



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**GAN ANAHTARLAMA ELEMANLARI  
KULLANILARAK SMPS TASARIMI VE  
SİLİKON BAZLI TASARIMLA  
KARŞILAŞTIRMA**

---

GÖRKEM SAVAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği-Türkçe Anabilim Dalı  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

İSTANBUL, 2025

---



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**GAN ANAHTARLAMA ELEMANLARI  
KULLANILARAK SMPS TASARIMI VE  
SİLİKON BAZLI TASARIMLA  
KARŞILAŞTIRMA**

---

GÖRKEM SAVAŞ

523121038

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği-Türkçe Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

İSTANBUL, 2025

---

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, "GaN Anahtarlama Elemanları Kullanılarak SMPS Tasarımı ve Silikon Bazlı Tasarımla Karşılaştırma" başlığı altında güç elektroniği alanında GaN teknolojisinin, silikon teknolojisine göre avantajlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Tez sürecinde, gerek teorik gerekse uygulamalı düzeyde önemli katkılar sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, tez sürecinde sağladığı rehberlik, sürekli desteği ve derinlemesine bilgisi ile bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasında büyük rol oynamıştır. Ayrıca, tez sürecinde bana destek olan aileme, arkadaşlarıma ve akademik çevreme teşekkür ederim. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında katkısı olan her bireye şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular ve tasarımlar, güç elektroniği alanında GaN teknolojisinin potansiyelini daha iyi anlamamıza katkı sağlamakta ve bu teknolojiyi pratik uygulamalarda daha verimli bir şekilde nasıl kullanabileceğimizi ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın, ilgili alanlarda gerçekleştirilecek gelecekteki araştırmalara katkı sağlayacak bir temel oluşturması beklenmektedir.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
SEMBOLLER/SYMBOLS .....	vi
KISALTMALAR/ABBREVIATIONS .....	vii
ŞEKİLLER .....	viii
TABLolar.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	2
2. GENEL BİLGİLER.....	8
2.1. İzole Olmayan Topolojiler .....	9
2.1.1. Buck (Düşürücü) dönüştürücüler .....	10
2.1.2. Boost (Yükseltici) dönüştürücüler.....	10
2.1.3. Buck-Boost dönüştürücüler .....	11
2.2. İzole Topolojiler .....	12
2.2.1. Forward (İleri) dönüştürücüler .....	12
2.2.2. Flyback dönüştürücüler .....	13
3. TEORİK HESAPLAMALAR VE BENZETİMLER.....	16
3.1. Teorik Hesaplamalar.....	17
3.2. Benzetim Modelleri .....	26
3.2.1. GaN Tabanlı Tasarımın Benzetim Analizi .....	27
3.2.1.1. Devre analizi.....	28
3.2.1.2. Verimlilik ve termal performans analizi.....	34
3.2.2. Si Tabanlı Tasarımın Benzetim Analizi .....	38
3.2.2.1. Devre analizi.....	39
3.2.2.2. Verimlilik ve termal performans analizi.....	43
4. FİZİKSEL TASARIM VE ANALİZİ .....	46
4.1. Tasarım ve Prototipleme.....	46

4.2. GaN Tabanlı Devre Tasarımına Ait Ölçümler .....	52
4.3. Si Tabanlı Devre Tasarımına Ait Ölçümler.....	57
5. KARŞILAŞTIRMA VE SONUÇ .....	62
5.1. Verimlilik .....	62
5.2. Termal Performans .....	64
5.3. Maliyet.....	65
5.4. Sonuç .....	66

## ÖZET

Günümüzde güç elektroniği alanında kullanılan dönüştürücülerde yüksek verimlilik ve kompakt tasarım ön planda tutulmaktadır. Özellikle, GaN (Galyum Nitrür) tabanlı anahtarlama elemanları, silikon tabanlı elemanlara göre daha yüksek verimlilik, daha düşük ısı kayıp ve daha küçük boyutlar sunarak önemli bir avantaj sağlamaktadır. GaN teknolojisinin, güç dönüştürücü tasarımlarında sağladığı bu üstünlük, güç elektroniği sistemlerinin performansını artırmakta ve daha verimli enerji dönüşümünü mümkün kılmaktadır.

Bu tez, GaN tabanlı anahtarlama elemanları ile tasarlanan bir flyback dönüştürücüsünün silikon tabanlı tasarım ile karşılaştırılmasını ele almaktadır. Çalışmanın amacı, GaN teknolojisinin flyback dönüştürücü tasarımlarında sağladığı verimlilik artışı ve kompaktlık avantajlarını incelemektir. Çalışma kapsamında, ilk olarak bir güç kaynağı devresi, GaN tabanlı flyback kontrol entegresiyle tasarlanmış ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ardından, gerçekleştirilen bu tasarım fiziksel olarak oluşturulmuştur ve test edilmiştir. Sonrasında oluşturulan tasarımdaki flyback kontrolcüsü, silikon bazlı bir kontrolcüyle değiştirilmiş ve bu tasarım da aynı analizlere ve testlere tabii tutulmuştur.

Tasarımlar karşılaştırıldığında, GaN tabanlı devrenin silikon tabanlı devreye kıyasla daha düşük ısı kayıpları ile daha yüksek verimlilik sunduğu ve daha küçük boyutlarda tasarlanabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, her iki tasarımda da enerji verimliliği, güvenlik önlemleri ve izolasyon gibi parametreler incelenmiş ve GaN tabanlı tasarımın bu alanlarda daha avantajlı olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçların ışığında bu çalışma, GaN teknolojisinin güç elektroniği uygulamalarında, özellikle flyback dönüştürücü gibi yüksek verimlilik gerektiren tasarımlarda nasıl bir fark yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

## **ABSTRACT**

In today's power electronics, high efficiency and compact design are prioritized in converters. Particularly, GaN (Gallium Nitride) based switching elements offer significant advantages over silicon-based elements, providing higher efficiency, lower thermal losses, and smaller sizes. The superiority of GaN technology, especially in power converter designs, enhances the performance of power electronics systems and enables more efficient energy conversion.

This thesis focuses on comparing a GaN-based flyback converter design with silicon-based designs. The aim of the study is to examine the efficiency increase and compactness advantages provided by GaN technology in flyback converter designs. Initially, a power supply circuit was designed using a GaN-based flyback control IC and simulated. Then, this circuit design was physically implemented and tested. Subsequently, the flyback controller in the circuit was replaced with a silicon-based controller and this design was subjected to the same analyses and tests.

When the two designs are compared, it is observed that the GaN-based circuit offers higher efficiency with lower thermal losses compared to the silicon-based circuit and can be designed in smaller sizes. Additionally, parameters such as energy efficiency, safety measures, and isolation were examined in both designs, GaN-based design has been shown to be more advantageous in these areas. According to the findings, this study reveals how GaN technology can make a difference in power electronics applications, especially in designs requiring high efficiency such as flyback converters.

## SEMBOLLER/SYMBOLS

$V_{IN}$	: Giriş Gerilimi
$V_{OUT}$	: Çıkış Gerilimi
$V_{OR}$	: Reflected (Yansıma) gerilimi
$V_{DC}$	: DC gerilim
$V_{AC}$	: AC gerilim
$V_{DS}$	: Drain-source gerilim
$P_O$	: Çıkış Gücü
$P_{in}$	: Giriş Gücü
$f_L$	: Hat frekansı
$f_{sw}$	: Anahtarlama frekansı
$t_C$	: Giriş diyotu iletim süresi
$C_{in}$	: Giriş Kapasitansı
$I_{LOAD}$	: Yük Akımı
$n$	: Verimlilik
$C_D$	: Drain Kapasitansı
$D$	: Duty Cycle (Görev Döngüsü)
$L_P$	: Primer İndüktansı
$N$	: Sarım Sayısı
$PIV$	: Maksimum Ters Gerilim
$R_{DS(ON)}$	: Açık Durum Direnci
$C_{oss}$	: Çıkış Kapasitansı
$B_{max}$	: Maksimum Akı Yoğunluğu
$A_e$	: Çekirdek Kesit Alanı

## **KISALTMALAR/ABBREVIATIONS**

**SMPS** : Switch Mode Power Supply(Anahtarlamaalı Güç Kaynağı)

**SiC** : Silikon Karbür

**Si** : Silikon

**GaN** : Galyum Nitrit

**LED** : Light-emitting Diode (Işık Yayan Diyot)

**CRT** : Cathode Ray Tube (Katot Işımı Tüpü)

**EMC** : Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)

**EMI** : Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)

**PWM** : Pulse Width Modulation (Sinyal Genişlik Modülasyonu)

**CCM** : Continuous Conduction Mode (Sürekli İletim Modu)

**DCM** : Discontinuous Conduction Mode (Aralıklı İletim Modu)

**HEMT**: High-electron-mobility Transistor (Yüksek Elektron Hareketliliğine Sahip Transistor)

## ŞEKİLLER

Şekil 2.1: Buck Dönüştürücünün Devre Şeması .....	10
Şekil 2.2: Boost Dönüştürücünün Devre Şeması .....	11
Şekil 2.3: Buck-Boost Dönüştürücünün Devre Şeması .....	11
Şekil 2.4: İleri Dönüştürücünün Devre Şeması [15] .....	13
Şekil 2.5: Flyback Dönüştürücülerin Devre Şeması [19].....	14
Şekil 3.1: InnoSwitch3-EP Uygulama Şeması [23] .....	18
Şekil 3.2: GaN Tabanlı Anahtarın Referans Tasarımı [24].....	19
Şekil 3.3: Tepe $V_{DS}$ Değerleri [27] .....	25
Şekil 3.4: GaN Tabanlı Tasarımın Devre Şeması .....	28
Şekil 3.5: GaN Tabanlı Tasarımın Primer Başlangıç Durum Grafiği(@265V).....	30
Şekil 3.6: GaN Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafiği(@265V) .....	30
Şekil 3.7: GaN Tabanlı Tasarımın Sekonder Kararlı Durum Grafikleri(@265V).....	31
Şekil 3.8: GaN Tabanlı Tasarımın Geribesleme ve Bypass Gerilim Grafikleri(@265V) .....	32
Şekil 3.9: GaN Tabanlı Tasarımın Çıkış Değerleri(@265V).....	32
Şekil 3.10: GaN Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafikleri(@85V).....	33
Şekil 3.11: GaN Tabanlı Tasarımın Çıkış Değerleri Grafiği(@85V) .....	34
Şekil 3.12: GaN Tabanlı Tasarımın Verimlilik – Yük İlişkisi (@230V).....	36
Şekil 3.13: GaN Tabanlı Tasarımın Verimlilik-Giriş Gerilimi İlişkisi (@Tam Yük) ...	36
Şekil 3.14: GaN Tabanlı Tasarımın Benzetim Sonuçlarına Dayanan Tahmini Kayıpları .....	37
Şekil 3.15: Si Tabanlı Tasarımın Primer Taraf Başlangıç Durum Grafiği(@265V) .....	39
Şekil 3.16: Si Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafiği(@265V) .....	40
Şekil 3.17: Si Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafiği(@85V) .....	41

<b>Şekil 3.18:</b> Si Tabanlı Tasarımın Sekonder Kararlı Durum Grafikleri .....	42
<b>Şekil 3.19:</b> Si Tabanlı Tasarımın Çıkış Grafikleri .....	42
<b>Şekil 3.20:</b> Si Tabanlı Tasarımın Yük Oranı-Verimlilik Grafiği(@230V).....	43
<b>Şekil 3.21:</b> Si Tabanlı Tasarımın Giriş Gerilimi-Verimlilik İlişkisi (@Tam Yük).....	44
<b>Şekil 3.22:</b> Si Tabanlı Tasarımın Benzetim Sonuçlarına Dayanan Tahmini Kayıpları .	44
<b>Şekil 4.1:</b> Devrenin Şematik Tasarımı .....	47
<b>Şekil 4.2:</b> Devrenin PCB Tasarımı a) Üstten Görünüş b) Alttan Görünüş .....	48
<b>Şekil 4.3:</b> Baskı Devre Kartı a) Üstten Görünüş b) Alttan Görünüş.....	49
<b>Şekil 4.4:</b> Prototip Kart a) Üstten Görünüş b) Alttan Görünüş .....	50
<b>Şekil 4.5:</b> Devrenin Analiz Düzenegi ve Araçları.....	51
<b>Şekil 4.6:</b> Devrenin Gerilim ve Akımının Ölçüm Yöntemi .....	52
<b>Şekil 4.7:</b> Osiloskop ve Elektronik Yük Bağlantıları.....	52
<b>Şekil 4.8:</b> GaN Tabanlı Entegre .....	53
<b>Şekil 4.9:</b> GaN Tabanlı Tasarımın Başlangıç Durumu Akım ve Gerilim Grafikleri .....	53
<b>Şekil 4.10:</b> GaN Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi (@265V).....	54
<b>Şekil 4.11:</b> GaN Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi (@85V).....	55
<b>Şekil 4.12:</b> GaN Tabanlı Tasarımın Alt Yüzey Termal Kamera Görüntüsü.....	57
<b>Şekil 4.13:</b> Si Tabanlı Entegre.....	57
<b>Şekil 4.14:</b> Si Tabanlı Tasarımın Başlangıç Durum Grafikleri(@265V) .....	58
<b>Şekil 4.15:</b> Si Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi(@265V).....	59
<b>Şekil 4.16:</b> Si Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi(@85V).....	60
<b>Şekil 4.17:</b> Si Tabanlı Tasarımın Alt Yüzey Termal Kamera Görüntüsü.....	61
<b>Şekil 5.1:</b> GaN ve Si Tabanlı Kontrolcülerde Sıcaklık - $R_{DS(ON)}$ ilişkisi.....	63
<b>Şekil 5.2:</b> GaN ve Si Tabanlı Tasarımların Verimlilik-Çıkış Gücü İlişkisi (@85V).....	63

**Şekil 5.3:** GaN ve Si Tabanlı Tasarımların Verimlilik-Çıkış Gücü İlişkisi (@265V)... 64

**Şekil 5.4:** GaN ve Si Tabanlı Anahtarların Farklı Yük Koşullarında Bileşim-Ortam Sıcaklık Artışı (°C)..... 65

## TABLULAR

<b>Tablo 1.1:</b> Benzer Çalışmalar .....	6
<b>Tablo 2.1:</b> Anahtarlama Güç Kaynağı Topolojilerinin Özellikleri .....	9
<b>Tablo 3.1:</b> GaN Tabanlı Tasarımın Parametreleri .....	18
<b>Tablo 3.2:</b> Tavsiye Edilen Giriş Kapasitans Değerleri [25] .....	20
<b>Tablo 3.3:</b> Yansıma Voltajı Değeri.....	21
<b>Tablo 3.4:</b> GaN Tabanlı Tasarımın PI Expert Çıktıları .....	35
<b>Tablo 4.1:</b> GaN Tabanlı Tasarımın Verimlilik Analizi .....	56
<b>Tablo 4.2:</b> Si Tabanlı Tasarımın Verimlilik Analizi.....	61

## 1. GİRİŞ

Günümüz enerji dönüşüm sistemleri, artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve taşınabilir cihazların yaygınlaşmasıyla birlikte hem bireysel hem de endüstriyel alanlarda kritik bir rol oynamaktadır. Sistemlerin verimliliğini artırmak ve boyutlarını küçültmek, sürdürülebilirlik hedefleri ve kullanıcı beklentileri açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle düşük güç uygulamalarında, enerji kayıplarını azaltmak ve maliyetleri düşürmek, mühendislik tasarımlarında karşılaşılan temel zorluklar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, enerji dönüşüm topolojileri ve kullanılan yarı iletken teknolojilerinin seçimi, sistem performansını doğrudan etkilemektedir.

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, flyback topolojisi; basit tasarımı, yüksek izolasyon kabiliyeti ve uygun maliyetli yapısıyla düşük ve orta güç uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Beyaz eşya, televizyon, bilgisayar adaptörleri, cep telefonları ve çeşitli endüstriyel kontrol üniteleri gibi birçok cihazda yaygın şekilde kullanılan flyback dönüştürücüler, maliyet etkinliği ve güvenilirliği bir arada sunabilmektedir.

Uzun yıllardır, güç elektroniği sistemlerinde silikon tabanlı anahtarlama elemanları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, silikon tabanlı elemanların yüksek anahtarlama kayıpları ve düşük sıcaklık dayanımı gibi kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar, daha yüksek verimliliğe, düşük kayıplara ve daha iyi termal performansa duyulan ihtiyacı karşılamakta bazı noktalarda yetersiz kalmaktadır. Silikon (Si) yarı iletken malzemeler, bu sorunlara kısmen çözüm getirse de özellikle düşük güçlü ve kompakt sistemlerde maliyet etkinliği ve küçük boyut gereksinimlerini tam anlamıyla karşılamakta zorlanmaktadır.

Elektronik endüstrisinin hızla ilerlemesi ve enerji dönüşümünde daha verimli çözümler arayışı, silikon teknolojisinin sınırlamalarını ortaya çıkarmış ve alternatif malzemelere olan ilgiyi artırmıştır. Bu doğrultuda, Galyum Nitrür (GaN) anahtarları, düşük iletim direnci ve azaltılmış parazitik kapasitansları sayesinde, yüksek frekanslı ve yüksek verimli anahtarlama güç kaynaklarında üstün performans özellikleriyle silikonun yerini alabilecek güçlü bir seçenek olarak öne çıkmaktadır [1]. Yüksek anahtarlama hızları, GaN elemanlarının daha küçük pasif bileşenler ile çalışmasına olanak tanır, böylece güç dönüştürücü tasarımlarının boyutları küçülürken verimlilik artırılabilir.

GaN teknolojisi; LED aydınlatma sistemleri, bilgisayar adaptörleri, beyaz eşyalar, akıllı telefon şarj cihazları ve diğer düşük güçlü taşınabilir cihazlar gibi birçok uygulamada hızlı bir şekilde kendine kullanım alanı bulmayı başarmıştır. Bu teknolojinin sunduğu özellikler sayesinde, cihazın genel maliyet etkinliği artırılırken güvenilirliği ve ömrü de olumlu yönde etkilenmektedir.

Bu tez çalışmasında, GaN tabanlı anahtarlama elemanları kullanılarak tasarlanmış bir flyback dönüştürücü, silikon tabanlı bir yapıyla hem benzetim programı kullanılarak hem de fiziksel olarak gerçekleştirilen devre tasarımları üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, orta güçlü (47,5W) GaNFET'li bir sistem ile yine aynı güç seviyesinde silikon tabanlı MOSFET'li anahtarlama elemanı kullanılan diğer sistem; verimlilik, anahtarlama frekansı ve anahtarlama kaybı gibi bazı parametreler açısından karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, GaN teknolojisinin sunduğu avantajlar ve dezavantajlar analiz edilerek, gelecekteki uygulamalar için potansiyel faydaları değerlendirilmiştir.

### **1.1. Literatür Araştırması**

Flyback dönüştürücülerin tasarımı ve anahtarlama elemanlarının seçimi üzerine yapılan çalışmalar, güç elektroniği literatüründe geniş bir yer tutmaktadır. Güç dönüştürücü sistemlerde anahtarlama elemanlarının performansı, sistemin genel verimliliğini ve maliyetini belirleyen en kritik faktörlerden biridir.

GaN tabanlı yarı iletkenler, düşük güç kayıpları, yüksek anahtarlama hızları ve kompakt tasarımlara olanak sağlaması gibi özellikleri ile literatürde dikkat çeken bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, GaN teknolojisinin avantajlarının deneysel sonuçlarla desteklenmesi ve bu teknolojinin sınırlamalarının detaylı bir şekilde ele alınması, son yıllarda yapılan araştırmaların ana odak noktalarından biri olmuştur. Literatürde, GaN tabanlı dönüştürücülerin performans analizlerine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte, bu sistemlerin silikon tabanlı tasarımlarla doğrudan karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır.

Bu bölümde, flyback dönüştürücülerde kullanılan anahtarlama elemanlarına yönelik teorik ve deneysel çalışmalar incelenmiş, GaN ve silikon tabanlı elemanlar arasındaki farklılıklar literatürler çerçevesinde örneklendirilmiştir.

K. Varadarajan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, GaN FET tabanlı flyback güç kaynaklarının ani gerilim artışlarına (surge) dayanıklılığı test edilerek, bu teknolojinin geniş ölçekli tüketici elektroniği uygulamalarında kullanılmaya hazır olduğu gösterilmiştir. IEC 61000-4-5 ve VDE 0884-11 standartlarına göre yapılan testlerde, GaN FET'lerin 800V'un üzerindeki geçici gerilimlerde bile zarar görmeden çalışmaya devam ettiği ve dönüştürücü verimliliğinde herhangi bir kayıp yaşanmadığı tespit edilmiştir. Bu dayanıklılık, GaN elemanlarının, maliyet odaklı tüketici elektroniği ürünlerinde güvenle kullanılabilmesini ortaya koymaktadır [2].

J. Puukko ve arkadaşlarının GaN tabanlı flyback dönüştürücülerin tasarımı ve analizine yönelik sunmuş oldukları çalışmada, özellikle GaN cihazlarının yüksek  $dV/dt$  özellikleri nedeniyle güç ve gate döngülerinin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada sistem tasarımı, EPC'nin 200V/12A GaN elemanları kullanılarak yapılmıştır ve gate sürücü tasarımı ve snubber devrelerinin seçimi konusu üzerinde oldukça durulmuştur. Ayrıca, yüksek frekanslı transformatörlerin seçiminde kayıplar detaylı bir şekilde incelenmiş ve farklı iletim modlarında (CCM, BCM, DCM) verimlilik analizleri yapılmıştır. En yüksek verimlilik, BCM modunda valley switching ile elde edilmiştir [3].

GaN tabanlı güç kaynaklarının termal performansını konu alan bir çalışmada, GaN cihazlarının düşük iletim ve anahtarlama güç kaybı özellikleri nedeniyle güç elektroniğinde devrim yaratıcı bir teknoloji sunduğu ifade edilmiştir. Ancak, bu cihazların küçük boyutlarından dolayı, yüksek güç dönüştürücülerinde kullanılabilmesi için yeni soğutma metotlarının ele alınması gerekliliğinden bahsedilmiştir. Bu çalışmada, GaN tabanlı kompakt güç dönüştürücüler geliştirmek için en uygun soğutma çözümünü bulmak amacıyla farklı soğutma yapıları karşılaştırmaktadır. Önerilen ısıl analiz ve performans karşılaştırması, üst ve alt yüzeyden soğutma çözümleri karşılaştırılarak deneysel olarak doğrulanmıştır [4].

GaN tabanlı flyback kontrolcüsü ile yapılan bir çalışmada, yüksek anahtarlama frekansı ve verimliliğin güç adaptörü boyutunu küçültmedeki önemi araştırılmıştır. Active clamp flyback (ACF) topolojisinin tüm hat ve yük koşullarında sıfır gerilimle anahtarlama sağladığı, aynı zamanda sızıntı endüktansı ve snubber kayıplarını azalttığı gösterilmiştir. GaN anahtarlayıcıların kullanılması sayesinde anahtarlama frekansı 5-10 kat artmış ve verimlilik iyileştirmiştir. Çalışmada, kritik iletim modunda çalışan yüksek frekanslı

ACF'nin çalışma prensipleri ve akım dalga biçimleri, detaylı eşdeğer devreler ve analitik modellerle açıklanmıştır. Ayrıca, sinyal akımı dalga biçimini optimize eden yeni bir ikinci taraf rezonans konsepti önerilmiş ve bu yöntem, 45W'lık yüksek yoğunluklu adaptör prototipiyle doğrulanmıştır [5].

Bir başka çalışmada, GaN tabanlı güç transistörlerinin normalde açık anahtarlama davranışını kullanarak quasi-rezonant flyback dönüştürücüsünün uygulanabilirliği gösterilmiştir. GaN ve silikon tabanlı MOSFET'ler karşılaştırılarak elektriksel özellikler ve güç kayıpları incelenmiştir. Çalışmaya göre, quasi-rezonant teknoloji, açılma kayıplarını azaltarak verimliliği artırmakta ve cihaz sıcaklığını düşürmektedir. Ayrıca, GaN'in çıkış kapasitansı ve iletim direnci avantajları sayesinde Silisyum transistörlere göre, %7,02 daha yüksek verimlilik sağladığı bildirilmiştir. Bu da GaN transistörlerinin güç elektroniği uygulamalarında potansiyel faydalarını göstermektedir [6].

F. Cacciotto ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada GaN teknolojisinin yüksek verimli dönüştürücülerde kullanılma potansiyeli detaylı bir şekilde ele alınmıştır. GaN'in özelliklerinden faydalanan farklı flyback topolojileri, verimlilik performansı açısından analiz edilmiştir. Son olarak, her bir topolojinin avantajları ve dezavantajları detaylı bir şekilde tartışılmıştır [7].

Bir DC-DC dönüştürücü tasarımı çalışmasında, GaN tabanlı FET'lerin güç ve anahtarlama verimliliği incelenmiş ve aynı devre topolojisinde silikon tabanlı cihazlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma, çeşitli giriş koşulları ve çıkış yükleri (R, RC, RL, RLC) altında analiz edilmiştir. Önerilen topoloji, %99,6'ya kadar maksimum güç dönüştürme verimliliği sağlamak ve 1 MHz'in üzerindeki yüksek frekanslarda çalışabilmektedir. Sunulan GaN tabanlı flyback modeli, yüksek güç verimliliği ve anahtarlama hızı gerektiren kompakt cihazlarda Si tabanlı anahtarlayıcıların yerini alabileceğini kanıtlar niteliktedir [8].

Bir diğer flyback dönüştürücü çalışmasında, GaN tabanlı 100 W'lık bir dönüştürücü, silikon (Si) tabanlı bir dönüştürücü ile karşılaştırılmaktadır. Her iki dönüştürücü de %80 verimlilik hedefiyle tasarlanmış ve anahtarlama frekansları belirlenmiştir. Sonuçlar, GaN tabanlı dönüştürücünün, Si tabanlı dönüştürücünün yaklaşık on katı daha yüksek anahtarlama frekansında çalışabildiğini ve bu durumun flyback transformatörünün hacmini altı kat azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, GaN tabanlı dönüştürücülerde

çıkış kapasitansı, Si tabanlı dönüştürücülere göre on kat daha düşük olup, bu da çıkış kapasitörlerinin boyutunun küçülmesini sağlamaktadır. Bu bulgular, GaN tabanlı dönüştürücülerde güç yoğunluğunun önemli ölçüde arttığını ortaya koymaktadır [9].

Taşınabilir cihazlar için 65 Watt'lık USB-C ve USB-A çıkışlı şarj cihazı tasarımını ele alan bir başka çalışmada, AC-DC dönüşümünde tipik silikon transistör yerine GaNFET anahtarlar kullanılmıştır. Çalışmada, GaNFET'lerin arka planı ve daha düşük  $RDS_{ON}$  direnci ile parazitik kapasitansların verimliliği artıran avantajları tartışılmaktadır. Ayrıca, 65W USB şarj cihazının temel devre topolojisi ve GaNFET kullanılarak elde edilen verimlilik sonuçları ele alınmıştır [10].

D. Arseniuk ve Y. Zinkovsky'nin yapmış olduğu bir çalışmada, yüksek frekanslı anahtarlama kayıpları minimize etmek amacıyla GaN tabanlı HEMT kullanılan flyback dönüştürücülerinin optimizasyonunu ele alınmıştır. Çalışma, GaN HEMT'lerinin silikon transistörlerine göre üstün özelliklerini vurgulayarak, anahtarlama kayıplarını azaltmaya yönelik devre tasarım yöntemlerine odaklanmıştır. Bilgisayar benzetimleri kullanılarak, farklı parametrelerin cihazın performansı ve verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, verimlilik ve güvenilirliği artırmak için kullanılan devre topolojileri, transistor sürücüleri ve snubber devrelerinin önemini ortaya koymakta ve güç kaynaklarına ihtiyaç duyan uygulamalar için rehberlik sağlamaktadır [11].

Bir çalışmada, 600 V'luk GaN anahtarları ve diyotları, IGBT ve MOSFET gibi silisyum tabanlı cihazlarla karşılaştırılarak detaylı testlere tabi tutulmuştur. Deneysel kayıp modelleri, veri sayfası modelleriyle karşılaştırılmış ve bu cihazların anahtarlama kayıpları ile iletim kayıpları analiz edilmiştir. Çeşitli güç dönüştürücülerinin, özellikle boost, buck-boost ve half bridge invertörlerinin, deneysel düzenekleri incelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur. Çalışma, GaN cihazlarının daha yüksek anahtarlama frekanslarına olanak sağlamasının, çevrimdışı UPS sistemleri gibi güç dönüştürme ekipmanlarının boyutunu ve maliyetini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Sonuç olarak, GaN tabanlı cihazların, yüksek performans, daha küçük sistem boyutları ve daha düşük maliyetler sağladığına dair bulgular elde edilmiştir [12].

