

# Darbeli Radar Uygulamaları İçin Yeni Bir E Sınıfı Güç Kuvvetlendiricisi Yük Devresi Tasarımı

## A Novel Class E Load Network Design For Pulsed Radar Applications

Oğuzhan Kızılbey<sup>1</sup>, Osman Palamutçuoğulları<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tübitak Bilgem

Gebze Kocaeli

oguzhan.kizilbey@tubitak.gov.tr

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi

Elektrik-Elektronik Fakültesi

opal@itu.edu.tr

### Özet

*Bu çalışmada; darbeli radar uygulamaları için kullanılacak olan bir E sınıfı yüksek verimli güç kuvvetlendiricisinin yük ve harmonik sonlandırıcı devrelerinin tasarımı ve benzetimleri yapılmıştır. Alışlagelen E sınıfı güç kuvvetlendiricisi yapısı ile yüksek frekanslarda yeterince yüksek verim elde edilememektedir. Ayrıca, harmonik frekanslarındaki işaretlerin yeterince bastırılması sağlanamamaktadır. Önerilen yük devresi modeli; 2. ve 3. harmonik frekanslarında yüksek empedans göstermekle birlikte, etkin elemanın çıkış kapasitesinin en verimli çalışma için gerekli seviyeye çekilmesi ve frekans ile değişiminin kompanze edilmesi temeline dayanmaktadır. Yapıda CREE firmasının ürünü olan CGH40006P Galyum Nitrit (GaN) transistör kullanılmıştır. AWR Microwave Office ile yapılan benzetim sonucunda 2.7-2.9 GHz bandı boyunca yaklaşık %80 savak verimi, %77 güç ekli verim ve 10 Watt (40 dBm) çıkış gücünün elde edilebileceği gösterilmiş ve gerçekleştirilen devre üzerinde yapılan ölçümler sonucunda da bu benzetimlere çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.*

### Abstract

*In this work; the simulation and realization of the load and harmonic termination networks for a high efficiency-high power PA which is used in pulsed radar applications is realized. It is not possible to get sufficiently high efficiency and the power at high frequencies by using the traditional Class-E PA structures. The proposed loading network imposes sufficiently high impedances for the second and third harmonic components. This circuit also adjusts output capacitance of the transistor to lower efficient values and compensates its variations with respect to frequency which is necessary for high output power. In this work; the CREE's GaN transistor Model: CGH40006P is used as an active element of the PA. As the result of the simulation by using AWR Microwave Office program, it is shown that approximately 80% drain efficiency (DE) and 77% power added efficiency (PAE) with output power of 10 Watts are*

*obtainable and these results are also verified with the practically realized circuit.*

### 1. Giriş

Güç kuvvetlendiricilerinden istenen en önemli özelliklerden bir tanesi, doğru akım gücünü en büyük bir verimle işaret gücüne dönüştürmektir. Yüksek frekans güç kuvvetlendiricilerinde bu özellik daha da önemlidir. Çünkü, yüksek frekanslarda çalışabilen etkin elemanlar harcayabilecekleri güç bakımından sınırlı ve pahalıdır. Dolayısıyla, en yüksek verime sahip kuvvetlendirici sınıflarının seçilmesi birçok uygulama için yeğlenir. Gerekli soğutucu yüzey alanı ve doğru akım kaynağından çekilen güç de verimin yükselmesi ile birlikte azalacaktır. Verim değerinin artırılması ile transistörün kılıf sıcaklığı düşeceğinden, elemanın bozulma olasılığı da azalacaktır. Bu nedenlerle, yüksek verimli yüksek frekans güç kuvvetlendiricileri üzerine çalışmalar halen yoğun bir şekilde sürmektedir.

