

# İKİNCİ ve ÜÇÜNCÜ HARMONİK AYARLAMAYLA Cree Marka CG2H40025 Transistör Kullanarak Geniş Bant Mikrodalga Güç Yükselteci Tasarımı ve Simülasyonu

<sup>1</sup>Ahmet Aktaş ve <sup>\*2</sup>Nursel Akçam  
Mühendislik Fakültesi, Elektrik-elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye

## Özet

İletişim sistemleri, radar sistemleri, mikrodalga fırın, Bluetooth kulaklık ve daha birçok alan olan RF teknolojileri için mikrodalga güç yükselteçleri gereklidir. Mikrodalga güç yükselteçleri, mikrodalga sistemlerde genellikle verici bölümünde antenin önüne yerleştirilir. Kayıpları azaltmak için giriş ve çıkış uyumlama devreleri kullanılır. Bu çalışmada Cree marka transistör ile tasarım ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Çıkış katındaki ikinci ve üçüncü harmoniklerin simülasyon çıkışını nasıl değiştirdiğini incelemek için iki ayrı devre tasarlanmıştır. Tasarlanan güç yükselteci 2 GHz – 2,5 GHz arasında % 90 güç ekli verim, 10,5 dB kazanç ve 11,3 Watt çıkış gücüne sahiptir. Güç ekli verimliliği için kullanılan transistörün temel avantajı iyi bir ortalama çıkış gücü kazancıyla % 90'dan yüksek verim elde etmektir. Tasarlanan diğer güç yükselteci ise 1,5 GHz - 2,5 GHz arasında % 70 güç ekli verim, 12 dB kazanç ve 16,6 Watt çıkış gücü performansına sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Genişbant, bant genişliği, güç yükselteci, kazanç, verim

## Abstract

Microwave power amplifiers necessary for RF technologies which are communication systems, radar systems, microwave oven, bluetooth headphone and more areas. Microwave power amplifiers are usually placed in front of the antenna at transmitter level in microwave systems. Input and output matching circuits are used to reduce losses. In this study, Design and simulation were realized with Cree brand transistor. Two separate circuits were designed to analyse how the second and third harmonics in the output stage change the simulation output. The implemented power amplifier exhibits performance between 2 GHz and 2.5 GHz with a 90% power added efficiency, 10.5 dB gain, and 11.3 W output power. The main advantage of the used transistor for power adding efficiency is a high 85 % with good average output power gain. The other implemented power amplifier has performance between 1.5 GHz and 2.5 GHz with a 70% power added efficiency, 12 dB gain, and 16.6 W output power.

**Key words:** Wideband, bandwidth, power amplifier, gain, efficiency

## 1. Giriş

Günümüzde artan iletişim talepleri nedeniyle güncel kablosuz iletişim sistemlerine ihtiyaç giderek artmaktadır. Son yıllarda modern kablosuz iletişimde en ilgi çekici araştırma konularından birisi de güç yükselteçleridir. Bu nedenle yüksek verimli güç yükselteçlerine yönelik talepte artmaktadır. Modern kablosuz iletişim sistemlerinde, RF güç yükselteçleri, verici sistemlerinin en

\*Yazarlar: Adres: Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Gazi Üniversitesi, 06570, Ankara TÜRKİYE. <sup>1</sup>E-mail adres: ahmet.aktas3@gazi.edu.tr <sup>\*2</sup> E-mail adres: ynursel@gazi.edu.tr

önemli parçalarından birisidir. Isınma problemi ve soğutma gereksinimi nedeniyle güç yükselteçlerinin yüksek verimli olması için sistem verimliliğinin artırılması gerekir. Bir güç yükseltecinin yüksek verimliliği, sistem maliyetini azaltan daha düşük güç tüketimine sahiptir. Ayrıca yüksek verimli güç yükselteçlerinin gerçekleştirilmesi geleceğin iletişim sistemleri için önemlidir. Bu nedenle 5G, sivil ve askeri radarlar başta olmak üzere birçok kullanım alanı vardır. Bu geniş kullanım için sistem bant genişliğini arttırmak önemlidir. Sistem bant genişliğini arttırmak için harmonik ayarlama tekniği ile J sınıfı, sürekli F ve  $F^{-1}$  sınıfı en çok tercih edilen güç yükselteci sınıflarındandır. Harmonik ayarlama tekniği sayesinde güç yükselteçlerinin tasarımının özellikleri de iyileştirilmiştir [1-2].

