

Elektrik-elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Gelişen Sistemler



Editör
İŞHAK PARLAR



BİDGE Yayınları

Elektrik-elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde Gelişen Sistemler

Editör: İSHAK PARLAR

ISBN: 978-625-8567-14-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Güncel mühendislik alanında karşılaşılan problemler, artan teknolojik çeşitlilik ve sistem karmaşıklığı nedeniyle tek bir mühendislik disiplininin bakış açısıyla çözülebilecek sınırların ötesine geçmiştir. Enerji üretim ve dağıtım sistemlerinden ileri elektronik donanımlara, modern haberleşme altyapılarından akıllı algılama sistemleri ve yazılım destekli mühendislik uygulamalarına kadar uzanan bu geniş teknoloji ekosistemi, disiplinler arası etkileşimi temel bir gereklilik hâline getirmektedir. Bu kitap; elektrik, elektronik ve haberleşme mühendisliği alanları ile bunların alt uzmanlık dallarında yürütülen güncel kuramsal çalışmalar ve uygulama odaklı araştırmaları bir araya getirerek, mühendislik problemlerine bütünlüklük bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir. Akademisyenler, lisansüstü araştırmacılar ve endüstri profesyonelleri için referans niteliği taşıması amaçlanan eser, disiplinler arası iş birliğinin yenilikçi, sürdürülebilir ve etkin mühendislik çözümleri üretmedeki belirleyici rolünü ortaya koyan çalışmaları kapsamaktadır.

Dr. Öğr. Üyesi İshak PARLAR

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

Sol-jel Tekniğiyle Üretilen İnce Filmlerin (ağ Katkılı In_2S_3) Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi	1
<i>İBRAHİM BOZ, ABDULKADİR AYANOĞLU</i>	
KANSER TESPİTİNDE YAPAY ZEKA VE DERİN ÖĞRENME UYGULAMALARI	16
<i>MUSAB COŞKUN</i>	
MOBİL ROBOTLAR İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI İZLEME SİSTEMİ TASARIMI	38
<i>SEYİT AHMET KARIŞ, MUSTAFA ENGİN</i>	
YÜKSEK FREKANS UYGULAMALARINDA KLASİK ANALOG SÜZGEÇ YAPILARININ SINIRLARI VE ELLİPTİK SÜZGEÇLERİN SAĞLADIĞI AVANTAJLAR	56
<i>FADİLE ŞEN</i>	
Modern Fpga'lerin Donanım Kaynaklarının İncelenmesi	72
<i>BAHADIR ÖZKILBAÇ</i>	
PYTHON PROGRAMLAMA DİLİ VE KAREKOD TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK ENVANTER KONTROL PROGRAMI GELİŞTİRİLMESİ	93
<i>BEKİR SAMİ TEZEKİCİ, MUSTAFA ONUR TÜFEKÇİ</i>	
GAZ SENSÖRLERİ: TEMELLER, TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR	119
<i>YUNUS AKALTUN</i>	

BÖLÜM 1

SOL-JEL TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN İNCE FİLMLERİN (AG KATKILI In_2S_3) YAPISAL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim BOZ¹

Abdulkadir AYANOĞLU²

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan enerji gereksinimi ve fosil yakıt temelli üretim süreçlerinin çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji teknolojilerine yönelik araştırmaları zorunlu hâle getirmiştir. Bu çerçevede güneş enerjisi, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi, geniş erişilebilirliği ve çevreyle uyumlu yapısı sayesinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir konuma sahiptir. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan fotovoltaik sistemlerin verimliliği ise büyük ölçüde yarıiletken

¹ Öğr Gör, Mardin Artuklu Üniversitesi, Elektrik ve Enerji , Orcid: 0000-0002-2719-4197

² Dr.Öğr.Üy. Mardin Artuklu Üniversitesi, OSB-Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Mardin-Türkiye-Orcid: 0009-0001-2392-7015

malzemelerin yapısal ve optik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Yarıiletken malzemeler, enerji bant yapıları ve taşıyıcı davranışlarının dış etkenlere duyarlı olması nedeniyle optoelektronik teknolojilerin temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda ince film yarıiletkenler; düşük üretim maliyetleri, geniş alanlara uygulanabilirlikleri ve ayarlanabilir fiziksel özellikleri sayesinde fotovoltaiik aygıtlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. İnce film teknolojileri, malzeme tüketiminin azaltılması ve üretim süreçlerinin basitleştirilmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır.

III–VI grubu bileşik yarıiletkenlerden biri olan indiyum sülfür (In_2S_3), toksik içermeyen yapısı, kimyasal kararlılığı ve uygun bant aralığı nedeniyle fotovoltaiik uygulamalar için dikkat çekici bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. In_2S_3 yarıiletkeni, özellikle güneş pillerinde pencere tabakası olarak kullanılabilecek özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, bu malzemenin yapısal ve optik özellikleri üretim yöntemi, katkılama ve ısı işlem koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir.

Yarıiletken ince filmlerin performansının artırılmasında katkılama önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Katkı atomları, kristal örgüde meydana getirdikleri değişimler aracılığıyla enerji bant yapısını ve optik davranışı etkileyebilmektedir. Bu çalışmada tercih edilen gümüş (Ag) katkısı, In_2S_3 ince filmlerinin yapısal düzenliliğini ve optik soğurma özelliklerini iyileştirme potansiyeli nedeniyle incelenmiştir.

Bu kitap bölümünde, sol-jel yöntemi kullanılarak üretilen saf ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Tavlama sıcaklığı ve Ag katkı oranının film özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilerek, elde edilen sonuçlar fotovoltaiik ve optoelektronik uygulamalar açısından tartışılmaktadır.

2. Ag KATKILI In_2S_3 YARIİLETKENLERİN LİTERATÜRDEKİ YERİ

İndiyum sülfür (In_2S_3), III–VI grubu bileşik yarıiletkenler arasında yer almakta olup, üretim koşullarına bağlı olarak farklı kristal fazlarda elde edilebilmektedir. Bu faz çeşitliliği, In_2S_3 ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin üretim yöntemi ve işlem parametrelerine duyarlı olmasına neden olmaktadır Barreau ve ark.(2000). Literatürde, In_2S_3 ince filmlerinin termal buharlaştırma, kimyasal püskürtme, SILAR ve sol-jel gibi çeşitli yöntemlerle üretildiği rapor edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, özellikle tavlama sıcaklığının kristal yapı ve optik bant aralığı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı vurgulanmaktadır. Tavlama işlemiyle birlikte kristal kusurların azaldığı ve filmlerin yapısal düzenliliğinin arttığı belirtilmektedir (Bhira ve ark 2000) ,(Boylestad, R. Ve ark 2015). Bu durum, ince film yarıiletkenlerde ısı işlemlerin önemini ortaya koymaktadır.

Yarıiletken ince filmlerin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesinde katkılama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal katkı atomları, kristal örgüye dâhil olarak enerji bant yapısında değişimlere yol açabilmekte ve optik soğurma davranışını etkileyebilmektedir. In_2S_3 yarıiletkeni üzerinde gerçekleştirilen katkılama çalışmalarında, farklı metal katkıların elektriksel ve optik özellikler üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu rapor edilmiştir (Pahtan ve ark. 2005).