Bir diğer çalışmada, Galliyum Nitrür (GaN) ve silikon süperjunction (SJ) MOSFET cihazlarının QR Flyback dönüştürücü topolojisinde karşılaştırılması konusu ele alınmıştır. GaN cihazlarının düşük on-state direnci ve gate charge değeri sayesinde daha

düşük iletim kayıpları ve daha yüksek verimlilik sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlar, dönüştürücünün tasarımı GaN için optimize edilmemiş olsa bile GaN tabanlı QR Flyback dönüştürücüsünün, silikon MOSFET'lere göre %0.8 daha yüksek verimlilik sunduğunu ve anahtarlama güç kayıplarını azalttığını göstermektedir. Bu bulgular, GaN tabanlı tasarımların QR Flyback uygulamalarında önemli performans iyileştirmeleri sağladığını doğrulamaktadır [13].

Yukarıda aktarılan literatür çalışmaları arasından bu tezde odaklanılan konuya en yakın olan çalışmalar Tablo 1.1'de verilmiştir. Bu çalışmalardan da görüldüğü üzere, GaN tabanlı anahtarlayıcılar düşük iletim kayıpları, yüksek anahtarlama hızları ve kompakt yapı avantajları ile flyback dönüştürücü tasarımlarında öne çıkmaktadır. Ancak bu çalışmaların çoğu ya yalnızca benzetim tabanlıdır ya da belirli prototip koşulları altında gerçekleştirilmiş sınırlı analizler sunmaktadır. Ayrıca, farklı yarı iletken teknolojilerinin aynı mimari altında, benzer çalışma şartlarıyla fiziksel olarak karşılaştırıldığı çalışmalara literatürde nadiren rastlanmaktadır. Bu tez çalışmasında ise hem GaN hem de Si tabanlı flyback dönüştürücüler fiziksel olarak tasarlanmış ve benzer koşullarda performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir diğer dikkat çekici yönü, bu karşılaştırmanın doğrudan SMPS entegreleri özelinde yapılmış olmasıdır. Bu yönüyle tez, mevcut literatürden farklı olarak entegre seviyesinde bir değerlendirme sunmaktadır.

**Tablo 1.1:** Benzer Çalışmalar

Referans No	Yazar	Yıl	Çalışma İçeriği	Si ile GaN Karşılaştırması	Çıkış Gücü (W)	Maksimum Verimlilik (%)
[5]	X. Lingxiao ve arkadaşları	2017	GaN tabanlı active clamp flyback kontrolcüsü ile yapılan bu çalışmada, yüksek anahtarlama frekansı ve verimliliğin güç adaptörü boyutunu küçültmedeki önemi araştırılmıştır.	Yok	45	94,50

[6]	S. Jeng ve arkadaşları	2012	Bu çalışmada, GaN ve silikon tabanlı MOSFET'lerin elektriksel özellikleri ve güç kayıpları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, QR anahtarlama teknolojisi, GaN'in düşük çıkış kapasitansı ve iletim direnci avantajları sayesinde, silikon transistörlere kıyasla %7,02 daha yüksek verimlilik elde edilmesine ve cihaz sıcaklığının düşürülmesine olanak sağlamaktadır.	Var	60	96,10
[9]	R. Nune ve arkadaşları	2016	Bu çalışmada, GaN ve Si tabanlı flyback dönüştürücüler güç yoğunluğu açısından karşılaştırılmıştır. GaN dönüştürücüsü, Si'ye kıyasla yaklaşık on kat daha yüksek anahtarlama frekansında çalışarak transformator hacmini altı kat, çıkış kapasitör boyutunu ise on kat azaltmıştır. Sonuç olarak, GaN tabanlı dönüştürücüde %92 oranında güç yoğunluğu (W/cm <sup>3</sup> ) artışı elde edilmiştir.	Var	100	-
[10]	S. Simhadri ve arkadaşları	2024	USB-C ve USB-A çıkışlı şarj cihazı tasarımını ele alan bu çalışmada, AC-DC dönüşümünde, GaNFet'lerin arka planı ve daha düşük RDSon direnci ile parazitik kapasitanslarının verimlilik yönünden avantajları tartışılmıştır.	Yok	65	92.4
[13]	G. Mauromicale ve arkadaşları	2019	Bu çalışmada, QR flyback topolojisinde silikon Si MOSFET ile GaN güç anahtarlarının performansları karşılaştırılmıştır. GaN için özel bir optimizasyon yapılmamasına rağmen, dönüştürücü devresi ile uyumlu çalışması sağlanmış ve %0.8 oranında verimlilik artışı elde edilmiştir. Bu sonuç, iyileşmenin yalnızca GaN teknolojisinin kendisinden kaynaklandığını göstermektedir.	Var	15	80,3

## 2. GENEL BİLGİLER

Elektrik enerjisinin güvenilir, verimli ve yönetilebilir bir şekilde dönüştürülmesi, 20. yüzyılın başlarından itibaren önemli bir mühendislik problemi olmuştur. Anahtarlamalı güç kaynaklarının gelişimi, bu probleme yönelik yenilikçi çözümlerin ortaya çıkmasıyla hız kazanmıştır.

Anahtarlamalı güç kaynaklarının ilk adımları, 1900'lü yılların başlarında kullanılan doğrultucu ve filtre devreleriyle atılmıştır. Ancak bu sistemler, büyük boyutları ve düşük verimlilikleri nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahipti. 1930'larda vakum tüplerinin anahtarlama elemanları olarak devrelerde yer alması, enerji dönüşümü teknolojilerinde dönüm noktası olmuştur. Bu dönemde, elektrik enerjisinin daha etkin bir şekilde dönüştürülmesine yönelik ilk prensipler geliştirilmiştir.

1950'lerin ortalarına gelindiğinde, transistörlerin icadı ile SMPS tasarımlarında devrim niteliğinde değişiklikler gerçekleşmiştir. Transistörler, vakum tüplerine kıyasla çok daha küçük, hafif ve enerji verimliliği yüksek bileşenler olarak öne çıkmıştır. Bu gelişme, SMPS sistemlerini askeri ve endüstriyel uygulamalar için kullanılabilir hale getirmiştir. 1970'ler itibarıyla, mikroişlemci teknolojilerinin gelişmesi ve tüketici elektroniğinin hızla yaygınlaşmasıyla birlikte SMPS tasarımları, daha geniş bir uygulama alanına yayılmıştır. Bu dönemde geliştirilen flyback ve forward topolojileri, özellikle düşük güçlü uygulamalarda devre tasarımcılarına büyük avantajlar sağlamıştır.

1980'ler ve 1990'lar, SMPS teknolojisinde kontrol yöntemlerinin geliştiği ve verimliliğin artırıldığı bir dönem olmuştur. PWM temelli kontrol devreleri, daha hassas güç düzenlemesi ve daha yüksek enerji tasarrufu sağlamıştır. Aynı zamanda, anahtarlama frekanslarının artmasıyla güç kaynağı bileşenlerinin boyutları küçülmüş, bu da cihazların toplam hacmini azaltmıştır.

SMPS tasarımlarında kullanılan yarı iletken teknolojilerindeki yenilikler dikkat çekici bir hızla ilerlemiştir. Silikon tabanlı elemanlar, GaN ve SiC gibi ileri yarı iletken malzemelerle desteklenmeye başlamıştır. Bu malzemeler, SMPS sistemlerinin verimliliğini artırmakla kalmayıp, daha küçük boyutlu ve yüksek performanslı tasarımlara da olanak tanımaktadır. Güç dönüştürücüleri, anahtarlamalı güç kaynakları, telekomünikasyon güç kaynakları, kesintisiz güç kaynakları, enerji depolama sistemleri

ve elektrikli araç batarya şarj cihazları gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanıldıkları için son yıllarda özel bir ilgi görmektedir [14].

Anahtarlama güç kaynakları, temel olarak enerji dönüşümünde kullanılan topolojilere göre Tablo 2.1'deki gibi sınıflandırılır.

**Tablo 2.1:** Anahtarlama Güç Kaynağı Topolojilerinin Özellikleri

TOPOLOJİ	GÜÇ (WATT)	YAKLAŞIK VERİMLİLİK (%)	UNIVERSAL GİRİŞ (85-265 VAC)	ÇOKLU ÇIKIŞ	MANYETİK İHTİYACI
BUCK	500	85	YOK	YOK	TEKİL BOBİN
BOOST	150	70	YOK	YOK	TEKİL BOBİN
BUCK-BOOST	150	70	YOK	YOK	TEKİL BOBİN
ÇUK	150	75	YOK	YOK	ÇİFT BOBİN
SEPIC	150	75	YOK	YOK	ÇİFT BOBİN
FLYBACK	150	75	VAR	VAR	TRAFO VE BOBİN
FORWARD	150	75	VAR	VAR	TRAFO VE BOBİN
HALF BRIDGE	500	85	VAR	VAR	TRAFO VE BOBİN
FULL BRIDGE	500	85	VAR	VAR	TRAFO VE BOBİN
PUSH PULL	500	80	YOK	YOK	TRAFO VE BOBİN

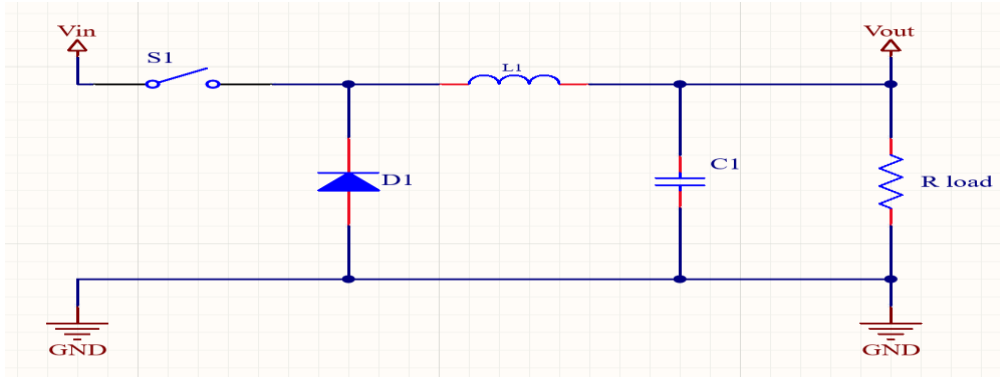
Anahtarlama güç kaynakları tasarımında kullanılan farklı topolojiler, her biri belirli uygulamalara ve gereksinimlere göre avantajlar sunar. En uygun topolojiyi seçebilmek için giriş gerilimi aralığı, çıkış sayısı, dielektrik izolasyon gereksinimi, voltaj ve akım seviyeleri gibi bir dizi faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörler, güç kaynağının tipini (buck, boost, buck-boost), trafo kullanımını ve tasarımın güvenilirliğini etkiler. Ayrıca, trafo primerine uygulanan maksimum voltaj ve görev döngüsü gibi etkenler de doğru topolojiyi seçerken önemli rol oynar. Bu şekilde, her uygulama için en uygun ve verimli güç kaynağı topolojisinin belirlenmesi sağlanır [15].

## 2.1. İzole Olmayan Topolojiler

İzolasyonsuz topolojiler, giriş ve çıkış arasında doğrudan bir elektriksel bağlantının bulunduğu devre yapılarıdır. Bu tip topolojilerde genellikle transformatör kullanılmaz, bu nedenle daha basit bir tasarım sunar ve maliyeti düşüktür. Genellikle düşük güç gereksinimi olan uygulamalarda tercih edilir. Ancak, giriş-çıkış arasında izolasyon olmaması nedeniyle güvenlik gereksinimlerinin daha az olduğu durumlar için uygundur. Bunlardan en sık kullanılanlar buck, boost ve buck-boost dönüştürücülerdir.

### 2.1.1. Buck (Düşürücü) dönüştürücüler

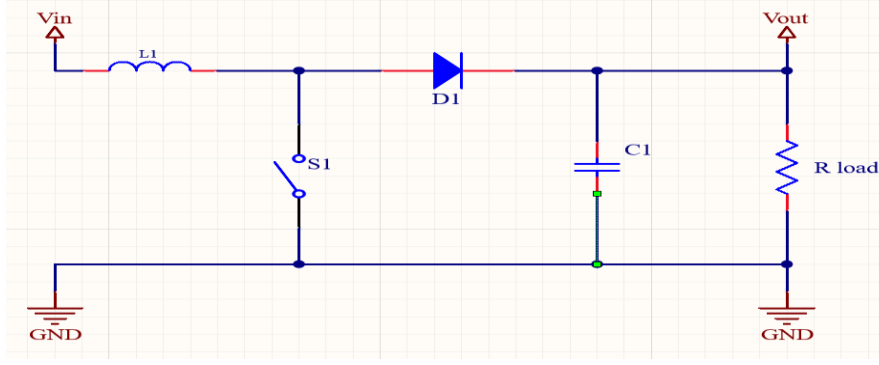
Buck dönüştürücü, girişteki yüksek DC gerilimini daha düşük bir seviyeye indirerek kararlı bir DC çıkış sağlar ve yüksek verimlilik avantajıyla taşınabilir elektronik cihazlardan endüstriyel güç sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çalışma mekanizması; bir anahtarlama elemanının (örneğin; MOSFET) hızlı açma-kapama işlemleri sırasında enerjiyi bir endüktör ve kapasitör kombinasyonu üzerinden yük tarafına aktarmasına dayanır. Bu süreçte dalgalı giriş gerilimi yumuşatılarak sabit bir çıkış sağlanır. Temel devre şemaları Şekil 2.1'deki gibidir. Verimlilikleri %90'a yakındır. Güncel çalışmalar, özellikle kontrol tekniklerindeki gelişmelerle, buck dönüştürücülerin enerji verimliliğini ve yanıt hızını daha da artırmanın mümkün olduğunu ortaya koymaktadır [16].



Şekil 2.1: Buck Dönüştürücünün Devre Şeması

### 2.1.2. Boost (Yükseltici) dönüştürücüler

Boost dönüştürücü, girişteki düşük bir DC gerilimini daha yüksek bir seviyeye çıkarmak için kullanılan etkili bir DC-DC dönüştürücüdür. Bu dönüştürücünün, güneş fotovoltaik panelleri ve yakıt hücreleriyle çalışan sistemler gibi yüksek voltaj kazancı gerektiren düşük giriş voltajlı uygulamalarda kullanımı yaygındır [17]. Çalışma prensibi, bir endüktörün enerjiyi depolayıp anahtarlama elemanlarıyla yük tarafına aktarılmasıdır. Bu işlem sırasında enerji depolama ve aktarım süreçleri arasında yüksek verimlilik sağlanır. Temel devre şemaları Şekil 2.2'deki gibidir.

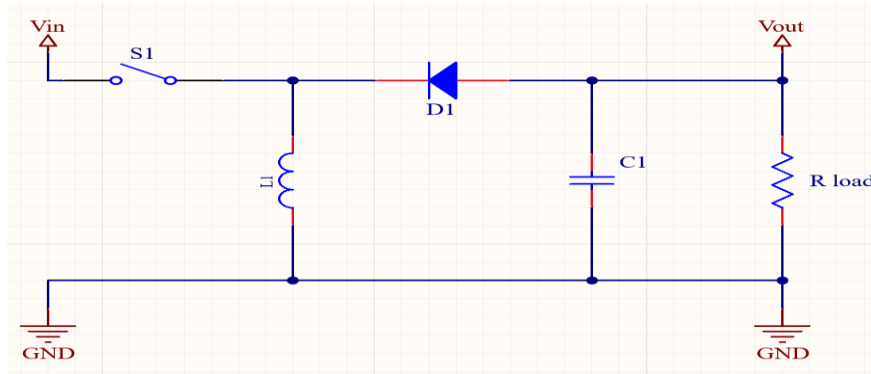


**Şekil 2.2:** Boost Dönüştürücünün Devre Şeması

### 2.1.3. Buck-Boost dönüştürücüler

Buck-boost dönüştürücüler, giriş voltajının hem artırılması hem de azaltılması gereken uygulamalarda kullanılan esnek bir DC-DC dönüştürücü topolojisidir. Bu devre, giriş voltajının hedef çıkış geriliminden daha yüksek veya daha düşük olduğu durumlarda aynı verimlilikle çalışabilir. Çalışma prensibi, buck ve boost modlarını birleştirerek, enerji akışını bir endüktör, anahtarlama elemanı, diyot ve kapasitör ile kontrol etmeye dayanır. Böylece, hem voltaj düşürme (buck) hem de voltaj yükseltme (boost) işlemleri tek bir yapıda gerçekleştirilebilir. Temel devre şemaları Şekil 2.3'deki gibidir.

Bu yapı, özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde, taşınabilir elektronik cihazlarda ve batarya yönetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Gerçek zamanlı uygulamalarda, voltaj aralığındaki değişimler nedeniyle yüksek verimlilikle voltaj artırma ve düşürme dönüşümleri de zorunludur [18]. Modern tasarımlar, daha yüksek verimlilik, düşük enerji kaybı ve geniş voltaj aralığında kararlılık sağlamak için optimize edilmektedir.



**Şekil 2.3:** Buck-Boost Dönüştürücünün Devre Şeması

## 2.2. İzole Topolojiler

İzole güç dönüştürücüler, giriş ve çıkış devreleri arasında elektriksel bağlantıyı keserek izolasyon sağlayan ve bu özellikleriyle güvenlik, gürültü azaltma ve sistem kararlılığı gibi avantajlar sunan önemli bir dönüştürücü ailesidir. Bu izolasyon genellikle bir transformatör yardımıyla gerçekleştirilir ve özellikle farklı topraklama seviyeleri bulunan devrelerde veya yüksek voltajlı uygulamalarda hayati bir rol oynar.

Bu tür dönüştürücüler, enerji transferini etkinleştirmek için anahtarlama elemanları, transformatörler, doğrultucu diyotlar ve filtre bileşenlerini bir arada kullanır. Flyback ve ileri dönüştürücü gibi basit yapılandırmaların yanı sıra, push-pull, yarım köprü ve tam köprü gibi daha karmaşık topolojiler de izole güç dönüştürücü kategorisine girer. Bu çeşitlilik, geniş bir uygulama alanına hitap etmelerini sağlar.

Genellikle telekomünikasyon, tıbbi cihazlar, endüstriyel kontrol sistemleri ve yüksek güçlü enerji dönüştürme ihtiyaçları gibi kritik alanlarda tercih edilirler. İzolasyon gerekliliği bulunmayan izole olmayan topolojilere kıyasla daha karmaşık bir tasarıma ve daha yüksek maliyete sahiptirler.

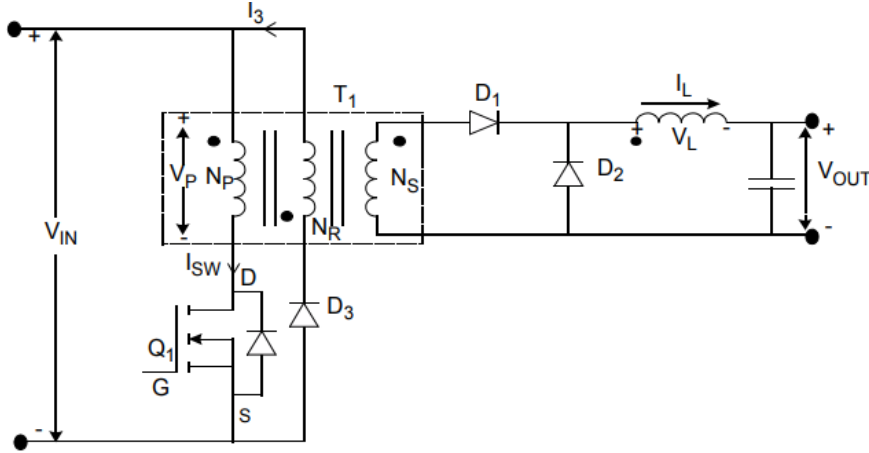
İzole topolojilerden sık kullanılan forward dönüştürücüler ve bu tezdeki uygulamaya konu metodoloji olan flyback dönüştürücüler aşağıdaki başlıklarda detaylandırılmıştır.

### 2.2.1. Forward (İleri) dönüştürücüler

İleri dönüştürücüler, izolasyon gereksinimi olan ve orta-yüksek güç uygulamalarında kullanılan bir anahtarlama güç dönüştürücü topolojisidir. Enerji transferini sağlamak için bir transformatör kullanır ve bu sayede giriş ve çıkış arasında elektriksel izolasyon sağlar. Çalışma prensibi, anahtarlama elemanının açık ve kapalı durumları sırasında transformatörün manyetik alanında enerji depolanması ve bu enerjinin çıkış yüküne aktarılmasına dayanır. Bu süreçte bir diyot ve filtre kapasitörü, çıkışta sabit bir DC voltaj oluşturulmasını sağlar. Bu bakımdan izole edilmiş buck dönüştürücü olarak nitelendirilebilir. Temel devre şemaları Şekil 2.4'deki gibidir.

Tipik kullanım alanları arasında telekomünikasyon sistemleri, endüstriyel kontrol devreleri ve sunucu güç kaynakları yer alır. Elektriksel izolasyon gerektiren yerlerde

sıklıkla tercih edilmesinin yanı sıra, hassas yüklerin kararlı bir şekilde beslenmesini sağlama kabiliyetiyle öne çıkar.



Şekil 2.4: İleri Dönüştürücünün Devre Şeması [15]

### 2.2.2. Flyback dönüştürücüler

Flyback dönüştürücüler, güç elektroniği alanında düşük ve orta güçlü izole edilmiş güç kaynakları için yaygın olarak kullanılan bir topolojidir. Bu dönüştürücü tipi, ilk olarak CRT ekranlarının beslenmesi gibi uygulamalarda ortaya çıkmış olsa da, günümüzde şarj cihazları, LED sürücü devreleri, beyaz eşyalar ve endüstriyel yardımcı güç kaynakları gibi pek çok farklı alanda tercih edilmektedir. Yapısının basitliği ve maliyet etkinliği, özellikle 150 Watt'ın altındaki uygulamalarda flyback dönüştürücülerin en önemli tercih sebeplerindedir.

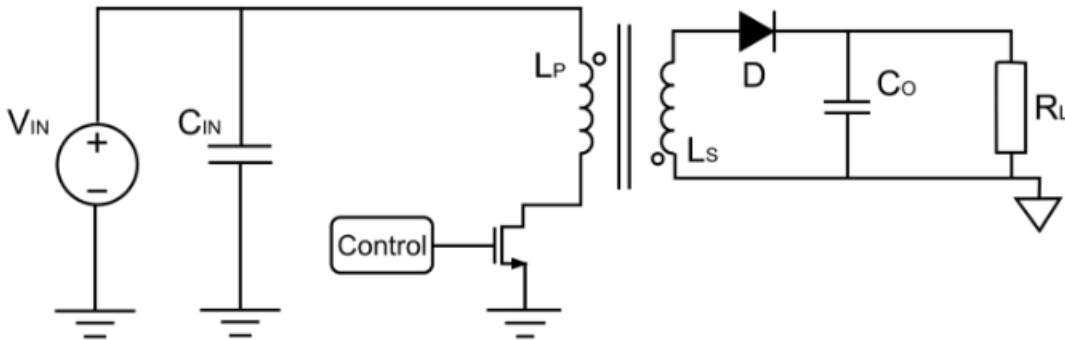
Flyback'in avantajlarından biri de, enerjinin bir transformatör aracılığıyla depolanması ve transfer edilmesi sayesinde, giriş ve çıkış arasında elektriksel izolasyon sağlamasıdır. Bu özellik, yalnızca güvenlik açısından değil, aynı zamanda elektromanyetik uyumluluğun (EMC) artırılması bakımından da kritik öneme sahiptir. Flyback dönüştürücülerin transformatör tabanlı yapısı, farklı giriş ve çıkış voltaj seviyelerine uyum sağlama esnekliği sunarken, sistemlerin kompakt ve düşük maliyetli bir şekilde tasarlanmasına olanak tanır.

Flyback dönüştürücüler her uygulama için ideal bir çözüm sunmaz. Özellikle yüksek güçlü sistemlerde, bu topoloji verimlilik açısından dezavantajlı hale gelebilir. Bunun temel nedenlerinden biri, Flyback transformatörünün enerji depolama işlevini

üstlenmesiyle manyetik tasarımın oldukça karmaşık hale gelmesidir. Uygun bir manyetik çekirdek seçimi yapılmadığında veya transformatörün parametreleri doğru belirlenmediğinde, doygunluk ve yüksek elektromanyetik girişim (EMI) gibi sorunlar ortaya çıkabilir.

Sonuç olarak, Flyback dönüştürücüler, düşük maliyet ve kompakt tasarım gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm sunarken, yüksek güçlü sistemlerde karşılaşılan sınırlamalar nedeniyle diğer topolojilere kıyasla daha az tercih edilmektedir. Yine de, sunduğu avantajlar sayesinde günümüz güç elektroniği sistemlerinde kendine güçlü bir yer edinmiştir.

Flyback dönüştürücülere ait temel devre şeması, Şekil 2.5'teki gibidir. Bu yapıda ilk olarak, giriş gerilimini anahtarlayan bir güç yarı iletkeni yer alır. Devrede bulunan transformatör hem gerilim seviyesinin dönüştürülmesini hem de giriş ile çıkış arasında elektriksel yalıtımı mümkün kılar. Transformatörün sekonder tarafına bağlı doğrultucu eleman, anahtarlama sonucunda oluşan darbeli gerilimi doğru akıma çevirir. Son olarak, çıkış kondansatörü ise gerilimdeki dalgalanmaları sönümleyerek düzgün ve kararlı bir çıkış gerilimi elde edilmesine katkı sağlar. Bu bileşenlerin koordineli çalışması, flyback topolojisinin güvenilir ve etkili bir enerji dönüşüm yöntemi olmasını sağlar.



**Şekil 2.5:** Flyback Dönüştürücülerin Devre Şeması [19]

Flyback dönüştürücü tasarlarken dikkate alınması gereken bazı temel parametreler vardır: giriş voltajı ( $V_{IN}$ ), çıkış voltajı ( $V_{OUT}$ ), primer indüktansı ( $L_P$ ) ve sekonder indüktansı ( $L_S$ ). Bunun yanı sıra, transformatör tasarımı, Flyback uygulamalarında sistem performansını doğrudan etkileyen en kritik unsurlardan biridir. Bir Flyback transformatörünün tasarımı sırasında, çekirdek seçimi, sargı sayıları ve hava boşluğu gibi faktörler dikkatlice değerlendirilmelidir.

Dönüştürücünün sarım sayıları, yani primer ( $N_P$ ) ve sekonder ( $N_S$ ) sargılar arasındaki dönüş oranı, giriş voltajını ( $V_{IN}$ ) istenilen çıkış voltajına ( $V_{OUT}$ ) dönüştürmede belirleyici bir faktördür [20]. Uygun bir dönüş oranı seçimi, dönüştürücünün kararlı çalışmasını sağlar. Örneğin, sekonder sargıdaki sarım sayısının artırılması çıkış voltajını yükseltirken, primer sargının artırılması genellikle çıkış voltajında düşüşe yol açar. Bu nedenle, dönüş oranı tasarlanırken giriş voltajının varyasyonları ve yükün talep ettiği çıkış voltajı aralığı dikkate alınmalıdır.

Bir başka önemli tasarım unsuru ise transformatörün hava aralığıdır. Flyback dönüştürücüde, enerji depolama işlevinin büyük bir kısmı çekirdekte oluşturulan manyetik alana dayanır. Çekirdeğe bir hava aralığı eklemek, mıknatıslanma akımını kontrol ederek doyma riskini azaltır ve enerji depolama kapasitesini artırır. Ancak, hava aralığının fazla büyük olması durumunda kaçak endüktans artabilir ve bu durum anahtarlama elemanlarında istenmeyen gerilim dalgalanmalarına neden olabilir.

Son olarak, koruma mekanizmaları ve izolasyon, flyback dönüştürücülerinin UL 1577 ve IEC 62368 gibi güvenlik standartlarını karşılaması açısından kritik öneme sahiptir. Koruma devreleri, EMI performansını optimize etmek ve cihazın verimsiz ya da zararlı çalışma koşullarına girmesini önlemek için tasarlanmalıdır. Bazı flyback kontrolcü entegrelerde bu tarz uyumlulukları sağlaması için düşük ve yüksek gerilim koruma, aşırı akım koruma gibi fonksiyonlar dahili olarak bulunmaktadır.

### 3. TEORİK HESAPLAMALAR VE BENZETİMLER

Flyback dönüştürücülerde anahtar (switch), devrenin en önemli bileşenlerinden biridir ve sistemin temel işlevlerini yerine getirmesini sağlar. Anahtar eleman, genellikle bir MOSFET veya GaN tabanlı bir transistör olup, enerjinin depolanması ve transferi süreçlerini yönetir. Devrede, giriş voltajının manyetik bir çekirdekte enerji olarak depolanmasını sağlamak için anahtarlama işlemi yapar. Anahtar, açık (iletken) olduğu sürede transformatörün primer sargısından akım geçerek enerji çekirdekte depolanır. Kapalı (kesimde) olduğu sürede ise çekirdekten depolanan enerji sekonder sargıya aktarılır ve çıkışa iletilir. Bu süreç, yüksek frekansta sürekli tekrarlanarak sistemin giriş voltajını istenen bir çıkış voltajına dönüştürmesini sağlar.

Anahtarlama verimliliği ve hızı, flyback devresinin genel performansını doğrudan etkiler. Özellikle yüksek anahtarlama hızları, daha küçük manyetik bileşenlerin kullanılmasına olanak tanırken, düşük kayıplar sağlayarak sistemin enerji verimliliğini artırır. Ancak bu avantajlara rağmen, anahtar elemanların kontrol edilmesi ve sürülmesi karmaşık bir tasarım gerektirir. İşte bu noktada, modern kontrolcü entegreler devreye girer.