N. Sokal'ın 1975 yılında önerdiği alışlagelen E sınıfı yapı, yüksek frekanslarda çalışma için uygun değildir. Verim değerlerinin frekansla birlikte düşmesi ve harmonik frekanslarındaki bileşenlerin yeterince bastırılmadığı yapılan tasarım ve benzetimler sonucunda görülmüştür [1]. Bunun üzerine, sözü edilen sorunları gidermek amacıyla özgün bir E sınıfı kuvvetlendiricisi yük yapısı önerilmiştir. Önerilen bu yapının benzetimi yapılmıştır. Gerçeklemeler Rogers firmasının yüksek frekans devre gerçeklemeleri için önerdiği, düşük kayıplı RT5880 taban malzemesi ile yapılmıştır. Kullanılan taban malzemesinin bağlı dielektrik sabiti 2.2, kalınlığı 254 µm'dir. Taban kalınlığının 254 µm seçilmesinin nedeni, kalın dielektrik taban kullanıldığında düşük karakteristik empedansa sahip hatların genişliğinin, başarımı düşürecek şekilde artmasıdır. Bu durumda tüm kuvvetlendirici devresinin başarımı düşülebilecektir ve bu sonuçtan kaçınmak için yeterince ince yani 254 µm kalınlığında taban kullanılmıştır. Etkin eleman olarak CREE firmasının geliştirdiği bir GaN transistör olan CGH40006P seçilmiştir. Bugün E sınıfı güç kuvvetlendiricilerinde kullanılmak üzere seçilebilecek en uygun yarı iletken güç transistörler, GaN

teknolojisi kullanılarak üretilen türdendir. Çizelge 1'de; GaN, Si ve GaAs güç transistörlerinin bazı ölçütler nazarında karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 1 : Güç transistörlerinin karşılaştırılması.

Transistör	Akım yoğunluğu (mA/mm)	Çıkış kapasitesi (pF/mm <sup>2</sup> )	Kırılma gerilimi (V)
Si LDMOS	400	3.3	50
GaAs HFET	300	0.185	15
GaN HEMT	600	0.14	300

GaN teknolojisi ile üretilen transistörlerin en önemli özellikleri, kırılma gerilimlerinin diğerlerine göre çok yüksek oluşu (dolayısıyla çok daha çıkış gücü sağlayabilmeleri), çıkış kapasitelerinin savak-kaynak geriliminin değişiminden etkilenmeden yaklaşık sabit kalması (0.14pF/mm<sup>2</sup>) ve çok yüksek sıcaklıklara kadar ( $\approx 350^{\circ}\text{C}$ ) çalışabilmeleridir [2]. Bu özelliklerinden ötürü bugün, bir tek transistör ile 2.8 GHz sıklığında 400 Watt çıkış gücü elde edilebilmektedir ki, Si ve GaAs yarıiletken malzeme ile üretilen transistörlere göre bu değer en az 4 kat daha yüksektir. Bu özellikleri ile GaN transistörler, yüksek güç uygulamalarında günümüzde rakipsizdir. Transistörün geçit ve savak uçları düşük kayıplı altın kaplama malzeme ile üretilmiş olup, kaynak ucu kılıfın alt kısmındadır ve bu ucun topraklanması için, transistörün bakır tabana krem lehimle yapıştırılması gerekmektedir.

## 2. Önerilen E sınıfı Güç Kuvvetlendirici İçin Yük Devresi

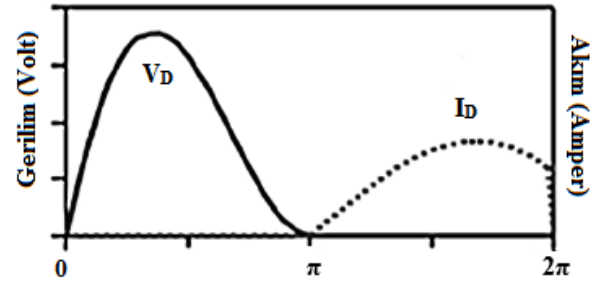
Alışlagelen E sınıfı güç kuvvetlendiricisi yapısının giriş bölümünde de sözü edilen yetersizlikleri nedeniyle, E sınıfı güç kuvvetlendiricisinin yük devresi değişik bir topoloji kullanılarak gerçekleştirilmelidir.

