



Boşluklu Vivaldi Antenin Optimizasyonunda Frekans Adım Aralığı Seçiminin Modelleme Başarısı Üzerindeki Etkisi

Effect of Frequency Step Spacing Selection on Modelling Performance in Optimization of Cavity Vivaldi Antenna

Ahmet Uluslu^{1*}, Yekta Onur Eren²

¹İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Öz

Modelleme problemlerinde eğitilen verinin çokluğu modellemenin başarısı üzerinde her zaman olumlu etkiye sahip olmayabilir. Her ne kadar giriş verilerinin belirlenmesinde gelişmiş Latin Hiperküp gibi gelişmiş örnekleme yöntemi kullanılsa da bu verilerin az veya çok olması modelleme başarısını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı bu çalışmada bir Ku bantı dikdörtgen boşluklu Vivaldi anten için geliştirilmiş ÇKA kullanılarak 10 GHz ve 20 GHz arasında modelleme başarısı üzerinde detaylı bir analiz çalışması yapılmıştır. Ku bant frekans aralığı 12 GHz ve 18 GHz olmakla birlikte bölgesel bir kapsama alanına sahip olduğundan dolayı uydu haberleşme sisteminde sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca yapılan çalışmadaki anten bant genişliği oldukça geniş olması modelleme çalışmasını oldukça güçleştirmektedir. Ek olarak başka bir güçlük ise giriş parametre sayısının çokluğu olarak karşımıza çıkmaktadır. Modellemede kullanılacak olan giriş parametrelerinin seçiminde gelişmiş bir örnekleme yöntemi olan Latin Hiperküp yöntemi kullanılmıştır. Çıkış parametresi olarak ise 3B EM benzetim yardımı ile antenin S11 (dB) parametresinin frekans ile değişimi hedef/tahmin olarak karşılaştırmalı verilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde modelleme sonucu hedef ve tahmin verilerinin neredeyse birebir örtüştüğü çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. En başarılı sonucun 50 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 100-20 eğitim-doğrulama verisi ile elde edildiği görülmüştür. Tüm bu yöntemler herhangi başka bir modelleme problemine kusursuzca uyarlanabilir.

Anahtar Kelimeler: Anten tasarım, çok bant, dikdörtgen boşluklu vivaldi, geliştirilmiş çka, Ku bant, modelleme, parametre ağırlıkları.

Abstract

In modelling problems, the abundance of trained data may not always have a positive impact on modelling success. Although advanced sampling methods such as the Advanced Latin Hypercube are used to determine the input data, having too little or too much of this data can negatively impact modelling success. For all these reasons, this study conducted a detailed analysis of the modelling success between 10 GHz and 20 GHz using an MLP developed for a Ku-band rectangular slot Vivaldi antenna. The Ku-band frequency range is 12 GHz and 18 GHz, and due to its regional coverage, it is frequently preferred in satellite communication systems. Furthermore, the antenna's relatively wide bandwidth in this study makes modelling quite challenging. Another difficulty arises from the large number of input parameters. The Advanced Latin Hypercube method was used to select the input parameters to be used in the modelling. As the output parameter, the variation of the antenna's S11 (dB) parameter with frequency was compared as target/prediction using 3D EM simulation. The results obtained demonstrate very successful results, with the target and prediction data from the modelling results being nearly identical. The most successful results were observed with 100-20 training-validation data from 120 samples generated using a 50 MHz frequency step. All of these methods are perfectly adaptable to any other modelling problem.

Keywords: Antenna design, enhanced MLP, Ku band, modelling, multi-band, parameter weights, rectangular cavity vivaldi.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: auluslu@iuc.edu.tr

Ahmet Uluslu orcid.org/0000-0002-5580-1687

Yekta Onur Eren orcid.org/0009-0003-6122-1368



1. Giriş

Havacılık, uzay ve savunma teknolojisinin hızla gelişmesi, çeşitli uçakların başarısının iyileştirilmesi ve uzay faaliyetlerinin artmasıyla birlikte, modern radarlar genellikle kapsamlı elektronik girişim, anti-radyasyon füzesi, düşük ve çok düşük irtifa penetrasyonu ve gizlilik teknolojisi gibi dört tehdit ile karşı karşıyadır. Geniş bant veya ultra geniş bant radarlar, modern radarların başarısını iyileştirmek ve yeni nesil yüksek başarılı radar geliştirmek için büyük önem taşımaktadır. Sadece radarın anti-parazit yeteneğini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda anti-radyasyon füzesiyle de etkili bir şekilde başa çıkabilir ve geniş görelî bant genişliği sayesinde daha yüksek mesafe çözünürlüğü, çoklu hedef çözünürlüğü ve daha yüksek menzîl doğruluğu elde edebilir. Radarın iki boyutlu görüntüleme, hedef sınıflandırma tanıma ve düşük irtifa takibinde önemli bir rol oynar (Guan vd. 2024).

Yaygın geniş bant antenler arasında Vivaldi anteni başta olmak üzere helezon anten vb. bulunur (Gibson 1979). Vivaldi anteni, geniş frekans bandı ve basit yapısı nedeniyle radar ve elektronik karşı önlemlerde yaygın olarak kullanılır. Literatürde 5 GHz – 30 GHz geniş bandında çalışan konik yuvalı bir Vivaldi anteni tasarımlarda karşımıza çıkmaktadır (Yu vd. 2016). Ayrıca faz dizisi uygulamaları için çalışan konik yuvalı bir Vivaldi antenlerde mevcuttur (Kambham ve Paik 2017). Ek olarak Vivaldi antenin farklı bir tasarımı olan çok geniş bantta çalışan Antipodal Vivaldi Anten tasarımları vardır (Shaikh vd. 2017). Tüm bunlara ek olarak çok geniş bantlı milimetre dalga uygulamaları için dengeli Antipodal Vivaldi'nin tasarımı mevcuttur (Wang vd. 2017). Vivaldi anteni, üstün özellikleri nedeniyle duvardan görüntüleme sistemi için en iyi seçimlerden biri olarak kabul edilir. Ayrıca yüksek kazanç, geniş bant, basit yapı ve imalatı kolaydır. Ek olarak, bu anten türü dizi tasarımı için de uygundur. Vivaldi anteni ilk olarak Gibson tarafından sunulmuştur. Bu anten geniş bant karakteristiği sağlayabilen doğrusal polarizedir ve düzlemsel yapıya sahiptir (Gibson, 1979). Geleneksel Vivaldi anteni baskılı devre teknolojisinden yapılmıştır. Hafiflik, düşük maliyet ve basit üretim avantajlarına sahiptir. Ancak, büyük mikroşerit kaybı, karmaşık kurulum ve entegrasyon ve düşük yapı mukavemeti gibi bazı dezavantajları da vardır. Rick W. Kindt, tüm metal Vivaldi anteni hakkında çok fazla araştırma yapmıştır (Kindt ve Pickles 2009, Kindt ve Pickles 2010). Çalışmalarda belirli işlevler için bazı çift kutuplu tüm metal Vivaldi antenlerini geliştirmiştir (Gulati vd. 2017, Yan vd. 2016, Yılmaz ve Dogan, 2017). Yapılan çalışmada, daha küçük boyuta ve daha genel uygulamalara sahip olması için 10 GHz – 20 GHz bandında çalışan yeni nesil geniş bant-

lı dikdörtgen boşluklu Vivaldi anten modellenmesi üzerine çalışılacaktır.

Böyle bir görevi başarmak, önemli miktarda deneme yanılma gerektiren çok amaçlı çok boyutlu bir optimizasyon süreci gerektirir. Bu süreç genellikle araştırmacıları modelleri için bir karar almaya zorlar. Araştırmacılar ya hızlı ve hesaplama açısından verimli tasarım optimizasyonu elde etmek için düşük doğrulukta bir kurs modeli kullanmalı ya da nispeten uzun veya uygulanamaz tasarım optimizasyon süreci genişliğinde yüksek doğrulukta ince örgülü tasarım kullanılmalıdır (Mahouti 2019). Doğru, güvenilir ve hesaplama açısından verimli bir optimizasyon sürecine sahip olmak için en etkili çözümlerden biri veri odaklı modellerin kullanımınıdır. Veri odaklı modeller, parametre ayarı (Wang vd. 2018), istatistiksel analiz ve çok amaçlı tasarım gibi uygulamalar için birçok araştırma tarafından kullanılmıştır (Deb vd. 2002, Ochoa ve Cangelaris 2013, Rossi vd. 2014). Literatürde, polinom regresyonu, kriging enterpolasyonu, radyal baz fonksiyonları, destek vektör regresyonu, polinom kaos genişlemesi ve yapay sinir ağları gibi mikrodalga yapıların vekil tabanlı modellenmesi için birçok yapay zekâ tabanlı yöntem bulunmaktadır (Barmuta vd. 2015, Cai vd. 2018, Chavez-Hurtado ve Rayas-Sanchez 2016, Petrocchi vd. 2017, Queipo vd. 2005, Rayas-sanchez ve Gutierrez-Ayala 2006).

Bu çalışmada, bir Ku bandı dikdörtgen boşluklu Vivaldi antenin geliştirilmiş Çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) kullanılarak 10 GHz – 20 GHz arasında modelleme başarısı üzerinde detaylı bir analiz çalışması yapılacaktır. İlk olarak Latin Hiperküp örnekleme kullanılarak, Elektromanyetik (EM) benzetimi ile bir veri kümesi üretilmiştir. Kullanılan örnekleme yöntemi daha önce birçok çalışmada başarılı sonuçlara sahip bir yöntemdir (Uluslu 2022, Uluslu 2023). Fakat bu çalışmalarda optimum modelleme koşullarına değinilmemiştir. Bu çalışmada ÇKA kullanılarak frekans adım aralığının modelleme başarısı üzerindeki etkisi farklı eğitim ve doğrulama veri sayıları ile gösterilecektir. Böylece optimum modelleme koşulları tespit edilmiş olacaktır.

Özetle çalışmada öne çıkanlar:

- o Yapılan çalışmada havacılık ve uzay teknolojisi başta olmak üzere savunma sistemleri için bir Ku bant 12 GHz – 18 GHz çok bantlı bir dikdörtgen boşluklu Vivaldi antenin geliştirilmiş ÇKA kullanılarak 10 GHz – 20 GHz arasında modelleme başarısı üzerinde detaylı bir analiz çalışması yapılacaktır.
- o Çalışmada frekans adım aralığı seçiminin başarısına et-

kisi farklı algoritma, mimari ve veri sayıları ile detaylı olarak analiz edilmiştir.

- o Modelleme sonuçları 3B EM benzetimi yardımı ile antenin S_{11} (dB) (genlik) parametresinin frekans ile değişimi hedef/tahmin olarak karşılaştırmalı verilmiştir.
- o Giriş parametre sayısının çok olması ve antenin S_{11} (dB) (genlik) parametresinin oldukça değişken olması problemi oldukça zorlaştırmaktadır.

Bilindiği üzere Vivaldi antenin karmaşık yapısı dolayısı ile benzetim sonuçları çok uzun süreler alabilmektedir. Bu gibi durumlarda modellemeye olan ihtiyaç açığa çıkmaktadır. Bu çalışmada ise optimum modelleme koşulları tespiti üzerine detaylı bir analiz çalışmasını barındırmaktadır. Çalışma aynı zamanda tasarım giriş parametrelerinin modelleme başarısı üzerindeki ağırlığını da ortaya çıkarmaktadır.

2. Kaynak Araştırması

Konik yuvalı antenler ve bunların çeşitleri son zamanlarda 1 GHz – 18 GHz frekans aralığını kapsayan haberleşme uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Yer altı radar (GPR) uygulamaları için yüksek performanslı geniş bantlı bir Vivaldi antenine sahip olmak için Frekans seçici yüzeyler (FSS) yüklü yapılara sahip benzersiz bir tasarım önerilmiştir. Yapılan çalışma sonucu elde edilen performans sonuçları literatürden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak ilgili çalışmada önerilen anten, 0,6 GHz – 4 GHz çalışma aralığında yüksek kazanç performansına (13,6 dBi) sahiptir (Mahouti vd. 2023). Farklı bir çalışmada, duvardan geçen radar sistemleri uygulamaları için bir mikro şeritten yuvaya geçişle beslenen bir Vivaldi anteninin tasarımını sunulmuştur. Bu makale 1 GHz ile 11,4 GHz arasında bir çalışma frekansına sahip bir Vivaldi antenini vurgulamaktadır. Elde edilen tepe kazancı 10,18 dBi olarak verilmiştir. Kazanç ise, 1 GHz ile 8 GHz arasında 4 dBi'den daha büyüktür. Mevcut Vivaldi anteni, anten performansı üzerindeki etkilerini incelemek için farklı parametreler için tasarlanmıştır (Amador vd. 2024). Bir diğer farklı bir makalede, radyo astronomi uygulamaları için 5 GHz bant genişliğine sahip Vivaldi anten dizisi rapor edilmiştir (Tianang vd. 2018). Parazitik bir elemana sahip eliptik yama ve 66 mm açıklık boyutuna sahip 6 GHz – 21 GHz'i kapsayan Antipodal bir Vivaldi anteni literatürde mevcuttur (Bang vd. 2018). Literatürde ayrıca 2,5'ten düşük bir VSWR ile 5 GHz – 20 GHz üzerinde çalışan ultra geniş bantlı küçük açıklıklı konik yuvalı faz dizi ante-