Mikrodalga güç yükselteçleri; haberleşme sistemleri, radar sistemleri, mikrodalga fırın, bluetooth kulaklık ve daha fazla alanlar olan RF teknolojiler için gereklidir. Mikrodalga yükselteçler genellikle mikrodalga sistemlerde verici katında antenden önce yer alırlar. Tasarımlarında giriş ve çıkış katları olarak sınıflandırılırlar. Kayıpları azaltmak için uyumlama devreleri kullanılır. Düşük voltajla çalışan GaAs transistörlerden çok daha yüksek güç gerektiren GaN transistörlerine kadar farklı uyumlama devreleri kullanılır. İstenilen güçlendirme işlemi en az kayıpla sağlanır. Mikrodalga güç yükselteçleri kullanım alanlarına ve sistemlerine göre birçok farklı özelliğe sahiptir. Bunlar; çıkış gücü, verimlilik, güç kazancı ve bant genişliğidir. Entegre devre teknolojisi daha yüksek çalışma frekansına doğru ilerledikçe yeni problemlerin ortaya çıkması elbette ki muhtemeldir. Ancak, günümüzde gelişmiş entegre transistor teknolojisi sayesinde geniş bant 300 GHz güç yükselteci teknolojisi mevcuttur.

## 2. Materyaller ve Yöntem

Bu çalışmada, AWR simülasyon programında transistor DC I-V eğrisinin analizi, RF (Radio Frekans) güç yükselteci performansı, giriş ve çıkış uyumlama devreleri kullanılarak Cree marka transistor ile tasarım ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Önerilen güç yükselteci, giriş ve çıkış bölümü olarak iki bölümden oluşmaktadır. Çıkış aşamasındaki ikinci ve üçüncü harmoniklerin simülasyon çıkışını nasıl etkilediğini analiz etmek için iki ayrı devre tasarlanmıştır.

Mikrodalga güç yükselteçleri, başta haberleşme sistemleri olmak üzere, sivil ve askeri alanlarda kullanılırlar. Gelişen entegre devre teknolojisi sayesinde güç yükselteçleri üretimi daha kolay, daha küçük boyutlarda ve daha hafif sistemler için oldukça uygundur.

Güç yükselteci sınıfları iletim açısına göre sınıflandırılır. Mevcut yükselteci sınıflarına, farklı yöntemlerle devre elemanları eklenerek iletim açıları değiştirilmiş yeni yükselteci sınıfları ortaya çıkmıştır. Farklı yöntemlerle eklenen devre elemanları sadece iletim açısını değiştirmeyip, iletim açısının yanı sıra kazanç, verim, rezonans frekansı, iletim ve yansıma katsayıları gibi birçok parametrede değişikliğe neden olur. Bu değişikliklerden biri de bu makale çalışmasının konusu olan J sınıfı yükseltecidir. Bu yeni yöntem, AB/B sınıfı yükselteçlerinin çıkış grafiklerinin değiştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Transistör doyum bölgesinde çalıştırılmayacağı için verilen bazı verim değerlerine ulaşamamaktadır. Drain ile source arasına eklenen kondansatör

verim artışı sağlar [3]. Genellikle güç yükselteçleri, verimin maksimum noktasına ulaştığı doyma noktasına yakın çalışır. J sınıfı güç yükselteçlerde transistörün çıkış empedansına uygun ayarlanmış reaktif harmonik sonlandırma vardır ve J sınıfı güç yükselteçisi ikinci harmonik voltaj geliştirme tekniğini kullanır [5-7].

### 2.1. Güç yükselteci kullanımında transistör teknolojileri

Transistörler yükselteç devrelerinin ana elamanıdır. Transistörler yüksek verimli ise daha az güç kaybı ve daha az ısınma sorunlarıyla karşılaşılır. Yarıiletken cihaz teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemelerin bazı önemli özellikleri Tablo 1.'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yarı iletken cihaz teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler için performans katsayıları [8]

Malzeme	Johnson $[(E_{br}.U_d/\pi)^2]$	Keyes $[K.(U_d/\epsilon_r)^{1/2}]$	Baliga $[\epsilon_r.\mu_n.E_{br}^3]$	Baliga HF $[\mu_n.E_{br}^2]$
Si	1	1	1	1
GaAs	7,1	0,45	15,6	10,8
4H-SiC	180	4,61	130	22,9
GaN	760	1,6	650	77,8

