MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS GENİŞ BANTLI WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

RABİA HATİPZADE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

(Türkçe) Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

EŞ-DANIŞMAN

Doç. Dr. Oğuzhan KIZILBEY

İSTANBUL, 2023

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS GENİŞ BANTLI WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

RABİA HATİPZADE

(523119041)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

(Türkçe) Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

EŞ-DANIŞMAN

Doç. Dr. Oğuzhan KIZILBEY

İSTANBUL, 2023

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam boyunca beni destekleyen ve cesaretlendiren birçok kişiye teşekkür etmek istiyorum. İlk olarak tez danışmanım Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ benim yanımda olup, beni her adımda yönlendirdi ve tezime son halini verene kadar bana büyük bir sabırla rehberlik etti ve cesaretlendirdi.

Ayrıca tezimin araştırma kısmında ve verilerin analizinde büyük yardımları olan Doç. Dr. Oğuzhan KIZILBEY'in yardımlarını unutmayacağım. Önerileri, eleştirileri ve teşvikleri tez çalışmamın tamamlanmasında büyük fayda sağladı.

Bunun yanı sıra tezimin tamamlanması için gerekli olan maddi ve manevi desteği sağlayan kurumum DeltaV Uzay Teknolojileri'ne teşekkür etmek istiyorum. Bu destekler olmadan tezimdeki çalışmaları yapamazdım.

Son olarak aileme, arkadaşlarıma, beni her zaman destekleyen yöneticilerime minnettarım. Destekleri bana her zaman güç verdi.

Hepinize teşekkür ederim.

Nisan 2023 **Rabia HATİPZADE**

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... İİ

İÇİNDEKİLER ..... İİİ

ÖZET V

ABSTRACT ..... Vİİ

SEMBOLLER ..... İX

KISALTMALAR X

ŞEKİL LİSTESİ ..... Xİ

TABLO LİSTESİ ..... Xİİİ

1. GİRİŞ 1

2. WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ/BİRLEŞTİRİCİ DEVRELER HAKKINDA GENEL BİLGİLER 2

2.1 Wilkinson Güç Bölücü Analizi 7

2.1.1. Çift Mod Analizi 8

2.1.2. Tek Mod Analizi 9

2.2 Benzer Çalışmalar 12

3. WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ/BİRLEŞTİRİCİ DEVRE TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI 15

3.1 İki Yollu 2 GHz -6 GHz Wilkinson Güç Bölücü/Birleştirici Tasarım, Benzetim, Üretim ve Ölçümü 16

3.1.1. Tasarım 16

3.1.2. Benzetim 19

3.1.3. Üretim ve Ölçüm 20

3.2 Dört Yollu 2 GHz -6 GHz Wilkinson Güç Bölücü/Birleştirici Tasarım, Benzetim, Üretim ve Ölçümü 26

3.2.1. Tasarım 26

3.2.2. Benzetim 28

3.2.3. Üretim ve Ölçüm 30

3.3 İki ve Dört Yollu WGB Devreleri ile Pratik Uygulama Örneği 41

4. SONUÇ 44

KAYNAKLAR 45

ÖZET

YÜKSEK FREKANS GENİŞ BANTLI WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Radyo frekansı (RF) güç bölücü ve birleştiricileri, girişlerine uygulanan işaretleri eşit veya belirlenmiş diğer oranlarda bölmek veya bu işaretleri birleştirmek için kullanılan pasif mikrodalga devrelerdir. Bu devreler birçok elektronik sistemin içerisinde kullanılmaktadır. Bu sistemlere örnek olarak işaret karıştırma, elektronik harp, sivil ve askeri radarlar, hücresel haberleşme için kullanılan baz istasyonları, noktadan noktaya haberleşme için kullanılan radyo linkler, uydu haberleşme linkleri verilebilir. Kullanım alanı oldukça geniş olan bu yapılar, aynı zamanda test ve ölçme alanlarında kurulan düzeneklerin de bir parçasıdır.

Bu tez çalışmasında, 2 GHz -6 GHz frekans bandında çalışan, eşit genlikli, iki ve dört çıkışlı, yukarıda bahsedilen sistemlerde kullanılabilecek çok katmanlı Wilkinson güç bölücü/birleştirici devre tasarımı ele alınmıştır. Çalışmada mikroşerit hat ve ayrık yalıtım dirençleri kullanılmıştır. Devrelerin teorik tasarımı, şematik benzetimi, elektromanyetik benzetimi, üretimi ve ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca örnek bir uygulama da sunulmuştur.

Devre tasarımına başlamadan önce literatür taraması yapılarak; daha önce yapılmış ve yayınlanmış olan bildiri ve makaleler gözden geçirilerek, benzer yapılar belirlenmiştir. Daha sonra mikroşerit hatların ve toplu devre elemanlarının teorik hesaplamaları yapılmıştır. Yalıtım dirençlerinin değerleri, mikroşerit hatların genişlik ve uzunlukları, Wilkinson yapının kat sayısı gibi tasarım parametreleri hesaplamalarla belirlenmiştir.

Giriş-çıkış bağlantıları için SMA konektörler; dielektrik taban olarak ise Rogers firmasına ait RT5870 kodlu teflon tabanlı malzeme kullanılmıştır. Bu dielektrik malzeme yüksek frekans çalışmaları için oldukça uygundur ve yüksek başarım göstermektedir.

Daha sonra hesaplamalarla belirlenmiş mikroşerit hat ve direnç değerleri kullanılarak oluşturulan bu yapıların, uygun tasarım teknikleriyle benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim programlarında hem şematik benzetim hem de elektromanyetik benzetim yapılmıştır. Şematik ve elektromanyetik benzetim sonuçlarının benzer olması sağlanmıştır. Benzetimler ve optimizasyonlar sonucunda elde edilen fiziksel ölçü ve direnç değerleriyle beraber, uygun dielektrik taban üzerine gerçeklemeler yapılmıştır. Gerçeklemenin yapılabilmesi için, tasarlanan ve son hale getirilen devrenin baskılı devre

şeması çizilmiştir. Çizilen baskı devre şeması, hassas kazıma tekniği kullanılarak üretilmiştir. Üretim sonrasında elde edilen güç bölücülerin direnç ve konektör bağlantı işlemleri yapılmış ve ölçümler için hazır hale getirilmiştir. Ölçümler Vektör Network Analizör (VNA) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Giriş yansıma katsayısı, araya girme kaybı, çıkış yansıma katsayısı, çıkışlar arası yalıtım gibi değerler frekansa bağlı olarak grafikler halinde elde edilmiştir. Gerçekleştirilen devrelerden elde edilen ölçüm sonuçları ile, benzetimler sonucu elde edilen ölçüm sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür.

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH FREQUENCY WIDEBAND WILKINSON POWER DIVIDER

Radio frequency (RF) power dividers and combiners are electronic circuits used to divide or combine signals applied to their inputs in equal or other specified proportions. These circuits are used in many electronic systems such as signal jamming, electronic warfare, civil and military RADARs, base stations used for cellular communication, radio links used for point-to-point communication, satellite communication links. These structures, which have a very wide usage area, are also a part of test and measurement setups.

In this thesis; a multi-layer Wilkinson power divider/combiner circuits are designed to operate in 2 GHz -6 GHz frequency band with equal amplitude, two and four output to be used in the above-mentioned systems. Microstrip line and discrete insulation resistors were used in the study. Theoretical design, schematic and electromagnetic simulation, production and measurements of the circuits were implemented and a sample application is also presented.

Before starting the circuit design, previously published studies were reviewed and similar structures were determined. Then, microstrip lines and bulk circuit elements were theoretically defined. Design parameters such as insulation resistance values, width and length of microstrip lines, and the number of the stages of the Wilkinson structure were determined by calculations. SMA connectors for inputs and outputs connections; teflon-based material coded RT5870 belonging to Rogers company was used as the dielectric substrate. This dielectric material is very suitable for high frequency applications and shows high performance.

Then, by using the microstrip line and resistance values determined by calculations, the circuits of these structures were simulated with appropriate design techniques. In simulation programs, both schematic and electromagnetic simulation were realized. It was seen that the results of the schematic and electromagnetic simulations were matched. The physical measurements and resistance values obtained as a result of simulations and optimizations were implemented on the appropriate dielectric base. The printed circuit diagram of the designed and finalized circuit has been drawn for implementation. The drawn printed circuit diagram was produced using precision drilling technique. After

production, the resistor and connector connections of the power dividers are made. In this way, the circuits have been prepared for measurements. Measurements were made using Vector Network Analyzer (VNA) device. Values such as input reflection coefficient, insertion loss, output reflection coefficient, insulation between outputs are given in graphs depending on frequency.

SEMBOLLER

ɾ **:** Yansıma katsayısı

S **:** Saçılma Parametreleri

Ω : Ohm

V : Volt

Z : Empedans

dB : Desibel

KISALTMALAR

RF **:** Radyo Frekans

VNA **:** Vektor Network Analizör

WGB **:** Wilkinson Güç Bölücü

SMA : SubMiniatur Versiyon A Konnektörü

EM : Elektromanyetik

GHz : Gigahertz

R : Direnç

P : Güç

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Wilkinson Güç Bölücü Yapısı..... 1

Şekil 2. Wilkinson güç bölücü yapısı iletim hattı devresi [6]. 4

Şekil 3. İki Yollu Wilkinson Güç Bölücü Yapısı. Geleneksel güç bölücü yapısı(a), Çok katlı (kas kat) güç bölücü yapısı. 7

Şekil 4.Wilkinson güç bölücü devresi, (a) Mikroşerit hat yapısı, (b) iletim hattı devresi [6]. 7

Şekil 5. WGB Simetrik Form 8

Şekil 6. Çift Mod Analizi devresi 8

Şekil 7. Tek Mod Analizi devresi 10

Şekil 8. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü şematik. 17

Şekil 9. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü yapısı. 18

Şekil 10. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü şematik benzetim sonuçları. 19

Şekil 11. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü EM benzetim sonuçları..... 20

Şekil 12. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü üretimi. 21

Şekil 13. S-Parametreleri ölçüm düzeneği. 21

Şekil 14. Üç-kat iki-yollu WGB Port 1- Port 2 arası S_{11} ve S_{21} ölçüm sonuçları..... 22

Şekil 15. Üç-kat iki-yollu WGB Port 1- Port 3 arası S_{11} ve S_{31} ölçüm sonuçları..... 23

Şekil 16. Üç-kat iki-yollu WGB Port 2- Port 3 arası S_{32} ölçüm sonucu..... 23

Şekil 17. Üç-kat iki-yollu WGB S-Parametre ölçüm sonuçları..... 24

Şekil 18. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü şematik. 27

Şekil 19. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü yapısı. 28

Şekil 20. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü şematik benzetim sonuçları. 29

Şekil 21. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü EM benzetim sonuçları. 30

Şekil 22.Üç-kat dört-yollu Wilkinson Güç Bölücü üretimi..... 31

Şekil 23. Ölçüm düzeneği..... 32

Şekil 24. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 2 arası S_{11}, S_{21} ve S_{22} ölçüm sonuçları. 33

Şekil 25. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 3 arası S_{11}, S_{31} ve S_{33} ölçüm sonuçları. 34

Şekil 26. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 4 arası S_{11}, S_{21} ve S_{22} ölçüm sonuçları. 34

Şekil 27. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 5 arası S_{11}, S_{21} ve S_{22} ölçüm sonuçları.. 35

Şekil 28. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 2 ve Port 3 arası S_{32} ölçüm sonucu. 36

Şekil 29. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 2 ve Port 4 arası S_{42} ölçüm sonucu. 36

Şekil 30. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 2 ve Port 5 arası S_{52} ölçüm sonucu. 37

Şekil 31. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 3 ve Port 4 arası S_{43} ölçüm sonucu. 38

Şekil 32. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 3 ve Port 5 arası S_{53} ölçüm sonucu. 38

Şekil 33. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 4 ve Port 5 arası S_{54} ölçüm sonucu. 39

Şekil 34. Üç-kat dört-yollu WGB S-Parametre ölçüm sonuçları. 39

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Wilkinson Güç Bölücü Devresi Özellikleri. 16

Tablo 2. Üç-kat iki-yollu WGB devresinin EM benzetim ve VNA ölçüm sonuçları karşılaştırması. 24

Tablo 3. Yakın zamanda yapılmış bazı iki yollu WGB çalışmalarıyla karşılaştırma..... 25

Tablo 4. Üç-kat dört-yollu WGB devresinin EM benzetim ve VNA ölçüm sonuçları karşılaştırması. 40

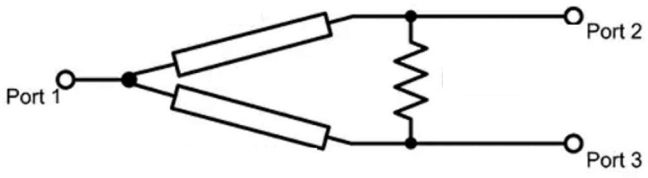
Tablo 5. Yakın zamanda yapılmış bazı dört yollu WGB çalışmalarıyla karşılaştırma. . 41

Tablo 6. Güç Ölçüm Sonuçları 43

1. GİRİŞ

Güç bölücüler veya tersi yönde kullanıldıklarında güç birleştiriciler çoğunlukla radyo teknolojisi alanında kullanılan, giriş portundan gelen sinyali iki veya daha çok çıkışa bölen pasif devrelerdir. İdeal bir güç bölücü devresi girişine gelen güç sinyalini eş genlikli ve eş fazlı olarak iki eşit sinyale böler. Güç bölücüler/birleştiriciler birçok uygulama alanına sahiptir. Yaygın olarak haberleşme alanı, güç yükselteçleri(amplifiers), mikserler ve farklı RF uygulamalarında kullanılırlar. Çoklu anten platformlarında antenlere gelen sinyalleri bölmek veya antenlerden gelen sinyalleri toplamak örnek kullanım alanlarından biri olarak gösterilebilir. Çoğunlukla iletilen ve alınan sinyalleri ayırma veya birleştirme görevleri olsa da farklı kullanım alanları da mevcuttur.

Bu tez çalışmasında yukarıda ifade edilen sistemlerde kullanılabilecek 2 GHz -6 GHz frekans bandında çalışan, özdeş genlikli 2 veya 4 çıkışa sahip, mikroşerit hat ve ayrık yalıtım dirençleri içeren, çok katlı Wilkinson yapısına sahip RF güç bölücü/birleştirici devrelerinin teorik tasarımı, şematik ve elektromanyetik benzetimi ve gerekli ölçümlerin yapılması ile sonuçların değerlendirilmesini takiben bu devrelerin üretimi hedeflenmiştir. Tasarımların karşılıklı (resiprokal), kayıpsız ve iyi izolasyon yeteneğine sahip olması amaçlanmıştır. Tipik bir iki yollu Wilkinson güç bölücü/birleştirici devresi Şekil 1' den de görüldüğü gibi giriş portu, çeyrek dalga boylu iletim hatları, izolasyon direnci ve çıkış portlarından oluşmaktadır.



Şekil 1. Wilkinson Güç Bölücü Yapısı

2. WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ/BİRLEŞTİRİCİ DEVRELER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Güç bölücülerde, bir giriş sinyali daha düşük güce sahip iki veya daha fazla çıkış sinyaline bölünürken; bir güç birleştirici ise iki veya daha fazla giriş sinyalini bir çıkış portunda birleştirir. Güç bölücüler genellikle güç sinyalini eşit bölme oranına (3 dB) sahip olsa da eşit olmayan güç bölme oranları da mümkündür ancak bu çalışmada eşit bölme durumu ele alınmıştır.

En basit RF güç bölücü türü, bir giriş ve iki çıkışa sahip üç bağlantı noktalı T- bağlantı bölücüsüdür. Kayıpsız T-bağlantı bölücüsü, tüm bağlantı noktalarında eşleşmeme dezavantajına sahiptir ve çıkış portları arası izolasyon genellikle düşük seviyededir. Bu nedenle, bir çıkış portundan gelen sinyal diğer çıkış portunu etkileyebilir. T-bağlantı bölücüsü düşük frekanslar ve düşük güç uygulamalarında idealdir. Diğer bir bölücü örneği ise dirençli güç bölücülerdir. Bu bölücü devresinde direnç kullanılarak güç bölme işlemi gerçekleştirilir. Bu tip bölücülerde devre tasarımı basittir ve maliyet düşüktür. Ancak yüksek frekans uygulamalarında istenmeyen yüksek kayıplara neden olabilir. Wilkinson güç bölücü devrelerini bu iki yapıdan ayıran özelliği yüksek frekansta düşük kayıplı ve yüksek izolasyonlu olmasıdır. Ancak tasarımı daha karmaşık ve üretimi pahalıdır.

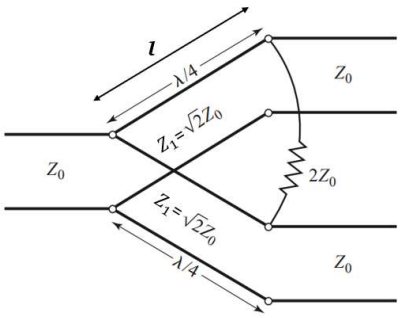
RF güç bölücü/birleştiricilerin tasarımında kullanılan iki ana topoloji, Wilkinson ve Gysel güç bölücü/birleştirici yapılarıdır. Güç bölücü/birleştirici devrelerinin tarihi, Ernest J. Wilkinson'ın 1960 tarihli makalesi ile başlar. E.J. Wilkinson bu çalışmasında gücü rastgele sayıda bağlantı noktası arasında eşit olarak bölmek için çeyrek dalga hatları ve toplu dirençler kullanan bir güç bölücü önermiştir [1]. Bu önerisinin basitliği ve sadece direnç elemanını kullanarak çıkış portlarını izole etme yeteneği, tasarımının popüler olmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, bu bileşenin ana dezavantajı, güç kullanma kabiliyetidir. İzolasyon direnci iletim hatları arasına yerleştirildiğinden, üretilen ısı devreden toprak düzlemine etkin bir şekilde dağıtılamaz [1]. Bu nedenle, yüksek güçte çalışma potansiyeli, topraklanmamış direnç tarafından ciddi şekilde sınırlanır. Ancak Ulrich H. Gysel 1975'teki güç bölücü tasarımıyla, çeyrek dalga boylu çıkış portlarını ayrı izolasyon dirençleriyle sonlandırarak Wilkinson'un güç işleme kapasitesini geliştirmek için bir çözüm sağlamıştır [2]. Tasarımda bu tür bir özgürlük özellikle daha yüksek güç

kullanımı gerektiren uygulamalar için yararlıdır. Gysel güç bölücü devresinin belirtilen bu önemli üstünlüğüne rağmen, ana dezavantajı Wilkinson güç bölücü/ birleştiricisine kıyasla nispeten daha dar bant genişliğine sahip olmasıdır [2,13]. Dolayısıyla güç bölücü devrelerinin ortaya çıkışından günümüze kadar olan gelişimi genellikle güç tutma kapasitesini arttırma ve geniş bant ihtiyacını gidermeye yönelik özellikler üzerine olmuştur. Tasarımda bu tür bir özgürlük özellikle daha yüksek güç kullanımı gerektiren uygulamalar için yararlıdır.

