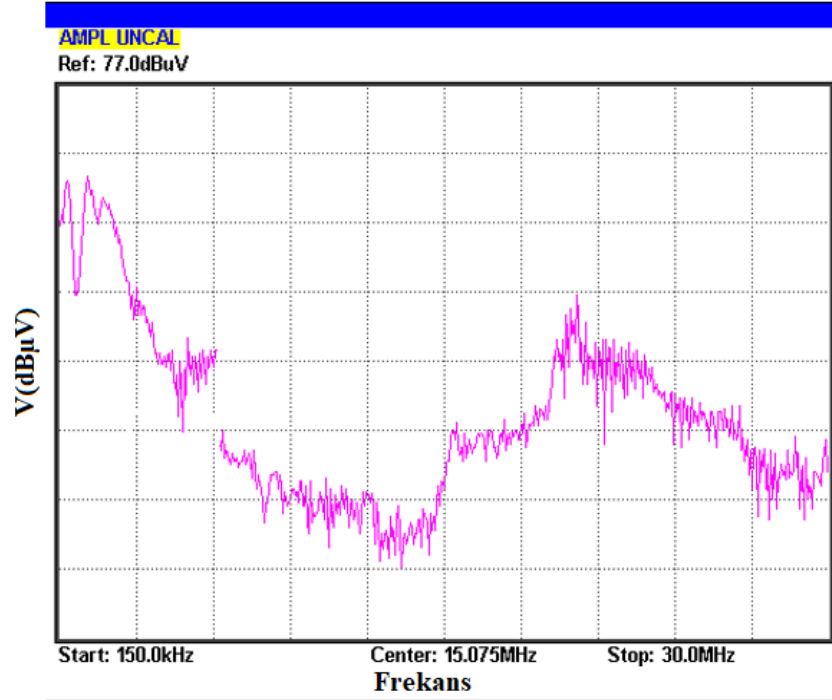
Şekil 4.14. Sistem açık, saç kurutma makinesi 2. fan kademesinde



Şekil 4.15. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan ve 1.1s1 kademesinde



Şekil 4.16. Sistem açık, saç kurutma makinesi 2. fan ve 1. ısı kademesinde



Şekil 4.17. Sistem açık, saç kurutma makinesi 2. fan ve 2. ısı kademesinde

Çalışmada ölçüm düzeneğinde 10 dB zayıflatıcı kullanıldığından iletim yoluyla gürültü ölçümü sonuçları değerlendirilirken, spektrum analizörde gözlenen gürültü değişiminin analizinde bu 10 dB zayıflatıcı göz önünde bulundurulmuştur.

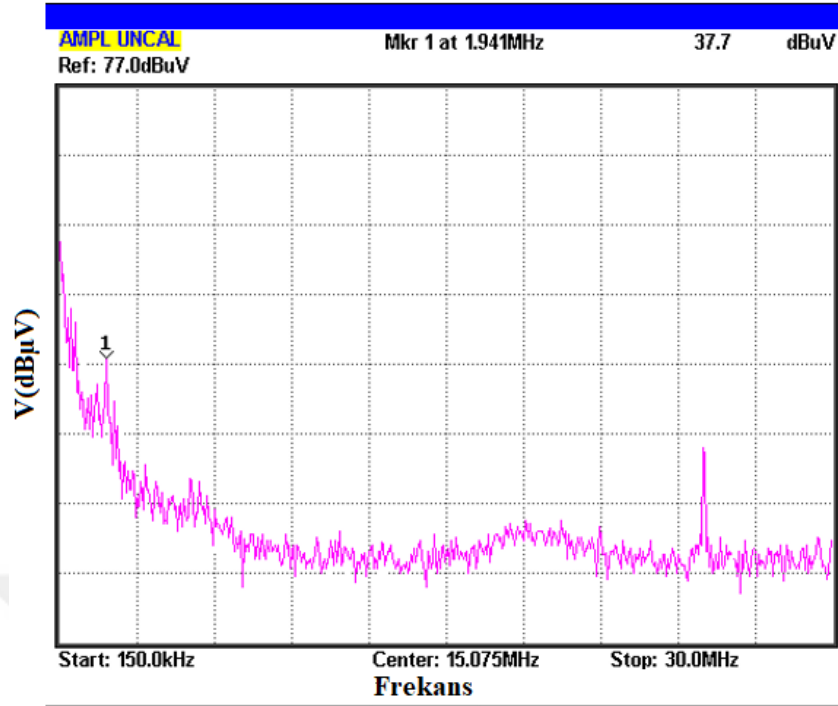
Değişken yük karakterlerinin iletim yoluyla gürültüye olan etkisinin incelenmesi amacıyla, akkor lamba (Şekil 4.10), led lamba (Şekil 4.11) ve floresan lamba (Şekil 4.12) ve saç kurutma makinesi kullanılmıştır. Bu yüklerin etkisine bağlı ölçülen gürültü değişimleri sırası ile Şekil 4.10 – 17’de verilmiş ve gürültü seviyelerinin Şekil 3.13’te verilen sınır değerlerinin altında kaldığı gözlenmiştir. Sistemin çıkışına yük olarak saç kurutma makinesi bağlandığında, Şekil 4.13’te görüldüğü gibi ölçülen gürültü sinyalinde diğer yüklerden farklı olarak gürültü karakterinde değişim gözlenmiştir. Ardından saç kurutma makinesinin ısı ve fan kademeleri değiştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Bu değişiminin nedeninin saç kurutma makinesinin empedans karakteristiğinin bobin yapısında olmasına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Saç kurutma makinesi 2. fan kademesindeyken (Şekil 4.14) 2 MHz’e kadar ve 11 MHz ile 18 MHz arasında gürültü seviyesinde yükselme görülmüş ve 2 MHz’in altında CISPR 22 iletim gürültü sınır değerinin aşıldığı görülmüştür. 2.0628 MHz noktasında 55.7 dB μ V genliği ölçülmüştür. Cihaz 1. fan ve 1. ısı kademesine alındığında (Şekil 4.15) gürültü seviyesinde artış görülmüştür. Düşük frekans bölgesinde 15 MHz ve 17.5 MHz frekans aralığında CISPR 22 iletim gürültü sınır değeri aşılmıştır. Yine 2. fan ve 1. ısı kademesinde (Şekil 4.16) 2 MHz’e kadar gürültü sınır değeri aşılmıştır Cihaz 2. fan ve 2. ısı kademesine alındığında (Şekil 4.17) ise, 2 MHz’e kadar gürültü sınır değeri aşılmıştır. Ayrıca 19.5 MHz ile 20.5 MHz arasında gürültü sınır değeri aşılmıştır. Bu aralıktaki maksimum değer ise 57 dB μ V olarak gözlemlenmiştir. Saç kurutma makinesi örneğinde gözlemlendiği gibi, yükün karakteri, kademeli değişken güç çeken yük yapılarına bağlı olarak gürültü karakterinin de değişim gösterdiği görülmüş olup GES bileşenlerinde bu durumun dikkate değer olduğu not edilmiştir.

Ölçümler sırasında çıkış akımı pens ampermetre ile anlık yük değişimine bağlı olarak ölçülmüştür. İnvertör devreye alındığı anda AC akım 0.6 A olarak ölçülmüştür. Saç kurutma makinesinin ısısı 1. kademeye getirildiğinde çıkış akımı 2.5 A, ısı 2. kademeye ayarlandığında çıkış akımı 4 A olarak okunmuştur. Fan ve ısı 2. kademedeyken çıkış akımı 6.6 A olarak ölçülmüştür. Monokristal panel kablolarında DC akım değeri maksimum 9.1 A olarak ölçülmüştür. Akü kablosunda ise 5.5 A olarak ölçülmüştür. Pens ampermetre ile panel akımı ölçümü Şekil 3.14’te verilmiştir.

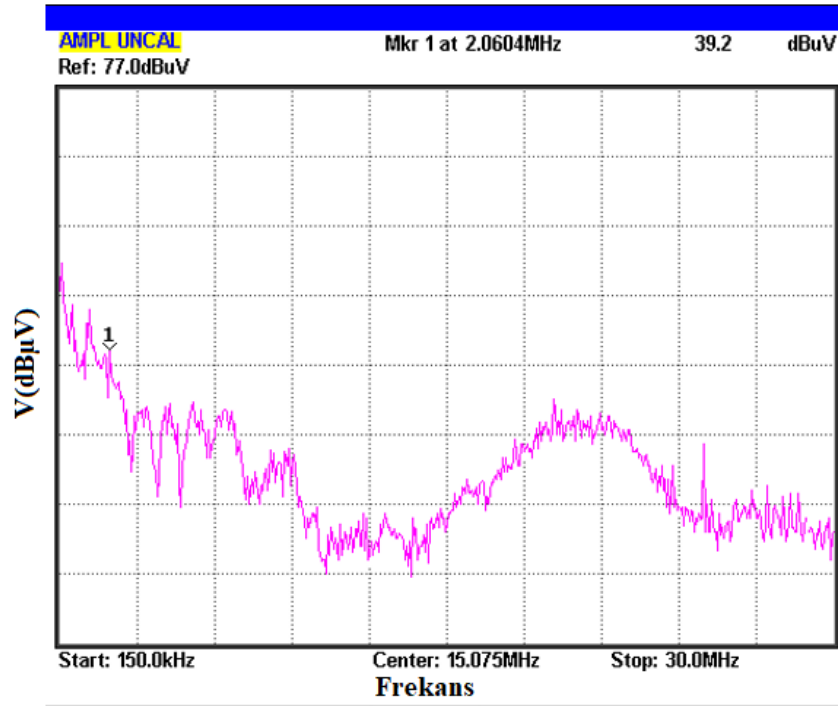
4.2.2. Laboratuvar ortamı perc monokristal panel ölçümleri

Sisteme perc monokristal güneş paneli bağlanarak iletim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha önce ortam gürültü ölçümü alındığı için, bu ölçüm tekrarlanmamıştır. Panel etkisini gözlemlemek için invertör kapalı konumda, panel bağlantısı yapılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir.

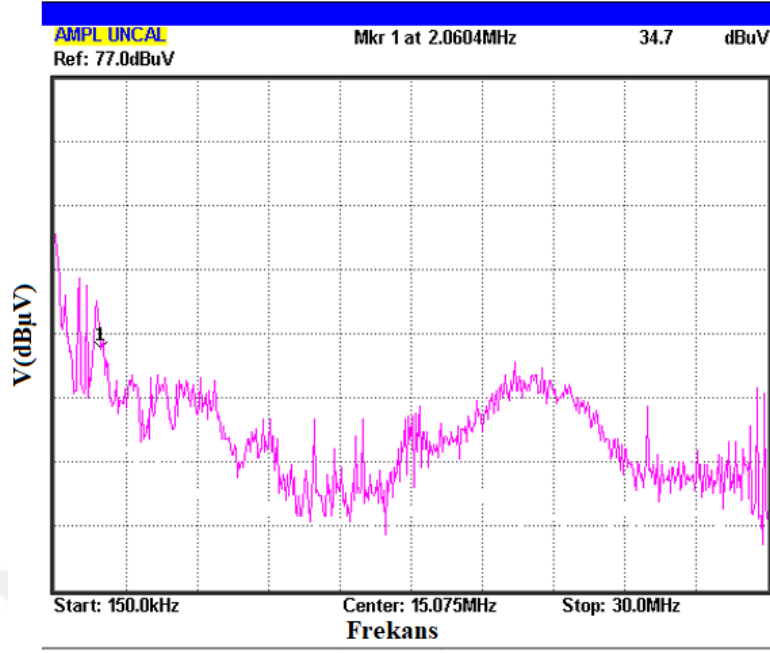
Şekil 4.18’de düşük frekans bölgesinde artış görülürken, 1.941 MHz frekans noktasında 47.7 dB μ V değeri okunmuştur. 15 MHz ile 20.9 MHz frekans aralığında genlik değerinde artış görülmüştür. İnvertör çıkışına floresan lamba (Şekil 4.19) bağlıyken ve led lamba (Şekil 4.20) bağlıyken gürültü karakteristiğinde değişim ve artış gözlenmiştir. Şekil 4.20’de 29 MHz – 30 MHz frekans aralığında gürültü değişimindeki dalgalanma görülmektedir.



Şekil 4.18. İnvörtör kapalı, panel bağlı



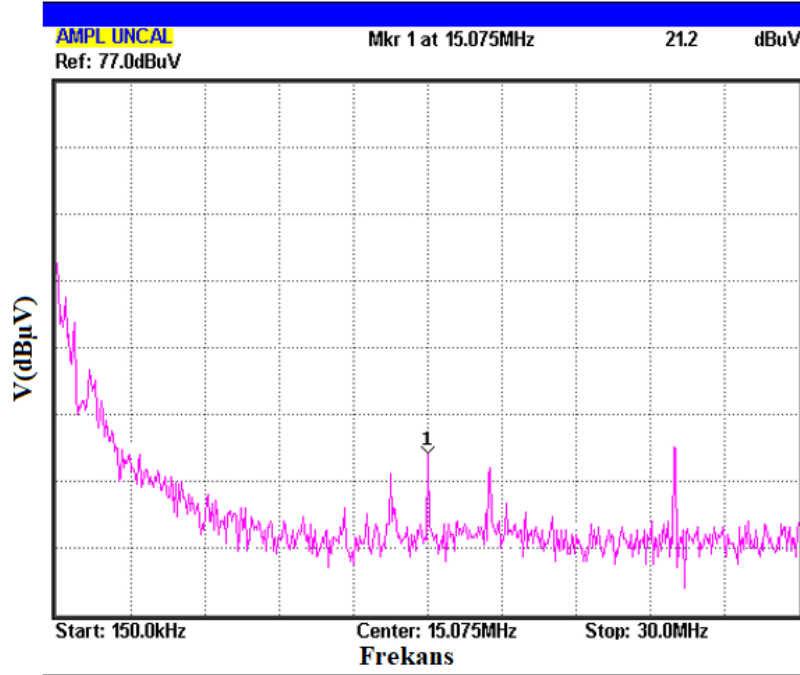
Şekil 4.19. Sistem açık, floresan lamba bağlı