### 2.1. Alışlagelen E Sınıfı Güç Kuvvetlendiricisi Yük Devresi

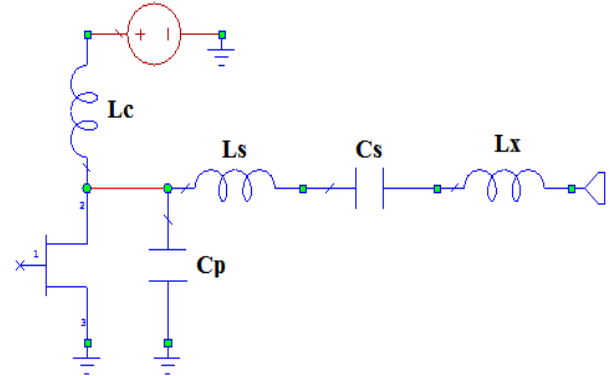
Transistörü bir anahtar gibi kullanan D sınıfı güç kuvvetlendiricileri alçak frekanslarda oldukça yüksek bir verimle çalışmaktadır. Çünkü, anahtar kapalı iken transistör doymaya sokulduğundan ve de transistörün akımı yüksek değerde olduğundan, savak-kaynak uçlarındaki gerilim çok küçüktür. Tam tersi durumda yani anahtar açık iken, savak kaynak gerilimi büyük değer aldığında transistör kesimde olduğundan, içinden geçen akım kuramsal olarak sıfırdır. Fakat, yüksek frekanslara doğru gidildikçe transistörün açma-kapama süreleri işaretin periyoduna göre ihmal edilemez duruma gelerek, akım ve gerilimin dalga şekilleri yaklaşık olarak trapez şeklini alır. Eğer yük empedansı saf gerçel ise Şekil 1'de görüldüğü gibi, akımın düşmeye başladığı anda gerilim yükselmeye başlar. Bu durumda açma kapama sırasında oldukça büyük bir akım ve gerilim aynı anda transistöre uygulanmış olur. Bu halde, verimin düşeceği açıktır. Ayrıca, akımın ve gerilimin aynı anda yüksek değerlerde bulunması transistörün yıpranmasına ve kısa süre içinde bozulmasına neden olacaktır. Bu durumda çıkış gücü ve dolayısıyla verimin düşeceği açıktır. Akım ve gerilimin

periyodik olarak azalıp çoğalması kaçınılmaz olmakla birlikte ikisinin aynı anda benzer şekilde değişmesi gerekmez. Yani, akım ve gerilimin değişimleri birbirine göre ötelenebilir. E sınıfı çalışmada savak-kaynak gerilimi en düşük değerini aldıktan sonra akım olacak şekilde transistör anahtarlanır. Bu durumda akım ve gerilimin birlikte yüksek değerde bulunduğu hiçbir an olmadığından, açılma ve kapanma süreleri uzun da olsa bu süreler içinde transistörde önemli bir güç harcanmaz. Bu bilgiler eşliğinde bir E sınıfı güç kuvvetlendirici devresinin sağlaması gereken şartlar şu şekilde sıralanabilir.

- Akım ve gerilimin düşme ve yükselmeleri aynı anda oluşmamalıdır.
- Kapanma anında savak geriliminin bütün türevleri sıfır olmalıdır [3].



Şekil 1: İdeal halde E sınıfı gerilim akım dalga şekilleri.



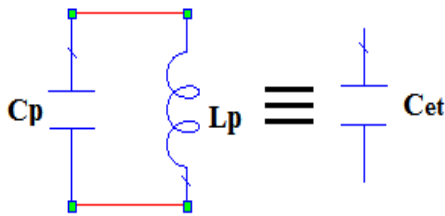
Şekil 2: Alışlagelen E sınıfı yük devresi.