Wilkinson güç bölücü, buluşundan bu yana uzun yıllar mikrodalga devrelerinin ve sistemlerinin bir parçası olarak düşünülse de aşağıdaki dezavantajları göz ardı edilmemelidir:

- Devre, çeyrek dalga boyundaki kollarından dolayı yer kaplar.
- Çıkış portları tek dirençle sağlandığından, iletim hatları arasındaki kuplajı önlemek zordur.
- Tek bir direncin sağladığı ayırma, çıkış portları arasındaki fiziksel mesafeyi ve izolasyonu korumak için yeterli değildir.
- Bölücünün çeyrek dalga uzunluğundaki kolları, operasyonel bant genişliğini sınırlar.
- İzolasyon direncinin değerindeki değişimler devre performansı düşürür.
- Dirençleri köprülemek için hatların birbirine yaklaşması gerektiğinden, iletim hatları arasında yeterli boşluk bulunan güç bölücünün üç yollu versiyonu için bir düzen oluşturmak zordur [3].

Wilkinson güç bölücü/birleştirici yapılarının hat empedansları ve direnç değerleri Şekil 2'deki yapı üzerinde gösterilmiştir. Bu değerlerin matematiksel hesaplamaları çift ve tek mod analizleri ile aşağıda verilen (2.1)- (2.3) arası denklemler kullanılarak yapılır. Ayrıca hesaplamaları yapan hazır Excel tabloları da kullanılabilir.



Şekil 2. Wilkinson güç bölücü yapısı iletim hattı devresi [6].

$$Z_1 = \sqrt{2}Z_0 \tag{2.1}$$

$$l = \lambda/4 \tag{2.2}$$

$$R = 2Z_0 \tag{2.3}$$

Wilkinson güç bölücü/birleştirici genel olarak üç portu da aynı empedans değeri Z_0'a sahip olacak şekilde tasarlanır.

Burada;

Z_0, giriş veya çıkış portlarının karakteristik empedansı, genellikle 50 Ω alınır.

l, çeyrek dalga boylu iletim hattı uzunluğu,

Z_1, iletim hattı empedansı,

λ, dalga boyu,

R, izolasyon direncidir.

RF ve mikrodalga güç bölücü ve birleştiricilerinin performans göstergeleri, bant genişliği, güç bölme, faz dengesi, genlik dengesi, ekleme kaybı, uyumluluk, geriye dönüş kaybı, yalıtım ve güç sığası gibi parametrelerdir [4].

Bant genişliği, istenen özelliğin sağlandığı frekans aralığıdır. Güç bölücü devrelerinin tasarım ve uygulamalarında dikkat edilmesi gereken önemli bir performans göstergesidir. Devrenin bant genişliğini arttırmak için devre elemanlarının seçimi, devre tasarımı ve bileşenlerin yerleşimi gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

Güç bölme, güç bölücü devrelerinin en önemli performans göstergelerinden biridir. Giriş gücünün eşit veya dengeli bir şekilde iki veya daha fazla çıkışa bölünmesini ifade eder. Devrelerinin başarılı bir şekilde tasarlanması ve uygulanması için önemli bir performans göstergesidir. Güç bölme oranının eşit veya dengeli olması, devrenin verimliliğini ve

regülasyonunu arttırır ve böylece yükler arasında güç dağılımının dengelenmesine yardımcı olur.

Faz dengesi, güç bölücü çıkışlarının arasındaki faz farkını anlatır ve bu fark sıfır, doksan veya yüz seksen derece olabilir. Eşit güç bölücü devrelerindeki faz dengesi, devrenin farklı çıkışları arasındaki faz farklarının mümkün olduğunca az olmasıdır. Bu her çıkışa eşit miktarda güç aktarımını sağlar. Faz dengesi her bir çıkışın aynı miktarda güç alması gerektiği durumlarda önemlidir. Özellikle anten dizileri veya mikrodalga cihazlarda sinyallerin kesintisiz ve doğru iletilmesi için gereklidir. Faz dengesi kaybı ne kadar düşük olursa o kadar az güç kaybı olur ve devrenin verimi artar.

Genlik dengesi, güç bölücü devrelerin farklı çıkış sinyallerin genliğinin mümkün olduğunca birbirine eşit olmasıdır. Bu her bir çıkışa eşit miktarda güç aktarılmasını sağlar. Genlik dengesi kaybı ne kadar düşük olursa o kadar az güç kaybı olur ve devrenin verimi artar.

Ekleme kaybı, güç bölücü devrelerinin performansını etkileyen önemli bir parametredir. Devrenin girişine uygulanan gücün çıkışlardaki güç seviyeleriyle ilişkisi üzerine doğrudan etkiye sahiptir. Ekleme kaybı genellikle dB ile ifade edilir. İletkenlerdeki kayıp, dielektrik kayıp, yalıtım kaybı gibi sistem kayıplarının toplamını ifade eder. Devrenin çalıştığı frekans aralığı boyunca mümkün olduğunca sabit kalması, güç bölücü devrenin doğru bir şekilde çalışması için önemlidir.

Uyumluluk (matching), devrenin giriş ve çıkışları arasındaki adaptasyonu ifade eder. Güç bölücü devrelerinin uyumluluğu giriş ve çıkı empedanslarıyla belirlenir. İyi bir uyumluluk giriş empedansının, çıkış empedanslarının sinyallerin aktarıldığı frekans boyunca mümkün olduğunca sabit kalmasını gerektirir. Bu sinyalin doğru bir şekilde bölünmesini sağlarken aynı zamanda sinyalin bozulmasını da önler. Uyumluluk bölünen sinyalin frekans bandı boyunca sabit kalırsa bölücü devre daha geniş bir frekans aralığında çalışabilir. Bu nedenle uyumluluk güç bölücü devrelerinde performansı, tasarımı ve uygulanması sırasında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

Güç bölücü devrelerinin önemli bir performans göstergesi de geriye dönüş kaybıdır. Geriye dönüş kaybı devrenin girişinden çıkışına doğru giden bir sinyalin, çıkıştan girişe doğru geri yansıması ve bu yansımanın oranıdır. Bölücü devrelerinin performansının ölçülmesi için kullanılan bir ölçüttür. İdeal bir bölücü devre girişine uygulanan sinyalin tamamını çıkışlara bölerek aktarmalıdır. Ancak gerçekte devre elemanlarında

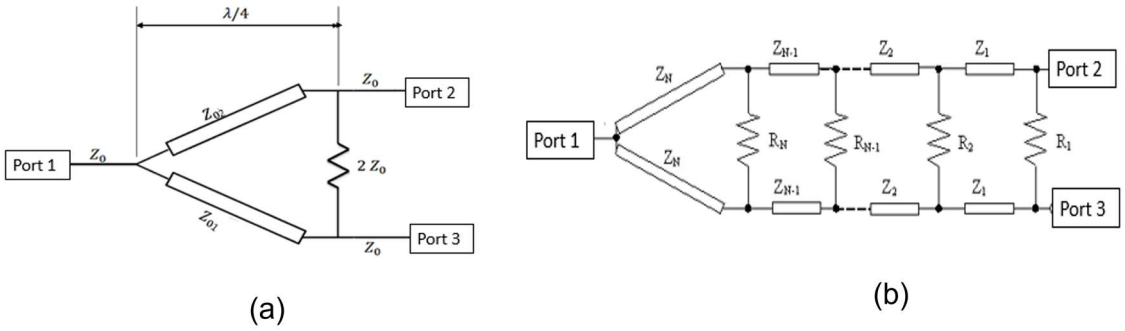
kaynaklanan yansımalar, sinyalin bir kısmının geriye yansımasına neden olur. Geriye dönüş kaybının ölçüsü, bir devrenin geriye dönüş kaybı seviyesini ifade eder ve dB cinsinden ifade edilir. 0 dB'den daha düşük olmalıdır, ideal olarak -20 dB veya daha fazla olmalıdır. Bu yansıyan sinyalin giriş sinyalinin yüzde biri veya daha azı seviyesinde olacağı anlamına gelir.

Yalıtım, bölücü devrelerinin giriş ve çıkışları arasındaki izolasyon seviyesini ifade eder. dB cinsinden ifade edilir. Yüksek frekanslı devrelerde özellikle önemlidir. İdeal bir güç bölücü devresinde her çıkış portu birbirinden tamamen izole edilmiş olması gerekir. Bu herhangi bir çıkışta üretilen sinyallerin diğer çıkışları etkilemeyeceği anlamına gelir. Ancak gerçekte yalıtım seviyesi devrenin tasarım, bileşenlerin kalitesi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Özellikle RF uygulamalarında ve veri iletiminde önemlidir.

İyi bir güç bölücü/birleştirici devresinin, çıkışları arasında yüksek yalıtıma, olması gereken ekleme kaybına yakın bir kayıp değerine ve yüksek uyumluluğa sahip olması gerekir [4].

Yüksek güç kapasitesinin iyileştirilmesi, daha iyi yalıtkanlık, daha geniş çalışma bandı ve devrenin daha küçük boyutlara indirgenmesi gibi tasarım parametreleri güç bölücü devrelerinin gelişiminin günümüze kadar devam ederek gelmesini sağlamıştır. Gelecekte de aynı parametreler üzerinden güç bölücü/birleştirici yapılarının gelişimlerine devam edeceğini tahmin etmek zor değildir.

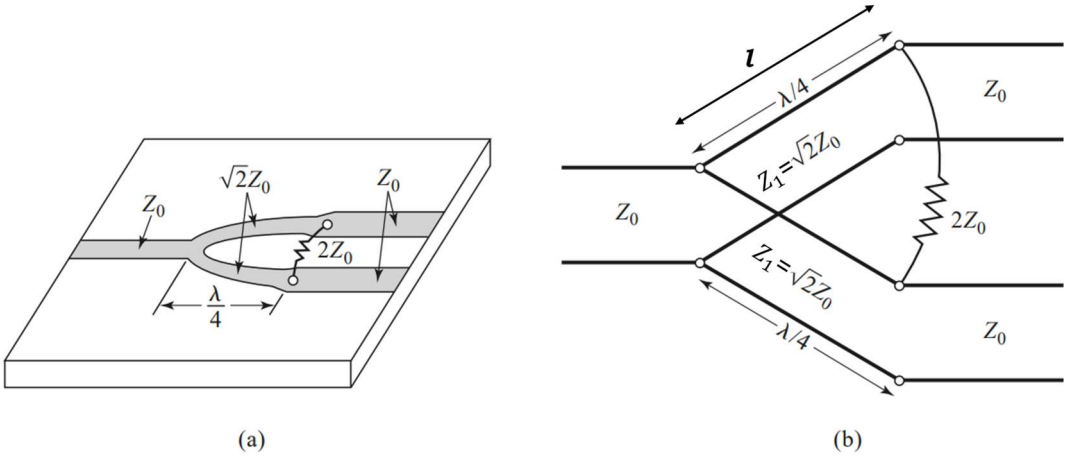
Çalışma bandını genişletmek için önerilen yöntem çok katlı yani kaskat tasarımlardır [5]. Kaskat tasarımlar yapının arka arkaya eklenmesiyle oluşur. Şekil 3 (a)'da tipik bir Wilkinson güç bölücü/birleştirici devresi görülmektedir. Bu yapının bandını genişletmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Bandı genişletmek için önerilen modellerden bir tanesi de kaskat modeldir. Kaskat yani çok katlı Wilkinson güç bölücü/birleştirici devresinin yapısı ise Şekil 3 (b)' deki gibidir. Kaskat tasarımlar Wilkinson güç bölücü modelleri için bandı genişletmesi açısından verimlidir.



Şekil 3. İki Yollu Wilkinson Güç Bölücü Yapısı. (a)Geleneksel güç bölücü yapısı, (b) Çok katlı (kaskat) güç bölücü yapısı

2.1 Wilkinson Güç Bölücü Analizi

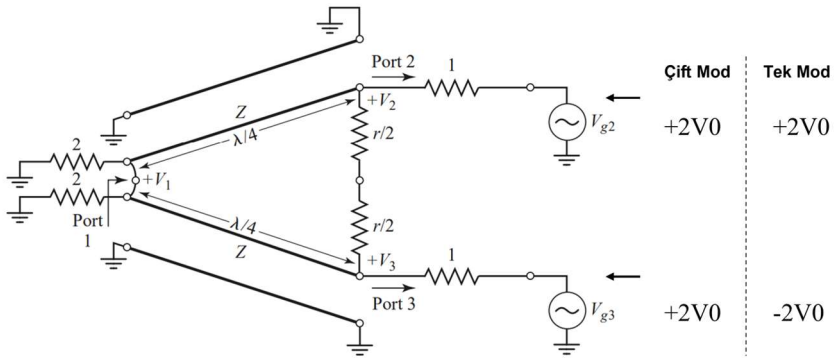
Wilkinson güç bölücü, Şekil 4 (a)'da gösterildiği gibi genellikle mikroşerit hat yöntemi kullanılarak tasarlanır. Mikroşerit hatta karşılık gelen iletim hattı devresi ise Şekil 4 (b)'deki gibidir.



Şekil 4.Wilkinson güç bölücü devresi, (a) Mikroşerit hat yapısı, (b) iletim hattı devresi [6].

Devrenin çıkış portları simetrik ve asimetrik kaynaklar tarafından beslenen daha basit iki devreye indirgenerek analiz edilir. Bu analiz yönteminin adı 'tek-çift' mod analizidir.

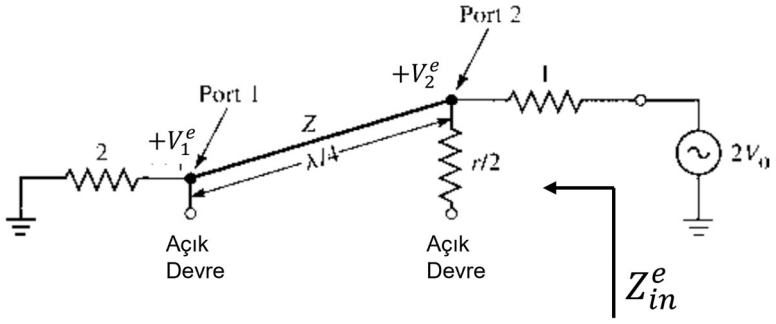
Basitleştirmek için tüm empedansları Z_0 karakteristik empedansına göre normalleştirirsek Şekil 5'te gösterildiği gibi çıkış bağlantı noktalarındaki gerilim kaynakları ile yeniden çizebiliriz. Port 1'deki empedans ikiye bölündüğünden yarım devrelerdeki empedansların iki katına çıktığı unutulmamalıdır.



Şekil 5. WGB Simetrik Form

2.1.1. Çift Mod Analizi

Çift mod analizinde V_{g2}= V_{g3} =2V$_0$ gerilimi ile beslenir. Port 2 ve Port 3 ün empedans değerleri eşit olduğunda r/2 direncinin üzerinden akım akmaz. Bu durumda Şekil 5'teki gibi eşit ve simetrik iki yarım devre oluşur ve analiz edilebilir hale gelir. Simetri düzleminden akım akmayacağı için açık devre olarak tanımlanabilir. Şekil 6'da Port 2 bağlantı noktasından bakıldığında Z_{in} empedansı görünür.



Şekil 6. Çift Mod Analizi devresi

Çeyrek dalga boyu iletim hattı empedansı Denklem 2.1.1'deki gibi olduğundan Z_{in} Denklem 2.1.2'deki gibi hesaplanır.

$$Z_0 = \sqrt{Z_L Z_{in}} \tag{2.1.1}$$

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \tag{2.1.2}$$

Empedans uyumluluğu için $Z_{in} = 1$ olması gerektiğinden;

$$Z_{in} = \frac{Z^2}{2} = 1 \tag{2.1.3}$$

$$Z = \sqrt{2} \tag{2.1.4}$$

İletim hattının empedansı ise Denklem 2.1.4'teki gibi olur. Böylece Denklem 2.1 türetilmiş olur.

Port 1 ve Port 2 noktalarındaki gerilimler aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır [6].

$$V(x) = V^+\left(e^{-j\beta x} + \Gamma\, e^{j\beta x}\right) \tag{2.1.5}$$

$$V_2^e = V(-\frac{\lambda}{4}) = jV^+(1-\Gamma) \tag{2.1.6}$$

$$V_1^e = V(0) = V^+(1+\Gamma) = jV_0\frac{\Gamma+1}{\Gamma-1} \tag{2.1.7}$$

Yansıma katsayısı(Γ), normalleştirilmiş değer 2'nin direncine bakan Port 1 bağlantı noktasında görülen katsayıdır. Yani yansıma katsayısı Denklem 2.1.8'daki gibidir [6].

$$\Gamma = \frac{2-\sqrt{2}}{2+\sqrt{2}} \tag{2.1.8}$$

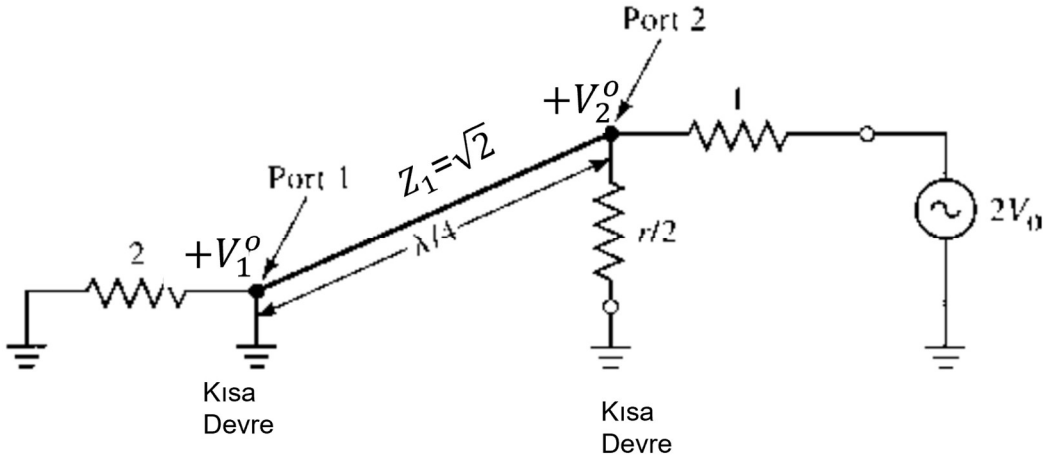
Bu veriler doğrultusunda Port 1'deki gerilim değeri aşağıdaki gibi olur.

$$V_1^e = -j\,V_0\sqrt{2} \tag{2.1.9}$$

2.1.2. Tek Mod Analizi

Tek mod uyarma analizi için, Şekil 5'teki devrenin V_{g2} ve V_{g3} numaralı bağlantı noktalarına uygulanan iki sinyal aynı büyüklüğe sahip ancak zıt fazlardadır; Şekil 5'te gösterilen devrenin ortasında voltaj farkı oluşmaz. Bu nedenle, bu devre Şekil 7'de gösterildiği gibi orta düzlem topraklanarak ikiye bölünmüştür. V_1^o noktası kısa devre olduğu için bu noktaya gelen akım empedansın olmadığı hattı takip eder. İletim hattının empedansı Denklem 2.1.4'te $\sqrt{2}$ olarak hesaplanmıştı. Bu durumda Port 1 tarafından iletim hattı empedans hesabı yapıldığında burada sonsuz bir empedans hesaplanır. Böylece Port 2 noktasından Port 1 noktasına doğru herhangi bir akım akmaz, Port 2

noktasına gelen akım sadece r/2 hattı üzerinden akar. r/2 hattının 1 olarak hesaplandığı göz önüne alındığında, Port 1 noktasının gerilim değeri $V_1^o = 0$, Port 2 noktasının gerilim değeri ise $V_2^o = \mathrm{V}_0$ olur.