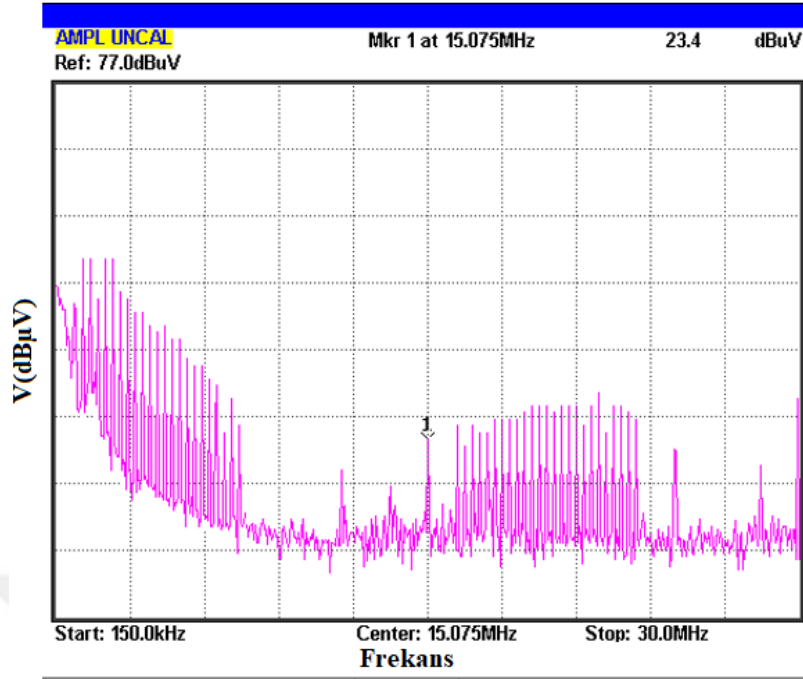
Şekil 4.20. Sistem açık, 40 W yük bağlı

4.2.3. Açık alan polikristal panel ölçümleri

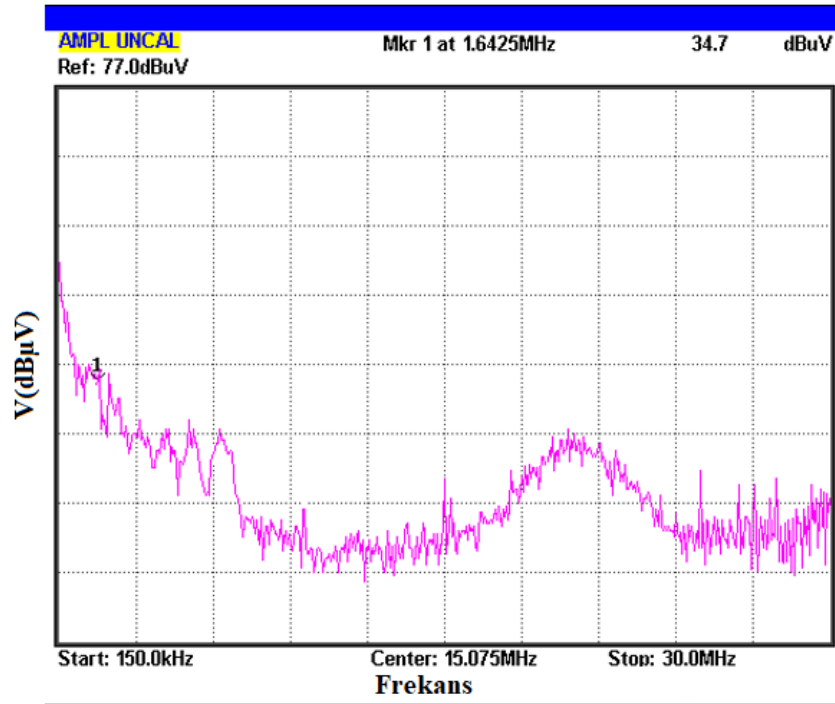
Açık alanda polikristal güneş paneli kullanılarak düzenek ölçüme hazır hale getirilmiş ve iletim yoluyla emisyon ölçümleri alınmıştır. Panel bağlantısı yapılmış ve invertör kapalı konumdayken ölçüm alınmıştır. Sonra invertör açılmış ve invertör çıkışına yükler bağlanarak iletim gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



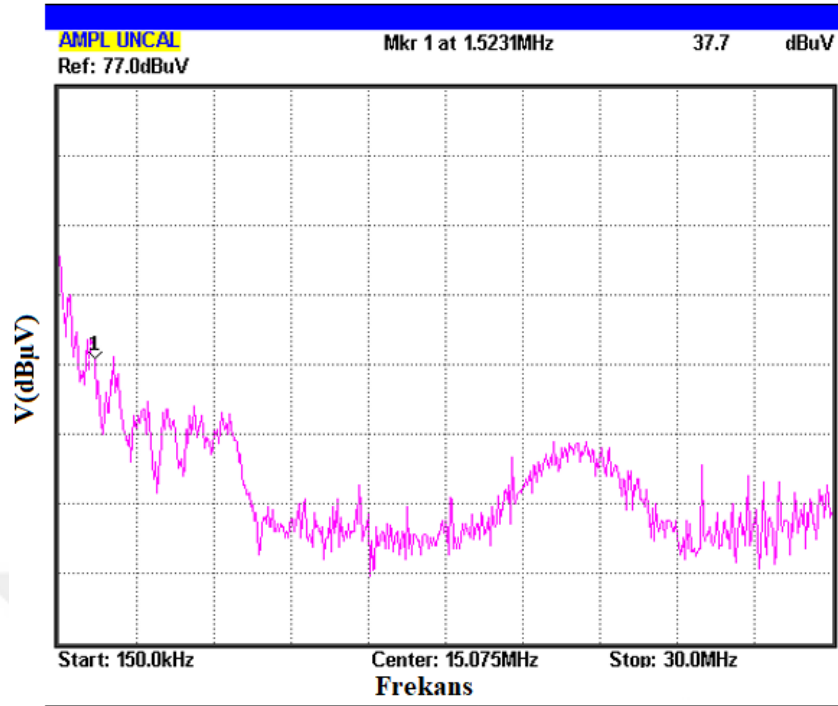
Şekil 4.21. İnvörtör kapalı, panel bağlı



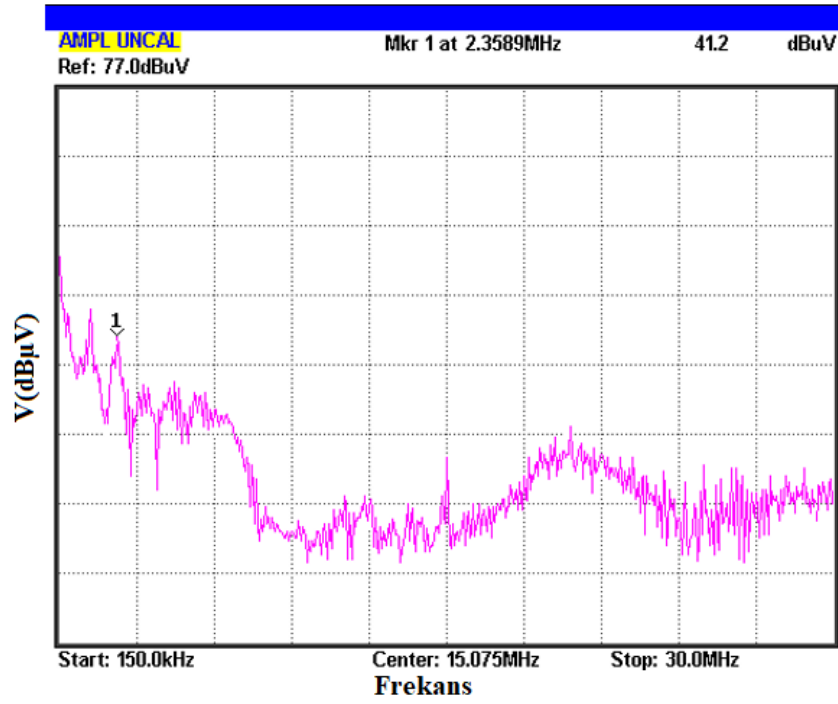
Şekil 4.22. İnvörtörün açılış anı



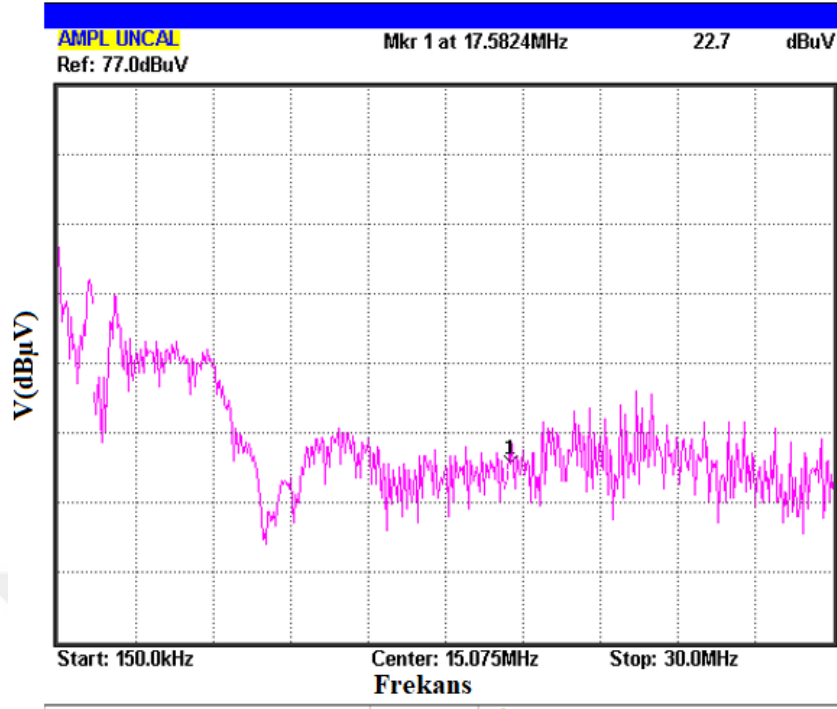
Şekil 4.23. Sistem açık, 9 W yük bağlı



Şekil 4.24. Sistem açık, 40 W yük bağlı



Şekil 4.25. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan kademesinde



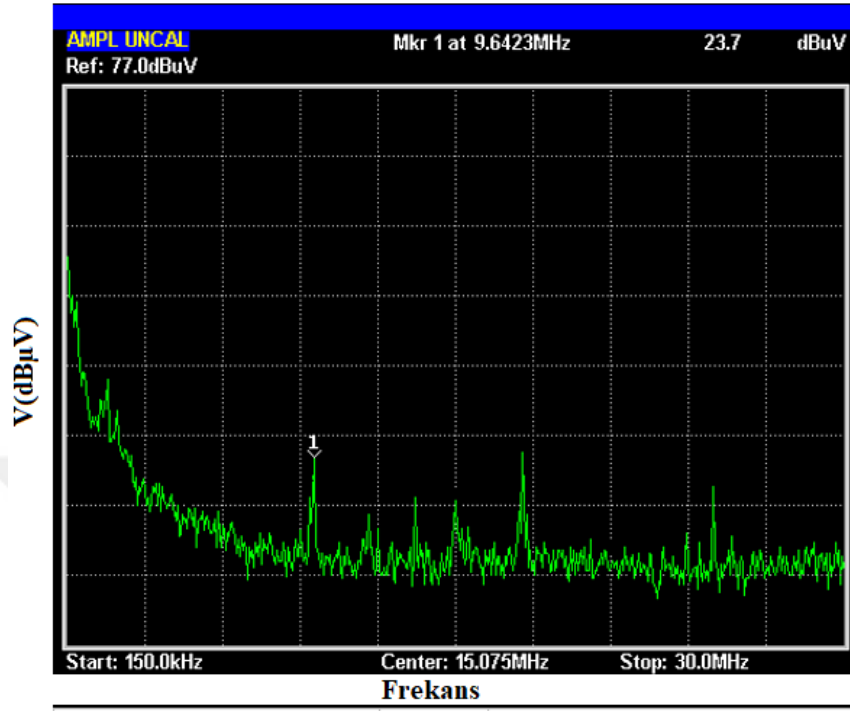
Şekil 4.26. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan ve ısı kademesinde

Şekil 4.21’de birtakım spike’lar görülmüştür. 15.075 MHz frekansta 31.2 dBμV değerinde ve 24.9852 MHz frekansta 31.7 değerinde spike ölçülmüştür. İnvertör çıkışına yük bağlanmadan invertör açılmış ve invertörün tam açılma anında alınan ekran görüntüsü 4.22’te verilmiştir. Şekil 4.22’de sistem dengeye gelmeden geçiş anındaki gürültü dalgalanmaları ve spike’lar görülmektedir. İnvertör çıkışına akkor lamba (Şekil 4.23), led lamba (Şekil 4.25) ve saç kurutma makinesi (Şekil 4.26) bağlanarak ölçümler tekrarlanmıştır. Çıkışa akkor lamba (Şekil 4.23) bağlandığında, standartlara uygun olarak gerçekleştirilen laboratuvar ortamı ölçümleri ile benzer olmakla beraber 27 MHz – 30 MHz arasında gürültü yoğunluğunda artış gözlenmiştir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilen sonuçlardan görüleceği üzere saç kurutma makinesi bağlandığı zaman yapısındaki endüktif empedans nedeniyle gürültü karakteristiğinde değişim gözlenmektedir.

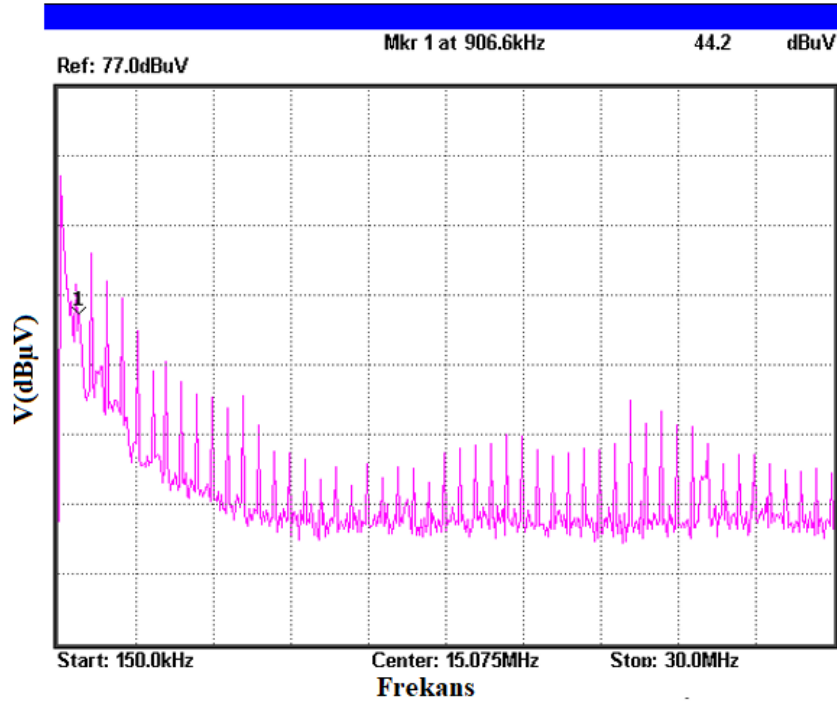
4.2.4. Açık alanda alınan perc monokristal panel ölçümleri

Açık alanda sisteme perc monokristal güneş bağlanarak iletim ölçümleri alınmıştır. Yine öncelikle invertör kapalı ve perc monokristal güneş paneli bağlı iken (Şekil 4.27) ölçüm alınmış ve birtakım spike’lar görülmüştür. İnvertörün açılış anında (Şekil 4.28), invertöre floresan lamba bağlı iken (Şekil 4.29), 9 W yük bağlı iken (Şekil 4.30), 40 W yük bağlı iken (Şekil 4.31), ve saç kurutma makinesi bağlı iken (Şekil 4.32 ve şekil 4.33) ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonuçlarının laboratuvar ortamında alınan sonuçlara yakın olduğu görülmüştür. Enerji sistemlerinde temel gürültü bileşenleri iç ve dış gürültüler olarak sınıflandırılır. İç gürültüler ağırlıklı olarak açma kapama manevraları ile anahtarlama elemanlarının etkisi ile gözlenir. İnvertörler de yapısında anahtarlama elemanları içeren temel sistem bileşenidir. İnvertörün devreye girip çıkma anlarındaki

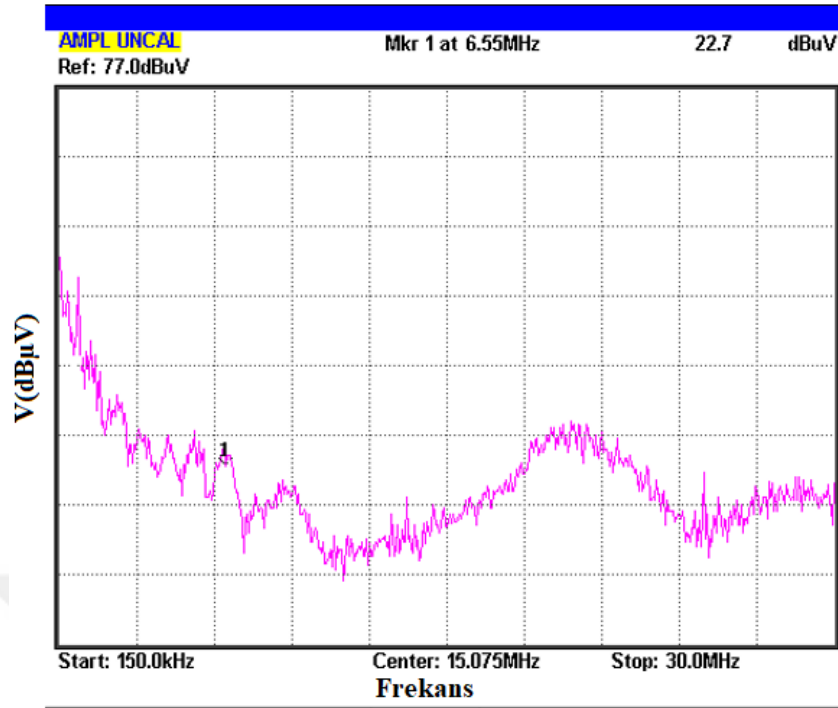
gürültü karakterizasyonuna ilişkin bir ölçüm alınarak Şekil 4.28’de verilen değişim gözlenmiştir.