Bu metal katkılar arasında yer alan gümüş (Ag), bant yapısını modifiye edebilmesi ve optik soğurma katsayısını artırabilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır. Literatürde yer alan sınırlı sayıdaki çalışmada, Ag katkı oranının artmasıyla birlikte In_2S_3 ince filmlerinin optik bant aralığında daralma meydana geldiği

belirtilmektedir (Floyd, T. L. 2018). Ancak sol-jel yöntemi kullanılarak üretilen Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin, tavlama sıcaklığı ve katkı oranı birlikte ele alınarak sistematik biçimde incelendiği çalışmaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir(Sedra, A. Ve ark 2020), (Yakuphanoglu, F. Ve ark. 2007).

Bu çalışma, sol-jel yöntemiyle üretilen Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerini ayrıntılı biçimde inceleyerek literatürdeki bu eksikliğin giderilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

3. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada saf ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmler sol-jel daldırma (dip-coating) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sol-jel yöntemi; düşük maliyetli olması, geniş alanlara homojen kaplama imkânı sunması ve kimyasal bileşimin hassas biçimde kontrol edilebilmesine olanak tanınması nedeniyle tercih edilmiştir.

Üretim süreci, çözelti hazırlanması, altlıkların temizlenmesi, kaplama işlemi ve tavlama aşamalarından oluşmaktadır. Ag katkı oranı farklı yüzdelerde ayarlanarak katkı miktarının film özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaplama sonrası elde edilen ince filmler, farklı sıcaklıklarda tavlanaarak ısıl işlemin yapısal ve optik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

3.1. Sol-Jel Çözeltilerinin Hazırlanması

In_2S_3 ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin üretimi için gerekli çözeltiler, indiyum ve sülfür kaynakları kullanılarak hazırlanmıştır. Ag katkılı çözeltilerde gümüş oranı farklı yüzdelerde ayarlanarak katkı miktarının etkisi araştırılmıştır. Çözeltilerin homojenliği, manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo yardımıyla sağlanmış; böylece film kalınlığının ve yüzey yapısının uniform olması hedeflenmiştir.

3.2. Altlıkların Hazırlanması ve Kaplama İşlemi

Kaplama işlemlerinde cam altlıklar kullanılmıştır. Altlıklar, yüzeydeki organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması amacıyla kimyasal çözücülerle temizlenmiş ve ultrasonik banyoda işlem görmüştür. Temizlenen altlıklar sol-jel çözeltisine belirli bir hızda daldırılıp çekilerek ince film kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi, film kalınlığını artırmak ve yüzey homojenliğini iyileştirmek amacıyla belirli sayıda tekrar edilmiştir.

3.3. Tavlama İşlemi

Kaplama sonrası elde edilen ince filmler, farklı sıcaklıklarda tavlanoarak kristal yapı ve optik özellikler üzerindeki sıcaklık etkisi incelenmiştir. Tavlama işlemi, filmlerdeki organik kalıntıların uzaklaştırılması ve kristalleşmenin artırılması amacıyla uygulanmıştır. Tavlama sıcaklığı arttıkça filmlerin yapısal düzenliliğinde belirgin iyileşmeler gözlenmiştir.

3.4. Karakterizasyon Teknikleri

Üretilen ince filmlerin yapısal özellikleri X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile incelenmiştir. Yüzey morfolojisi ve tanecik yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Optik özelliklerin belirlenmesinde UV-Vis spektrofotometresi kullanılmış; optik soğurma, geçirgenlik ve bant aralığı değerleri bu ölçümlerden elde edilmiştir.

4. YAPISAL ÖZELLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Üretilen saf ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin kristal yapıları X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen kırınım desenleri, In_2S_3 yarıiletkeninin karakteristik kristal

düzlemleriyle uyum göstermektedir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte kırınım piklerinin şiddetinde belirgin bir artış gözlenmiş ve bu durum kristal yapının iyileştiğini göstermiştir.

Ag katkısının kristal yapı üzerindeki etkisi incelendiğinde, düşük katkı oranlarında temel kristal yapının korunduğu, ancak katkı oranının artmasıyla birlikte pik genişliklerinde ve şiddetlerinde değişimler meydana geldiği belirlenmiştir. Bu değişimler, Ag atomlarının kristal örgüde oluşturduğu lokal gerilmeler ve kusurlarla ilişkilendirilmektedir.

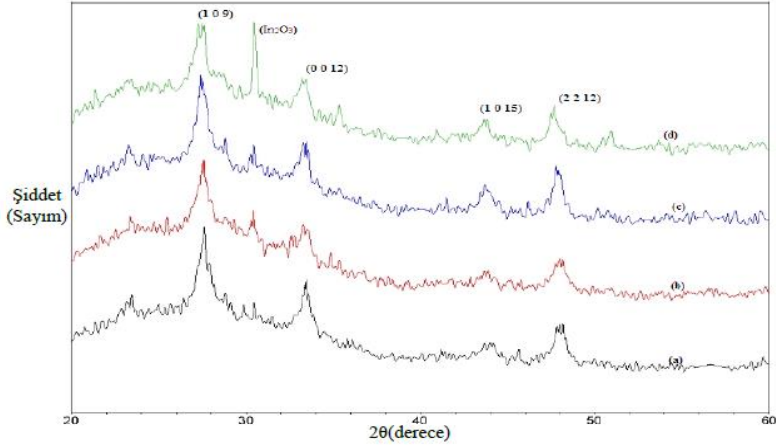
Yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. SEM görüntüleri, tavlama sıcaklığı ve Ag katkı oranının tanecik boyutu ve yüzey homojenliği üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Düşük katkı oranlarında yüzeyin daha homojen olduğu, yüksek katkı oranlarında ise tanecik kümelenmelerinin arttığı gözlenmiştir.

4.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analizi

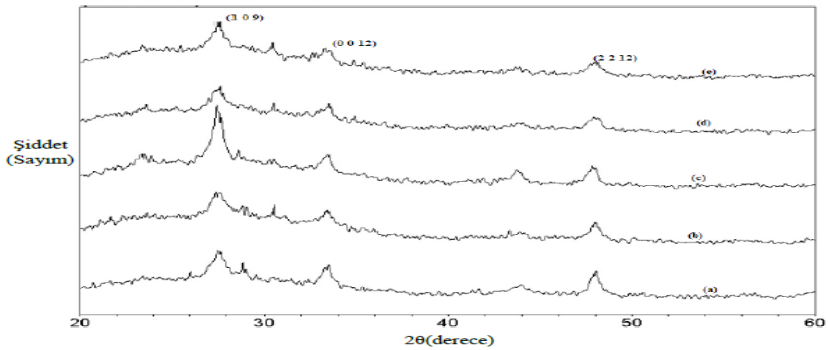
Saf ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin kristal yapıları XRD analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen kırınım desenleri, In_2S_3 yarıiletkeninin literatürde rapor edilen karakteristik düzlemleriyle uyum göstermektedir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte kırınım piklerinin şiddetinde belirgin bir artış gözlenmiş, bu durum kristal yapının iyileştiğini göstermiştir.