Şekil 7. Tek Mod Analizi devresi

Çift ve tek mod analizleri sonucu Port 1 tarafından Şekil 5'teki devrenin karakteristik empedansı hesaplanabilir.

$$Z_{in} = \frac{1}{2}\ Z^2 \qquad (2.1.10)$$

Denklem 2.1.4'ün sonucu, Denklem 2.1.10'da yerine yazılırsa $Z_{in} = 1$ olarak hesaplanır. Böylece kayıpsız bir iletim hattı oluşturulmuş olur.

Çift-tek mod analizleri aracılığıyla Wilkinson güç bölücü devresinin Saçılma parametreleri(S) matrisi oluşturulabilir.

Port 1 noktasında Z_0=Z_{in}=1 olduğundan;

$$\mathrm{S}_{11} = 0$$

Çift ve tek mod analizlerinde Port 2 ve Port 3 eşleştiğinden;

$$\mathrm{S}_{22} = \mathrm{S}_{33} = 0$$

Çift ve tek mod analizlerinde Port 1 ve Port 2'nin gerilim değerleri hesaplanmıştı. Port 1'deki toplam gerilimin Port 2'deki toplam gerilime oranı karşılılık (resiprokal) özelliğinden dolayı aşağıdaki gibi olur.

$$\mathrm{S}_{12} = \mathrm{S}_{21} = \frac{V_1^e + V_1^o}{V_2^e + V_2^o} = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

Port 3 ve Port 2'nin simetriklik özelliğinden dolayı;

$$S_{13} = S_{31} = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

Port 2 ve Port 3 ün yapıyı ikiye bölmede kısa veya açık devre olmasından dolayı;

$$S_{23} = S_{32} = 0$$

değerlerini alırlar. Böylelikle Wilkinson güç bölücü devresi için saçılma parametrelerinin matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-j}{\sqrt{2}} & \frac{-j}{\sqrt{2}} \\ \frac{-j}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{-j}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 Benzer Çalışmalar

Çalışmanın yenilikçi yönü geniş bant uygulamaları için kullanılabilecek olmasıdır. Bunu sağlayabilmek için kaskat tasarım yöntemi kullanılmıştır. Kaskat tasarım, aynı yapının arka arkaya eklenmesi ile kat sayısını arttırmaktır. Ancak bu tasarım yöntemi yapının boyut olarak büyümesine neden olur. Büyük boyutlar yüksek frekans uygulamalarında istenmeyen bir etkidir. Literatürde bu sorunu çözmek için kullanılan açık yöntem uygulamaları vardır. Örneğin Gysel yapılarında tasarımlar iç taraftaki boşluklara doğru yapılabilir.

Güncel literatürde yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibidir. Bu çalışmaların bazıları ulusal tez merkezi (https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/) sitesinden alınmıştır.

Deutschmann ve arkadaşları 2 ila 40 GHz frekans aralığı için ultra geniş bantlı kompakt güç bölücülerin geliştirilmesi için çalışmıştır. Çalışmalarında oldukça büyük bant genişliğini minimum boyutta elde etmek için ardışık bölümlerin azaltılmış hat uzunluklarına sahip çok katlı bir yaklaşım kullanmışlardır [7]. Çalışmanın bant genişliği oldukça büyüktür. Dolayısıyla çalışmalarımıza yol gösterir niteliktedir.

Tiku Yu yaptığı geniş bant çalışmasında parçalı yapıya dayalı bir topoloji önermektedir. Bu yapıda parçalı ve topraklanmış kapasitörler ve seri dirençler kullanılmıştır [8].

Kasar ve arkadaşları Chebishev empedans eşleştirme tekniğini kullanarak çok katmanlı, mikro şerit Wilkinson güç bölücü devresi çalışmışlardır. 1 GHz merkez frekansında yapılan bu çalışmada tek kat ve 4 katmanlı tasarımların bant genişliği üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır [9].

Emre Elibol 2013 yılında ‘Güvenlik Maksatlı Doppler Radar Vericisi İçin Güç Bölücü, Güç Yükselteci, Güç Toplayıcı Devre Tasarımı, Üretimi ve Analizi’ isimli yüksek lisans tezinde, bir güç yükselteci için bölücü tasarımı yapmıştır. Çalışma frekansı 1,26 GHz olarak belirlenmiş ve tasarımlar bu frekansta yapılmıştır [10]. Bu tezde, Elibol’un tez çalışmasından farklı olarak daha yüksek frekanslarda ve geniş bantta çalışılmıştır. Merkez frekansı 4 GHz ve bant genişliği 2 GHz-6 GHz olan iki yollu ve dört yollu bölücü/birleştirici yapılarının çalışılması hedeflenmiştir.

Vahdettin Taş 2015 yılındaki ‘Yeni Saçılma Parametresi İlişkilerini Kullanarak Performansı Geliştirilmiş Güç Bölücüler ve Yönlü Bağlaçlar Tasarlamak İçin Yeni Teknikler’ adlı doktora tez çalışmasında güç bölücü tasarımlarının optimizasyonunda kullanılmak üzere saçılma parametre ilişkilerini incelemiş, yeni hesaplama metotları geliştirmiştir. Geliştirilen denklemlerden bir tanesini sisteme uygulayarak optimizasyon sağlamıştır [11]. Bu tez çalışmasında yeni bir hesaplama yöntemi bulma gibi bir amaç güdülmediğinden mevcut hesaplama yöntemleri kullanılmıştır.

Dilara Oğuz 2016 yılında ‘Geniş Bantlı Değiştirilmiş Gysel Güç Bölücü’ isimli yüksek lisan tezinde geniş bant Gysel güç bölücü tasarımı yapmış, yaptığı bu çalışmada bandı genişletmek için LC filtre tasarımı kullanmıştır [12]. Oğuz’un tez çalışmasından farklı olarak bu tez çalışmasında bölücü/birleştirici yapısının bandını genişletmek için filtre tasarımı düşünülmüştür. Bunun yerine kat sayısı arttırılarak yani kaskat tasarım yöntemini kullanarak bant genişletilmeye çalışılmıştır.

Batuhan Sütbaş 2019 yılında “Milimetre-Dalga Uygulamaları İçin Geliştirilmiş Wilkinson Güç Bölücü Yapıları” İsimli yüksek lisans tezinde merkez frekansı 30 GHz olan üç yollu bir Wilkinson güç bölücü/birleştirici çalışmıştır [3]. B. Sütbaş’ın çalışmasından farklı olarak bu tez çalışmasında iki ve dört yollu bir Wilkinson güç bölücü/birleştirici tasarımı hedeflenmiştir.

Li ve arkadaşları 2022 yılında yaptıkları çalışmalarında geniş bantlı iki yollu bir Wilkinson güç bölücü devresi çalışmışlardır. Bandı arttırmak için kaskat tasarım yöntemini kullanmaları bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Ancak çalışmaları, katların geometrik yapısı ve bant genişliği ile bu çalışmadan farklılık göstermektedir [17].

Chen ve arkadaşları 2022 yılında yaptıkları çalışmalarında iki farklı bantta çalışabilen sekiz yollu bir Wilkinson güç bölücü devresi üzerinde durmuşlardır. Sekiz yollu bir bölücü elde etmek için temel yapıyı art arda üç kez kullanarak iletim hattını oluşturmuşlardır [18]. Chen ve arkadaşlarının çalışmalarının çıkış port sayısını arttırmada kullandıkları teknik ile bu tezde kullanılan çıkış portu sayısını arttırma tekniği benzerlik göstermektedir. Ancak bant genişliği bu çalışmaya oranla daha dardır.

Hem ulusal hem de uluslararası literatürde yer alan bazı tez ve makale çalışmaları yukarıda sıralanmıştır. Bu çalışmalara konu olan bölücü/birleştirici devreleri genellikle düşük frekanslarda ve nispeten daha dar bantlarda tasarlanmıştır. Bu tez çalışmasının

yukarıdaki çalışmalardan en önemli farkı daha yüksek frekans ve daha geniş banda sahip olmasıdır. Bandı genişletmek için kaskat tasarım yönteminin kullanılacak olması ise diğer bir farklılıktır.

3. WILKINSON GÜÇ BÖLÜCÜ/BİRLEŞTİRİCİ DEVRE TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, eşit olarak iki ve dört kola bölünmüş geniş bantlı Wilkinson Güç Bölücü devre tasarımı, benzetimi ve üretim çalışmaları sunulmuştur.

Bölücü/birleştirici yapısının girişe gelen gücü çıkış portlarına eşit dağıtması, çıkış portları arasında yüksek izolasyon sağlaması, karşılıklı ve geniş bantlı olması hedeflenmiştir. Merkez frekansı 4 GHz, bant genişliği 2 GHz -6 GHz olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bant genişliğini yüzdesel olarak ifade etmek gerekirse, merkez frekansın 4 GHz olması ve bant genişliğinin de 4 GHz olması, %100 oransal bant genişliği değerini vermektedir. Bu oransal bant genişliğine sahip Wilkinson güç bölücü yapılarında en az üç katlı yapı tasarlamak gerekir [19]. Daha az sayıda kat kullanıldığında özellikle bandın yüksek frekans kısımlarında iletim kayıplarıyla karşılaşılabilmektedir. Mikroşerit hat genişlik/kalınlık değerleri ve dirençlerin değerleri [14,19] nolu referanslarda belirtilen yöntemlerle hesaplanmıştır.

Tasarımda mikroşerit iletim hattı yapısı kullanılmıştır. Mikroşerit iletim hattı yapısı, iletken bir tabaka, dielektrik bir malzeme ve bir yüzeyden oluşan yapıdır. İletken tabaka genellikle bakır veya altın gibi malzemelerden yapılır. Dielektrik malzeme genellikle cam elyaf, seramik veya teflon gibi malzemelerden seçilir. Yapının üzerindeki yüzey ise genellikle hava veya başka bir dielektrik malzemeyle temas halinde olan üst yüzeydir. Bu yüzey elektromanyetik dalgaların iletim hattında ilerlemesi sırasında sinyallerin yayılmasına izin verir. Bu elektromanyetik dalgalar genişlik ve kalınlık ölçüleri tarafından belirlenen belirli bir modda ilerlerler. Bu modlar iletim hattın karakteristik empedansına bağlıdır ve iletken tabakanın genişlik, kalınlık ve uzunluğu ile belirlenir. Mikroşerit iletim hatları yüksek frekanslı devrelerde yüksek performans gerektiren uygulamalar için kullanılır. Bu tür hatların en önemli avantajları düşük kayıp yüksek güç taşıma kapasitesi ve iyi karakteristik empedans tutarlılığı ve bütünleşmiş devrelere kolayca entegre edilebilmesidir [6,16].

Tasarımda karakteristik empedansı $2Z0$ olan $\lambda/4$ çeyrek iletim hatları kullanılmıştır. Karakteristik empedans ve iletim hattı analizleri önceki bölümde anlatılmıştır. Bölücü/birleştirici yapıları AWR Mikrodalga Ofis programı aracılığıyla tasarlanmış ve

benzetimleri yine aynı program aracılığıyla yapılmıştır. Substrat olarak dielektrik sabiti 2.33, dielektrik kalınlığı 79 μm, bakır kalınlığı 35 μm olan RT5870 malzemesi kullanılmıştır. İzolasyon dirençleri Vishay markasının yüksek güç uygulamalarına dayanımlı RCP serisinin 0805 kılıfı seçilmiştir. Direnç kılıfı seçilirken katlar arası mesafe dikkate alınmıştır. Bu serideki dirençler ek bir soğutucu yapısına ihtiyaç duymadan 1.5 Watt'lık güç kapasitesine sahiptir. İstenen bant genişliğini sağlayabilmek için 3 katlı kaskat yapı kullanılmıştır.

Tasarlanan Wilkinson güç bölücü devresinin Tablo 1'deki özellikleri sağlamasına dikkat edilmiştir.

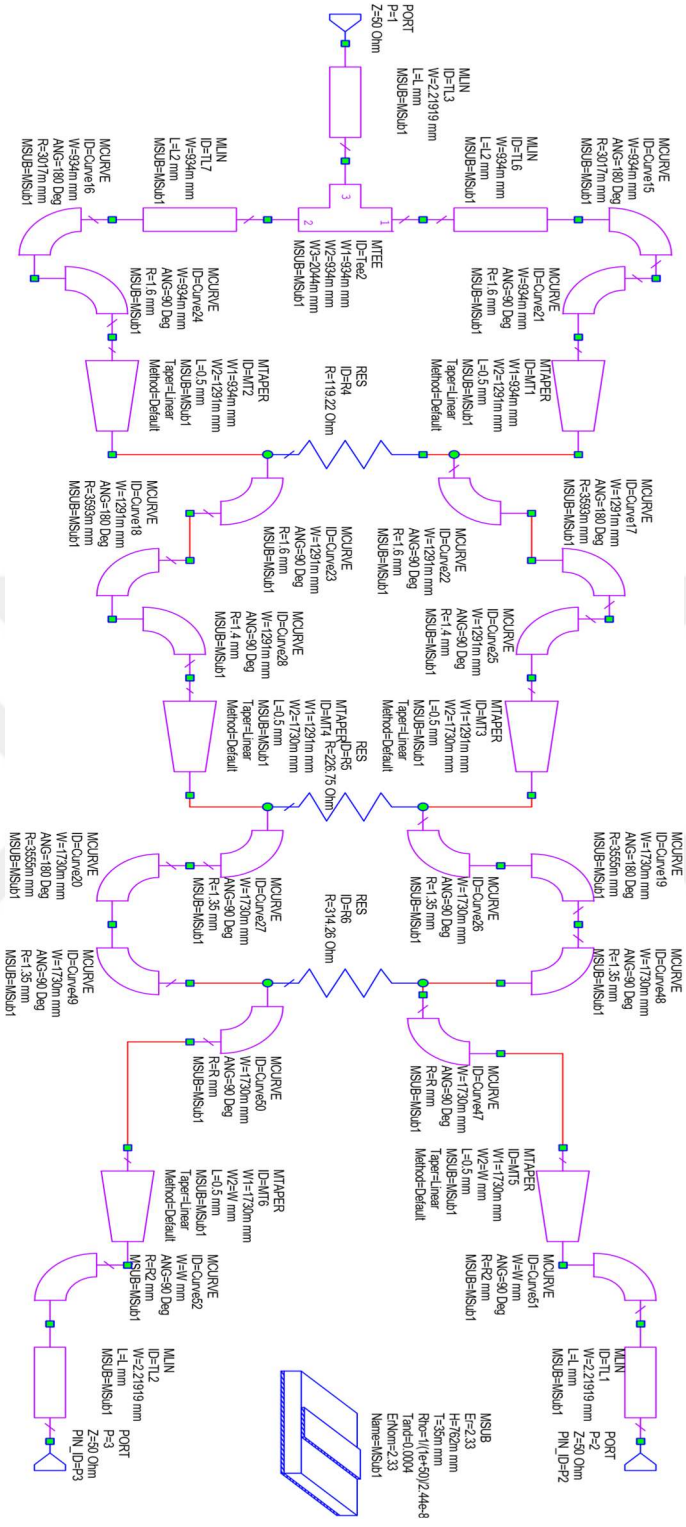
Tablo 1. Tasarlanan Wilkinson Güç Bölücü Devresine ait Özellikler

Resiprokal	$S_{ab}=S_{ba}$	$S_{12}=S_{21}$	ve	$S_{23}=S_{32}$
Uyumlu (eşleşmiş)	$S_{11}=0$	$S_{22}=0$		$S_{33}=0$
Çıkış Terminalleri Arası İzolasyon	$S_{23}=0$	$S_{32}=0$		

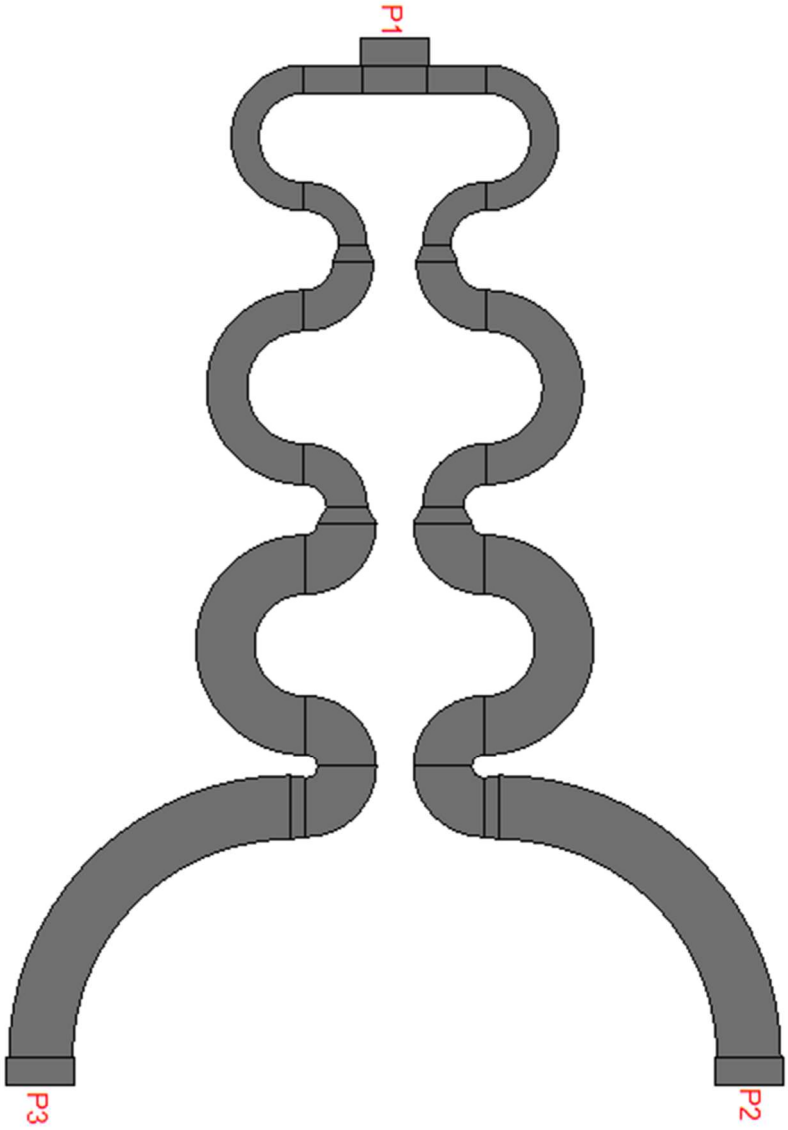
3.1 İki Yollu 2 GHz -6 GHz Wilkinson Güç Bölücü/Birleştirici Tasarım, Benzetim, Üretim ve Ölçümü

3.1.1. Tasarım

Üç-katlı iki yollu Wilkinson güç bölücü/birleştirici devresinin şematik tasarımı Şekil 8'deki gibidir. Fiziksel büyüklükler ilk önce empedans ve elektriksel uzunluk olarak [14, 19]'de verilen yöntemle hesaplanmıştır. Tüm iletim hatlarında elektriksel uzunluk olarak $\frac{\lambda}{4}$ çeyrek dalga boyu kullanılmıştır. Wilkinson güç bölücü devresinin önce Şekil 8' de görüldüğü gibi şematik yapısı hazırlanmıştır. Şematik yapı AWR Mikrodalga Ofis programı aracılığıyla hazırlanmıştır. Gerçek sonuçlara yaklaşabilmek için dirençlerin iki kapılı S parametre değerleri sisteme eklenerek ideal direnç kullanımından kaçılmıştır. Şekil 8'de şematik tasarımı gösterilen devrenin yapısı Şekil 9'daki gibi olmuştur. Kullanılan dirençlerin boyut bilgisi göz önüne alınarak kollar arası mesafeler ayarlanmıştır.