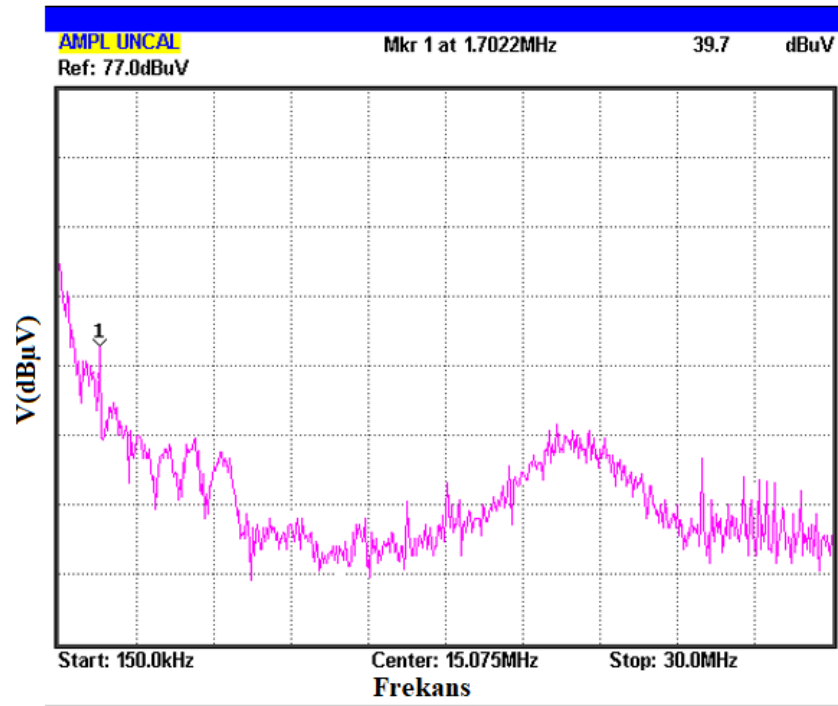
Şekil 4.27. İnvörtör kapalı, perc monokristal panel bağlı



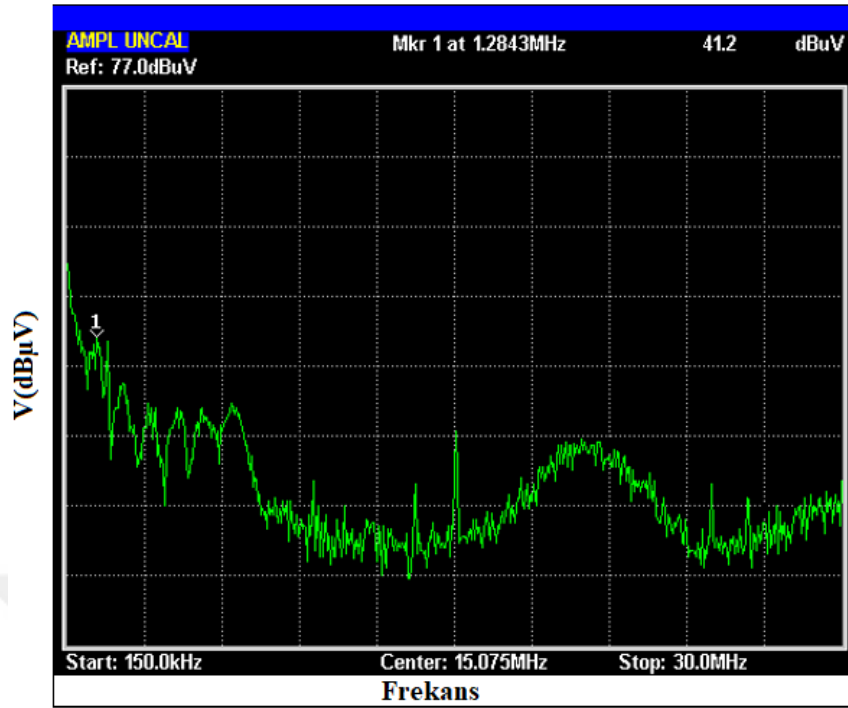
Şekil 4.28. İnvörtörün açılış anı



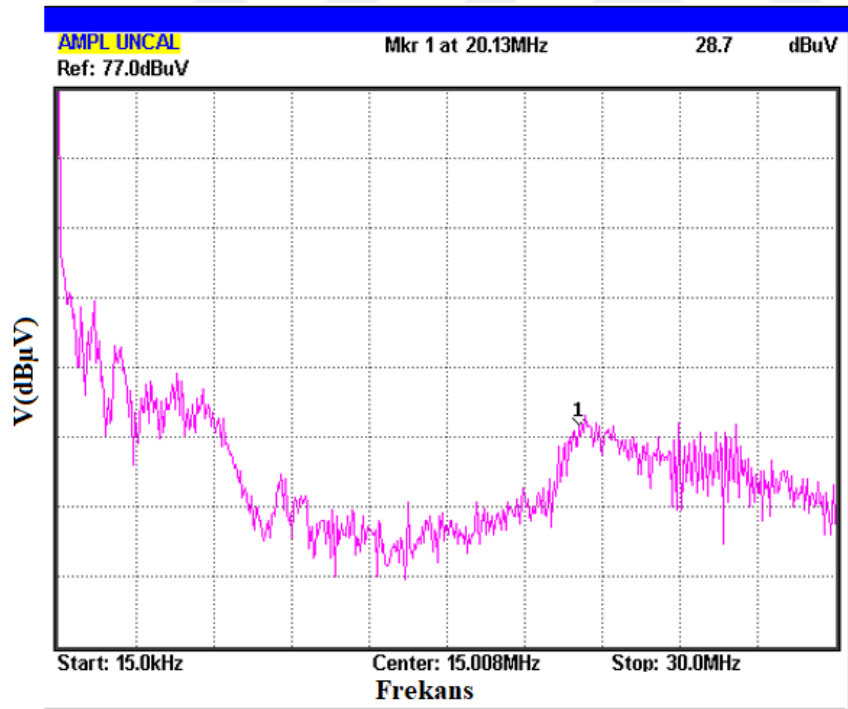
Şekil 4.29. Sistem açık, floresan lamba bağlı



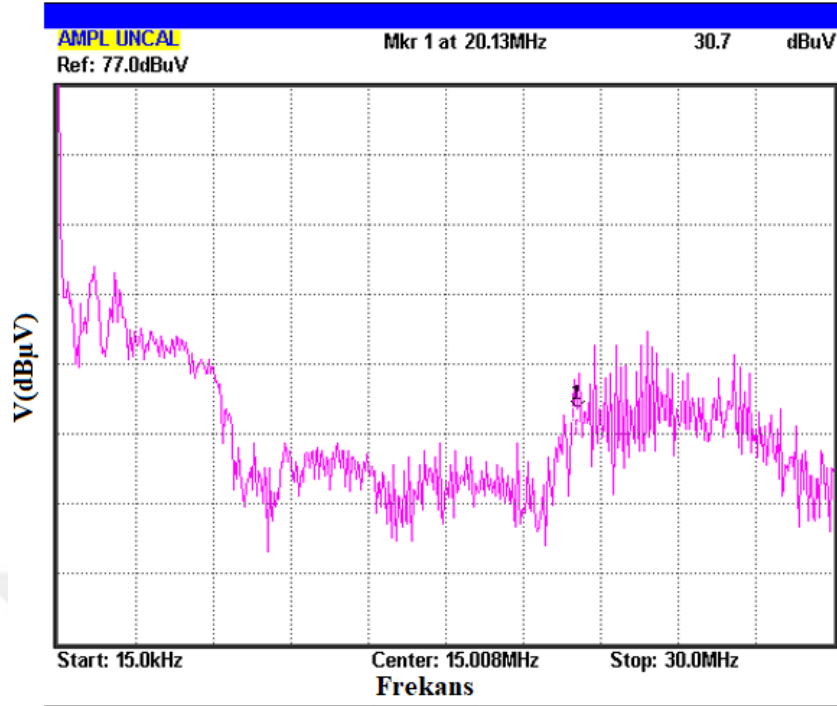
Şekil 4.30. Sistem açık, 9 W yük bağlı



Şekil 4.31. Sistem açık, 40 W yük bağlı



Şekil 4.32. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan kademesinde



Şekil 4.33. Sistem açık, saç kurutma makinesi 1. fan ve ısı kademesinde

4.4. Işıma Gürültü Ölçüm Sonuçları

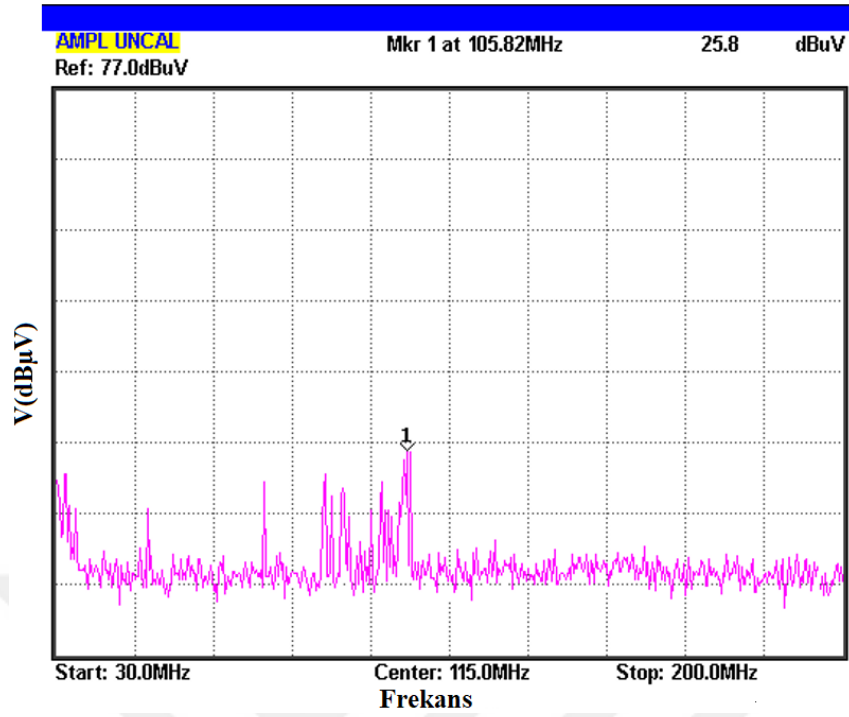
4.4.1. Polikristal panel ölçümleri

Aydınlatma sisteminin ışıma gürültüsüne katkısını araştırmak için, sistem kapalı halojen lambalar açık ve sistem açık halojen lambalar açık olmak üzere iki durumda da ölçüm alınmıştır. Halojen lambaların ışıma gürültüsüne etkisi gözlenmemiştir.

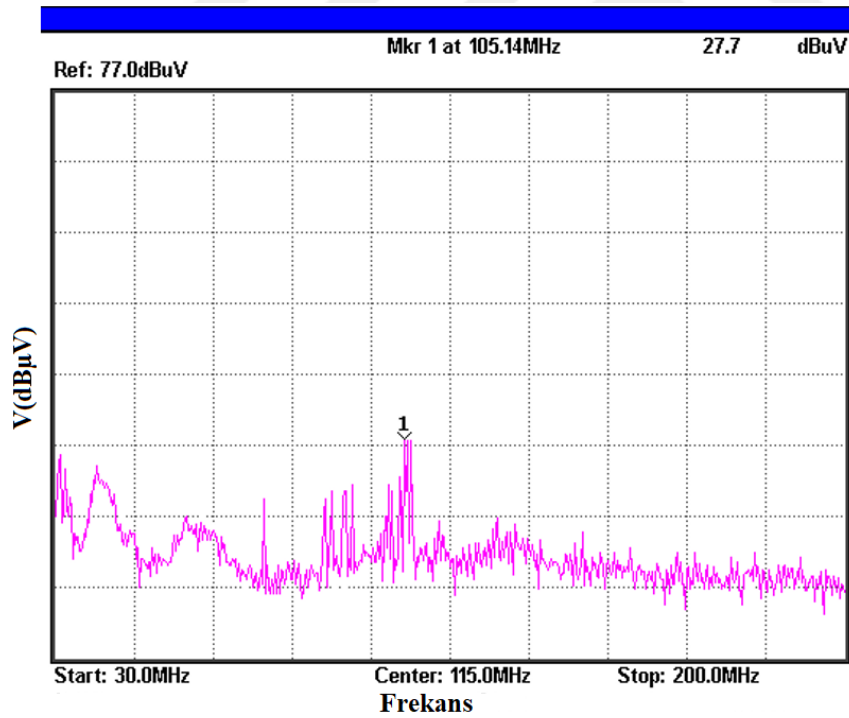
Spektrum analizörden alınan ölçüm sonuçlarında gürültü gerilim değeri $\text{dB}\mu\text{V}$ olduğu için, ölçüm sonuçları değerlendirilirken $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ elektrik alan birimine dönüşüm için Denklem 3.53 kullanılmıştır.

Ortam gürültüsünü ölçmek için spektrum analizöre SMA adaptörü aracılığıyla RF kablosu bağlanmış ve sistem açılmamıştır (halojen lambalar kapalı, invertör kapalı). Şekil 4.34' ten görüleceği üzere 30 - 35 MHz frekans aralığında ve 87.8 - 106.5 MHz aralığında gürültü gözlenmiştir. 105.82 frekansında ölçülen değer ise 37.93 ($25.8+12.13$) $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 'dir.