Ag katkısının kristal yapı üzerindeki etkisi incelendiğinde, düşük katkı oranlarında temel kristal yapının korunduğu, ancak katkı oranı arttıkça pik şiddetlerinde ve genişliklerinde değişimler meydana geldiği belirlenmiştir. Bu değişimler, Ag atomlarının kristal örgüde oluşturduğu lokal gerilmeler ve kusurlarla ilişkilendirilmektedir. Yüksek katkı oranlarında pik genişlemesi, kristal boyutunda azalmaya ve yapısal düzensizliklere işaret etmektedir.

Tavlama sıcaklığının artmasıyla kristal kusurların azaldığı ve daha düzenli bir yapı olduğu gözlenmiştir. Bu durum, Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin uygun tavlama koşulları altında yüksek kristal kaliteye sahip olabileceğini göstermektedir.



Şekil 1. Ag katkılı $\text{-In}_2\text{S}_3$ çözeltisi ile farklı sıcaklıkta hazırlanmış numunelere ait XRD sonuçları



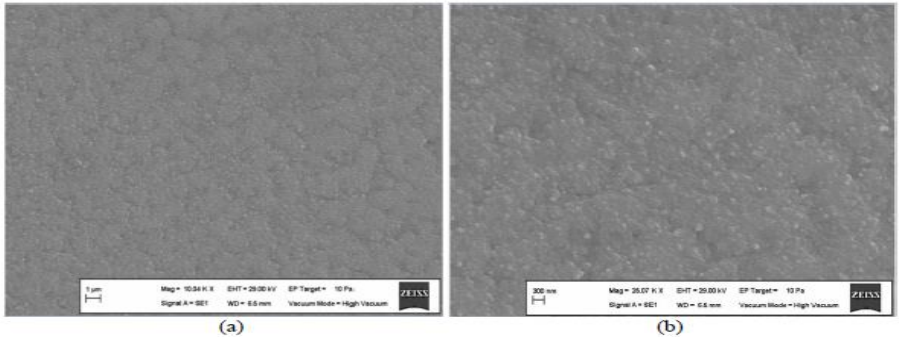
Şekil 2. Ag katkılı In_2S_3 çözeltisi ile hazırlanmış numunelere ait XRD sonuçları, farklı Ag katkı oranı

4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM görüntüleri, üretilen ince filmlerin yüzey morfolojisi hakkında ayrıntılı bilgiler sunmaktadır. Saf In_2S_3 ince filmlerinin yüzeylerinin homojen ve çatlak içermeyen bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte taneciklerin daha belirgin hâle geldiği ve yüzeyin daha kompakt bir yapı kazandığı tespit edilmiştir.

Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinde ise katkı oranına bağlı olarak yüzey morfolojisinde değişimler meydana gelmiştir. Düşük Ag katkı oranlarında yüzeyin homojenliği korunurken, yüksek katkı oranlarında tanecik kümelenmeleri ve yüzey pürüzlülüğünde artış gözlenmiştir. Bu durum, Ag katkısının nükleasyon süreçlerini etkileyerek tanecik büyüme mekanizmasını değiştirdiğini göstermektedir.

SEM analizleri, XRD sonuçlarıyla uyumlu olarak, tavlama sıcaklığı ve Ag katkı oranının filmlerin yapısal özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



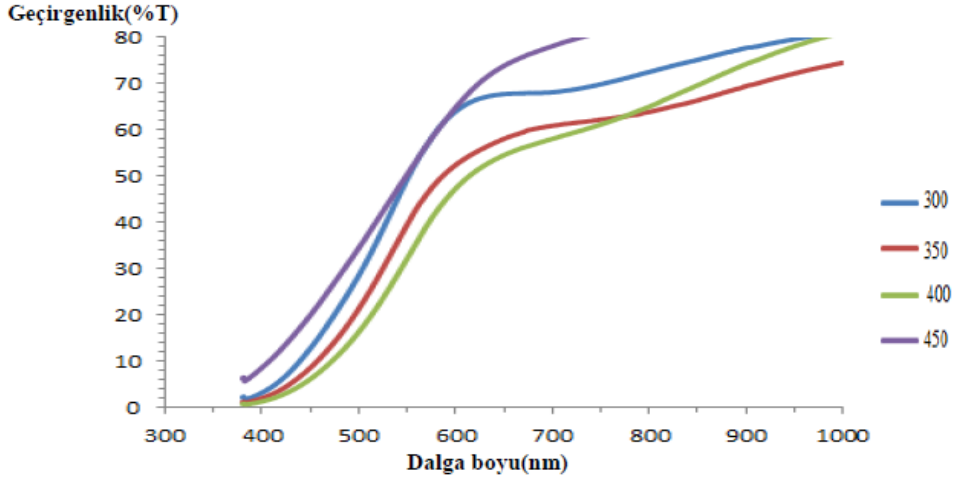
Şekil 3. Sol-jel tekniğiyle ile hazırlanmış In_2S_3 yarıiletkeninin a) katkısız b)Ag katkılı, ince filmlerinin SEM görüntüsü,

5. OPTİK ÖZELLİKLER VE BANT ARALIĞI ANALİZİ

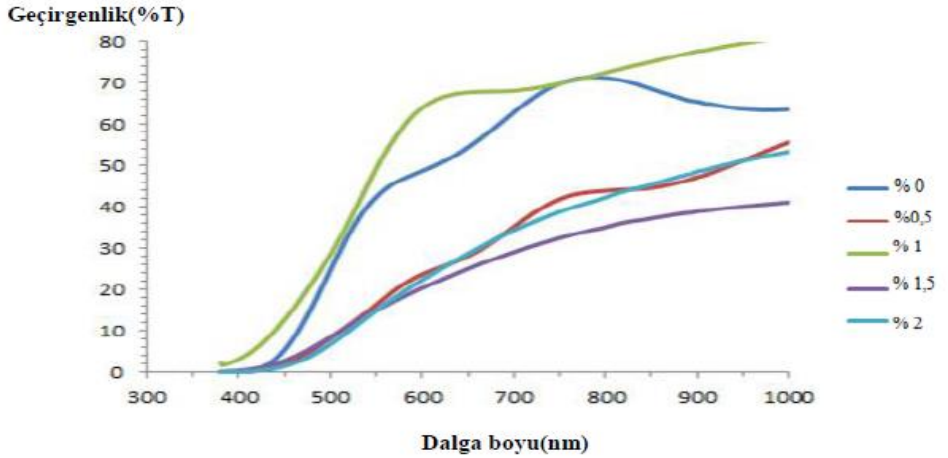
Saf ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin optik özellikleri, UV-Vis spektrofotometresi kullanılarak incelenmiştir. Optik ölçümler, filmlerin geçirgenlik, soğurma davranışı ve optik bant aralığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu özellikler, özellikle fotovoltaiik ve optoelektronik uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır.