Şekil 8. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü şematik yapısı

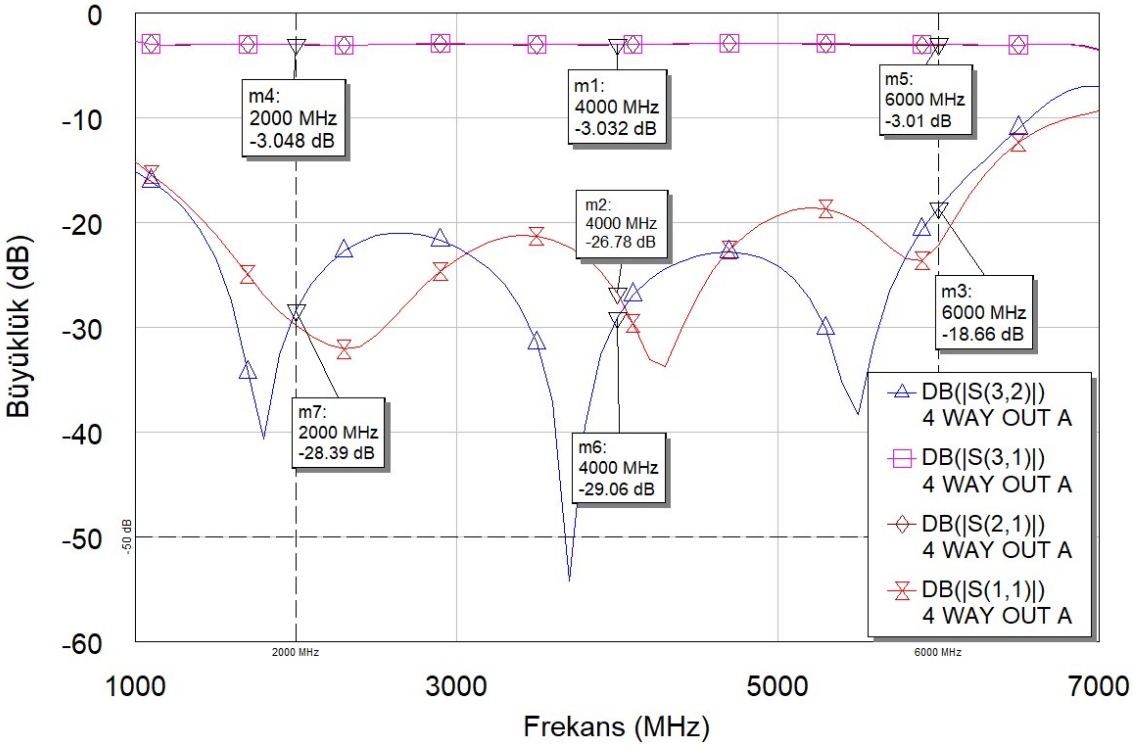


Şekil 9. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü yapısı.

3.1.2. Benzetim

Tüm şartlar sağlandığında şematik benzetim yapılmış ve S parametre benzetim sonuçları Şekil 10'da verildiği gibi elde edilmiştir. Tasarım sürecinde benzetim sonuçlarının kabul edilebilir seviyede olmasına dikkat edilmiştir.

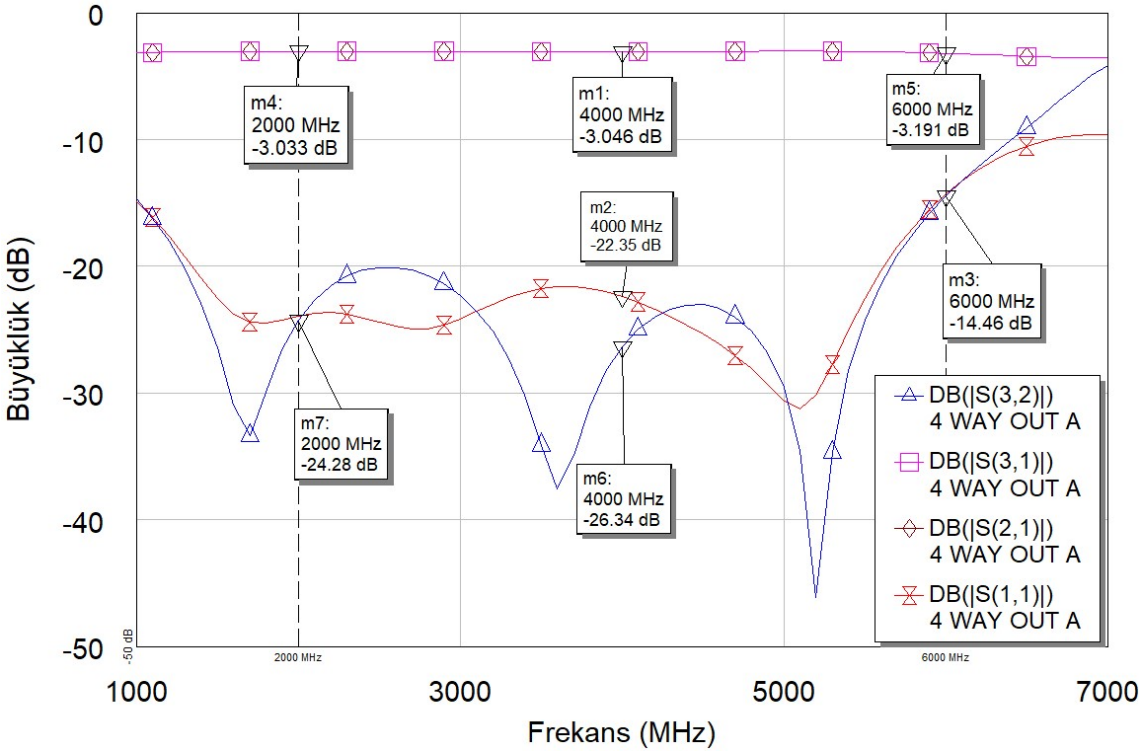
Benzetim sonuçları incelendiğinde 2 GHz -6 GHz bandı boyunca giriş yansıma katsayısı yani S_{11}, -18 dB'nin altında kalmıştır. Ayrıca araya girme kaybı yani S_{21} ve S_{31} değerleri -3,05 dB değerinden daha iyi seviyededir. Teorik olarak bu değerlerin -3 dB olması gerekir ancak tasarlanan sistemlerde bu değere ulaşmak çok zordur. İzolasyon kaybı yani S_{32} ise bant boyunca -20 dB 'nin altında ölçülmüştür.



Şekil 10. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü şematik benzetim sonuçları.

Mikroşerit hatlarla yüksek frekanslarda çalışıldığında, hat bağlantı noktalarından kaynaklanan ve hatta hattın fiziksel olarak izlediği rotadan kaynaklanan ideal olmayan davranışlar devrenin cevabında etkin rol oynar. Bu durumların tespiti ancak EM benzetim ile mümkündür. Devrenin EM benzetim sonuçları ise Şekil 11'deki gibi elde edilmiştir. EM benzetim sonuçlarının devrenin şematik benzetimine göre daha olumsuz sonuçlar

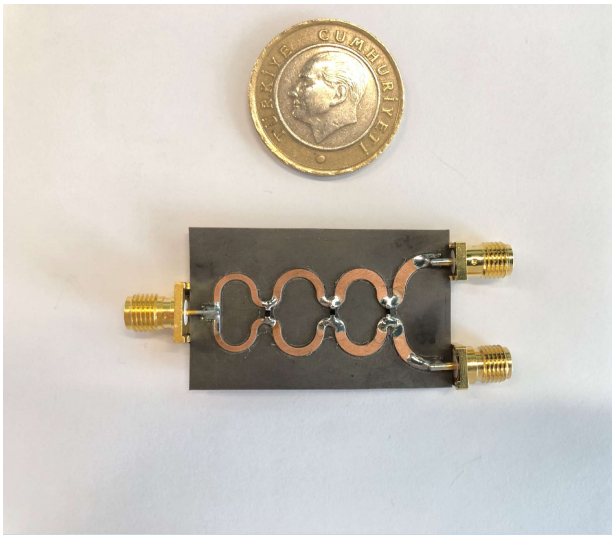
vermesi doğaldır. Bu benzetim sonuçları 2 GHz -6 GHz bandı boyunca giriş yansıma katsayısı yani S_{11}, -14 dB'nin altında kalmıştır. Ayrıca araya girme kaybı yani S_{21} ve S_{31} değerleri -3,2 dB değerinden daha iyi seviyededir. İzolasyon kaybı yani S_{32} ise bant boyunca -20 dB'nin altında ölçülmüştür.



Şekil 11. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü EM benzetim sonuçları.

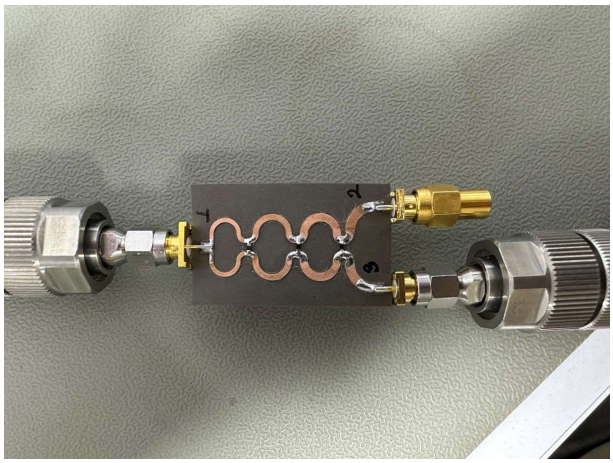
3.1.3. Üretim ve Ölçüm

Üretim öncesi AWR programında tasarlanan devrenin şematik tasarımı ALTIUM PCB tasarım programında hazırlanmıştır. Hazırlanan PCB tasarımı kazıma teknolojisi kullanılarak, LPKF PCB kazıma cihazında Şekil 12'de de görülen son halini almıştır. Daha sonra dirençler ve SMA konnektörleri takılarak en son haline getirilmiştir. Devre üretildikten sonra fiziksel olarak S parametreleri Rohde-Schwarz ZNA43-4 Port Vektor Network Analizor (VNA) aracılığıyla ölçülmüştür.



Şekil 12. Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü üretimi.

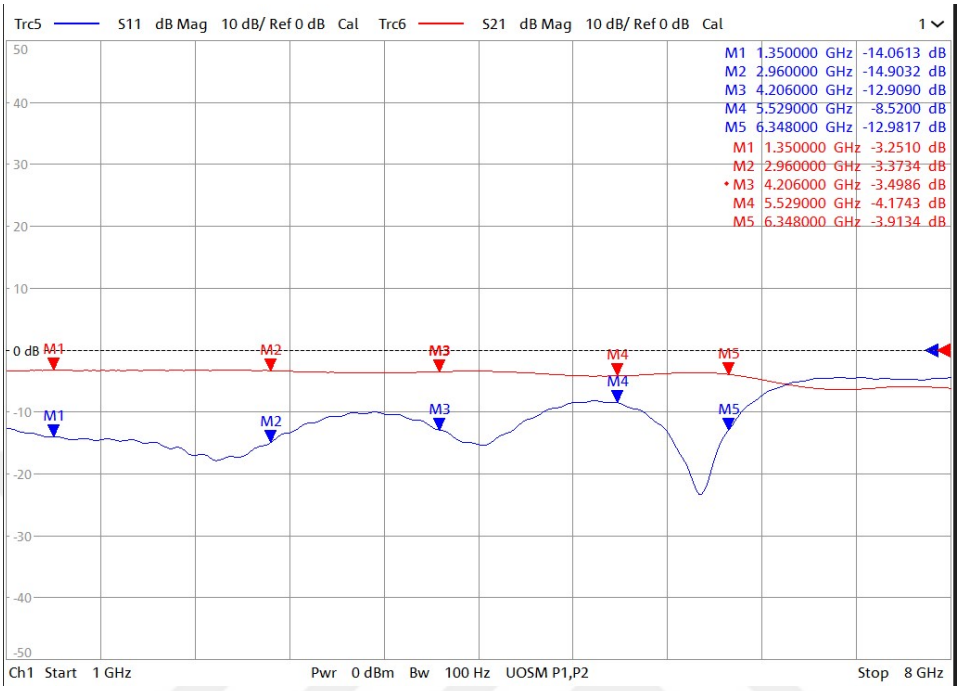
Ölçümler VNA cihazının iki portu kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm öncesi VNA cihazı 1 GHz- 8 GHz frekans bölgesi için kalibre edilmiştir. Daha sonra WGB'nin portları numaralandırılmıştır. Giriş portu Port 1 ve çıkış portları Port 2 ve Port 3 olarak isimlendirilmiştir. Ölçümler sırasında VNA portlarının bağlandığı portlar dışındaki portlar 50 Ohm empedans sonlandırıcı ile sonlandırılmıştır. Ölçüm düzeneği Şekil 13'teki gibidir.



Şekil 13. S-Parametreleri ölçüm düzeneği.

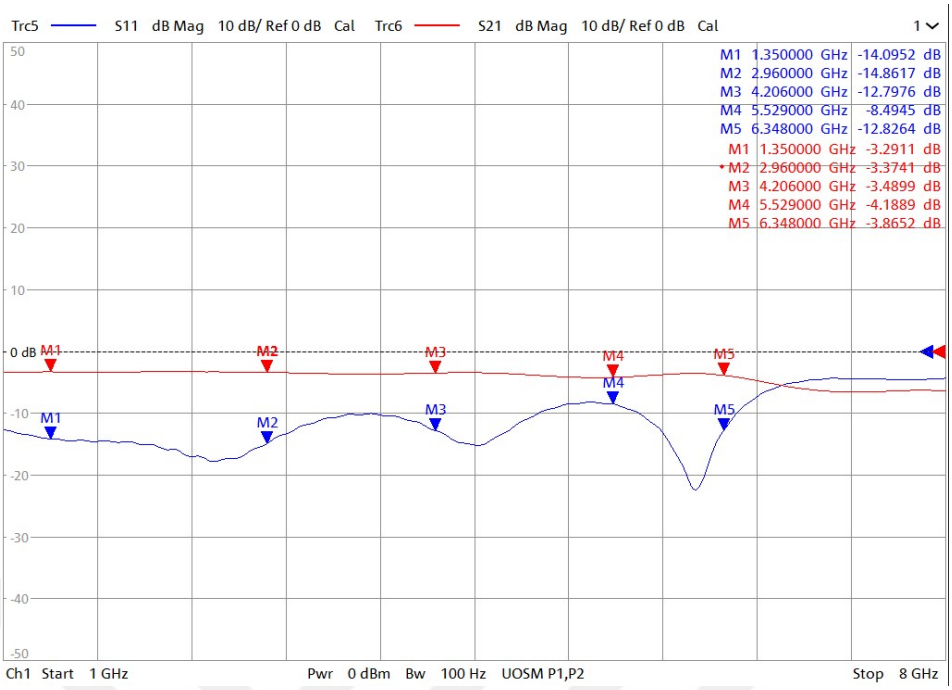
Şekil 14, üç kat iki yollu WGB devresinin ölçülen giriş yansıma katsayısını ve araya girme kaybını göstermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre giriş yansıma katsayısı yani S_{11} değeri 2 GHz-5 GHz frekans bölgesinde -10 dB; 5 GHz-5,7 GHz frekans bölgesinde -8,2 dB ve 5,7 GHz-6,4 GHz frekans bölgesinde -10 dB seviyesinin altında kalmıştır. Port

2’den ölçülen araya girme kaybı yani S_{21}, 2 GHz-5 GHz bölgesinde -3,8 dB; 5 GHz-6,4 GHz bölgesinde ise -4,2 dB seviyesinden daha iyidir.



Şekil 14. Üç-kat iki-yollu WGB Port 1- Port 2 arası S_{11} ve S_{21} ölçüm sonuçları.

Şekil 15, üç kat iki yollu WGB devresinin Port 3’ten ölçülen araya girme kaybını göstermektedir. Buradaki araya girme kaybı yani S_{31} 1,3 GHz-5 GHz bölgesinde -3,8 dB; 5 GHz-6,4 GHz bölgesinde ise -4,2 dB seviyesinden daha iyidir.



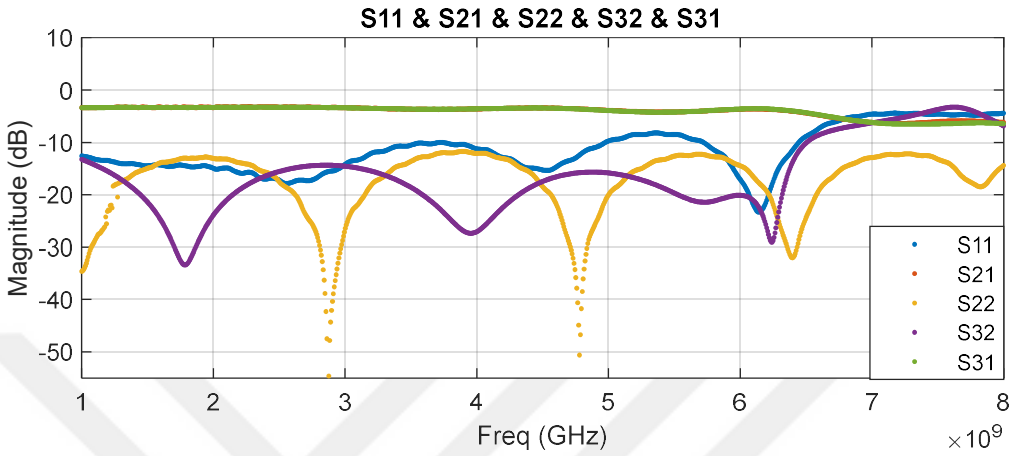
Şekil 15. Üç-kat iki-yollu WGB Port 1- Port 3 arası S_{11} ve S_{31} ölçüm sonuçları.

Şekil 16, üç kat iki yollu WGB devresinin Port 2 ile Port 3 arasındaki izolasyon kaybı ölçüm sonucunu göstermektedir. İzolasyon kaybı yani S_{32} bant boyunca -14,4 dB altında ölçülmüştür.



Şekil 16. Üç-kat iki-yollu WGB Port 2- Port 3 arası S_{32} ölçüm sonucu.