Devrede akım ve gerilimin değişimini edilgen elemanlardan oluşmuş olan yük devresi belirler. Şekil 2'de alışlagelen E sınıfı yük devresi verilmiştir.  $L_C$  yüksek endüktanslı bir boğucu bobindir. Endüktansı, ilgili RF sıklığında yeterince büyük reaktans gösterecek şekilde seçilir. Bu durumda devre bir doğru akım kaynağı ile besleniyor kabul edilebilir [4].  $C_P$  ve  $L_X$  birlikte, açılma anında gerilimin gecikmesini ve parabolik olarak yükselmesini sağlar.  $C_P$ ,  $L_X$  ve  $C_S$  ile  $L_S$ 'den oluşan seri rezonans devresinin elemanlarının değerleri ve değer katsayısı uygun seçilerek istenen özelliklerin gerçekleşmesi ve yük direncinden akan akımın yaklaşık (sonlu  $Q_0$  nedeniyle) sinüs biçimli olması sağlanır. E sınıfı devrede temel frekanstaki işareti geçiren akortlu  $L_S$ - $C_S$  rezonans devresinin aynı zamanda 2. ve 3. harmoniklerdeki akımları yeterince açık devre etmesi gerekmektedir. Ancak, devrenin  $Q$  değer katsayısının yeterince büyük olmaması nedeniyle bu koşul sağlanamamaktadır.

Yüksek frekanslarda E sınıfı çalışma için gerekli olan  $C_p$  paralel kondansatörünün değeri oldukça küçüktür ( $< 1$  pF). Fakat transistör yüksek frekanslarda kullanıldığında çıkış kapasiteleri hiçbir zaman olması gereken değer kadar düşük olamamaktadır. Bu aşırı kapasitenin herhangi bir yöntem ile azaltılamaması durumunda, anahtarın tam olarak açık ve kapalı konuma alınması gerçekleştirilememektedir. Bu sorun alışlagelen yapının yüksek frekanslarda çok yüksek verimlere ulaşamamasının önemli nedenlerinden bir tanesidir [1]. Çok yüksek verimlere ulaşabilmek için bu aşırı kapasitenin giderilmesi gereklidir.

## 2.2. Önerilen Yeni E Sınıfı Yük Devresi

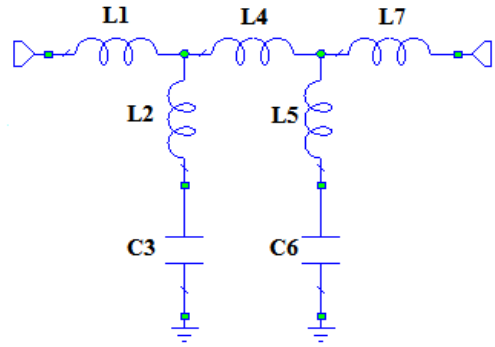
Önerilen yeni yük devresi ile transistör çıkışında bulunan aşırı kapasite RF boğucu bobin yerine  $C_p$ 'ye paralel bağlanacak uygun bir endüktans ile kapasite değeri düşürülebilir. Şekil 3'teki devrede çalışma sıklığı, devrenin rezonans sıklığından yüksek olması durumunda paralel rezonans devresi kapasitif olacaktır. Buradaki etkin kapasite denklem 1 yardımıyla gösterilmiştir.



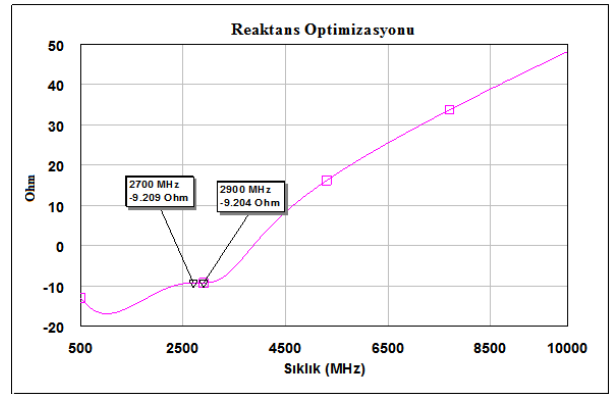
Şekil 3:  $C_p$  ve  $L_p$ 'ten oluşan paralel rezonans devresinin eşdeğer kapasitesi.