5.1. Optik Soğurma ve Geçirgenlik Özellikleri

Elde edilen UV-Vis spektrumları, In_2S_3 ince filmlerinin görünür ve yakın morötesi bölgede yüksek optik soğurma sergilediğini göstermektedir (şekil 5). Saf In_2S_3 ince filmlerinde tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte soğurma kenarında belirgin bir kayma gözlenmiştir. Bu durum, kristal yapının iyileşmesi ve kusur yoğunluğunun azalması ile ilişkilendirilmektedir. Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinde ise katkı oranına bağlı olarak optik soğurma davranışında değişimler meydana gelmiştir (şekil 6) . Düşük Ag katkı oranlarında soğurma özelliklerinin saf In_2S_3 filmlerine benzer olduğu görülürken, katkı oranının artmasıyla birlikte soğurma katsayısında artış gözlenmiştir. Bu artış, Ag katkısının enerji bant yapısını değiştirerek ek ara enerji seviyeleri oluşturmasıyla açıklanabilir. Geçirgenlik ölçümleri incelendiğinde, saf In_2S_3 ince filmlerinin görünür bölgede orta düzeyde geçirgenliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Ag katkısının artmasıyla geçirgenlik değerlerinde kısmi bir azalma gözlenmiş, bu durum artan soğurma ve saçılma etkileriyle ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4. Hazırlanmış $Ag-In_2S_3$ yarıiletkenlerinde tavlama sıcaklığının optiksel geçirgenliğe etkisi, farklı sıcaklıkt tavllanmış filmler



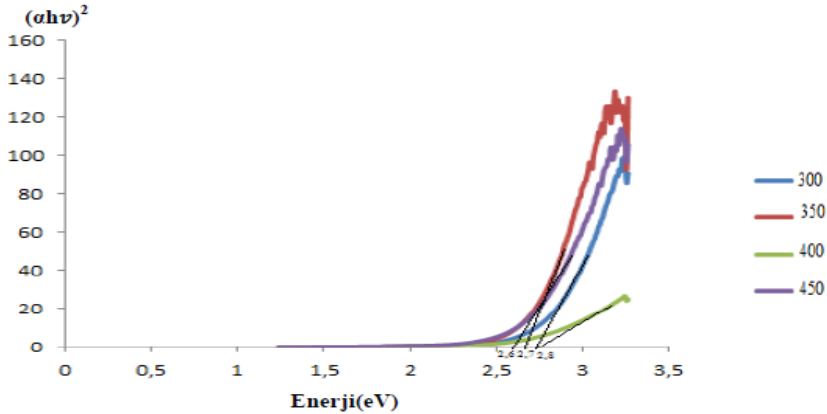
Şekil.5 Ag katkı oranının In_2S_3 yarıiletkenlerinin optiksel geçirgenliğe etkisi

5.2. Optik Bant Aralığının Belirlenmesi

Optik bant aralığı (E_g) değerleri, soğurma katsayısı kullanılarak Tauc yöntemi ile hesaplanmıştır. $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri üzerinden yapılan ekstrapolasyonlar sonucunda, saf In_2S_3 ince filmlerinin bant aralığının literatürde rapor edilen değerlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte bant aralığında küçük değişimler meydana gelmiştir. Bu değişim, kristal yapının düzenlenmesi ve bant kenarındaki kusur durumlarının azalmasıyla ilişkilendirilmektedir. Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinde ise katkı oranının artmasıyla optik bant aralığında belirgin bir daralma gözlenmiştir.

Bant aralığındaki bu daralma, Ag atomlarının kristal örgüye dâhil olması sonucu bant yapısında meydana gelen bozulmalar ve yeni enerji seviyelerinin oluşması ile açıklanabilir. Elde edilen bant aralığı değerleri, Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin güneş pili uygulamalarında ışık soğurucu tabaka olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 6 . hazırlanan In_2S_3 yarıiletkenlerinde tavlama sıcaklığının optik bant Aralığı üzerindeki etkisi,

6. BULGULARIN LİTERATÜRLE KARŞILAŞTIRMALI TARTIŞMASI

Bu çalışmada elde edilen yapısal ve optik bulgular, literatürde rapor edilen benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. XRD analizleri, tavlama sıcaklığının artmasıyla In_2S_3 ince filmlerinin kristal kalitesinin iyileştiğini göstermiştir. Bu sonuç, literatürde sol-jel ve kimyasal püskürtme yöntemleriyle üretilen In_2S_3 ince filmler için bildirilen sonuçlarla uyumludur.

Ag katkısının kristal yapı üzerindeki etkileri incelendiğinde, düşük katkı oranlarının kristal yapıyı bozmadığı, ancak yüksek katkı oranlarında yapısal düzensizliklerin arttığı görülmüştür. Benzer şekilde, literatürde Ag ve diğer metal katkılı In_2S_3 ince filmleri üzerine yapılan çalışmalarda da katkı oranının kritik bir parametre olduğu vurgulanmaktadır.

Optik özellikler açısından elde edilen sonuçlar, Ag katkısının optik bant aralığını daralttığını ve soğurma katsayısını artırdığını ortaya koymaktadır. Bu durum, literatürde rapor edilen Ag katkılı ZnS ve In_2S_3 benzeri yarıiletken sistemlerle uyum göstermektedir. Bant aralığındaki daralma, Ag katkısının fotovoltaik uygulamalarda daha geniş spektral bölgede ışık soğurulmasına olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu karşılaştırmalı değerlendirmeler, sol-jel yöntemiyle üretilen Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin yapısal ve optik özellikler açısından literatürdeki benzer sistemlerle rekabet edebilir nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle uygun katkı oranı ve tavlama sıcaklığı seçimiyle, bu filmlerin güneş pili ve optoelektronik uygulamalar için umut vadeden bir malzeme olduğu söylenebilir.

7. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu kitap bölümünde, sol-jel yöntemi kullanılarak üretilen saf ve Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri sistematik olarak incelenmiştir. Tavlama sıcaklığı ve Ag katkı oranının, ince filmlerin kristal yapısı, yüzey morfolojisi ve optik bant aralığı üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

XRD analizleri, tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte In_2S_3 ince filmlerinin kristal kalitesinin belirgin biçimde iyileştiğini ortaya koymuştur. Kırınım piklerinin şiddetindeki artış ve pik genişliklerindeki azalma, kristal yapının daha düzenli hâle geldiğini göstermektedir. Ag katkılı filmlerde ise düşük katkı oranlarında temel kristal yapının korunduğu, ancak yüksek katkı oranlarında kristal düzensizliklerin ve lokal gerilmelerin arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, katkı oranının kritik bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

SEM analizleri, saf In_2S_3 ince filmlerinin homojen ve kompakt bir yüzey yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Tavlama sıcaklığının artması, taneciklerin daha belirgin hâle gelmesini ve yüzey pürüzlülüğünün azalmasını sağlamıştır. Ag katkılı filmlerde ise katkı oranına bağlı olarak tanecik büyüme mekanizmasının değiştiği ve yüksek katkı oranlarında yüzey morfolojisinin bozulduğu gözlenmiştir. Bu durum, Ag katkısının nükleasyon ve büyüme süreçlerini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Optik ölçümler, In_2S_3 ince filmlerinin görünür bölgede yüksek soğurma katsayısına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Tavlama sıcaklığının artmasıyla optik soğurma davranışında iyileşme gözlenirken, Ag katkısı optik bant aralığında daralmaya yol açmıştır. Bant aralığındaki bu daralma, Ag atomlarının kristal örgüde oluşturduğu ara enerji seviyeleri ve bant yapısındaki bozulmalarla ilişkilendirilmektedir. Elde edilen bant aralığı

değerleri, Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin güneş pili ve optoelektronik uygulamalar için uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sol-jel yöntemiyle üretilen Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerin, uygun katkı oranı ve tavlama sıcaklığı koşullarında, yapısal ve optik özellikler açısından önemli avantajlar sunduğu söylenebilir. Bu özellikler, söz konusu malzemenin fotovoltaik aygıtlarda pencere tabakası veya ışık soğurucu katman olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalarda, Ag katkılı In_2S_3 ince filmlerinin elektriksel özelliklerinin (taşıyıcı yoğunluğu, hareketlilik ve özdirenç) ayrıntılı olarak incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu filmlerin gerçek bir güneş pili yapısı içerisinde test edilmesi, elde edilen yapısal ve optik avantajların aygıt performansına olan etkisini ortaya koyacaktır. Farklı metal katkıların ve çoklu katkılama stratejilerinin araştırılması da In_2S_3 tabanlı ince filmlerin uygulama alanlarını genişletebilecek önemli bir araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir.