SMPS entegrelerinin kullanımı, güç elektroniği alanında önemli bir dönüm noktası olmuştur. 20. yüzyılın ortalarına kadar güç kaynağı sistemleri, genellikle doğrusal regülatörler (linear regulators) ile tasarlanıyordu. Bu tür sistemler, basitlikleri ve düşük elektromanyetik girişimleri nedeniyle tercih ediliyor olsa da bu sistemlerin ciddi bir dezavantajı düşük verimliliğe sahip olmalarıdır. Çıkış voltajını kontrol etmek için fazla enerjiyi ısı olarak yaymaları, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda ciddi enerji kayıplarına yol açmaktadır.

SMPS entegrelerinin gelişimi, 20. yüzyılın sonlarına doğru, doğrusal güç kaynaklarının düşük verimlilik ve büyük boyut gibi dezavantajlarını aşma ihtiyacı ile hız kazanmıştır. Bu entegreler, entegre kontrol devreleri ve ileri düzey anahtarlama teknolojileri sayesinde hem enerji kayıplarını azaltmış hem de kompakt ve güvenilir güç çözümleri sunmuştur. Günümüzde SMPS kontrolcü entegreleri, EMI'yi en aza indiren özellikleri ve yüksek anahtarlama frekanslarına uyum sağlayan yapıları ile flyback dönüştürücülerde sıklıkla kullanılmaktadır [21].

Çalışmada kullanılan flyback anahtarlama elemanları, Power Integrations firmasının InnoSwitch3-EP serisinden tercih edilmiştir. Bu serinin hem GaNFET'li hem de Si

tabanlı MOSFET’li flyback anahtarlama elemanlarının olması, karşılaştırma yapabilme avantajından ötürü malzeme seçiminde temel sebep olmuştur.

### 3.1. Teorik Hesaplamalar

Tez çalışmasının bu bölümünde, INN3678C üretici parça kodlu, 750V GaNFET içeren SMPS anahtarı kullanılarak gerçekleştirilen tasarım detaylı olarak incelenmiştir ve bu anahtar üzerinden teorik hesaplamalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında tercih edilen entegre, GaNFET içermesi sayesinde yüksek verimlilik sunarken aynı zamanda daha kompakt ve düşük kayıplı bir tasarım imkânı sağlar. 65W’a kadar çıkış gücünü destekleyen entegre, geniş bir giriş voltaj aralığında (85-265 VAC) çalışabilir ve düşük standby gücü tüketimi (<30 mW) ile enerji tasarrufuna önemli katkı sağlar.

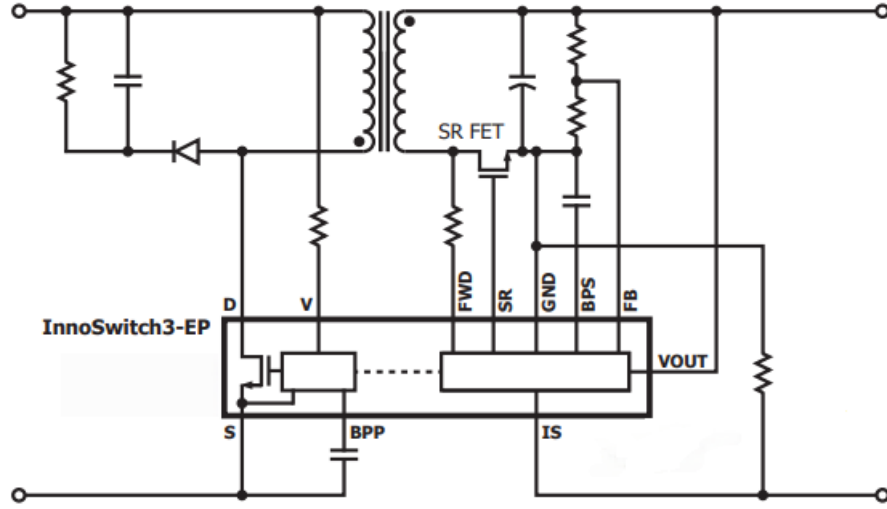
Entegre, flyback topolojisine uygun olarak tasarlanmıştır ve modern SMPS uygulamalarında sıklıkla tercih edilen gelişmiş özelliklere sahiptir. Yüksek frekansta çalışabilme kapasitesi, trafolar ve pasif bileşenlerin boyutlarını küçülterek sistemin güç yoğunluğunu artırır.

Entegrenin tasarımında yer alan çoklu koruma mekanizmaları, aşırı akım, gerilim ve sıcaklık durumlarında devrenin güvenliğini sağlamaktadır. Tüm bu özellikler, entegreyi enerji verimliliği ve güvenilirlik açısından ön plana çıkarırken, tasarım sürecini de önemli ölçüde kolaylaştırır.

Entegrenin içinde yer alan dahili optocoupler sayesinde hem primer hem de sekonder kontrole olanak tanırken tasarımın izolasyon seviyesini de artırır. SMPS devresinde ihtiyaç duyulan birçok çevresel bileşenlerini dahili olarak içermesinden ötürü PCB tasarımını da büyük ölçüde kolaylaştırır ve akım döngülerini kısaltarak verimliliği artıracak bir tasarıma olanak tanır.

Şekil 3.1’de uygulama şeması gösterilen Innoswitch3, QR, CCM ve DCM modun anahtarlama frekansına ve yüke göre değişen kombinasyonuyla flyback kontrolü sağlayan, multi-mode çalışabilen bir entegredir. QR ve CCM modu, genellikle düşük yük koşullarında daha yüksek verimlilik elde etmek için kullanılır. Bu modda, anahtarlama sırasında MOSFET’in drain-source voltajı, rezonans osilasyonları sayesinde daha düşük seviyelerde kalır, bu da anahtarlama kayıplarını azaltır. Yük arttıkça, devre CCM moduna

geçer. CCM, daha yüksek yüklerde enerji kayıplarını minimize eder, daha kararlı bir çalışma modu sağlar ve sürekli bir enerji akışı sunar [22].



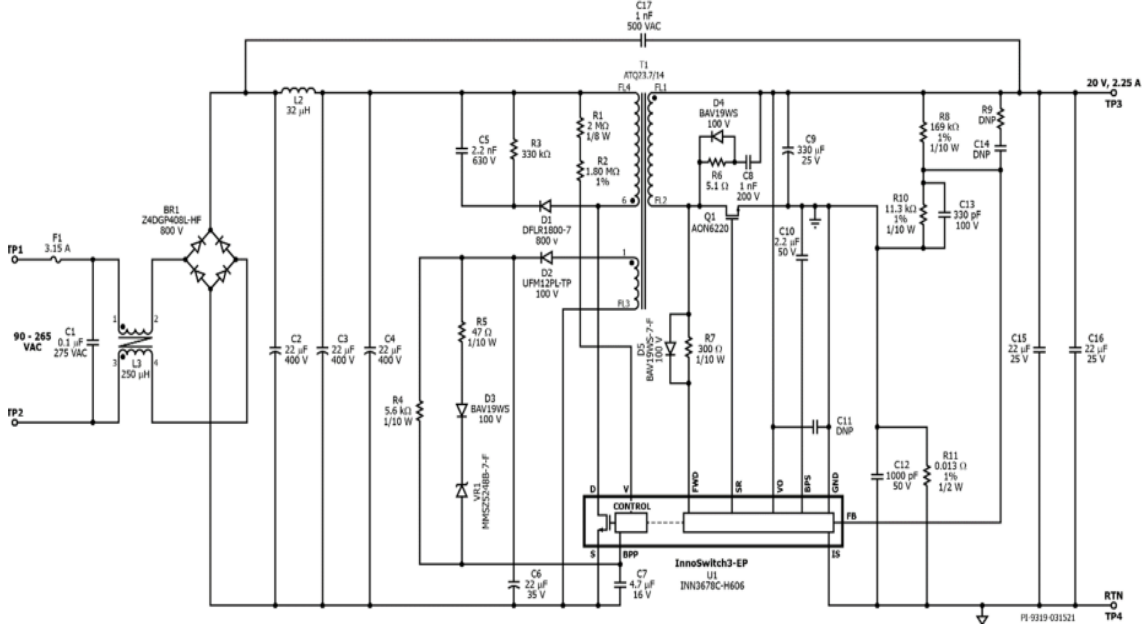
**Şekil 3.1:** InnoSwitch3-EP Uygulama Şeması [23]

Güç kaynağı tasarımının ilk basamağı, tasarım için gerekli parametrelerin belirlenmesidir. Bu tez çalışması için, 19V, 2,5A'lik çıkışlı batarya şarj devrelerinde kullanılabilecek tasarım parametreleri girdi olarak seçilmiştir ve Tablo 3.1'deki gibi belirlenmiştir.

**Tablo 3.1:** GaN Tabanlı Tasarımın Parametreleri

Tasarım Parametreleri	Sembol	Değer
Giriş Gerilimi	$V_{IN}$	Universal (85-265VAC)
Frekans	$f_L$	50 Hz
Anahtarlama Frekansı (Tam Yükte)	$f_{SW}$	100 KHz
Toplam Çıkış Gücü	$P_{OUT}$	47,5W
Çıkış Gerilimi	$V_{OUT}$	19V
Maksimum Çıkış Akımı	$I_{LOAD MAX}$	2,5A
Yansıma Gerilimi	$V_{OR}$	100V
Hedef Verimlilik	$n$	0,88
Çıkış Dalgalanma Gerilimi	$V_{OUTripple}$	120mV

Power Integrations tarafından yayınlanan Innoswitch3-EP referans tasarım dokümanında, 45W'lık bir flyback dönüştürücü için referans tasarım paylaşılmıştır [24]. Şekil 3.2'deki referans tasarım şemasından yola çıkarak flyback devresini oluşturmak mümkündür.



Şekil 3.2: GaN Tabanlı Anahtarın Referans Tasarımı [24]

Referans tasarım, çalışmaya konu olan uygulama için uygun hale getirilmiş ve Tablo 3.1'deki gereksinimleri sağlamak için gerekli teorik hesaplamalar yapılmıştır. Bu parametrelere göre yapılan teorik hesaplamalar, aşağıdaki bölümlerde detaylıca yer almaktadır. Hesaplamalar yapılırken kullanılan komponentlerin ideal olduğu varsayılmıştır. Bu sebeple kayıplar ihmal edilmiştir.

Tasarıma başlarken girişte kullanılacak bara kapasitör değerinin hesaplanması gerekmektedir. Giriş kapasitör değeri çıkış gücüne göre belirlenir. Tablo 3.2'de sunulan yönergelere göre, çıkış Watt gücü başına 2-3  $\mu\text{F}$  önerilmektedir. Güç kaynağının çıkış gücü 47,5W olduğundan, kapasitörün değeri 95-142,5  $\mu\text{F}$  arasında olmalıdır. Bu değer aralığında standart bir değer olarak 120  $\mu\text{F}$  seçilerek tasarımı ilerletmek uygun görülmüştür. Kullanılan kapasitenin toleransı %20 olduğu durumda ise minimum 96  $\mu\text{F}$ , giriş kapasitesi ihtiyacını karşılamaktadır.

**Tablo 3.2:** Tavsiye Edilen Giriş Kapasitans Değerleri [25]

AC Giriş Gerilimi (Volt)	Çıkış Gücü Başına Toplam Giriş Kapasitansı Katsayısı ( $\mu\text{F}/\text{W}$ )
100-115	2~3
85-265	2~3
230	1

Giriş geriliminin 265V olduğu durumda maksimum DC bara voltajı Denklem 3.1'deki gibi hesaplanır.

$$V_{DCMAXPK} = 265 \times \sqrt{2} = 375V \quad (3.1)$$

Giriş DC kapasitörünün değeri, minimum DC giriş voltajı,  $V_{DCMIN}$ 'in değerini belirler. Bu, kapasitörde görülen minimum DC voltajı olarak tanımlanır. Bu değer, Denklem 3.2'deki gibi hesaplanır.

$$V_{DCMIN} = \sqrt{(2 \times V_{ACMIN}^2) - \frac{2 \times P_o \times \left(\frac{1}{2 \times f_L} - t_c\right)}{n \times C_{in}}} = 88,8V \quad (3.2)$$

AC giriş gerilimi 85V, Çıkış gücü 47,5W, hat frekansı 50Hz, giriş diyot iletim süresi ortalama 2,7 milisaniye ve giriş kapasitans değeri 120  $\mu\text{F}$  olarak alındığında 88,8V değerine ulaşılır.

Tasarım için bir diğer önemli parametre yansıma gerilimi değerini belirlemektir. Innoswitch3 tasarım dokümanında [25], çıkış voltajına göre seçilebilecek en uygun yansıma voltaj değerleri paylaşılmıştır. Bu uygulama için çıkış gerilim değeri 19V olacaktır. Tasarım dokümanına göre bu çıkış voltajı değeri için yansıma voltajının 120V'tan küçük seçilmesi tavsiye edilmektedir.

**Tablo 3.3:** Yansıma Voltajı Değeri

Çıkış Gerilimi	Önerilen Yansıma Gerilimi Değeri	Önerilen Gerilim Aralığı
5V	55V	45V-60V
9V	85V	80V-90V
12-20V	110V	100V-120V

Tasarım dokümanında önerilen yansıma gerilimi seviyesi 110V olarak belirtilse de bazı yüksek güçlü uygulamalarda düşük yansıma voltajı seçmek,  $V_{DS}$  gerilimini düşüreceğinden daha avantajlı durumlar ortaya çıkarır. Bu sebeple bu uygulamada yansıma gerilimi 100V olarak seçilmiştir.

Tasarımın maksimum çıkış gücünün 47,5W olacağı isterler arasında yer almaktadır. Bu durumda maksimum giriş gücünü, verimlilikten yola çıkarak Denklem 3.3'deki gibi hesaplamak mümkündür.

$$P_{IN(MAX)} = \frac{P_{OUT(MAX)}}{n} = \frac{47,5W}{0,88} = 53,98W \quad (3.3)$$

Bir diğer dikkate alınması gereken değer, kullanılacak trafonun primer tarafının indüktans değeridir. Tasarlanacak güç kaynağı devresinde kullanılacak trafonun primer indüktansı, birçok hesabın çıkış noktasıdır. Bunu hesaplamak için Denklem 3.4 kullanılabilir.

$$L_p = \frac{1}{\left[ \left( \sqrt{2 \times P_{IN(MAX)} \times f_{SWmin}} \right) \times \left( \frac{1}{V_{DCmin}} + \frac{1}{V_{OR}} \right) + \pi \times f_{SWmin} \times \sqrt{C_D} \right]^2} = 648\mu H \quad (3.4)$$

Denklemden  $f_{SWmin}$ , minimum anahtarlama frekansını temsil eder. Bu değer veri sayfasında 30 KHz olarak belirtilmiştir.  $C_D$ , drain pinindeki kapasitans değeridir ve veri sayfasında yer alan grafikten yola çıkarak ve trafonun da primer kapasitansını dikkate alarak yaklaşık 120pF olarak varsayılabilir. Bulunan değerler formülde yerine yazıldığında tasarlanacak trafonun primer indüktansı  $648\mu H$  olarak hesaplanır.

Primer indüktans değerinden yola çıkarak maksimum görev döngüsü değerini hesaplamak mümkündür. Bu değer, teorik hesaplamaları ilerletebilmek için kritik bir

değişkendir. Bu parametre, flyback anahtarının açık olduğu sürenin, toplam periyot süresine oranını ifade eder. Bu değer, tam yükte (53,98W) ve minimum giriş voltajında (88,8V) hesaplanır. Maksimum görev döngüsünü hesaplamak için Denklem 3.5 kullanılır.

$$D_{MAX} = \frac{1}{V_{DCmin}} \times \sqrt{2 \times P_{IN(MAX)} \times L_p \times f_{SWmin}} = 0,52 \quad (3.5)$$

Yine primer indüktans değerinden yola çıkarak Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 kullanılarak sırasıyla primer akımının tepe değeri ( $I_p$ ) ve RMS ( $I_{RMS}$ ) değeri hesaplanır.

$$I_p = \sqrt{\frac{2 \times P_{IN(MAX)}}{L_p \times f_{SWmin}}} = 2,35A \quad (3.6)$$

$$I_{RMS} = I_{LIM} \times \sqrt{D_{MAX} \times \frac{1}{3}} = 0,71A \quad (3.7)$$

Her ne kadar akımın tepe değeri 2,35A olarak hesaplanmış olsa da, anahtarın tepe akımını limitleme fonksiyonu bulunduğu için tepe değeri  $I_{LIM}$  değeri olarak belirlenmelidir. Primer akımının limit değeri anahtarın veri sayfasında 1,7A olarak belirtilmiştir.

Tasarıma uygun trafo seçimi için dikkate alınması gereken birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan bazıları kullanılacak çekirdek (core) boyutu, çekirdek tipi ve malzemesidir. Seçim yaparken, trafonun kullanılacağı uygulamanın güç, verimlilik ve anahtarlama frekansı değerleri mutlaka dikkate alınmalıdır. Uygun çekirdek seçimi yapılırken tasarım değerlerini karşılayan ve yaygın olarak kullanılan çekirdekleri tercih etmek, birçok durumda tasarım için hızlı bir çözüm noktası olabilmektedir. Bu tasarım için bir trafo üreticisinin veri sayfası [26] incelenmiş ve güç değerleri düşünüldüğünde EF25 çekirdek kullanılması uygun görülmüştür. Çekirdek tipi belirlendikten sonra Denklem 3.8 kullanılarak primer sarım sayısını hesaplamak da mümkündür.

$$N_p = \frac{L_p \times I_{LIM}}{B_{max} \times A_e} = 58,3 \cong 58 \text{ tur} \quad (3.8)$$

EF25 çekirdeği için  $B_{max}$  değeri 400mT,  $A_e$  değeri 47,2mm<sup>2</sup> olarak belirtilmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak primer tur sayısı 58 tur olarak belirlenmiştir.

Yansıma gerilimi ve çıkış gerilimi parametreleri kullanılarak, trafonun dönüş oranı Denklem 3.9 ve 3.10'daki gibi hesaplamak mümkündür. Sonrasında sekonder sarım sayısı da hesaplanabilir.

$$N_T = \frac{V_{OR}}{V_{OUT}} = \frac{100}{19} = 5,26 \quad (3.9)$$

$$N_s = \frac{N_p}{N_T} = \frac{58}{5,26} = 11 \text{ tur} \quad (3.10)$$

Trafoda flyback anahtarını beslemek için bir yardımcı sargıya da ihtiyaç vardır. Yardımcı sargının sağladığı gerilim genellikle 11V ile 15V arası bir değerde seçilir. Denklem 3.11 yardımcı sargının sarım sayısını hesaplamak için kullanılır.

$$N_{aux} = \frac{N_s(V_{aux} + V_{D aux})}{V_{OUT}} = \frac{11 \times 13,5}{19} \cong 8 \text{ tur} \quad (3.11)$$

Edinilen değerlerden yola çıkarak sekonder tarafın tepe ve RMS akımları, Denklem 3.12 ve 3.13 kullanılarak hesaplanır.

$$I_{SECpk} = I_{LIM} \times \frac{N_p}{N_s} = 8,96A \quad (3.12)$$

$$I_{SECrms} = I_{SECpk} \times \sqrt{\frac{1 - D_{MAX}}{3}} = 3,58A \quad (3.13)$$

Belirlenen sarım sayıları baz alındığında, çıkış MOSFET'i üzerindeki maksimum ters gerilimi Denklem 3.14'deki gibi hesaplanır.

$$PIV = V_{DCMAX} \times \left( \frac{N_s}{N_p} \right) + V_o = 90,08V \quad (3.14)$$

Bu hesaplamada parazitik gerilimler dikkate alınmadığından MOSFET seçimi yaparken  $V_{DS}$  değerini %20 toleransla seçilmesi tavsiye edilmektedir. Bu nedenle uygulamada 120V drain-source gerilimine sahip, bir SR FET seçilmiştir.

Çıkış kapasitesinin seçimi, güç kaynağı tasarımındaki bir diğer önemli faktördür. Bu değer; çıkış akımının, anahtarlama frekansının, çıkış gerilimindeki dalgalanmanın

periyodu (genellikle 10 olarak kabul edilir) ve çıkış dalgalanma geriliminin bir fonksiyonudur. Çıkış kapasitesi için minimum değer, Denklem 3.15'teki gibi hesaplanır.

$$C_{OUTmin} = \frac{I_{OUTmax} \times N_{CP}}{f_{SW} \times V_{OUTripple}} = \frac{2,5A \times 10}{85000Hz \times 0,12V} = 245\mu F \quad (3.15)$$

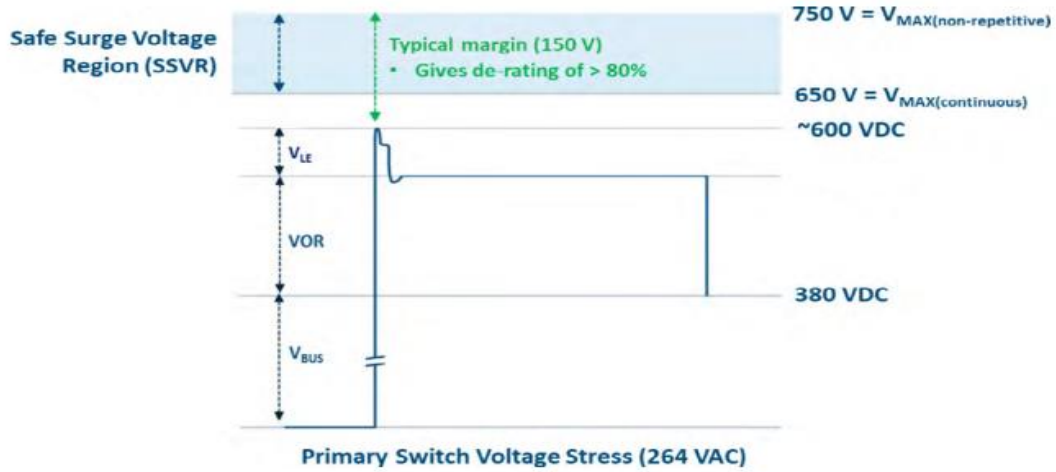
Yapılan hesaplamada çıkış kapasitesi için minimum değer 245uF olarak belirlenmiştir. Bu değer minimum değer olduğu düşünüldüğünde çıkış kapasitesini bu değerden büyük ve standart bir değer seçmek uygun olacaktır. Bu tez çalışmasında, 330uF olarak seçilmiştir.

Primer anahtarı olarak kullanılan GaNFET üzerinde iki farklı gerilim tipi vardır. Bu gerilimler anahtar açıkken ( $V_{DSON}$ ), anahtar kapalıyken ( $V_{DSOFF}$ ) olarak ifade edilir.  $V_{DSON}$  gerilimi kullanılan anahtarın açık durum direnci ( $R_{DSON}$ ) üzerinden akan  $I_{RMS}$  ile Denklem 3.16'daki gibi belirlenir. Flyback anahtarının veri sayfasında yer alan değere göre bu anahtarın maksimum  $R_{DSON}$  direnci bileşim (junction) sıcaklığının 25°C olduğu koşullarda 0,52Ω, 100°C olduğu koşullarda ise 0,78Ω değerindedir. Bu değer GaNFET olmasından dolayı Si tabanlı MOSFET'lere göre bir hayli küçüktür. Dolayısıyla  $V_{DSON}$  gerilimleri de Si tabanlı MOSFET'lere göre çok daha düşüktür.

$$V_{DSON} = I_{RMS} \times R_{DSON@100^{\circ}C} = 0,55V \quad (3.16)$$

$V_{DSOFF}$  gerilimi ise GaN anahtarın üzerine düşen en yüksek gerilimdir. Bu değer, giriş voltajı, yansıma voltajı ve clamp voltajının bir fonksiyonudur.  $V_{DSOFF}$  gerilimi, flyback anahtarı MOSFET'inin breakdown değerinin en fazla %90'ı kadar olmalıdır. Mevcut durumda 750V breakdown gerilimine sahip GaNFETli anahtar için  $V_{DSOFF}$  gerilimi 675V'u aşmamalıdır.

Şekil 3.3'te belirtilen uygulama notunda yer alan grafiğe göre  $V_{DSMAX}$  değerinin 600V'a yakınsayarak belirlemek doğru sonuçlar vermektedir.



Şekil 3.3: Tepe  $V_{DS}$  Değerleri [27]

Flyback dönüştürücüsünde geri besleme dirençleri, çıkış gerilimini izlemek ve düzenlemek için kullanılır. Bu dirençler, geri besleme döngüsünün bir parçası olarak çıkış voltajını düzenler ve istenen değeri korumaya yardımcı olur. Geri besleme hattı üzerinden alınan sinyaller, flyback entegresine iletilir ve entegre de anahtarlama elemanını kontrol ederek çıkış gerilimini sabit tutar. Dirençlerin değeri, çıkış geriliminin doğru şekilde ayarlanmasını sağlar ve kararlılığı artırır. Dolayısıyla, çıkış kararlılığını sağlamak için geri besleme dirençlerinin doğru seçilmesi elzemdir.

Entegrenin veri sayfasında yer alan bilgiye göre geri besleme direnç değerleri,  $V_{FB}$  değerini 1,265V olarak belirleyecek şekilde seçilmelidir. Bu sebeple 19V'luk çıkış gerilimi düşünüldüğünde gerilim bölücü dirençlerden ilki 470K, ikincisi 33K olarak seçilebilir. Bu değerler 1,247V değerinde çıkış verse de ulaşılması kolay standart değerler olduğu için seçilmiştir.

Bu bölümde yapılan teorik hesaplamalarla, sonraki bölümlerde devreyi Simplis ve PI Expert gibi yazılımlarla benzetim ortamında gerçekleştirmek için yeterli veriler elde edilmiştir. Benzetim sonuçları, teorik hesaplamaların gerçek devre koşullarında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek ve tasarımın geçerliliğini doğrulamak için önemli bir rol oynamaktadır.

### 3.2. Benzetim Modelleri

Güç elektroniği devrelerinin tasarım sürecinde benzetim, devrenin performansını analiz etmek, olası hataları önceden tespit etmek ve fiziksel prototipleme öncesinde optimizasyon sağlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Benzetimler sayesinde gerilim ve akım dalga formları detaylı şekilde incelenebilir, devrenin farklı çalışma koşullarındaki davranışı önceden değerlendirilebilir. Ayrıca, çeşitli yarı iletken teknolojilerinin ve devre elemanlarının karşılaştırılması mümkün hale gelerek en verimli tasarımın belirlenmesine katkı sağlar. Bu süreç, maliyet ve zaman tasarrufu sağlarken, tasarım sürecinin daha güvenilir ve kontrollü bir şekilde ilerlemesine yardımcı olur.

Güç elektroniği devrelerinde doğru ve verimli bir tasarım süreci için benzetim araçlarının seçimi büyük önem taşımaktadır. Kullanılan yazılımın, devrenin çalışma prensibini gerçekçi bir şekilde modelleyebilmesi ve tasarımcının ihtiyaçlarına uygun analizler sunabilmesi gerekmektedir. Doğru bir benzetim aracı, devrenin kararlılığını değerlendirmek, dalga formlarını incelemek ve çeşitli çalışma koşullarında sistemin nasıl tepki vereceğini öngörmek açısından kritik bir avantaj sağlar. Bu bağlamda, güç elektroniği uygulamalarına özel olarak geliştirilen benzetim yazılımları, tasarım sürecini daha verimli hale getirmekte ve mühendislerin daha güvenilir sonuçlar elde etmesine katkı sunmaktadır.

Benzetim araçları, tasarım sürecinde mühendislerin kararlarını şekillendiren önemli bir unsurdur. Bu araçlar, çeşitli tasarım parametrelerinin hızlı bir şekilde test edilmesine olanak tanırken, aynı zamanda potansiyel problemleri daha fiziki prototipler yapılmadan önce belirleyebilme imkânı sunar. Bu bağlamda, güç elektroniği devrelerinin analiz ve doğrulama sürecini hızlandıran ve doğruluğu artıran bazı özel yazılımlar öne çıkmaktadır. Bu yazılımlardan biri de Simplis'tir.

Simplis, özellikle güç elektroniği devrelerinin tasarımı ve benzetimi için geliştirilmiş bir yazılımdır. Adını "Simulation for Piecewise Linear Systems" ifadesinden alan Simplis, klasik SPICE tabanlı simülatörlerden farklı olarak, devreleri parçalı doğrusal modelleme yöntemiyle analiz eder. Bu yaklaşım, özellikle anahtarlamalı güç kaynakları, DC-DC dönüştürücüler ve inverterler gibi doğrusal olmayan sistemlerde benzetim hızını ve doğruluğunu artırmaktadır.

Yazılımın temel avantajı, yüksek anahtarlama frekanslarında çalışan devrelerde hızlı ve kararlı benzetim sonuçları sağlayabilmesidir. SPICE gibi yaygın kullanılan araçlarda, anahtarlama sırasında devrede meydana gelen küçük zaman adımları ve karmaşık geçici durumlar benzetimin süresini ciddi şekilde uzatabilir. Simplis, bu tür zorlukları aşmak için anahtarlama cihazlarını idealize ederek ve devreyi parçalı doğrusal modellerle temsil ederek zamandan tasarruf sağlar. Ayrıca, benzetim sırasında devrenin kararlılık analizi ve hata toleransı gibi kritik mühendislik problemleri üzerine de çözüm üretir.