İki yollu WGB devresinin ölçülen tüm S parametre değerleri Şekil 17'de ki gibidir. Şekil 17'de belirtilen ölçüm sonuçları 2 GHz-6 GHz frekans bandı boyunca Tablo 2'de belirtilmiştir.



Şekil 17. Üç-kat iki-yollu WGB S-Parametre ölçüm sonuçları.

Tablo 2'de tasarımı yapılan iki yollu WGB devresinin benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen S-parametre değerleri karşılaştırılmaktadır. Ölçüm sonuçlarının benzetim değerlerinden farklılık göstermesi doğaldır.

Tablo 2. Üç-kat iki-yollu WGB devresinin EM benzetim ve VNA ölçüm sonuçları karşılaştırması.

	S-Parametresi	**2 GHz-6 GHz Frekans Bölgesi**	
EM Benzetim Sonuçları	S_{11}(dB)	<-14	
	S_{21}(dB)	<-3,2	
	S_{31}(dB)	<-3,2	
	S_{32}(dB)	<-20	
		2 GHz-5 GHz Frekans Bölgesi	**5 GHz-6 GHz Frekans Bölgesi**
Ölçüm Sonuçları	S_{11}(dB)	< -10	< -10
	S_{21}(dB)	<-3,8	<-4,2
	S_{31}(dB)	<-3,8	<-4,2
	S_{32}(dB)	<-14,4	<-14,4

Tablo 3'te yakın zamanda yapılmış bazı iki yollu Wilkinson Güç Bölücü devrelerinin üretim sonrası ölçüm sonuçları ile bu çalışmanın üretim sonrası ölçüm sonuçları

karşılaştırılmıştır. Bu tabloya göre yapılan çalışmalarla kıyaslandığında iki yollu güç bölücü devresi güç bölücü gereksinimlerini karşılamaktadır.

Tablo 3. Yakın zamanda yapılmış bazı iki yollu WGB çalışmalarıyla karşılaştırma.

Kaynak	**Bant Genişliği (GHz)**	**S_{11} (dB)**	**S_{21}/S_{31} (dB)**	**S_{32} (dB)**	**Yayın Yılı**
[8]	0,235-0,750	<-20	<-3,47	<-20	**2018**
[15]	2-4	<-15	<-4	<-10	**2021**
	4-8	<-20	<-4	<-17	
	8-12	<-10	<-5	<-15	
[17]	1,2-3,4	<-20	<-3,3	<-17	**2022**
[20]	1,8-2,2	<-15	<-3,29	<-20	**2023**
[21]	0,5-3,5	<-30	<-3,24	<-29	**2018**
Bu çalışma	2-6	<-10	(-3,2) -(-4,2)	<-14,4	**2023**

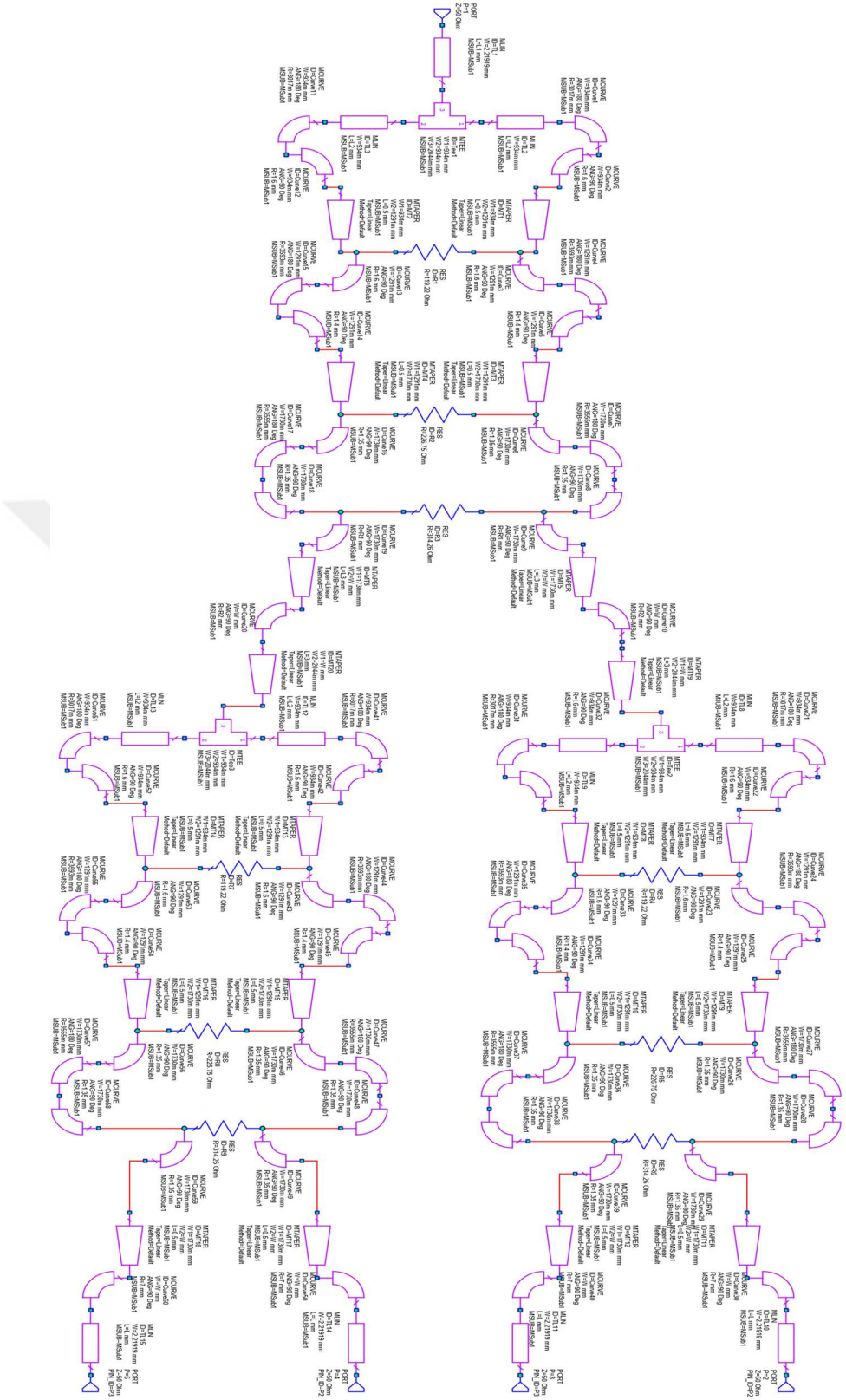
3.2 Dört Yollu 2 GHz -6 GHz Wilkinson Güç Bölücü/Birleştirici Tasarım, Benzetim, Üretim ve Ölçümü

3.2.1. Tasarım

Üç-kat iki-yollu Wilkinson güç bölücü devresinin uygun şekilde art arda (kaskat) ve paralel bağlayarak dört-yollu Wilkinson güç bölücü yapısı elde etmek mümkündür. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü devresinin tasarımı, önceki kısımda anlatılan üç-kat iki yollu WGB tasarımın üç kere kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu şekilde tasarlanmış dört-yollu Wilkinson güç bölücü devresinin şematik tasarımı Şekil 18'de verilmiştir. Şematik benzetimi AWR Mikrodalga Ofis programı aracılığıyla hazırlanmıştır. İki yollu şematik benzetimin arka arkaya eklenmesiyle kolayca dört yollu Wilkinson güç bölücü yapısı hazırlanmıştır.

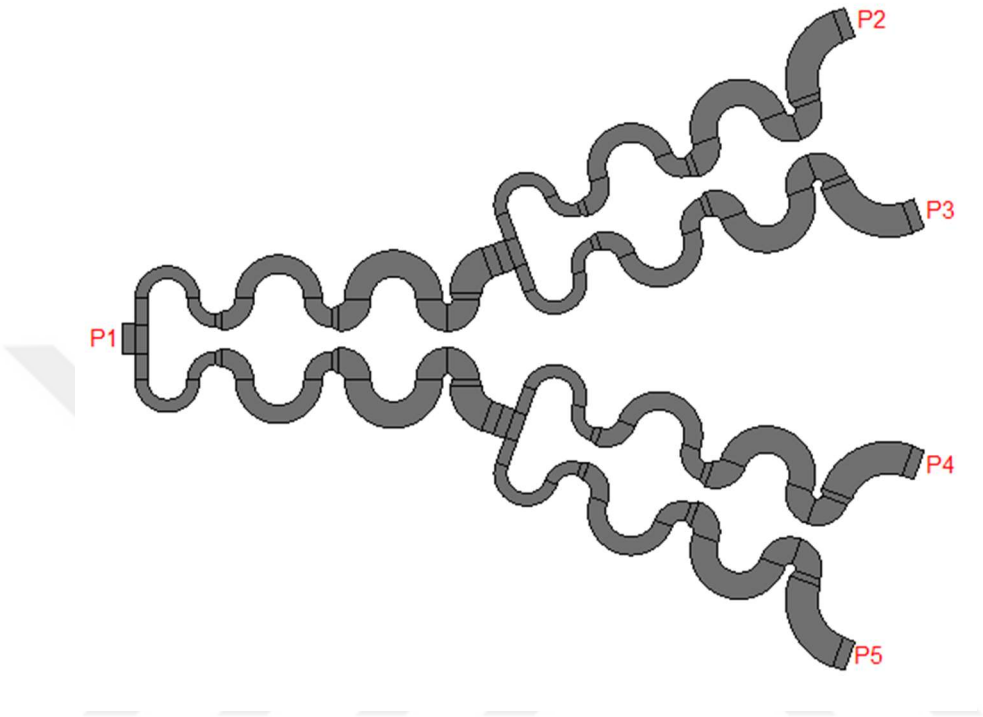
Dört-yollu Wilkinson güç bölücü devresi üç adet iki-yol Wilkinson güç bölücü devresi içermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken birleştirmeler esnasında güç bölücü girişlerine uygulanacak olan devre ölçülerinin yollar arasına sığacak şekilde tasarlanmasıdır. Aynı dikkat birleştirici yollarının mesafeleri tasarlanırken de gösterilmelidir.

İki-yollu Wilkinson güç bölücü yapıları kullanılarak basitçe dört-yol veya sekiz-yol güç bölücü devreleri tasarlamak mümkündür. Ancak yukarıda bahsedilen kolların arasının açılması gerekliliği, özellikle bandın üst frekanslarda araya girme kayıplarını arttırmakta ve yansıma katsayılarını bozmaktadır. Ayrıca fiziksel olarak da yapının büyümesi söz konusudur. Bu gibi durumlarda genellikle tasarım sonrası optimizasyon yöntemi kullanılarak düzenlemeler yapılır.



Şekil 18. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü şematik yapısı

Şematik tasarımı Şekil 18'deki gibi olan devrenin yapısı Şekil 19'deki gibi olmuştur. Yapının kolları iki yollu devrenin çıkışında açılandırılarak genişletilmiş ve devreler bu şekilde yerleştirilmiştir.

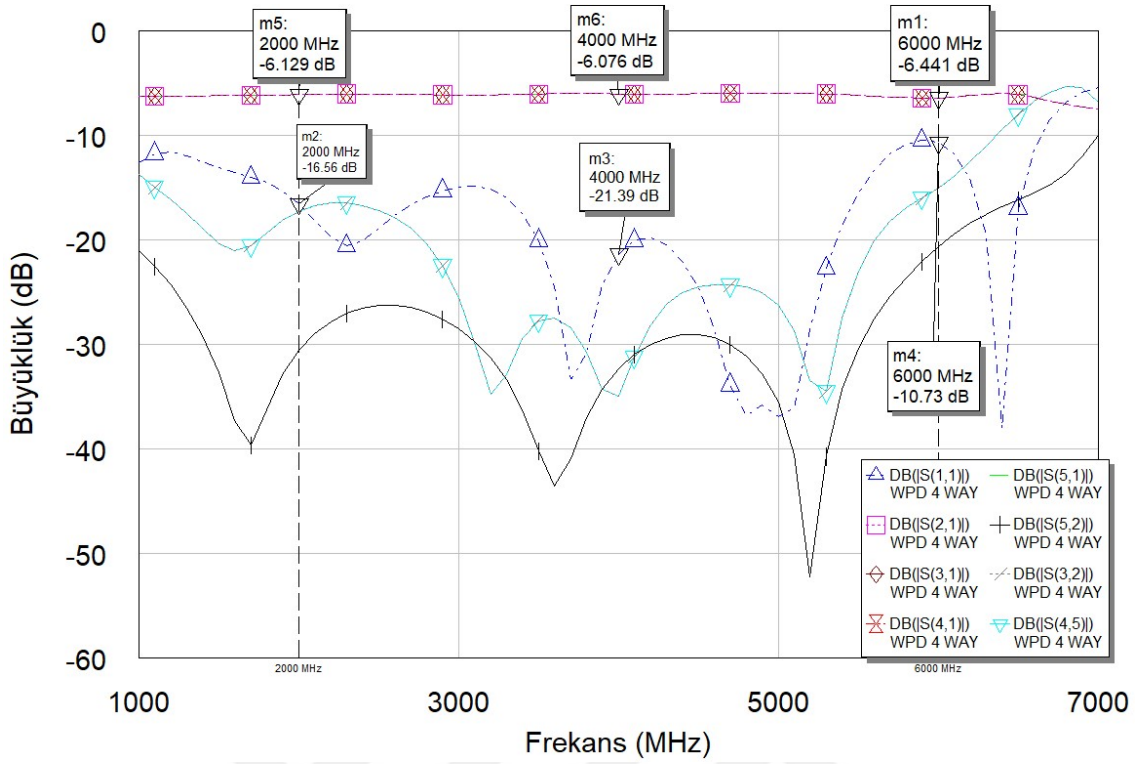


Şekil 19. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü yapısı.

3.2.2. Benzetim

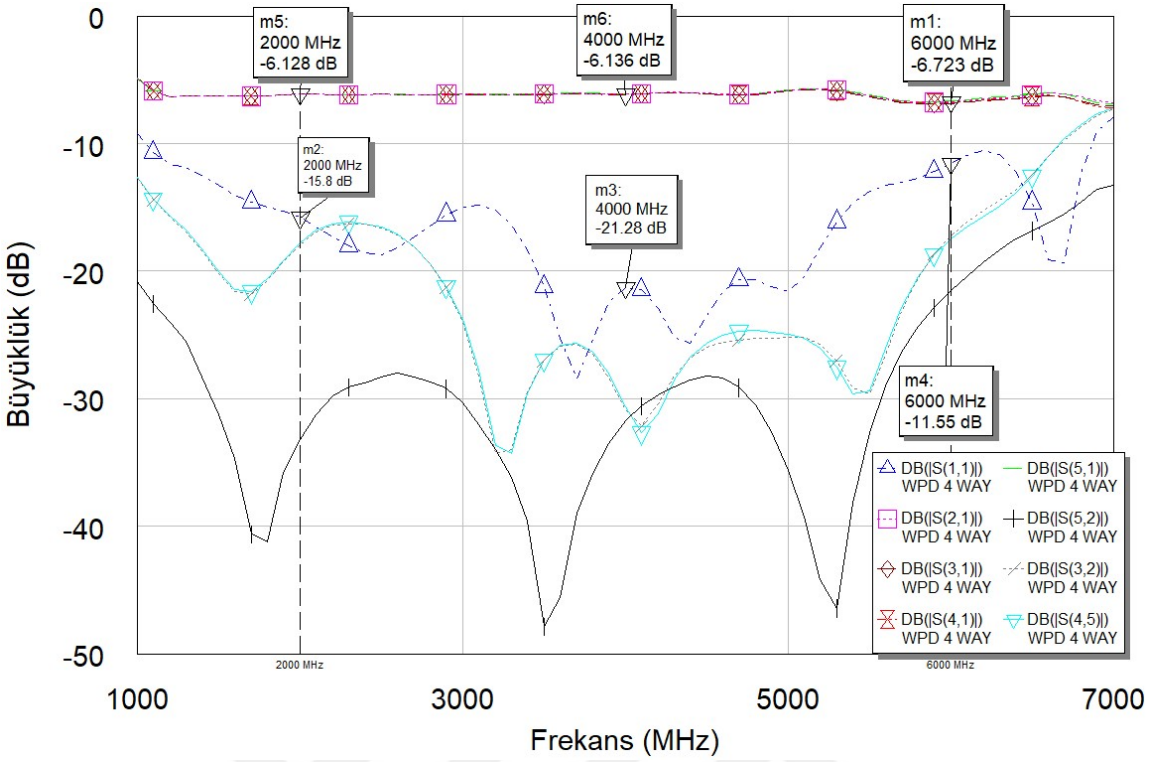
Tüm şartlar sağlandığında dört yollu Wilkinson güç bölücü devresinin şematik benzetimi yapılmış ve S parametre sonuçları Şekil 20'deki gibi elde edilmiştir. Tasarım sürecinde benzetim sonuçlarının kabul edilebilir seviyede olmasına dikkat edilmiştir.

Şematik benzetim sonuçları incelendiğinde 2 GHz -6 GHz bandı boyunca giriş yansıma katsayısı yani S_{11}, -10 dB'nin altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca ekleme kaybı yani S_{21}, S_{31}, S_{41} ve S_{51} değerleri -6,45 dB değerinden daha iyi seviyededir. Teorik olarak bu değerlerin -6 dB olması gerekir ancak tasarlanan sistemlerde bu değere ulaşmak çok zordur. İzolasyon kaybı yani S_{45} ve S_{23} bant boyunca -16 dB altında ölçülmüştür, S_{52} ise bant boyunca -20 dB altında ölçülmüştür.



Şekil 20. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü şematik benzetim sonuçları.

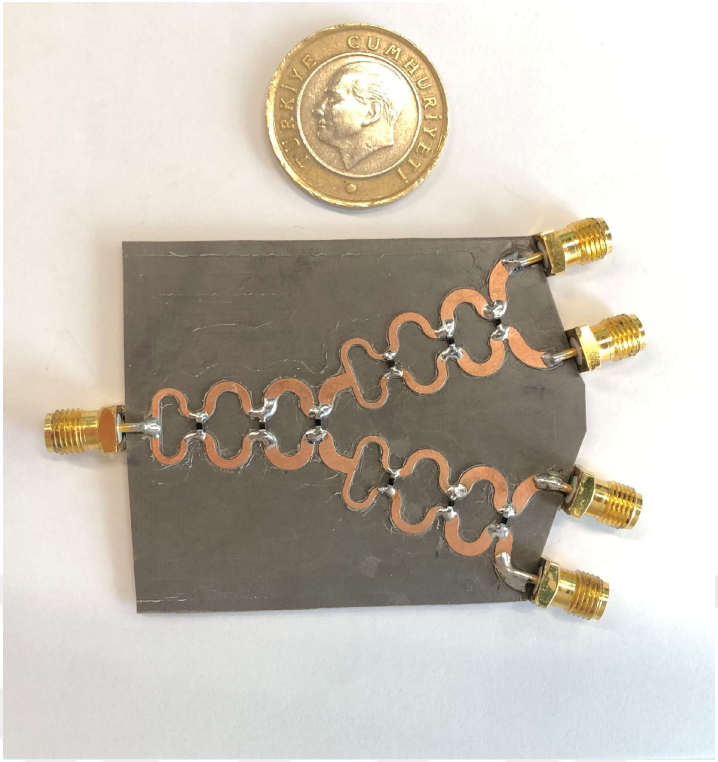
Devrenin EM benzetim sonuçları ise Şekil 21'de verilmiştir. EM benzetim sonuçları devrelerin şematik benzetimine göre gerçeğe daha yakın olmaktadır. Bu benzetim sonuçları 2 GHz -6 GHz bandı boyunca giriş yansıma katsayısı yani S_{11} -11 dB'nin altında kalmıştır. Ayrıca ekleme kaybı yani S_{21}, S_{31}, S_{41} ve S_{51} değerleri -6,73 dB değerinden daha iyi seviyededir. İzolasyon kayıpları S_{45} ve S_{23} bant boyunca -16 dB'nin altında ölçülmüştür, S_{52} ise bant boyunca -25 dB'nin altında ölçülmüştür.