ni de görülebilir (NagaPavani vd. 2018). Literatürde ayrıca 6 GHz – 18 GHz üzerinde parlama tasarımı şekillendirmeli dikdörtgen yuvalara sahip kompakt Antipodal bir Vivaldi anteni de bildirilmiştir (Bhagyalakshmi vd. 2018). 12 GHz bant genişliğine sahip ve 45°'ye kadar tarama yapan, 2,5'ten düşük VSWR değerine sahip, 700 MHz – 9 GHz bant genişliğini kapsayan ultra geniş bantlı genişletilmiş çentikli dizi radyatör bildirilmiştir (Coburn ve McCormick 2018). Bir çalışmada, tıbbi görüntüleme, gözetleme veya iç mekân lokalizasyonu gibi ultra geniş bant uygulamaları için tasarlanmış ultra geniş bant sistemlerine uygun geniş bantlı bir Vivaldi anten sunulmuştur. Anten, 3 boyutlu bir elektromanyetik benzetim aracı kullanılarak tasarlanmış ve optimize edilmiştir. İlgili çalışmada antenin bant genişliğinin, başka herhangi bir anten parametresini değiştirmeye gerek kalmadan, mikroşerit beslemenin toplam uzunluğu ve konumu değiştirilerek değiştirilebileceği gösterilmiştir (Güzelkara ve Kılıç 2025). Bir diğer çalışmada, CST Studio bilgisayar programı ve bu programın optimize yöntemlerini kullanarak; imal edilen Antipodal Vivaldi anteninin, üretim ve ölçümlerini kapsamaktadır. İlgili çalışmanın hedefi, antenin çeşitli mobil haberleşme teknolojileriyle uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için, istenen frekanslarda, optimizasyon işlemi uygulanmasıyla elde edilen antenin tasarım ve üretim süreçlerini geliştirmektir. Elde edilen sonuçlarda 2,64 GHz merkez frekansı için bant genişliği -17,719 dB'nin 3 dB fazlası olan -14,719 dB verisinin ölçüldüğü sol ve sağ aralıklar arası olan 2,53 GHz ve 2,77 GHz frekansları arası olup bant genişliği yaklaşık 240 MHz olduğu görülmüştür (Duman ve Berk 2024). Ulusal ve uluslararası literatür örneklerinden de görülebileceği üzere Vivaldi anten çalışmaları günümüzde yaygınlığını sürdürmektedir. Bununla birlikte literatürde mevcut olan tüm metal Vivaldi antenlerin hepsi geniş bant aralığına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Dar bant genişliğine sahip Vivaldi anten tasarımı nadiren rapor edilmiştir. Vivaldi anten karmaşık bir yapıya sahip olduğundan dolayı benzetim sonuçları çok uzun süreler alabilmektedir. Bu sebep modelleme ihtiyacını doğurmaktadır. Bu makalede, bir Ku bandı dikdörtgen boşluklu Vivaldi anten geliştirilmiş, geri dönüş kaybı üzerindeki etki incelenmiş ve analiz edilmiştir. Tek bir bantta 10 GHz – 20 GHz'i kapsayan geri dönüş kaybı için modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemler boyunca MATLAB 2023B versiyonu kullanılmıştır. Anten tasarımı ve modelleme başarısı sonraki bölümlerde sunulmakta ve tartışılmaktadır.

3. Gereç ve Yöntemler

3.1. Matematiksel Model

Boşluklu Vivaldi anteni, dikdörtgen veya dairesel bir boşluğu olan üstel veya doğrusal konik toprak düzleminde 16 GHz civarında rezonans veren bir Vivaldi anteni oluşturur. Vivaldi boşluklu anteni, büyük mikro şerit kaybı, karmaşık kurulum ve entegrasyon gibi Antipodal antenin eksikliklerini önler. Vivaldi boşluklu antenin geniş bant özellikleri, onu havacılık ve uzay teknolojilerinde kullanılan faz dizilimi uygulamaları için uygun hale getirir. Çalışma için Çizelge 1'de gösterilen özellik değerlerine sahip bir üstel konik toprak düzleminde dikdörtgen bir boşluğa sahip varsayılan bir Vivaldi anteni oluşturur. Anten, tipik olarak 10 GHz – 20 GHz frekans aralığında çalışır.

3.1.1. Anten Tasarımı

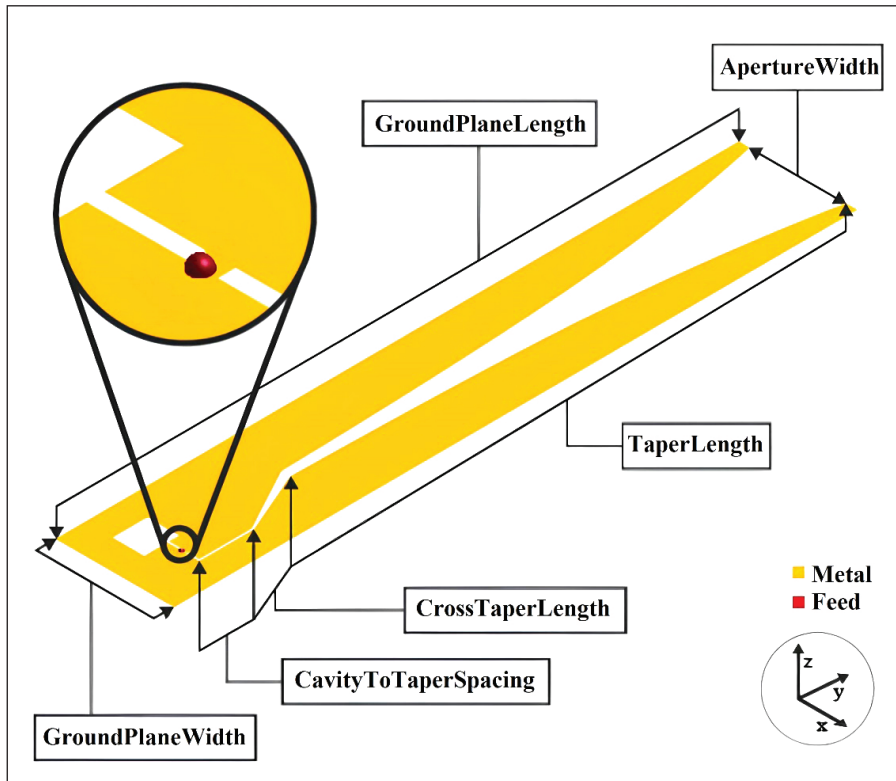
Şekil 1'de gösterildiği gibi, anten konik bir yuva hattından oluşur. Çizelge 1'de gösterildiği gibi, uzunluk ve genişlik açısından dikdörtgen bir boşluk, sabit yuva hattını geniş bir bant ile eşleştirmek için doldurur. Şekil 1'de gösterildiği gibi, merkez iletken yuva hattının diğer ucuna bir koaksiyel hat bağlar. Yan duvarlar ve arka duvarlar mekanik sertliği sağlamak için dahildir. Tek antenin açıklık boyutu değişken ola-

rak, yan duvarlar sabit olarak seçilir. Temel yapısı Şekil 1'de verilmiş olanın antenin tasarım parametre detayları ise Çizelge 1'de detaylı olarak verilmiştir. Önerilen model 6 tanesi değişken olmak üzere 14 farklı parametreden oluşmaktadır. Çalışmada ölçüm ve hesaplama işlemlerinde MATLAB R2023B versiyonunda mevcut anten araç kutusu kullanılacaktır. Bunun haricinde hesaplama için herhangi bir ampirik denklem kullanılmayacaktır. Çizelge 1, tasarımda kullanılan parametrelerin merkez değerleri ve değer aralıkları hakkında ayrıntılı bilgi sağlar.

Çok bantlı dikdörtgen boşluklu Vivaldi anteni için modellemede kullanılacak olan değişkenlere ait detaylar Çizelge 1'de detaylı olarak gösterilmiştir.

3.2. Önerilen Yöntem

Bu çalışmada belirlenen aralıktaki verilerin Latin Hiperküp örnekleme yöntemi ile seçilerek Çok katmanlı algılayıcı kullanılarak modellemesi üzerine detaylı bir çalışma yapılacaktır. Buradaki asıl amaç farklı frekans adım aralığı seçiminin başarı üzerindeki etkisini belirlemektir. Ku bant aralığı için belirlenen (10 GHz – 20 GHz) frekans aralığında 4 farklı frekans adımı (40MHz, 50 MHz, 80MHz ve 100MHz) çalışmalar yapılmış olup her bir çalışmada farklı eğitim ve doğrulama veri sayıları için farklı başarı sonuçları sergilene-



Şekil 1. Boşluklu Vivaldi antenin şematik görünümü ve tasarım parametreleri (vivaldi Offset Cavity, n.d.).

Çizelge 1. Çok bantlı Vivaldi antenin tasarımı için parametrelere kodlarının tanımı.

Parametre Kodu	Tanımı	Merkez Değeri	Değer Aralığı
Taper Length Konik Uzunluğu	Çapraz konik uç noktasından ölçülen konik uzunluk	105 (mm)	±%10
Aperture Width Açıklık Genişliği	Açıklık genişliği	20 (mm)	±%10
Cross Taper Length	Çapraz konik uzunluğu	13,1 (mm)	±%10
Cavity To Taper Spacing	Boşluktan çapraz koniğe geçiş mesafesi	10,7 (mm)	±%10
Ground Plane Length	Toprak düzlemi uzunluğu	140 (mm)	±%10
Ground Plane Width	Toprak düzlemi genişliği	24 (mm)	±%10
Tapered Slot Width	Konik ucun genişliği	2 (mm)	Sabit
Taper Offset	Y eksenı boyunca orta-Tapered Slot Width'ten işaretli mesafe	-6,3 (mm)	Sabit
Slot Line Width	Yuva çizgisinin genişliği	0,5 (mm)	Sabit
Opening Rate	Konik açıklık oranı	25	Sabit
Cavity Shape	Boşluğun şekli	"Dikdörtgen"	Sabit
Cavity Offset	Antenin besleme noktasından x ve y yönü boyunca mesafe	[4,8 3] (mm)	Sabit
Feed Offset	Zemin Düzlemi Genişliğinin simetri çizgisinden besleme noktasına kadar olan işaretli mesafe	-3 (mm)	Sabit
Conductor	Metal malzeme türü	Metal ("PEC")	Sabit

cektir. İlerleyen kısımlarda Latin Hiperküp örnekleme yöntemi ve Çok katmanlı algılayıcı üzerine temel bilgiler verilerek önerilen model tasarımı ile bölüm sonuçlandırılacaktır.

3.3. Latin Hiperküp Örnekleme

Çok boyutlu bir dağılımdan parametre değerlerinin neredeyse rastgele bir örneğini bulmak için Latin Hiperküp örnekleme (LHS) istatistiksel bir tekniktir. Bilgisayar deneyleri yapmak veya Monte Carlo entegrasyonu yapmak için genellikle örnekleme tekniği kullanılır (McKay vd. 1979). Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndan Michael McKay tarafından LHS tanımlanmıştır (McKay vd. 1979). Buna benzer bir yaklaşım ise Vilnis Eglajs tarafından önerilmiştir (Hardin ve Sloane 1993). Ronald L. Iman ve arkadaşları tarafından başka bir yaklaşım geliştirilmiştir (Iman vd. 1981). Daha sonra kapsamlı bilgisayar yönergeleri yayınlanmıştır (Hardin ve Sloane 1993). İstatistiksel örneklemede, her satırda ve sütunda yalnızca bir örnek varsa, kare bir ızgara, örnek pozisyonlarını içeren bir Latin karesidir. Latin hiperküp olarak bilinen kavram, herhangi bir sayıda boyuta genelleştirilebilir ve bu nedenle, onu içeren her eksen hizalı hiper düzlemdeki tek örneklerdir (McKay vd. 1979). Bir fonksiyonun örnekleme sırasında, N değişkenler ve her değişkenin aralıkları şu şekilde bölünür, burada M eşit olasılık aralıklarını

temsıl eder. Daha sonra, Latin hiperküp gereksinimlerini karşılayacak şekilde örnek noktaları yerleştirilir. Bu durum, bölümlerin sayısını zorlaştırırken, M her değişken için eşit olmalıdır. Bu örnekleme şeması bağımlıdır çünkü daha büyük (değişken) boyutlarda örnekler gerektirmez. Rastgele örneklerin tek tek alınabilmesi ve şimdiye kadar hangi örneklerin alındığını hatırlayabilmesi başka bir avantajdır.

Latin Hiperküp örnekleme, ortogonal örnekleme ve rastgele örnekleme arasındaki farklılıklar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. Rastgele örneklemede, önceden oluşturulan örnek noktaları dikkate alınmadan yeni örnek noktaları oluşturulur. Kaç örnek noktasına ihtiyaç duyulduğu konusunda önceden bilgi sahibi olmanıza gerek yoktur.
2. Latin Hiperküp örneklemede ilk olarak, kaç örnek noktası kullanılacağı ve her örnek noktasının hangi satır ve sütunda alındığı hatırlanmalıdır. Bu yapılandırma, bir satranç tahtasında birbirini tehdit etmeyen kalelere benzer.
3. Ortogonal örnekleme, örnek uzayı eşit sayıda olası alt uzaylara ayırır. Bir Latin Hiperküp örneği oluşturmak için tüm örnek noktaları aynı anda seçilir, böylece her alt uzayın aynı yoğunlukta örneklendiği garanti edilir.

Geleneksel rastgele örnekleme, herhangi bir güvence veremeyen yalnızca bir dizi rastgele sayıdır; ortogonal örnekleme, rastgele sayılar kümesinin gerçek değişkenliği çok iyi temsil ettiğinden emin olunur. Ayrıca bu yöntem ile aşırı öğrenmenin önüne geçilmiş olur.