$$C_{et} = C_p \left[ 1 - \frac{1}{\omega_0^2 L_p C_p} \right] = C_p \left[ 1 - \frac{f_R^2}{f_0^2} \right] \quad (1)$$

Burada  $f_0$  çalışma sıklığı,  $f_R$  'de  $C_p$ - $L_p$  rezonans devresinin rezonans sıklığıdır. Dolayısıyla, transistöre ait  $C_p$ 'nin değeri göz önüne alınarak,  $L_p$ 'nin değeri söz konusu çalışma sıklığından istenilen kapasiteyi sağlayacak şekilde seçilebilir. İkinci önemli bir gerekçe de geniş bantlı çalışmayı sağlayabilmek için tüm harmonikler açık devre edilirken, Şekil 1'deki  $L_x$  endüktansının reaktans değerinin frekansla artmayıp yaklaşık sabit tutulmasını sağlamaktır. Bu amaçla Şekil 4'teki gibi yeni bir yük devresi önerilmiştir. Buradaki devre, eliptik alt geçiren süzgeç devresine benzemekle birlikte, buradaki  $L_2$ - $C_3$  ve  $L_5$  -  $C_6$ 'dan oluşan seri rezonans devreleri, ve  $L_1$  -  $L_4$  endüktanslarına uygun değerler verilerek, yukarıda sözü edilen iki gereksinim sağlanabilmektedir. Yapı temel olarak alt geçiren süzgeç olduğu için, 2. ve daha yüksek harmonikler büyük ölçüde açık devre edilirken, devreye seri olarak eklenmesi gereken  $L_x$  endüktansının reaktansı da istenilen bant içerisinde sabit tutulabilmektedir. Bu değişim Şekil 5'te gösterilmiştir.



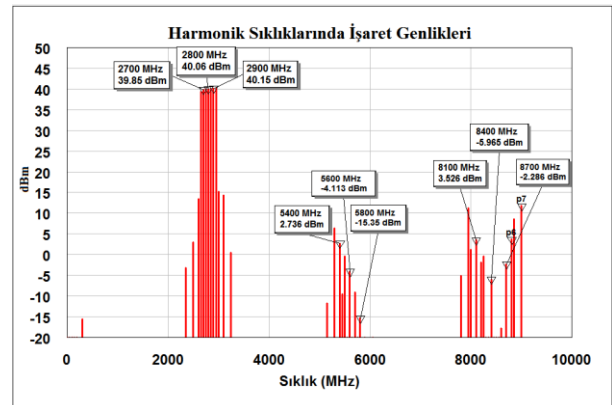
Şekil 4: Yeni E sınıfı yük devresi.



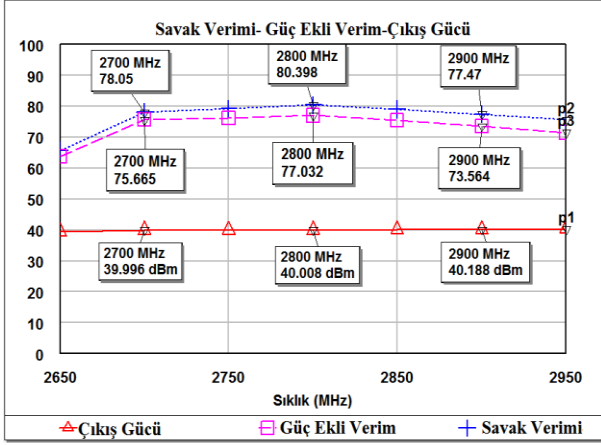
Şekil 5: Reaktans kompanyasyonu.

## 2.3. Önerilen Yapının Benzetimi

AWR Microwave Office benzetim programıyla yapılan benzetimlerde, yeni yük yapısı kullanılan devrenin çıkış gücü, harmonik frekanslarındaki bileşenlerin genliği, güç ekli verim, savak verimi 2.7-2.9 GHz bandında elde edilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7'de sözü geçen parametrelere ait benzetim sonuçları verilmiştir.