Simplis, yalın bir arayüze sahip olan ve SIMetrix yazılımıyla entegre çalışan bir platformdur. Bu entegrasyon sayesinde, sadece doğrusal olmayan devre analizi değil, aynı zamanda AC benzetimleri, Fourier analizi, dalga formu incelemeleri ve bileşen optimizasyonu gibi geniş kapsamlı tasarım araçları da sunar. Kullanıcılar, tasarımlarında farklı parametre değerlerini test ederek devrenin performansını hızlı bir şekilde değerlendirebilir ve iyileştirme yapabilir. [28]

Sonuç olarak, Simplis, güç elektroniği tasarımı ve doğrulama sürecini hem hızlandıran hem de daha verimli hale getiren güçlü bir araçtır. Hız, doğruluk ve basit ara yüzüyle sıkça tercih edilen bir benzetim uygulamasıdır.

Bu yazılımı kullanarak;

- Çıkış gerilimi ve akımı ayarlamaları
- Başlangıç durum analizleri
- Kararlı durum analizleri
- Yük transient davranışları
- Düşük ve yüksek gerilim koruma fonksiyonu analizi
- Gürültü analizleri

yapmak mümkündür. Yazılım; verimlilik analizi, kayıp analizi gibi durumlar için çok doğru sonuçlar vermeyeceği belirtilse de elde edilen verilerin değerlendirilebileceği fakat fiziksel olarak devre üzerinden mutlaka doğrulama yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

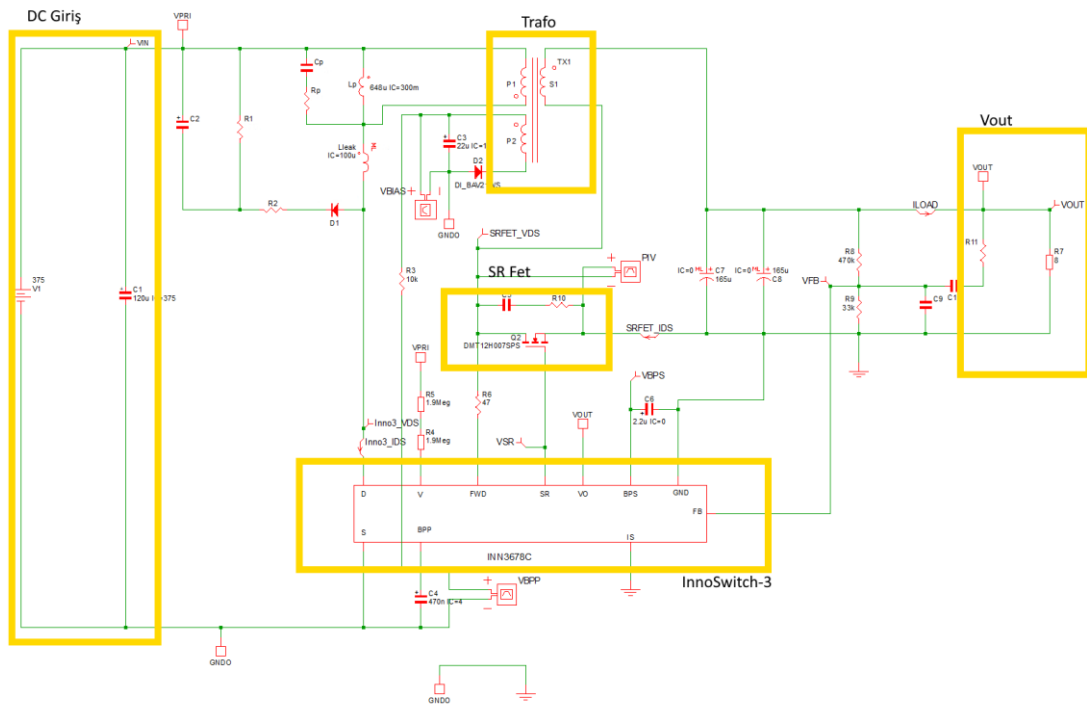
### **3.2.1. GaN Tabanlı Tasarımın Benzetim Analizi**

Benzetim analizleri kapsamında çalışma iki aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada, devrenin elektriksel davranışları ve çalışma prensipleri SIMPLIS yazılımı kullanılarak

detaylı şekilde incelenmiştir. Bu analiz sayesinde devrenin zamanla değişen gerilim ve akım değerleri gözlemlenmiş, bileşenlerin dinamik tepkileri değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise PI Expert yazılımı üzerinden sistemin verimlilik analizi gerçekleştirilmiş; anahtarlama elemanlarının kayıpları, sıcaklık değerleri ve genel performans metriği değerlendirilerek devre tasarımının enerji etkinliği açısından uygunluğu ortaya konmuştur. Bu iki aşamalı yaklaşım hem devrenin kararlılığını hem de enerji verimliliğini kapsamlı şekilde inceleme imkânı sunmuştur.

### 3.2.1.1. Devre analizi

Power Integrations firması, InnoSwitch3 serisi için halihazırda Simplis benzetim modelini websitelerinde paylaşmaktadır. Şekil 3.4'te verilen şematik tasarım için kullanılan model bu yolla edinilmiştir. Paylaşılan InnoSwitch3 modeline, çalışmada tercih edilen kontrolcünün veri sayfasında yer alan bileşim sıcaklığının 100°C olduğu koşullardaki  $R_{DS(ON)}$  değeri 0,78Ω ve standart akım limit değerinin ortalama değeri 1700mA girilmiştir.

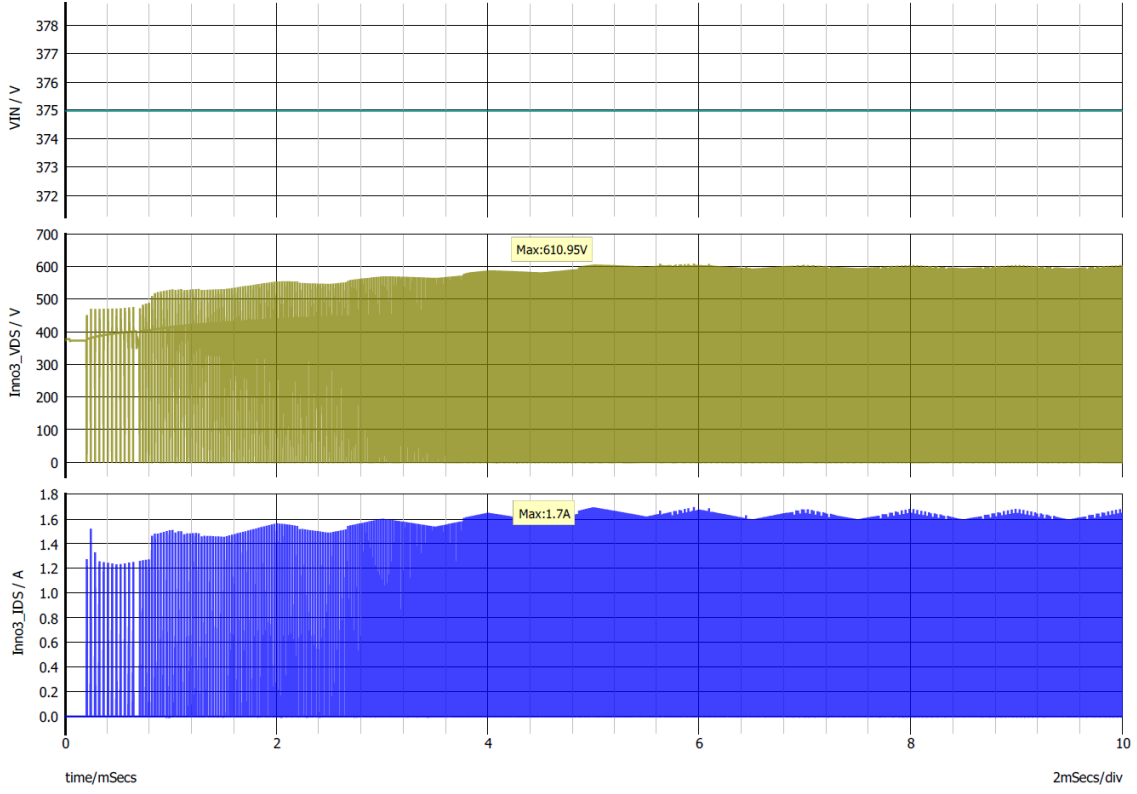


Şekil 3.4: GaN Tabanlı Tasarımın Devre Şeması

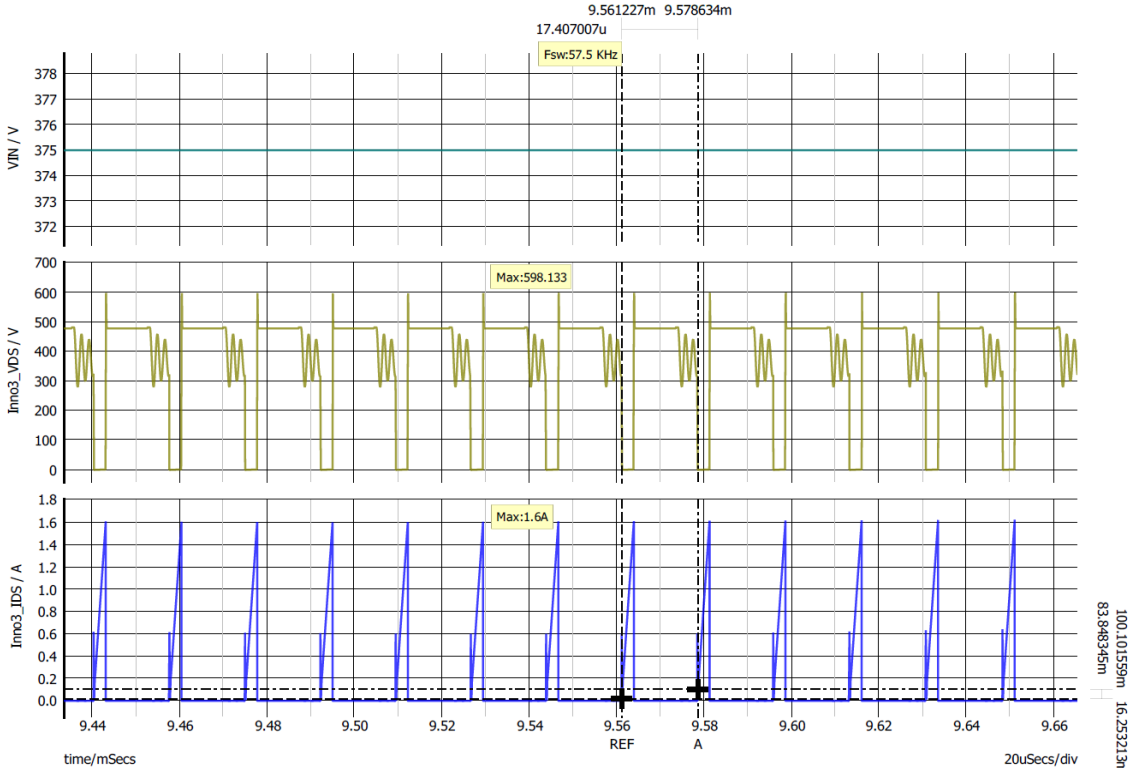
Benzetim süresi, girişte kullanılan doğrultucu elemanlar eklendiği takdirde çok fazla uzamaktadır. Benzetim süresinin kısaltılması için bu elemanlar eklenmemiştir ve devre direkt olarak DC giriş gerilimiyle beslenmiştir. Bypass kapasite değerinin akım limit değerine etkisi entegrenin veri sayfasında belirtilse de Simplis modelinde entegrenin modeline girilen akım limit değeri baz alınmaktadır. Bu sebeple hızlı benzetim için daha küçük bypass kapasitesi (470nF) seçilmiştir.

Tasarımı doğrulamak için maksimum yük koşulları altında, maksimum giriş gerilimiyle analiz başlatılmıştır. Bu analiz sonucu, öncelikli olarak oluşan başlangıç durum ve kararlı durum için primer tarafının drain-source gerilimi ve drain-source akımı grafiği elde edilmiştir.

InnoSwitch3-EP anahtarının ölçülen maksimum drain-source gerilimi Şekil 3.5'te 611V seviyesinde olsa da kararlı duruma geçtikten sonra Şekil 3.6'da da görüldüğü üzere maksimum drain-source gerilimi 598V seviyesine kadar inmektedir. Teorik hesaplamalarla da örtüşen şekilde maksimum drain-source akımı 1,7A seviyesindedir. Kararlı durum sırasında bu değer 1,6A olarak ölçülmüştür. Anahtarlama periyodu 17,4us olarak ölçülmüştür. Bu durumda(@ $V_{INMAX}, I_{SMAX}$ ) anahtarlama frekansı 57,5 KHz değerindedir.



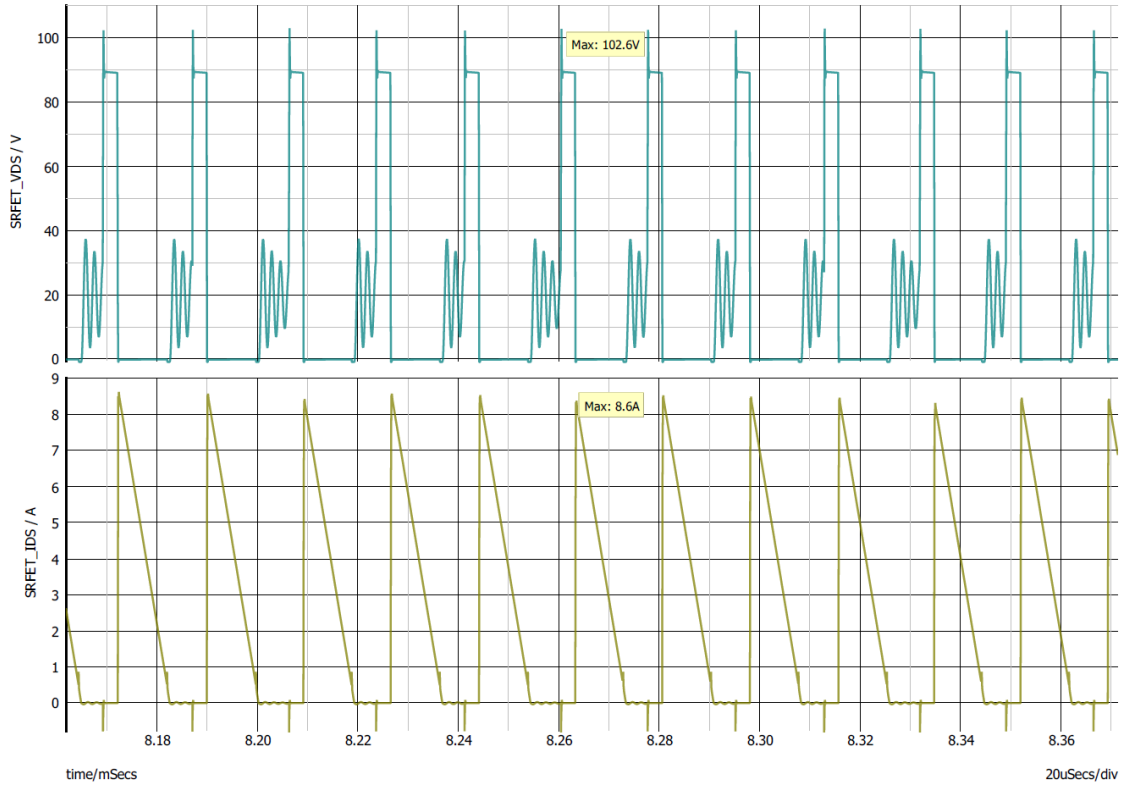
**Şekil 3.5:** GaN Tabanlı Tasarımın Primer Başlangıç Durum Grafiği(@265V)



**Şekil 3.6:** GaN Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafiği(@265V)

Analize, sekonder taraf için senkron MOSFET'in drain-source gerilimi ve akımı, MOSFET'in ters gerilim grafikleri oluşturularak devam edilmiştir.

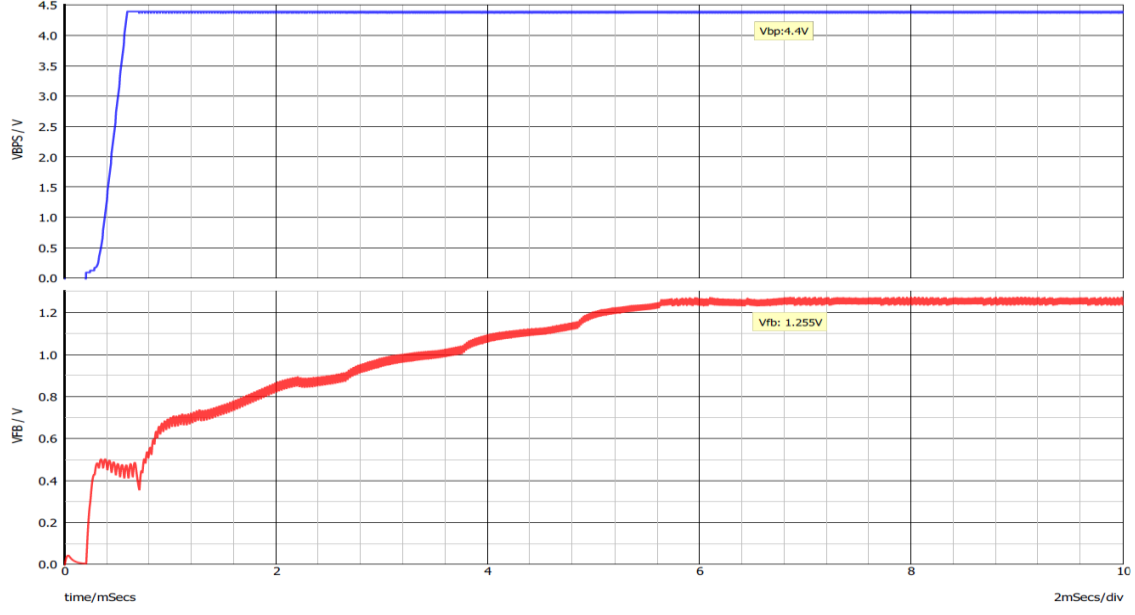
Şekil 3.7'de sekonder tarafın grafikleri belirtilmiştir. Buna göre SRFET üzerindeki maksimum gerilim 102,6V seviyesinde, MOSFET'in anahtarladığı maksimum akım ise 8,6A seviyesindedir.



**Şekil 3.7:** GaN Tabanlı Tasarımın Sekonder Kararlı Durum Grafikleri(@265V)

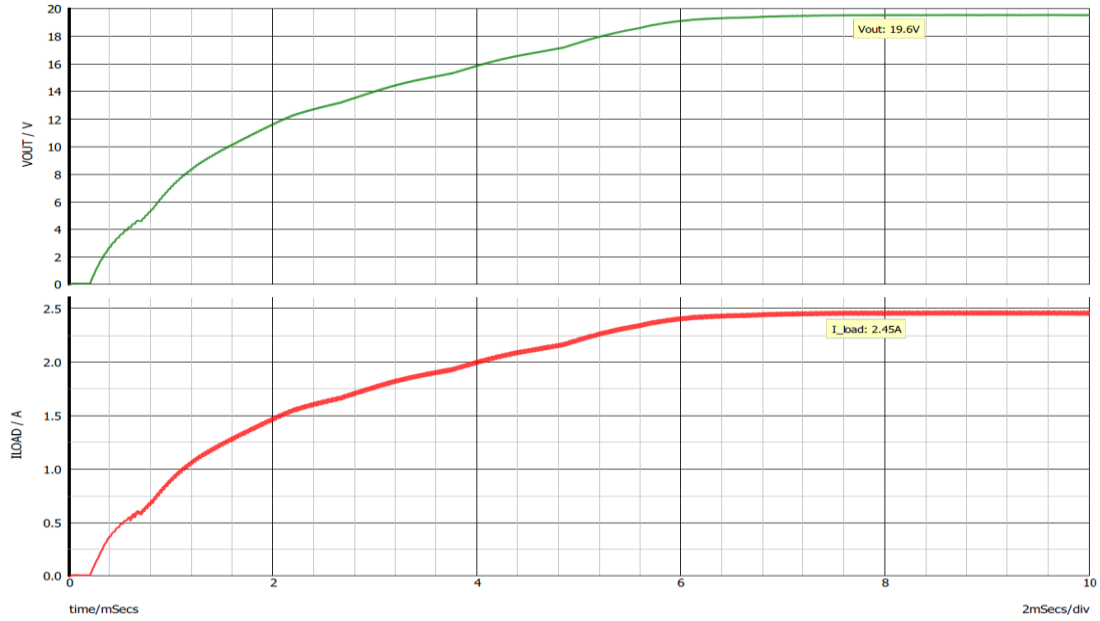
Analizin bir sonraki adımında by-pass pin gerilimi ve geribesleme gerilim değerine ait grafikler oluşturulmuş ve analiz edilmiştir.

Şekil 3.8'de oluşan grafikler analiz edildiğinde, tasarımın bypass gerilimi 4,4V seviyesindedir. Entegrenin dahili regülatörü bypass pin gerilimini veri sayfasında da belirtildiği gibi bu seviyede tutmaktadır. Geribesleme gerilimi ise 1,265V olarak ölçülmüştür.



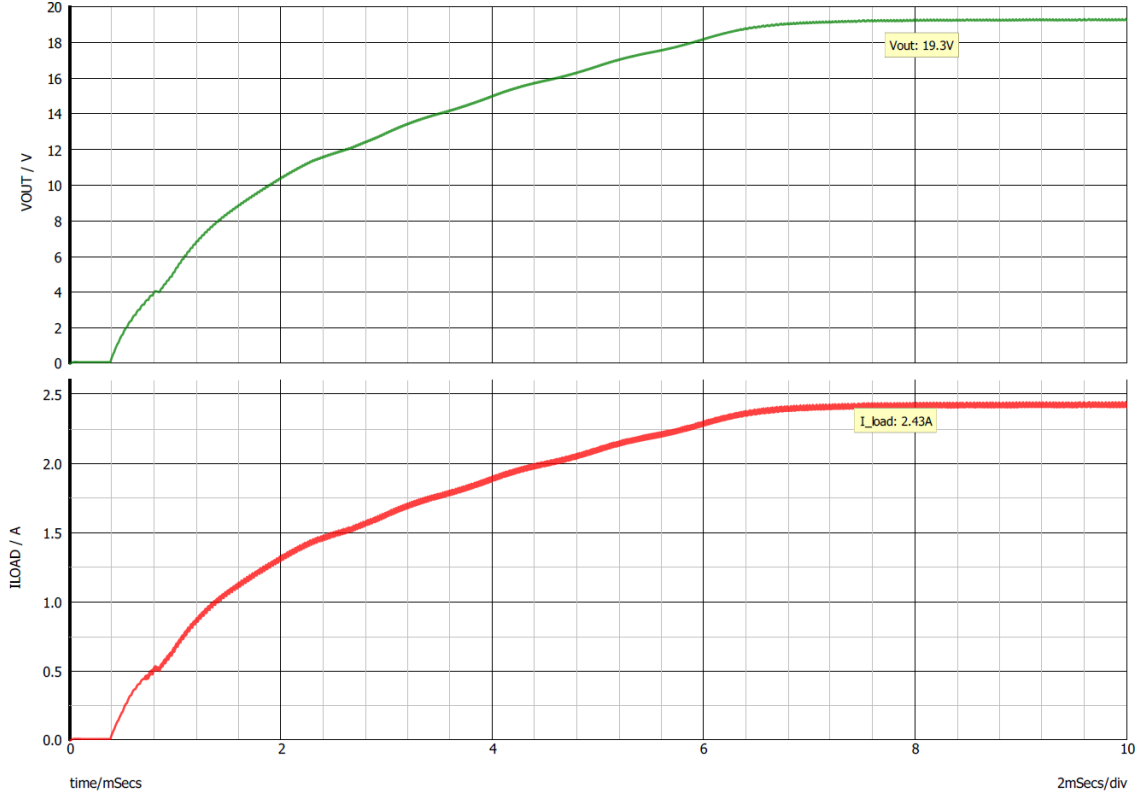
**Şekil 3.8:** GaN Tabanlı Tasarımın Geribesleme ve Bypass Gerilim Grafikleri(@265V)

Benzetimin yapıldığı koşullarda oluşan çıkış gerilim ve çıkış akım değerleri Şekil 3.9'daki grafikte gösterilmiştir. Yük akımının 2,5A olduğu durumda, çıkış voltajı 19,6V olarak ölçülmüştür. Benzetimde giriş ve çıkış gücü değerlerine Simplis ara yüzünde “verimlilik hesabı” sekmesinden ulaşabilmek mümkündür. Bu tasarım için ölçülen değerler giriş için 50,8W, çıkış için 48W seviyelerindedir. Bu durumda verimlilik %94,5 olarak ölçülmüştür.



**Şekil 3.9:** GaN Tabanlı Tasarımın Çıkış Değerleri(@265V)





**Şekil 3.11:** GaN Tabanlı Tasarımın Çıkış Değerleri Grafiği(@85V)

### 3.2.1.2. Verimlilik ve termal performans analizi

Devre tasarımının Simplis ortamındaki analizi tamamlandıktan sonra, Power Integrations firması tarafından geliştirilen bir tasarım aracı olan PI Expert yazılımında elde edilen çıktılar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Farklı parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılmış ve tasarımın diğer yönleri incelenmiştir.

PI Expert yazılımı, elektronik mühendislerine PI'ın entegrelerini kullanarak güç kaynağı tasarımları oluşturmak için olanak sağlar. Bu yazılım kullanılarak;

- Giriş ve çıkış parametrelerini temel alarak bir devre tasarımı oluşturulabilir
- Manyetik bileşenler (örn. trafo) gerçeğe en uygun şekilde tasarlanabilir
- Oluşturulan tasarımlar analiz edilir ve performans tahminleri yapılabilir
- Seçilen tasarıma uygun şematik diyagramlar oluşturulabilir ve malzeme listesi ve manyetik tasarım detayları gibi çıktılar edinilebilir

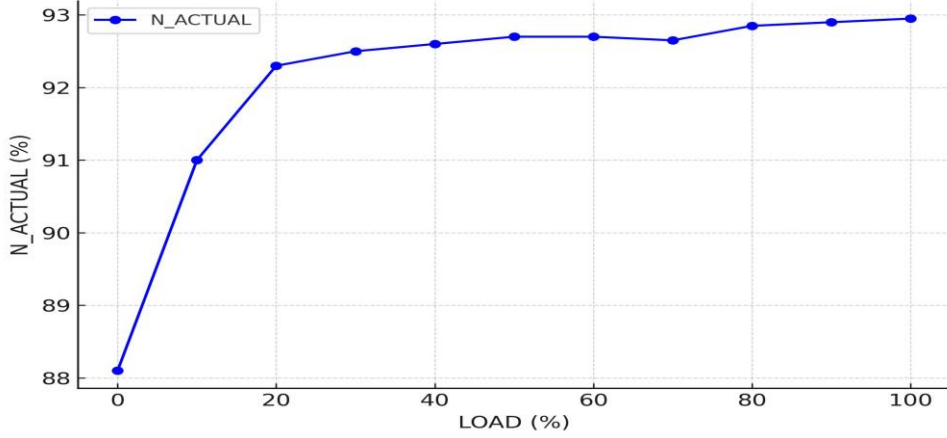
Tasarım parametreleri PI Expert aracına girildiğinde kayıpların da hesaba katılarak gerçeğe en yakın bir tasarım oluşturulmaktadır. Tablo 3.4'te PI Expert yazılımının hesapladığı bazı kritik değerler gösterilmektedir.