Şekil 21. Üç-kat dört-yollu Wilkinson güç bölücü EM benzetim sonuçları.

3.2.3. Üretim ve Ölçüm

Üretim öncesi AWR Microwave Office programında tasarlanan devrenin şematik tasarımı ALTIUM PCB tasarım programında hazırlanmıştır. Hazırlanan PCB tasarım için kazıma teknolojisi kullanılarak LPKF PCB kazıma cihazı ile prototip üretilmiştir. Daha sonra dirençler ve SMA konnektörleri monte edilerek Şekil 22'de görülen son haline getirilmiştir.

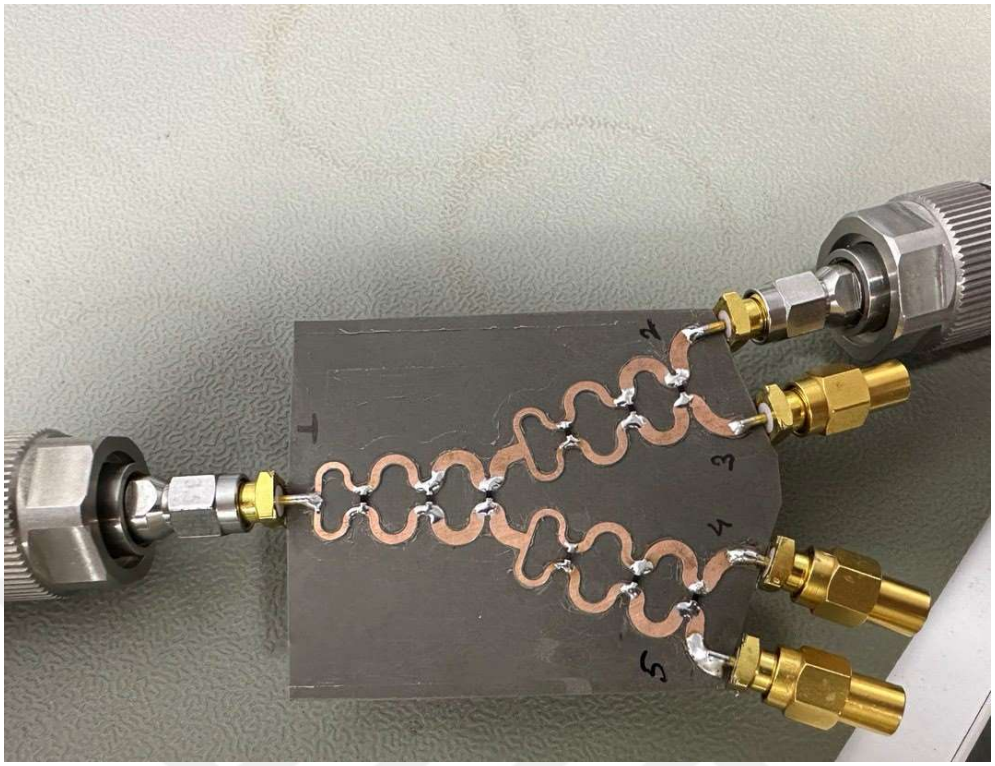


Şekil 22.Üç-kat dört-yollu Wilkinson Güç Bölücü üretimi.

Devre üretildikten sonra fiziksel olarak S parametreleri Vektor Network Analizor (VNA) cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

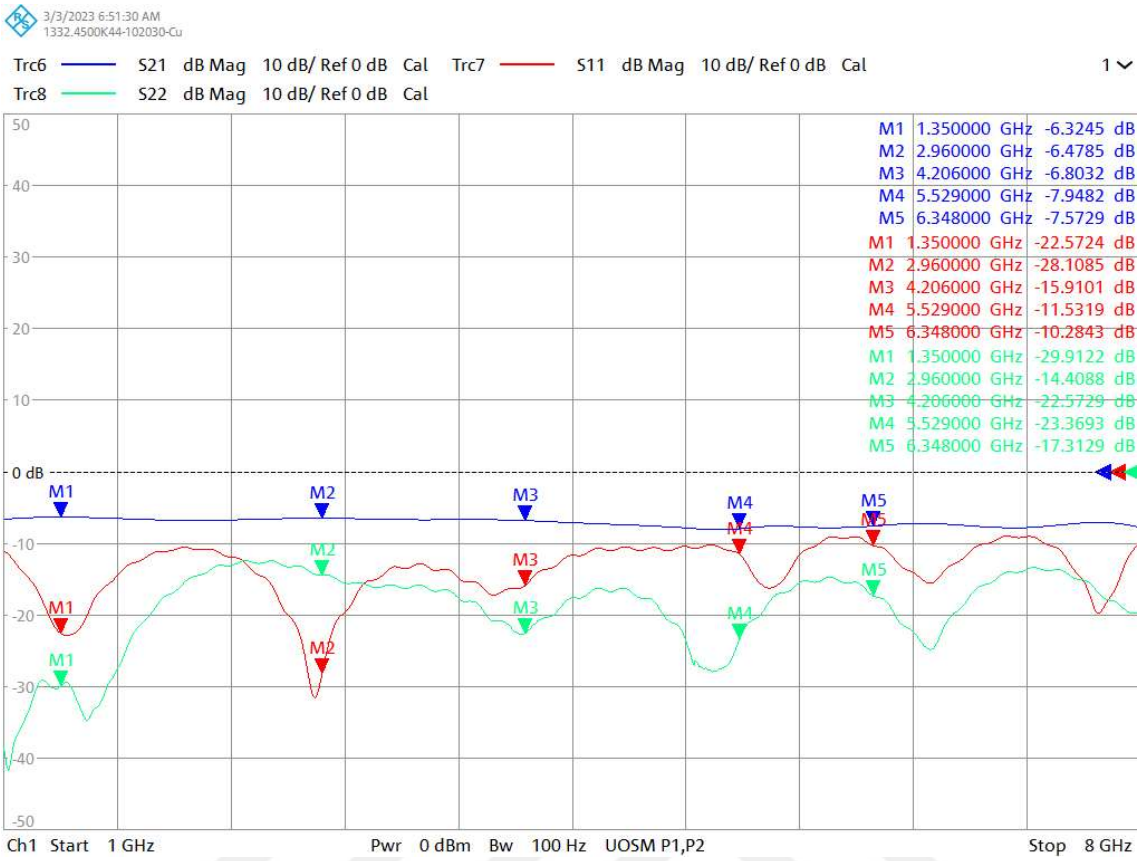
Ölçümler VNA cihazının iki portu kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm öncesi VNA cihazı 1 GHz- 8 GHz frekans bölgesi için kalibre edilmiştir. Daha sonra WGB'nin portları numaralandırılmıştır. Giriş portu Port 1 ve çıkış portları Port 2, Port 3, Port 4 ve Port 5 olarak isimlendirilmiştir. Ölçümler sırasında VNA portlarının bağlandığı portlar dışındaki portlar, 50 Ohm empedanslı sonlandırıcı ile sonlandırılmıştır. Ölçüm düzeneği Şekil 23'teki gibi oluşturulmuştur.

Öncelikle Port 1- Port 2, Port 1-Port 3, Port 1-Port 4, Port 1-Port 5 portları arası giriş yansıma katsayısı ve ekleme kaybı ölçülmüştür. Daha sonra Port 2-Port 3, Port 2-Port 4, Port 2-Port 5, Port 3-Port 4, Port 3-Port 5 ve Port 4-Port 5 arası izolasyon kayıpları ölçülmüştür.



Şekil 23. Ölçüm düzeneği.

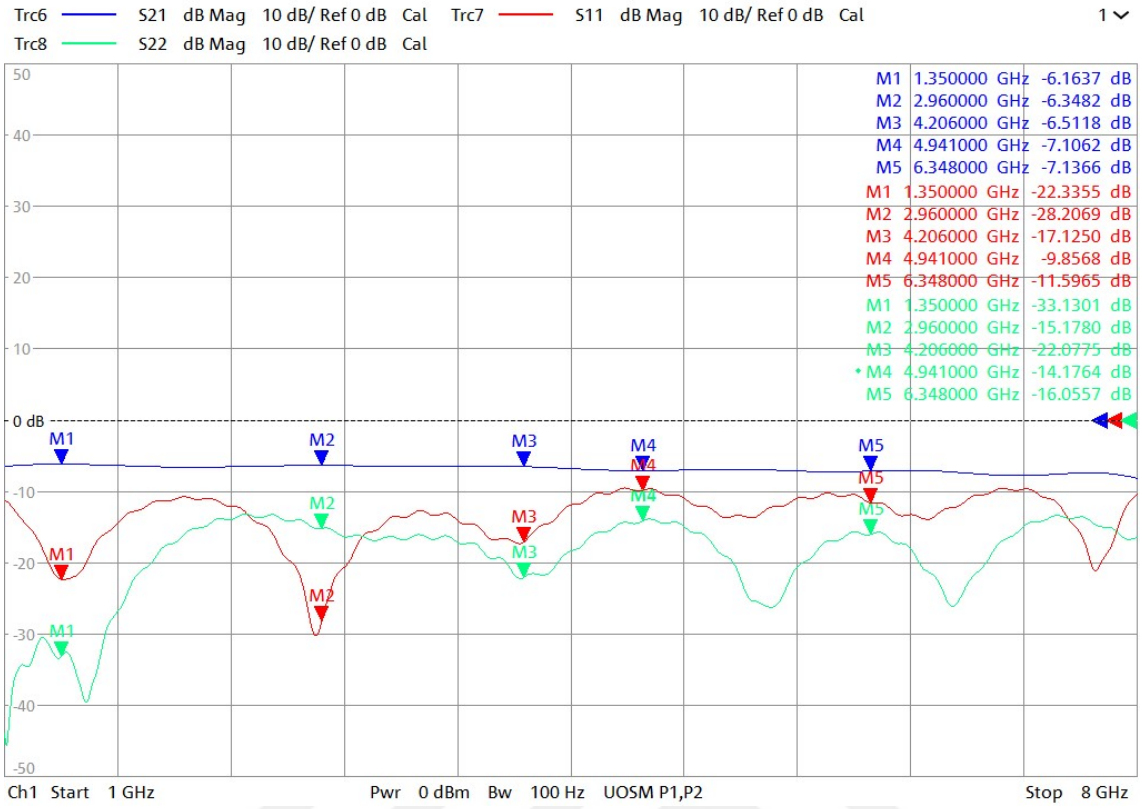
Şekil 24, üç kat dört yollu WGB devresinin Port 1 ile Port 2 arası ölçüm sonuçlarını içermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre 2 GHz-6 GHz bandı boyunca giriş yansıma katsayısı yani S_{11} değerinin -10 dB'nin altında kaldığı görülmektedir. S_{22} değeri ise bant boyunca -12,7 dB seviyesinden daha iyidir. Port 1-Port 2 arası araya girme kaybı yani S_{21} değeri için, bandın üst frekanslarına doğru kaybın arttığını görülmüştür. Burada bandı bölümler halinde incelemek daha doğrudur. Port 1- Port 2 arası araya girme kaybı 2 GHz-4 GHz frekans bölgesinde -6,7 dB seviyesinden daha iyi olduğu; 4 GHz- 6 GHz frekans bölgesinde ise -8 dB seviyesinden daha iyi olduğu görülmektedir.



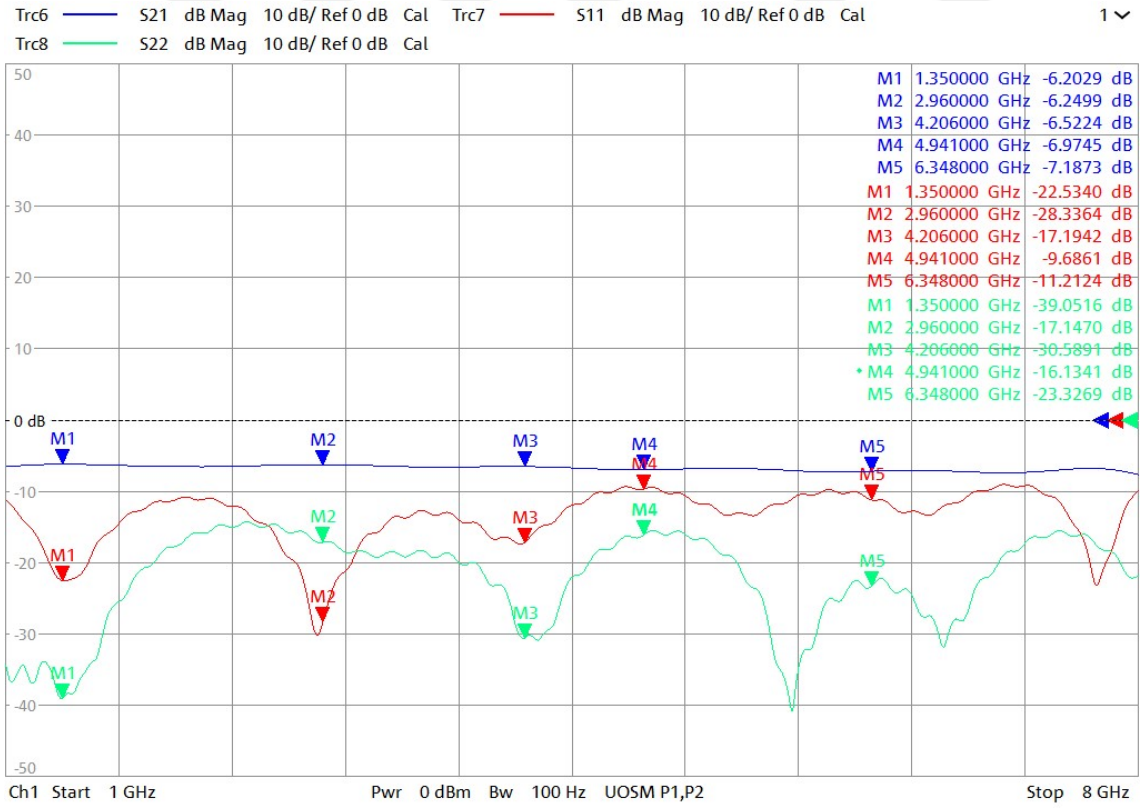
Şekil 24. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 2 arası S_{11}, S_{21} ve S_{22} ölçüm sonuçları.

Şekil 25, üç kat dört yollu WGB devresinin Port 1 ile Port 3 arası ölçüm sonuçlarını içermektedir. Bant boyunca giriş yansıma katsayısının 2 GHz- 4 GHz frekans aralığında -10,76 dB seviyesinden; 4 GHz-6 GHz frekans aralığında ise -9,56 dB seviyesinden daha iyi olduğu görülmektedir. S_{22} değeri bant boyunca -13 dB seviyesinden daha iyidir. Port 1-Port 3 arası araya girme kaybı yani S_{31} bant boyunca -7,2 dB seviyesinden daha iyi seviyede ölçülmüştür.

Şekil 26, üç kat dört yollu WGB devresinin Port 1 ile Port 4 arası ölçüm sonuçlarını içermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre bant boyunca giriş yansıma katsayısının 2 GHz-4 GHz frekans bölgesinde -10,81 dB seviyesinden; 4 GHz-6 GHz frekans aralığında ise -9,34 dB seviyesinden daha iyidir. S_{22} değeri bant boyunca -14 dB seviyesinden daha iyidir. Port 1-Port 4 arası araya girme kaybı yani S_{41} bant boyunca -7,2 dB seviyesinden daha iyi olduğu görülmektedir.

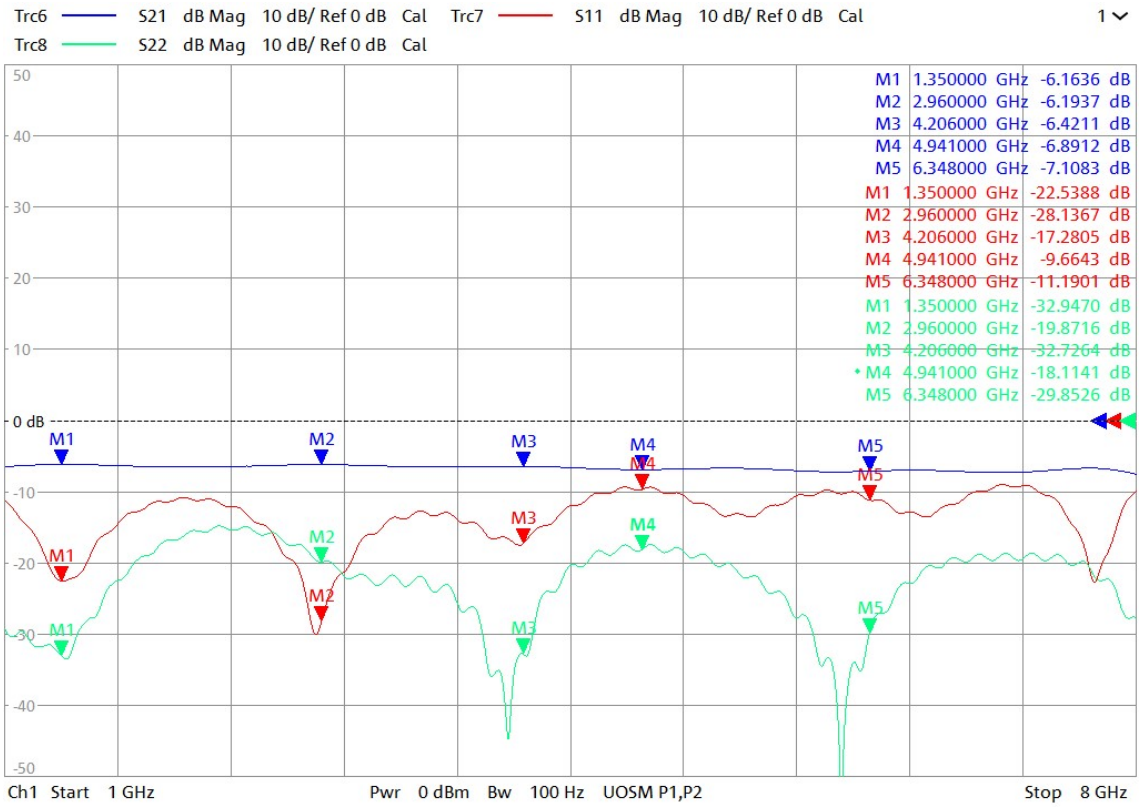


Şekil 25. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 3 arası S_{11}, S_{31} ve S_{33} ölçüm sonuçları.



