
Araştırma Makalesi / Research Article

Radar HF Bandı RF Güç Yükselteci

Egemen MEHTER¹, Rıdvan Berk BİLGİÇ¹, Murat ÜÇÜNCÜ^{1*}

¹*Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, Bağlıca Kampüsü, Ankara*
(ORCID: [0000-0003-4020-1993](https://orcid.org/0000-0003-4020-1993)) (ORCID: [0000-0003-4941-6640](https://orcid.org/0000-0003-4941-6640)) (ORCID: [0000-0002-2113-1398](https://orcid.org/0000-0002-2113-1398))

Öz

Bu çalışmada; Radar HF bandında (9-10 MHz) 1kW çıkış gücüne sahip RF güç yükselteci tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Sistem; 2 adet güç yükselteci, 1 adet güç bölücü, 1 adet güç birleştirici olmak üzere 4 ana üniteden oluşmaktadır. Güç yükselteçlerinin (2 adet) her biri yaklaşık 600W çıkış gücüne sahip olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Kayıplar göz önüne alınarak 600W çıkış gücü hedef olarak belirlenmiştir. Minimum %50 verimlilik elde edilmesi öngörülmüştür. Her bir yükselteçten minimum 20 dB kazanç elde edilmektedir. Tek girişte sağlanan gücün 2 ayrı kola bölünerek güç yükselteçlerinin girişlerine bağlanması amacıyla güç bölücü tasarlanmıştır. İki ayrı güç yükseltecinden gelen çıkış güçlerinin tek bir noktada toplanarak çıkışta 1kW güç alınabilmesi amacıyla güç birleştirici tasarlanmıştır. Sonuç olarak, belirtilen tüm alt sistemler bir araya getirilerek istenilen tasarım kriterlerini sağlayan 1kW çıkış gücüne sahip bir güç yükselteci tasarlanmış ve üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: RF güç yükselteç, Güç bölücü, Güç birleştirici, HF radar bandı.

Radar HF Band Power Amplifier

Abstract

In this study, an RF power amplifier with 1kW output power suitable for Radar HF band (9-10 MHz) is designed and produced. The system is composed of 4 main units: 2 power amplifiers, 1 divider and 1 combiner. Power amplifiers (2 units) are each designed to have an output power of approximately 600W. Considering the losses, 600 W output power is determined as the target. It is aimed to achieve a minimum efficiency of 50%. Minimum 20 dB gain is obtained from each amplifier. A divider is designed to divide the power provided in the single input into 2 separate branches and connect it to the inputs of the power amplifiers. A combiner is also designed in order to collect 1kW power at the output by integrating the two output powers from the two separate power amplifiers in a single point. As a result, a high-power amplifier with 1 kW output power is designed and manufactured by integrating all subsystems.

Keywords: RF power amplifier, Divider, Combiner, HF radar band.

1. Giriş

RF güç yükselteci, DC giriş gücünü önemli bir verim ile bir RF çıkış gücüne dönüştüren elektronik bir devredir. Doğrusallık, verimlilik, çıkış gücü seviyesi, bant genişliği ve kullanılan tasarım teknikleri bakımından çeşitli güç yükselteçleri bulunmakla birlikte; RF güç yükselteçleri çıkışta, giriş sinyalinin orijinal dalga şeklini korumaya çalışan doğrusal yükselteçler ile giriş sinyalinin orijinal dalga şeklini koruyamayan, dolayısıyla doğrusal olmayan güç yükselteçleri olarak iki ana kategori altında incelenebilir.

Güç yükselteçleri, haberleşme, seyrüsefer ve radyo yayınları için HF' den milimetrik dalgalara kadar uzanan geniş bir frekans bandında kullanılırlar. Uygulamalara göre güç düzeyleri farklılıklar göstermekte; uzun menzilde 10 kW gibi çok yüksek güce kadar, kısa menzil kablosuz iletişimde ise 1 mW gibi çok düşük güç seviyelerinde güç yükselteçleri kullanılabilir. Bazı uygulamalarda farklı yüksek güç seviyeleri gerekebilmektedir. Bu uygulamalar için doğrusallık, güç, bant genişliği, verimlilik

*Sorumlu yazar: murat.ucuncu@yahoo.com.tr

Geliş Tarihi: 08.03.2021, Kabul Tarihi: 06.10.2021

ve maliyet önemli parametrelerdir [1].

Önceki çalışmalara ilişkin yapılan literatür taramasında çoğunlukla E Sınıfı anahtarlama modu güç yükselteçleriyle ilgili çalışmaların ön planda olduğu görülmektedir. E Sınıfı güç yükselteçlerinde; transistör, anahtar gibi çalıştırılarak akım ve voltaj dalga formları şekillendirilmekte, eşzamanlı olarak yüksek akım ve yüksek voltaj oluşması engellenmektedir. Bu şekilde yüksek verimlilik elde edilmektedir [2].

Frederick H. Raab [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 1.8 – 128 MHz frekanslarında 200 W çıkış gücü elde edilmiş ve 128 MHz’de minimum verimlilik %70 olarak ölçülmüştür.

E Sınıfı güç yükselteç tasarımı alanında Masahiko Yamazoe, Kazuhisa Haeiwa, Shoji Hirose [4] tarafından yapılan çalışmada; itme-çekme topolojisinden faydalanılmış ve 3-26 MHz frekans bandında %74 verimlilikle 100 Watt çıkış gücü elde edilmiştir.

Arturo Mediano, Francisco Javier Ortega-Gonzalez [5] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 2 adet E Sınıfı güç yükselteç tasarlanmıştır, HF ve VHF bantlarını kapsayan bu güç yükselteçlerinde %90 verimlilikle sırasıyla 50 W ve 150 W çıkış gücü elde edilmiştir.

Bu çalışmaların ortak özellikleri E Sınıfı olmalarıdır. Bu sebeple de güç yükselteçlerinin verimlilik değerleri yüksek, doğrusallıkları ise düşüktür.

Mincheol Seo [6] tarafından yapılan A Sınıfı güç yükselteci tasarım çalışmasında; 2-512 MHz aralığında minimum 40W (46dBm) çıkış gücü elde edilmiştir. Söz konusu çalışma kapsamında; LDMOS transistör ve itme-çekme topolojisi tercih edilmiştir. Frekans Bandı boyunca güç yükselteç kazancının minimum 41.5 dB, güç eklemeli verimlilik (PAE: Power Added Efficiency) değerinin minimum %28.3 olduğu belirtilmektedir.

Güç kazancı ile ilgili bir diğer çalışma Juliusz Modzelewski [7] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada E Sınıfı güç yükselteçlerinde itme-çekme topolojisinin yüksek verimlerde daha yüksek çıkış güçlerini desteklediği belirtilmektedir.

İncelenen bir diğer çalışma Ahmad Zakaria Ahmad, Ekta Aggrawal ve Karun Rawat [8] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada LDMOS transistör kullanılarak 2.1 GHz’de 100 W (50dBm) çıkış gücü elde edilmiş, kazanç ise 10.8 dB olarak ölçülmüştür. Çalışmada %52.5 verimlilik elde edildiği belirtilmektedir.

Adnan Raza ve Jeff Gengler [9] tarafından GaN HEMT transistör teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada ise 100-1000 MHz bant aralığında 70 W çıkış gücü ve %60 verimlilik elde edilmiştir.

E Sınıfı güç yükselteçlerinin verimlilikleri yüksek, doğrusallıkları ise düşüktür. Bu özelliklerinden dolayı QAM (Quadrature Amplitude Modulation : Dördün Genlik Modülasyonu), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : Dikey Frekans Bölmeli Çoklama) ve benzeri modülasyon teknikleri ile modüle edilen sinyalleri yükseltmek için E sınıfı yükselteçler tercih edilmez. A, B, AB Sınıfı güç yükselteçleri ise doğrusal güç yükselteçleridir [10-12]. Bu nedenle QAM, OFDM sinyallerin yükseltilmesinde doğrusal güç yükselteçleri kullanılır. A Sınıfı güç yükselteçlerinin doğrusallığı yüksek, verimleri ise düşüktür, B Sınıfı yükselteçlerin ise A Sınıfı yükselteçlere kıyasla verimi yüksek, doğrusallıkları ise düşüktür. A ve B sınıfı yükselteçlerin ara sınıfı olan AB Sınıfı yükselteçler ise A sınıfının doğrusallık, B sınıfının verimlilik özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada belirtilen nedenlerle AB Sınıfı güç yükselteci tasarımı tercih edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu makalede, Radar HF (9-10 MHz) bandında 1 kW çıkış gücüne sahip güç yükselteci tasarımı ve üretimi ele alınmaktadır. Yükselteç tasarımında güç kayıpları dikkate alınarak her biri 600 W çıkış gücüne sahip 2 yükselteç tasarımı ele alınmış ve her bir yükselteç için 20 dB kazanç ve minimum %50 verimlilik öngörülmüştür. Belirtilen 2 ayrı güç yükseltecinin bölünmesi ve birleştirilmesi için kullanılan birleştirici – bölücü yapılarının 0.3 dB araya girme kaybı, 15 dB geri dönüş kaybı ve 20 dB izolasyon kriterlerini sağlaması hedeflenmiştir.

Güç yükselteci devresinde donanım olarak; yüksek güç kapasiteli ve doğrusal olma gibi temel etmenlerden dolayı LDMOS teknolojisine sahip 2 adet Ampleon BLF188XR güç transistörü kullanılmıştır [13]. LDMOS teknolojisi çeşitli RF uygulamaları için önde gelen teknolojilerden biridir. VHF, UHF baz istasyonu, RF aydınlatma ve mikrodalga pişirme aygıtları bu teknolojinin kullanıldığı bazı örneklerdir [14]. Bu uygulamada kullanılan transistörler, çift dereceli harmonikleri teorikte

tamamen, pratikte de yüksek oranlarda bastırabilme özelliği nedeniyle itme-çekme topolojisinde seçilmiştir. İtme-çekme topolojisinin bir diğer avantajı da yüksek giriş ve çıkış empedansından dolayı geniş bant genişliğine olanak sağlamasıdır [15]. Bu transistörlerin seçilmesindeki diğer bir parametre ise kullanılmaya aday farklı transistörler arasında yapılan değerlendirmede BLF188XR transistörünün HF bandında istenilen kazanç, çıkış gücü ve verimlilik kriterlerini sağlamasıdır.