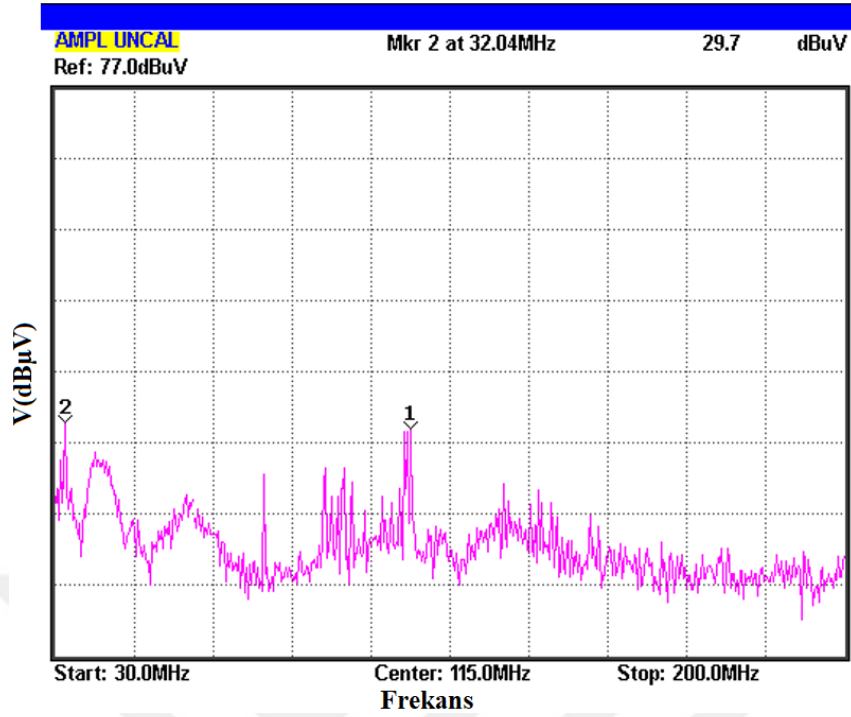
Invertör ve aydınlatma sistemi açık iken, invertörün çıkışına 9 W gücünde ampul bağlanarak ölçüm alınmış ve sonucu Şekil 4.35'te verilmiştir. 35 - 75 MHz frekans aralığında ve 85 - 145 MHz frekans aralığında gürültü görülmüştür. 105.82 MHz frekansında 39.83 ($27.7+12.13$) $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ olarak okunmuştur. 39.84 MHz frekansında 41.5 ($25+16.5$) $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ olarak okunan değer CISPR 22 standardının belirlediği sınır değerinin (40.5 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$) üzerindedir.



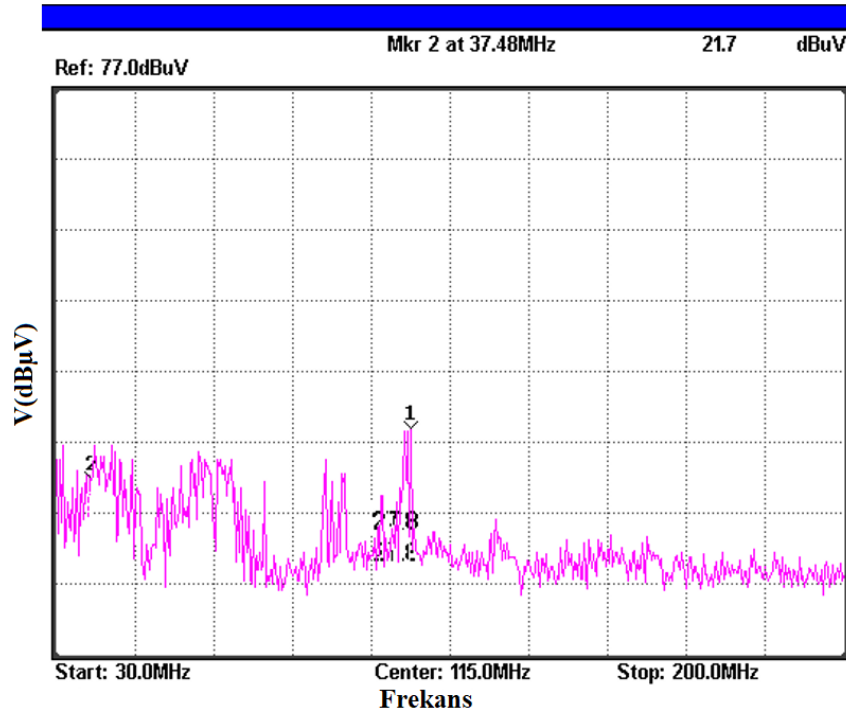
Şekil 4.34. Sistem kapalı



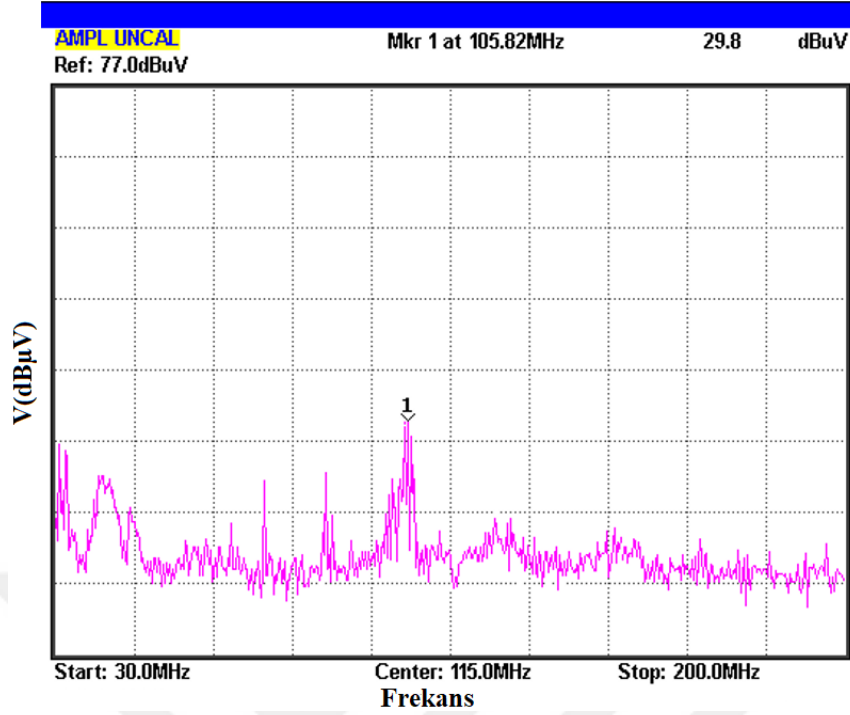
Şekil 4.35. Sistem açık, 9 W yük bağlı



Şekil 4.36. Sistem açık, 40 W yük bağlı



Şekil 4.37. Saç kurutma makinesi bağlı



Şekil 4.38. Filtre kahve makinesi bağlı

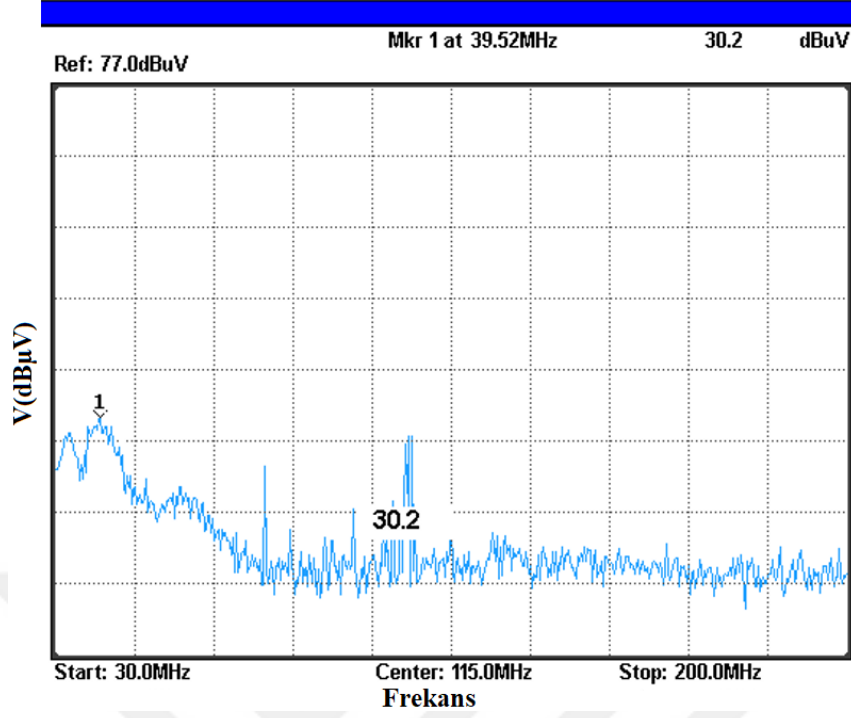
Sistem açık iken invertörün çıkışına 40 W led ampul bağlandığında, Şekil 4.36’da görüldüğü gibi 32.04 frekansında genlik değeri 47.7 (29.7+18) dB μ V/m’dir. Bu frekansta ısıma sınır değeri aşılmıştır, bazı durumlarda ölçüm şartlarında ortam etkisinin buna neden olabileceği de değerlendirilmiştir. Bir önceki yüke kıyasla 49 - 64 MHz arasında genlik değerinde artış görülmüştür. Yine 100 - 149 MHz arasında genlik değerinde artış görülmüştür. 37.12 - 42.53 MHz aralığında sınır değeri aşılmıştır.

Yük olarak saç kurutma makinesi bağlandığında sinyale gürültü eklendiği görülmektedir (Şekil 4.37). 50 - 73 MHz arasında diğer yüklere kıyasla gürültü genliğinde artış görülmektedir. 38 - 42.5 MHz aralığında ısıma sınır değeri aşılmıştır.

Çıkışa filtre kahve makinesi bağlandığında alınan ölçüm Şekil 4.38’de verilmiştir. 105.82 frekansında tepe noktasının değeri 42 dB μ V/m’dir.

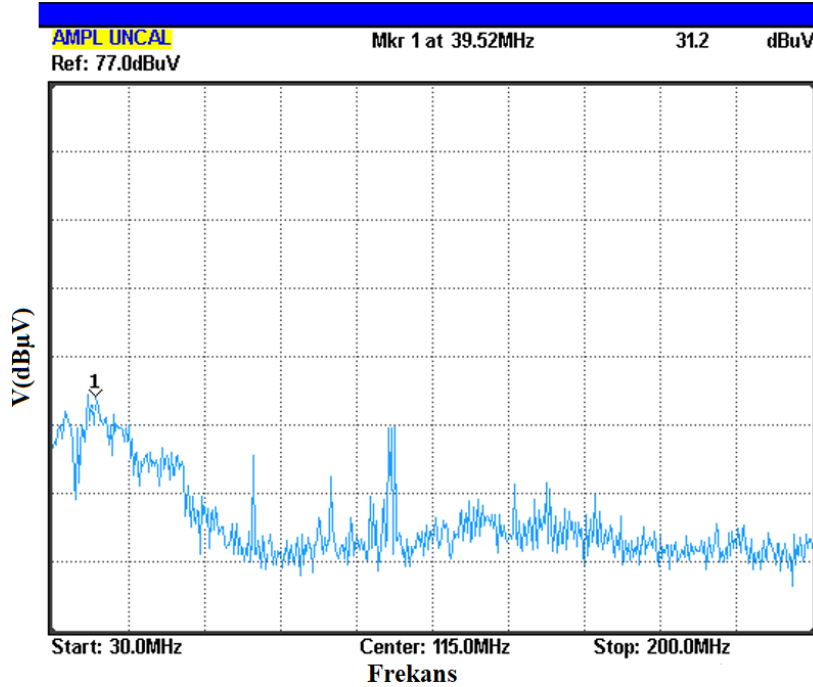
Bikonik anten dikey olarak konumlandırılarak aynı yükler için ölçümler tekrarlanmıştır.

Invertör çıkışında 9 W yük bağlıken 30 - 73 MHz frekans bölgesinde gürültü görülmekle beraber, 39.52 MHz’de 46.7 (30.2+16.5) dB μ V/m olarak okunan değer ısıma sınır değerini aşmıştır (Şekil 4.39).



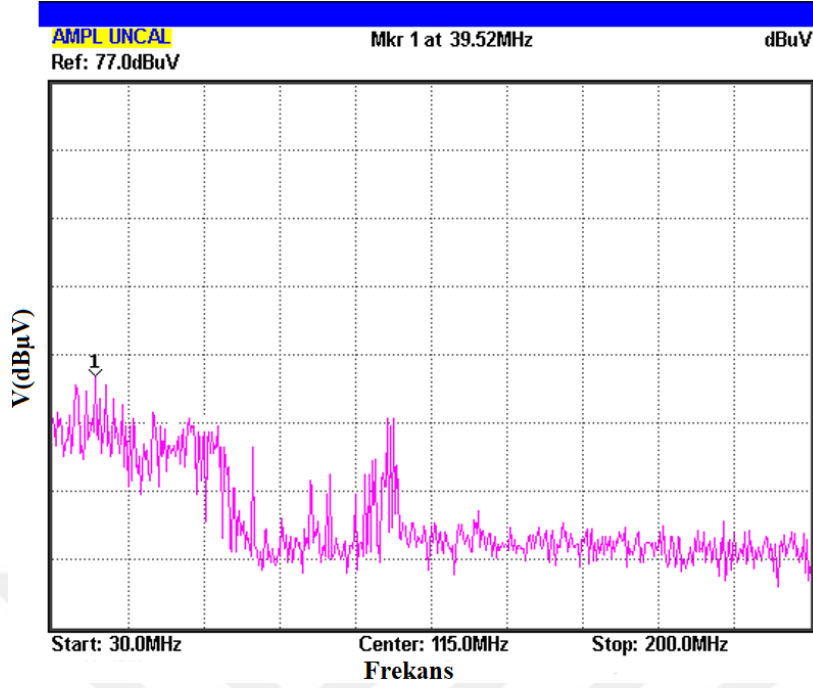
Şekil 4.39. 9 W yük bağlı

Çıkışa 40 W yük bağlandığında ise 9 W'a kıyasla 115 - 155 MHz aralığında gürültü görülmüştür. 35 - 47 MHz aralığında ısıma sınır değeri aşılmıştır (Şekil 4.40).



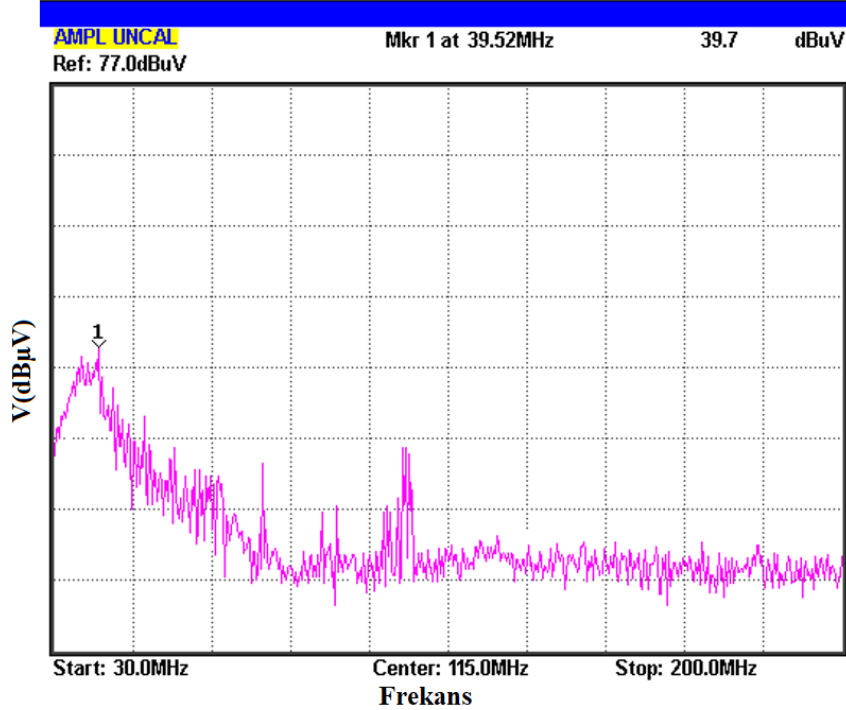
Şekil 4.40. 40 W yük bağlı

Yük olarak saç kurutma makinesi bağlandığında alınan ölçüm Şekil 4.41'de verilmiştir. 35 - 47 MHz aralığında ısıma sınır değeri aşılmıştır.