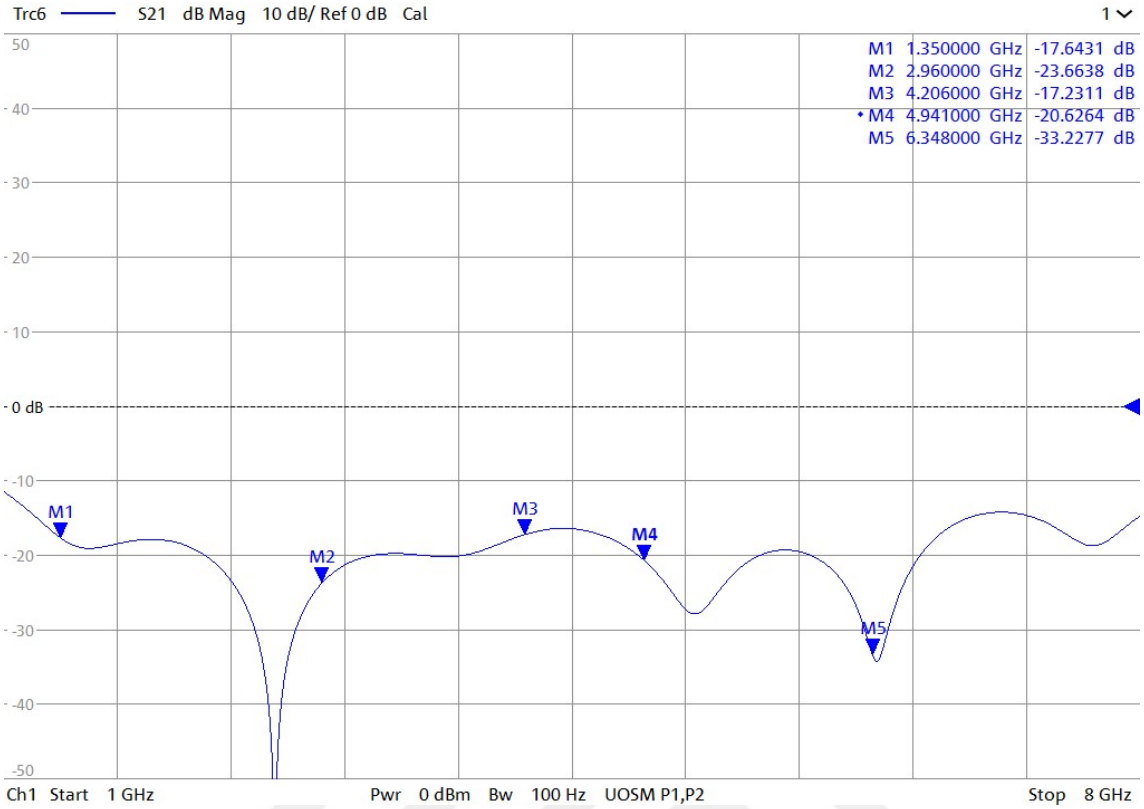
Şekil 26. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 4 arası S_{11}, S_{21} ve S_{22} ölçüm sonuçları.

Şekil 27, üç kat dört yollu WGB devresinin Port 1 ile Port 5 arası ölçüm sonuçlarını içermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre bant boyunca giriş yansıma katsayısının 2 GHz- 4 GHz frekans aralığında -10,81 dB seviyesinden; 4 GHz- 6 GHz frekans aralığında ise -9,34 dB seviyesinden daha iyi olduğu görülmektedir. Port 1-Port 5 arası araya girme kaybını yani S_{51} bant boyunca -7,15 dB seviyesinden daha iyidir.

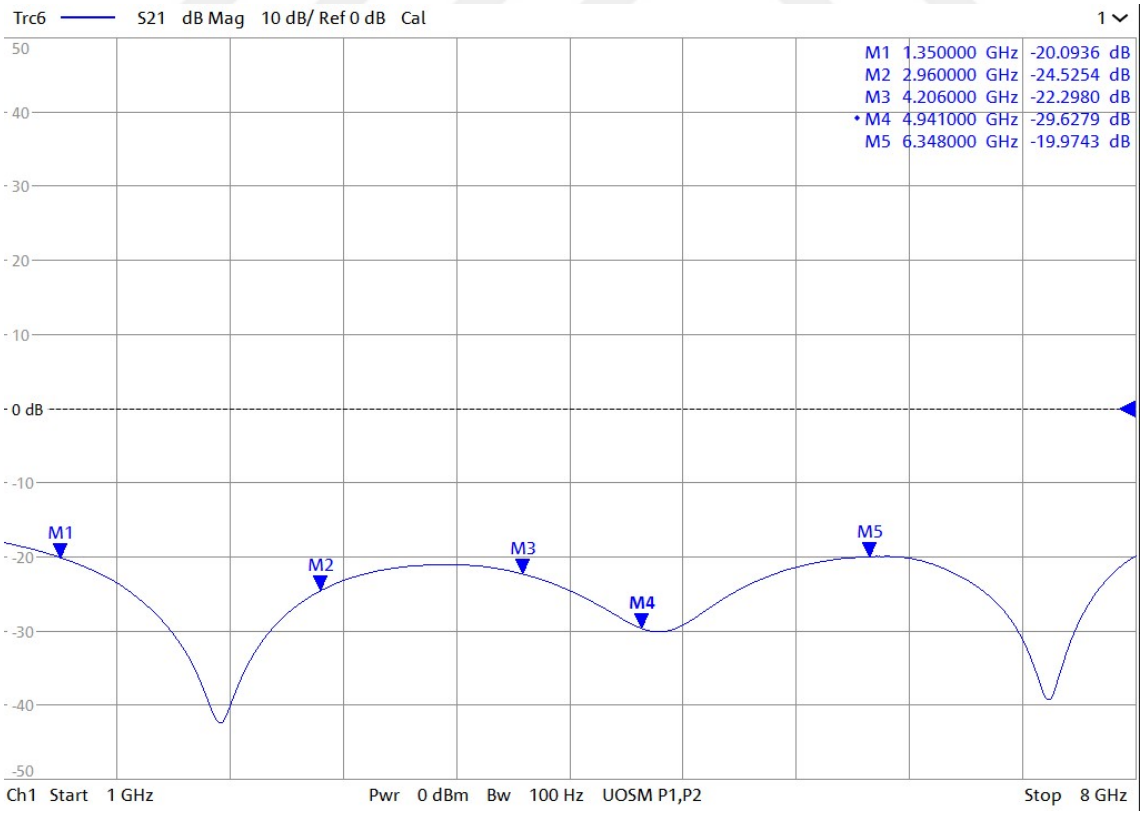


Şekil 27. Üç-kat dört-yollu WGB Port 1- Port 5 arası S_{11}, S_{21} ve S_{22} ölçüm sonuçları.

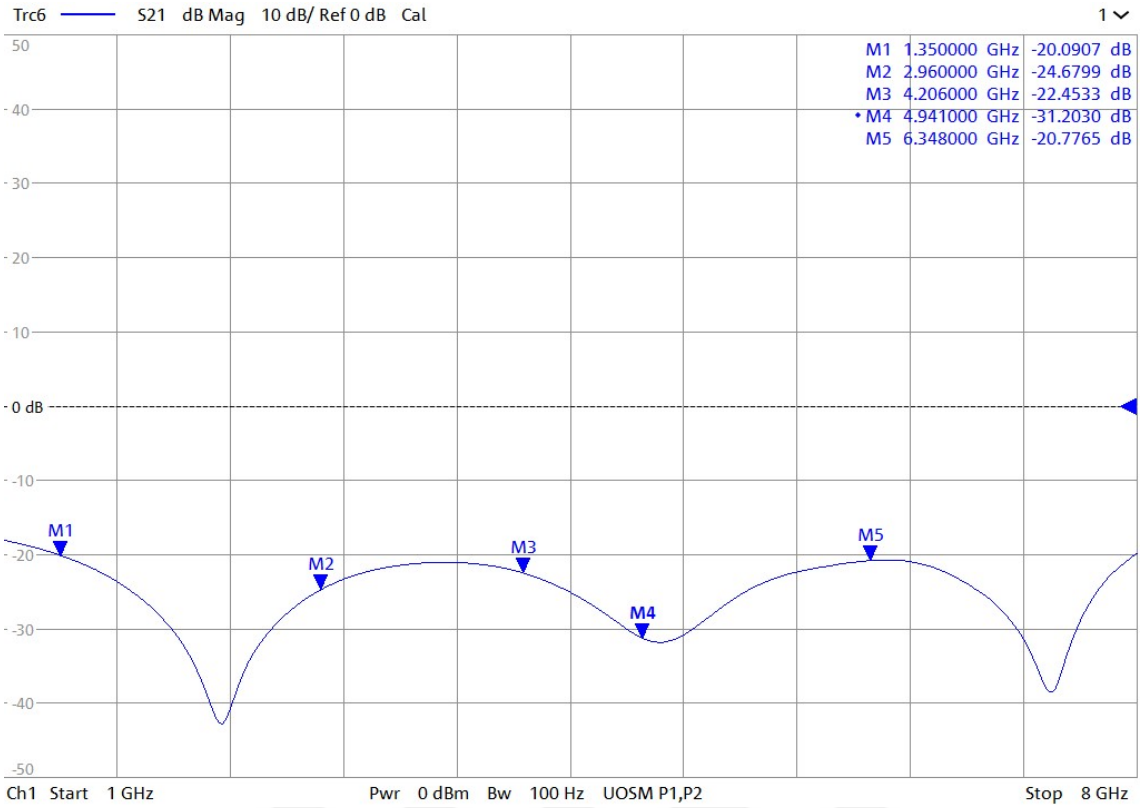
Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da üç kat dört yollu WGB devresinin sırasıyla Port 2 ile Port 3, Port 2 ile Port 4 ve Port 2 ile Port 5 arası izolasyon kayıplarına ilişkin ölçümlere yer verilmiştir. İzolasyon kaybı yani S_{32} bant boyunca -16,41 dB; S_{42} bant boyunca -20 dB ve S_{52} bant boyunca -21,81 dB 'nin altında ölçülmüştür.



Şekil 28. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 2 ve Port 3 arası S_{32} ölçüm sonucu.

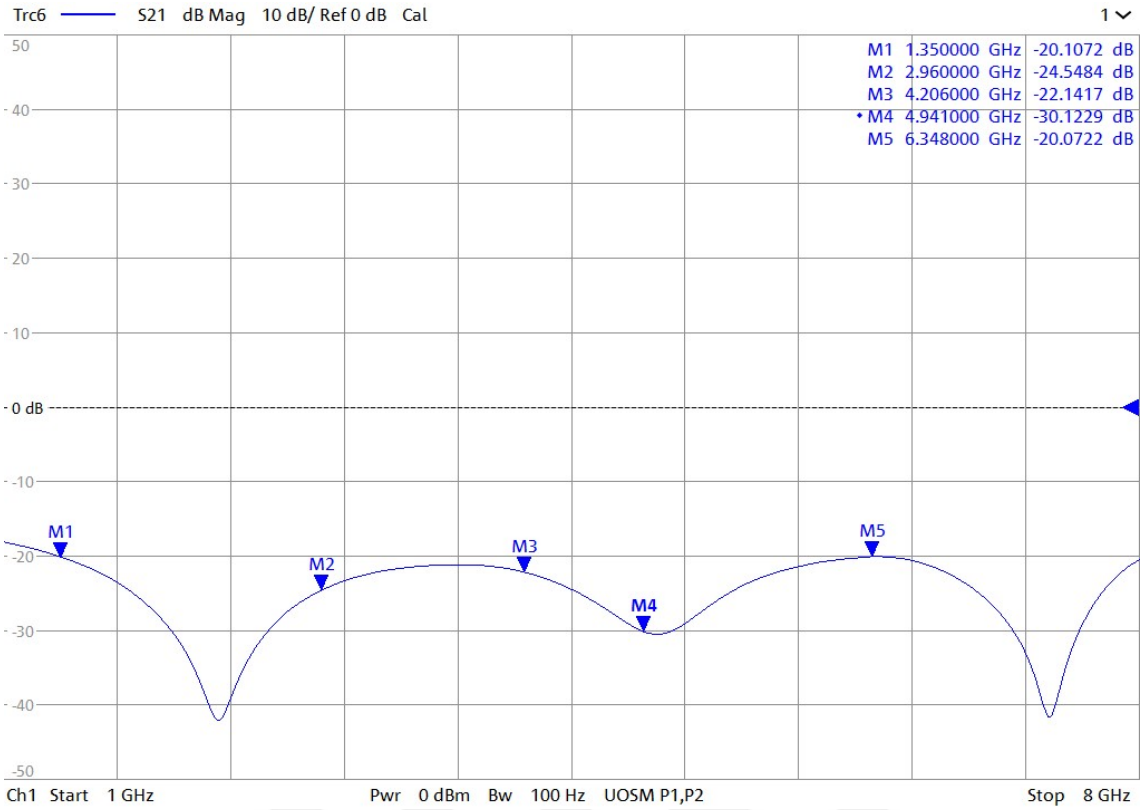


Şekil 29. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 2 ve Port 4 arası S_{42} ölçüm sonucu.

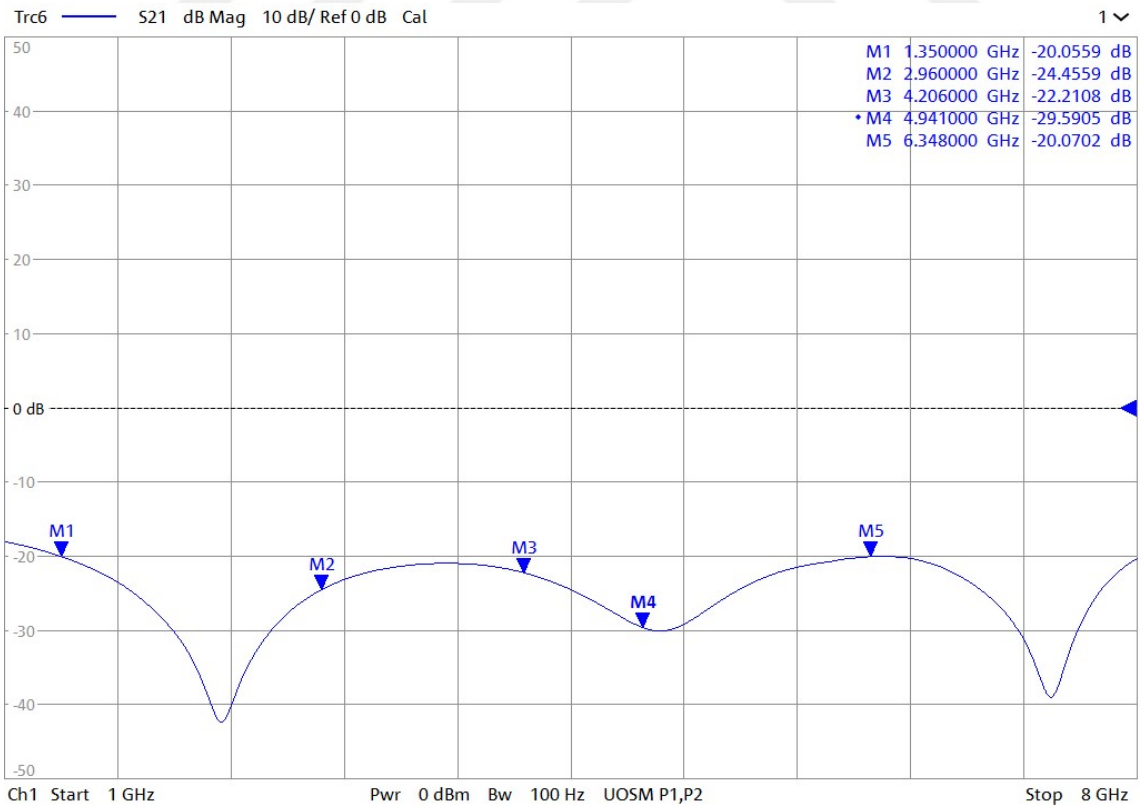


Şekil 30. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 2 ve Port 5 arası S_{52} ölçüm sonucu.

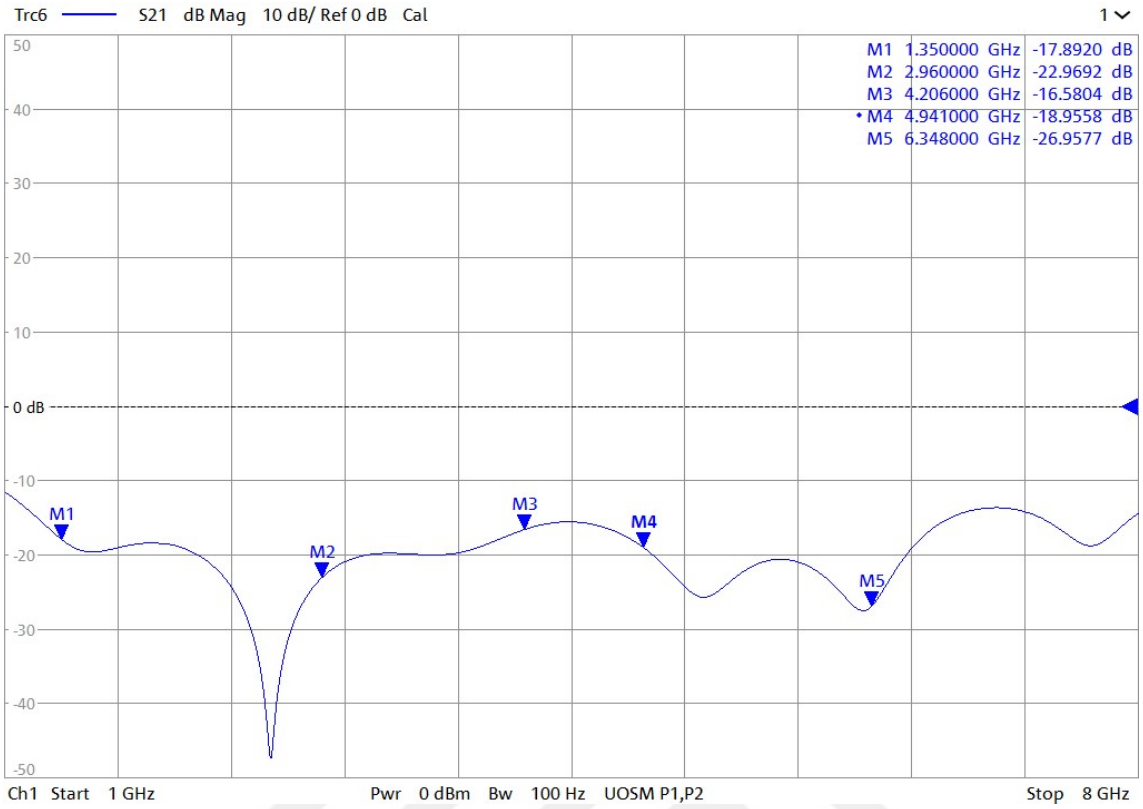
Şekil 31, Şekil 32 ve Şekil 33'te üç kat dört yollu WGB devresinin sırasıyla Port 3 ile Port 4, Port 3 ile Port 5 ve Port 4 ile Port 5 arası izolasyon kayıplarına ilişkin ölçümlere yer verilmiştir. İzolasyon kaybı yani S_{43} bant boyunca -21 dB; S_{53} bant boyunca -20,96 dB ve S_{54} bant boyunca -15,54 dB seviyesinin altında ölçülmüştür.