2.1. Donanım Mimari Yapısı

Güç yükselteçlerinin girişinde bölücü kullanılmıştır. Bu kapsamda tasarlanan ve üretilen 2-yollu bölücü donanımının amacı, tek girişte sağlanan gücün 2 ayrı kola bölünerek güç yükselteçlerinin girişlerine bağlanmasıdır. Güç yükselteçlerinin çıkışlarında ise birleştirici kullanılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan ve üretilen 2-yollu birleştirici yapısının görevi ise iki ayrı güç yükselteçinden gelen çıkış güçlerinin tek bir noktada toplanarak çıkışta 1kW güç elde edilmesini sağlamaktır.

2.2 Tasarım Parametreleri

Güç yükselteçleri, haberleşme sistemlerinin verici yapılarından yayılan sinyalin bozulmaya uğramadan yükseltilerek antene ulaşabilmesini sağlayan devre elemanları olarak tanımlanabilir. Bir RF güç yükselteci güç transistörleri, giriş uyumlaştırma devresi, çıkış uyumlaştırma devresi ve kutuplama (bias) devresi ana bloklarından oluşmaktadır. Güç transistöründen maksimum oranda kazanç ile çıkış gücü alınabilmesi için transistörün giriş ve çıkışında empedans uyumlama devreleri kullanılması gerekir. Kutuplama devresinin amacı ise, güç yükseltecinin çalışma noktasını ayarlayabilmektir. DC giriş gücünü, RF çıkış gücüne dönüştüren temel eleman ise güç transistörleridir. Günümüzde tasarlanan devrelerin, ölçüm cihazlarının, akademik çalışmaların büyük çoğunluğunda empedans uyumu için 50 Ω kullanılmaktadır. Bu nedenle sistemin giriş ve çıkış empedansları 50 Ω olarak seçilmiştir. Böylece yansımalarından kaynaklı kayıplar en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Tasarımın başlangıcında çıkış gücü, verimlilik, güç eklemeli verimlilik, bant genişliği, kazanç, doğrusalık, yansıma, S parametreleri ve kararlılık temel tasarım parametreleri olarak seçilmiştir. Bu parametrelere ilişkin detay tanımlamalar çeşitli kaynaklarda açıklanmaktadır [16,17].

2.3 Güç Yükselteci Sınıfları

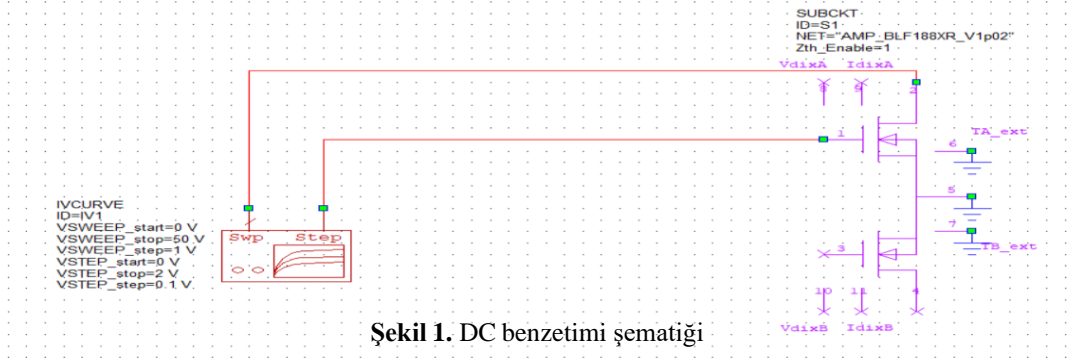
Bu makalede tasarımı ele alınan yükselteç AB sınıfı yükselteçtir. AB sınıfı, A sınıfı ve B sınıfı yükselteçlerin özelliklerini kendi yapısı altında bir arada toplar ve böylece A sınıfının doğrusalık, B sınıfının verimlilik özelliklerini taşır. Hem doğrusalık, hem de verimlilik ihtiyaçlarını karşılamak için eşik geriliminin üzerinde dikkatlice kutuplama yapılır. AB sınıfı yükselteçler, B sınıfı yükselteçler gibi sıklıkla itme-çekme yapıda kullanılır. Transistör yarım döngüden fazla aktif bölgede çalıştığı için birleşme noktasındaki bozulma azdır ve böylece daha doğrusal ve verimli bir yapı elde edilmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Güç Yükselteci Tasarımı Simülasyon Çalışmaları

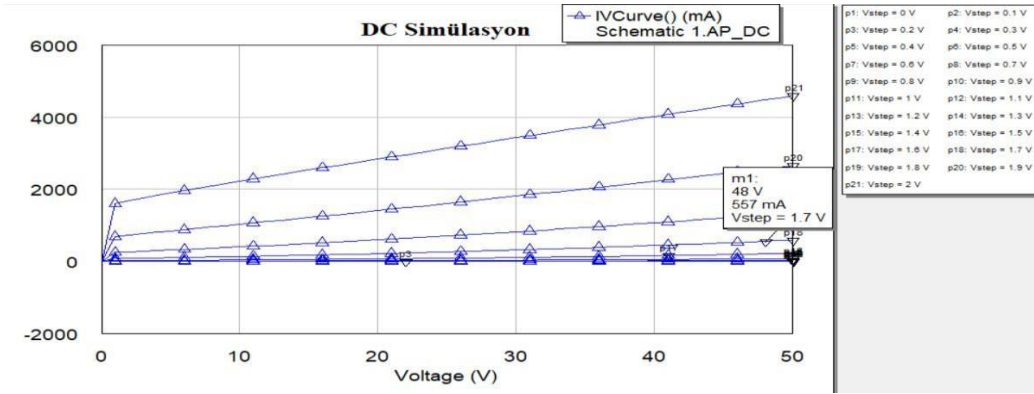
3.1.1 DC Benzetimi

DC benzetiminin amacı güç yükseltecinde kullanılacak transistörün istenilen çalışma sınıf aralığında çalışabilmesi için en uygun besleme voltaj değerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda öncelikle DC benzetim çalışması yapılmıştır. Güç yükselteci kapsamında kullanılması planlanan “Ampleon BLF188XR” transistörünün teknik özellikleri incelendiğinde VDS geriliminin 50V’a kadar yükseltilebileceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, VDS değeri 48V olarak belirlenmiştir. Güç yükselteç tasarımında; VDS değerine karşılık gelen VGS değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu maksatla AWR yazılımı desteği ile Şekil 1’deki devre kurulmuştur. Devrede IVCURVE kullanarak VGS ve VDS voltajlarını istenilen değer aralıklarında değiştirerek ortaya çıkan IDS akımı gözlemlenmiştir.



Şekil 1. DC benzetimi şematığı

AWR yazılım paketi kullanılarak yapılan DC benzetim sonucu Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. IV eğrisi

Şekil 2’de VDS değerlerinin 0-50 V arasındaki değişimi ile VGS değerlerinin 0-2 V aralığındaki değişimleriyle birlikte transistörden akacak IDS akım değerinin ayarlanması gösterilmektedir. VDS değeri bir önceki paragrafta açıklandığı üzere 48V olarak belirlenmiştir. AB Sınıfı tasarım için çalışma noktasını kesim bölgesinden bir miktar yukarıda seçmek gerekir. Bu nedenle transistör için IDS akımını yaklaşık 500-550 mA olarak ayarlamının uygun olacağı belirlenmiştir. Burada, ‘m1’ işaretçisinin de gösterdiği üzere 48V VDS ve 1.7V VGS değerine karşılık IDS akımı 557mA’dır. Bu sonuçla birlikte VGS değeri 1.7V olarak belirlenmiştir.

3.1.2 Yük Çekme ve Kaynak Çekme Analizleri

Bu analizlerin amacı; transistörün en uygun giriş ve çıkış empedansını belirlemektir. Transistörün en uygun giriş ve çıkış empedansını belirlemek uyumlama devresini tasarlamak için önemlidir. Kazanç, çıkış gücü, verimlilik gibi kısıtların sağlanması için giriş-çıkış empedansları doğru bir şekilde belirlenmelidir.

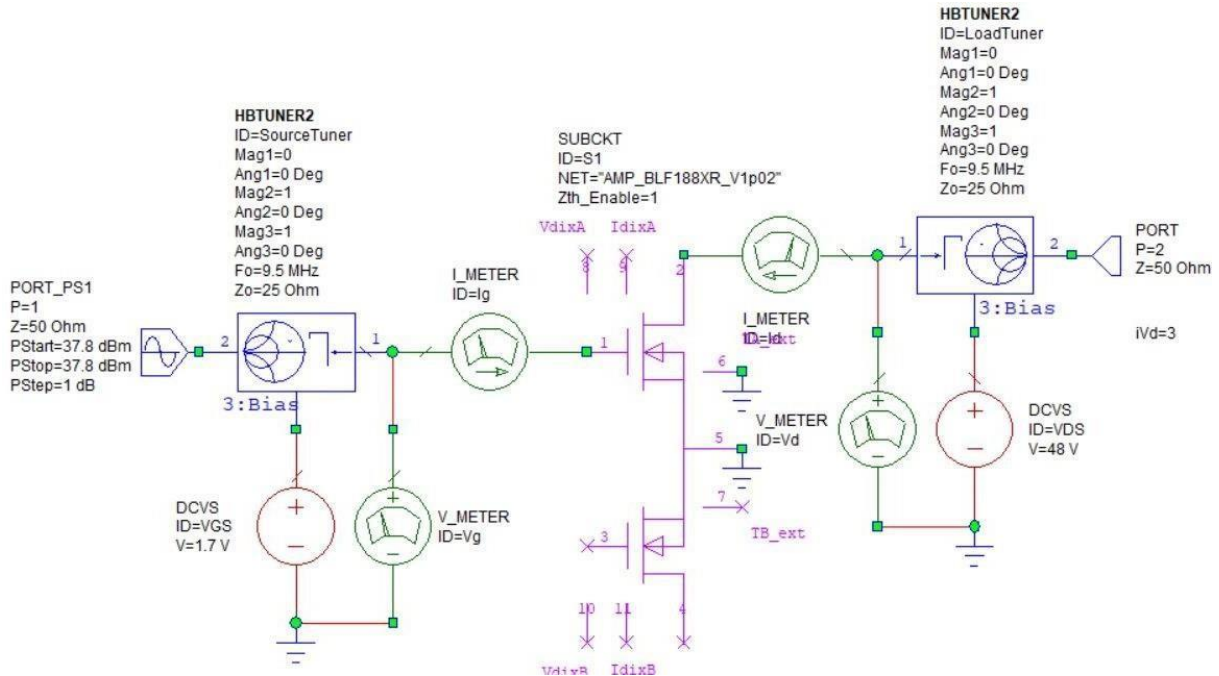
Yük çekme analizi için AWR yazılımı desteği ile Şekil 3’deki devre kurulmuş ve belirtilen değerler elde edilmiştir. Bu devrede güç transistörleri çalıştırma noktasına uygun VGS ve VDS değerleriyle beslenerek, istenilen frekansta kullanıcının belirlediği yansıma katsayısı büyüklük ve açı değerlerinde en uygun giriş ve çıkış empedansını ayarlamak için ‘HBTUNER2’ kullanılmıştır. Devrenin giriş ve çıkışında 1:1 Bal-un yapısı kullanılarak 25 Ω olan empedans 50 Ω değerine dönüştürülmektedir. Bu nedenle benzetim çalışmasında akort empedans değerleri 25 Ω olarak kullanılmıştır.