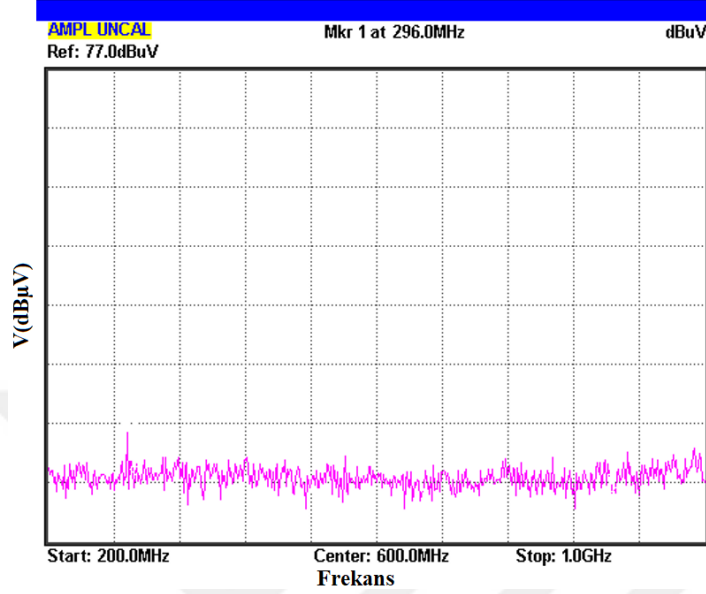
Şekil 4.41. Saç kurutma makinesi bağlı

Çıkışa filtre kahve makinesi (1100 W) bağlandığında düşük frekans bölgesinde sınır değerlerinin aşıldığı görülmektedir. 39.52 MHz frekansında 55.9 (39.7+16.5) dBμV/m değeri görülmüştür (Şekil 4.42).



Şekil 4.42. Filtre kahve makinesi bağlı

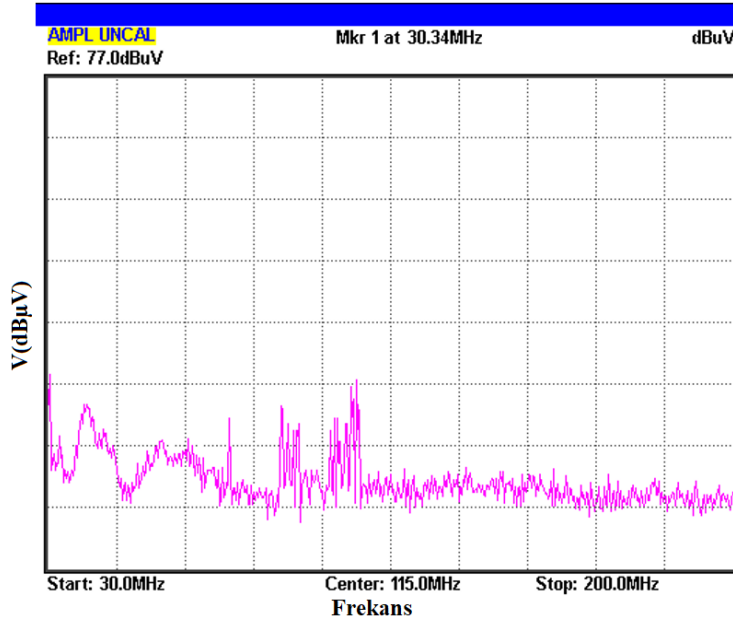
200 MHz - 1 GHz aralığında ölçüm yapabilmek için spektrum analizöre log-periyodik anten bağlanmıştır. Sistem farklı yükler kullanılarak çalıştırıldığında ilgilenilen frekans aralığında gürültü gözlenmemiştir. Kahve makinesi bağlı iken alınan ölçüm Şekil 4.43'te verilmiştir.



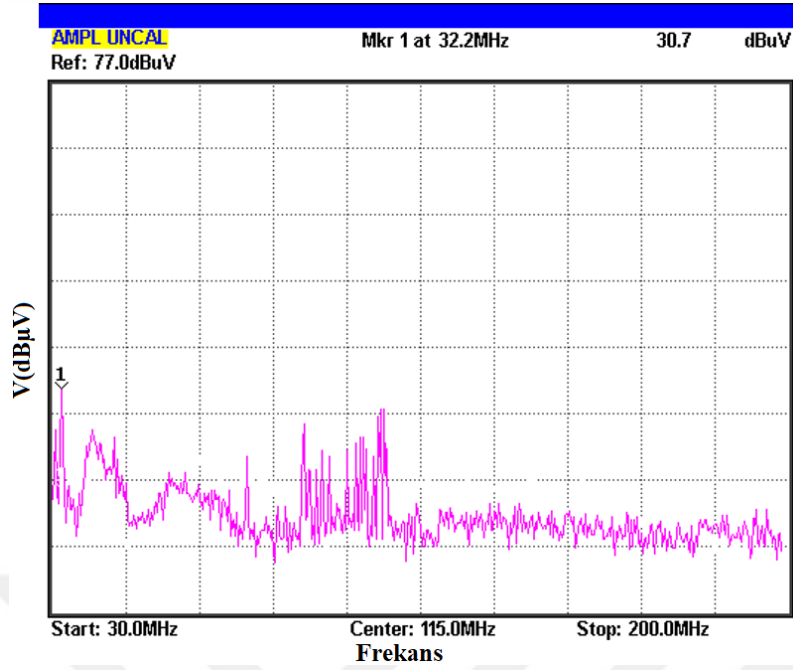
Şekil 4.43. Log-periyodik anten, kahve makinesi bağlı

4.4.2. Perc monokristal panel ölçümleri

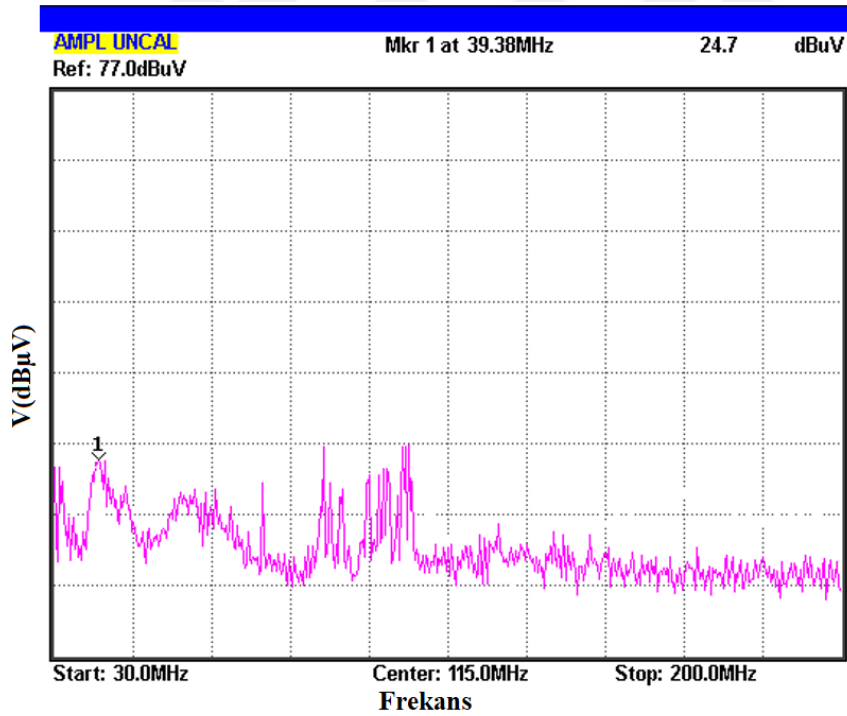
30 MHz - 1 GHz frekans aralığındaki ışıma ölçümleri perc monokristal güneş paneli için tekrarlanmıştır. Bikonik anten yatay polarizasyondayken çıkışa 9 W, 40 W, saç kurutma makinesi ve ısıtıcı bağlanarak ölçüm alınmıştır.



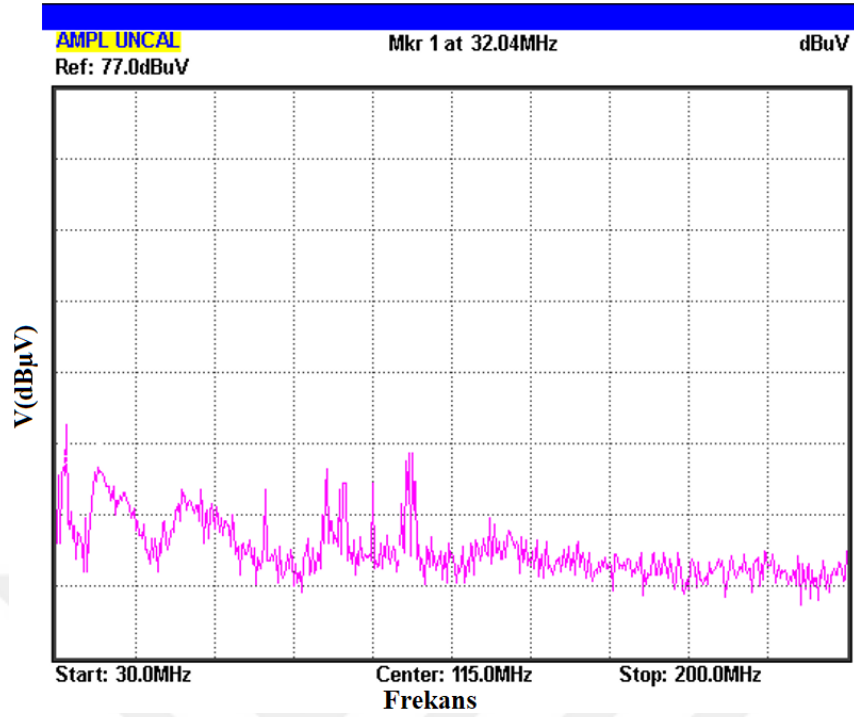
Şekil 4.44. Panel bağlantısız, invertör açık (9 W)



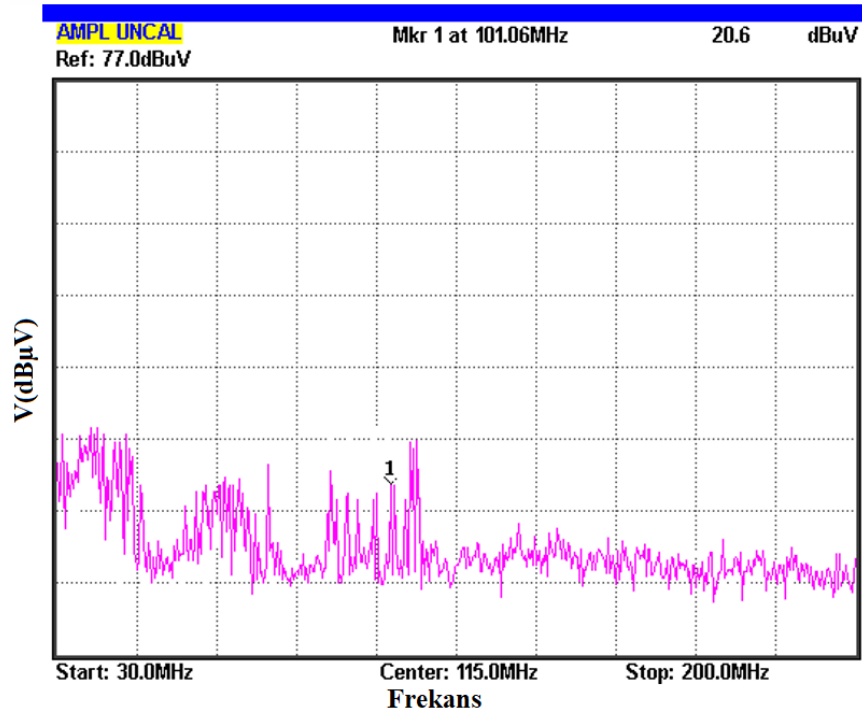
Şekil 4.45. Panel bağlantılı, invertör açık (9 W)



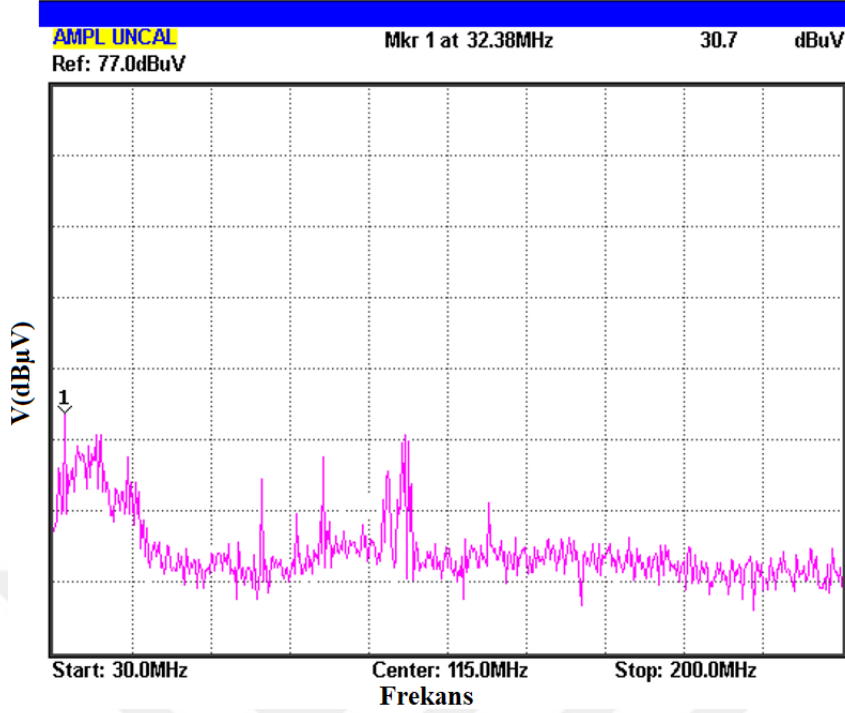
Şekil 4.46. Panel bağlantısız, invertör açık (40 W)



Şekil 4.47. Panel bağlantılı, invertör açık (40 W)