Tablo 1'de verilen malzemelerin performans katsayıları;

- Johnson performans katsayısı, malzemenin yüksek güç ve yüksek frekanslarda çalışma kapasitesini,
- Keyes performans katsayısı, entegre devrelerde kullanılan yüksek hızlı transistörlerin anahtarlama davranışının termal limit kapasitesini,
- Baliga performans katsayısı, güç transistörlerinde iletim kayıplarını en aza indirmek için gereken kritik malzeme parametrelerini,
- Baliga yüksek frekans (Baliga HF) performans katsayısı, malzemenin yüksek frekanslardaki anahtarlama güç kayıplarını tanımlar [9,10].

Yüksek verimli güç yükselteçler; B, C, F, F<sup>-1</sup>, E gibi transistör sınıflarını yüksek performans koşullarında çalıştırılarak tasarlanabilir. Ek olarak Cripps tarafından 2009 yılında geniş bant ve yüksek verimli güç yükselteçini gerçekleştirmek için J sınıfı önerilmiştir [3,4]. J sınıfı modu, B/AB sınıfının çıkış dalga biçimi değiştirilerek elde edilir. Temel, ikinci ve üçüncü harmonik empedanslarının çoklu bağlantı seçenekleri yardımıyla, B sınıfı güç yükselteci çıkış gücünü ve drain verimliliğini elde etmek için geniş bant tasarım esnekliği sağlar. Bazı sınıflar kullanım alanları ve iletim açısıyla birlikte Tablo.2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** İletim açısına göre transistör sınıfları

Sınıf	Kullanım Alanları	İletim Açısı
A Sınıf	Devrelerde tercih edilmez	360°
B Sınıf	Bazı eski RF cihazlarda	180°
AB Sınıf	Ses sistemlerinde	180° - 200°
C Sınıf	Yüksek frekans sinüzoidal dalga osilatör ve belirli radyo frekansı sistem türlerinde	100° - 150°
D Sınıf	Ses cihazları, taşınabilir ev yükselteçleri ve cep telefonu sistemleri	Darbe genişliğine göre değişir
E ve T arası Sınıflar	PWM kiplenimli sayısal sinyal sistemlerinde	Darbe genişliğine göre değişir

Mikrodalga devrelerinde giriş ve çıkış arasındaki ilişkinin kurulması gerekir. Girişte çok düşük güç seviyesindeki sinyali bu kattaki gürültüden korumak gerekir. Bunun için farklı filtre türleri vardır. Ancak bu çalışmada gürültü faktörü dikkate alınmamıştır. Şekil 1.'de tasarlanan devre bloklar halinde verilmiştir.

**Şekil 1.** Tasarım için hazırlanan blok diyagram

## 2.2. Kazanç, verim ve uyumlama devreleri

Bir güç yükseltecinin çıkış gücü, yüke iletilen RF gücü olarak tanımlanır. Transistörün giriş ve çıkış empedansına göre giriş ve çıkış uyumlama devreleri belirlenmelidir. Yüke maksimum güç sağlanması için tipik olarak yükseltecinin çıkış empedansının eşlenik uyumlamasına eşit olmalıdır. Dolayısıyla sadece direnç elemanı yer almalıdır. Bir periyoddaki ortalama çıkış gücü  $P_{çıkış}$ ;

$$P_{çıkış} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} v(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

olarak verilir. Çoğu durumda sadece temel frekanstaki çıkış gücü yaygındır. Temel ortalama çıkış gücü, gerçek bir yük ( $R$  direnç) için,  $V_o$ 'nun sinüzoidal çıkış sinyalinin genliği olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_{out} = \frac{V_o^2}{2R} \quad (2)$$