Şekil 31. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 3 ve Port 4 arası S_{43} ölçüm sonucu.

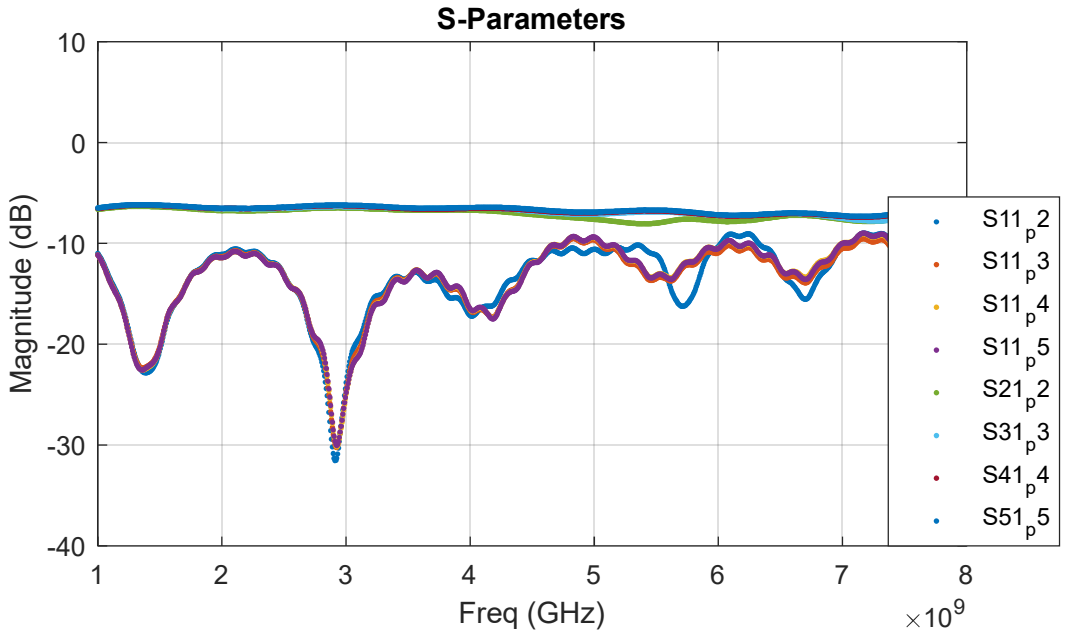


Şekil 32. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 3 ve Port 5 arası S_{53} ölçüm sonucu.



Şekil 33. Üç-kat dört-yollu WGB çıkış Portları Port 4 ve Port 5 arası S_{54} ölçüm sonucu.

Dört yollu WGB devresine ait ölçülen tüm S parametre değerleri Şekil 34'te görülmektedir. Burada belirtilen ölçüm sonuçları ayrıca 2 GHz-6 GHz frekans bandı boyunca Tablo 4'te belirtilmiştir.



Şekil 34. Üç-kat dört-yollu WGB S-Parametre ölçüm sonuçları.

Tablo 4'te tasarımı yapılan dört yollu WGB devresine ait S-parametre değerlerinin benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmaktadır. Ölçüm sonuçlarının benzetim değerlerinden farklılık göstermesi doğaldır.

Tablo 4. Üç-kat dört-yollu WGB devresinin EM benzetim ve VNA ölçüm sonuçları karşılaştırması.

	S-Parametresi	**2 GHz-6 GHz Frekans Aralığı**		
EM Benzetim Sonuçları	S_{11}(dB)	<-11,55		
	S_{21}(dB)	<-6,72		
	S_{31}(dB)	<-6,72		
	S_{41}(dB)	<-6,72		
	S_{51}(dB)	<-6,72		
	S_{32}(dB)	<-16		
	S_{54}(dB)	<-16		
	S_{52}(dB)	<-25		
		2 GHz-4 GHz	**4 GHz-5GHz**	**5 GHz-6 GHz**
Ölçüm Sonuçları	S_{11}(dB)	<-10,56	<-9,32	<-10,41
	S_{21}(dB)	<-6,7	<-7,6	<-8,05
	S_{31}(dB)	<-6,5	<-7,1	<-7,1
	S_{41}(dB)	<-6,6	<-6,9	<-7,2
	S_{51}(dB)	<-6,5	<-6,8	<-7,14
	S_{32}(dB)	<-18,05	<-16,41	<-19,28
	S_{54}(dB)	<-18,37	<-15,55	<-20,06
	S_{52}(dB)	<-21,09	<-21,41	<-21,99

Tablo 5'te ise yakın zamanda yapılmış bazı dört yollu Wilkinson Güç Bölücü devrelerinin üretim sonrası ölçüm sonuçları ile bu tez çalışmasında üretilen devrenin ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu tabloya göre mevcut çalışmalarla kıyaslandığında tasarlanan dört yollu güç bölücü devresinin güç bölücü gereksinimlerini karşıladığı anlaşılmaktadır.

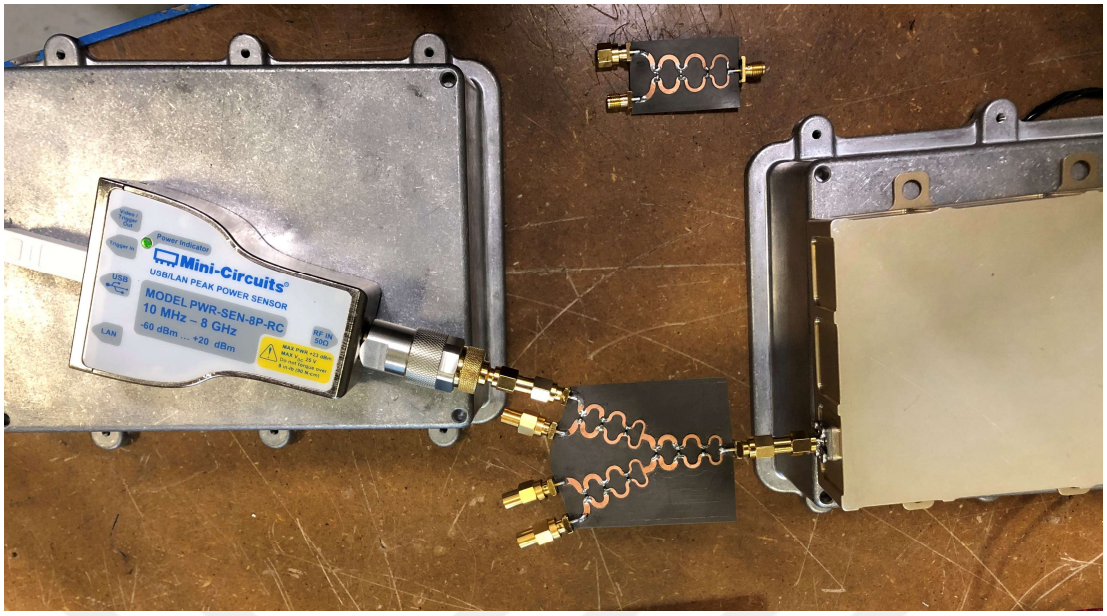
Tablo 5. Tez çalışmasında üretilen güç bölücü ile daha önce yapılmış çalışmalarda sunulmuş bazı dört yollu WGB devrelerinin karşılaştırılması.

Kaynak	Bant Genişliği (GHz)	S_{11} (dB)	$S_{21}/S_{31}/S_{41}/S_{51}$ (dB)	$S_{32}/S_{42}/S_{52}/S_{43}/S_{53}/S_{54}$(dB)	Yayın Yılı
[20]	1,85-2,35	<-15	-	<-20	**2023**
[22]	8,5-9,5	<-20	(-6,7)- (-8,8)	<-22	**2019**
[23]	2-5	<-18	(-7)- (-8,5)	<-20	**2019**
[24]	0,54-1,08	<-15	(-6,2)- (-7,1)	<-15	**2019**
[25]	3,1-10,6	<-15	(-6,9)- (-7,1)	-	**2007**
[26]	8-12	<-23	(-7,4)- (-8)	<-30	**2021**
Bu çalışma	2-6	<-10	(-6,7)- (-8,05)	<-15,5	**2023**

3.3 İki ve Dört Yollu WGB Devreleri ile Pratik Uygulama Örneği

Üretimleri ve ölçümleri tamamlanan WGB devreleri ile S bandında merkez frekansı 2250 MHz olan, 17 dBm güç çıkışı veren bir RF haberleşme modülü ile uygulama yapılmıştır. Ölçüm düzeneği Şekil 35'teki gibi olan teste ait ölçüm sonuçları Şekil 36'da verilmiştir. Ölçüm Mini-Circuits güç sensörü ile yapılmıştır. Güç sensörünün arayüzünden okunan değerler Şekil 36'daki gibi olmuştur. Şekil 36 (a) WGB girişi Port 1'e gelen referans giriş gücüdür. Şekil 36 (b) iki yollu WGB çıkış portlarından Port 2'de okunan güç değeridir. Şekil 36 (c) iki yollu WGB çıkış portlarından Port 3'te okunan güç değeridir. Şekil 36 (d) dört yollu WGB çıkış portlarından Port 2'de okunan güç değeridir. Şekil 36 (e) dört yollu WGB çıkış portlarından Port 3'te okunan güç değeridir. Şekil 36 (f) dört yollu WGB çıkış portlarından Port 4'te okunan güç değeridir. Şekil 36 (g) dört yollu WGB çıkış portlarından Port 5'te okunan güç değeridir.

Arayüz üzerinde okunan değerlerden *tepe değerleri* referans alınmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken dönüştürücü konnektör kaybı göz önüne alınmalıdır. Tablo 6'da iki ve dört yollu WGB devrelerinin çıkışta ölçülen güç değerleri ve referans giriş gücü (14,18 dB) arasındaki fark gösterilmiştir.



Şekil 35. Güç ölçüm test düzeneği.



Şekil 36. Güç Ölçüm Sonuçları: a) WGB girişine gelen güç-Port 1, b) İki yollu WGB Port 2, c) İki yollu WGB Port 3, d) Dört yollu WGB Port 2, e) Dört yollu WGB Port 3, f) Dört yollu WGB Port 4, g) Dört yollu WGB Port 5.

Tablo 6. Güç Ölçüm Sonuçları

	Port	Ölçülen Değer(dB)	Fark (dB)
İki Yollu WGB	Giriş Portu (Referans)	14,18	-
	Port 2	11,45	2,73
	Port 3	11,31	2,87
Dört Yollu WGB	Port 2	7,98	6,2
	Port 3	8,52	5,66
	Port 4	8,11	6,07
	Port 5	7,76	6,42

4. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, geniş bantlı Wilkinson tipi iki-yol ve dört-yol güç bölücüleri tasarlanmış; devrelerin şematik ve elektromanyetik (EM) benzetimleri yapılmış ve ardından üretimleri gerçekleştirilmiştir. Taban malzemesi olarak 2.33 dielektrik sabitine, 79 μm dielektrik kalınlığına, 35 μm bakır kalınlığına sahip RT5870 taban kullanılmıştır. İzolasyon direnci olarak yüksek güç uygulamalarına uygun olacak şekilde 0805 kılıf Vishay RCP serisi dirençler seçilmiştir. Gerekli bant genişliğini sağlayabilmek için üç-katlı tasarım yapılmıştır.

Devrenin şematik ve EM benzetim sonuçları birbiriyle örtüşmektedir. EM benzetim sonuçlarına göre iki-yol güç bölücü için bant boyunca -14 dB'den daha düşük giriş yansıma katsayısı, -3,2 dB araya girme kaybı ve portlar arası -20 dB izolasyon kaybı değerleri elde edilmiştir. Gerçek ölçümlerde ise iki-yol güç bölücü için giriş yansıma katsayısı 2 GHz- 5 GHz frekans aralığında -10 dB ve 5 GHz-6 GHz frekans aralığında ise -8,2 dB seviyesinde ölçülmüştür. Araya girme kaybı 2 GHz-5 GHz frekans aralığında -3,6 dB; 5 GHz -6 GHz frekans aralığında -4,2 dB olarak ölçülmüştür. Çıkış portları arası izolasyon değeri ise bant boyunca -14 dB'den daha iyi seviyede olduğu görülmüştür.

İki-yol güç bölücü devresi, ard arda bağlanarak dört-yol güç bölücü yapısı elde edilmiştir. Üç-kat dört-yollu güç bölücü devresinin EM benzetimi sonuçlarında bant boyunca -6,7 dB araya girme kaybı, -10 dB'den daha düşük geri dönüş kaybı ve -16 dB değerlerinde izolasyon kaybı elde edilmiştir. Gerçek ölçümlerde ise dört-yol güç bölücü için araya girme kaybı Port 2 için 2 GHz-4 GHz frekans bölgesinde -6,7 dB seviyesinde iken 4 GHz-5 GHz frekans bölgesinde -7,6 dB ve 5 GHz-6 GHz bölgesinde -8 dB seviyesinde ölçülmüştür. Port 3, Port 4 ve Port 5 için ise sırasıyla 2 GHz- 4 GHz frekans bölgesinde -6,7 dB; 4 GHz- 5 GHz frekans bölgesinde -7,2 dB ve 5 GHz-6 GHz bölgesinde -7,2 dB seviyesinden daha iyi olduğu görülmüştür. Dört-yol güç bölücü için tüm portlardan ölçülen geriye dönüş kaybı -10 dB seviyesinde; çıkış portları arası izolasyon kaybı ise bant boyunca -15 dB seviyesinden daha iyi seviyededir.

Sonuç olarak tasarlanan 2 devre gerçek bir uygulamada kullanılmış ve gerekli isterleri karşıladığı görülmüştür. Çalışmanın sonuçları güç bölücü devresi tasarımı ve mikrodalga

devrelerin genel anlamda tasarımı konusunda araştırmacılara ve ilgili mühendislere rehberlik edebilir.

KAYNAKLAR

[1] Wilkinson, E.J., "An N-Way Hybrid Power Divider", IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques , Cilt no: 8, Sayı: 1 , Sayfa No: 116- 118, Ocak 1960.

[2] Gysel, U.H., "A New N-Way Power Divider/Combiner Suitable For High-Power Applications", 1975 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium, 10.1109/MWSYM.1975.1123301, 12-14 Mayıs 1975.

[3] Sütbaş, B., 'Improved Wılkınson Power Dıvıder Structures For Mıllımeter-Wave Applıcatıons', 2019.

[4] Maloratsky, L.G., "Setting Strategies for Planar Dividers/Combiners", Microwave Journal, 62-84, Feb. 2010

[5] Oraizi, H., Sharifi, A., "Optimum Design of a Wideband Two-Way Gysel Power Divider With Source to Load Impedance Matching", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques , Cilt No: 57, Sayı: 9, Sayfa No: 2238- 2248, Eylül 2009.

[6] D. M. Pozar, 'Microwave Engineering', John Wiley and Sons,2012.

[7] Deutschmann, B., Jacob, A. F., 'Compact Ultra-Broadband Power Dividers with Integrated Resistors', Proceedings of the 48th European Microwave Conference, 25–27 Eylül 2018, Madrid, Spain

[8] Yu, T., 'A Broadband Wilkinson Power Divider Based on the Segmented Structure', IEEE Transactıons On Mıcrowave Theory And Technıques, Vol. 66, No. 4, Aprıl 2018.

[9] Kasar, Ö., Gözel, M. A., Kahriman, M., 'Broadband Wilkinson Power Divider Based On Chebyshev İmpedance Transform Method', International Advanced Researches and Engineering Journal 02(03) 299-303, 2018

[10] Elibol, E., 'Güvenlik Maksatlı Doppler Radar Vericisi İçin Güç Bölücü, Güç Yükselteci, Güç Toplayıcı Devre Tasarımı, Üretimi ve Analizi', 2013

[11] Taş, V., ‘Yeni Saçılma Parametresi İlişkilerini Kullanarak Performansı Geliştirilmiş Güç Bölücüler ve Yönlü Bağlaçlar Tasarlamak İçin Yeni Teknikler’, 2015

[12] Oğuz, D., ‘A Modified Wideband Gysel Power Divider Structure’, December 2016.

[13] Ahmed, M., Kheirallah, H., Eltrass, A., Amar, A., Almslmany, A., “A New Enhanced Design of broadband Gysel Power Divider and Combiner”, 2023 International Microwave and Antenna Symposium (IMAS), 2023

[14] https://www.microwaves101.com/encyclopedias/multistage-wilkinsons,

[15] Arıcan, G., O., ‘A Compact 2-Way Multısectıon Power Dıvıder For Broadband Operatıons’, Journal of Scientific Reports-C, Aralık 2021

[16] Edwards, T., C., Steer, M., B., ‘Foundations for Microstrip Circuit Design’ Fourth Edition, John Wiley and Sons,Ltd, 2016.

[17] Li, X., Wu, B., Kong, M., Wu, X., Geng, X., Guo, C., ‘A Broadband Stripline Wilkinson 2-way Power Divider’, 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China), 09-12 Aralık 2022.

[18] Chen, X., Lin, F., ‘Research and Design of Dual-Band 1:8 Wilkinson Power Dividers for 5G Application’ 2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology

[19] Cohn, S., “A Class of Broadband Three-Port TEM-Mode Hybrids”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 16, no. 2, pp. 110–116, Şubat 1968

[20] C. Karpuz, A. K. Gorur, M. Cakir, A. Cengiz and A. Gorur, "Compact Wilkinson Power Dividers Based on Narrow Slits Loaded Transmission Lines," 2023 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Las Vegas, NV, USA, 2023, pp. 174-177.

[21] M. H. Maktoomi, D. Banerjee and M. S. Hashmi, "An Enhanced Frequency-Ratio Coupled-Line Dual-Frequency Wilkinson Power Divider," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 65, no. 7, pp. 888-892, July 2018.

[22] Y. Taryana, V. E. Bowo, Y. Sulaeman, P. K. Deni and T. Praludi, "Four Way Power Divider using Wilkinson Method for X-Band Radar," 2019 International

Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), Tangerang, Indonesia, 2019, pp. 41-45,

[23] A. Altaf, G. Mehdi, C. Xi and J. Miao, "Design and analysis of three stage one into four-way equal Wilkinson Power Divider," 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 908-912,

[24] Kasar, Ö., "Design and Implementatıon of Compact Four Way Wilkinson Power Divider for UHF Applications.", Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 2020.

[25] Yao, Y., Feng, Z.,"A band-notched ultra-wideband 1 to 4 wilkinson power divider using symmetric defected ground structure," 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 1557-1560.

[26] Y. Gillani, M. Farooq, S. M. Sarmad and H. M. Cheema, "A Wideband CPW-based 4-way Wilkinson Power Divider for X-band Applications," 2021 1st International Conference on Microwave, Antennas & Circuits (ICMAC), Islamabad, Pakistan, 2021, pp. 1-3.