3.4. Çok Katmanlı Algılayıcı

Çok katmanlı algılayıcılar (ÇKA), ileri beslemeli modern bir yapay sinir ağıdır. En az üç katmanda düzenlenmiş, doğrusal olmayan aktivasyon işlevine sahip tam olarak bağlı nöronlardan oluşur ve doğrusal olarak ayıramayan verileri ayırt etme yeteneğine sahiptir (Cybenko 1989). Geri yayılım yöntemi, gelişmiş ileri beslemeli ağların eğitiminin temelini oluşturur (Kelley 1960, Linnainmaa 1976) ve “geri besleme” sinir ağları olarak da bilinir (Van Der Malsburg 1986). Çok katmanlı algılayıcılar, yalnızca doğrusal olarak ayrılabilir verileri ayırt edebilen tek katmanlı algılayıcıları oluşturmak için yapılan bir çabadır. Geleneksel olarak doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu olarak kullanılan bir Heaviside adım fonksiyonu, algılayıcı tarafından kullanılmıştır. Bununla birlikte, geri yayılım algoritması için gelişmiş Çok katmanlı algılayıcıların sigmoid veya ReLU gibi sürekli aktivasyon özellikleri kullanması gerekir (Werbos vd. 2005). Çok katmanlı algılayıcılar, derin öğrenme için hala popüler bir seçenektir ve birçok alanda kullanılabilir (Gardner ve Dorling 1998).

3.4.1. Aktivasyon Fonksiyonu

Çok katmanlı bir algılayıcıda her nöronun doğrusal aktivasyon fonksiyonu varsa, yani ağırlıklı girdileri her nöronun çıktısına eşleyen doğrusal bir fonksiyon varsa, doğrusal cebir herhangi bir katmanın iki katmanlı bir girdi-çıktı modeline indirgenebileceğini gösterir. Bazı ÇKA nöronları, biyolojik nöronların aksiyon potansiyellerini veya ateşleme frekansını modellemek için doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu kullanır.

Sigmoidler, tarihsel olarak yaygın olan iki aktivasyon fonksiyonudur:

Birincisi, -1 ile 1 arasında değişen hiperbolik bir tanjanttır ve diğeri, şekil olarak benzer olan ancak 0 ile 1 arasında değişen lojistik fonksiyondur. i nöron veya i düğüm ve v_i giriş bağlantılarının ağırlıklı toplamıdır. Doğrucu işlevleri alternatif aktivasyon işlevleri olarak önerilmiştir. Radyal tabanlı işlevler, radyal tabanlı ağlarda kullanılan, denetlenen sinir ağı modellerinin başka bir türü olan aktivasyon işlevleri arasındadır.

Derin öğrenmede, sigmoidlerle ilgili sayısal sorunları çözenin olası yollarından biri olarak doğrultulmuş doğrusal birim (ReLU) daha popüler hale geldi.

3.4.2. Katmanlar

Çok katmanlı algılayıcılar, bir giriş ve bir veya daha fazla gizli katmana sahip üç veya daha fazla doğrusal olmayan şekilde etkinleştirilmiş düğüm katmanından oluşur. Çok katmanlı algılayıcılar tamamen bağlı olduğundan, bir katmandaki her düğüm diğer katmandaki her düğüme belirli bir ağırlıkla bağlanır.

3.4.2.1. Giriş veya görünür katmanlar

Veri kümenizden girdi alan alt katman, ağı açığa kalan kısmı olduğu için görünür katman olarak adlandırılır. Genellikle bir sinir ağı, veri kümenizdeki her giriş değeri veya sütun için bir nöron içeren görünür bir katmanla çizilir.

3.4.2.2. Gizli katmanlar

Giriş katmanından sonraki katmanlara, girdiye doğrudan maruz kalmadıkları için gizli katmanlar denir. En basit ağ yapısı, gizli katmanda değeri doğrudan çıktı olarak veren tek bir nörona sahip olmaktır.

3.4.2.3. Çıkış katmanı

Son gizli katmana çıktı katmanı denir ve problem için gerekli formata karşılık gelen bir değer veya değer vektörünün çıktısını üretmekten sorumludur.

3.4.3. Öğrenme

Her veri parçası işlendikten sonra algılayıcı, beklenen sonuca göre bağlantı ağırlıklarını değiştirerek öğrenir. Doğrusal algılayıcıdaki en küçük ortalama kareler, geri yayılım olarak bilinen denetlenen öğrenmenin bir örneğidir. Bu süreçte, ağı çıktılar ile gerçek değerler arasındaki hata hesaplanır ve bu hata, ağırlıkları ve biasları ayarlamak için kullanılır.

3.4.3.1. Veri hazırlama

Öncelikle verilerinizi sinir ağı üzerinde eğitime hazırlamanız gerekir. Bu kısımda veriler hazırlanır.

3.4.3.2. Stokastik gradyan inişi

Sinir ağları için klasik ve hala tercih edilen eğitim algoritması stokastik gradyan inişi olarak adlandırılmaktadır. Bu, bir seferde bir veri satırının ağı girdi olarak sunulduğu yerdir. Ağı, girdiyi yukarı doğru işler ve sonunda bir çıktı değeri üretmek için nöronları etkinleştirir. Bu, ağıda ileri geçiş olarak adlandırılır. Bu, ağı eğitildikten sonra yeni veriler hakkında tahminlerde bulunmak için de kullanılan geçiş türüdür.

3.4.3.3. Ağırlık güncellemeleri

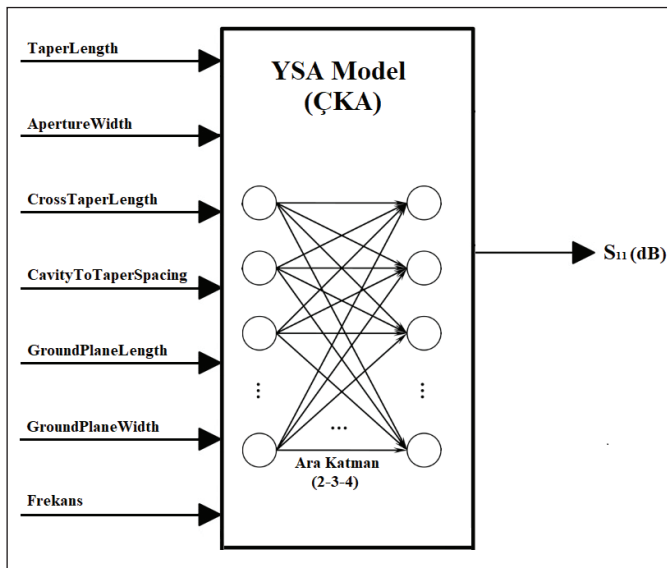
Ağıdaki ağırlıklar, her eğitim örneği için hesaplanan hatalardan güncellenebilir ve buna çevrimiçi öğrenme denir. Bu, ağıda hızlı ama aynı zamanda kaotik değişikliklere yol açabilir. Alternatif olarak, hatalar tüm eğitim örneklerine kaydedilebilir ve ağ sonunda güncellenebilir. Bu yöntemle toplu öğrenme denir ve genellikle daha karardır.

3.4.3.4. Tahmin

Bir sinir ağı eğitildikten sonra tahminlerde bulunmak için kullanılabilir.

3.5. Önerilen Model

Çok katmanlı algılayıcılar ve Yapay sinir ağları giriş, çıkış ve gizli katmanlar içerir. Bu tür ağların yapısı gereği, çoklu giriş/çıkış modelleme yeteneğine sahiptir (Uluslu 2022). Dikdörtgen boşluklu Vivaldi antenin modellenmesinde yararlanılacak olan Çok katmanlı algılayıcı 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 nörondan oluşan iki, üç ve dört gizli katmana sahip olacak şekilde farklı durumlar için tasarlanmıştır. Esinlenen yapılar farklı çalışmalarda başarılı sonuçlara sahiptir (Uluslu 2021, Uluslu 2022). Giriş ve çıkış katmanlarında farklı ağırlık katsayıları vardır. Eğitim aşaması, çıkan eğitim hata oranını en aza indirene kadar modelleme çalışmasını sürdürür. Bu amaca ulaşmak için katmanlar arasında iki farklı aktivasyon fonksiyonunu bir araya getirmek kullanılmıştır. Gizli katman, son nöronda “logsis” aktivasyon fonksiyonu olarak kullanırken, diğer katmanlar için “tansig” tercih edilir. Literatürdeki çalışmalara benzer şekilde, aktivasyon fonksi-



Şekil 2. Dikdörtgen boşluklu Vivaldi antenin modellenmesi için kullanılacak olan kara kutu modeli.

yonları tercih edilmiştir (Mahouti 2019). Kara kutu modeli Vivaldi antenin 6 değişken parametresine frekans parametresi de dahil edilerek toplamda 7 giriş parametresi olacak şekilde tasarlanmıştır. Çıkış parametresi olarak ise S_{11} (dB) (genlik) parametresi kullanılacaktır. Şekil 2’de önerilen ağ modelinin kara kutu modellemesini göstermektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

Bulgular ve tartışma bölümü 4 kısımdan oluşmaktadır. Tüm kısımlarda kullanılacak olan ağ için kara kutu modeli Bölüm 3.5 altındaki Şekil 2’de verilmiştir. Algoritmaların Bayes düzenliştirmesinin geriye yayılımı (trainbr), Levenberg-Marquardt geri yayılımı (trainlm), Dayanıklı geri yayılım (trainrp) ve Ölçeklenmiş eşlenik gradyan geri yayılımı (trainscg) den oluşan ağ modeli ile çalışılmış fakat içlerinde en başarılı olan “trainbr” için sonuçlar verilmiştir. Ağın mimarisi 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 nörona sahip 2, 3 ve 4 ara katmanlı olacak şekilde karmaşık olarak ayarlanacaktır. 2 ara katmana sahip ağ modeli 10, 15, 20, 25 ve 30 nöron sayıları ile tasarlanmıştır. 3 ara katmanlı modelde ise 10, 15, 20, 25 nörona sayılarına sahiptir. 4 ara katmana sahip ağ modeli ise 5, 10, 15, 20, 25 nöron sayılarına sahiptir. Seçilen tüm bu algoritma ve mimariye sahip modeller daha fazla veri arasında ayıklanarak en başarıları seçilerek sergilenmiştir. Her kısımdaki kullanılan veriler Latin Hiperküp örnekleme yöntemi ile seçilmiş ve birebir özdeştir. Literatür taramasında en düşük örnekleme boyutu olarak 144 olarak tespit edilmiştir (Akdagli vd. 2013). Yapılacak çalışmada ise örnekleme boyutu 120 olarak her kısım için ortaktır ve bu rakam diğer literatür örneklerinden daha düşüktür. Eğitim-doğrulama veri sayısı olarak 4 farklı rakama seçilmiş olup bunlar 70-50, 80-40, 90-30, 100-20 olarak seçilmiştir. Oran olarak bunlar sırası ile %70, %50, %25 ve %16 ya denk gelmektedir. Bu nedenle doğrulama hata gerçekliği artacaktır. Eğitim ve doğrulama verilerinin ayrımı, verilen literatür örneklerinde olduğu gibi rastgele olarak yapılmıştır. Çizelgelerde modelleme başarısını değerlendirmek için ortalama kare hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve R kare (R^2) sıklıkla kullanılır. Her kısımda ayrıca bir algoritma için seçilen belirli sonuçlar grafik olarak gösterilecektir. Tüm bu optimizasyon prosedürlerini gerçekleştirmek için 13900K Intel Core i9 CPU, 5.80 GHz işlemci, 16 GB grafik kartı belleği ve 32 GB rastgele erişim belleği ile donatılmış bir bilgisayar kullanılmıştır. Ek olarak, tüm modelleme işlemleri otuz üç dakikada tamamlandı. Bu da ortalama iki dakikaya tekabül etmektedir. Çizelge 2, ilerleyen dört kısımda kullanılacak olan eğitim ve doğrulama veri setlerinin sayısal bilgilerini içermektedir.

4.1. 40 MHz Frekans Adım Aralığı için Modelleme Başarı Sonuçları

Bu kısımda 10 GHz – 20 GHz arasında 0,04 GHz frekans lineer adım aralığı kullanılarak edilen sonuçların modellenmesi üzerine bir çalışma yapılacaktır. Böylelikle her bir örnek için 251 veri oluşmaktadır. Bunu 120 örnek sayısı ile çarparsak 251x120 toplam örnek sayısını elde etmiş oluruz. 120 örnek veri 4 farklı şekilde modellenmiştir. İlkinde 70 eğitim ve 50 doğrulama verisi, ikincisinde 80 eğitim ve 40

doğrulama verisi, üçüncüsünde 90 eğitim ve 30 doğrulama verisi ve sonuncusunda 100 eğitim ve 20 doğrulama verisi olmak toplam 120 örnek veri kullanılacaktır. Toplamda algoritma 4 farklı koşu yapmış olup her bir farklı koşu için toplam eğitim ve doğrulama verilerine karşılık gelen kısımlar için MSE, MAE ve R^2 her bir koşu için hesaplanmıştır. 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi için 40 MHz frekans adım aralığında modelleme başarı sonuçları sırası ile Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 2. Eğitim ve doğrulama veri seti detayları.