Kaynakça

- Barreau, N., Marsillac, S., Albertini, D., & Pareige, P. (2005). Structural and optical properties of In_2S_3 thin films deposited by evaporation. *Thin Solid Films*, **482**(1–2), 43–48.
- Barreau, N., Marsillac, S., Bernede, J.-C., & Barreau, A. (2000). Investigation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ growth on different transparent conductive oxides. *Applied Surface Science*, **161**, 120–126.
- Bhira, L., Benramdane, N., Mathieu, C., & Bouzidi, A. (2000). Optical properties of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ thin films prepared by spray pyrolysis. *Materials Chemistry and Physics*, **62**(2), 176–180.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2015). *Electronic devices and circuit theory* (11th ed.). Pearson Education.
- Floyd, T. L. (2018). *Electronic devices* (10th ed.). Pearson Education.
- Pathan, H. M., Lokhande, C. D., Kulkarni, S. S., Amalnerkar, D. P., Seth, T., & Han, S.-H. (2005). Some studies on successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) grown indium sulphide thin films. *Materials Research Bulletin*, **40**, 1018–1023.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2020). *Microelectronic circuits* (8th ed.). Oxford University Press.
- Yakuphanoglu, F., & Caglar, Y. (2007). The effect of metal doping on the optical properties of semiconductor thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, **431**(1–2), 128–132.

BÖLÜM 2

KANSER TESPİTİNDE YAPAY ZEKA VE DERİN ÖĞRENME UYGULAMALARI

1. MUSAB COŞKUN¹

Giriş

Kanser, küresel ölçekte önde gelen ölüm nedenlerinden biri olup, erken teşhis hastaların hayatta kalma oranlarını ve tedavi başarısını doğrudan etkilemektedir. Geleneksel tanı yöntemleri, uzman radyologların ve patologların manuel incelemelerine dayanmaktadır. Tanı süreci zaman alıcı ve maliyetli olmakla birlikte gözlemciye bağlı hatalara açıktır. Son yıllarda, Yapay Zeka (YZ) ve özellikle Derin Öğrenme (DÖ) teknikleri, tıbbi görüntüleme analizinde devrim yaratmıştır. Kitabın bu bölümünde kanser tespitinde kullanılan modern YZ mimarilerini incelenmekte, yaygın kanser türlerindeki güncel literatür başarılarını özetlenmekte ve hibrit model yaklaşımlarının tanısal doğruluk üzerindeki etkisi tartışılmaktadır. Bölümde ayrıca, araştırmacılar için rehber niteliğinde veri ön işleme, model eğitimi ve Açıklanabilir Yapay Zeka (AYZ) kavramlarını içeren uçtan uca bir uygulama çerçevesi sunulmaktadır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-8323-2330

Kanser, biyolojik olarak kontrolsüz hücre çoğalması ve bu hücrelerin vücudun diğer bölgelerine yayılma potansiyeli ile karakterize edilen heterojen bir hastalık grubudur. Günümüzde hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde en önemli halk sağlığı sorunlarından biri olmaya devam etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü'ne (DSÖ) bağlı Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı'nın (UKAA) verilerine göre, küresel kanser yükü hızla artmakta; her yıl yaklaşık 19 milyon yeni vaka teşhis edilmekte ve 10 milyona yakın ölüm gerçekleşmektedir (Bray et al., 2018). Bu istatistikler, kanserin sadece tıbbi bir sorun değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik bir kriz olduğunu göstermektedir.

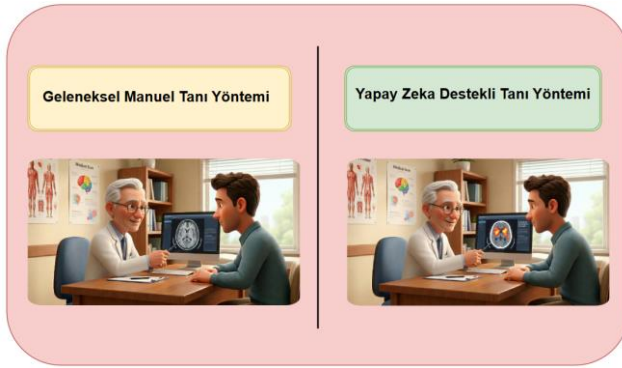
Hastalığın yönetiminde en kritik faktör zaman olarak karşımıza çıkmaktadır. Kanser vakalarında sağkalım oranları, hastalığın teşhis edildiği evre ile ters orantılıdır. Örneğin, lokalize evrede tespit edilen bir meme kanseri veya melanom vakasında 5 yıllık sağkalım oranı %99'lara ulaşabilirken, metastatik evrede bu oran dramatik bir şekilde düşmektedir. Bu durum, semptomlar henüz klinik olarak belirginleşmeden önce yapılan tarama ve erken tanı süreçlerinin hayati önemini ortaya koymaktadır.

Modern tıpta tanı süreci büyük ölçüde radyolojik (MR, BT, Röntgen, Ultrason) ve patolojik (Histopatolojik Görüntüler) görüntülemeye dayanır. Geleneksel iş akışında bu görüntüler, alanında uzmanlaşmış radyologlar ve patologlar tarafından görsel olarak incelenir. Ancak bu insan merkezli analiz süreci, günümüz sağlık sistemlerinde ciddi çıkmazlarla karşılaşmaktadır:

- I. **Veri Patlaması ve İş Yüğü:** Tıbbi görüntüleme teknolojilerindeki gelişmeler, görüntü çözünürlüklerini ve kesit sayılarını artırmıştır. Bir radyoloğun günde incelemesi gereken görüntü sayısı binlerle ifade edilmektedir. Bu yoğun veri akışı, uzmanlarda algısal yorgunluğa yol açarak tanısız hata riskini artırmaktadır (Topol, 2019).

- II. **Gözlemciler Arası Değişkenlik:** Aynı tıbbi görüntüye bakan iki farklı uzman, deneyimlerine ve eğitimlerine bağlı olarak farklı tanıları koyabilmektedir. Hatta aynı uzmanın farklı zamanlarda aynı görüntüye farklı yorumlar getirdiği durumlar literatürde sıkça raporlanmıştır.
- III. **Karmaşık Örüntülerin Tespiti:** Erken evre tümörler veya mikrokalsifikasyonlar genellikle çok küçük boyutludur ve çevre dokularla düşük kontrast farkına sahiptir. İnsan gözünün ayırt etmekte zorlandığı bu silik örüntülerin tespiti, manuel incelemelerde gözden kaçabilmektedir.