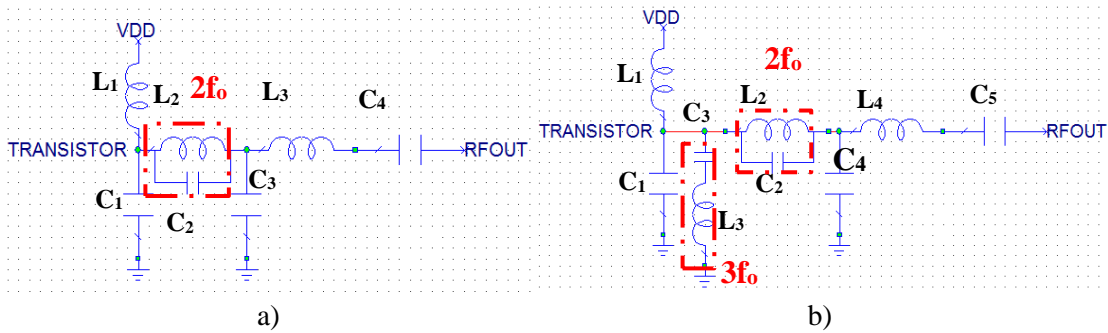
Güç yükselteçlerdeki en önemli parametrelerden biri, güç dönüştürme verimidir. Bu performans parametresi sayesinde güç kazancı ve dağılımı ayırt edilir. Sürekli dalga (Certainly Wave – CW)

işleminde belirli bir frekansta ölçülür ve iyi bir bant genişliği için alt ve üst bant limitlerine sahip verim değerlerinin farklı olmaması gerekir. Tek kademeli bir transistör kazancı için deşarj verimliliği (veya kollektör verimliliği);

$$\text{Verim} = \eta_D = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{DC}}} \quad (3)$$

olarak tanımlanır [11]. Burada  $\eta_D$ , transistör drenaj verimi;  $P_{\text{DC}}$ , güç yükseltecinin dc gücüdür. Mikrodalga güç yükselteçlerin klasik tasarımlarında; sınırlı bant genişliği, gürültü faktörü, kararlılık, DC biyaslama, transistörün giriş ve çıkış aşamasındaki kayıplar, tek kademeli güç transistöründeki sınırlı güç kazancı, giriş ve çıkış uyumlama devreleri gibi bazı zorluklar vardır. Kazancı en yüksek seviyede tutabilmek için kayıpları en düşük seviyeye indirmek gerekir. Doğrusallık bu noktada anahtar kelimedir. Kazanç ve verimlilik lineer bölgede çalışmaya bağlıdır. Ayrıca birçok sistem farklı çalışma frekansına sahiptir. Elektronik devrelerde kullanılan transistörlerin frekans değerleri arttıkça güç kazanç değerleri düşer. Diğer anahtar kelime DC biyaslamadır.

Kararlılık, iki kapılı sistemlerde sistemin istenmeyen yayın oluşumuna karşı gösterdiği direnci olarak da ifade edilebilir [12]. Yükselteç tasarımlarında, devrenin giriş ve çıkış empedanslarının herhangi bir istenmeyen yayın oluşturmaksızın kararlı bir biçimde çalışmaları istenir. Devre kararlılığı herhangi bir koşuldan bağımsız olarak sağlanıyorsa bu tür devrelere koşulsuz kararlı, eğer devre kararlılığı bir koşula bağlı olarak sağlanabiliyorsa bu tür devrelere ise koşullu kararlı olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle, iki kapılı doğrusal devrelerin koşulsuz kararlı olmaları için tüm frekans spektrumu boyunca farklı empedans değerleriyle sonlandırıldığı durumda devrede herhangi bir istenmeyen yayın gözlemlenmemesi gerekir. Bununla beraber eğer iki kapılı bir devre belirli bir empedans ve belirli bir DC besleme durumları için belirli frekans bandı aralığında kararlı hale geliyor ise bu tür devreler koşullu kararlı olarak adlandırılır [13].



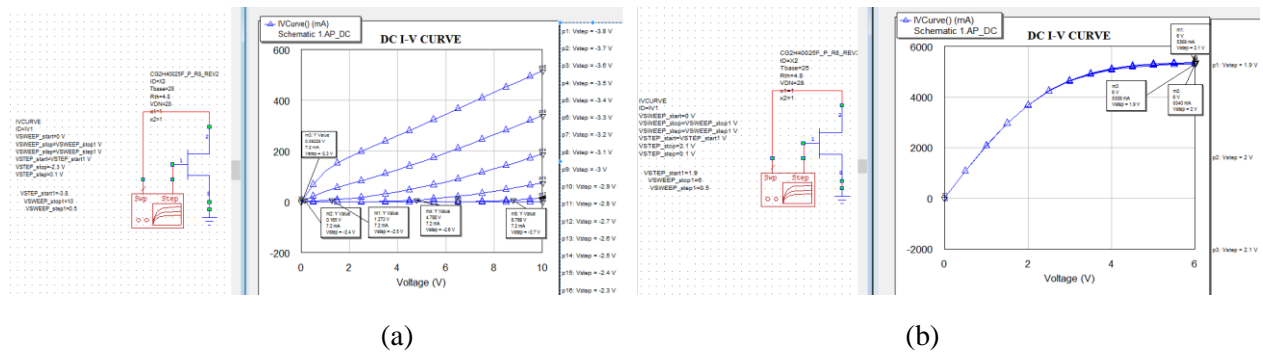
**Şekil 2.** Transistörün parazitik kapasitansı C1 ile gösterilmiştir. a) İkinci harmonik ayarlamayla çıkış uyumlama devresi b) Üçüncü harmonik ayarlamayla çıkış uyumlama devresi