Parametre Kodu	Değer Aralığı	Örnekleme Yöntemi	Örnek sayısı (Bölüm 4.1)	Örnek sayısı (Bölüm 4.2)	Örnek sayısı (Bölüm 4.3)	Örnek sayısı (Bölüm 4.4)
Taper Length (mm)	105 ±%10					
Aperture Width (mm)	20 ±%10					
Cross Taper Length (mm)	13,1 ±%10	LHS	Eğitim: 70-80-90-100			
Cavity To Taper Spacing (mm)	10,7 ±%10		Doğrulama: 20-30-40-50			
Ground Plane Length (mm)	140 ±%10		Toplam: 120			
Ground Plane Width (mm)	24 ±%10					
Frekans (GHz)	10 – 20	Lineer	251	201	126	101
Toplam Örnek	-	-	120x251	120x201	120x126	100x100

Çizelge 3. 40 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 70-50 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R^2)	Doğrulama Hata (R^2)
[10 15]	4,82977	6,22209	1,82202	2,01215	0,67852	0,57476
[15 20]	0,25800	1,18027	0,36666	0,70268	0,98548	0,93267
[20 15]	0,23800	4,67481	0,35476	0,84881	0,98661	0,78392
[20 20]	3,00861	36,25579	1,40366	4,53255	0,81477	0,21480
[20 25]	0,18219	1,38449	0,30514	0,82857	0,98977	0,92244
[25 20]	0,21989	2,44395	0,33461	1,10543	0,98764	0,87143
[25 25]	0,14295	2,46438	0,26907	1,09132	0,99198	0,87572
[30 20]	0,16353	4,03268	0,28987	1,18268	0,99082	0,80951
[10 15 20]	0,19100	2,57464	0,31741	0,96232	0,98927	0,86473
[10 20 25]	0,90626	65,63416	0,67282	4,17663	0,94802	0,24435
[15 20 25]	0,13295	9,88911	0,25930	2,37490	0,99254	0,50474
[20 15 10]	0,17317	1,46459	0,30483	0,77679	0,99028	0,91928
[25 20 10]	0,12076	2,53661	0,25153	1,08735	0,99323	0,86341
[25 20 15]	0,14307	4,57601	0,27548	1,33194	0,99198	0,76811
[10 15 20 25]	0,58364	14,86233	0,57311	2,70481	0,96685	0,44899
[20 15 10 5]	1,57219	79,11950	0,89813	3,72761	0,90793	0,25898
[20 15 15 10]	0,18654	26,73972	0,32144	3,32455	0,98952	0,20552
[25 20 20 15]	0,07113	6,58745	0,19441	1,46455	0,99602	0,75559

Çizelge 4. 40 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 80-40 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları.

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,52323	2,09862	0,53408	0,82480	0,97027	0,88204
[15 20]	0,30608	1,38306	0,40700	0,75219	0,98272	0,92342
[20 15]	0,30324	4,38539	0,40238	0,86084	0,98288	0,79928
[20 20]	0,19694	0,47523	0,31116	0,47586	0,98891	0,97286
[20 25]	0,18461	1,36300	0,30558	0,71727	0,98961	0,92671
[25 20]	0,19292	1,60874	0,31761	0,86262	0,98914	0,90976
[25 25]	0,24175	1,86184	0,34601	0,93157	0,98638	0,89884
[30 20]	0,15307	2,09862	0,28024	0,99426	0,99139	0,88264
[10 15 20]	0,29680	4,55983	0,40529	0,93556	0,98325	0,77765
[10 20 25]	0,14634	1,53820	0,28087	0,67218	0,99177	0,91804
[15 20 25]	1,36225	27,80770	0,87271	3,56555	0,92060	0,22993
[20 15 10]	0,17116	1,50324	0,29955	0,76299	0,99037	0,91680
[25 20 10]	0,13630	3,85957	0,27191	0,98808	0,99234	0,81514
[25 20 15]	0,11286	1,55772	0,23678	0,82016	0,99366	0,91228
[10 15 20 25]	0,13168	22,32674	0,26067	1,57745	0,99260	0,48783
[20 15 10 5]	1,93856	11,89824	1,06025	2,63079	0,88486	0,40405
[20 15 15 10]	0,13055	14,23371	0,25917	2,73980	0,99267	0,29542
[25 20 20 15]	0,36312	70,21033	0,44865	5,65104	0,97946	0,12261

Çizelge 5. 40 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 90-30 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları.

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,44320	0,67248	0,48481	0,58292	0,97481	0,96150
[15 20]	0,23931	0,49519	0,35442	0,48827	0,98648	0,97182
[20 15]	0,22251	0,78823	0,34397	0,56579	0,98743	0,95595
[20 20]	0,23033	1,83269	0,34964	0,84874	0,98699	0,89962
[20 25]	0,20252	3,21279	0,33092	1,18781	0,98857	0,84981
[25 20]	0,19649	1,62055	0,32355	0,87058	0,98891	0,90587
[25 25]	0,17215	2,26622	0,29902	1,07193	0,99029	0,87796
[30 20]	0,15207	3,04239	0,28223	1,10889	0,99143	0,86079
[10 15 20]	0,17537	0,56383	0,30083	0,47137	0,99011	0,96868
[10 20 25]	0,13678	0,53931	0,25997	0,48778	0,99229	0,97011
[15 20 25]	4,70021	9,15239	1,79822	2,38650	0,68733	0,40689
[20 15 10]	0,18066	1,19923	0,31210	0,70690	0,98981	0,93200
[25 20 10]	0,14159	1,95135	0,27662	0,86481	0,99202	0,89426
[25 20 15]	0,13424	4,71142	0,26612	1,37170	0,99244	0,76746
[10 15 20 25]	0,11380	0,65094	0,23764	0,51791	0,99359	0,96453
[20 15 10 5]	3,04097	13,73523	1,37981	2,75324	0,81158	0,27997
[20 15 15 10]	0,12676	9,14197	0,25647	2,24266	0,99286	0,50006
[25 20 20 15]	0,09713	5,88648	0,22234	1,38191	0,99453	0,72132

Çizelge 6. 40 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 100-20 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

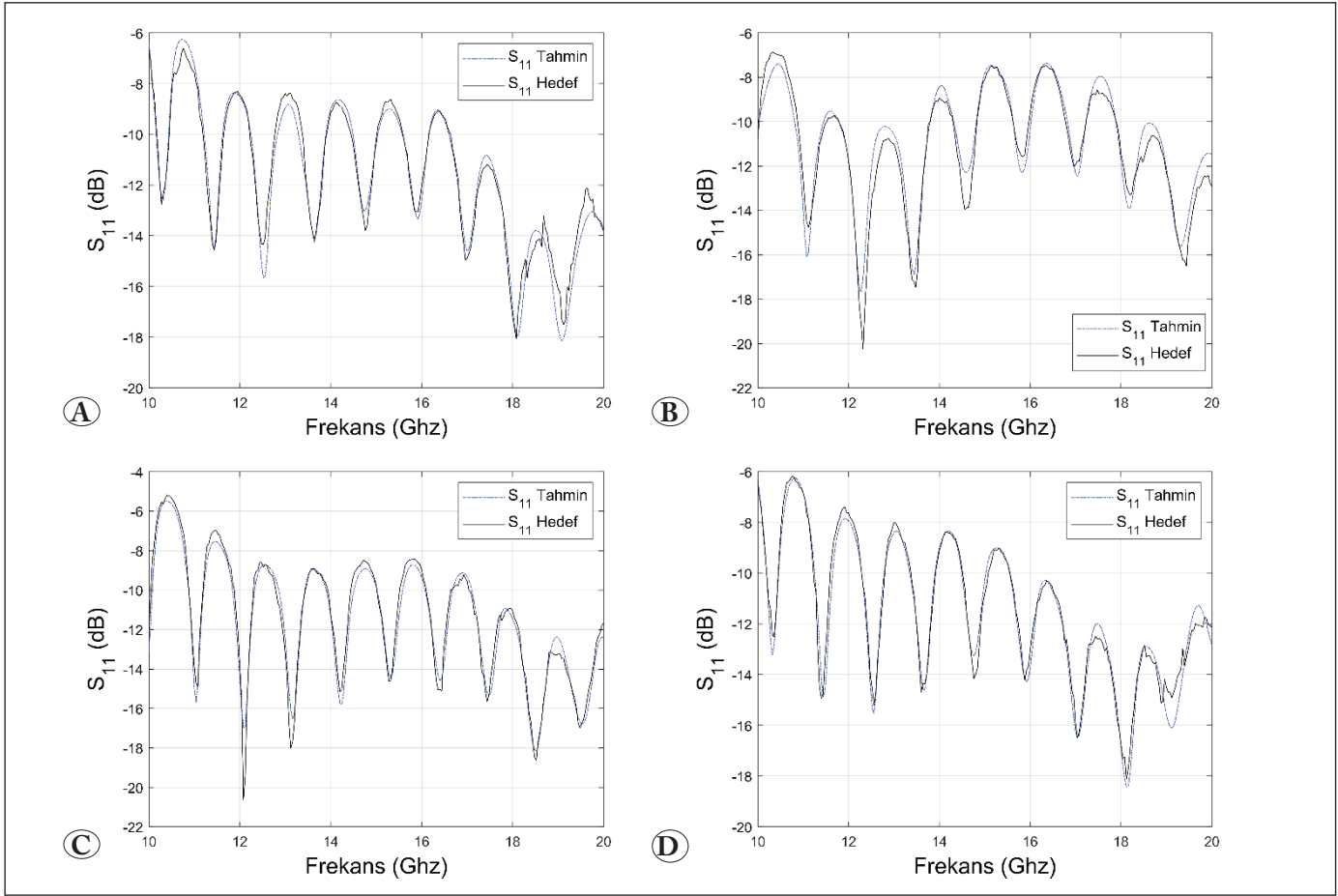
Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,46594	1,55513	0,51994	0,79152	0,97384	0,91087
[15 20]	0,20142	1,31351	0,33661	0,65205	0,98878	0,93058
[20 15]	0,19078	0,93762	0,32747	0,62707	0,98937	0,94861
[20 20]	0,14695	1,01917	0,28313	0,61029	0,99182	0,94431
[20 25]	0,14217	1,04318	0,27681	0,67538	0,99209	0,94224
[25 20]	0,15201	1,28120	0,28814	0,73495	0,99154	0,92964
[25 25]	0,13606	2,19684	0,27186	1,01232	0,99243	0,88380
[30 20]	0,11744	2,90089	0,25281	0,88318	0,99347	0,85855
[10 15 20]	2,17442	14,15584	1,15380	2,66898	0,87123	0,35892
[10 20 25]	4,77384	5,98531	1,82415	1,99516	0,68630	0,58043
[15 20 25]	0,10704	0,99217	0,24343	0,60365	0,99405	0,94632
[20 15 10]	0,15117	0,88214	0,28896	0,57426	0,99159	0,95279
[25 20 10]	0,10532	1,82424	0,24467	0,83132	0,99415	0,90832
[25 20 15]	0,09186	2,94149	0,22811	1,10229	0,99490	0,85039
[10 15 20 25]	1,47811	43,38250	0,90779	4,37556	0,91444	0,14774
[20 15 10 5]	0,12967	19,08410	0,27530	2,65300	0,99279	0,31149
[20 15 15 10]	0,11543	1,72268	0,25296	0,86440	0,99358	0,90872
[25 20 20 15]	0,06006	6,57869	0,18267	1,31656	0,99667	0,75917

Elde edilen Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6'yı yorumlayacak olursak 2 ve 3 ara katmana sahip algoritma mimarili sonuçların en başarılı sonuçlara sahip olduğu sonucuna ulaşırız. 40 MHz frekans adımı için 70-50 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı sırası ile 15 ve 20 nörona sahip mimari en başarılı sonuca ulaşmıştır. 80-40 eğitim-doğrulama verisi için yine 2 ara katmanlı ve her ara katmanda 20 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. 90-30 eğitim-doğrulama verisi için 3 ara katmanlı sırası ile 10, 15 ve 20 nörona sahip mimari diğerlerine göre daha başarılı olmuştur ve son olarak 100-20 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı sırası ile 15 ve 20 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. Genel olarak ara katman ve nöron sayısının artışının sadece modelleme sürecinde artışa neden olduğu fakat bununla birlikte modelleme başarısında ise bir yükselişe neden olmadığı sonucuna varırız. Örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesini kendi içinde kıyaslayacak olursak en başarılı sonucun beklendiği gibi 100-20 eğitim-doğrulama verisi için olduğunu görürüz. Bununla birlikte 90-30 eğitim-doğrulama verisi ve 80-40 eğitim-doğrulama verisi kullanılan modelleme nerede ise benzer başarı göstermiştir. En başarısız sonuçlar ise 70-50 eğitim-doğrulama verisi için olduğu görülmüştür.

Tüm bunlara ek olarak örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesi sonucu elde edilen 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi en başarılı sonuçlara ait grafikler sırası ile Şekil 3A, Şekil 3B, Şekil 3C ve Şekil 3D'de gösterilmiştir. Grafiklerdeki hedef ve model sonuçlarının örtüşmesi modelleme başarısının yüksek olduğunu grafiksel olarak ispatlamaktadır.