***Şekil 1.** Geleneksel Manuel Tanı Süreci ile Yapay Zeka Destekli Tanı Sürecinin Farkı*



Geçmişte kullanılan Bilgisayar Destekli Tanı (BDT) sistemleri, mühendisler tarafından manuel olarak tanımlanan kurallara dayanmaktaydı. Ancak son on yılda, YZ ve özellikle DÖ teknolojileri, bu paradigmayı kökten değiştirmiştir. Şekil 1’de geleneksel manuel tanı süreci ile yapay zeka destekli tanı sürecinin farkı görülmektedir. DÖ, özellikle KSA, görüntüdeki öznelilikleri manuel bir müdahale olmaksızın, doğrudan ham veriden hiyerarşik olarak öğrenme yeteneğine sahiptir (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015). Bu algoritmalar, klasik uzmanlarla yarışır ve hatta bazı durumlarda onları geçen performanslar sergilemiştir (Litjens et al., 2017).

1. Tıbbi Görüntülemede YZ Mimarileri

Tıbbi görüntü analizi, YZ'nin en başarılı olduğu alanlardan biridir. Burada iki temel mimari öne çıkmaktadır.

1.1. Konvolüsyonel Sinir Ağları

KSA'lar, özellikle görüntü ve video gibi yüksek boyutlu ve mekânsal bağımlılık içeren verilerin analizinde etkili olacak şekilde geliştirilmiş DÖ mimarileridir. KSA'ların temel amacı, görüntü verisi içerisinde yer alan yerel örüntüleri ve mekânsal hiyerarşileri otomatik olarak öğrenmek ve bu bilgileri giderek daha soyut temsil seviyelerine dönüştürmektir. Bu hiyerarşik yapı sayesinde ağın ilk katmanları kenar ve köşe gibi basit özellikleri öğrenirken, daha derin katmanlar dokular, nesne parçaları ve nihayetinde karmaşık şekil ve nesne temsillerini yakalayabilmektedir.

KSA mimarilerinin temeli, LeCun ve çalışma arkadaşları tarafından 1990'lı yıllarda önerilen ve özellikle el yazısı rakam tanıma problemlerinde başarı sağlayan LeNet modeline dayanmaktadır. Bu çalışmalar, klasik tam bağlantılı yapay sinir ağlarının görüntü verisi üzerindeki sınırlılıklarını aşarak, ağırlık paylaşımı ve yerel alıcı alanlar gibi kavramların etkinliğini ortaya koymuştur. Günümüzde KSA'lar; tıbbi görüntüleme, otonom araçlar, yüz tanıma, endüstriyel hata tespiti ve uzaktan algılama gibi pek çok alanda de facto standart modeller haline gelmiştir (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015).

KSA'ların tipik bir mimarisi; konvolüsyon katmanları, aktivasyon fonksiyonları, örnekleme katmanları ve tam bağlantılı katmanlardan oluşmaktadır. Konvolüsyon katmanları, giriş görüntüsü üzerinde kayan filtreler aracılığıyla özellik haritaları üretirken; örnekleme katmanları, hesaplama maliyetini azaltmak ve modelin küçük konumsal değişimlere karşı daha dayanıklı olmasını sağlamak amacıyla uzamsal boyut indirgeme işlemi gerçekleştirir.

Bu yapı, hem parametre sayısını kontrol altında tutmakta hem de aşırı öğrenme riskini azaltmaktadır.

Derin KSA mimarilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, ağ derinliğinin artmasına bağlı olarak kaybolan gradyan ve patlayan gradyan gibi optimizasyon problemleri daha belirgin hale gelmiştir. Bu zorlukları aşmak amacıyla literatürde farklı mimari yaklaşımlar geliştirilmiştir (He et al., 2016; Tan & Le, 2019). Genel olarak KSA tabanlı mimariler görüntü verisinden anlamlı özelliklerin otomatik ve hiyerarşik biçimde öğrenilmesini mümkün kılarak, klasik görüntü işleme yöntemlerine kıyasla önemli üstünlükler sağlamaktadır. Geliştirilen modern KSA varyantları, hem model derinliği hem de hesaplama verimliliği açısından önemli ilerlemeler sunmuştur. Özellikle tıbbi tanı ve karar destek sistemlerinde güvenilir ve güçlü araçlar olarak literatürdeki yerini sağlamlaştırmıştır.

1.2. Vision Transformers ve Dikkat Mekanizması

Derin öğrenme alanında son yıllarda yaşanan en önemli paradigma değişimlerinden biri, dikkat mekanizmasının yalnızca Doğal Dil İşleme (DDİ) ile sınırlı kalmayıp, bilgisayar görme ve tıbbi görüntüleme gibi problemler için de başarıyla uygulanmasıdır. Bu dönüşümün teorik altyapısını, Vaswani ve arkadaşlarının “Attention is All You Need” başlıklı çalışması sunmuştur (Vaswani et al., 2017). Bu makale, sıralı verilerde bağımlılıkların modellenmesi için Tekrarlı Sinir Ağları (TSA) veya KSA yapılarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, tamamen dikkat temelli bir mimari olan Transformer’ı tanıtmıştır. Bu esneklik ve ölçeklenebilirlik, Transformer mimarisini görüntü verileri üzerinde benzer biçimde uygulamaya yönlendirmiştir. Özellikle Dosovitskiy ve arkadaşları tarafından önerilen Vision Transformer (ViT) modeli, görüntüyü sınırlı sayıda sabit boyutlu karelere bölerek bu parçalar arasındaki ilişkileri öğrenmeye odaklanır (Dosovitskiy et al., 2020).

ViT mimarisinde, giriş görüntüleri öncelikle eşit boyutlu karelere ayrılır ve her bir kare, doğrusal bir projeksiyonla vektör uzayına taşınarak patch embedding adı verilen temsiller oluşturulur. Bu temsillere uzamsal bilgi kaybını önlemek için konumsal kodlamalar eklenir. Oluşturulan token dizisi, çok katmanlı Transformer encoder bloklarına uygulanır ve bu blokların temel bileşeni olan çoklu dikkat mekanizması sayesinde görüntüdeki farklı bölgeler arasındaki ilişkiler eş zamanlı olarak modellenir.

Dikkat mekanizmasının en önemli avantajı, görüntünün yalnızca yerel komşuluklarla sınırlı kalmayıp uzun mesafeli ve küresel bağlam ilişkilerini doğrudan öğrenebilmesidir. Bu özellik, özellikle karmaşık görsel ilişkilerin kritik olduğu tıbbi görüntüleme, uzaktan algılama ve sahne analizi gibi uygulamalarda önemli bir üstünlük sağlar. KSA'lar doğaları gereği sınırlı alıcı alanlara sahip olduğundan, küresel bağlam bilgisini ancak çok sayıda katman üst üste ekleyerek dolaylı şekilde öğrenebilirler. Oysa ViT tabanlı mimariler, dikkat mekanizması sayesinde görüntünün tamamını aynı anda değerlendirebilirler.