Verimli bir mikrodalga yükselteci için temel frekansa ek olarak ikinci ve üçüncü harmonik frekanslarda da güç yükseltecinin uyumlama empedans değerleri için ayrıntılı analiz yapmak gerekir. Bu çalışma kapsamında Şekil 2.'deki ikinci ve üçüncü harmonikler için ayrı ayrı çıkış

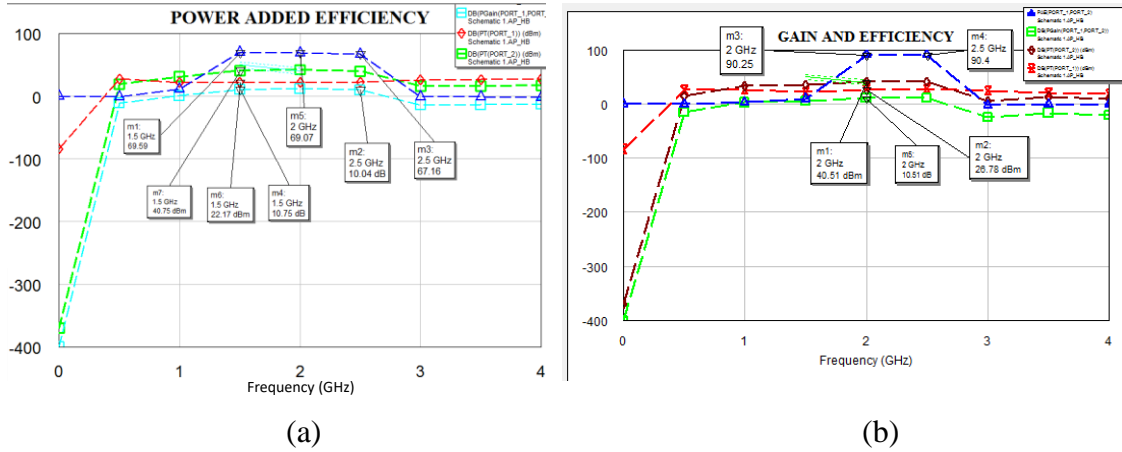
uyumlama devreleri tasarlanmıştır. Daha sonra elde edilen simülasyon sonuçları incelenmiştir. Devre elemanları için uygun değerler ikinci ve üçüncü harmonik frekansları için oluşturulan devrede bulunurken, devre elemanlarındaki küçük değişikliklerin çıkış grafiğinde ani değişimlere neden olduğu gözlemlenmiştir. Rezonans frekansından ani çıkış olmuştur.  $V_g$  giriş voltajındaki değişiklikler de çıkışta ani değişikliklere neden olmuştur. Bazen de verim ve kazanç arasındaki ters ilişki istenilen performans değerlerine ulaşmayı zorlaştırmıştır. Yüksek verim elde edildiği durumda istenilen kazanç değerine ulaşamamıştır. Yüksek kazanç elde edildiği diğer durumda ise istenilen verim değerlerine ulaşamamıştır. İncelenen geniş bant frekans aralığındaki grafik doğrusal bir çizgiye yakın olmalıdır. Bunu sağlamak için devre elemanlarının birbirleriyle uyumluluğu çok önemlidir.