Smith diyagramı radyo ve mikrodalga frekanslarındaki iletim hatlarının tasarımı ve empedans eşleşmesinde sıklıkla kullanılan bir grafikdir. Şekil 4’de Smith diyagramı üzerinde 3 çeşit kontur bulunmaktadır. Mavi konturlar çıkış gücünü, pembe konturlar verimliliği, kahverengi konturlar ise kazancı temsil etmektedir.

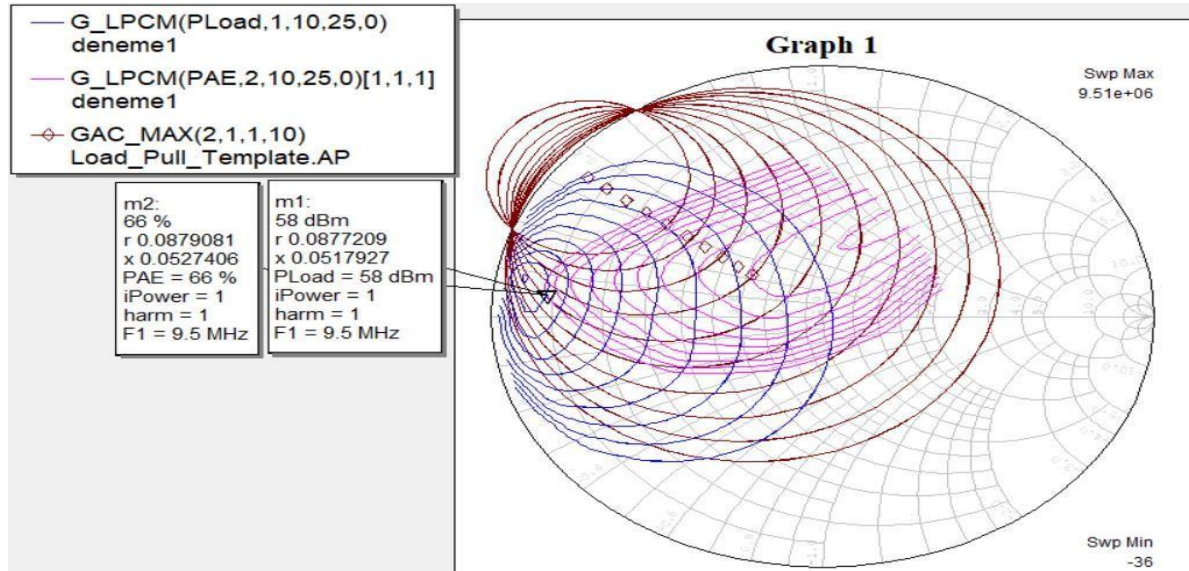
Bu konturlar üzerinde en uygun çıkış empedans belirlemesi yapılmıştır. Seçilen noktanın 58 dBm çıkış gücü ve %66 verimliliğe sahip olduğu, bu değerlerin de isterleri sağladığı görülmektedir.

Seçilen empedans değeri Şekil 4’de görüldüğü gibi $0.087 + j 0.051 \Omega$ ‘dur. Bu değer 25Ω ile normalize edilmiş değerdir. Başka bir deyişle, transistörün en uygun çıkış empedansı bu değerın 25 ile çarpılması ile elde edilen yaklaşık $2.17 + j1.27 \Omega$ değeridir.

Kaynak Çekme analizi ile benzer işlemler transistörün en uygun giriş empedansını belirlemek için yapılmıştır. Belirlenen en uygun giriş ve çıkış empedanslarına göre giriş ve çıkış empedans uyumlama devreleri tasarlanmıştır.



Şekil 3. Yük çekme analiz şematığı



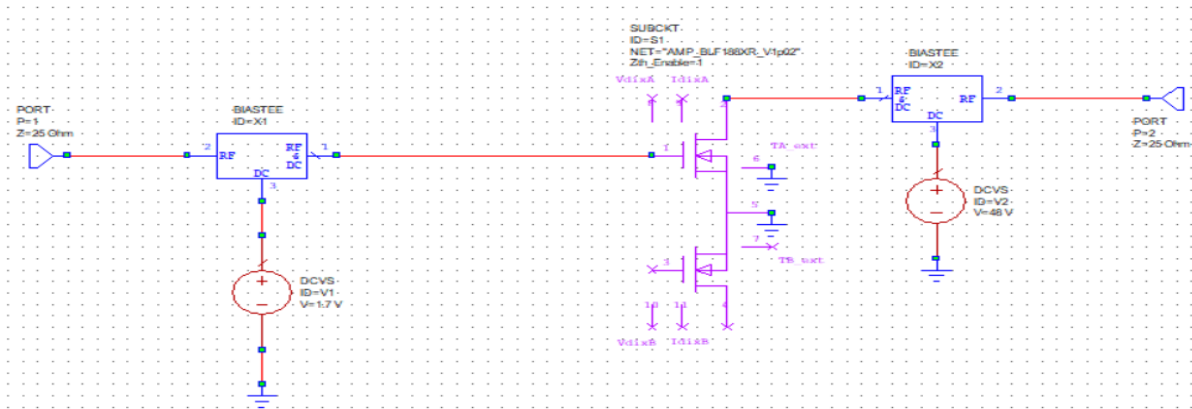
Şekil 4. Yük çekme analiz sonucu

3.1.3 Kararlılık Analizleri

Kararlılık analizlerinde AWR yazılım paketi kullanılmış, Rollet Kararlılık (K) ve B1 yardımcı kararlılık faktörü değerleri incelenmiş ve bu değerlerin bulunmasını sağlayan denklemler [18]-[19] kullanılarak AWR programında kararlılık ile ilgili benzetimler yapılmıştır.

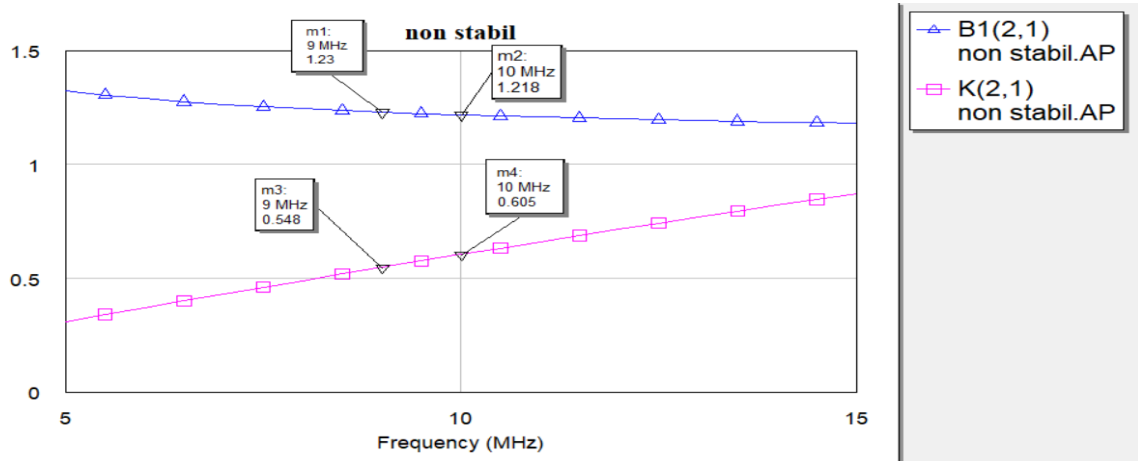
Burada, temel hedef transistörün koşulsuz kararlı şekilde çalışmasıdır. Bunun için $K>1$, $B1>0$ şartlarının sağlanması gerekmektedir [18]. Şekil 5’de kararlılık analizi için tasarlanan devre ve Şekil

6’da benzetim sonuçları gösterilmektedir.