KSA ve ViT yaklaşımları karşılaştırıldığında, her iki mimarinin de farklı güçlü ve zayıf yönleri olduğu görülmektedir. KSA'lar yerel öznitelikleri güçlü biçimde çıkarabilirken görece küçük veri setlerinde bile başarılı olabilirler. Vision Transformer modelleri ise genellikle daha büyük veri kümelerine ihtiyaç duyar ve küresel bağlamı daha verimli yakalayarak bazı görevlerde geleneksel KSA mimarilerini geride bırakabilirler. Bu durum, son yıllarda literatürde hibrit KSA-Transformer modellerinin geliştirilmesini de tetiklemiştir. Öte yandan, ViT mimarilerinin hesaplama karmaşıklığı ve bellek gereksinimi, özellikle yüksek çözünürlüklü görüntülerde önemli bir tasarım kısıtı oluşturmaktadır. Zira patch sayısının artması dikkat matrisinin karesel karmaşıklık göstermesine neden olur. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, daha verimli Transformer varyantları geliştirilmiştir (Wang et al., 2025).

Vision Transformer tabanlı yaklaşımlar, özellikle kanser tespitine yönelik tıbbi görüntü analizi problemlerinde son yıllarda önemli ilerlemeler göstermiştir. Kanser tanısı genellikle klinik açıdan son derece kritik olan görüntü sınıflandırma, segmentasyon veya anomali tespiti görevlerini içerir ve bu görevlerde küresel bağlam ilişkilerinin modellenmesi, tanı doğruluğunu artırabilir. Örneğin, meme kanseri tespitinde ViT tabanlı modeller, klasik KSA yaklaşımlarına kıyasla hem yerel hem küresel örüntüleri daha iyi yakalayarak kompleks doku ilişkilerini değerlendirmektedir (Meylem & Çiçek, 2025). ViT mimarileri göğüs kanseri, akciğer kanseri veya beyin tümörü gibi farklı kanser türlerinde de uygulanmıştır. Akciğer kanseri sınıflandırması için yapılan bir çalışmada, ViT tabanlı model BT taramalarında yaklaşık %98'lik yüksek doğruluk elde ederek gürültülü ve bulanık görüntülerde bile sağlam performans göstermiştir (Alqhatani et al., 2025). Ayrıca, ViT ve KSA bileşenlerini birleştiren hibrit modeller, kolon ve akciğer kanseri gibi farklı kanser türlerinin tespitinde yüksek başarı oranları ile literatürde raporlanmıştır (Yıldız & Yakut, 2023; Aburass et al., 2025). Bu bulgular, ViT mimarilerinin tıbbi görüntü analizinde kanser tespitini daha kapsamlı bağlamsal örüntülerle modelleyerek, tanı doğruluğunu artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, büyük veri setleri ve güçlü donanım gereksinimi gibi pratik zorluklar nedeniyle, klinik uygulamalarda bu modellerin genelleştirilmiş ve açıklanabilir hale getirilmesi için ek araştırmalar gerekmektedir (Aburass et al., 2025).

2. Yaygın Kanser Türlerinde Yapay Zeka Uygulamaları

Yapay zeka (YZ) tabanlı sistemler, farklı kanser türlerinin kendine özgü biyolojik yapıları ve kullanılan görüntüleme modaliteleri doğrultusunda özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır. Mamografi, Bilgisayarlı Tomografi (BT), dermoskopi ve Manyetik Rezonans Görüntüleme (MR) gibi farklı görüntüleme teknikleri, YZ modellerinin mimari seçimlerini ve eğitim stratejilerini doğrudan

etkilemektedir. Bu bölümde, literatürde en yaygın olarak çalışılan kanser türleri üzerinden YZ uygulamaları ele alınmakta ve elde edilen klinik açıdan anlamlı sonuçlar özetlenmektedir.

2.1. Meme Kanseri

Meme kanseri, dünya genelinde kadınlarda en sık görülen kanser türlerinden biri olup, erken tanı sağkalım oranlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Klinik pratikte tarama amacıyla yaygın olarak kullanılan mamografi görüntüleri, mikrokalsifikasyonlar ve kitle yapıları gibi ince detayların değerlendirilmesini gerektirir. Ancak bu bulguların kontrastının düşük olması ve doku yoğunluğunun değişkenliği, insan gözünün algı kapasitesini zorlayan önemli faktörlerdir.

Bu alanda yapılan en dikkat çekici çalışmalardan biri, McKinney ve arkadaşları tarafından yürütülen ve Google Health iş birliğiyle geliştirilen derin öğrenme tabanlı tarama sistemidir. Söz konusu çalışmada, çok merkezli ve uluslararası veri setleri üzerinde eğitilen modelin, hem yanlış pozitif hem de yanlış negatif oranlarını anlamlı biçimde düşürdüğü gösterilmiştir. Özellikle yanlış pozitif oranlarında %5.7, yanlış negatif oranlarında ise %9.4'lük azalma rapor edilmesi, YZ sistemlerinin radyolog kararlarını destekleyici potansiyelini ortaya koymaktadır (McKinney et al., 2020).

Teknik açıdan bakıldığında, meme kanseri tespitinde çoğunlukla tam görüntü mamografileri üzerinde eğitilmiş derin KSA mimarileri tercih edilmektedir. ResNet tabanlı yapılar, derinlik avantajı ve kararlı gradyan akışı sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda dikkat mekanizmaları ve çoklu ölçekli özellik çıkarımı kullanan modellerin, yoğun meme dokusuna sahip hastalarda daha tutarlı performans sunduğu bildirilmektedir.

2.2. Akciğer Kanseri

Akciğer kanseri, genellikle ileri evrelerde teşhis edilmesi nedeniyle yüksek mortalite oranına sahip bir kanser türüdür. Ancak erken evrede tespit edilen akciğer nodüllerinde, hastaların beş yıllık sağkalım oranlarının %70'lere kadar çıkabildiği bilinmektedir. Bu nedenle, düşük doz BT taramaları erken tanı açısından kritik öneme sahiptir.

Ardila ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen öncü bir çalışmada, uçtan uca eğitilen üç boyutlu konvolüsyonel sinir ağları (3B-KSA) kullanılarak, hastaların mevcut ve geçmiş BT taramaları birlikte değerlendirilmiştir. Geliştirilen modelin, radyolog performansını aşan bir AUC değerine ulaştığı ve özellikle nodül progresyonunun değerlendirilmesinde yüksek doğruluk sağladığı rapor edilmiştir (Ardila et al., 2019).

Akciğer kanseri tespitinde karşılaşılan temel zorluklardan biri, nodüllerin damar yapıları veya benign lezyonlarla karıştırılmasıdır. Bu nedenle, iki boyutlu kesitler yerine volumetrik analiz yapan 3B modellerin kullanılması kritik hale gelmiştir. 3B-KSA tabanlı yaklaşımlar, nodülün çevresel bağlamını daha iyi temsil ederek yanlış sınıflandırma riskini azaltmaktadır.

2.3. Cilt Kanseri

Cilt kanseri, özellikle malign melanom türünde erken teşhis edilmediğinde yüksek metastaz riski taşımaktadır. Dermoskopi cihazlarıyla elde edilen yüksek çözünürlüklü cilt lezyonu görüntüleri, YZ tabanlı sınıflandırma modelleri için oldukça uygun bir veri kaynağı sunmaktadır.