4.2. 50 MHz Frekans Adım Aralığı için Modelleme Başarı Sonuçları

Bu kısımda 10 GHz – 20 GHz arasında 0,05 GHz frekans lineer adım aralığı kullanılarak edilen sonuçların modellenmesi üzerine bir çalışma yapılacaktır. Böylelikle her bir örnek için 201 veri oluşmaktadır. Bunu 120 örnek sayısı ile çarparsak 201x120 toplam örnek sayısını elde etmiş oluruz. 120 örnek veri 4 farklı şekilde modellenmiştir. İlkinde 70 eğitim ve 50 doğrulama verisi, ikincisinde 80 eğitim ve 40 doğrulama verisi, üçüncüsünde 90 eğitim ve 30 doğrulama verisi ve sonuncusunda 100 eğitim ve 20 doğrulama verisi olmak toplam 120 örnek veri kullanılacaktır. Toplamda algoritma 4 farklı koşu yapmış olup her bir farklı koşu için toplam eğitim ve doğrulama verilerine karşılık gelen kısımlar için MSE, MAE ve R² her bir koşu için hesaplanmıştır. 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi için



Şekil 3. 40 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden “trainbr” algoritmali ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) benzetimi (A) 70-50 eğitim-doğrulma verisi (B) 80-40 eğitim-doğrulma verisi (C) 90-30 eğitim-doğrulma verisi (D) 100-20 eğitim-doğrulma verisi.

50 MHz frekans adım aralığında modelleme başarı sonuçları sırası ile Çizelge 7, Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10’da verilmiştir.

Elde edilen Çizelge 7, Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10’u yorumlayacak olursak 2 ve 3 ara katmana sahip algoritma mimarili sonuçların en başarılı sonuçlara sahip olduğu sonucuna ulaşırız. 50 MHz frekans adımı için 70-50 eğitim-doğrulama verisi için 3 ara katmanlı sırası ile 20, 15 ve 10 nörona sahip mimari en başarılı sonuca ulaşmıştır. 80-40 eğitim-doğrulama verisi için yine bir önceki ile aynı 3 ara katmanlı sırası ile 20, 15 ve 10 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. 90-30 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı ve her ara katmanda 20 nörona sahip mimari diğerlerine göre daha başarılı olmuştur ve son olarak 100-20 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı sırası ile 20 ve 15 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. Genel olarak ara katman ve nöron sayısının artışının sadece modelleme sürecinde artışa neden olduğu fakat bununla birlikte mo-

delleme başarısında ise bir yükselişe neden olmadığı sonucuna varırız. Bir önceki bölümde de ortak bir şekilde 70-50 ve 80-40 eğitim-doğrulama verisi için en başarılı sonuçların ortak olduğu görülmüştür. Örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesini kendi içinde kıyaslayacak olursak en başarılı sonucun 100-20 eğitim-doğrulama verisi için olduğunu görürüz. İkinci en başarılı sonucun 90-30 eğitim-doğrulama verisi ve üçüncünün ise 80-40 eğitim-doğrulama verisi kullanılan modelleme olduğu görülmüştür. En başarısız sonuçlar ise beklendiği gibi 70-50 eğitim-doğrulama verisi için olduğu görülmüştür.

Tüm bunlara ek olarak örnek verilerin 4 farklı şekilde modellemesi sonucu elde edilen 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi en başarılı sonuçlara ait grafikler sırası ile Şekil 4A, Şekil 4B, Şekil 4C ve Şekil 4D’de gösterilmiştir. Grafiklerdeki hedef ve model sonuçlarının örtüşmesi modelleme başarısının yüksek olduğunu grafiksel olarak ispatlamaktadır.

Çizelge 7. 50 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 70-50 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,46594	1,55513	0,51994	0,79152	0,97384	0,91087
[15 20]	0,20142	1,31351	0,33661	0,65205	0,98878	0,93058
[20 15]	0,19078	0,93762	0,32747	0,62707	0,98937	0,94861
[20 20]	0,14695	1,01917	0,28313	0,61029	0,99182	0,94431
[20 25]	0,14217	1,04318	0,27681	0,67538	0,99209	0,94224
[25 20]	0,15201	1,28120	0,28814	0,73495	0,99154	0,92964
[25 25]	0,13606	2,19684	0,27186	1,01232	0,99243	0,88380
[30 20]	0,11744	2,90089	0,25281	0,88318	0,99347	0,85855
[10 15 20]	2,17442	14,15584	1,15380	2,66898	0,87123	0,35892
[10 20 25]	4,77384	5,98531	1,82415	1,99516	0,68630	0,58043
[15 20 25]	0,10704	0,99217	0,24343	0,60365	0,99405	0,94632
[20 15 10]	0,15117	0,88214	0,28896	0,57426	0,99159	0,95279
[25 20 10]	0,10532	1,82424	0,24467	0,83132	0,99415	0,90832
[25 20 15]	0,09186	2,94149	0,22811	1,10229	0,99490	0,85039
[10 15 20 25]	1,47811	43,38250	0,90779	4,37556	0,91444	0,14774
[20 15 10 5]	0,12967	19,08410	0,27530	2,65300	0,99279	0,31149
[20 15 15 10]	0,11543	1,72268	0,25296	0,86440	0,99358	0,90872
[25 20 20 15]	0,06006	6,57869	0,18267	1,31656	0,99667	0,75917

Çizelge 8. 50 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 80-40 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

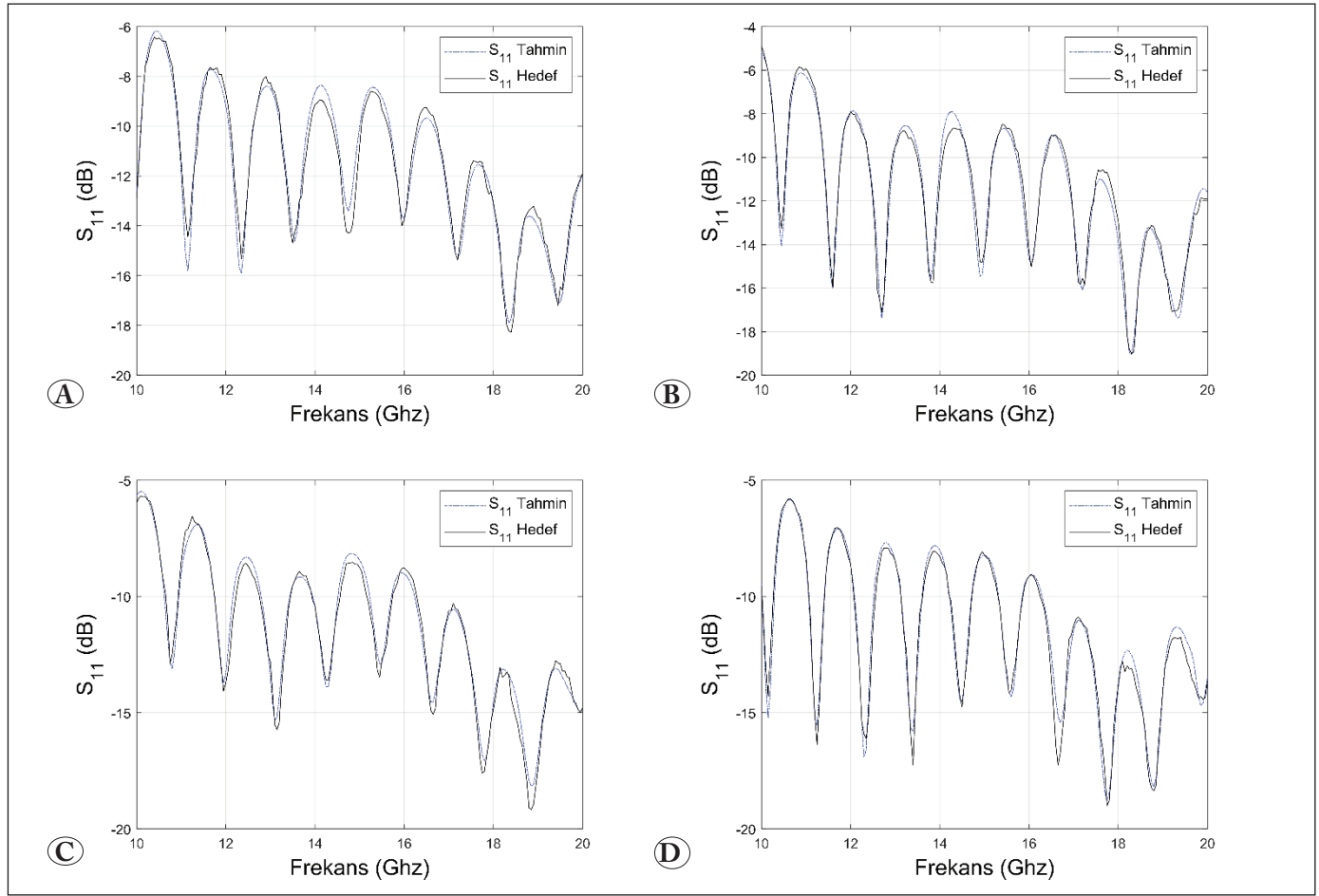
Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,82567	5,57334	1,83231	1,92206	0,68073	0,60962
[15 20]	0,19961	1,45583	0,33101	0,61976	0,98884	0,92341
[20 15]	0,22056	0,61350	0,34346	0,52564	0,98766	0,96475
[20 20]	0,18563	4,33553	0,32008	0,92732	0,98963	0,81749
[20 25]	0,15091	0,94573	0,28476	0,58624	0,99157	0,94671
[25 20]	0,14886	1,63471	0,28340	0,57792	0,99169	0,91893
[25 25]	0,13957	1,59691	0,27373	0,78511	0,99221	0,91568
[30 20]	0,13306	1,54078	0,27020	0,85876	0,99257	0,91240
[10 15 20]	0,17260	0,89777	0,31212	0,59451	0,99036	0,95232
[10 20 25]	0,13519	1,16180	0,27447	0,66449	0,99246	0,93735
[15 20 25]	0,11905	1,43676	0,25712	0,68618	0,99336	0,92075
[20 15 10]	0,14515	0,60932	0,28323	0,51242	0,99190	0,96601
[25 20 10]	0,11388	2,84864	0,25069	0,79785	0,99365	0,86791
[25 20 15]	0,09961	1,09700	0,23414	0,64521	0,99445	0,94149
[10 15 20 25]	0,10816	1,25240	0,24370	0,71950	0,99397	0,92990
[20 15 10 5]	0,14521	60,73510	0,28972	1,62474	0,99189	0,28826
[20 15 15 10]	0,12075	1,84604	0,26313	0,80047	0,99326	0,90091
[25 20 20 15]	0,06999	2,62115	0,19670	1,00294	0,99610	0,87735

Çizelge 9. 50 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 90-30 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları.

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,73582	5,34122	1,81511	1,90791	0,68467	0,63779
[15 20]	0,23563	1,46212	0,36713	0,67584	0,98670	0,92276
[20 15]	0,21560	1,06901	0,34898	0,60597	0,98783	0,94300
[20 20]	0,16428	0,49670	0,29810	0,48372	0,99074	0,97263
[20 25]	0,16464	2,22319	0,30199	0,91930	0,99072	0,89381
[25 20]	0,14495	1,42480	0,27949	0,61921	0,99184	0,92933
[25 25]	0,14508	15,40811	0,28339	1,28140	0,99183	0,60793
[30 20]	0,14473	1,31668	0,28531	0,77588	0,99185	0,92593
[10 15 20]	0,16313	0,56006	0,29843	0,49187	0,99081	0,96883
[10 20 25]	2,13827	15,51701	1,13080	2,88653	0,87186	0,35633
[15 20 25]	0,11361	1,19803	0,24856	0,57759	0,99361	0,93768
[20 15 10]	0,15554	2,06209	0,29376	0,73951	0,99124	0,89533
[25 20 10]	0,11670	1,25346	0,25665	0,76091	0,99343	0,93024
[25 20 15]	0,14465	3,13182	0,28368	0,90217	0,99185	0,83612
[10 15 20 25]	0,11734	2,41050	0,25446	0,77731	0,99340	0,88574
[20 15 10 5]	0,13163	1,52761	0,27017	0,74202	0,99259	0,91777
[20 15 15 10]	0,12069	1,75032	0,26108	0,73330	0,99321	0,91059
[25 20 20 15]	0,24364	22,21559	0,37774	2,59031	0,98624	0,37655

Çizelge 10. 50 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 100-20 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,45804	7,61885	0,50574	0,77907	0,97403	0,73048
[15 20]	0,19549	1,10707	0,32450	0,50241	0,98900	0,93888
[20 15]	0,19716	0,33692	0,32706	0,40787	0,98890	0,98122
[20 20]	0,18637	1,05348	0,32210	0,61657	0,98951	0,94409
[20 25]	0,17481	1,18322	0,31389	0,67388	0,99017	0,93404
[25 20]	0,15507	0,61681	0,28831	0,49583	0,99128	0,96563
[25 25]	0,13695	0,47222	0,27115	0,48193	0,99231	0,97328
[30 20]	0,14778	0,95607	0,28539	0,65209	0,99169	0,94627
[10 15 20]	0,17615	0,46133	0,31007	0,46100	0,99009	0,97438
[10 20 25]	0,13931	0,52043	0,27335	0,44809	0,99217	0,97066
[15 20 25]	0,13148	1,37673	0,27170	0,77740	0,99261	0,92768
[20 15 10]	0,19018	3,08847	0,32884	0,70978	0,98930	0,85946
[25 20 10]	0,13000	0,67702	0,27130	0,50332	0,99270	0,96130
[25 20 15]	0,11685	0,91004	0,25528	0,56327	0,99344	0,94932
[10 15 20 25]	0,11631	1,25839	0,24965	0,57997	0,99347	0,93480
[20 15 10 5]	0,14806	0,48496	0,28851	0,49650	0,99168	0,97305
[20 15 15 10]	0,11512	1,60257	0,25071	0,58546	0,99354	0,92723
[25 20 20 15]	0,07981	1,04780	0,20999	0,61394	0,99552	0,94769



Şekil 4. 50 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden “trainbr” algoritmali ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) benzetimi (A) 70-50 eğitim-doğrulama verisi (B) 80-40 eğitim-doğrulama verisi (C) 90-30 eğitim-doğrulama verisi (D) 100-20 eğitim-doğrulama verisi.