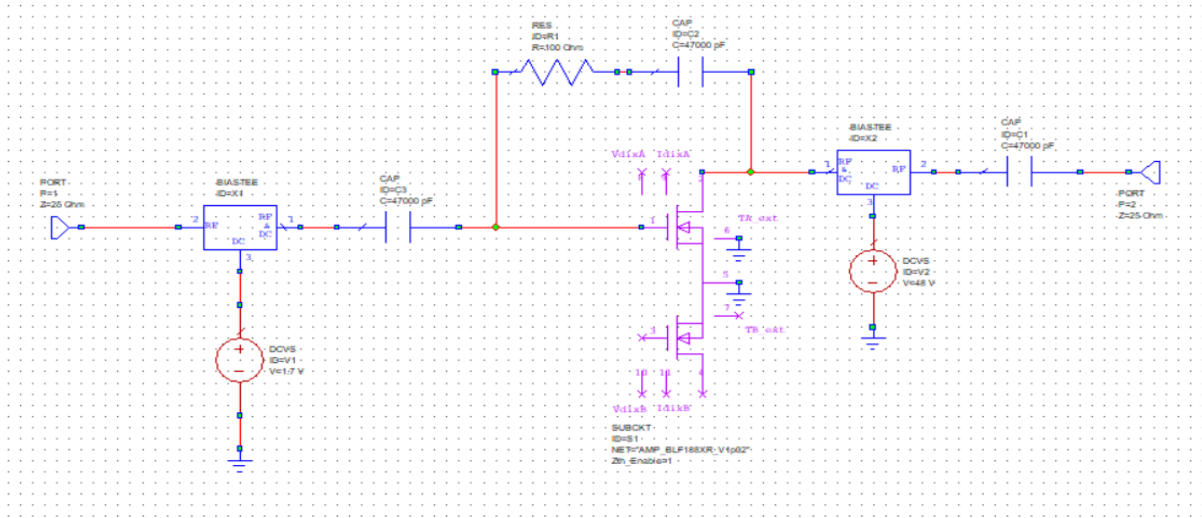
Şekil 5 Kararlılık analizi için kurulan devre şematiği

Şekil 6’daki sonuca göre $B1 = 1.2$, K ise yaklaşık olarak 0.55 ’dir. Bu değerlere göre tasarlanan sistem “koşulsuz kararlılık” kriterini sağlamamaktadır. Transistörü koşulsuz kararlı çalıştırmak için araştırma yapılmış ve savak – kapı geri beslemesi kullanılmasının kararlılığa olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir [1]. Savak – kapı geri beslemesi sisteme eklenmiş ve kararlılık benzetimleri tekrar edilmiştir. Savak – kapı geri beslemesinde kullanılan değerler AWR programında ince ayar yapılarak belirlenmiştir. Elde edilen yeni değerler dikkate alındığında $K > 1$, $B1 > 0$ koşulları sağlanarak “koşulsuz kararlılık” elde edilmiştir.

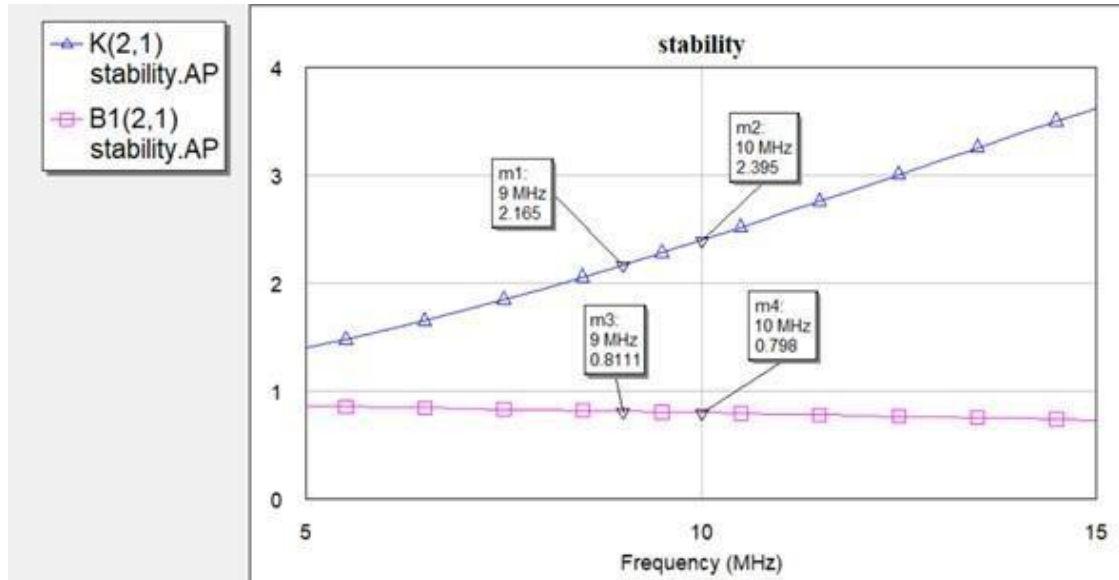


Şekil 6. Kararlılık analiz sonucu

Şekil 7’de RC geri besleme eklenmiş sistem, Şekil 8’de ise elde edilen yeni değerler gösterilmektedir. Şekil 8’deki sonuçlara göre 9 – 10 MHz aralığında $K = 2.2$, $B1 = 0.8$ olduğu görülmektedir. Eklenen geri besleme yapısıyla tasarlanan sistem “koşulsuz kararlılık” kriterine uygun hale getirilmiştir. Geri besleme devresinde kullanılacak değerlerin tespiti için AWR yazılımı kullanılmıştır.



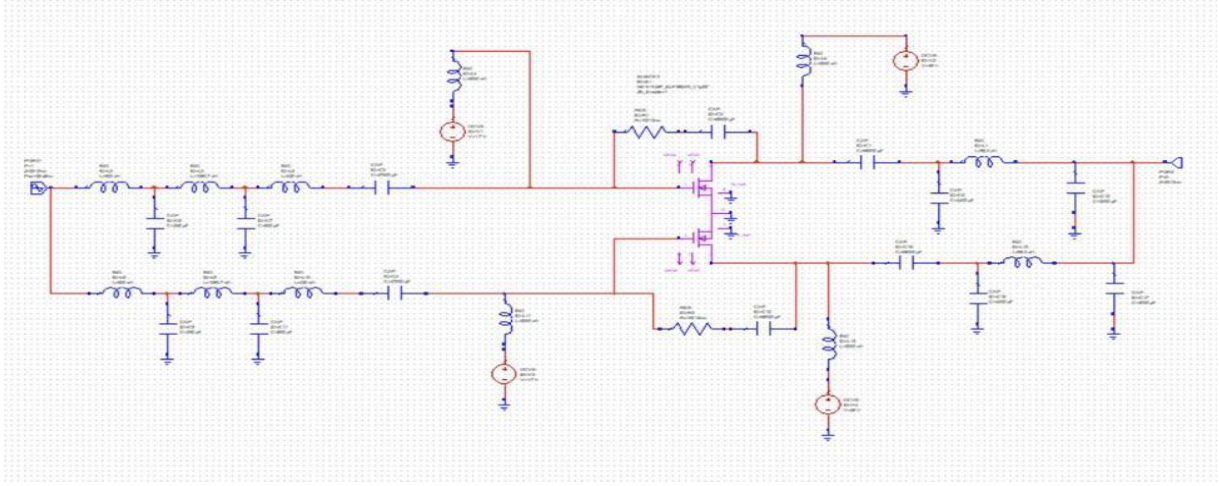
Şekil 7. Geri besleme eklenmiş devre



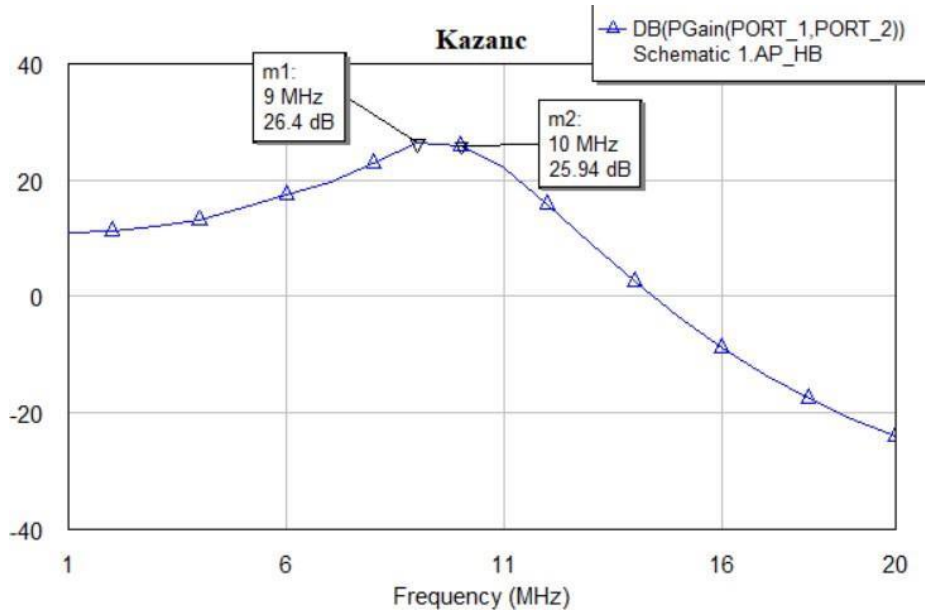
Şekil 8. Geri beslemeli devrenin kararlılık analiz sonucu

3.1.4 Kazanç – Çıkış Gücü – Verimlilik Ölçüm Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde AWR kullanılarak yapılan “Yük Çekme ve Kaynak Çekme” analizleri, giriş – çıkış empedans uyumlama devre tasarımı; kazanç, çıkış gücü, verimlilik hesaplamaları açıklanmaktadır. Ayrıca, benzetim çalışmalarında kıstasların sağlanıp sağlanmadığı irdelenmektedir. Şekil 9’da tasarlanan devrenin son hali gösterilmektedir. Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de ise sırasıyla kazanç, çıkış gücü, verimlilik sonuçları yer almaktadır.