**Tablo 3.4:** GaN Tabanlı Tasarımın PI Expert Çıktıları

Parametre	PI Expert Çıktıları	Birim	Açıklama
$V_{DC\ MIN}$	88,6	V	Minimum DC Giriş Gerilimi
$V_{DC\ MAX}$	374,8	V	Maksimum DC Giriş Gerilimi
$t_C$	2,71	ms	Giriş Diyotu İletim Süresi
$I_{AVG}$	0,58	A	Ortalama DC Giriş Akımı
$K_P$	0,58		CCM/DCM çalışma oranı (@ $V_{MIN}$ & Full Load)
$D_{MAX}$	0,531		Maksimum Duty Cycle (@ $V_{MIN}$ & Full Load)
$I_{PEAK}$	1,717	A	Maksimum Primer Akımı (@ $V_{MIN}$ & Full Load)
$I_{RMS}$	0,840	A	Primer RMS Akımı (@ $V_{MIN}$ & Full Load)
$V_{DRAIN}(Estimated)$	615,12	V	Tahmini Drain-Source Gerilimi
$PIV$	90,08	V	Çıkış MOSFET'inin Maksimum Ters Gerilimi
$L_{P\ NOM}$	630	$\mu H$	Nominal Primer İndüktansı
$L_{P\ LKG}(Estimated)$	5,36	$\mu H$	Tahmini Primer Sızıntı Akımı
Core Type	EF25		Trafo Çekirdek Tipi
$N_{BIAS}$	8		Bias Sargısı Sarım Sayısı

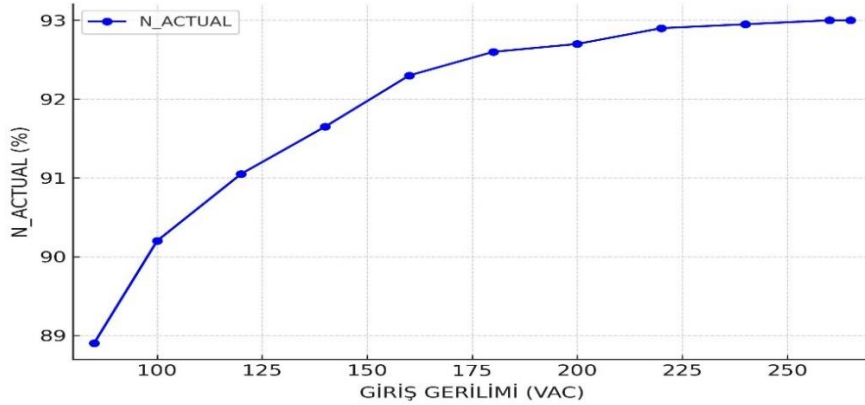
Tablo 3.4'te verilen yazılım çıktıları; komponentlerin ESR, ESL değerleri, termal performans değişimleri, trafonun çekirdek tasarımı, kullanılan bobin tellerinin kesitleri, iç dirençleri gibi birçok değeri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Bu nedenle daha önce yapılan hesaplamalardan birtakım farklılıklar göstermesi beklenen bir durumdur. Bu değerler baz alınarak benzetim oluşturmak, her zaman daha doğru sonuçlar verecektir.

Şekil 3.12'deki verimlilik analizi 230 VAC giriş gerilimi altında yapılmıştır. PI Expert analizinde verimliliğin en az olduğu değer hafif yük durumudur. Bu noktada tasarımın verimliliği %88'e kadar düşmektedir. Bununla birlikte %15 yük kapasitesinde SMPS veriminin %91 seviyesine kadar çıktığı görülmektedir. Tasarımın maksimum verimliliğine tam yük koşulunda ulaşılmıştır ve bu değer %93 seviyesindedir.



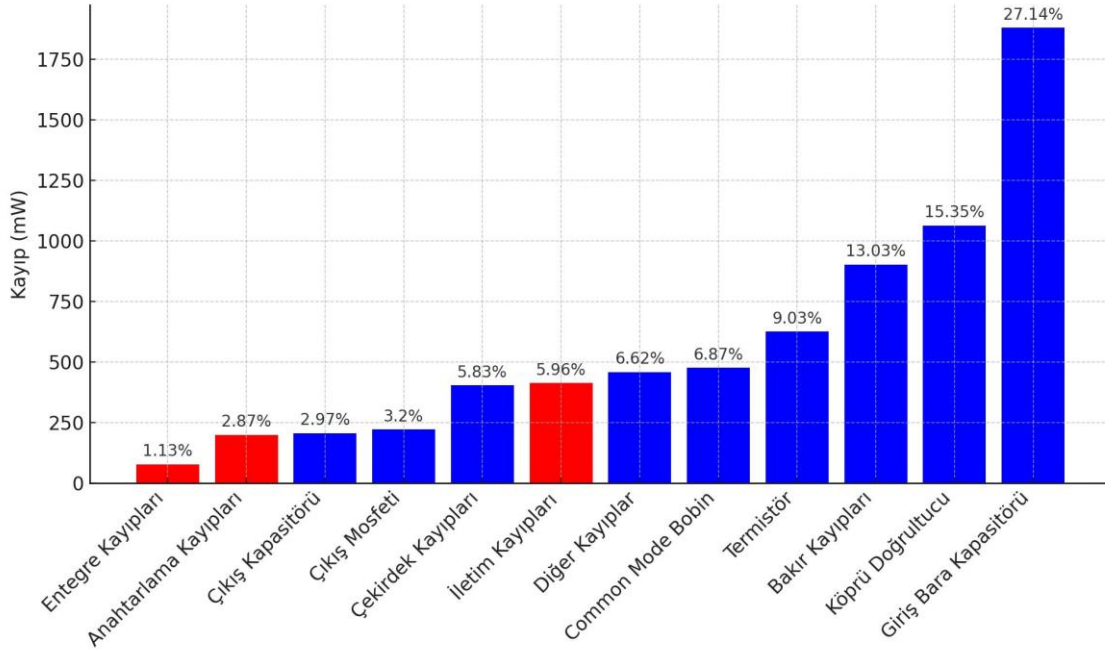
**Şekil 3.12:** GaN Tabanlı Tasarımın Verimlilik – Yük İlişkisi (@230V)

Verimlilik analizinde bir diğer dikkate alınması gereken değer de giriş voltajı değeridir. Şekil 3.13'de farklı giriş voltajı değerleri için SMPS'in verimlilik değerlendirilmesi verilmiştir. Bu grafiğe göre en düşük verimlilik %88,7 ile kayıpların en fazla olduğu 85V giriş durumunda oluşmuştur. Öte yandan 265V giriş voltajında SMPS'in maksimum verimlilik değeri 0,93 olarak ölçülmektedir. Verimlilik grafiğindeki değerler tam yük altında oluşturulmuştur.



**Şekil 3.13:** GaN Tabanlı Tasarımın Verimlilik-Giriş Gerilimi İlişkisi (@Tam Yük)

Tasarlanan SMPS devresinin kayıp analizi Şekil 3.14'te belirtilmiştir. Buna göre en fazla kayıp %27 ile giriş bara kapasitörlerinin kaybı olarak belirlenmiştir. Flyback anahtarın kaybı grafikte kırmızı sütunlarla temsil edilmektedir ve 691mW değerinde, %10 seviyesindedir. Senkron MOSFET'in kayıpları ise %3,2 seviyesindedir. Bu kayıplar tam yükte ve kayıpların en yüksek olduğu giriş voltajı olan 85 VAC altında ölçülmüştür.



**Şekil 3.14:** GaN Tabanlı Tasarımın Benzetim Sonuçlarına Dayanan Tahmini Kayıpları

PI Expert yazılımı kullanarak termal kayıpları da hesaplamak mümkündür. Bunun için kullanılan flyback kontrolcüsünün veri sayfasında belirtilen thermal resistance( $R_{th}$ ) değerini dikkate almak gerekmektedir.

Thermal resistance (termal direnç), bir malzemenin veya bileşenin, ısıyı bir yerden başka bir yere iletme karşısındaki direnç miktarını ifade eder. Elektronik cihazlar ve bileşenler için termal direnç, genellikle ısıyı kaynak (örneğin bir yarı iletken veya MOSFET) ile çevresine, özellikle soğutma yüzeylerine (örneğin bir heatsink) iletme yeteneğini belirler.

Yüksek termal direnç, ısıyı verimli bir şekilde iletmede zorluk anlamına gelir. Bu durumda, bileşenin sıcaklığı hızla artar, bu da performans düşüşüne ve hatta bileşen hasarına yol açabilir. Düşük termal direnç ise, ısının hızlı bir şekilde dağılmasını ve bileşenin daha düşük sıcaklıkta çalışmasını sağlar ve genellikle daha iyi bir soğutma gereksinimi anlamına gelir.

Veri sayfasında yer alan termal direnç değerlerine göre bileşen ile ortam arasındaki termal direnç değeri( $\theta_{ja}$ )  $50^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , bileşim ile bileşenin yüzeyi arasındaki termal direnç değeri( $\theta_{jc}$ ) ise  $18^{\circ}\text{C}/\text{W}$  olarak belirtilmiştir.

Mevcut uygulamada PI entegre üzerindeki  $691\text{mW}$  güç kaybından yola çıkarak sıcaklık artışı değerlerini hesaplamak mümkündür.

$$\Delta T = R_{TH} \cdot P_{loss} \quad (3.17)$$

PI kontrolcüsünün üzerindeki kayıptan yola çıkarak Denklem 3.18 üzerinden  $\Delta T_{ja}$  değeri  $23,9^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T_{jc}$  değeri ise  $8,6^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanır.

### 3.2.2. Si Tabanlı Tasarımın Benzetim Analizi

Bu tez çalışmasında, GaN bazlı model ile karşılaştırma yapmak için firmanın aynı serisinden Silikon tabanlı INN3677C anahtarı seçilmiştir. Bu entegre,  $725\text{V}$ 'luk MOSFET teknolojisine sahiptir ve yüksek verimlilik ve kompakt tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.  $45\text{W}$ 'a kadar çıkış gücü sunabilmesi ve geniş bir giriş voltaj aralığında çalışabilmesi sayesinde, endüstriyel güç kaynakları, batarya şarj cihazları gibi farklı uygulamalar için uygun bir çözümdür.

Entegre, çalışmada kullanılan GaN tabanlı entegreyle aynı aileden seçilmiştir. Her iki entegre aynı footprinte sahiptir ve benzer güç değerleriyle çevresellerini değiştirmeden doğrudan kullanılabilir.

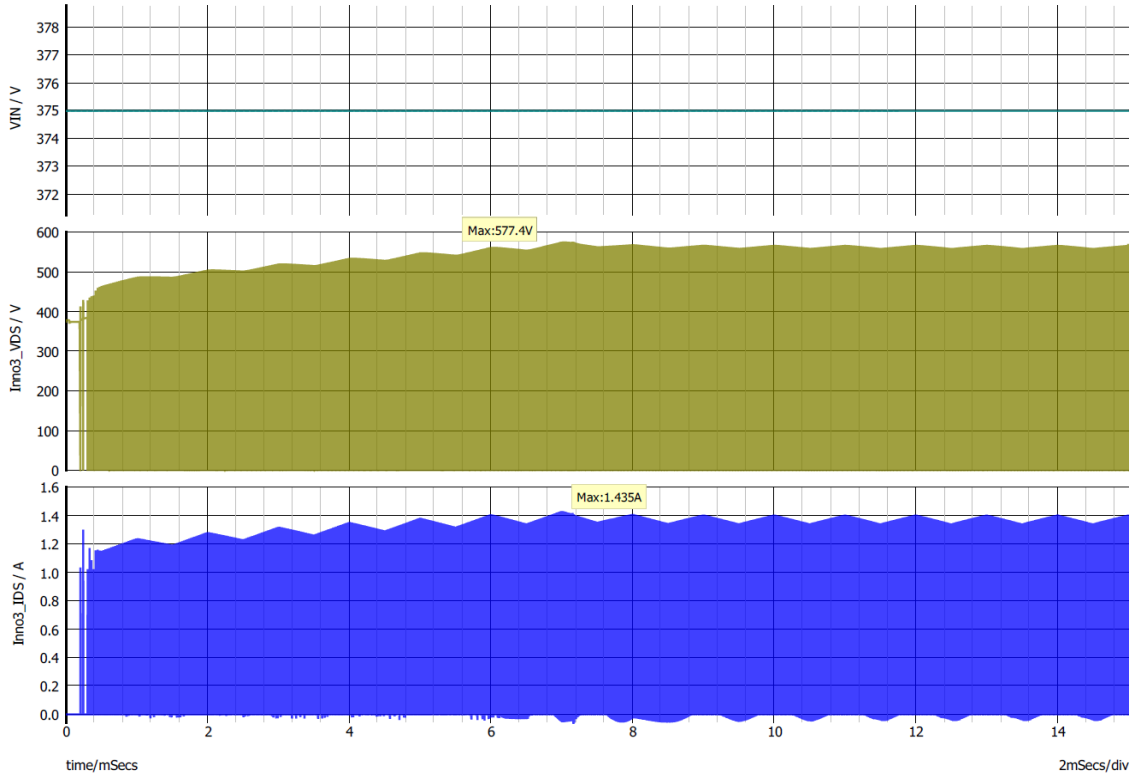
Tez çalışmasının bu bölümüne INN3677C anahtarını kullanarak bir güç kaynağı oluşturmakla başlanmıştır. Tasarım parametreleri, Tablo 3.1'de verilen GaN tabanlı tasarım ile aynı tutulmuş olup farklı olarak sadece tasarıma entegrenin maksimum güç kapasitesi olan  $45\text{W}$  yük uygulanmıştır.

Entegrenin breakdown gerilim seviyesi  $725\text{V}$  olduğu için tasarımdaki  $610\text{V}$ 'luk maksimum drain-source seviyesini karşılamaktadır. Bu sebeple trafo tasarımı da değiştirilmeden doğrudan kullanılmıştır.

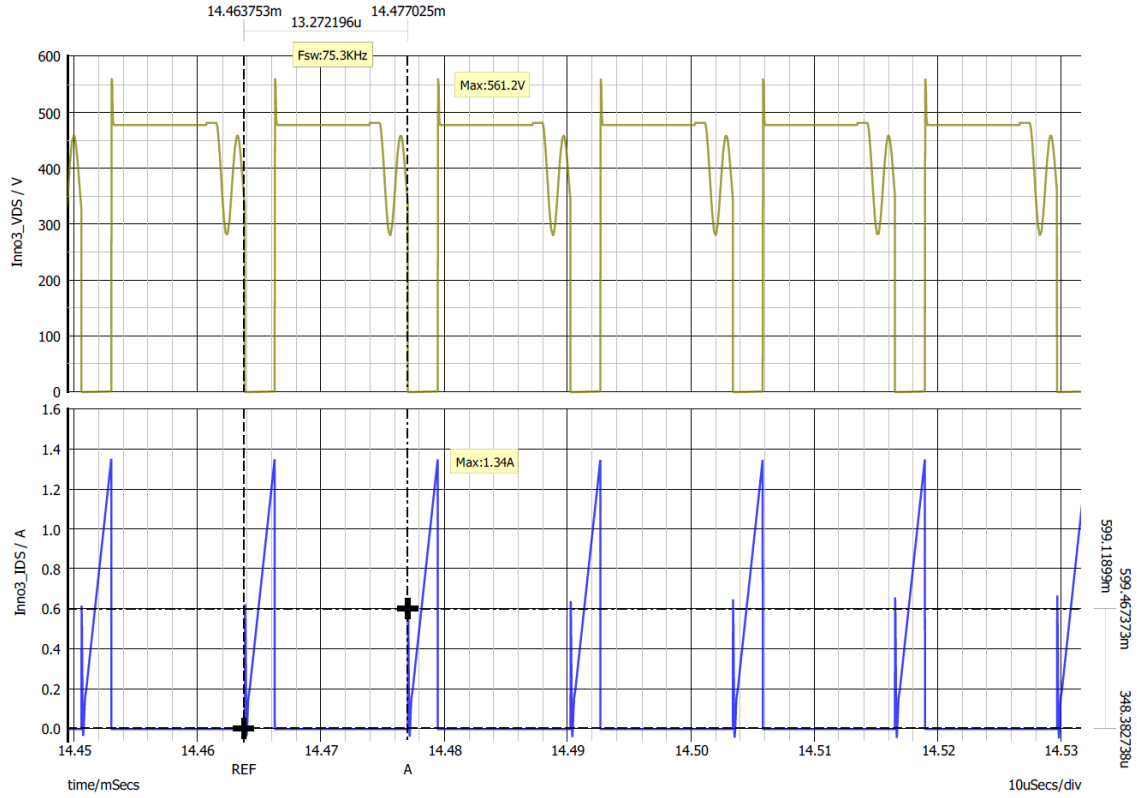
### 3.2.2.1. Devre analizi

Simplis devre analiz modelinde, söz konusu entegre için firma tarafından paylaşılan veri sayfasında yazan  $R_{DS(on)}$  değeri  $100^{\circ}\text{C}$ 'de  $1,86\Omega$  olarak ve akım limit değeri  $1,35\text{A}$  olarak alınmıştır.

Tasarımı doğrulamak için benzetim, maksimum yük koşulu ve maksimum giriş gerilimi olan  $265\text{V}$  ve  $19\text{V}$  çıkış seviyesinde  $45\text{W}$  gücü sağlamak için, maksimum çıkış akımı olan  $2,35\text{A}$  üzerinden başlatılmıştır. Bu analiz sonucunda, öncelikli olarak oluşan kararlı durum için primer tarafının drain-source gerilimi ve drain-source akımı grafikleri sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'daki gibi elde edilmiştir.



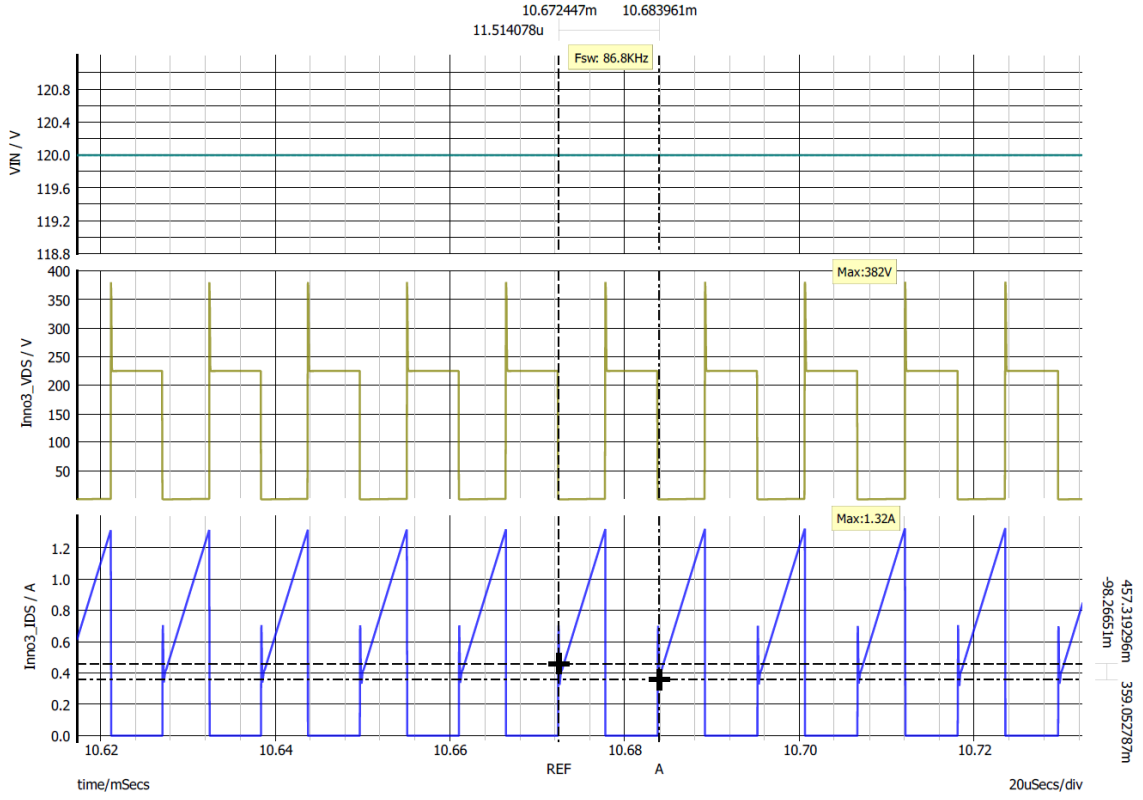
**Şekil 3.15:** Si Tabanlı Tasarımın Primer Taraf Başlangıç Durum Grafiği(@265V)



**Şekil 3.16:** Si Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafiği(@265V)

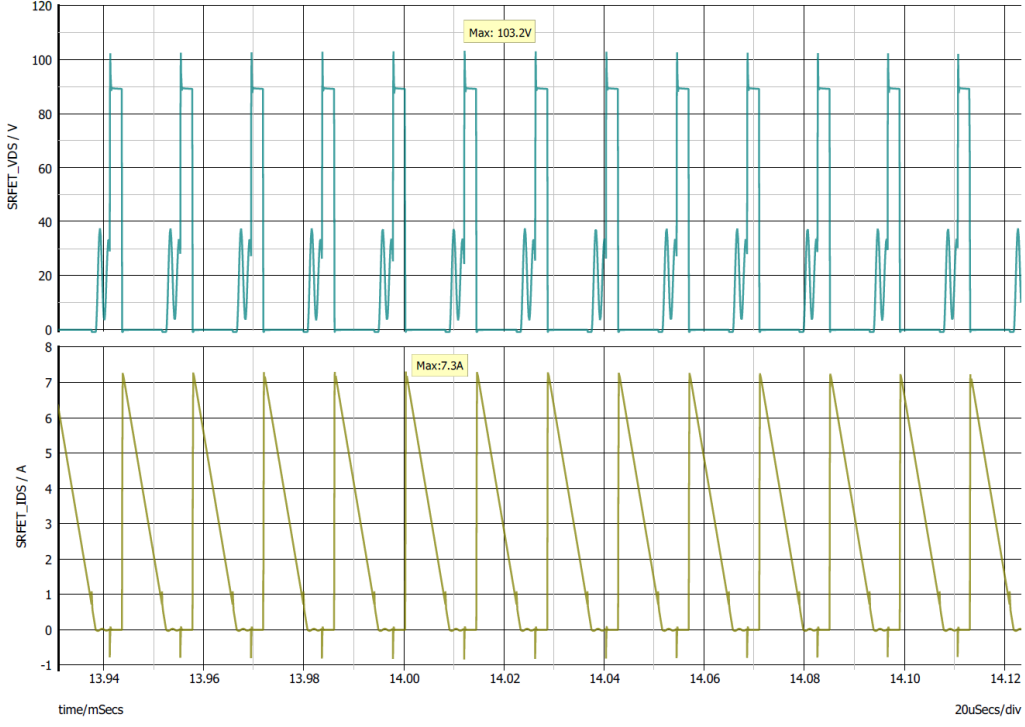
InnoSwitch3-EP anahtarının kararlı durumda ölçülen maksimum drain-source gerilimi 577,4V seviyesindedir. Maksimum drain-source akımı ise 1,44A seviyesindedir. Kararlı durumda anahtarlama periyodu 13,3us olarak ölçülmüştür. Bu durumda(@ $V_{INMAX}$ ,  $I_{SMAX}$ ) anahtarlama frekansı 75,3KHz değerindedir. Grafikler maksimum yük koşullarında elde edilmiştir. Bias sargısı gerilimi 12,7V, bypass gerilimi ise 4,4V olarak ölçülmüştür.

Bir diğer grafik ise 85V AC gerilim altında, maksimum çıkış gücü uygulanarak Şekil 3.17'deki gibi elde edilmiştir. Buna göre entegrenin bu koşullarda CCM modunda çalıştığını söylemek mümkündür. Öte yandan anahtarlama frekansı da 86,8 KHz seviyesindedir. Ölçülen maksimum akım değeri 1,32A, maksimum gerilim seviyesi ise 382V'tur.



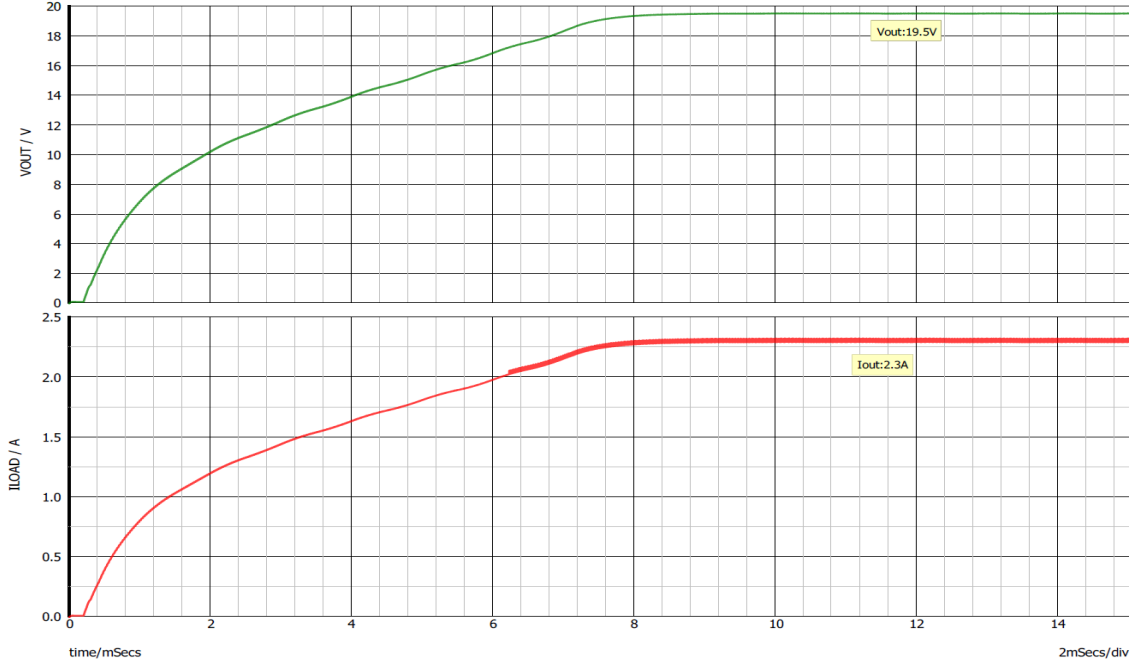
**Şekil 3.17:** Si Tabanlı Tasarımın Primer Kararlı Durum Grafiği(@85V)

Şekil 3.18’de sekonder kararlı durum grafiği incelendiğinde, MOSFET’in anahtarladığı drain-source akımı 7,3A seviyesinde olup drain-source gerilimi 103,2V olarak ölçülmüştür. Feedback gerilimi ise 1,255V olarak gözlemlenmiştir.



**Şekil 3.18:** Si Tabanlı Tasarımın Sekonder Kararlı Durum Grafikleri

Şekil 3.19’da belirtildiği üzere, kurulan devrenin çıkış gerilimi, 2,3A yükte 19,5V olarak ölçülmüştür ve bu değer 45W çıkış gücü ile uyumlu olup tasarım parametrelerini karşılamaktadır.

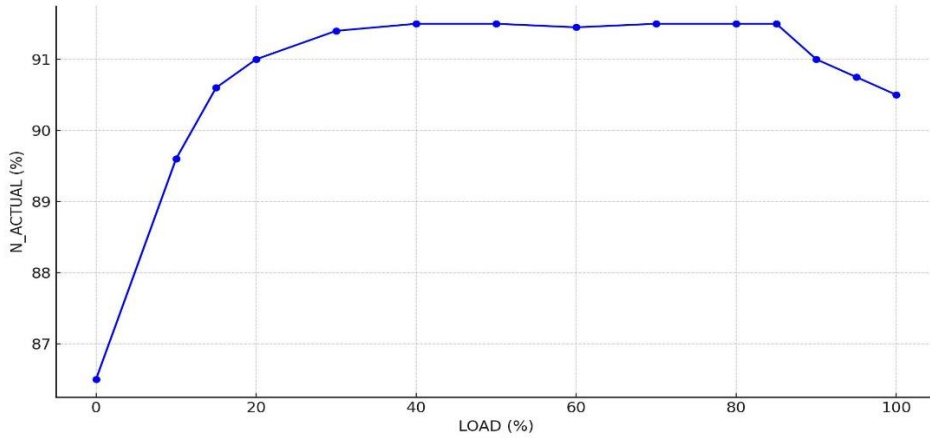


**Şekil 3.19:** Si Tabanlı Tasarımın Çıkış Grafikleri

### 3.2.2.2. Verimlilik ve termal performans analizi

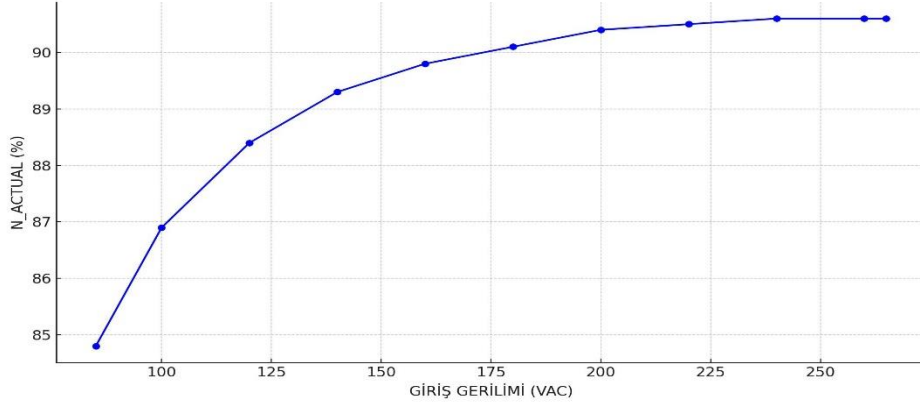
Çalışmada tasarımı yapılan GaN bazlı flyback devresinde sadece kontrolcü entegresi Si bazlı entegre ile değiştirilerek PI Expert'te yeniden oluşturulmuştur. Böylelikle tasarımın hem yük değişimine, hem de giriş geriliminin değişimine karşı verimlilik oranının nasıl etkilendiğini gözlemlemek mümkündür.