4.3. 80 MHz Frekans Adım Aralığı için Modelleme Başarı Sonuçları

Bu kısımda 10 GHz – 20 GHz arasında 0,08 GHz frekans lineer adım aralığı kullanılarak edilen sonuçların modellenmesi üzerine bir çalışma yapılacaktır. Böylelikle her bir örnek için 126 veri oluşmaktadır. Bunu 120 örnek sayısı ile çarparsak 126x120 toplam örnek sayısını elde etmiş oluruz. 120 örnek veri 4 farklı şekilde modellenmiştir. İlkinde 70 eğitim ve 50 doğrulama verisi, ikincisinde 80 eğitim ve 40 doğrulama verisi, üçüncüsünde 90 eğitim ve 30 doğrulama verisi ve sonuncusunda 100 eğitim ve 20 doğrulama verisi olmak toplam 120 örnek veri kullanılacaktır. Toplamda algoritma 4 farklı koşu yapmış olup her bir farklı koşu için toplam eğitim ve doğrulama verilerine karşılık gelen kısımlar için MSE, MAE ve R^2 her bir koşu için hesaplanmıştır. 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi için 80 MHz frekans adım aralığında modelleme başarı sonuç-

ları sırası ile Çizelge 11, Çizelge 12, Çizelge 13 ve Çizelge 14’de verilmiştir.

Elde edilen Çizelge 11, Çizelge 12, Çizelge 13 ve Çizelge 14’ü yorumlayacak olursak 2 ve 3 ara katmana sahip algoritma mimarili sonuçların en başarılı sonuçlara sahip olduğu sonucuna ulaşırız. 80 MHz frekans adımı için 70-50 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı sırası ile 10 ve 15 nörona sahip mimari en başarılı sonuca ulaşmıştır. 80-40 eğitim-doğrulama verisi için 3 ara katmanlı sırası ile 10, 15 ve 20 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. 90-30 eğitim-doğrulama verisi için bir önceki ile aynı 3 ara katmanlı sırası ile 10, 15 ve 20 nörona sahip mimari diğerlerine göre daha başarılı olmuştur ve son olarak 100-20 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı ve her katmanda 20 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. Genel olarak ara katman ve nöron sayısının artışının sadece modelleme sürecinde artışa neden olduğu fakat bununla birlikte modelleme başarısında ise bir

Çizelge 11. 80 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 70-50 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,44304	0,61681	0,47527	0,53932	0,97534	0,96488
[15 20]	4,82898	6,45517	1,82085	2,05862	0,68491	0,54493
[20 15]	4,81575	6,75587	1,81763	2,06051	0,68598	0,54201
[20 20]	0,23824	9,02957	0,34530	1,70824	0,98682	0,67536
[20 25]	4,82372	6,73808	1,82010	2,09094	0,68534	0,52974
[25 20]	4,80896	6,75257	1,81735	2,07845	0,68652	0,54003
[25 25]	4,82533	6,40450	1,82004	2,03171	0,68521	0,55206
[30 20]	4,80354	6,31254	1,81610	2,00363	0,68696	0,56455
[10 15 20]	2,33465	15,27276	1,19834	2,82654	0,86216	0,29796
[10 20 25]	4,79745	6,48710	1,81422	2,06002	0,68744	0,55777
[15 20 25]	4,80541	7,04168	1,81641	2,13135	0,68680	0,52830
[20 15 10]	4,77111	6,54905	1,81005	2,07146	0,68954	0,54510
[25 20 10]	0,15026	1,93934	0,28331	0,87590	0,99171	0,89697
[25 20 15]	0,12365	3,01054	0,25720	1,16675	0,99318	0,83897
[10 15 20 25]	0,12882	2,28518	0,25970	0,81389	0,99289	0,88343
[20 15 10 5]	0,18300	2,36405	0,31422	0,93635	0,98989	0,87399
[20 15 15 10]	1,15625	38,32364	0,79120	3,77662	0,93428	0,19774
[25 20 20 15]	0,12643	120,39095	0,25810	5,05583	0,99303	0,16191

Çizelge 12. 80 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 80-40 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,85069	5,02261	1,83049	1,85106	0,68297	0,66033
[15 20]	0,33059	2,53019	0,40817	0,74065	0,98165	0,87064
[20 15]	0,32751	1,04089	0,41029	0,67522	0,98182	0,94113
[20 20]	0,50280	4,42523	0,51909	1,33767	0,97195	0,79287
[20 25]	0,20006	2,81929	0,31556	1,15273	0,98894	0,85041
[25 20]	0,21341	6,99449	0,33463	1,55586	0,98819	0,66944
[25 25]	0,19843	15,90586	0,32420	1,38197	0,98903	0,55537
[30 20]	0,20872	12,09095	0,32205	1,50596	0,98845	0,62574
[10 15 20]	0,21535	0,63687	0,33117	0,51815	0,98809	0,96405
[10 20 25]	0,22634	32,61557	0,33844	1,94822	0,98747	0,40873
[15 20 25]	0,15571	13,24768	0,28771	1,60398	0,99140	0,61279
[20 15 10]	0,19969	1,42199	0,31879	0,76451	0,98896	0,92010
[25 20 10]	0,13894	10,42534	0,27195	1,15660	0,99233	0,69601
[25 20 15]	0,13666	1,18300	0,26212	0,71547	0,99246	0,93601
[10 15 20 25]	0,16095	1,56648	0,28899	0,68465	0,99111	0,91272
[20 15 10 5]	0,16739	1,85813	0,29248	0,82674	0,99075	0,89650
[20 15 15 10]	0,12884	2,24128	0,26589	0,82077	0,99289	0,88546
[25 20 20 15]	0,07446	4,24074	0,20538	1,32899	0,99590	0,78420

Çizelge 13. 80 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 90-30 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,47279	0,55508	0,50214	0,54652	0,97368	0,96822
[15 20]	2,66243	11,18280	1,28971	2,35188	0,84106	0,37544
[20 15]	0,32520	1,50245	0,40649	0,63812	0,98197	0,91648
[20 20]	0,28166	1,25169	0,37729	0,61307	0,98440	0,93243
[20 25]	4,75822	6,10187	1,80899	2,00677	0,69069	0,57944
[25 20]	0,22322	0,76438	0,32992	0,62033	0,98766	0,95649
[25 25]	0,19838	3,55278	0,31729	1,17034	0,98904	0,82460
[30 20]	0,19571	1,82651	0,30662	0,99503	0,98919	0,90164
[10 15 20]	0,21696	0,39280	0,34105	0,45450	0,98800	0,97767
[10 20 25]	0,16524	2,28646	0,27424	0,74220	0,99088	0,87829
[15 20 25]	0,15987	0,91561	0,29089	0,59272	0,99118	0,94994
[20 15 10]	0,23193	2,35099	0,34204	0,92112	0,98717	0,87492
[25 20 10]	0,16290	1,77266	0,29679	0,92433	0,99101	0,89942
[25 20 15]	0,13561	1,49358	0,26950	0,85514	0,99252	0,91736
[10 15 20 25]	0,74597	15,20358	0,64676	2,84817	0,95813	0,36766
[20 15 10 5]	0,16752	2,05714	0,29811	0,81811	0,99075	0,88617
[20 15 15 10]	0,63867	15,44905	0,58665	2,88322	0,96426	0,31842
[25 20 20 15]	0,13741	19,02931	0,26647	2,93085	0,99242	0,38507

Çizelge 14. 80 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 100-20 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

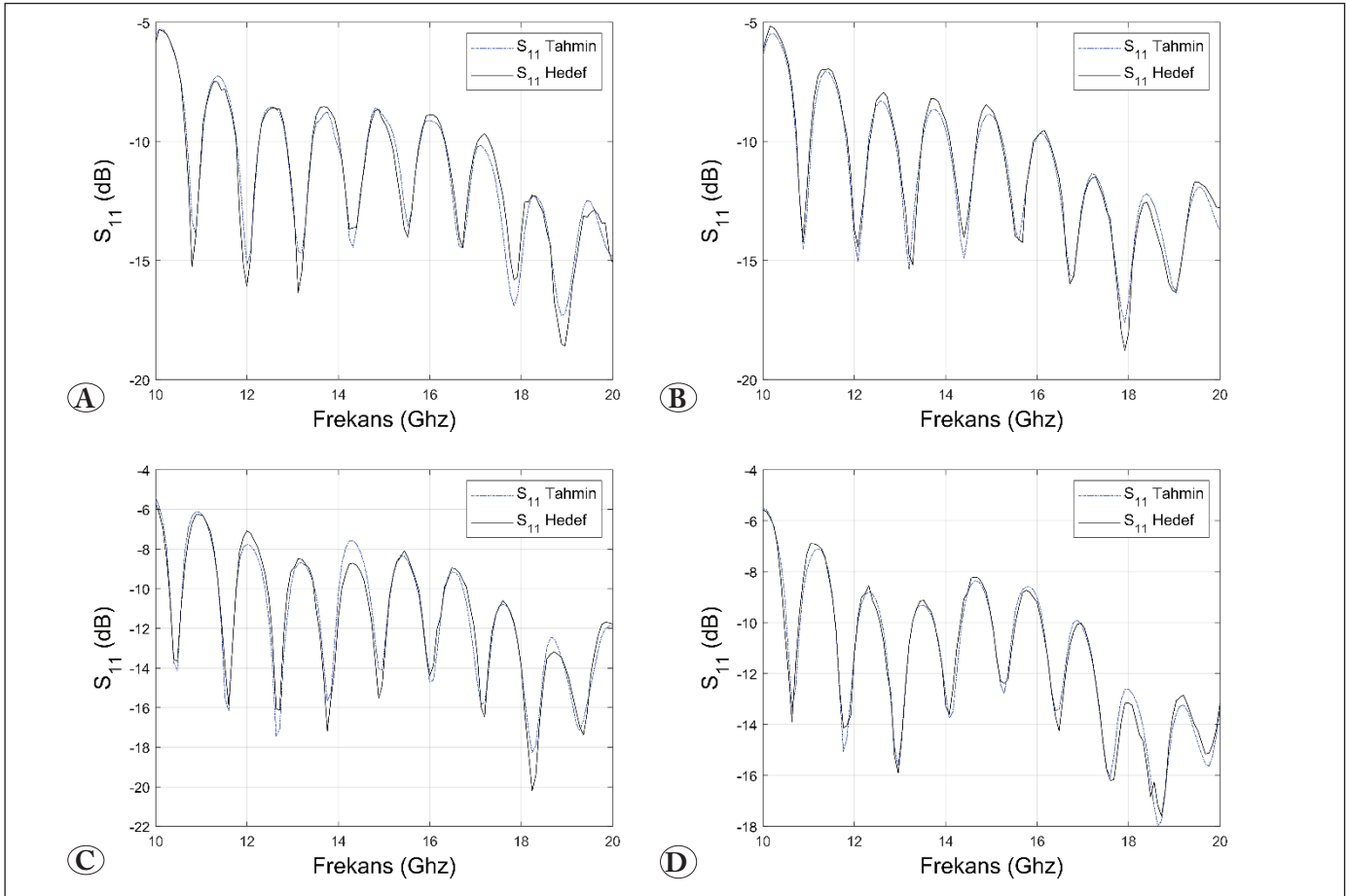
Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,83469	4,91336	1,82627	1,84361	0,68373	0,66319
[15 20]	0,29460	7,21839	0,38562	0,91390	0,98364	0,72284
[20 15]	0,27390	1,58104	0,37149	0,64202	0,98480	0,91312
[20 20]	0,22649	0,62580	0,33092	0,47565	0,98745	0,96463
[20 25]	0,26902	1,62670	0,36956	0,88087	0,98507	0,90906
[25 20]	0,23699	0,90593	0,34380	0,63415	0,98686	0,94792
[25 25]	0,23079	4,33435	0,33968	1,28839	0,98721	0,77612
[30 20]	0,22322	4,60841	0,33016	1,36287	0,98763	0,78459
[10 15 20]	0,31742	2,54145	0,40808	0,78194	0,98236	0,86596
[10 20 25]	0,17589	0,81409	0,30622	0,54122	0,99027	0,95530
[15 20 25]	0,21629	12,13937	0,33293	1,28884	0,98802	0,63393
[20 15 10]	0,23146	1,10326	0,34715	0,72767	0,98717	0,93709
[25 20 10]	0,17011	0,99031	0,29220	0,67639	0,99059	0,94628
[25 20 15]	0,14256	1,52376	0,27549	0,69544	0,99212	0,91534
[10 15 20 25]	0,13182	0,63526	0,25944	0,50499	0,99271	0,96342
[20 15 10 5]	0,22017	9,48161	0,34159	1,02565	0,98780	0,65726
[20 15 15 10]	0,33775	18,99167	0,42521	2,73826	0,98122	0,27061
[25 20 20 15]	0,09036	5,24002	0,22522	0,81790	0,99501	0,75807

yükselişe neden olmadığı sonucuna varırız. Örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesini kendi içinde kıyaslayacak olursak en başarılı sonucun beklenin aksine 90-30 eğitim-doğrulma verisi için olduğunu görürüz. Bu durum sadece 80 MHz frekans adımına özgü olup diğerlerinde oluşmamıştır. İkinci en başarılı sonucun 100-20 eğitim-doğrulma verisi ve üçüncünün ise 80-40 eğitim-doğrulma verisi kullanılan modelleme olduğu görülmüştür. En başarısız sonuçlar ise beklendiği gibi 70-50 eğitim-doğrulma verisi için olduğu görülmüştür. Genel olarak başarı oranları birbirine yakındır.