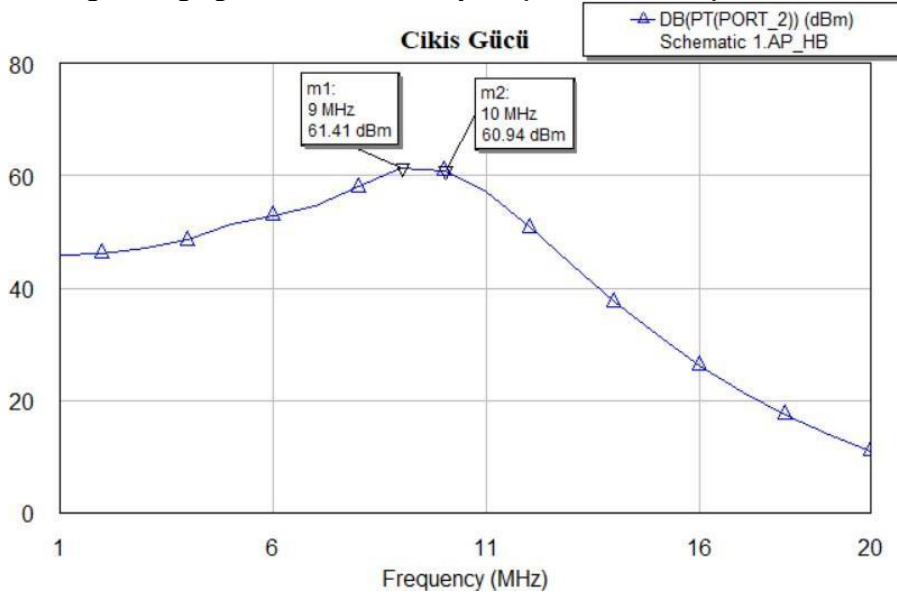


Şekil 9. Tasarlanan devrenin son hali



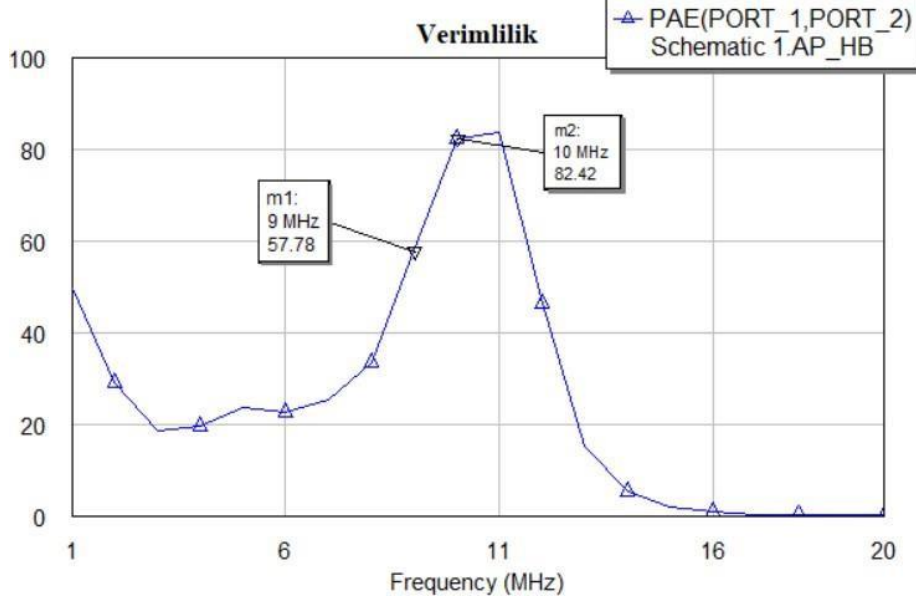
Şekil 10. Kazanç için benzetim sonucu

Şekil 10'da görüldüğü gibi 9 – 10 MHz' de yaklaşık 26 dB kazanç vardır.



Şekil 11 Çıkış gücü için yapılan benzetim sonucu

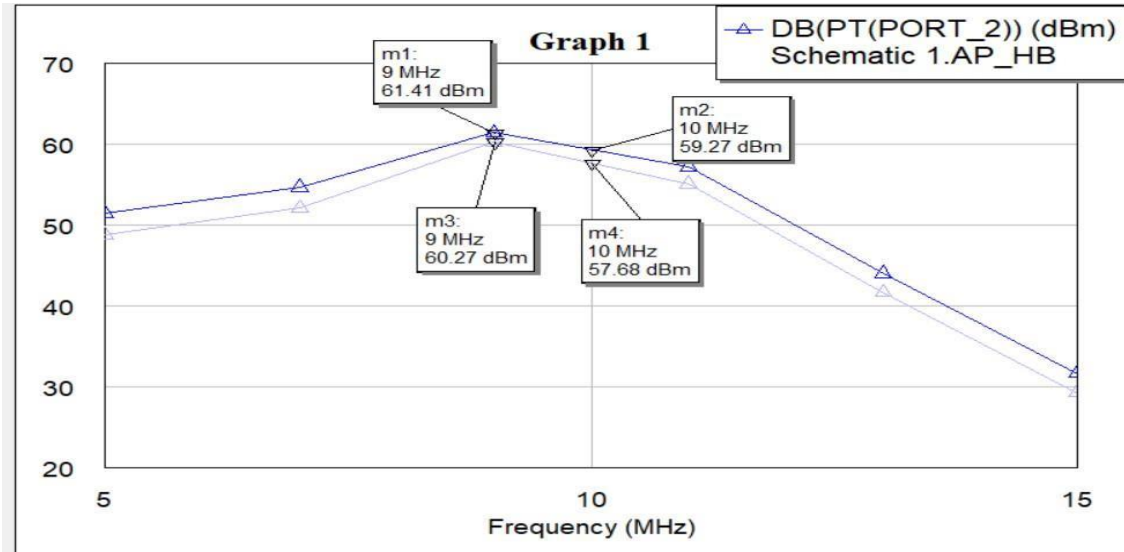
Şekil 11’de görüldüğü üzere 9 – 10 MHz’de yaklaşık 61 – 61.4 dBm çıkış elde edilmiştir.



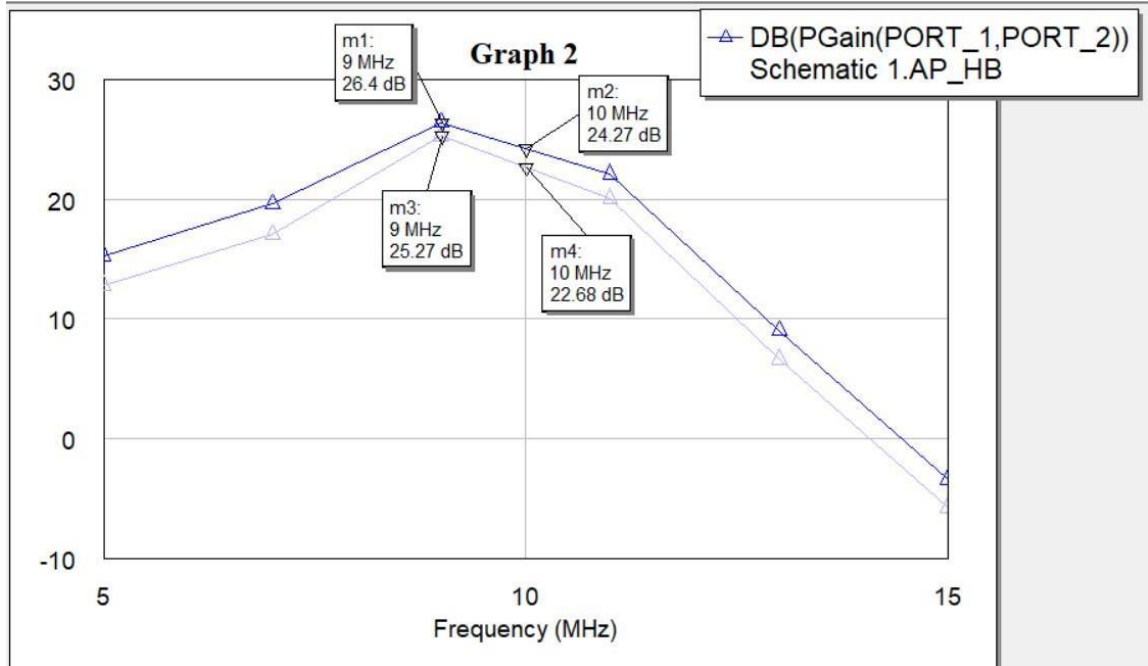
Şekil 12. Verimlilik için yapılan benzetim sonucu

Şekil 12’de görüldüğü gibi istenilen frekanslarda yaklaşık yüzde 57 – 82 arası verimlilik elde edilmiştir. Netice olarak, kıstasların tümünün sağlandığı görülmektedir.

Geri besleme devresinde denenen tüm değerlerde “koşulsuz kararlılık” kıstası sağlanmaktadır. Bunun için seçilecek direnç değeri belirlenirken kazanç ve çıkış gücü benzetimlerinden istifade edilmiştir. Şekil 13 toplam çıkış gücü ölçümleri, Şekil 14 ise kazanç ölçümlerini göstermektedir. Şekil 13 ve Şekil 14’de açık renk ile gösterilen ölçüm sonuçları geri besleme devresinde 50 Ω direnç kullanıldığında elde edilen değerleri, koyu renk olarak gösterilen sonuçlar ise geri besleme devresinde 100 Ω kullanıldığında elde edilen değerleri göstermektedir. Her iki ölçümde de direnç olarak 100 Ω kullanıldığında elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir. Bu nedenle geri besleme devresinde 100 Ω kullanımına karar verilmiştir.



Şekil 13. Geri besleme devresi değeri belirlemek için çıkış gücü benzetimi



Şekil 14 Geri besleme devresi değer belirlemek için kazanç benzetimi

3.1.5 Güç Yükselteç Tasarımı ve Testi

3.1.5.1 İlk Yükselteç Test Aşaması

Üretimi ve dizgisi tamamlanan yükseltecin test aşamasında öncelikle DC test yapılmıştır. DC testinin amacı benzetim çalışmasında yapıldığı şekilde $V_{DS} = 48V$ iken I_{DS} akımının yaklaşık 1A olduğu V_{GS} değerini belirlemektir. $V_{GS} = 1.8 V$ iken istenilen değere ulaşılmıştır. DC test aşamasından sonra çıkış gücü ve kazanç test edilmiştir. RF sinyalini güç yükseltecine vermeden önce ön yükseltme işlemi yapılmıştır. RF güç yükseltecinin çıkış gücünü ölçmek için 'Yönlü Güç Ölçer' kullanılmıştır. Son işlem olarak, yükseltelen sinyalinin zayıflatma işlemi yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde tespit edilen değerler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'deki değerler dikkate alınarak Verimlilik Denklem 1 'de belirtildiği şekilde hesaplanabilir.

Tablo 1. Test Ölçüm Sonuçları

P_{in}	P_{out}	Kazanç	Akım
34.6 dBm	58.44 dBm	23.80 dB	29.40 A

Kazanç yaklaşık olarak 23.8 dB'dir. Çıkış gücü ise 58.4 dBm, diğer bir deyişle çıkış gücü yaklaşık olarak 690 Watt'tır. Görüldüğü gibi verimlilik tasarım kistası olarak hedeflenen %50'ye çok yakındır. Böylece yükseltecin tasarım kistasını sağladığı anlaşılmaktadır.