Şekil 3.20'deki yük oranı-verimlilik grafiğinde görüldüğü üzere tasarımın en verimli olduğu durum %40 ile %85 yük koşulları aralığındadır. Verimlilik oranı bu koşulda %91,5 seviyesindedir. Hafif yük koşullarında tasarımın verimliliği %86 seviyesine kadar düştüğü gözlemlenmektedir. %85 yük sonrasında da tasarımın verimliliğinde düşüş gözlemlenmektedir. Bu grafik 230 VAC giriş gerilimi altında, sadece yük koşulları değiştirilerek oluşturulmuştur



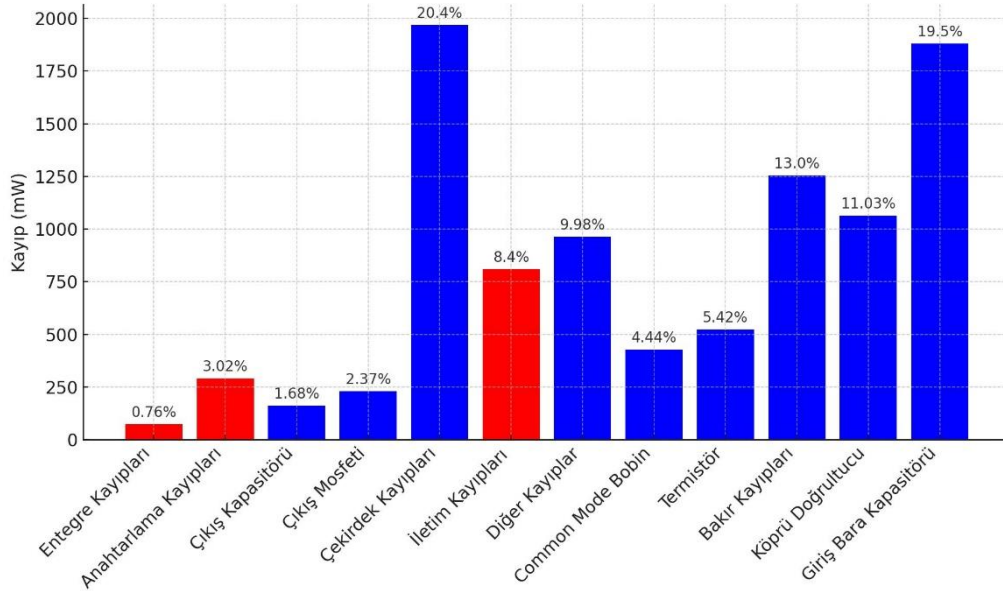
**Şekil 3.20:** Si Tabanlı Tasarımın Yük Oranı-Verimlilik Grafiği (@230V)

Şekil 3.21'deki giriş gerilimi-verimlilik grafiğinde görüldüğü gibi tasarımın maksimum verimliliği %90,5 seviyesindedir ve bu değere giriş geriliminin 265V seviyesindeyken ulaşılmaktadır. Bu grafik her giriş gerilimi değerinde maksimum yük koşulları dikkate alınarak oluşturulmuştur.



**Şekil 3.21:** Si Tabanlı Tasarımın Giriş Gerilimi-Verimlilik İlişkisi (@Tam Yük)

Tasarlanan SMPS devresinin kayıp analizi Şekil 3.22’de belirtilmiştir. Buna göre kayıpların en yoğun olduğu komponent %20,4 ile trafo olarak belirlenmiştir. Flyback anahtarın kayıp gücü 1174 mW seviyesinde, %12,1 olarak ölçülmüştür. Tahmini kayıp değerleri, kayıpların en fazla olduğu 85 VAC minimum giriş voltajında ve tam yükte belirlenmiştir.



**Şekil 3.22:** Si Tabanlı Tasarımın Benzetim Sonuçlarına Dayanan Tahmini Kayıpları

Elde edilen kayıp değerlerinden sıcaklık artış miktarını yaklaşık olarak hesaplamak mümkündür.

Veri sayfasında,  $\theta_{ja}$  değeri  $76^{\circ}\text{C}/\text{W}$  ve  $\theta_{jc}$  değeri  $8^{\circ}\text{C}/\text{W}$  olarak verilmiştir. Denklem 3.18 ile sıcaklık değışim miktarı hesaplandığında bileşim ile ortam arasındaki kayıplardan kaynaklı artışın  $89,224^{\circ}\text{C}$ , bileşim ile gövde arasındaki sıcaklık farkının ise  $9,392^{\circ}\text{C}$  olduğunu hesaplamak mümkündür.

## 4. FİZİKSEL TASARIM VE ANALİZİ

Fiziksel tasarım analizi, bir devre tasarımının teorik olarak elde edilen sonuçlarının gerçek dünya koşullarına uyarlanabilmesi için kritik bir aşamadır. Bu bölümde, farklı yazılımlar ile gerçekleştirilen benzetimlerin ardından, tasarımın fiziksel parametreleri ve bileşenleri analiz edilmiştir. Benzetimler, devreyi modellemek ve performansını incelemek için güçlü bir araç sağlasa da gerçek devre elemanları ile oluşturulmuş fiziksel devrenin analizi, tasarımın pratikteki doğruluğunu ve verimliliğini değerlendirmek için gereklidir. Bu bölümde, flyback devrelerinin farklı tasarım unsurlarının nasıl optimize edilebileceği, ısınma, yerleşim, bileşen boyutları ve verimlilik gibi faktörler üzerine odaklanılmıştır.

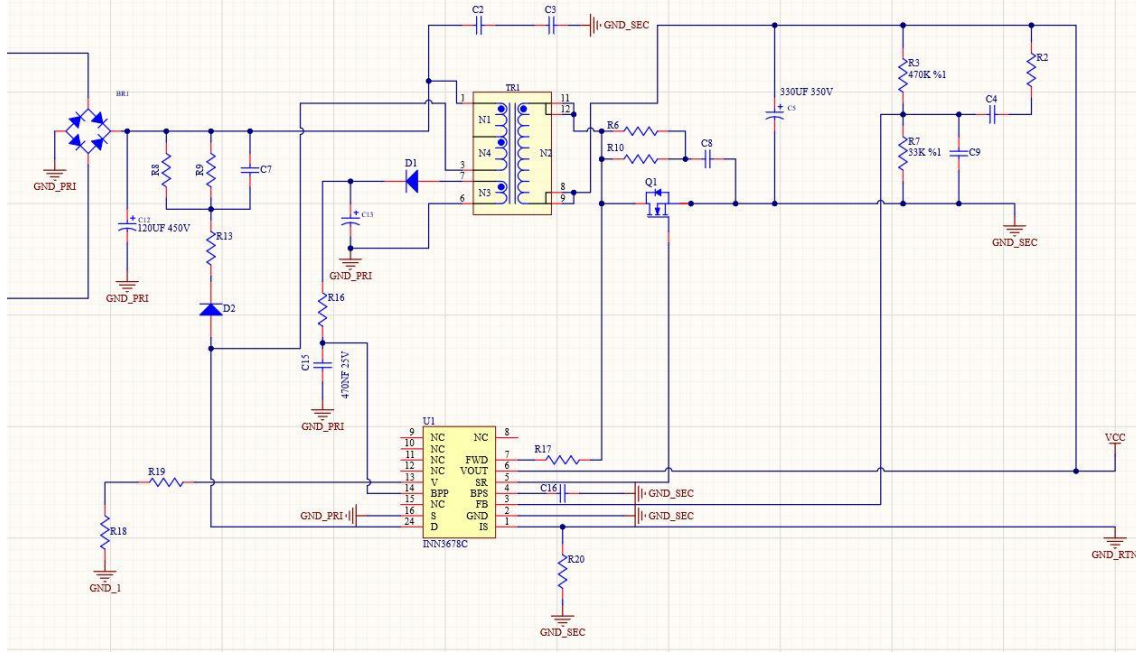
Fiziksel tasarım analizi, devre elemanlarının doğru yerleşimi, soğutma gereksinimlerinin karşılanması, kayıpların analiz edilmesi gibi önemli konuları kapsar. Bu aşamada, kullanılan GaN ve Si tabanlı MOSFET'lerin özellikleri, her iki teknoloji arasındaki farklar ve bu farkların devre tasarımına olan etkileri de incelenmiştir. Sonuç olarak, bu bölümde elde edilen veriler, tasarımın gerçek dünya uygulamalarındaki performansını optimize etmek ve daha güvenilir bir çalışma koşulu sağlamak amacıyla önemli bir temel oluşturmuştur.

Fiziksel tasarım adımına, şematik tasarımı ve sonrasında PCB tasarımını yaparak başlanmıştır. Bu aşamada, devrenin tüm elektriksel bağlantıları ve bileşen yerleşimleri belirlenmiş, ardından bu tasarımın fiziksel hale getirilmesi için PCB yerleşimi yapılmıştır. Şematik tasarım, devrenin doğru işleyişini sağlamak için gerekli olan tüm bağlantıları ve bileşenleri detaylandırırken, PCB tasarımı ise bu şematik yapının fiziksel ortama aktarılmasını ve uygulama için uygun hale getirilmesini amaçlamıştır.

### 4.1. Tasarım ve Prototipleme

Devreye ait şematik ve PCB tasarımı, tasarım sürecinin en kritik aşamalarından biridir. Bu adımda, devre elemanlarının yerleşimi ve bağlantıları sağlanmıştır. Şematik tasarımı yaparken kullanılacak komponentler, önceki benzetimler ve teorik hesaplar ile elde edilen veriler doğrultusunda seçilmiştir.

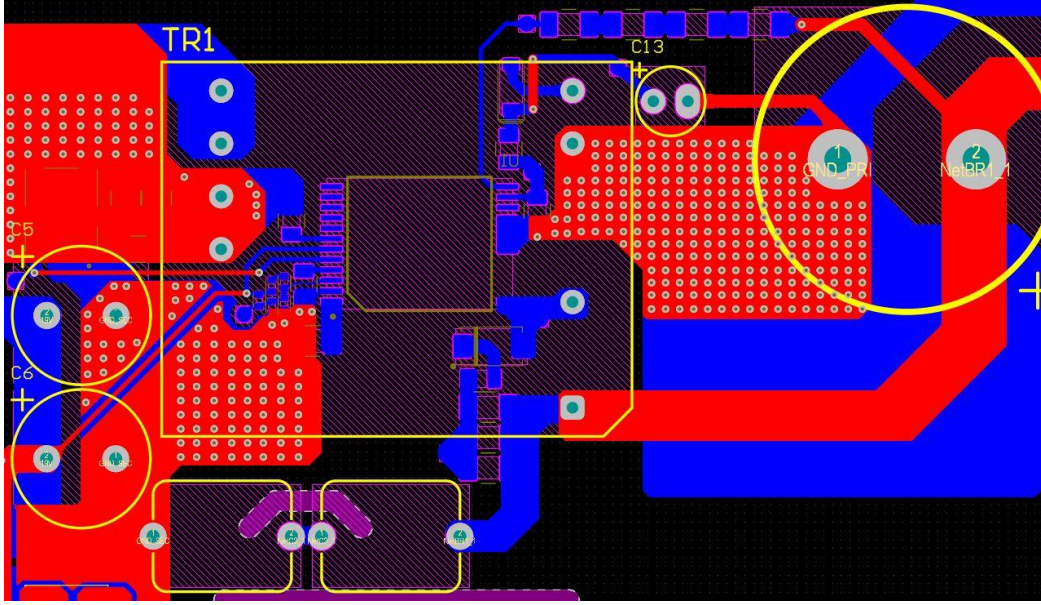
Şekil 4.1’de devreye ait şematik tasarım gösterilmiştir. Bu tasarım, teorik hesaplara uygun olarak yapılmıştır. Her iki entegre de aynı footprinte sahip olduğu için şematikte temsili olarak GaN tabanlı kontrolcü yer almaktadır.



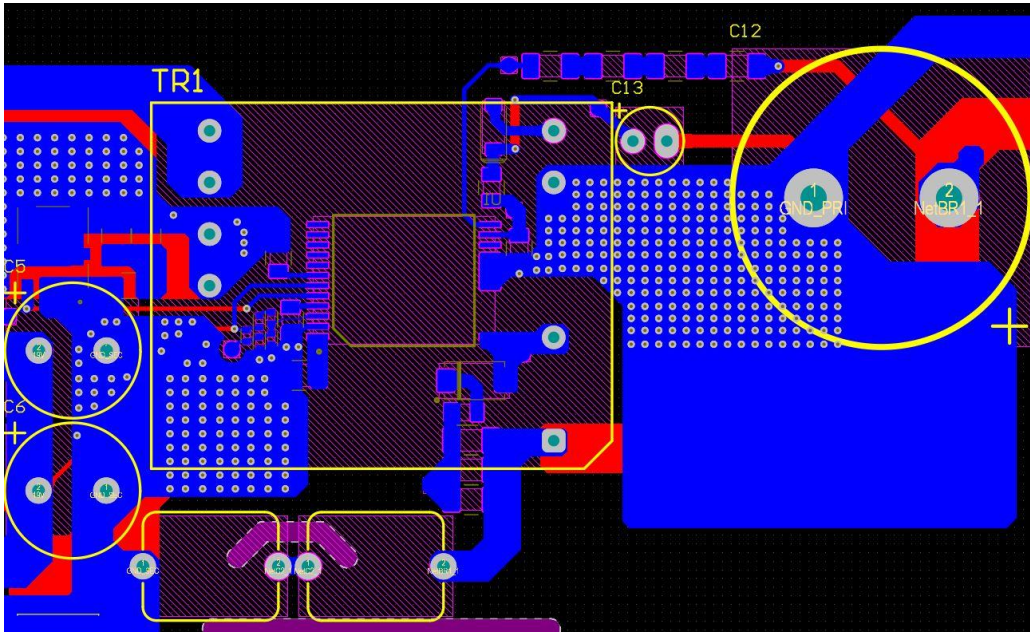
**Şekil 4.1:** Devrenin Şematik Tasarımı

Sonraki adımda ise, şematik tasarım temel alınarak PCB tasarımı gerçekleştirilmiştir. PCB tasarımı, devre elemanlarının fiziksel yerleşimlerinin optimize edilmesi, sinyal yollarının kısaltılması ve yüksek frekanslı sinyallerin doğru bir şekilde yönlendirilmesi gibi faktörler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Ayrıca, elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve ısı dağılımı gibi önemli mühendislik gereksinimleri de PCB tasarımında dikkate alınmıştır. Bu aşama, devrenin üretime hazır hale gelmesi ve uygulama alanında verimli bir şekilde çalışabilmesi için kritik bir adımdır.

Devreye ait PCB tasarımı Şekil 4.2’deki gibi çift yüzlü olarak yapılmıştır. Maksimum performans için entegreye ait veri sayfasında paylaşılan yerleşim planına dikkat edilmiştir. Termal performansı artırmak için 70µm kalınlığında bakır kullanılmıştır. Entegrenin soğutma alanı için üst yüzeyde 220 mm<sup>2</sup>, alt yüzeyde 590 mm<sup>2</sup> bakır soğutma alanı kullanılmıştır. PCB’de dielektrik katman olarak FR4 seçilmiştir.



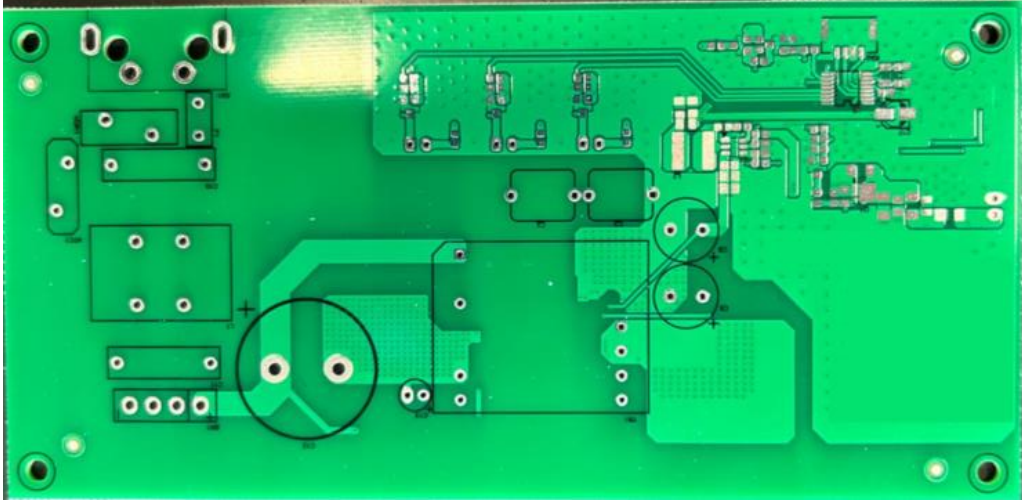
a)



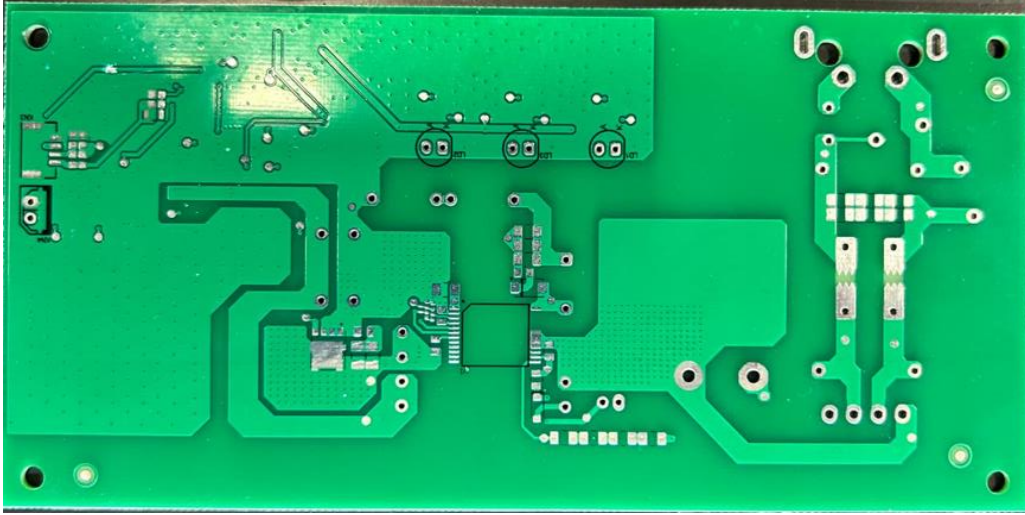
b)

**Şekil 4.2:** Devrenin PCB Tasarımı a) Üstten Görünüş b) Alttan Görünüş

Şekil 4.3'te üretim süreci tamamlanmış baskı devrenin alttan ve üstten görünümü yer almaktadır.



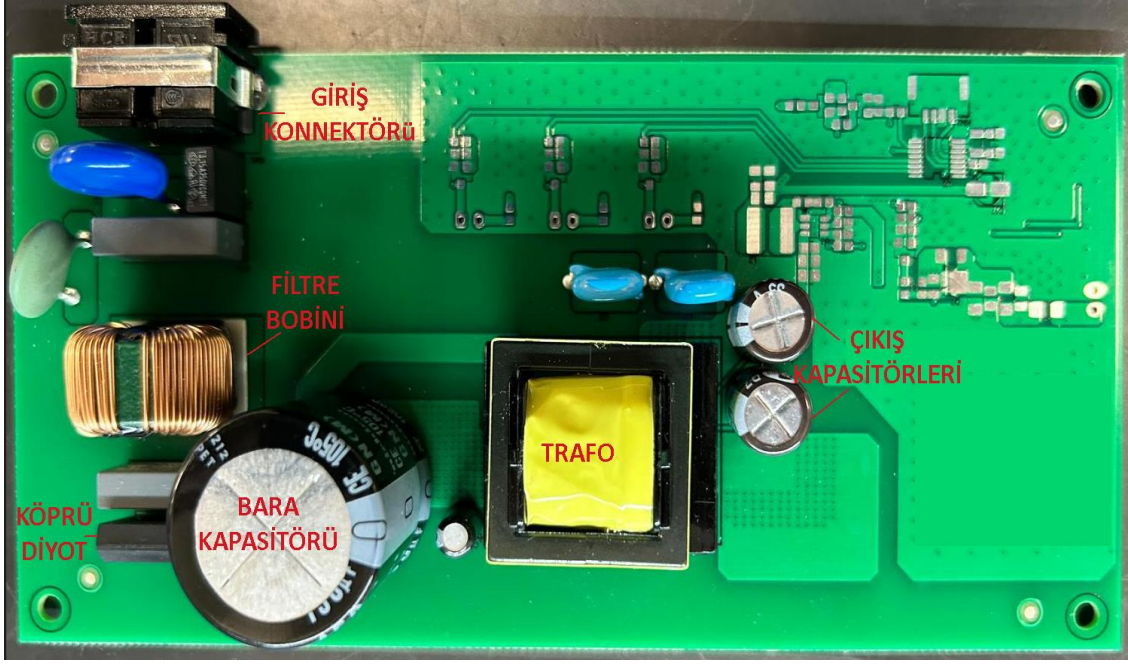
a)



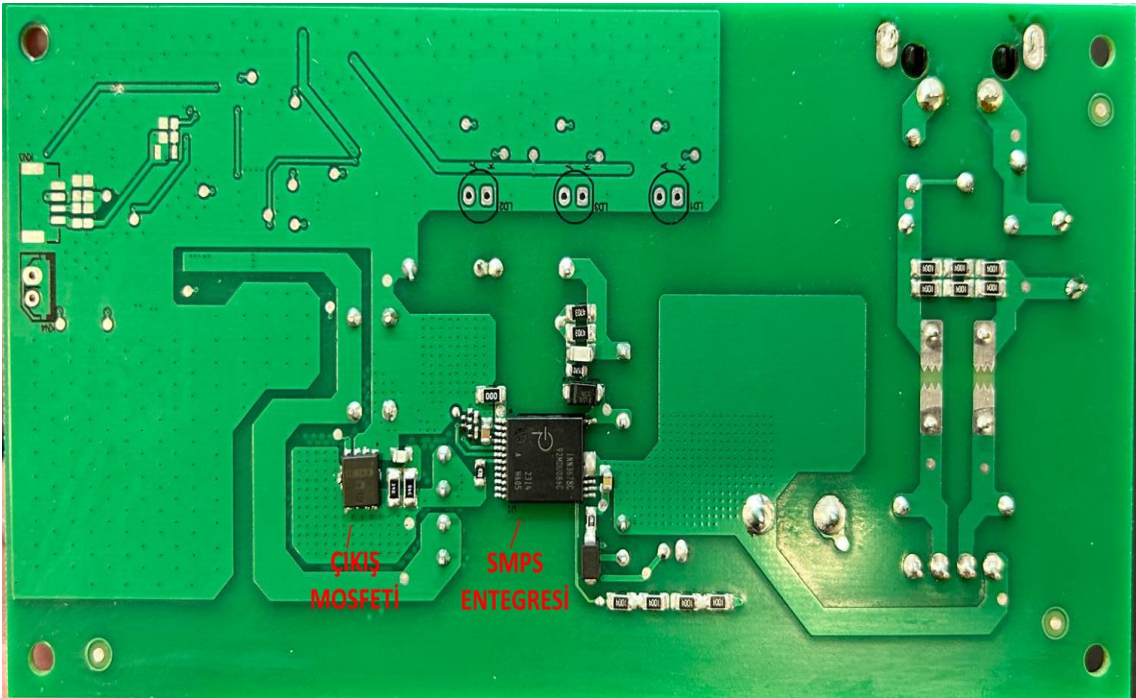
b)

**Şekil 4.3:** Baskı Devre Kartı a) Üstten Görünüş b) Alttan Görünüş

Şekil 4.4'te dizilen kartın alttan ve üstten görünüşü yer almaktadır. Flyback kontrolcüsü, entegrenin veri sayfasında önerildiği gibi trafonun altına konumlandırılmıştır. Giriş konnektörü, filtre bobini, giriş-çıkış kapasitörleri, köprü diyot gibi bacaklı bileşenler kartın üst tarafına montajlanmıştır. SMPS Entegresi, çıkış MOSFET'i gibi yüzey montajlı bileşenler kartın alt tarafında yer almaktadır.



a)

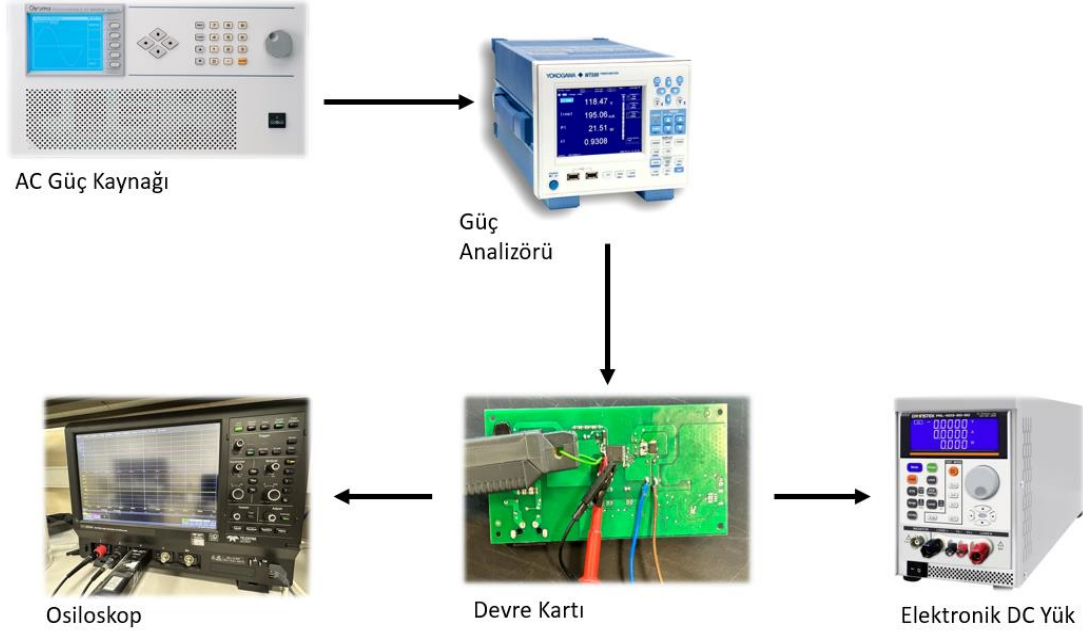


b)

Şekil 4.4: Prototip Kart a) Üstten Görünüş b) Alttan Görünüş

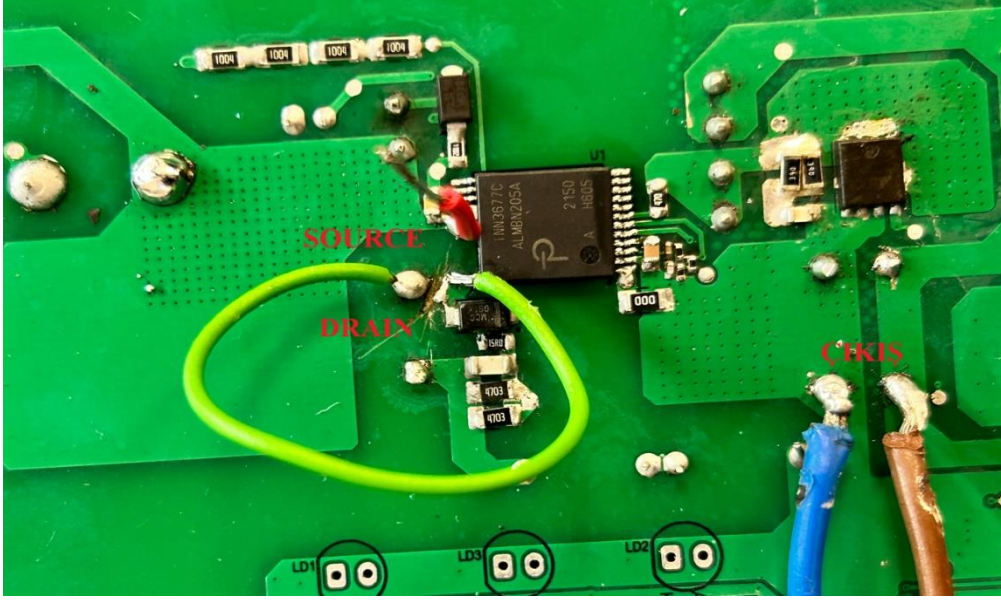
Tasarıma ait doğrulama ölçümlerini yapmak için Şekil 4.5'te görülen bir osiloskop (Lecroy HDO4054A), bir güç analizörü (Yokogawa WT500), bir güç kaynağı (Chroma

6560), bir elektronik yük (GW INSTEK PEL-503-80-50) ve bir termal kameradan (FLIR) oluşan düzenden yararlanılmıştır.



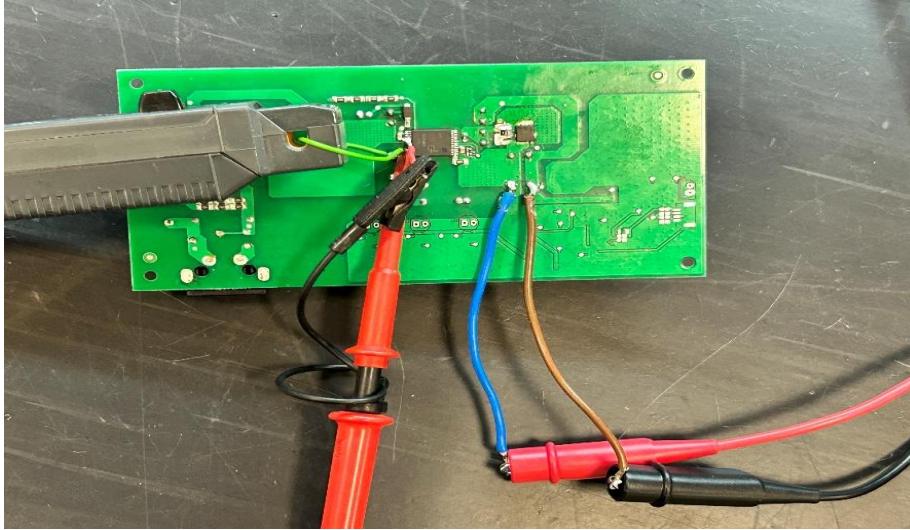
**Şekil 4.5:** Devrenin Analiz Düzeneği ve Araçları

Drain-source gerilimini ve akımını ölçmek için entegrenin drain pini ile trafo arasındaki hat kesilmiştir ve kesilen hatta osiloskopun akım probunun geçeceği uzunlukta Şekil 4.6'daki gibi bir atlama kablosu lehimlenmiştir. Ardından SMPS entegresinin source pinine osiloskop probu bağlayabilmek için kısa bir kablo ve çıkışa da elektronik yük bağlamak için çıkış kapasitesinin altına kablolar lehimlenmiştir.