Tüm bunlara ek olarak örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesi sonucu elde edilen 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi en başarılı sonuçlara ait grafikler sırası ile Şekil 5A, Şekil 5B, Şekil 5C ve Şekil 5D'de gösterilmiştir. Grafiklerdeki hedef ve model sonuçlarının örtüşmesi modelleme başarısının yüksek olduğunu grafiksel olarak ispatlamaktadır.

4.4. 100 MHz Frekans Adım Aralığı için Modelleme Başarı Sonuçları

Bu kısımda 10 GHz – 20 GHz arasında 0,10 GHz frekans lineer adım aralığı kullanılarak edilen sonuçların modellenmesi üzerine bir çalışma yapılacaktır. Böylelikle her bir örnek için 101 veri oluşmaktadır. Bunu 120 örnek sayısı ile çarparsak 101x120 toplam örnek sayısını elde etmiş oluruz. 120 örnek veri 4 farklı şekilde modellenmiştir. İlkinde 70 eğitim ve 50 doğrulama verisi, ikincisinde 80 eğitim ve 40 doğrulama verisi, üçüncüsünde 90 eğitim ve 30 doğrulama verisi ve sonuncusunda 100 eğitim ve 20 doğrulama verisi olmak toplam 120 örnek veri kullanılacaktır. Toplamda algoritma 4 farklı koşu yapmış olup her bir farklı koşu için toplam eğitim ve doğrulama verilerine karşılık gelen kısımlar için MSE, MAE ve R^2 her bir koşu için hesaplanmıştır. 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi için 100 MHz frekans adım aralığında modelleme başarı sonuçları sırası ile Çizelge 15, Çizelge 16, Çizelge 17 ve Çizelge 18'de verilmiştir.



Şekil 5. 80 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden “trainbr” algoritmali ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) benzetimi (A) 70-50 eğitim-doğrulma verisi (B) 80-40 eğitim-doğrulma verisi (C) 90-30 eğitim-doğrulma verisi (D) 100-20 eğitim-doğrulma verisi.

Çizelge 15. 100 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 70-50 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	0,61749	2,68853	0,59026	0,94796	0,96546	0,85638
[15 20]	4,84117	5,97659	1,82455	1,99530	0,68393	0,59449
[20 15]	4,80462	6,54311	1,81998	2,09978	0,68687	0,55282
[20 20]	4,79749	6,79486	1,81740	2,09018	0,68744	0,53673
[20 25]	4,78208	6,01598	1,81720	2,00942	0,68867	0,59645
[25 20]	4,79637	6,31744	1,81859	2,05545	0,68753	0,56666
[25 25]	4,79351	7,52263	1,81645	2,20191	0,68776	0,51006
[30 20]	4,79105	6,32146	1,81611	2,04705	0,68796	0,56491
[10 15 20]	4,79106	5,44924	1,81785	1,91853	0,68795	0,63843
[10 20 25]	4,77492	5,61244	1,81511	1,96327	0,68924	0,62317
[15 20 25]	4,77251	6,17633	1,81299	2,03243	0,68943	0,57856
[20 15 10]	4,77132	7,27227	1,81298	2,17819	0,68953	0,50422
[25 20 10]	4,74387	6,58290	1,80725	2,08463	0,69172	0,54761
[25 20 15]	4,76073	7,11217	1,81154	2,17114	0,69037	0,51701
[10 15 20 25]	4,77434	5,60488	1,81648	1,96327	0,68928	0,62644
[20 15 10 5]	0,14193	2,49496	0,27498	1,05068	0,99217	0,87408
[20 15 15 10]	4,76746	6,84867	1,81369	2,08439	0,68983	0,53925
[25 20 20 15]	0,06377	7,33881	0,18929	1,66543	0,99649	0,71769

Çizelge 16. 100 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 80-40 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,83076	5,36944	1,82688	1,92039	0,68328	0,64762
[15 20]	0,22369	0,68520	0,34126	0,50538	0,98758	0,96286
[20 15]	0,21075	5,61841	0,33317	0,70210	0,98830	0,75530
[20 20]	4,82715	6,85099	1,82258	2,11787	0,68357	0,53028
[20 25]	4,84711	6,63125	1,82852	2,09202	0,68196	0,54559
[25 20]	4,82575	6,40473	1,82514	2,06331	0,68369	0,56173
[25 25]	4,82019	6,90237	1,82322	2,11902	0,68414	0,52607
[30 20]	4,82272	6,90854	1,82443	2,12257	0,68394	0,52634
[10 15 20]	0,47310	1,62191	0,49147	0,74880	0,97354	0,91209
[10 20 25]	0,13995	1,02712	0,26934	0,57214	0,99225	0,94439
[15 20 25]	0,14640	7,59202	0,28233	1,41663	0,99189	0,68632
[20 15 10]	4,79511	6,51240	1,81938	2,07521	0,68616	0,55666
[25 20 10]	4,79439	6,51340	1,81822	2,07113	0,68622	0,55682
[25 20 15]	4,79992	6,03795	1,82110	2,00810	0,68577	0,59292
[10 15 20 25]	0,27885	0,93822	0,38679	0,61238	0,98449	0,94900
[20 15 10 5]	0,14951	1,82387	0,28289	0,76055	0,99172	0,90636
[20 15 15 10]	4,79673	6,47413	1,81970	2,07913	0,68602	0,55734
[25 20 20 15]	0,07511	13,34225	0,20183	1,91920	0,99585	0,66790

Çizelge 17. 100 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 90-30 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,84640	5,02906	1,82864	1,86339	0,68558	0,66705
[15 20]	4,88169	6,73800	1,83218	2,08026	0,68276	0,53755
[20 15]	4,83073	5,13839	1,82395	1,88191	0,68683	0,65663
[20 20]	4,84896	6,72070	1,82692	2,09151	0,68538	0,53437
[20 25]	4,85292	6,91876	1,82640	2,11496	0,68506	0,51773
[25 20]	4,83446	6,69988	1,82303	2,09331	0,68654	0,53613
[25 25]	4,85185	7,60459	1,82646	2,17950	0,68515	0,46732
[30 20]	4,84611	7,03421	1,82541	2,13524	0,68561	0,49627
[10 15 20]	0,19557	0,54852	0,32152	0,50987	0,98925	0,96973
[10 20 25]	4,84659	5,27929	1,82790	1,90024	0,68556	0,64657
[15 20 25]	4,83089	7,21464	1,82311	2,13828	0,68682	0,50783
[20 15 10]	4,83399	5,72933	1,82518	1,95548	0,68657	0,61270
[25 20 10]	0,13057	3,34097	0,26326	0,99126	0,99284	0,82632
[25 20 15]	0,16463	1,47911	0,29739	0,82020	0,99096	0,91753
[10 15 20 25]	0,12993	1,62881	0,26614	0,66770	0,99287	0,91321
[20 15 10 5]	0,16229	3,23049	0,29818	0,91546	0,99109	0,83102
[20 15 15 10]	4,81390	7,33768	1,81954	2,20192	0,68817	0,48622
[25 20 20 15]	0,08691	5,96345	0,21426	1,43091	0,99524	0,78416

Çizelge 18. 100 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden 100-20 eğitim-doğrulama verisi ile ÇKA modellemesi için başarı sonuçları

Algoritma Mimarisi	Eğitim Hata (MSE)	Doğrulama Hata (MSE)	Eğitim Hata (MAE)	Doğrulama Hata (MAE)	Eğitim Hata (R ²)	Doğrulama Hata (R ²)
[10 15]	4,85807	5,11019	1,83183	1,89212	0,68340	0,66484
[15 20]	0,32764	0,71336	0,40939	0,49534	0,98186	0,96094
[20 15]	4,83750	4,98697	1,82603	1,86292	0,68505	0,67433
[20 20]	0,29090	1,17484	0,38546	0,73704	0,98391	0,93530
[20 25]	4,85950	7,65936	1,82873	2,21239	0,68329	0,49041
[25 20]	4,86389	6,65855	1,83063	2,08955	0,68294	0,53496
[25 25]	4,85646	6,65311	1,82797	2,09614	0,68353	0,54205
[30 20]	4,84925	8,25005	1,82588	2,24488	0,68411	0,46434
[10 15 20]	4,85410	5,16145	1,83074	1,88159	0,68371	0,66107
[10 20 25]	4,84247	5,38954	1,82884	1,92958	0,68465	0,64001
[15 20 25]	0,38332	0,41084	0,45142	0,47708	0,97875	0,97740
[20 15 10]	4,82970	5,73879	1,82448	1,96307	0,68567	0,61166
[25 20 10]	4,84071	5,18597	1,82707	1,89764	0,68479	0,65719
[25 20 15]	4,82229	5,86893	1,82441	1,97696	0,68627	0,60131
[10 15 20 25]	0,36091	14,20957	0,43989	2,84777	0,98000	0,42256
[20 15 10 5]	0,16626	6,85070	0,30197	1,35468	0,99084	0,69330
[20 15 15 10]	0,12638	0,35663	0,25660	0,42705	0,99304	0,98041
[25 20 20 15]	4,82761	6,09895	1,82554	2,00046	0,68584	0,59094

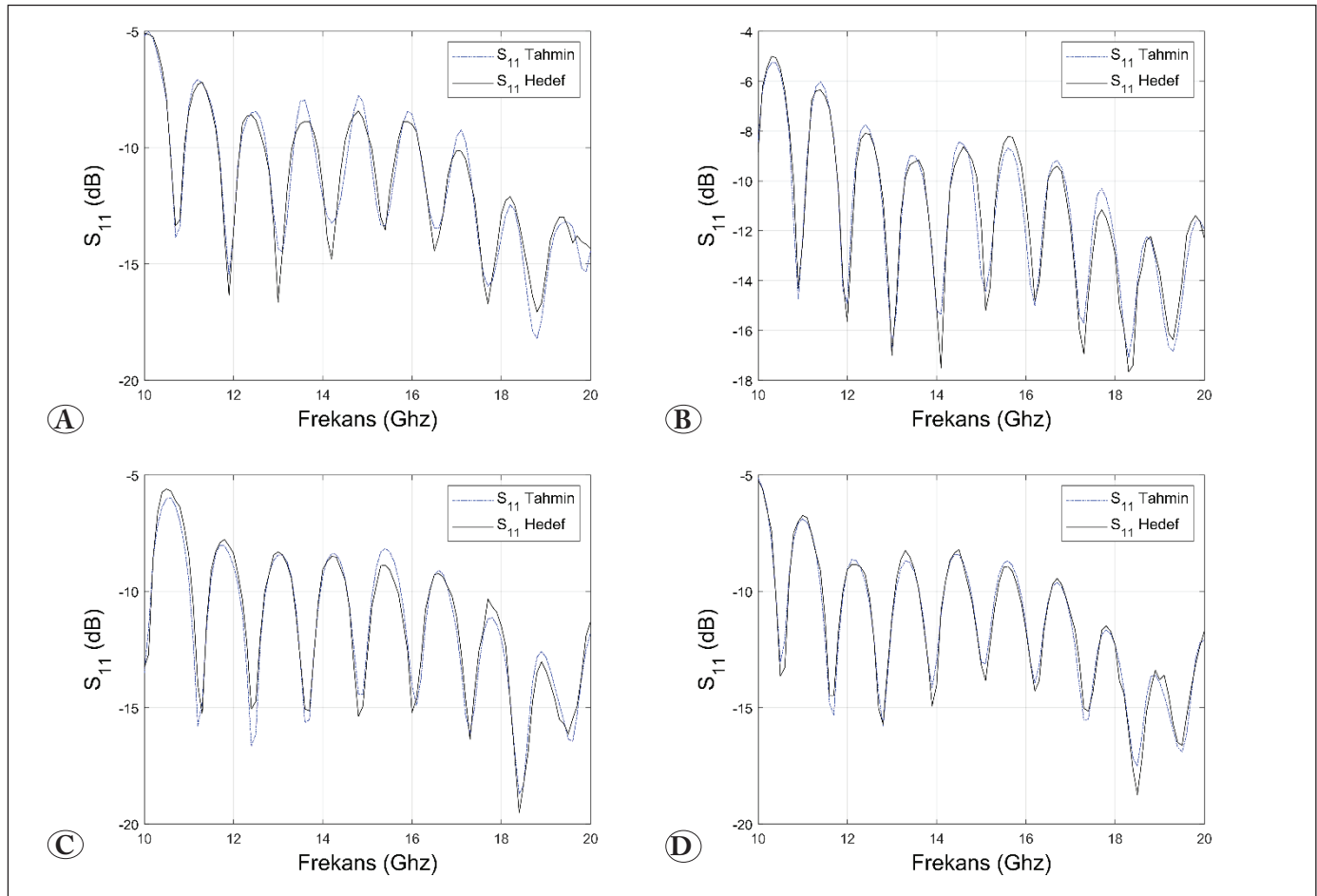
Elde edilen Çizelge 15, Çizelge 16, Çizelge 17 ve Çizelge 18'i yorumlayacak olursak 2, 3 ve 4 ara katmana sahip algoritma mimarili sonuçların en başarılı sonuçlara sahip olduğu sonucuna ulaşırız. 100 MHz frekans adımı için 70-50 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı sırası ile 10 ve 15 nörona sahip mimari en başarılı sonuca ulaşmıştır. 80-40 eğitim-doğrulama verisi için 2 ara katmanlı sırası ile 15 ve 20 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. 90-30 eğitim-doğrulama verisi için 3 ara katmanlı sırası ile 10, 15 ve 20 nörona sahip mimari diğerlerine göre daha başarılı olmuştur ve son olarak 100-20 eğitim-doğrulama verisi için diğer tüm sonuçlardan farklı olarak 4 ara katmanlı sırası ile 20, 15, 15 ve 10 nörona sahip mimari en başarılı olmuştur. Örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesini kendi içinde kıyaslayacak olursak en başarılı sonucun beklendiği gibi 100-20 eğitim-doğrulama verisi için olduğunu görürüz. Bununla birlikte 90-30 eğitim-doğrulama verisi ve 80-40 eğitim-doğrulama verisi kullanılan modelleme nerede ise özdeş başarı göstermiştir.

termiştir. En başarısız sonuçlar ise 70-50 eğitim-doğrulama verisi için olduğu görülmüştür.