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{PDC} = \frac{698 - 3}{48 * 29,4} * 100 = 49,2\% \quad (1)$$

3.1.5.2 İkinci Yükselteç Test Aşaması

İlk yükselteçte yapıldığı gibi önce DC test yapılarak, transistörün çalışma noktası ayarlanmıştır. Daha sonra RF sinyal üretici, ön yükselteç, zayıflatıcı ve tayf analizörü (spectrum analyser) kullanarak ölçüm yapılmıştır. Ölçüm yapıldıktan sonra kazanç değerini hesaplamak için ön yükselteç çıkış gücü

ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde tespit edilen değerler Tablo 2’de verilmiştir.

P_{in}	P_{out}	Kazanç	Akım
36 dBm	57.83 dBm	21.83 dB	26.1 A

Tablo 2’deki değerler dikkate alınarak verimlilik Denklem 2’de belirtildiği şekilde hesaplanabilir. Görüldüğü gibi verimlilik tasarım kistası olarak hedeflenen %50’ye çok yakındır. Böylece ikinci yükseltecin de tasarım kistasını sağladığı anlaşılmaktadır.

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{PDC} = \frac{606 - 4}{48 * 26,1} * 100 = 48\%$$

(2)

3.2. Birleştirici-Bölücü Tasarımı ve Simülasyon Çalışmaları

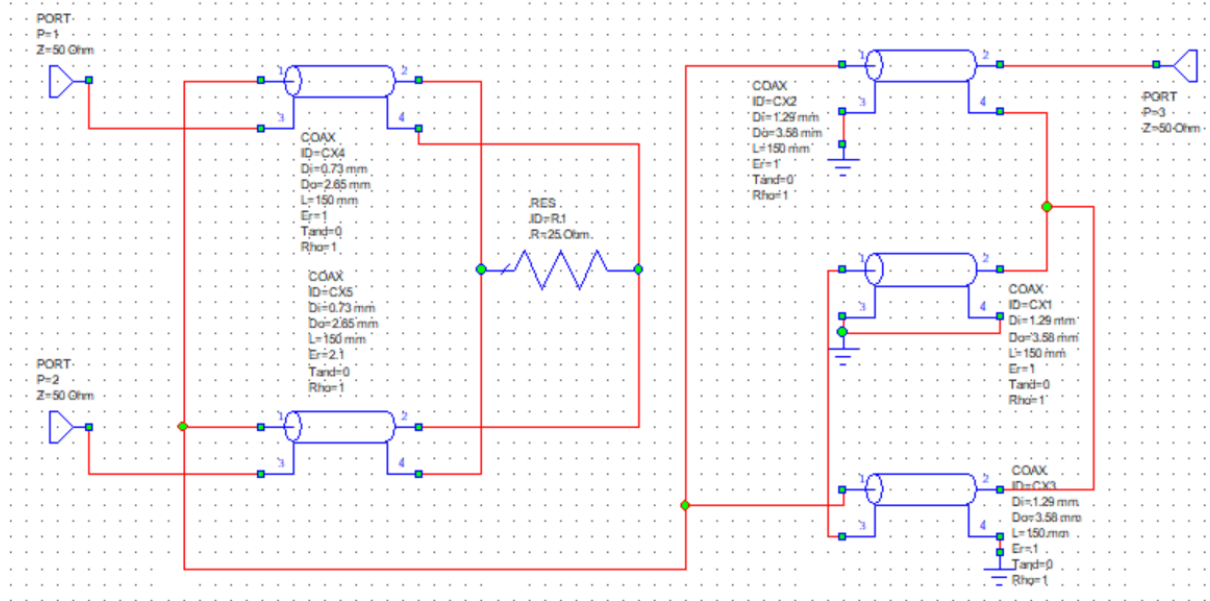
Tek girişte sağlanan gücün 2 ayrı kola bölünerek güç yükselteçlerinin girişlerine bağlanması amacıyla bölücü tasarımı, iki ayrı güç yükseltecinden gelen çıkış güçlerinin tek bir noktada toplanarak çıkışta 1kW güç alınabilmesi amacıyla da birleştirici tasarımı yapılmıştır.

Birleştirici – bölücü yapıları temelde aynıdır. Sadece yalıtım için kullanılan direncin güç değeri değişmektedir. Bölücü yapısında kullanılan direnç 5W, birleştirici yapısında kullanılan direnç ise 150W güce dayanacak şekilde seçilmiştir.

Birleştirici – bölücü yapısı 2 farklı bloktan oluşmaktadır. Bu yapıda ilk olarak 2 adet güç yükseltecinden gelen güçlerin birleştirildiği 2-yollu birleştirici bloğu ve arkasından 2:1 Un-Un TLT bloğu gelmektedir. 2-1 Un – Un TLT bloğunun amacı empedans dönüşümüdür. 2 girişten uygulanan güç önce birleştirici yapısına girmekte, daha sonra birleştirici yapısından çıkan 25 Ω değerinde empedans 2:1 Un-Un TLT yapısından geçerek çıkışta 50 Ω değerinde ve 1kW büyüklüğünde güç elde edilmesi hedeflenmiştir.

3.2.1 Birleştirici – Bölücü Yapısı ve Benzetim Çalışmaları

Tasarlanan birleştirici-bölücü yapının AWR üzerinde çizilmiş şematik görüntüsü Şekil 15’deki gibidir.

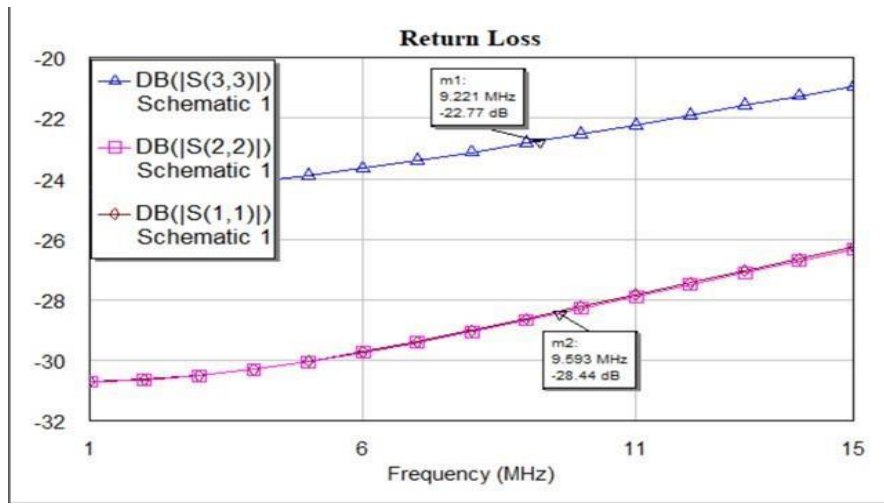


Şekil 15. Bölücü-birleştirici şematik çizimi

Şekil 15’de 2-yollu birleştirici ve 2:1 Un-Un TLT yapıları birleştirilmiştir. Sağ tarafta 3 koaksiyel kablo yapısı ile birleştirilmiş olan kısım 2:1 Un-Un TLT yapısıdır. Birleştirici yapısında çok yüksek güçler kullanıldığından iki kapı arasında yalıtım sağlanmıştır. Geri dönüş kayıplarını engellemek ve 2.kapıdan 1.kapıya olan yansımaları azaltmak için 25Ω direnç kullanılmıştır.

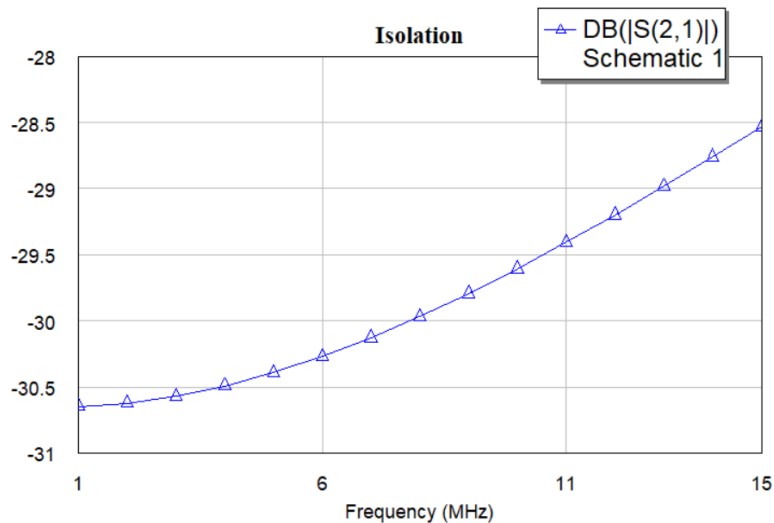
Bu yapıda kullanılan birleştirici modeli In-Phase Type B modelidir [1]. RF güç yükseltecı devrelerinde, devrelerin herhangi birinde oluşacak bir arızanın tüm yükseltecı etkilememesi için yalıtım çok önemlidir. Bu modelin kullanılma sebebi yüksek güçlerde çalışan bu devrelerin yalıtımının çok iyi yapılması gerektiğindedir.

Güç yükseltecı tasarımında önemli parametrelerden biri de geri dönüş kayıplarıdır. Bu maksatla S11, S22, S33 parametrelerinin değerleri incelenmiştir. S1, S22, S33 Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) değerleridir. Geri Dönüş Kaybı değeri girişten geri yansıyan gücün ne miktarda olduğunu gösterir. Tasarımını yaptığımız güç yükseltecı için Geri Dönüş Kaybının en az 15 dB olması arzu edilir. Yapılan benzetim çalışmasında (Şekil-16) 9-10 MHz aralığında Geri Dönüş Kaybının istenilenden daha iyi bir değer olarak 22 dB civarında olduğu görülmektedir.