### 2.3. Güç yükseltici modeli

Şekil 3'te simülasyon sonucunda elde edilen transistörün DC I-V eğrileri görülmektedir. Transistörün veri sayfasındaki değerlerini elde etmek için farklı senaryolar denemiştir. Transistörün doyum bölgesine yakın ve doyum bölgesine uzak çalışmasına göre farklı simülasyon eğrileri elde edilmiştir. Lineer bölgedeki eğriler ve lineer bölgelerden uzaklaşan eğriler görülmektedir. Elde edilen sonuçlar veri sayfasındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 2'de verilen ikinci ve üçüncü harmonik ayarlama devre şemaları için transistör empedansına uygun devre elemanları belirlendikten sonra Şekil 4'teki simülasyon çıktısı elde edilmiştir. İkinci harmonik ayarlama başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Ancak ikinci harmonik ayarlamaya ek olarak üçüncü harmonik ayarlamayla birlikte kullanımı sırasında simülasyon sonucunda elde edilen performans değerlerinin fazla yükselmediği görülmüştür. Bu nedenle üçüncü harmonik ayarlamının daha ayrıntılı incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 3. DC I-V Eğrisi a)  $V_{GS} = (-3,8V) - (-2,3V)$  b)  $V_{DS} = 6V$  ve  $V_{GS} = (1,9V) - (2,1V)$



Şekil 4. Tasarlanan RF Güç Yükseltici Simülasyon Çıktıları;  
a) İkinci harmonik ayarlama b) Üçüncü harmonik ayarlama

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada ikinci ve üçüncü harmonik ayarlamayla Cree Marka CG2H40025 transistör kullanarak geniş bant mikrodalga güç yükseltici tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Cree firması AWR ve ADS simülasyon programları için kütüphaneye eklenecek model desteği vermektedir. Transistörün veri sayfasındaki özellikleri ile simülasyon sonuçları arasında küçük farklılıklar elde edilmiştir. Giriş ve çıkış uyumlama devrelerini tasarlarken bu küçük farklılıklara dikkat etmek gerekmektedir. Verim ve kazanç arasındaki ters ilişki, tasarım için en büyük zorluklardan birisidir. Transistör yüksek verimle çalışırken, kazanç değerleri istenilen seviyeye ulaşamamıştır. İstenilen değerlerin elde edilememesi, devre topolojisinin değiştirilmesiyle çözülmüştür. Simülasyon sonucunda % 90 civarında verim elde edilirken kazanç değerinin 8 dBm seviyesinde kaldığı gözlemlenmiştir. Kazanç değerinin 12 dBm seviyesine yükseldiğinde verim değerinin % 80'e düştüğü görülmüştür. Analiz sonucunda girişteki ve çıkıştaki kayıpların frekans değişimine göre değiştiği gözlemlenmiştir. Giriş gücü seviyesine göre değişen verim değeri gözlemlenmiştir. Bu değişim miktarı azaltılmaya çalışılmıştır. Devre elemanlarının farklı bağlantı şekilleri denenerek ve farklı değerlerde pasif devre elemanları kullanılmasıyla tasarımın son hali elde edilmiştir. Tasarlanan güç yükseltici 2 GHz – 2,5 GHz arasında % 90 güç ekli verim, 10,5 dB kazanç ve 11,3 Watt çıkış gücüne sahiptir. Güç ekli verimliliği için kullanılan transistörün temel avantajı iyi bir ortalama çıkış gücü kazancıyla % 90'dan yüksek verim elde etmektir. Tasarlanan diğer güç yükselticisi ise 1,5 GHz - 2,5 GHz arasında % 70 güç ekli verim, 12 dB kazanç ve 16,6 Watt çıkış gücü performansına sahiptir.

Verici kısmında en yüksek güç harcayan bölüm güç yükseltici bölümüdür. Bu bölümün kayıplarını azaltmak, bütün sistemin verimli kullanılması anlamına gelmektedir. Farklı özelliklere sahip transistörlerle tasarımlar yapılmaktadır. Transistörlerin çalışma frekans aralığı ve güç

değerleri tasarım için önemlidir. Sistemin ihtiyaç duyduğu koşulları sağlamak için iyi araştırma yapmak gerekmektedir. Sürekli gelişen entegre devre teknolojisi bize yeni olanaklar sunmaktadır. Sistem boyutlarının küçülmesi en büyük artılardan biridir. Ancak yüksek güçlerde çalışan transistörlerin ısınma problemi nedeniyle boyutları fazla küçültülememektedir.

## **Teşekkür**

Değerli fikirlerini paylaşan hocam Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR'e teşekkür etmeyi borç bilirim.