**Şekil 4.6:** Devrenin Gerilim ve Akımının Ölçüm Yöntemi

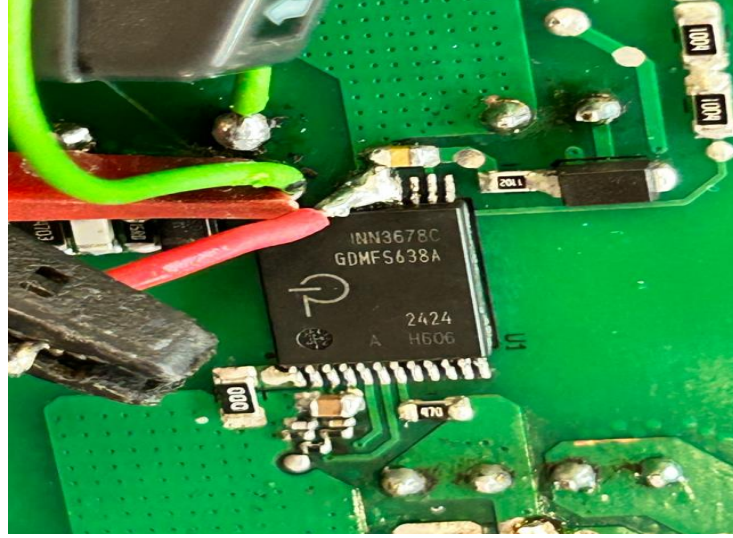
Osiloskopun akım probu, Şekil 4.7'deki gibi drain pinine lehimlenen atlama kablosuna yerleştirilmiştir. Entegrenin drain-source pinleri arasında, osiloskopun yüksek gerilim probu bağlanmıştır. Devrenin çıkışına elektronik DC yük bağlantısı yapılmıştır.



**Şekil 4.7:** Osiloskop ve Elektronik Yük Bağlantıları

#### **4.2. GaN Tabanlı Devre Tasarımına Ait Ölçümler**

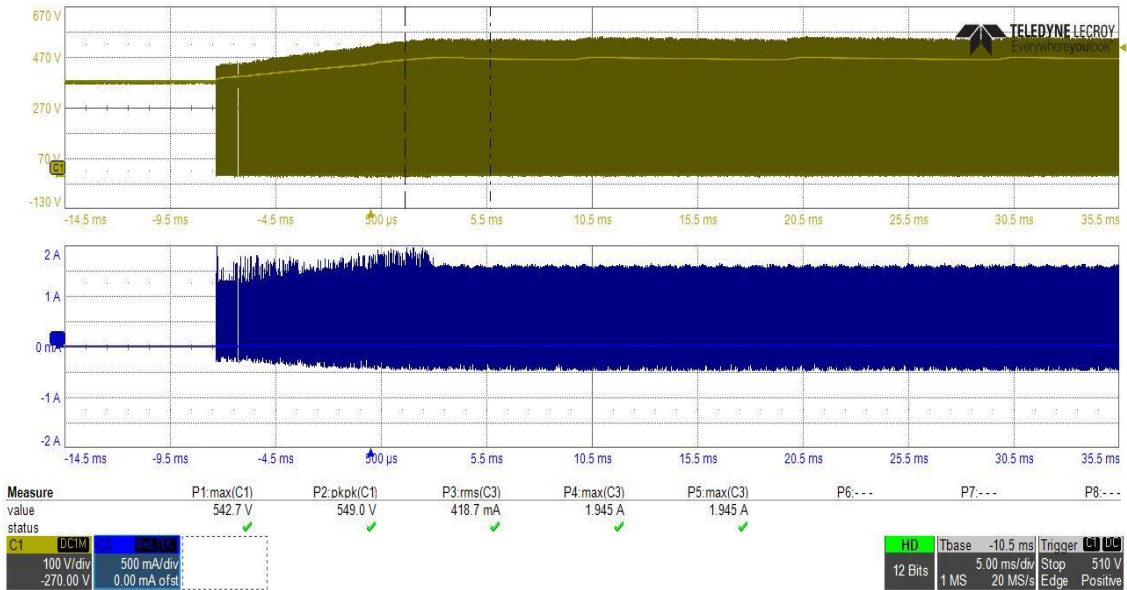
Tasarlanan devre kartına öncelikle GaN tabanlı INN3678C entegresi, Şekil 4.8'deki gibi lehimlenmiştir.



Şekil 4.8: GaN Tabanlı Entegre

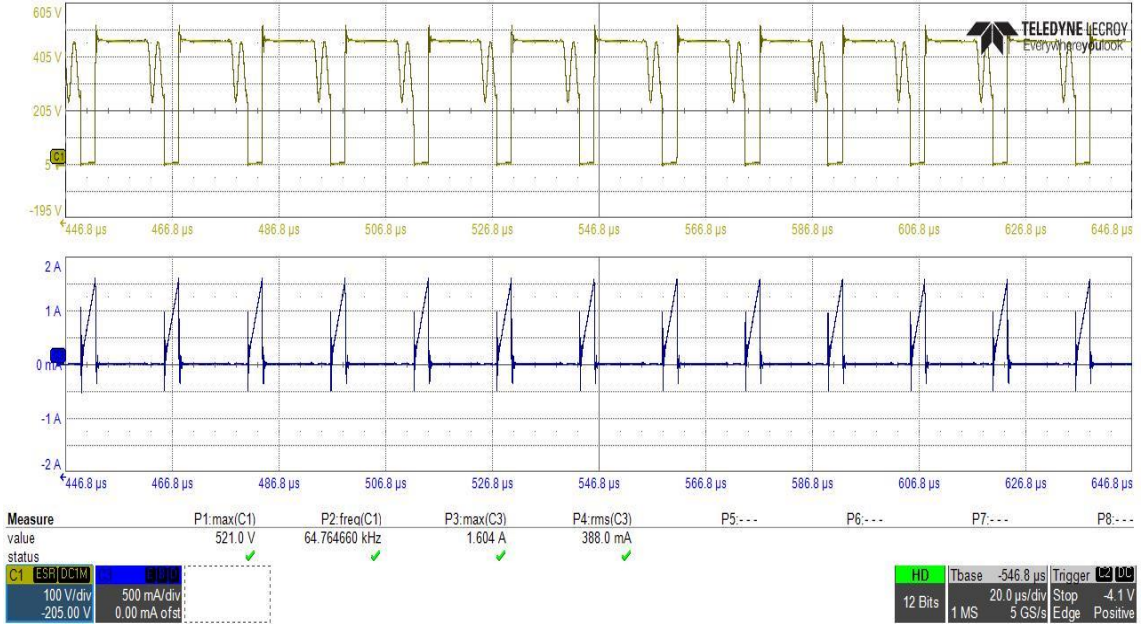
İlk olarak drain-source gerilimi ve akımı, osiloskop ile ölçülmüştür. Maksimum seviyenin gözlemlenmesi için başlangıç durum grafikleri oluşturulmuştur.

Şekil 4.9'daki osiloskop görüntüsünde tasarımın başlangıç durum akım ve gerilim grafiği yer almaktadır. Bu grafik, tasarımın maksimum gerilim değeri olan 265V altında, 47,5W tam yük koşullarında oluşturulmuştur. Buna göre başlangıç durumunda maksimum drain-source gerilimi 543V seviyesinde, maksimum akım değeri ise 1,945A seviyesindedir.



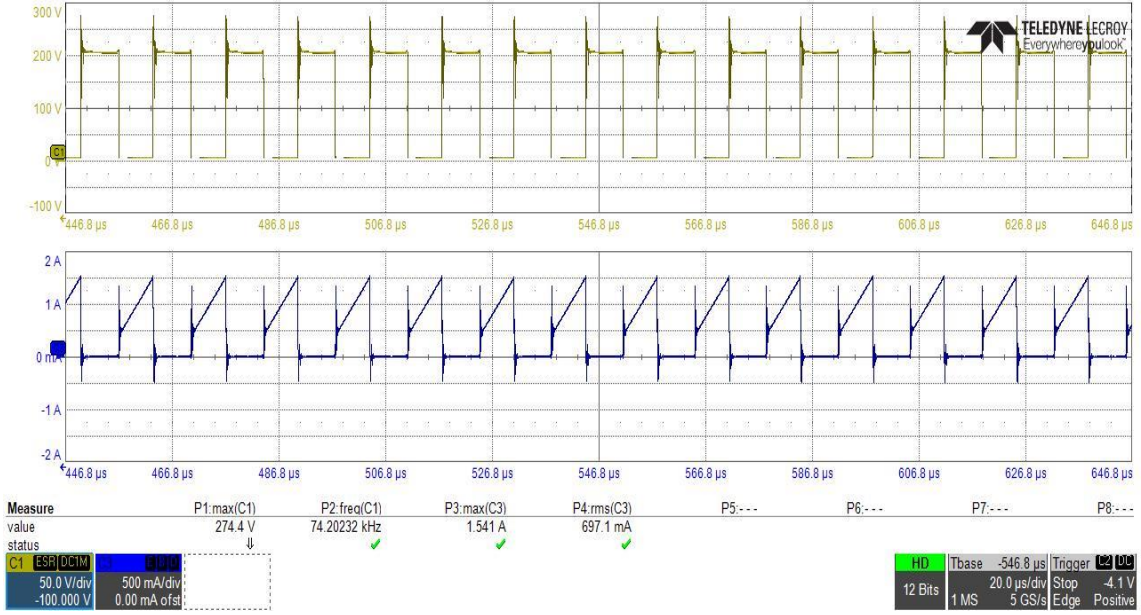
Şekil 4.9: GaN Tabanlı Tasarımın Başlangıç Durumu Akım ve Gerilim Grafikleri

Tasarım kararlı duruma geçtikten sonra drain-source maksimum gerilim seviyesi Şekil 4.10'daki gibi 521V seviyesine inmiştir. Akım seviyesi ise, entegrenin akım limitleme özelliğinin devreye girmesiyle birlikte 1,6A seviyesine inmiştir. Grafiklerden gözlemlendiği üzere entegre tam yük ve maksimum gerilim koşulları altında QR modda çalışmaktadır ve 65KHz anahtarlama frekansına sahiptir.



Şekil 4.10: GaN Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi (@265V)

Tasarıma ait kararlı durum grafikleri, 85V gerilim altında ve tam yük koşullarında Şekil 4.11'deki gibi oluşturulmuştur. Buna göre maksimum drain-source gerilimi 274,5V seviyesinde, akımı ise 1,541A seviyesindedir. Entegre bu koşullarda DCM modda çalışmakta olup anahtarlama frekansı 75 KHz'dir.



**Şekil 4.11:** GaN Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi (@85V)

Tasarıma ait güç değerleri de analiz edilmiştir. Gerilim kaynağı ile tasarımın giriş konnektörü arasında Şekil 4.5'te görüldüğü gibi bir güç analizörü bağlanmıştır. Devrenin çıkış kapasitesinin altına lehimlenen kablolar yardımıyla elektronik DC yük bağlantısı yapılmıştır. Elektronik DC yük, sabit güç moduna alınmış ve tasarıma ait giriş-çıkış gücü ve verimlilik değeri, güç analizörü yardımıyla farklı giriş gerilimleri altında tasarımın baz aldığı güç değeri üzerinden; tam yük (47,5W), yarım yük (23,75) ve hafif yük (1,0W) koşullarında ölçülmüştür.

Tablo 4.1'de tasarıma ait güç analiz sonuçları verilmektedir. Buna göre tasarımın çıkış gerilimi tam yükte ve 85VAC giriş gerilimi altında 18,12V seviyesine kadar inmektedir. Çıkış geriliminin maksimum değeri ise yarım yük koşullarında ve 265VAC giriş gerilimi altındadır. Tasarımın en verimli olduğu koşul %91,35 ile yarım yük koşullarında, 265VAC giriş gerilimi seviyesindedir. Tasarımın en verimsiz olduğu koşul ise %80 ile hafif yük koşullarında ve 265VAC giriş gerilim seviyesindedir. Devrenin standby güç tüketimi 265VAC altında 70mW olarak ölçülmüştür.

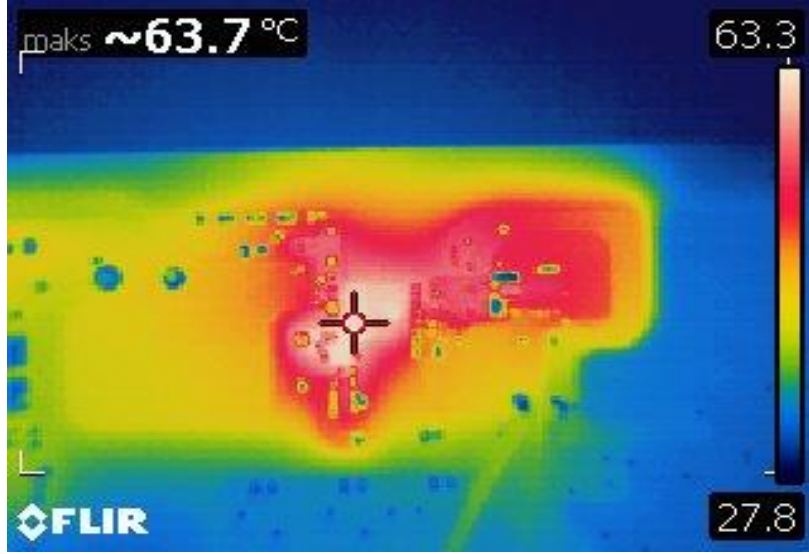
**Tablo 4.1:** GaN Tabanlı Tasarımın Verimlilik Analizi

Giriş Gerilimi (VAC)	Yük	Giriş Gücü (W)	Çıkış Gücü (W)	Çıkış Gerilimi (VDC)	Verimlilik (%)
265	Tam	52,28	47,50	19,25	90,86
<b>265</b>	<b>Yarım</b>	<b>26,00</b>	<b>23,75</b>	<b>19,34</b>	<b>91,35</b>
265	Hafif	1,25	1,00	19,13	80,00
230	Tam	52,24	47,50	19,00	90,93
230	Yarım	26,15	23,75	19,37	90,82
230	Hafif	1,20	1,00	19,13	83,33
150	Tam	52,95	47,50	18,66	89,71
150	Yarım	26,07	23,75	19,33	91,10
150	Hafif	1,16	1,00	19,13	86,21
85	Tam	54,85	47,50	18,12	86,60
85	Yarım	26,50	23,75	19,15	89,62
85	Hafif	1,16	1,00	19,12	86,21
265	Yük Yok	0,07	Standby	19,22	

Fiziksel tasarım süreci tamamlandıktan sonra, sistemin termal performansının değerlendirilmesi bir diğer önemli aşamadır. Bu bağlamda, sıcaklık analizi yapılmış ve devredeki ısıl davranış incelenmiştir. Termal yönetim, özellikle güç elemanlarının verimli çalışabilmesi ve sistemin güvenli bir şekilde performans göstermesi için kritik bir faktördür. Bu aşamada, termal kamera ile yapılan ölçümler ve sıcaklık dağılımları dikkate alınarak, sistemin sıcaklık profili ortaya konmuştur.

Öncelikle tasarım en verimsiz koşul olan 85VAC ve tam yük gerilimi altında çalıştırılmıştır. Görüntüler alınmadan önce devre 25°C oda sıcaklığı koşullarında üstü kapatılarak 6 saat boyunca çalıştırılmıştır.

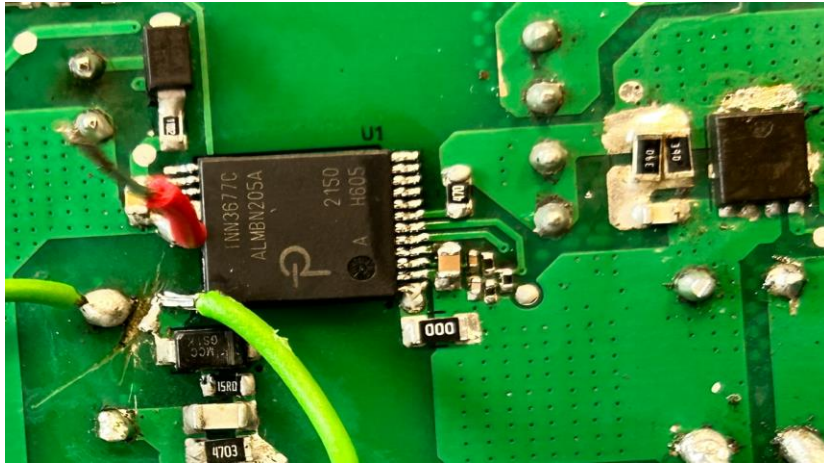
Tasarımda en çok ısınan komponent Şekil 4.12’de görüldüğü gibi SMPS entegresidir. Entegrenin sıcaklığı 85VAC giriş geriliminde, 47,5W tam yük koşullarında 63,7°C olarak ölçülmüştür. Entegrenin sıcaklık korumasının 130°C’de devreye girdiği düşünüldüğünde tasarımın güvenli sıcaklık değerlerinde çalıştığı yorumu yapılabilmektedir.



**Şekil 4.12:** GaN Tabanlı Tasarımın Alt Yüzey Termal Kamera Görüntüsü

### 4.3. Si Tabanlı Devre Tasarımına Ait Ölçümler

Tasarlanan devre kartına Si Tabanlı INN3677C entegresi, Şekil 4.13'deki gibi lehimlenmiştir.

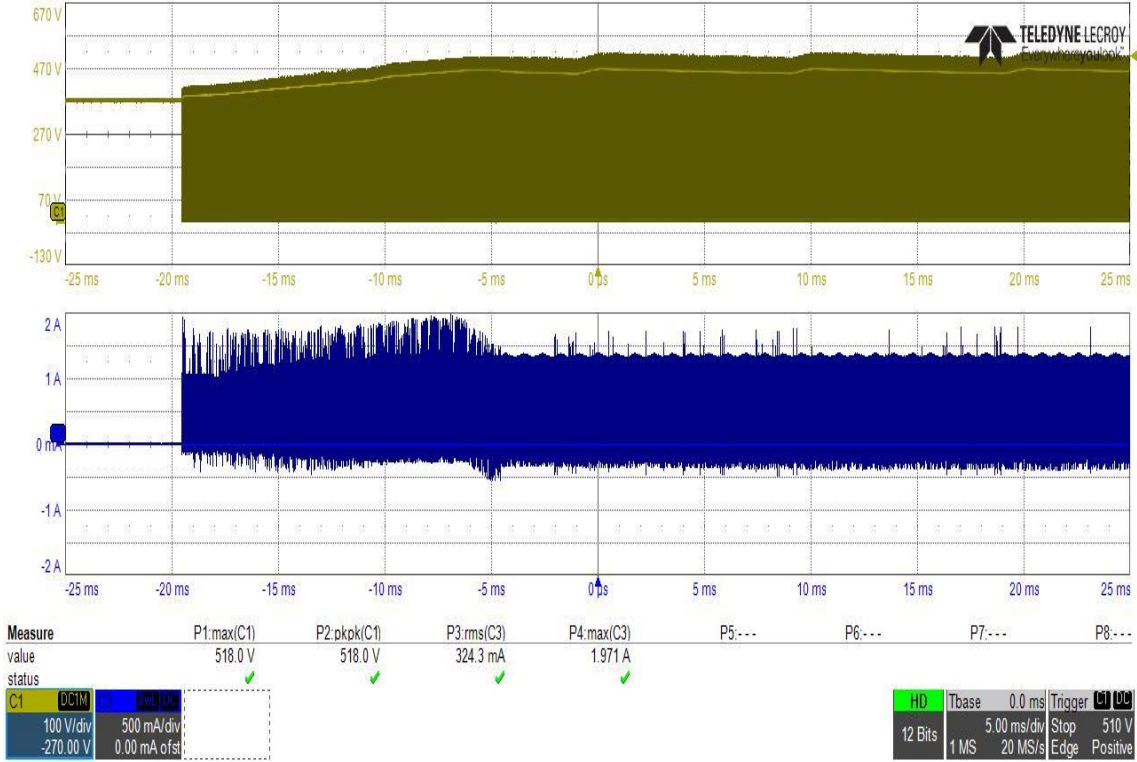


**Şekil 4.13:** Si Tabanlı Entegre

Tasarımın başlangıç durum ve kararlı durum analizini yapmak için osiloskop kullanılmıştır. Maksimum değerleri gözlemlemek için drain-source akım ve gerilim grafikleri oluşturulmuştur.

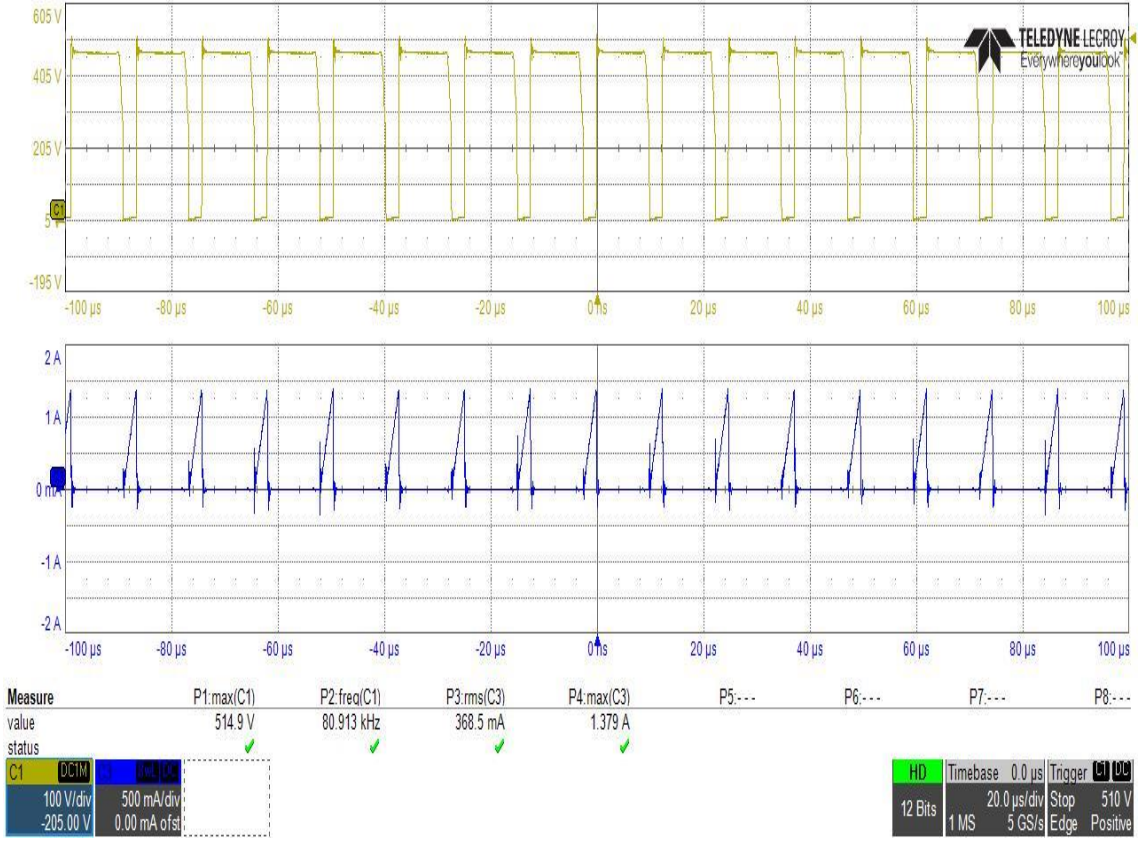
Şekil 4.14'deki osiloskop görüntüsünde tasarımın başlangıç durum grafiği yer almaktadır. Bu grafik, tasarımın maksimum gerilim değeri olan 265V altında, 45W tam yük

koşullarında oluşturulmuştur. Buna göre başlangıç durumunda maksimum drain-source gerilimi 518V seviyesinde, maksimum akım değeri ise 1,97A seviyesindedir.



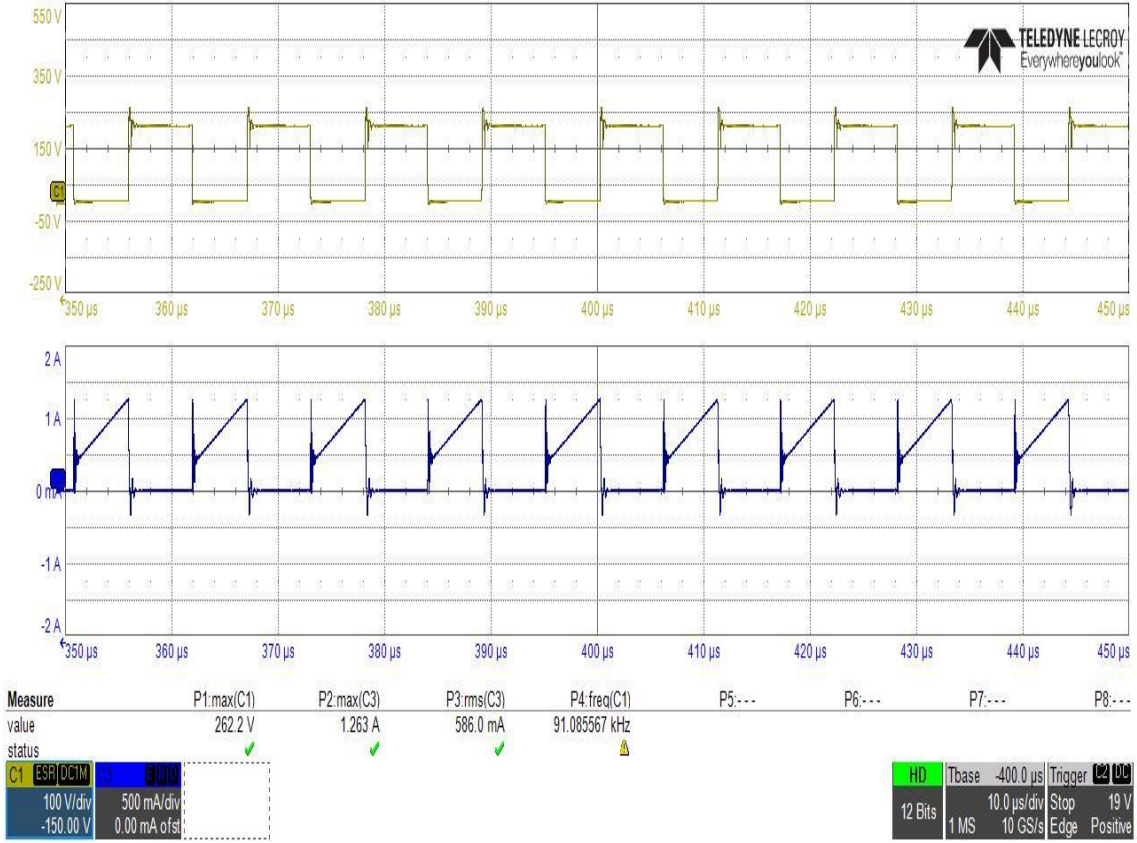
Şekil 4.14: Si Tabanlı Tasarımın Başlangıç Durum Grafikleri(@265V)

Tasarıma ait kararlı durum grafikleri, 265V gerilim altında ve tam yük koşullarında Şekil 4.15'deki gibi oluşturulmuştur. Buna göre maksimum drain-source gerilimi 515V seviyesinde, akımı ise 1,38A seviyesindedir. Entegre bu koşullarda DCM modda çalışmakta olup anahtarlama frekansı 81 KHz'dir.



**Şekil 4.15:** Si Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi(@265V)

Tasarıma ait kararlı durum grafikleri, 85V gerilim altında ve tam yük koşullarında Şekil 4.16'daki gibi oluşturulmuştur. Buna göre maksimum drain-source gerilimi 262V seviyesinde, akımı ise 1,26A seviyesindedir. Entegre bu koşullarda CCM modda çalışmakta olup anahtarlama frekansı 91 KHz'dir.



**Şekil 4.16:** Si Tabanlı Tasarımın Kararlı Durum Analizi(@85V)

Tasarıma ait giriş-çıkış gücü ve verimlilik değeri, güç analizörü yardımıyla farklı giriş gerilimleri altında tasarımın baz aldığı güç değerlerine göre; tam yük (45W), yarım yük (22,5W) ve hafif yük (1,0W) koşullarında ölçülmüştür.