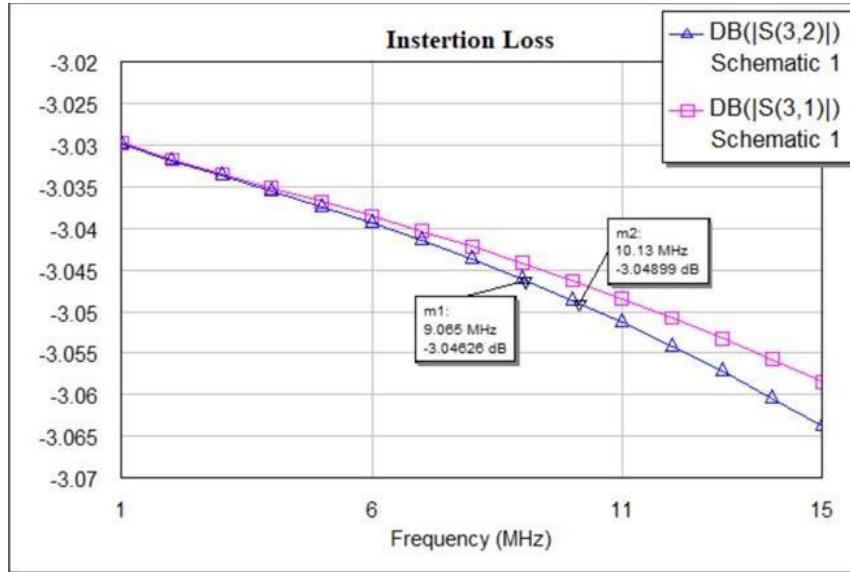
Şekil 16. Geri yansıyan güç

Diğer bir parametre ise yalıtım değerini gösteren S21 Parametresidir. S21 parametresi; 2 giriş kapısı arasında yansıma olup olmadığına ilişkin bir göstergedir. İzolasyon; giriş kapılarından biri arıza yaptığında diğer kapının bundan etkilenmemesi açısından önemlidir. İzolasyon değerinin de 15 dB veya üstünde bir değer olması genellikle arzu edilen bir durumdur. Benzetim neticesinde (Şekil 17) izolasyon değerinin 29.5 ve 30 dB aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 17. İzolasyon

Diğer bir parametre de Araya Girme Kaybı (Insertion Loss) olarak bilinen S31, S32 parametreleridir. Araya Girme Kaybına ilişkin benzetim neticesi Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Araya girme kaybı

3.2.2 Bölücü Testi

Tasarlanan ve üretilen bölücü, ağ analizörü kullanılarak test edilmiştir. Kullanılan ağ analizörü 2 kapılı olduğu için ölçüm alınmayan kapı 50Ω ile sonlandırdıktan sonra ölçüm alınan kapıların S parametreleri ölçülmüştür. Ölçüm 5 – 15 MHz aralığında yapılmış, 9 ve 10 MHz frekansları marker kullanılarak işaretlenmiştir. Bölücü için 5 – 15 MHz aralığında toplam 1601 nokta ile yapılan Geri Dönüş Kaybına ilişkin elde edilen değerler Tablo 3’de özetlenmiştir. Burada; 1. Kapı Giriş, 2. ve 3. Kapı ise Çıkış kapısıdır. Tablo 3’de belirtilen değerler 9 – 10 MHz aralığında yapılan ölçümlerde elde edilen en kötü değerlerdir. S11, S22 ve S33 Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) değerlerini belirtmektedir. Bu kapsamda, tasarım çalışmasında “Geri Dönüş Kaybı” minimum değeri olarak 15 dB hedeflenmiştir. Tablo 3’deki sonuçlardan görüldüğü gibi hedef kıstas belirlenen frekans aralığı içinde sağlanmaktadır.

Tablo 3. S Parametre Değerleri (dB)

S11	S22	S21	S33	S32	S31
-20.3	-20.8	-3.10	-21.0	-43.40	-3.11

S21 ve S31 Araya Girme Kaybı (Insertion Loss) değerleri için kullanılmaktadır. Tasarım kriteri olarak Araya Girme Kaybı maksimum 0.3 dB olarak belirlenmiştir. Bu kıstasın $3.11 - 3 = 0.11$ ile sağlandığı Tablo 3’de görülmektedir.

S32 yalıtım değerini belirtmektedir. Tasarım çalışmasında bu değer için minimum 20 dB kıstas olarak belirlenmiştir. Yapılan test neticesinde yalıtım değerinin Tablo 3’de görüldüğü gibi 43.4dB olduğu görülmüştür. Böylece, bu kıstasın da sağlandığı anlaşılmaktadır. Netice olarak, bölücü tasarımı için tüm kıstasların sağlandığı görülmektedir.

3.2.3 Birleştirici Testi

Üretimi tamamlanan birleştirici, ağ analizörü ile test edilmiştir. Kullanılan ağ analizörü 2 kapılı olduğu için ölçüm alınmayan kapısı 50Ω ile sonlandırdıktan sonra ölçüm alınan kapıların S parametreleri ölçülmüştür. Birleştirici için 5 – 15 MHz aralığında toplam 1601 nokta ile yapılan Geri Dönüş Kayıplarına ilişkin elde edilen değerler Tablo 4’de özetlenmiştir. Burada; 1. ve 2. Kapı Giriş, 3. kapı ise çıkış kapısıdır. Tablo-4’de belirtilen değerler 9 – 10 MHz aralığında yapılan ölçümlerde elde edilen en

kötü değerlerdir. S11, S22 ve S33 Geri Dönüş Kaybı değerlerini belirtmektedir. Bu kapsamda tasarım çalışmamızda Geri Dönüş Kaybı minimum değeri olarak 15 dB hedeflenmiştir. Tablo 4'deki sonuçlardan görüldüğü gibi bu hedef kıstas belirlediğimiz frekans aralığı içinde sağlanmaktadır.

Tablo 4. S Parametre Değerleri

S11	S22	S21	S33	S32	S31
-25.0	-25.0	-30.8	-21.0	-3.10	-3.10

S31 ve S32 Araya Girme Kaybı değerleri için kullanılmaktadır. Tasarım kıstası olarak Araya Girme Kaybı maksimum 0.3 dB olarak belirlenmiştir. Bu kıstasın 3.10 dB (S31 ve S31 değeri) - 3.00 dB (Yarı Güç Değeri) = 0.1 dB ile sağlandığı Tablo 4'de görülmektedir.

S21 izolasyon değerini belirtmektedir. Tasarım çalışmasında bu değer için minimum 20 dB kıstas olarak belirlenmiştir. Yapılan test neticesinde yalıtım değerinin Tablo 4'de belirtildiği üzere 30.8dB olduğu görülmüştür. Böylece, bu kıstasın da sağlandığı anlaşılmaktadır. Netice olarak, birleştirici tasarımı için tüm kıstasların sağlandığı görülmektedir.

3.3 Yapıların Entegrasyonu ve Nihai Sistem Testi

Önceki alt bölümlerde, 2 adet güç yükselteci, 1 adet bölücü ve 1 adet birleştirici olmak üzere 4 alt sistemin de isterleri sağladığı yapılan testler sonucunda görülmüştür. Son aşama, bu 4 yapının birleştirilerek 9-10MHz'de 12 Watt maksimum giriş gücüyle 1000 Watt çıkış gücü elde edilmesidir.

Bu maksatla bir test ortamı kurulmuştur. Her iki transistörün ayrı ayrı DC çalışma noktaları ayarlanmış, daha sonra RF sinyali, ön yükselteç ile yükselttilerek birleştirici yapısının girişine uygulanmıştır. Birleştirici, giriş gücünü ikiye bölerek güç yükselteçlerine iletmiştir. Güç yükselteçlerinde yükselttilen sinyaller birleştirici yapısı ile birleştirilmiştir. Tayf analizörü ile Offset değeri dB olarak ayarlanmış, böylece birleştirici yapısından çıkan güç Tayf Analizör'de ölçülmüştür. Son aşama olarak bölücü'ye uygulanan giriş gücünü ölçmek için ön yükselteç çıkışına Yönlü Güç Ölçer bağlanarak giriş gücü okunmuştur.

Yapılan testlerde elde edilen sonuçlar Tablo 5'de verilmektedir. Bölücü girişinden 12 Watt, yaklaşık olarak 40.8 dBm giriş gücü uygulanarak sistemden 1kW çıkış gücü elde edilmesi temel hedef olarak başlangıçta belirlenmiştir. Yapılan testte 9-10 MHz aralığında maksimum 39.64 dBm, diğer bir deyişle 9.2 W giriş gücüyle, 1kW çıkış gücü elde edildiği görülmüştür. Denklem (3) ile gösterildiği üzere 9.5 MHz'de %45 verimlilik elde edilmiştir.

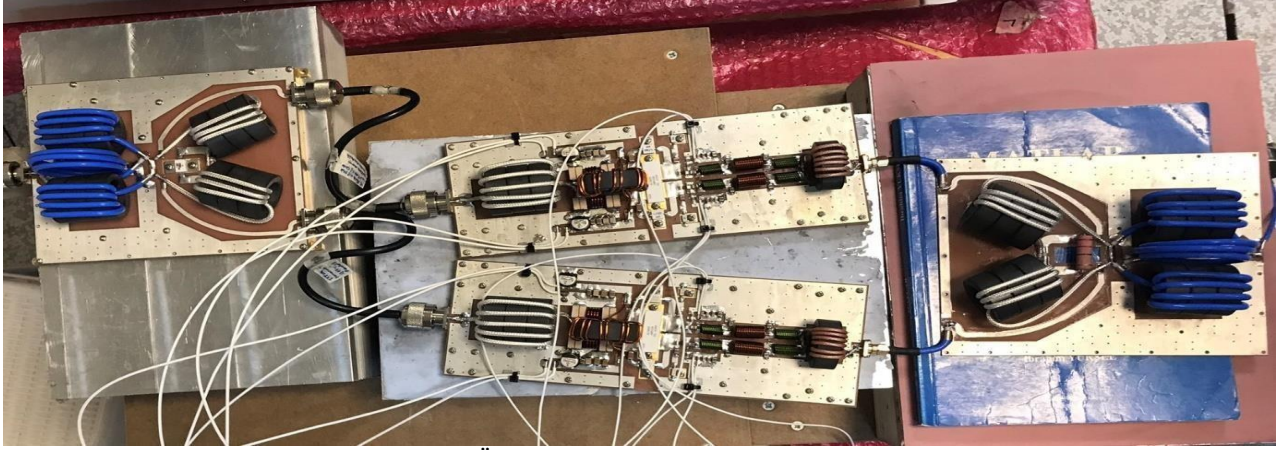
Sonuç olarak, tasarım kıstaslarının tümünün sağlandığı tespit edilmiştir.