Şekil 4.48. Sistem açık, saç kurutma makinesi bağlı

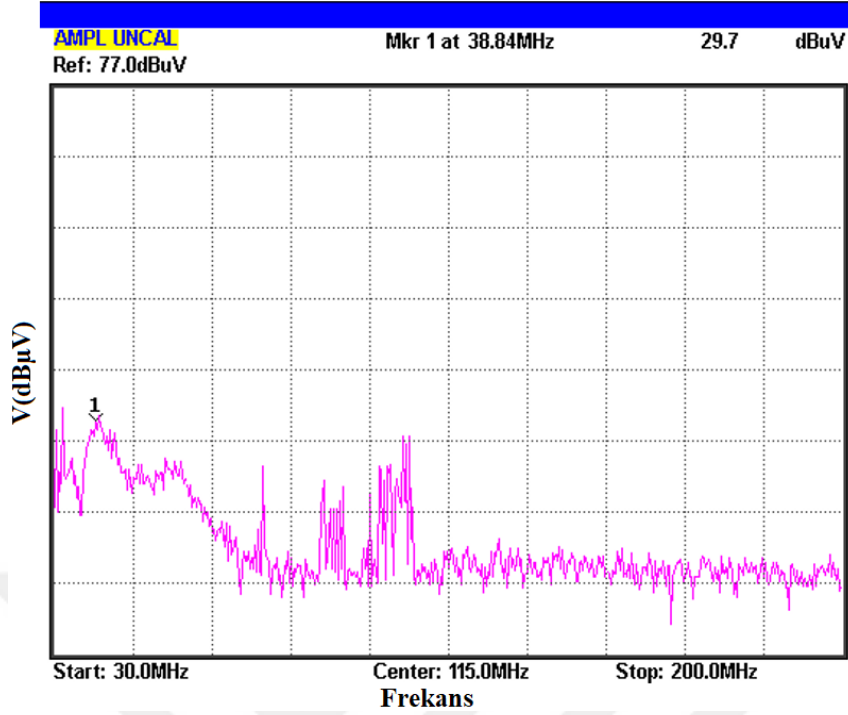


Şekil 4.49. Sistem açık, ısıtıcı bağlı (125 - 600 W)

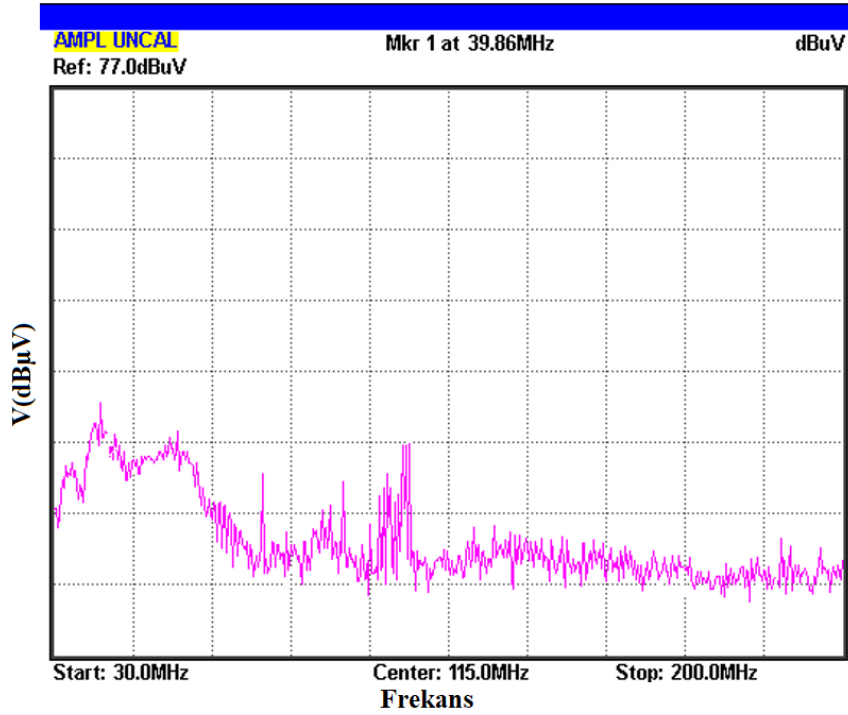
9 W yük altında invertör açık, panel bağlantısız ve invertör açık panel bağlantılı durumlarında alınan ısıma gürültüleri sırasıyla Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te verilmiştir. Düşük frekans bölgesinde küçük farklılıklar olmakla beraber benzer gürültü seviyeleri ölçülmüştür. Şekil 3.44'te 40.7 MHz frekansında 42.1 dBμV/m ile sınır değeri aşılmıştır. 40 W yük altında invertör açık, panel bağlantısız Şekil 4.46'da ve invertör açık panel bağlantılı koşullarında ısıma gürültüleri ise Şekil 4.47'de verilmiştir. Şekil 4.46'da 39.38 frekans değerinde $(24.7+16.5=41.2 \text{ dBμV/m})$ sınır değerinin aşıldığı gözlenmiştir.

Saç kurutma makinesi bağlandığında 35 - 47 MHz frekans aralığında gürültü seviyesi sınır değerinin üzerine çıkmıştır (Şekil 4.48). Çıkışa ısıtıcı bağlandığında ise 35 - 40.8 MHz gürültü seviyesi sınır değerinin üzerinde gözlenmiştir (Şekil 4.49).

Bikonik anten dikey polarizasyondayken aynı yükler için ölçümler tekrarlanmıştır. 9W yüke kıyasla (Şekil 4.50) 40 W yük bağlandığında (Şekil 4.51) 47 - 58.6 MHz ve 115 - 150 MHz frekans aralıklarında genlik değerinde artış görülmüştür. Her iki durumda da düşük frekans bölgesinde sınır değeri aşılmıştır.

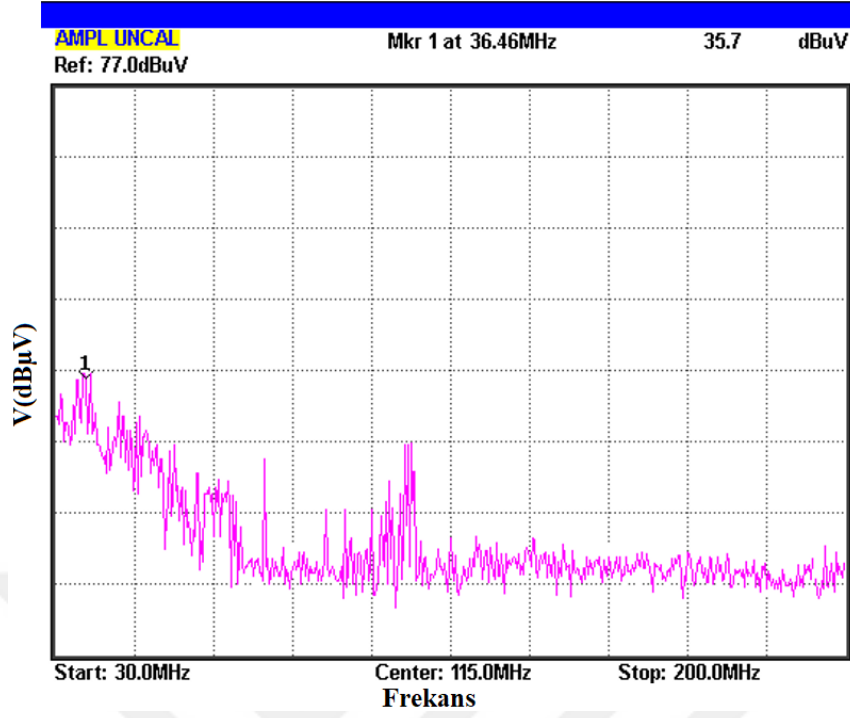


Şekil 4.50. Sistem açık, 9 W yük bağlı

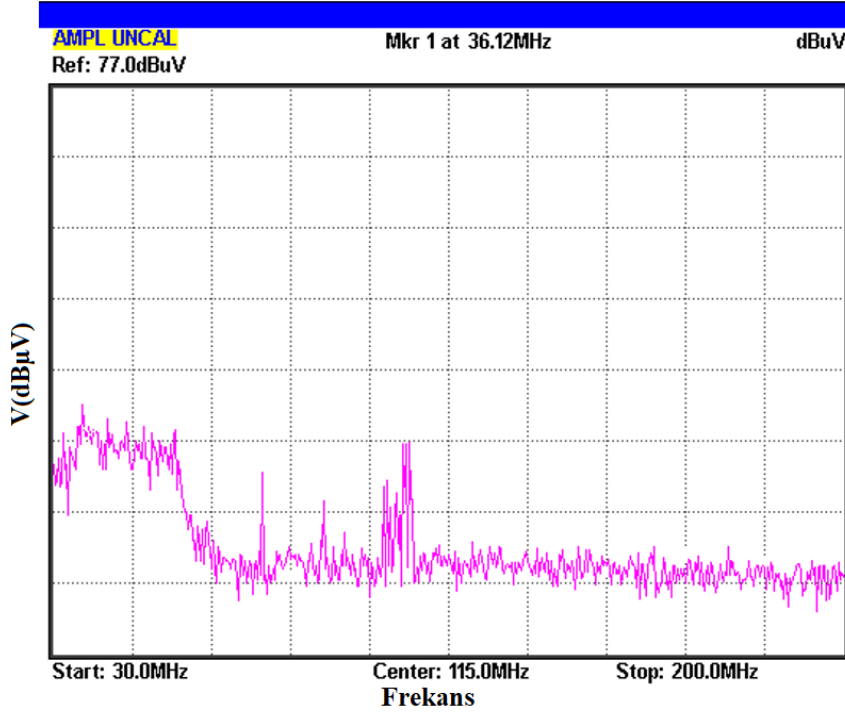


Şekil 4.51. Sistem açık, 40 W yük bağlı

Çıkışa saç kurutma makinesi bağlandığında 36.46 frekansında 53.2 dB μ V/m değeri ölçülmüştür (Şekil 4.52). Düşük frekans bölgesinde sınır değerinin üzerine çıkmıştır.



Şekil 4.52. Sistem açık, saç kurutma makinesi bağlı



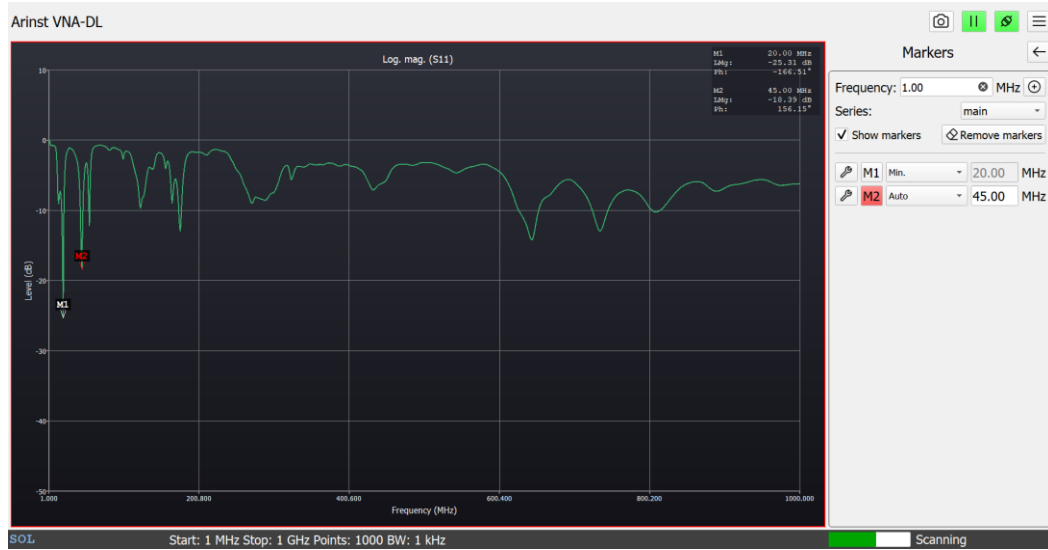
Şekil 4.53. Sistem açık, ısıtıcı bağlı (125 - 600 W)

İletim ve ısıma emisyon ölçümlerinde sistem kapalı iken, sistem açık iken ve çıkışa farklı karakteristikte ve farklı güçlerde yükler bağlarken emisyon gürültüleri incelenmiştir. GES sistemlerinde ister saha tipi ister çatı tipi olsun, farklı yüklerin devreye girip çıkması aslında güç faktörü ve yük karakteriyle ilgilidir. Bu da yüklerin endüktif

bölgede ve kapasitif bölgede çalışmasına göre değişmektedir. Ölçümde kullanılan yüklerin özelliklerini açıklayacak olursak, saç kurutma makinesi ele alındığında, karakteristik olarak yapısında endüktans bulunmaktadır. Güç faktörü de ona göre değişkenlik göstermekte olup endüktif karakterlidir. Kullanılan diğer yüklerin özellikleri ise yaklaşık olarak direnç (rezistif) yakındır. Rezistif yükün güç faktörü 1'e yakın olduğu için sistem daha stabil çalışmaktadır. Kullanılan yük aslında bir empedansı temsil etmektedir. Çekilen akımın artması durumunda güç de artmaktadır. Ölçümlerde yükün endüktansı, gücü ve çektiği akıma bağlı olarak gürültü etkisinin arttığı gözlenmiştir. İletim yoluyla gürültü ölçümünde sisteme endüktif karakterli yük bağlıyken, gücün artması durumunda gürültü karakteristiğinde değişim gözlenmiştir. Pratikte evlerde ve endüstride daha yüksek güç çeken cihazların kullanıldığı dikkate alındığında, GES ve PV bileşenleri kaynaklı iletim ve ısıma yollu girişim problemlerinin oluşabileceğinin öngörülmesi zor değildir. Pratik sistemlerde, tasarım ve projelendirmede elektromanyetik uyumluluk prensiplerine ilişkin mühendislik yaklaşımlarının uygulanması gereklidir. EMI filtre çözümleri (Gonschorek ve Vick 2009; Yalcin vd. 2018) bunlara örnek olarak verilebilir.

4.5. Güneş Paneli S-parametre Ölçüm Sonucu

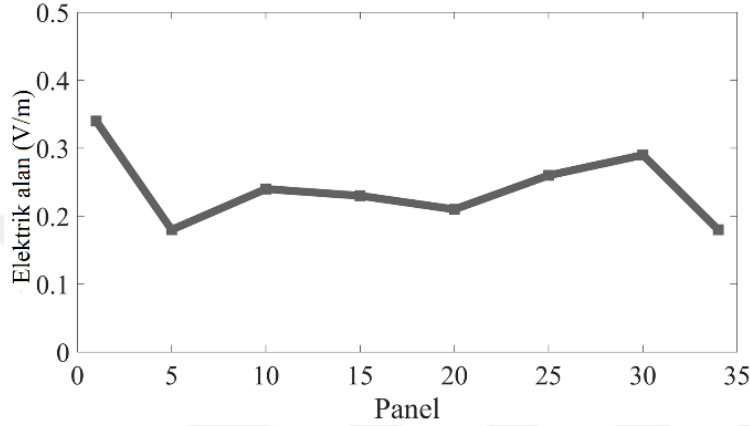
İletim ve ısıma ölçümlerine ilaveten güneş panellerinin anten davranışını hakkında fikir ortaya koymak adına Şekil 3.27'de yer alan güneş panelinin s-parametre ölçümü alınmıştır. Şekil 4.54'te görüldüğü gibi 20 MHz'de -25.31 dB, 45 MHz'de ise -18.39 dB değerleri gözlemlenmiştir. Uygun koşullar altında panelin ısıma yapabileceği görülmüştür. Bir santral bölgesinin hemen yanında RF kaynaklı vericiler (radyo, TV, cep telefonu) bulunabilir ve bu kaynaklardan yayılan alanlar olabilir. Dolayısıyla RF bölgesinde çevresel kaynaklardan gelen elektromanyetik alanları, alıcı anten gibi davranan panel ve GES bileşenleri nedeni ile sistemde indüklenen gürültüler oluşturabilir. Bu durum sistem içerisinde ve alt bileşenlerde gürültü indüklenmesine neden olabilir. Özellikle çatı ve yüksek güçlü GES uygulamalarında bölgenin RF kaynak durumunun dikkate alınması önemli görülmektedir.