## **Kaynakça**

- [1] Cripps, S. C., Tasker, P. J., Clarke, A. L., Lees, J., Benedikt, J. On the Continuity of High Efficiency Modes in Linear RF Power Amplifiers. IEEE Microwave and Wireless Components letters 2009. 19(10). 665-667.
- [2] Friesicke, C., Quay, R. and Jacob, A. F. The Resistive-Reactive Class-J Power Amplifier Mode. IEEE Microwave Wireless Components Letters 2015. 25(10). 666-668.
- [3] Crips, S. C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications. 2nd Edition. Norwood, USA: Artech House 2006.
- [4] Yan, H. H., Kumar, N., Latef, T. A., Yarman, B. S. B., Grebennikov A. Broadband GaN HEMT Distributed Power Amplifier Design with Phase Adjustment. Microwave and Optical Technology Letters 2018. 60(1). 253-256.
- [5] Wright, P., Lees, J., Benedikt, J., Tasker, P.J., Cripps, S.C. A Methodology for Realizing high Efficiency Class-J in a Linear and Broadband PA. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2009. 57(12). 3196-3204.
- [6] Kim, J. H., Lee, S. J., Park, B. H., Jang, S. H., Jung, J. H., Park, C. S. Analysis of High-Efficiency power Amplifier Using Second Harmonic Manipulation: Inverse Class-F/J Amplifiers. IEEE Transaction on microwave Theory and Techniques 2011. 59(8). 2024-2036.
- [7] Jain, A., Hannurkar, P. R., Pathak, S. K., Sharma, D. K. Investigation of Class J Continuous Mode for High-power Solid-state RF Amplifier. IET Microwaves Antennas&Propagation 2013. 7(8). 686-692.
- [8] Marino, F. A. et al. Figures of Merit in High-Frequency and High-Power GaN HEMTs. Journal of Physics 2009. Conference Series 193. 1-3.
- [9] Kelekçi, Ö. Design, Fabrication and Characterization of GaN Based High Electron mobility Transistors (HEMT). Ph. D. Thesis. Institute of Science and Technology of Gazi University, Ankara, 2011.



- [10] Acar M. A. Fabrication, Modeling and Characterization of GaN HEMTs and Design of High Power MMIC Amplifiers. Msc. Thesis. Institute of Engineering and Sciences of Bilkent University, Ankara, 2009.
- [11] Akkul, M., Bösch, W. Power Amplifier Applications. Handbook of RF and Microwave Power Amplifiers. edited by John L. B. Walker, England: Cambridge University Press 1<sup>st</sup> edition 2011. 508-569.
- [12] Kazan, O. GaN-based Robust Low-noise Amplifier. Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [13] Edwards, M. L., & Sinsky, J. H. A New Criterion for Linear 2-port Stability Using a Single Geometrically Derived Parameter. IEEE transactions on microwave theory and techniques 1992. 40(12). 2303-2311.
- [14] Chow, T. P., Khemka, V., Fedison, J., Ramungul, N., Matocha, K., Tang, Y., Gutman, R. J. SiC and GaN Bipolar Power Devices, Solid-State Electronics 2000. 44(2). 277-301.
- [15] Michael, S. Constant Conduction Angle Experimental Generation, A Senior Project, San Luis Obispo: The Faculty of the Electrical Engineering Department California Polytechnic State University, 2011.
- [16] Wang, L., Chen, D. Design of Broadband Power amplifier Based on ADS. IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB). Nanjing, China 2016. 1-3.
- [17]Peker, K. Design of a High Efficiency Power Amplifier by Using Doherty Configuration. Msc. Thesis. The Institute of Engineering and Sciences of Bilkent University, Ankara, 2010.
- [18]Sağlam, A. Class J Power Amplifier Design. Msc. Thesis. The Institute of Engineering and Sciences of Karabük University, Karabük, 2019.
- [19]John, L., Tessmann, A., Leuther, A., Neining, P., Merkle, T., Zwick, T. Broadband 300-GHz Power Amplifier MMICs in InGaAs mHEMT Technology. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology 2020. 10(3). 309-320.
- [20] Chang, H. C., Roblin, P., Hahn, Y., Lopez, J. I. M., Liang, C., Rawat, K. Frequency-Agile Class-J Power Amplifier with Clockwise Fundamental and Second Harmonic Loads. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique 2020. 68(7). 3184-3196.