Tablo 5. Nihai Güç ve Kazanç Değerleri

Frekans (MHz)	Pin	Pout	Kazanç
9 MHz	39.3 dBm	60.05 dBm	20.75 dB
9.5 MHz	38.86 dBm	60.09 dBm	21.23 dB
10 MHz	39.64 dBm	60.30 dBm	20.66 dB

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{PDC} = \frac{1020 - 7,7}{48 * 46,5} * 100 = 45\% \quad (3)$$

Üretimi tamamlanan sistemin nihai hali Şekil 19'da verilmektedir.



Şekil 19. Üretilen sistemin birleştirilmiş hali

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Radar HF bandında çalışan 1kW çıkış gücüne sahip RF Güç Yükselteci tasarımı yapılmıştır. Çalışma kapsamında 2 Güç Yükselteci, 1 Bölücü, 1 Birleştirici bulunmaktadır. Güç yükselteç tasarımı isterlere uygun transistöre karar verilerek başlanmıştır. Transistör seçiminde itme-çekme topolojisinde bir transistör seçilmiştir. Çift dereceli harmonikleri büyük ölçüde bastırabilme özelliğinden dolayı tasarlanan ve üretilen güç yükselteçinde İtme-Çekme yapı kullanılmıştır. Transistör seçimi tamamlandıktan sonra seçilen transistörün çalışma noktasını ayarlamak için DC benzetim yapılmıştır.

Bu benzetimde transistörün istenilen noktada çalışması için gereken voltaj besleme değerleri belirlenmiştir. Güç yükseltecinin çalışma frekans aralığında koşulsuz kararlı olması hedeflenir. Koşulsuz kararlılık için Kararlılık Analizleri başlığı altında anlatılan K ve B1 yardımcı kararlılık faktörleri incelenmiştir. Koşulsuz kararlılık $K>1$, $B1>0$ olduğunda sağlanmaktadır. Bunun için tasarlanan sistemin kararlılık benzetimi yapılmıştır. Tasarlanan sistem ilk başta bu koşulları sağlamamıştır. Bunun için araştırma yapılmış ve savak – kapı geri beslemesi kullanılmasının kararlılığa olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. [3] Savak – kapı geri beslemesi eklenmiş ve kararlılık benzetimleri tekrarlanmıştır. Son elde edilen sonuca göre $K>1$, $B1>0$ koşulları sağlanarak koşulsuz kararlılık elde edilmiştir. Savak – kapı geri beslemesinde kullanılan değerler, AWR programında ince ayar yapılarak belirlenmiştir.

Kararlılık analizlerinden sonra transistörden bakıldığında en uygun giriş ve çıkış empedansının belirlenmesi için Kaynak Çekme ve Yük Çekme analizleri yapılmıştır. Yansıma sonucu oluşacak kayıpları en aza indirmenin yolu empedans uyumlama devrelerini titizlikle tasarlamaktır. Bunun için de en uygun giriş ve çıkış empedansının belirlenmesinin önemi büyüktür. En uygun empedans belirleme işleminden sonra giriş uyumlama ve çıkış uyumlama devreleri tasarlanmıştır.

Empedans uyumlama işleminden sonraki aşama tasarlanan devrenin çıkış gücü, kazanç ve verimlilik benzetim sonuçları incelenmiştir. Sonuçlar istenilen şekilde olduğu için güç yükseltecinin benzetim çalışmaları noktalanıp üretim aşamasına geçilmiştir.

Birleştirici yapısı için ise 2 farklı yapının tasarlanan sistem için kullanıma uygun olduğu görülmüştür. Yüksek güç seviyelerinde çalışıldığından yalıtımı daha iyi olan birleştirici yapısı seçilmiştir. Birleştirici yapısıyla birlikte 2-1 Un-Un TLT yapısı empedans uyumlama için kullanılmıştır.

Birleştirici için araya girme kaybı, geri dönüş kaybı ve yalıtım değerleri benzetimler ile ölçülmüştür. Benzetim sonuçlarının çalışma frekans aralığında isterleri sağladığı görülmüştür.

Bu aşamaların tamamlanmasından sonra sistemlerin üretimi yapılmış ve her yapının ayrı ayrı testleri gerçekleştirilmiştir. 4 yapı da isterleri sağlamıştır. Çalışma sonucunda bu 4 yapı uygun şekilde birleştirilerek 1kW çıkış gücüne sahip bir sistem elde edilmiştir.

Bu makalede ele alınan çalışmamızda tasarımı ve üretimi yapılan güç yükselteci ile; E Sınıfı güç yükselteçlerine göre daha düşük, A Sınıfı yükselteçlere kıyasla daha yüksek bir verim elde edilmiştir.

Bu makalede ortaya konan güç yükseltecinin diğer çalışmalardan en önemli farkı elde edilen 1

kW yüksek çıkış gücü olarak belirtilebilir. Yüksek çıkış gücü olan güç yükselteçlerinde ısınma konusuna ilave önlem alınması gerekmektedir. Bu maksatla modüllerin köşelerine soğutucu plakalar için montaj delikleri eklenmesi planlanmalıdır. Bu işlemin, hava kanalları ile modülün güç akış yönü paralel olacak şekilde yapılması önemlidir. Soğutucu plakaların amacı yüzey alanını artırarak, ısının daha kolay atılmasını sağlamaktır. Bu şekilde yapılandırılan modüllerin önüne fan eklenerek ısı probleminin giderilmesi düşünülmelidir. Bu makalede detaylı olarak ortaya konan sistemin bir prototip olması ve kutulanmaması nedeniyle soğutma alt yapısı uygulanmamıştır.

Yapılan çalışma neticesinde; sistem girişte verilen 12W'lık gücü, çıkışta 1kW'lık RF gücü olarak elde edilmiştir.

Teşekkür

Bu makalede özetlenen 1 kW Güç Yükselteci projesinin tasarımı , üretimi ve testi konusunda projenin başından sonuna kadar ihtiyaç duyduğumuz yazılım, donanım ve test cihazı konusundaki tüm ihtiyaçlarımızı bize sağlayan RFTR Genel Müdürü Dr. Necip ŞAHAN ve RFTR Tasarım Direktörü Dr. Vahdettin TAŞ'a çok teşekkür ederiz. RFTR A.Ş. desteği olmadan bu projenin tamamlanması ve bu makalede yer alan çıktılara ulaşmamız mümkün olmazdı.

Yazarların Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur

Kaynaklar

- [1] Şahan N. 2007. High Power Wideband Linear RF Power Amplifier Design. Yüksek Lisans Tezi Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 1-149.
- [2] Sokal N.O. 1998. Class E High-Efficiency Power Amplifiers, from HF to Microwave, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 21-26 June, Baltimore, 1109-1112.
- [3] Raab F.H., Rupp D.J. 1994. High-efficiency single-sideband HF/VHF transmitter based upon envelope elimination and restoration, Sixth International Conference on HF Radio Systems and Techniques, 4-7 July, York, 21-25.
- [4] Yamazoe M., Haeiwa K. 2008. Hirose S. Development of a High efficiency HF power amplifier, 14th Asia-Pacific Conference on Communications, 14-16 October, Tokyo, 1-5.
- [5] Mediano A., Ortega-Gonzalez F.J. 2017. Class-E amplifiers and applications at MF, HF, and VHF, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 4-9 June, Honolulu, 1319-1322.
- [6] Seo M. 2010. Design of a 40-Watt Ultra broadband linear power amplifier using LD MOSFETs, Asia-Pacific Microwave Conference, 7-10 December, Yokohama, 414-417.
- [7] Modzelewski J. 2004. Power Gain of Class E and Class B VHF Tuned Power Amplifiers, 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 17-19 May, Warsaw, 41-44.
- [8] Ahmad A.Z., Aggrawal E., Rawat K. 2020. Design of 100 W LD MOS Based Power Amplifier for Cellular Applications, 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 27-28 February, Noida, 166-169.
- [9] Raza A, Gengler J. 2018. Design of a 70 W Wideband GaN HEMT Power Amplifier with 60% Efficiency over 100–1000 MHz Bandwidth, IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR), 17-20 January, San Diego, 72-74.

- [10] Du X., Helaoui M., You C.J., Li X., Zhao Y., Cai J., Ghannouchi F.M. 2019. Analytical design space of power amplifiers including the class-A/B/J continuum for dynamic load modulation, *IEEE Access*, 7: 71933-71942.
- [11] Shukla S.N., Pandey B., Srivastava S. 2012. New Circuit Models of Complementary Symmetry Class-AB and Class-B Push-Pull Amplifiers, 10th IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), 19-21 September, Kuala Lumpur, 538-542.
- [12] Dhar S.K., Sharma T., Zhu N., Holmes D., Darraji R., Ghannouchi F.M. 2019. Comprehensive Analysis of Input Waveform Shaping for Efficiency Enhancement in Class B Power Amplifiers, *International Microwave Symposium (IMS)*, 2-7 June, Boston, 1164-1167.
- [13] BLF188XR. 2019. <https://www.ampleon.com/products/broadcast/0-500-mhzrf-power-transistors/BLF188XR.html> (Erişim Tarihi: Kasım 15, 2019).
- [14] Theeuwen S.J.C.H., Qureshi J.H. 2012. LDMOS technology for RF power amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60 (6): 1755-1763.
- [15] Sahan N., Inal M.E., Demir S., Toker C. 2008. High-power 20-100-MHz linear and efficient power-amplifier design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56 (9): 2032-2039.
- [16] Şahin B. 2018. Yüksek Verimli ve Geniş Bantlı Güç Kuvvetlendirici Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-162.
- [17] Pozar, D.M. 2012. *Microwave Engineering*. Wiley, New Jersey.
- [18] Stability Factor K. https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Measurements/k_meas.htm (Erişim Tarihi: 25.11.2019).
- [19] Stability Factor: K. <https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Measurements/b1.htm> (Erişim Tarihi: 25.11.2019).