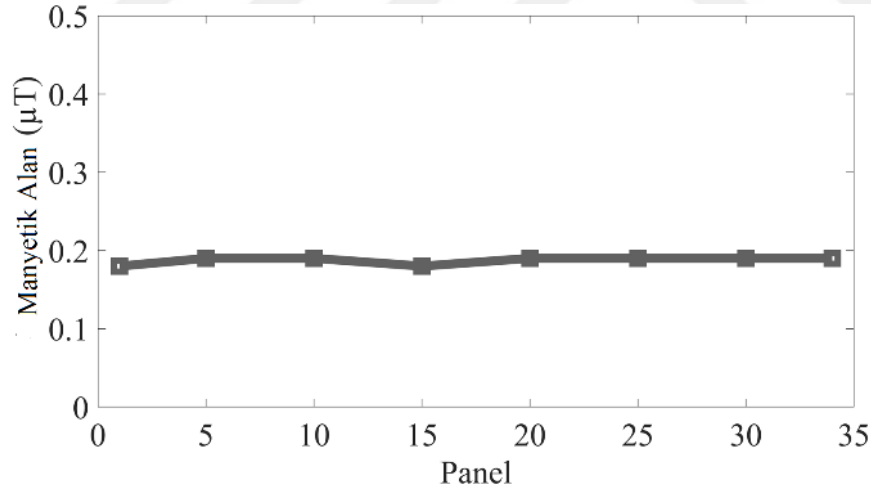
Şekil 4.54. S-parametre ölçüm sonucu

4.6. Elektrik Alan ve Manyetik Alan Ölçüm Sonuçları

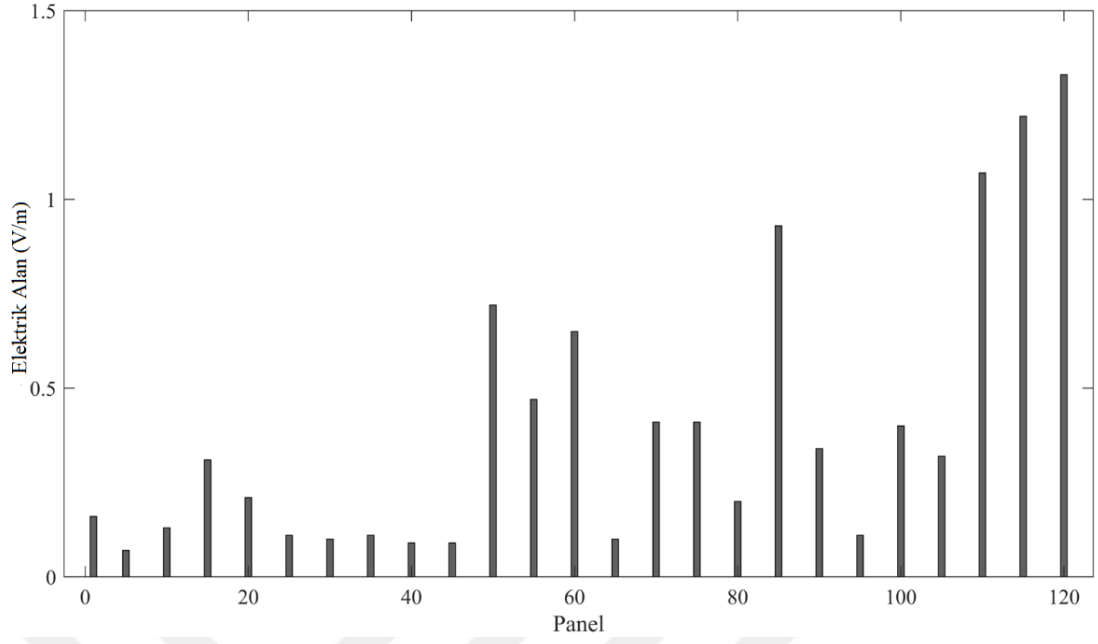
GES santralde X. sıradaki (Şekil 3.28) güneş panellerinin elektrik alan ölçüm değerleri Şekil 4.55'te verilirken, manyetik alan ölçüm değerleri Şekil 4.56'da verilmiştir. Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de ise sırasıyla Y. sırada alınan elektrik alan ve manyetik alan ölçüm değerleri yer almaktadır. X. sırada panellerden yayılan elektrik alan değerleri 0.18 ve 0.34 V/m değerleri arasında değişirken, Y. sırada 0.07 ve 1.33 V/m değerleri arasında dalgalanma göstermektedir. X. sırada manyetik alan 0.18 ve 0.19 μ T arasında değişim gösterir iken, Y. sırada 0.12 μ T değerine ulaşmaktadır.



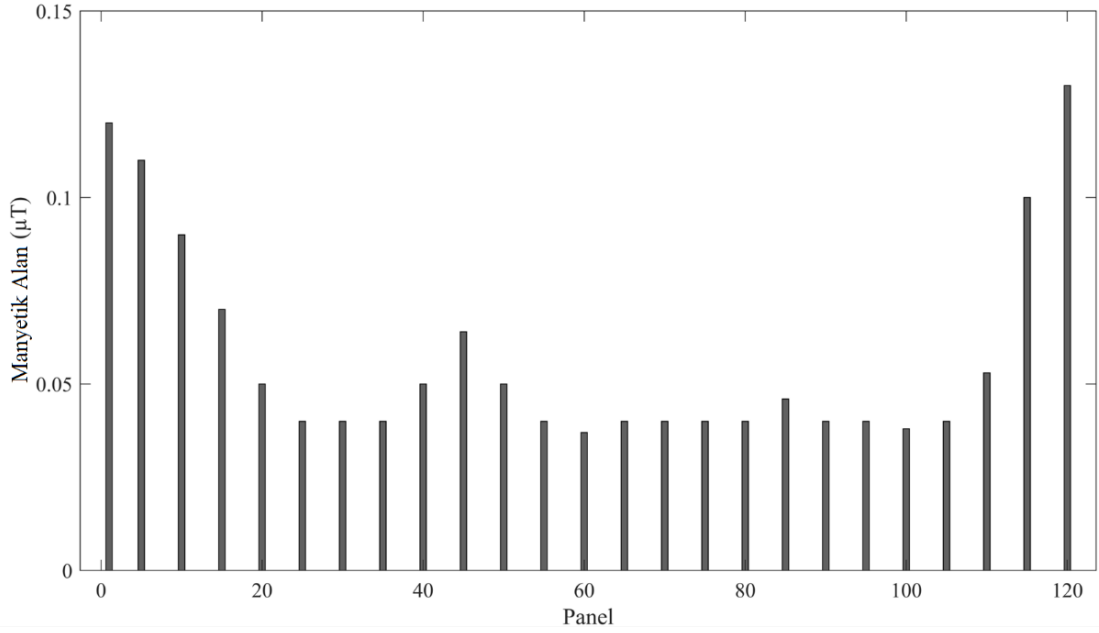
Şekil 4.55. Elektrik alan ölçüm sonuçları (X. sıra)



Şekil 4.56. Manyetik alan ölçüm sonuçları (X. sıra)



Şekil 4.57. Elektrik alan ölçüm sonuçları (Y. sıra)

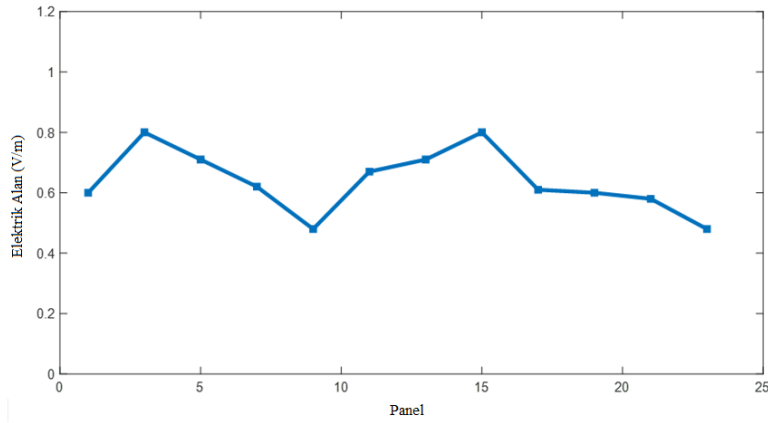
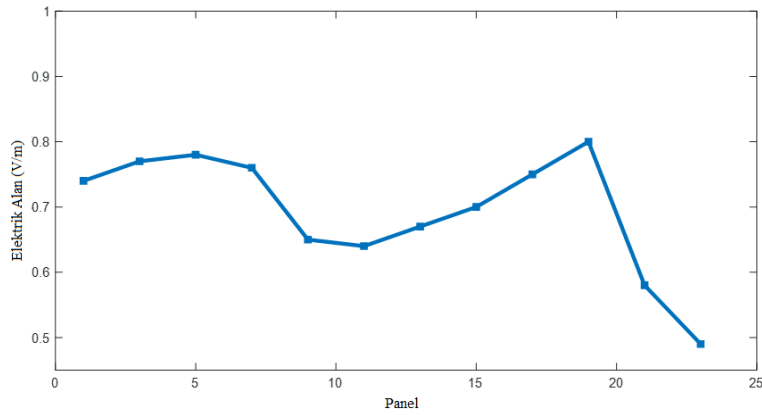


Şekil 4.58. Manyetik alan ölçüm sonuçları (Y. sıra)

Çatı GES'te her bir panel üzerinde alınan manyetik alan ölçüm değerleri Çizelge 4.7'de yer alırken, birinci sıra ve beşinci sıra paneller üzerinde alınan elektrik alan değerleri sırasıyla şekil 4.59 ve şekil 4.60'ta grafikte yer almaktadır.

Çizelge 4. 7. Çatı GES manyetik alan sonuçları

Sıra	1. panel (μT)	2. panel (μT)	3. panel (μT)	4. panel (μT)	5. panel (μT)
1	0.067	0.061	0.068	0.065	0.061
3	0.064	0.061	0.063	0.061	0.065
5	0.063	0.060	0.052	0.065	0.060
7	0.061	0.068	0.064	0.056	0.062
9	0.058	0.066	0.062	0.060	0.057
11	0.060	0.050	0.047	0.058	0.064
13	0.062	0.055	0.052	0.048	0.045
15	0.056	0.058	0.051	0.051	0.069
17	0.051	0.058	0.061	0.062	0.054
19	0.052	0.043	0.053	0.054	0.066
21	0.060	0.052	0.054	0.055	0.064
23	0.059	0.052	0.056	0.064	0.056

**Şekil 4.59.** Çatı GES elektrik alan ölçüm sonuçları**Şekil 4.60.** Çatı GES manyetik alan ölçüm sonuçları

Çatı üstü panellerinde manyetik alan ölçüm değerleri Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi 0.043 μ T ve 0.069 μ T arasında değişmektedir. Çatı üstü panellerinde elektrik alan ölçüm değerleri Şekil 4.59 ve Şekil 4.60’ta görüldüğü gibi 0.48 V/m ve 0.8 V/m arasında değişmektedir.

Yukarıda yer alan panel ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, ICNIRP’nin (Icnirp 2010) çalışan ve genel halk için yayınladığı maruziyet sınırlarının altında olduğu görülmüştür.



5. SONUÇLAR

Bir aygıt ya da sisteme ait elektromanyetik emisyon seviyeleri elektromanyetik emisyon ölçümleri aracılığıyla tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte bir aygıt ya da sistem örneklerinde elektromanyetik emisyon seviyelerinde belirgin farklılıklar olabilmektedir. Bu farklılık aygıtın ya da sistem bileşenlerinin fiziksel yapısında içerdiği elemanların birebir aynı karakteristikte olmamasından ve çevresel etkilerden kaynaklanmaktadır. Bu ise bir ürünün farklı örneklerinin neden olduğu emisyon seviyelerinin değişimlerine açıklık getirmektedir.

Özellikle anahtarlama elemanı içeren elektronik devreler çalışma doğası gereği istenmeyen elektromanyetik gürültü üretmektedir. GES bileşenlerinden olan güç dönüştürücü devreler de anahtarlama elemanı içermektedir. Daha küçük boyutlarda (kompakt) daha yüksek performans/verim elde etmek için bu elemanların çalışma frekanslarının artırılması, üretilen emisyon seviyelerini olumsuz anlamda değiştirmektedir.

Bu çalışmada ışıma emisyonlarının matematiksel modellemesi yapılmış ve burada CM akımlarının DM akımlarına kıyasla çok daha etkili olduğu gösterilmiştir. İletken/kablo uzunluğunun alan oluşturmada etkili olduğu gösterilmiştir.

İletim gürültülerinin simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre gürültünün genlik seviyesi standartta belirlenen sınır değerini aşmıştır. Ayrıca sisteme yük bağlandığı zaman gürültü seviyesinde artış ve gürültü karakteristiğinde değişim gözlenmiştir.

İletim ve ışıma ölçümleri esnasında sistem çıkışına farklı davranış sergileyen münferit yükler bağlanarak gürültü girişim bileşenlerine ilişkin analizler yapılmış ve yük tipinin gürültü karakteristiği üzerine etkisi incelenmiştir.

PV sistemin ana güç dönüştürücü bileşeni olan ve doğası gereği yapısında anahtarlama elemanları içeren invertörün çalışması sırasında, çıkıştan çekilen AC akım arttıkça üretilen gürültü seviyesinin arttığı görülmüştür.

Sistem çıkışına bağlanan yükün karakteristiğine göre oluşan gürültünün karakteristiğinin değiştiği görülmüştür.

İletim ölçümleri laboratuvar ortamında ve açık alanda gerçekleştirilerek gerçek zamanlı durumda üretilen gürültüye ilişkin veriler elde edilmiştir.

İletim ve ışıma ölçümü sonucunda elde edilen veriler genel olarak uluslararası standartların belirlediği sınır değerlerinin altında kalmakla birlikte, bazı frekans değerlerinde sınır değerlerinin aşıldığı görülmüştür.

Çatı ve saha GES santrallerinde paneller ve bileşenlerinin oluşturduğu elektrik ve manyetik alan ölçümlerine göre, değerler ICNIRP maruziyet sınırlarının altında kalmıştır.

Panelin anten davranışına ilişkin analizinde yansımaya ilişkin S_{11} bileşeni ölçülmüş ve güneş panellerinin uygun koşullar altında, bazı frekanslarda anten davranışı gösterebileceği görülmüştür. Dolayısıyla sistem boyutu arttıkça kullanılan yarı iletken

elemanların sayısının artması, uygun koşullar oluştuğunda anten gibi davranan panellerin sayısının ve kablolanmanın artması üretilen gürültünün artacağını göstermektedir.

Özellikle şahsi konutlarda çatı üstü GES'ler düşünüldüğünde artan invertör sayısı ile birlikte gürültü seviyesinde de artış gözlenebilir ve bu da sistemden enerji alarak çalışan diğer ev cihazlarının çalışmasını etkileyebilir. Aynı şekilde çatı üstü GES kurulumu olan diğer işyeri, fabrika vb. gibi binalarda, sistemden kaynaklanan emisyonlar bu birimlerde bulunan elektrikli, elektronik ekipmanlara girişim yapabilir ve tam performansta çalışmasını etkileyebilir.