Tüm bunlara ek olarak örnek verilerin 4 farklı şekilde modellenmesi sonucu elde edilen 70-50, 80-40, 90-30 ve 100-20 eğitim-doğrulama verisi en başarılı sonuçlara ait grafikler sırası ile Şekil 6A, Şekil 6B, Şekil 6C ve Şekil 6D'de gösterilmiştir. Grafiklerdeki hedef ve model sonuçlarının örtüşmesi modelleme başarısının yüksek olduğunu grafiksel olarak ispatlamaktadır.

5. Sonuç ve Öneriler

Yapılan çalışmada oldukça maliyetli olan bir Ku bandı dik-dörtgen boşluklu Vivaldi antenin geliştirilmiş ÇKA kullanılarak 10 GHz ve 20 GHz arasında modelleme başarısı üzerinde detaylı bir analiz çalışması yapılmıştır. Giriş verilerinin belirlenmesinde gelişmiş Latin Hiperküüp örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada gerek parametre sayısının fazla



Şekil 6. 100 MHz frekans adım aralığı kullanılarak oluşturulan 120 örnek veriden “trainbr” algoritmali ÇKA modellemesi sonucu oluşan S_{11} (dB) benzetimi (A) 70-50 eğitim-doğrulama verisi (B) 80-40 eğitim-doğrulama verisi (C) 90-30 eğitim-doğrulama verisi (D) 100-20 eğitim-doğrulama verisi.

olması gerekse de geniş bant modelleme yapılması problemi oldukça zor hale getirmiştir. Çıkış parametresi olarak ise 3B EM benzetimi yardımı ile antenin S_{11} (dB) (genlik) parametresinin frekans ile değişimi hedef/tahmin olarak karşılaştırmalı verilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde modelleme sonucu hedef ve tahmin verilerinin neredeyse birebir örtüştüğü çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada araştırılan frekans adım aralığının modelleme başarısı üzerindeki etkisi ise eğitim-doğrulama verisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Normalde frekans adım aralığı arttıkça başarının artması beklenirken bu durum oluşmamıştır. Bunun nedeni frekans adım aralığının birbirini katı olmaması olabilir. Sonraki çalışmalarda bu durum göz önüne alınmalıdır. Modelleme problemlerinde eğitilen verinin çokluğu modellemenin başarısı üzerinde her zaman olumlu etkiye sahip olmayabilir. Aksine eğitilen verinin çokluğu kaynakların boşa israfına neden olabilir. Ayrıca eğitim verisinin eğitimi için harcanan sürenin önüne geçilebilir. Literatürde gelecekteki yapılan çalışmalar için maksimum veri yerine optimum verinin kullanılması için bir referans çalışması olarak alınabilir. Genel olarak daha sade tasarımların yani az ara katman ve düşük nöron sayısının tüm çalışmada daha başarılı sonuçlar verdiği kanısına varabiliriz. Ek olarak tüm bu yöntemler herhangi başka bir modelleme problemi-ne kuşkusuzca uyarlanabilir. Yöntem çeşitli karmaşık ortamlara uygundur ve geniş uygulama alanına sahiptir.

Yazar katkısı: Çalışma tez öğrencisi ile yapılmıştır.

Etik kurul onayı: Etik kurul onayı gerekmemektedir.

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

6. Kaynaklar

- Akdagli, A., Toktas, A., Kayabasi, A., Develi, I. 2013. An Application of Artificial Neural Network to Compute the Resonant Frequency of E-Shaped Compact Microstrip Antennas. *Journal of Electrical Engineering*, 64(5): 317–322. Doi: 10.2478/jee-2013-0046
- Amador, M., Rouco, A., Albuquerque, D., Pinho, P. 2024. Ultra-Wideband Vivaldi Antenna for Through-Wall-Radar Applications. *2024 IEEE-APSTopical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 154–158. Doi: 10.1109/APWC61918.2024.10701805
- Bang, J., Lee, J., Choi, J. 2018. Design of a Wideband Antipodal Vivaldi Antenna with an Asymmetric Parasitic Patch. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 18(1): 29–34. Doi: 10.26866/jees.2018.18.1.29
- Barmuta, P., Ferranti, F., Gibiino, GP., Lewandowski, A., Schreurs, DMMP. 2015. Compact Behavioral Models of Nonlinear Active Devices Using Response Surface Methodology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(1): 56–64. Doi: 10.1109/TMTT.2014.2376559
- Bhagyalakshmi, M., Sowjanya, LSL., Sastry, NN. 2018. Compact antipodal Vivaldi antenna with rectangular slots and shaping of flare to cover 6 to 18 GHz. *Electromagnetics*, 38(8): 531–543. Doi: 10.1080/02726343.2018.1543175
- Cai, J., King, J., Yu, C., Liu, J., Sun, L. 2018. Support Vector Regression-Based Behavioral Modeling Technique for RF Power Transistors. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(5): 428–430. Doi: 10.1109/LMWC.2018.2819427
- Chavez-Hurtado, JL., Rayas-Sanchez, JE. 2016. Polynomial-Based Surrogate Modeling of RF and Microwave Circuits in Frequency Domain Exploiting the Multinomial Theorem. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(12): 4371–4381. Doi: 10.1109/TMTT.2016.2623902
- Coburn, W., McCormick, S. 2018. Ultra-wideband antenna performance comparison. 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), 1–2. Doi: 10.23919/ROPACES.2018.8364193
- Cybenko, G. 1989. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2(4): 303–314. Doi: 10.1007/BF02551274
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2): 182–197. Doi: 10.1109/4235.996017
- Duman, M., Berk, V. 2024. Geniş Bantlı Yüksek Performanslı Antipodal Vivaldi Anteni: Kablosuz İletişim Sistemleri için Verimli Bir Tasarım. *Journal of Smart Systems Research*, 5(1): 17–32. Doi: 10.58769/joinssr.1398068
- Gardner, MW., Dorling, S. R. 1998. Artificial neural networks (the multilayer perceptron) a review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, 32(14–15): 2627–2636. Doi: 10.1016/S1352-2310(97)00447-0
- Gibson, PJ. 1979. The Vivaldi Aerial. 1979 9th European Microwave Conference, 101–105. Doi: 10.1109/EUMA.1979.332681
- Guan, T., Cui, K., Yang, L., Zhang, Y., Wei, P., Ma, X. 2024. An Interference Detection Method for Satellite Communications based on Maximum Between-Class Variance of Spectral Histogram. *2024 IEEE 17th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, 608–613. Doi: 10.1109/ICSP62129.2024.10846393

- Gulati, G., Liang, M., Xin, H. 2017.** A conformal dual-polarized all-metal vivaldi array for feeding broadband luneburg lens. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2243–2244. Doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073164
- Güzelkara, İ., Kılıç, VT. 2025.** Bandwidth Optimization of an Ultra Wide Band Vivaldi Antenna Design with Its Feed Alignment. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(3): 1009–1023. Doi: 10.47495/okufbed.1519934
- Hardin, RH., Sloane, NJA. 1993.** A new approach to the construction of optimal designs. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 37(3): 339–369. Doi: 10.1016/0378-3758(93)90112-J
- Iman, RL., Helton, JC., Campbell, JE. 1981.** An Approach to Sensitivity Analysis of Computer Models: Part I—Introduction, Input Variable Selection and Preliminary Variable Assessment. *Journal of Quality Technology*, 13(3): 174–183. Doi: 10.1080/00224065.1981.11978748
- Kambham, P., Paik, HK. 2017.** Tapered slot Vivaldi antenna for phased array applications. 2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI), 343–345. Doi: 10.1109/ICICI.2017.8365369
- Kelley, HJ. 1960.** Gradient Theory of Optimal Flight Paths. *ARS Journal*, 30(10): 947–954. Doi: 10.2514/8.5282
- Kindt, R., Pickles, R. 2009.** 12-to-1 bandwidth all-metal Vivaldi array element. 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1–4. Doi: 10.1109/APS.2009.5171599
- Kindt, RW., Pickles, WR. 2010.** Ultrawideband All-Metal Flared-Notch Array Radiator. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(11): 3568–3575. Doi: 10.1109/TAP.2010.2071360
- Linnainmaa, S. 1976.** Taylor expansion of the accumulated rounding error. *BIT*, 16(2): 146–160. Doi: 10.1007/BF01931367
- Mahouti, P. 2019.** Design optimization of a pattern reconfigurable microstrip antenna using differential evolution and 3D EM simulation-based neural network model. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(8). Doi: 10.1002/mmce.21796
- McKay, MD., Beckman, RJ., Conover, WJ. 1979.** A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2): 239. Doi: 10.2307/1268522
- NagaPavani, G., Lakshmi Prasanna, Ch., NN. Sastry, Dr. 2018.** An ultra-wide band printed small aperture tapered slot phased array antenna covering 6–18GHz. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4): 2628. Doi: 10.14419/ijet.v7i2.18.12763
- Ochoa, JS., Cangellaris, AC. 2013.** Random-Space Dimensionality Reduction for Expedient Yield Estimation of Passive Microwave Structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(12): 4313–4321. Doi: 10.1109/TMTT.2013.2286968
- Petrocchi, A., Kaintura, A., Avolio, G., Spina, D., Dhaene, T., Raffo, A., Schreurs, DMMP. 2017.** Measurement Uncertainty Propagation in Transistor Model Parameters via Polynomial Chaos Expansion. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(6): 572–574. Doi: 10.1109/LMWC.2017.2701334
- Queipo, NV., Haftka, RT., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R., Kevin Tucker, P. 2005.** Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(1): 1–28. Doi: 10.1016/j.paerosci.2005.02.001
- Rayas-sanchez, J., Gutierrez-Ayala, V. 2006.** EM-Based Statistical Analysis and Yield Estimation Using Linear-Input and Neural-Output Space Mapping. 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1597–1600. Doi: 10.1109/MWSYM.2006.249641
- Rossi, M., Dierck, A., Rogier, H., Vande Ginste, D. 2014.** A Stochastic Framework for the Variability Analysis of Textile Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(12): 6510–6514. Doi: 10.1109/TAP.2014.2360219
- Shaikh, FA., Khan, S., Zaharudin, Z., Alam, AHMZ., Yaacob, MB., Shahid, Z., Diyana Bt. Abdul Rahman, F., Badron, KBt. 2017.** Ultra-wideband antipodal Vivaldi antenna for radar and microwave imaging application. 2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS), 1–4. Doi: 10.1109/ICETSS.2017.8324143
- Tianang, EG., Elmansouri, MA., Filipovic, DS. 2018.** Ultra-Wideband Lossless Cavity-Backed Vivaldi Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(1): 115–124. Doi: 10.1109/TAP.2017.2775286
- Uluslu, A. 2021.** Design of Microstrip Filter by Modeling with Reduced Data. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 36(11): 1453–1459. Doi: 10.13052/2021.ACESJ.361109
- Uluslu, A. 2022.** Farklı Örneklem Yöntemlerinin Yapay Sinir Ağlarında Performansının Karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2): 412–428. Doi: 10.21923/jesd.1012106
- Uluslu, A. 2023.** Application of Artificial Neural Network Base Enhanced MLP Model for Scattering Parameter Prediction of Dual-band Helical Antenna. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 38(5): 316–324. Doi: 10.13052/2023.ACESJ.380504

- Van Der Malsburg, C. 1986.** Frank Rosenblatt: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. In *Brain Theory*, 245–248. Springer Berlin Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-642-70911-1_20
- vivaldi Offset Cavity. n.d..** <https://ch.mathworks.com/help/antenna/ref/vivaldioffsetcavity.html>.
- Wang, J., Yang, X., Wang, B. 2018.** Efficient gradient-based optimisation of pixel antenna with large-scale connections. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(3): 385–389. Doi: 10.1049/iet-map.2017.0719
- Wang, N., Fang, M., Qiu, J., Xiao, L. 2017.** Improved design of balanced antipodal Vivaldi for MMW applications. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2615–2616. Doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073350
- Werbos, P. J. 2005.** Applications of advances in nonlinear sensitivity analysis. In *System Modeling and Optimization*, 762–770. Springer-Verlag. Doi: 10.1007/BFb0006203
- Yan, JB., Gogineni, S., Camps-Raga, B., Brozena, J. 2016.** A Dual-Polarized 2–18-GHz Vivaldi Array for Airborne Radar Measurements of Snow. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(2): 781–785. Doi: 10.1109/TAP.2015.2506734
- Yilmaz, BA., Dogan, D. 2017.** A dual polarized all metal wide-band vivaldi array with wide scan ability. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 309–310. Doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072197
- Yu, H., Yang, G., Wu, Q. 2016.** Design and analysis of tapered-slot Vivaldi antenna. 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 479–481. Doi: 10.1109/ICEICT.2016.7879745