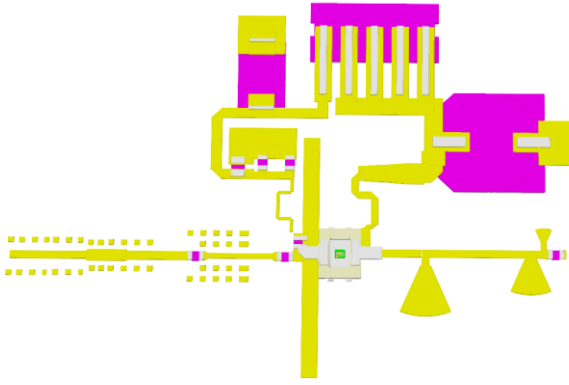


Şekil 6: Harmonik frekanslarındaki işaretlerin genlikleri.



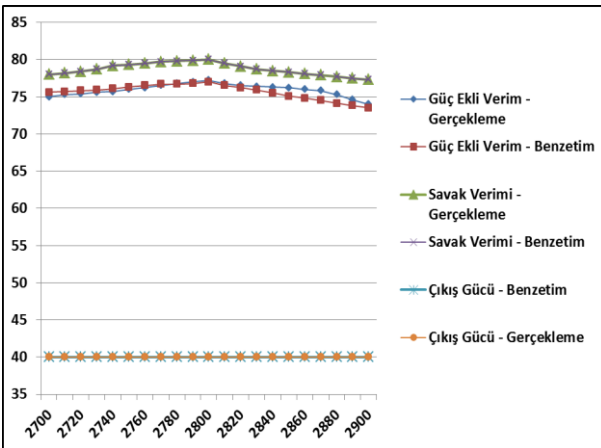
Şekil 7: Önerilen yapı ile gerçekleştirilen kuvvetlendiricinin, çıkış gücü, savak verimi ve güç ekli verim benzetim sonuçları.

Şekil 8'de benzetimi yapılan devrenin serimi gösterilmiştir. Bu serim kullanılarak kart üretilmiş olup, ölçümler Tübitak Bilgem RF laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 8: Baskılı devre çizimi.

Şekil 9'da ise ölçüm sonuçları ile, benzetim sonuçları karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, çıkış gücü, güç ekli verim ve savak verimi ölçüm ve benzetim değerleri birbirini örtüşmektedir.



Şekil 9: Ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

### 3. Sonuçlar

Alışlagelen E sınıfı yük devresi kullanılarak gerçekleştirilen E sınıfı kuvvetlendirici yapıları gerek verim açısından, gerek harmonik frekanslarında işaretlerin bastırılması açısından yetersizdir. Önerilen yeni yük devresi ile bu yetersizlikler aşılmıştır. Harmonik frekanslarında işaretler 2. harmonik sıklığı için yaklaşık 40 dB, 3. harmonik sıklığı için 45 dB bastırılmıştır. 4. ve 5. harmonik frekanslarında ise işaretlerin 60 dB'den fazla bastırıldığı gözlenmiştir. Ayrıca yapının yaklaşık savak verimi %80, güç ekli verimi ise %77 olmuştur.

### 4. Kaynaklar

- [1] Kızılbey, O., "Yüksek Verimli E Sınıfı dengeli güç Kuvvetlendiricisi Tasarımı İçin Yeni Bir Yaklaşım", 2012, İTÜ, Doktora Tezi.
- [2] Shi, K., Cortes D., Vreede L. ve Rijs F., A compact 65 Watt 1.7-2.3 GHz Class E GaN power amplifier for base stations, *IEEE European Microwave Integrated Circuits Conference*, 2011
- [3] Sokal, N.O. ve Sokal, A.O. "Class E a new class of high efficiency tuned single ended switching power amplifiers", *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 1975 10, 3, 168-176.
- [4] Kızılbey O., ve Palamutçuoğulları O., "Design of 3.3 – 3.7 GHz GaN HEMT Balanced Class E Power Amplifier" *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Aralık 1-3, 2011 Bursa, Turkey.