Bu çalışmada gerçek boyutta (prototip olmayan) güneş panelleri kullanılarak bir GES sistemi bileşenleri EMC açısından frekans ve zaman domaininde bir bütün olarak ele alınmıştır. Ayrıca anten davranışı yaklaşımı benimsenerek sistem bileşenlerinde meydana gelen ortak mod ve diferansiyel mod gürültü akımlarının oluşturabileceği ısıma emisyonları modellenmiştir. Son yıllarda GES teknolojilerine duyulan ihtiyaç ve bu alandaki gelişmeler dikkate alındığında, enerji sistemlerinde elektromanyetik girişim problemlerinin tanımlanarak, gerekli çözüm önerilerinin geliştirilmesi noktasında önemli bilgi ve tespitlerin sunulduğu bu çalışma yenilikler içermektedir. Bu bağlamda tez çalışması bilime ve GES teknolojileri alanına önemli katkılar sağlayacaktır.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular ışığında; ileri çalışmalar için panel yapılarının ve GES'nin tam anten modelleri incelenebilir. Burada geometrik şeklin/yapının tamamen anten davranışının ortaya çıkarılması amacıyla, hem çevreden gelen gürültülerin hem de sistemin iç bileşenlerinde dolaşan akımların ısıma yapabilme etkisi anlamında parametrik tespit yapılabilir. Elektromanyetik gürültü problemlerinin eliminasyonu için projelendirme aşamasında çevredeki enerji nakil hatları, vericiler, radarlar vb. bütün elektromanyetik kaynaklara ilişkin simülasyon çalışması yapılabilir. Çevreden gelen alanların gürültü, verim düşüklüğü etkisi oluşturup oluşturmadığı incelenebilir. Özellikle çatı GES'lerin olduğu bölgelerde çevresel elektromanyetik kaynaklar yaygın bulunabilir ve projelendirme aşamasında simülasyon ve kestirim hesaplamaları yapılabilir. Dolayısıyla olası herhangi bir EMI durumunda gerekli önlemler alınarak hem maliyetten hem zamandan tasarruf edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Alam, A., Mukul, M. K., and Thakura, P. 2016. Wavelet Transform-Based EMI Noise Mitigation in Power Converter Topologies. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(5), 1662-1673.
- Ali, Mohammad. 2017. Simulation of the Radiated Emissions of a Grid Connected Photovoltaic System. 1-13.
- Anand, D., and Jeevananthan, S. 2010. Modeling and analysis of conducted EMI emissions of a single-phase PWM inverters. *Asian Power Electronics Journal*, 4(3), 103-108.
- Andersson, J., Olsson, H., and Theocharis, A. 2021. Analysis of electromagnetic compatibility in photovoltaic installations validated by site measurements. 2021 IEEE Madrid PowerTech, ss. 1-6, 28 June-2 July 2021.
- Anonim <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>, [Son erişim tarihi: 07.12.2022].
- Anonymous <https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/electromagnetic-waves>, [Son erişim tarihi: 13.08.2023].
- Araneo, R., Lammens, S., Grossi, M., and Bertone, S. 2009. EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3), 639-648.
- Ari, N., and Ozen, S. 2008. Elektromanyetik Uyumluluk. Palme. Ankara, 224 s.
- Bellia, Habbati, Youcef, Ramdani, and Fatima, Moulay. 2014. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 53-61.
- Boyuan, Zhu, Leskarac, D., Junwei, Lu, and Wishart, M. 2016. Electromagnetic interference investigation of solar PV system for microgrid structure. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), ss. 456-459, 17-21 May 2016.
- Ceaki, O., Vatu, R., Mancasi, M., Porumb, R., and Seritan, G. 2015. Analysis of electromagnetic disturbances for grid-connected PV plants. 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), ss. 1-5, 6-9 July 2015.
- Chen, W., Duan, Y., Guo, L., Xuan, Y., and Yang, X. 2016. Modeling and Prediction of Radiated Emission From Solar Cell in a Photovoltaic Generation System. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(2), 540-545.
- Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T., and Bouzid, A. 2007. A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*, 32(9), 1724-1730.
- Chouder, Aissa, Silvestre, Santiago, Sadaoui, Nawel, and Rahmani, Lazhar. 2012. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 20(1), 46-58.
- Drapalik, M., Schmid, J., Kancsar, E., Schlosser, V., and Klinger, G. 2010. A Study of the Antenna Effect of Photovoltaic Modules. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), ss. 371-375, 23 - 25 March, Granada (Spain).
- Faiz, J., and Shahgholian, G. 2007. Electro magnetic interference in pwm inverter classification analysis modeling and effects reduction. 14th international symposium on power electronics - Ee 2007, ss. 1-4, 7-9 November.

- Gonschorek, K.H., and Vick, R. 2009. Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration. 3. Heidelberg, 470 s.
- Hamza, D., and Jain, P. 2010. Conducted EMI in grid-tied PV system. Intelec 2010, ss. 1-7, 4-8 Dec., Queens University, Canada.
- Haselhuhn, R., and Hemmerle, C. 2005. Fotovoltaik Sistemler. Çataklı Enerji Eğitim Yayıncılık Danışmanlık ve Tic. Ltd. Şti. Berlin, 441 s.
- Helhel, S., and Ozen, S. 2008. Assessment of occupational exposure to magnetic fields in high-voltage substations (154/34.5 kV). *Radiation Protection Dosimetry*, 128, 464–470.
- ICNIRP. 2010. Guidelines for limiting exposure to timevarying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* 99(6), 818–836.
- Juswardy, B., Schlagenhauser, F., Padhi, S., and Hall, P. 2011. Radiated EMI emission study on photovoltaic module for radio astronomy receiver front-end. 2011 Electromagnetic Compatibility Symposium - Perth, ss. 1-4, 9-11 Nov. 2011.
- Kapusta, T. 2012. EMI filters for photovoltaic converters. 2012 ELEKTRO, ss. 137-140, 21-22 May 2012.
- Khamphakdi, P., Tarateeraseth, V., Karanun, K., and Khan-ngern, W. 2006. The conducted electromagnetic interference of small grid connected inverter to power system. 2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, ss. 654-657, 27 Feb.-3 March 2006.
- Kharanaq, F. A., Emadi, A., and Bilgin, B. 2020. Modeling of Conducted Emissions for EMI Analysis of Power Converters: State-of-the-Art Review. *IEEE Access*, 8, 189313-189325.
- Igarashi, H., and Suenaga, S. 2005. Electromagnetic noise from solar cells. Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005., ss. 1820-1822, 3-7 Jan. 2005.
- Linder, S., and Wiklundh, K. 2022. In-situ Measurements of Conducted and Radiated Emissions from Photovoltaic Installations. 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, ss. 231-236, 5-8 Sept. 2022.
- Loschi, Hermes Jose, Ferreira, Luiz Antonio, Iano, Yuzo, Nascimento, Douglas, Cardoso, Paulo, Carvalho, Silvio, and Conte, Fabrizio. 2017. EMC Evaluation of Off-Grid and Grid-Tied Photovoltaic Systems for the Brazilian Scenario. *Journal of Clean Energy Technologies*, 6, 125-133.
- Murad, H., Manou, T., and Nagaoka, N. 2017. Modelling and analysis of PV panel for reducing EMI noise radiation. 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), ss. 1-6, 28-31 Aug. 2017.
- Ozen, S. 2008. Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high-voltage substation and its power lines. *Radiation Protection Dosimetry*, 128, 198–205.
- Ozen, S., and Helhel, S. 2022. Mühendislik Elektromanyetizminin Temelleri. Birsen. İstanbul, 465 s.
- Paul, Clayton R., Robert C. Scully, and Mark A. Steffka. 2022. Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons. Kentucky, 924 s.
- Prajapati, M., Fan, F., Zhao, Z., and See, K. Y. 2021. Estimation of Radiated Emissions From PV System Through Black Box Approach. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-4.
- Prajapati, M., and See, K. Y. 2018. Extraction of equivalent impedance of photovoltaic panel under its actual operating conditions. 2018 IEEE International Symposium

- on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), ss. 1145-1149, 14-18 May 2018.
- Prajapati, M., and See, K. Y. 2019. Extraction of Equivalent Noise Source Model From Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61(3), 903-910.
- Prajapati, Manish. 2019. Modeling and analysis of EMI from DC input of photovoltaic systems. Nanyang Technological University, Singapore s.
- Rajkumar, K., Karthikeyan, B., and Senthilkumar, S. 2015. An overview of conducted EMI and its mitigation in photovoltaic systems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 22523-22534.
- Redl, R. 1996. Power electronics and electromagnetic compatibility. PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, ss. 15-21 vol.11, 23-27 June 1996.
- Rucinski, M., Chrzan, P. J., Musznicki, P., Schanen, J. L., and Labonne, A. 2015. Analysis of electromagnetic disturbances in DC network of grid connected building-integrated photovoltaic system. 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), ss. 332-336, 24-26 June 2015.
- Safigianni, A. 2013. Electric and Magnetic Fields due to the Operation of Roof Mounted Photovoltaic Systems. *34th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Stockholm, Sweden, 12-15 August 2013, paper 130319123152, pp. 1908-1911.*
- Saidi, S., Bhiri, H., and Slama, J. Ben Hadj. 2016. Study of the electromagnetic near field radiated by the photovoltaic cells. 2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), ss. 374-377, 18-20 Dec. 2016.
- Sevgi, L. 2006. Tasarımdan üretime elektromanyetik uyumluluk. Eksen. İstanbul, 269 s.
- Smirnov, Y. 2011. RF disturbances produced by high-power photovoltaic solar plants Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta s.
- Tomisawa, M., and Tokuda, M. 2008a. Induction characteristics of a solar cell to radiated electromagnetic disturbances. 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, ss. 538-541, 19-23 May 2008.
- Tomisawa, M., and Tokuda, M. 2008b. Suppression of emissions radiated from solar cells in photovoltaic power generation system. 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, ss. 1-6, 18-22 Aug. 2008.
- Tomisawa, M., and Tokuda, M. 2009. Induction Characteristics of a Solar Cell on the Ground Plane from Radiated Electromagnetic Disturbances. 2009 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, ss. 81-84, 12-16 Jan. 2009.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. 2009. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. 2009 Brazilian Power Electronics Conference, ss. 1244-1254, 27 Sept.-1 Oct. 2009.
- Wada, T., Mori, T., Tokuda, M., Suenaga, S., and Igarashi, H. 2005. Radiated electromagnetic field from a solar cell for CISPR radiated emission measurement method. 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2005. EMC 2005., ss. 112-117 Vol. 111, 8-12 Aug. 2005.

- Wu, Ifong, Shinozuka, T., Ishigami, S., and Matsumoto, Y. 2015a. Evaluation of electromagnetic radiation from the DC side of a photovoltaic power generation system. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 4(2), 73-81.
- Wu, Ifong, Shinozuka, Takashi, Ishigami, Shinobu, and Matsumoto, Yasushi. 2015b. Effect of frame wire installed between PV panels and ground plane on radiation noise from PV power generation system. *IEICE Communications Express*, 4, 50-54.
- Yalcin, S., Ozen, S., and Helhel, S. 2018. EMI filter design based on the separated electromagnetic interference in switched mode power supplies. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(6), 3033 – 3043.



ÖZGEÇMİŞ

MERVE BEDELOĞLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2016-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2013-2016	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2009-2013	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Program Koordinatörü 2019-Devam Ediyor	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Altso Myo, Elektrik Programı, Antalya
Öğretim Görevlisi 2019- Devam Ediyor	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Altso Myo, Elektrik Programı, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Bedeloğlu, M., İl, N., Ateş, K., & Özen, Ş. (2021). Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components. *Radiation Protection Dosimetry*, 194(1), 57-64.
- 2- Bedeloglu, M., Topcu, Ç., Akgul, A., Döğer, E. N., Sever, R., Ozkan, O., ... & Çolak, O. H. (2018). Image-based analysis of emotional facial expressions in full face transplants. *Journal of Medical Systems*, 42(3), 1-10.

- 3- Topçu, Ç., Uysal, H., Özkan, Ö., Özkan, Ö., Polat, Ö., Bedeloğlu, M., ... & Çolak, Ö. H. (2018). Recovery of facial expressions using functional electrical stimulation after full-face transplantation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 15(1), 1-7.
- 4- Topçu, Ç., Uysal, H., Özkan, Ö., Özkan, Ö., Polat, Ö., Bedeloğlu, M., ... & Çolak, Ö. H. (2017). Assessment of emotional expressions after full-face transplantation. *Neural plasticity*, 2017.
- 5- Uysal, H., Topçu, Ç., Özkan, Ö., Özkan, Ö., Barçın, E., Akgül, A., ... & Çolak, Ö. H. (2016). ID 382–Electrophysiological evaluation of emotional expressions in the facial transplantation patients. *Clinical Neurophysiology*, 127(3), e127.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Bedeloğlu, M., Niyazi, İ. L., Kayhan, A. T. E. Ş., & Şükrü, Ö. Z. E. N. Güneş Enerjisi Santrallerinde Elektromanyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruziyet Analizi. *EMO Bilimsel Dergi*, 11(Özel Sayı), 64-69.
- 2- Akgül, A., Bedeloğlu, M., Topçu, Ç., Sever, R., Özkan, Ö., Özkan, Ö., ... Uysal, H.(2014). Çok Kanallı Kol Yüzey EMG Kayıtlarında 24 Farklı Hareket Grubu İçin Kanal Etkinliğinin Araştırılması . 18. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (pp.1-4). İstanbul, Turkey
- 3- Topcu, C., Akgul, A., Bedeloglu, M., Doger, E. N., Sever, R., Ozkan, O., ... & Colak, O. H. Muscle Activity Detection for Basic Movements in Patients with Face Transplantation.
- 4- Uysal, H., Topçu, Ç., Özkan, Ö., Özkan, Ö., Barçın, N. E., Akgül, A., ... Bedeloğlu, M.(2015). Yüz nakli olgularında duygu ifadelerinin elektrofizyolojik olarak değerlendirilmesi . 31. Ulusal Klinik Nörofizyoloji EEG-EMG Kongresi (pp.1). Antalya, Turkey
- 5- Topçu, Ç., Akgül, A., Bedeloğlu, M., Döğer, E. N., Sever, R., Özkan, Ö., ... Özkan, Ö.(2015). Yüz Hareketlerinin Sınıflandırılması için Yüzey EMG İşaretlerinin Entropi Analizi . 23. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (pp.1-4). Malatya, Turkey
- 6- Bedeloğlu, M., Topçu, Ç., Döğer, E. N., Akgül, A., Sever, R., Özkan, Ö., ... Özkan, Ö.(2015). Yüz Transplantasyon Hastasında Duysal İfade Gelişiminin Görüntü Temelli Analizi . TIPTEKNO2015 (pp.1-4). Muğla, Turkey
- 7- Topçu, Ç., Bedeloğlu, M., Akgül, A., Sever, R., Özkan, Ö., Özkan, Ö., ... Uysal, H.(2014). Yüzey EMG İşaretlerinin Higuchi Fraktal Boyutu ile Analizi ve Etkin Elektrot Bölgelerinin Tespiti . 18. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (pp.1-4). İstanbul, Turkey