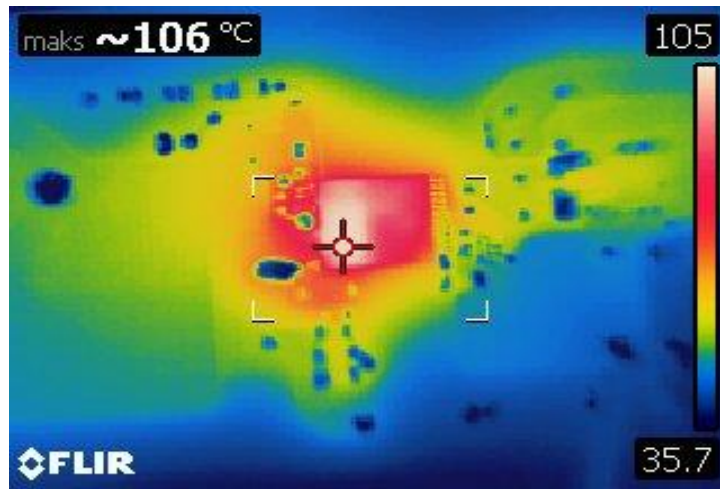
Tablo 4.2’de tasarıma ait güç analiz sonuçları verilmektedir. Buna göre tasarımın çıkış gerilimi tam yükte ve 85VAC giriş gerilimi altında 18,05V seviyesine kadar inmektedir. Çıkış geriliminin maksimum değeri 19,4V ile yarım yük koşullarında ve 265VAC giriş gerilimi altındadır. Tasarımın en verimli olduğu koşul %90,47 ile yarım yük koşullarında, 230VAC giriş gerilimi seviyesindedir. Tasarımın en verimsiz olduğu koşul ise %79,93 ile hafif yük koşullarında ve 85VAC giriş gerilim seviyesindedir. Devrenin standby güç tüketimi 265V AC altında 70mW olarak ölçülmüştür.

**Tablo 4.2:** Si Tabanlı Tasarımın Verimlilik Analizi

Giriş Gerilimi (VAC)	Yük	Giriş Gücü (W)	Çıkış Gücü (W)	Çıkış Gerilimi (VDC)	Verimlilik (%)
265	Tam	50,45	45,00	19,00	89,20
265	Yarım	24,92	22,50	19,40	90,29
265	Hafif	1,25	1,00	19,19	80,00
230	Tam	50,20	45,00	18,53	89,64
<b>230</b>	<b>Yarım</b>	<b>24,87</b>	<b>22,50</b>	<b>19,28</b>	<b>90,47</b>
230	Hafif	1,25	1,00	19,16	80,00
150	Tam	51,20	45,00	18,38	87,89
150	Yarım	24,90	22,50	19,23	90,36
150	Hafif	1,25	1,00	19,17	80,00
85	Tam	56,30	45,00	18,05	79,93
85	Yarım	25,25	22,50	19,15	89,11
85	Hafif	1,20	1,00	19,16	83,33
265	Yük Yok	0,07	Standby	19,22	

Si tabanlı entegreli tasarım 25°C'lik oda koşullarında 6 saat bekletildikten sonra sıcaklık analizi için termal kamera görüntüleri elde edilmiştir.

Şekil 4.17, en yoğun kayıp 85V giriş geriliminde ve 45W tam yük koşullarında oluşmuştur. Buna göre Si tabanlı entegrenin sıcaklığı 106°C seviyesindedir. Entegrenin termal koruması 135°C seviyesindedir. Bu görüntüler, devrenin kapalı ortamda ve iklim koşullarının elverişsiz olduğu ortamlarda ekstra bir soğutma önlemi alınarak kullanılmasının güvenlik açısından daha uygun olacağını göstermektedir.



**Şekil 4.17:** Si Tabanlı Tasarımın Alt Yüzey Termal Kamera Görüntüsü

## 5. KARŞILAŞTIRMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, GaN ve Si tabanlı anahtarlama elemanlı flyback dönüştürücülerinin performansları karşılaştırılmıştır. Her iki teknoloji, yüksek verimlilik, düşük kayıplar ve daha kompakt tasarımlar sunma potansiyeli ile dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda, farklı çalışma koşullarındaki performansları, özellikle anahtarlama kayıpları, çıkış verimlilikleri ve termal yönetim açısından incelenmiştir.

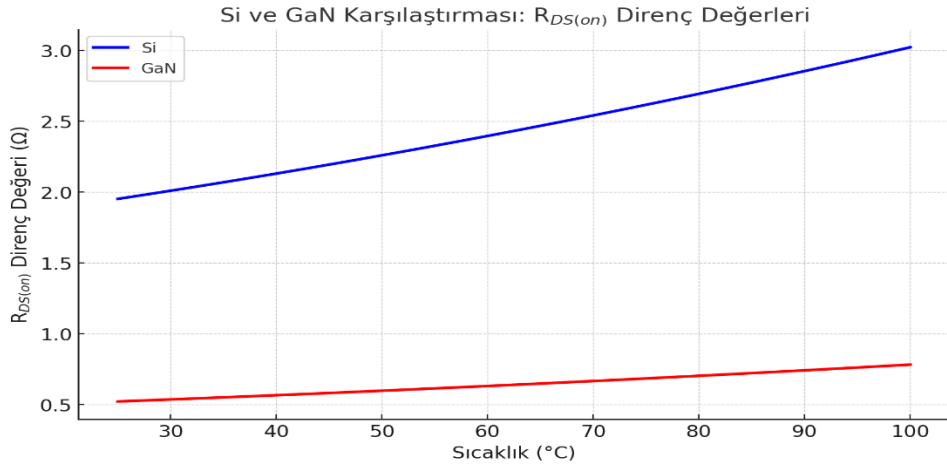
Tez çalışmasında aynı firmanın aynı seriden birbirleri yerine kullanılabilen ürünlerinin seçilmesi tam anlamıyla bir karşılaştırma yapılabilmesini sağlamıştır. PCB üzerinde sadece entegre değiştirilerek aynı soğutma alanında iki entegrenin de termal performanslarının gözlemlenme olanağı elde edilmiştir.

Elde edilen veriler, GaN tabanlı sistemlerin daha düşük kayıplara ve daha iyi termal performansa sahip olduğunu gösterirken, Si tabanlı sistemlerin genellikle daha düşük verimliliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. GaN ve Si tabanlı flyback kontrolcülerıyla yapılan iki ayrı tasarımda elde edilen veriler, teze konu olan çalışmaya çıktı sağlayacak nitelikte olmuştur. Bu bölümde, her iki teknolojinin avantajları ve sınırlamaları üzerine yapılan karşılaştırmalar ışığında, her iki malzeme tabanlı tasarımın uygunlukları değerlendirilmiştir.

### 5.1. Verimlilik

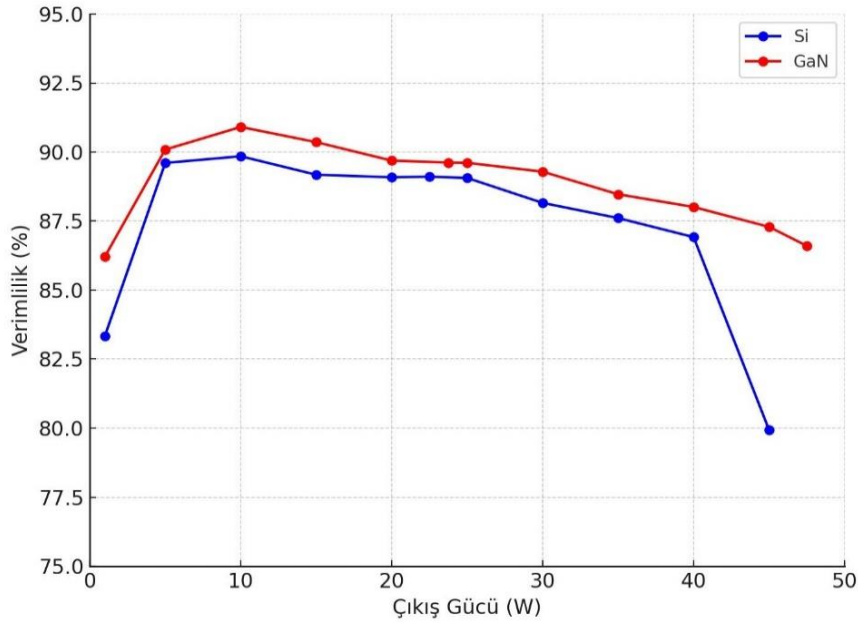
Her iki entegreyi verimlilik açısından karşılaştırırken, özellikle  $RDS_{ON}$  değerlerinin önemli bir parametre olduğunu belirtmek gerekir.  $RDS_{ON}$  değeri, bir MOSFET'in iletim halinde iken gösterdiği dirençtir ve bu değer ne kadar düşükse, geçiş kayıpları o kadar az olur. GaN ve Si teknolojileri farklı yapılar ve malzeme özelliklerine sahip olduğundan, her iki entegre için  $RDS_{ON}$  değerleri farklıdır ve bu doğrudan verimlilik üzerindeki etkilerini gösterir.

Şekil 5.1'de GaN ve Si Tabanlı entegrelerinin farklı sıcaklıklardaki  $RDS_{ON}$  değerlerini göstermektedir.  $RDS_{on}$  direncinin düşüklüğü iletim kayıplarını azaltmak için en önemli parametrelerden biridir. Öte yandan anahtarlama kayıplarını etkileyen bir diğer önemli parametre ise çıkış kapasitanslarıdır( $C_{oss}$ ). Bu değer GaN tabanlı anahtarlarda, Si tabanlı anahtarlara göre çok daha düşüktür. Bu da iletim kaynaklı kayıpların da minimize edilmesini sağlar.



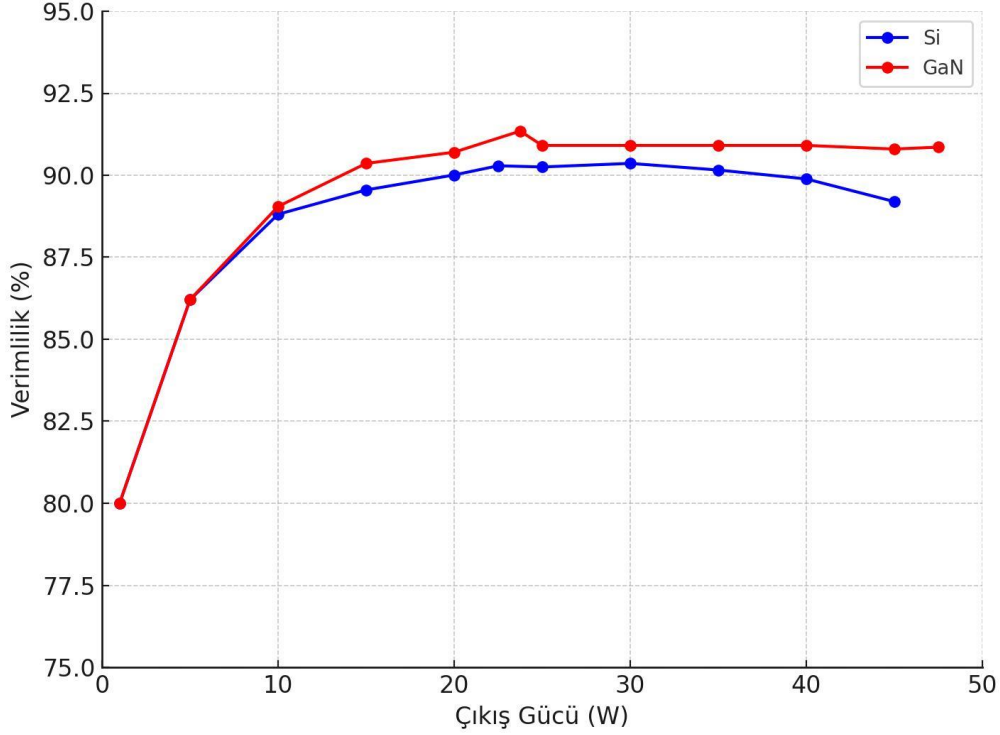
**Şekil 5.1:** GaN ve Si Tabanlı Kontrolcülerde Sıcaklık - R<sub>DS(ON)</sub> ilişkisi

Şekil 5.2’de sunulan grafik, verimliliğin en düşük olduğu 85VAC giriş geriliminde, fiziksel tasarım üzerinden oluşturulmuştur. Hafif yük durumunda Si bazlı tasarımın verimlilik oranı %83 seviyesindedir. Aynı koşullarda GaN bazlı tasarım %86 seviyesinde verimlilik sağlamaktadır. Tam yük koşullarında ise bu fark daha da artmaktadır. Si bazlı entegre tam yük altında %80’e yakın bir oranda verimlilik sunarken GaN bazlı tasarım %86 seviyesindedir. Minimum giriş gerilimi-maksimum yük koşullarında GaN bazlı tasarım verimlilikte %6,97 oranında iyileşme sağlamıştır.



**Şekil 5.2:** GaN ve Si Tabanlı Tasarımların Verimlilik-Çıkış Gücü İlişkisi (@85V)

Şekil 5.3'teki verimlilik-yük grafiği 265V giriş gerilimi altında fiziksel tasarım üzerinden ölçülen değerlerle oluşturulmuştur. Belirtilen giriş gerilimi seviyesinde kayıplar her iki tasarımda da benzer değerlerdedir fakat çıkış yükü arttıkça Si tabanlı tasarımın kayıplarında ölçülebilir bir artış olmaktadır.



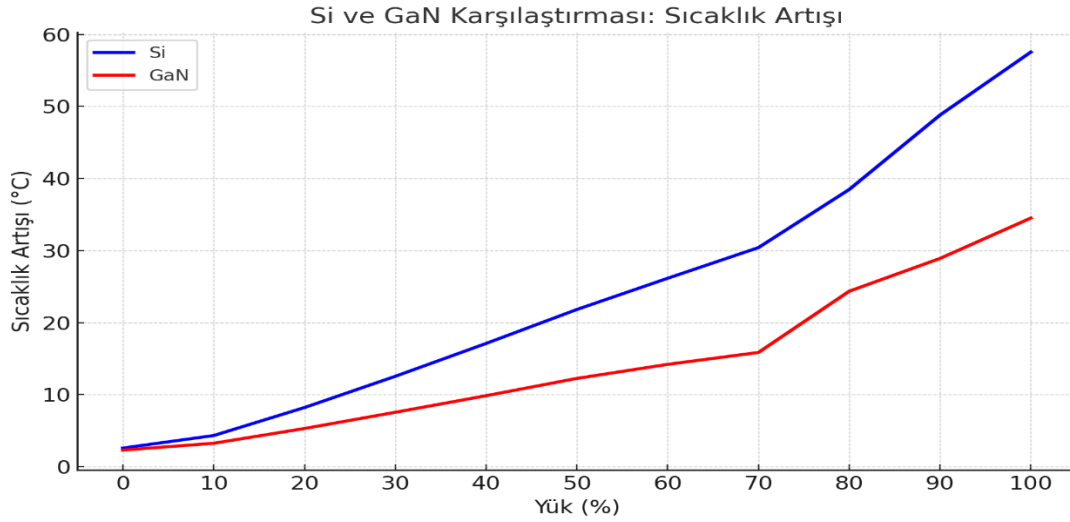
Şekil 5.3: GaN ve Si Tabanlı Tasarımların Verimlilik-Çıkış Gücü İlişkisi (@265V)

## 5.2. Termal Performans

Güç kaynağı tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri de sıcaklık artışlarıdır. Bu noktada PCB üzerinde soğutma alanı gereksinimini doğru belirlemek, gerekirse soğutucu kullanıp komponentlerin ısı iletimine katkı sağlamak oldukça önemlidir.

GaN tabanlı flyback kontrolcileri, ısı iletim konusunda oldukça gelişmiştir ve bu sebeple adaptör gibi kapalı cihaz ortamlarında yaygın bir kullanımı vardır. Si tabanlı kontrolcüler, yüksek güçlerde çoğunlukla daha büyük bir soğutma alanına veya soğutucuya ihtiyaç duyarlar.

Şekil 5.4'te sunulan grafikte termal dirençlerinden yola çıkılarak hesaplanan muhtemel sıcaklık artış oranları belirtilmiştir. Si tabanlı sistemler, GaN tabanlı sistemlere göre yük arttıkça daha fazla ısınır, bu da daha fazla soğutma gereksinimi anlamına gelir. GaN cihazlarının bu avantajları, özellikle yüksek verimlilik ve düşük ısınma gereksinimi isteyen uygulamalarda önemli bir avantaj sağlayabilir.



**Şekil 5.4:** GaN ve Si Tabanlı Anahtarların Farklı Yük Koşullarında Bileşim-Ortam Sıcaklık Artışı (°C)

Fiziksel tasarım yapıldıktan sonra her iki tasarımın termal görüntüleri oda koşullarında analiz edilmiştir ve Si tabanlı tasarımın maksimum yük koşullarında 106°C'yi gördüğü, aynı koşullarda GaN tabanlı tasarımda entegre sıcaklığının 63,7°C değerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Kullanılan PCB alanının normal uygulamalardan çok daha fazla bırakıldığını, yerleşim sıkıntısı olan uygulamalarda bu denli fazla soğutma alanının bırakılmasının her zaman mümkün olmayacağı düşünüldüğünde, Si tabanlı tasarımlarda özellikle yüksek güçlü uygulamalarda ek maliyet getirecek soğutucu kullanımı, PCB bakır kalınlığı artırmak gibi çözümler düşünülmelidir.

### 5.3. Maliyet

Maliyet, tasarımcıların kullanılacak komponentin seçimini yaparken dikkate aldığı önemli bir parametredir. GaN teknolojisi, Si tabanlı anahtarlama elemanlarına göre yaklaşık olarak %20 daha maliyetlidir, çünkü GaNFET'ler kristal yapı farklılıklarını dengelemek için ekstra bir buffer katmanına ihtiyaç duymaktadır. Bu katmanın

kullanılması neticesinde ortaya çıkan üretim hatalarını dengelemek için de ekstra bir yatırım gerekmektedir [29].

GaN teknolojisinin günden güne gelişmesiyle kullanım miktarındaki artış sayesinde kuşkusuz bu maliyetlerin de büyük ölçüde dengeleneceğini öngörmek yanlış bir bakış açısı olmayacaktır. Öte yandan termal performansları sayesinde GaN, özellikle yüksek güçlü tasarımlarda soğutucu gibi ekstra komponentlere ihtiyaç duymadığı için toplam sistem maliyetinde önemli bir kayıp getirmemektedir.

Her iki entegrenin fiyatları, komponent tedariki için ilk akla gelen tedarikçilerden birinden web üzerinden sorgulanmıştır. GaN tabanlı entegreninin birim maliyeti 2,16\$ seviyesindeyken, Si tabanlı entegrenin maliyetinin 1,4\$ olduğu gözlemlenmiştir.

PCB siparişleri için sıklıkla kullanılan Çin menşeli bir kart üreticisinde maliyetler bakır kalınlıklarına göre karşılaştırılmıştır. Tasarımın bakır kalınlığı 35 $\mu$  seviyesinde iken 10.000 adet kart için 1,03\$, 70 $\mu$  seviyesinde ise 1,24\$ birim maliyeti belirlenmiştir. Bu durumda Si bazlı tasarım için risk değerlerinden uzaklaşma adına daha kalın bakır kullanımı düşünüldüğünde 0,21\$ ek maliyet gözlemlenmektedir.

Toplam maliyet farklarına baktığımızda Si yerine GaN tabanlı entegre kullanımı yaklaşık 1.2\$ maliyet artışı getirmektedir ancak seçilen PCB soğutma alanının GaN tabanlı entegre için fazlasıyla yeterli olduğu, tam yük altındaki entegre sıcaklıklarından açıkça gözlemlenebilmektedir. Bu sebeple GaN tabanlı entegre kullanılırsa PCB alanının daha da küçültülebilmesi mümkün olacaktır. Bu da beraberinde kart kutusu boyutlarını da küçültmeye olanak sağlar ve kompakt tasarımlar için daha güvenilir bir çözüm sunabilir.

#### **5.4. Sonuç**

Bu tez çalışmasında yapılan karşılaştırmalar, GaN ve Si tabanlı flyback dönüştürücülerinin performans farklarını net bir şekilde ortaya koymuştur. GaN tabanlı sistemlerin, düşük kayıplar ve üstün termal performans sağladığı gözlemlenmiştir.  $R_{DS(on)}$  değerlerinin ve çıkış kapasitanslarının düşük olması, GaN transistörlerin verimliliğini artırırken, bu özellikler aynı zamanda daha düşük sıcaklık artışlarına yol açarak daha uzun ömürlü sistemler tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Si tabanlı sistemler ise genellikle daha düşük verimlilikle çalışmakta ve yüksek güçlerde daha büyük soğutma gereksinimi duymaktadır. Ancak, her iki teknolojinin de belirli avantajları

ve sınırlamaları bulunmakta olup, uygulama gereksinimlerine göre doğru seçimlerin yapılması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, GaN teknolojisi, özellikle verimlilik ve termal performans açısından silikona göre belirgin bir üstünlük göstermektedir. GaN tabanlı flyback dönüştürücülerin, düşük ısınma ve yüksek sıcaklık toleransı gibi özellikleri, onları yüksek verimlilik ve güvenilirlik isteyen uygulamalarda daha uygun hale getirmektedir. Bununla birlikte, GaN'in daha yüksek maliyeti, maliyet odaklı projelerde Si tabanlı sistemlerin tercih edilmesini gerektirebilir. Ancak, GaN teknolojisinin hızla gelişmesi ve daha yaygın hale gelmesiyle birlikte, üretim zorluğu ve maliyet gibi dezavantajların da ortadan kalkabileceği öngörüsü mümkündür.

## KAYNAKÇA

- [1] B. Tian, A. Zheng ve H. Hong, "Design of high efficiency Buck converter based on GaN," in *2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Information Technology (AICIT)*, Yichang, China, 2024.
- [2] K. Varadarajan, S. Singamaneni ve S. Kappala, "Surge-Robust Flyback Power Supplies with GaN," in *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020.
- [3] J. Puukko, J. Xu ve L. Liu, "Consideration of flyback converter using GaN devices," in *2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, Blacksburg, VA, USA, 2015.
- [4] A. Avila, A. Garcia ve F. Gonzalez, "Thermal Performance Analysis of GaN-Based High-Power Converters," in *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, Riga, Latvia, 2018.
- [5] X. Lingxiao ve Z. Jason, "Active Clamp Flyback Using GaN Power IC for Power Adapter Applications," in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA, 2017.
- [6] S. Jeng, M. Peng ve C. Hsu, "Quasi-Resonant Flyback DC/DC Converter Using GaN Power Transistors," *World Electric Vehicle Journal*, pp. 567-573, 2012.
- [7] F. Cacciotto ve A. Cannone, "Exploit GaN FET technologies in high efficiency flyback topologies: pros and cons of different architectures," in *2020 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Catania, Italy, 2020.
- [8] O. Ahmed, Y. Khan ve M. Butt, "Performance Comparison of Silicon- and Gallium-Nitride-Based MOSFETs for a Power-Efficient, DC-to-DC Flyback Converter," *electronics*, 2022.

- [9] R. Nune, A. Anurag ve S. Anand, "Comparative analysis of power density in Si MOSFET and GaN HEMT based flyback converters," in *2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Bydgoszcz, Poland, 2016.
- [10] S. Simhadri, P. Pong ve V. Prasad, "USB-C/A Charger with GaN FET," in *2024 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE)*, Los Angeles, CA, USA, 2024.
- [11] D. Arseniuk ve Y. Zinkovskyi, "Minimizing High-Frequency Switching Losses in Wideband GaN-HEMTS for Flyback Converters," *INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SCIENCES*, vol. 14, no. 2, pp. 53-60, 2023.
- [12] R. Mitova, R. Ghosh ve U. Mhaskar, "Investigations of 600-V GaN HEMT and GaN Diode for Power Converter Applications," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 29, no. 5, pp. 2441-2452, 2014.
- [13] G. Mauromicale, A. Raciti, S. A. Rizzo ve G. Susinni, "Si and GaN Devices in Quasi Resonant Flyback converters for Wall Charger Applications," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, USA, 2019.
- [14] H. Belkamel, K. Hyungjin ve S. Choi, "Interleaved Totem-Pole ZVS Converter Operating in CCM for Single-Stage Bidirectional AC–DC Conversion With High-Frequency Isolation," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 3, no. 36, 2021.
- [15] M. Kamil, "Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies (Part I)," Microchip Technology Inc., 2007.
- [16] W.-C. Liu, C.-J. Chen ve H.-J. Chen, "A Novel Accurate Adaptive Constant On-Time Buck Converter for a Wide-Range Operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020.

- [17] M. S. Z. Arafa S. Mansour, "A new extended single-switch high gain DC–DC boost converter for renewable energy applications," *Nature Scientific Reports*, 2023.
- [18] B. Chandrasekar, C. Nallaperumal ve S. Padmanaban, "Non-Isolated High-Gain Triple Port DC–DC Buck-Boost Converter With Positive Output Voltage for Photovoltaic Applications," *IEEE Access*, pp. 113649 - 113666, 2020.
- [19] T. Hudson ve M. Ametller, "How to Design a Flyback Converter in Seven Steps," 28 4 2022. [Çevrimiçi]. Adres: <https://www.monolithicpower.com/learning/resources>. [Erişildi 12 2024].
- [20] Z. Zhang, M. Ren ve T. Gao, "Primary-side control for the flyback AC–DC converter," *Frontiers in Energy Research*, no. 11, 2023.
- [21] H. Yuchao, Y. Kui ve L. Qidong, "Very-High-Frequency Resonant Flyback Converter with Integrated Magnetics," *electronics*, 2024.
- [22] P. Integrations, "InnoSwitch3-CE Family Datasheet," 2022. [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.mouser.com.tr/datasheet/2/328/innoswitch3\\_ce\\_family\\_datasheet-1145285.pdf](https://www.mouser.com.tr/datasheet/2/328/innoswitch3_ce_family_datasheet-1145285.pdf). [Erişildi 2024].
- [23] P. Integrations, "InnoSwitch3-EP Family Datasheet," 2024. [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.power.com/sites/default/files/documents/innoswitch3-ep\\_family\\_data\\_sheet.pdf](https://www.power.com/sites/default/files/documents/innoswitch3-ep_family_data_sheet.pdf). [Erişildi 2024].
- [24] P. Integrations, "45 W Isolated Flyback Power Supply Using InnoSwitch3-EP PowiGaN™ INN3678CH606," 22 Eylül 2022. [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.power.com/sites/default/files/documents/der-909\\_45w\\_flyback\\_adapter\\_using\\_innoswitch3-ep\\_powigan.pdf](https://www.power.com/sites/default/files/documents/der-909_45w_flyback_adapter_using_innoswitch3-ep_powigan.pdf). [Erişildi 2024].
- [25] P. Integrations, "Application Note AN-72 Innoswitch3 Family," Power Integrations, Eylül 2022. [Çevrimiçi]. Adres:

[https://www.power.com/sites/default/files/documents/annoswitch3\\_family\\_design\\_guide.pdf](https://www.power.com/sites/default/files/documents/annoswitch3_family_design_guide.pdf). [Erişildi Aralık 2024].

- [26] Meisongbei, "Ferrite Cores," [Çevrimiçi]. Adres: <https://www.meisongbei.com/res/meisongbei/pdres/201101/ferrite-cores.pdf>. [Erişildi 2024].
- [27] "GaN-Based Primary-Side Power Switches Extend The Power Range of Innoswitch3 IC Families," Power Integrations, [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.power.com/sites/default/files/documents/pi\\_whitepaper\\_w005\\_powigan\\_extending\\_power\\_range\\_of\\_innoswitch.pdf](https://www.power.com/sites/default/files/documents/pi_whitepaper_w005_powigan_extending_power_range_of_innoswitch.pdf). [Erişildi 2025 01 05].
- [28] "What is SIMPLIS?," Simetrix, [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.simplistechnologies.com/documentation/simplis/what\\_is\\_simplis/topics/what\\_is\\_simplis.htm](https://www.simplistechnologies.com/documentation/simplis/what_is_simplis/topics/what_is_simplis.htm). [Erişildi 2025].
- [29] Y. Haoxiang, "Comparison between GaN and SiC for power switching transistor application," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, California, USA, 2020.
- [30] Infineon, "CoolSET™ ICE5QRxx80BG-1 design guide for quasi-resonant flyback topology," 13 11 2024. [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CoolSET\\_ICE5QRxx80BG-1\\_design\\_guide-AdditionalTechnicalInformation-v01\\_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c92bcf0b001932f32053f16a4](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CoolSET_ICE5QRxx80BG-1_design_guide-AdditionalTechnicalInformation-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c92bcf0b001932f32053f16a4). [Erişildi 2024].
- [31] P. Integrations, "DER-538 25 W High Power Charger using InnoSwitch3-CE," 02 Temmuz 2020. [Çevrimiçi]. Adres: [https://www.power.com/sites/default/files/documents/der-538\\_25watt\\_high\\_power\\_charger\\_using\\_innoswitch3-ce.pdf](https://www.power.com/sites/default/files/documents/der-538_25watt_high_power_charger_using_innoswitch3-ce.pdf). [Erişildi 2024].
- [32] P. Integrations, "PI Expert," Power Integrations, [Çevrimiçi]. Adres: <https://www.power.com/design-support/pi-expert>. [Erişildi 2024].