Esteva ve arkadaşlarının Nature dergisinde yayımlanan çalışması, bu alandaki dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. Çalışmada, InceptionV3 mimarisi kullanılarak eğitilen KSA modelinin, iyi huylu ve kötü huylu cilt lezyonlarını ayırt

etmede deneyimli dermatologlarla karşılaştırılabilir performans sergilediği gösterilmiştir (Esteva et al., 2017). Bu sonuç, YZ sistemlerinin klinik karar destek aracı olarak kullanılabileceğini güçlü biçimde ortaya koymuştur.

Cilt kanseri çalışmalarında yaygın olarak kullanılan International Skin Imaging Collaboration (ISIC) veri seti, standartlaştırılmış görüntüler ve etiketler sunarak model karşılaştırmalarını mümkün kılmaktadır (Codella et al., 2018). Bununla birlikte, veri dengesizliği ve görüntü artefaktları gibi sorunlar, halen aktif araştırma konuları arasında yer almaktadır.

2.4. Beyin Tümörleri

Beyin tümörlerinde YZ uygulamaları yalnızca tümör varlığının tespitini değil, aynı zamanda tümörün segmentasyonunu, yani sınırlarının hassas biçimde belirlenmesini de kapsamaktadır. Bu süreç, cerrahi planlama, radyoterapi dozlaması ve hastalık takibi açısından hayati öneme sahiptir.

Bu alandaki en önemli gelişmelerden biri, BraTS (Brain Tumor Segmentation) yarışmaları ile sağlanmıştır. Isensee ve arkadaşları tarafından geliştirilen nnU-Net mimarisi, veri setine özel manuel ayar gerektirmeksizin, otomatik yapılandırma yeteneği sayesinde farklı segmentasyon görevlerinde üstün performans sergilemiştir (Isensee et al., 2021). nnU-Net, ön işleme adımlarından ağ mimarisine kadar tüm süreci otomatikleştirerek klinik kullanıma daha yakın bir çözüm sunmaktadır.

Beyin tümörü segmentasyonunda karşılaşılan başlıca zorluklar; tümör heterojenliği, düşük kontrastlı sınırlar ve farklı MR sekanslarının birlikte değerlendirilmesi gerekliliğidir. Bu nedenle çok kanallı girişler ve derin encoder-decoder yapıları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde ele alınan çalışmalar, YZ tabanlı yaklaşımların farklı kanser türlerinde tanı doğruluğunu artırma, erken teşhisi destekleme ve klinik karar süreçlerini iyileştirme potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, veri çeşitliliği, model açıklanabilirliği ve klinik entegrasyon gibi konular, gelecekteki araştırmalar için kritik önem taşımaktadır.

3. Metodoloji (Uygulama Çalışması ve Model Tasarımı)

Bu bölümde, önceki bölümlerde sunulan konular doğrultusunda, farklı kanser türlerine ve görüntüleme modalitelerine uyarlanabilir genellenebilir bir YZ tabanlı kanser tespit yaklaşımı önerilmektedir. Sunulan metodoloji; veri hazırlama, model mimarisi ve değerlendirme aşamalarını bütüncül bir yaklaşımla ele almakta ve klinik pratikte karşılaşılan temel zorluklara çözüm üretmeyi amaçlamaktadır.

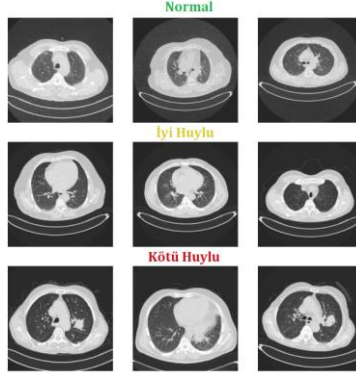
3.1. Veri Hazırlama ve Ön İşleme

Bu çalışmada akciğer kanseri sınıflandırması için IQ-OTHNCCD akciğer BT veri seti kullanılmıştır (Alyasriy & AL-Huseiny, 2023). Şekil 2’de veri setinden örnekler sunulmuştur. Veri setindeki sınıflar iyi huylu (Benign), kötü huylu (Malignant) ve normal (Normal) olacak şekilde üç kategoriye ayrılmıştır. Toplam 1097 görüntü içeren veri seti, eğitim-doğrulama-test ayrımı olacak biçimde rastgele bölünmüştür. Ayrım oranları çalışma kapsamında eğitim için yaklaşık %70, doğrulama için %15 ve test için %15 olarak belirlenmiştir. Bölme işlemi sırasında tekrar üretilebilirlik için sabit bir rastgelelik tohumu kullanılmıştır.

Ön işleme adımlarında tüm görüntüler, model giriş boyutuna uyumlu olacak şekilde 224×224 piksele ölçeklendirilmiştir. Eğitim aşamasında modelin genelleme yeteneğini artırmak amacıyla veri artırma uygulanmıştır (Shorten & Khoshgoftaar, 2019). Bu kapsamda rastgele yatay çevirme, küçük açılı döndürme ve hafif parlaklık/kontrast değişimleri kullanılmıştır. Doğrulama ve test

aşamalarında ise deterministik bir ön işleme tercih edilerek yalnızca yeniden boyutlandırma ve normalizasyon uygulanmıştır. Ayrıca görüntüler, ImageNet istatistikleri (ortalama ve standart sapma) kullanılarak normalize edilmiş, böylece önceden eğitilmiş KSA mimarisinin (MobileNetV3) daha kararlı öğrenmesi hedeflenmiştir.

Şekil 2. IQ-OTHNCCD akciğer BT veri setinden örnek görüntüler

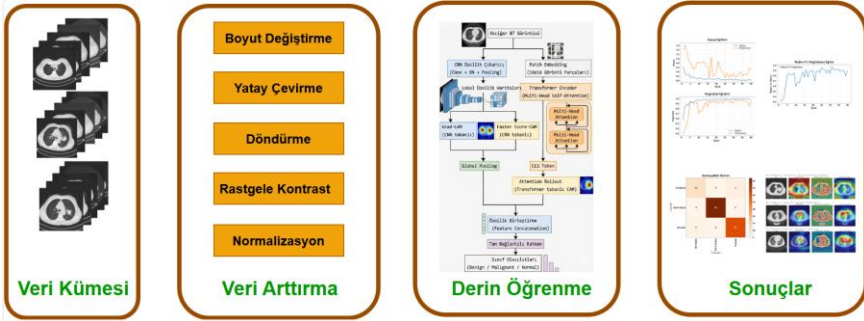


Tıbbi görüntüleme veri kümelerinde sıklıkla karşılaşılan sınıf dengesizliği problemi bu veri kümesinde de gözlenebilmektedir. Özellikle iyi huylu örnek sayısının görece düşük olması, modelin eğitim sürecinde bu sınıfı ihmal ederek iyi huylu örnekleri diğer sınıflara kaydırmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında eğitim verisinde dengeli örnekleme kullanılarak her minibatch içerisinde sınıfların dengeli temsili amaçlanmıştır. Ayrıca kayıp fonksiyonu tarafında sınıf ağırlıkları kullanılarak azınlık sınıf hatalarının daha güçlü cezalandırılması sağlanmıştır.

3.2. Hibrit Model Mimarisi

Şekil 3'te görüldüğü gibi önerilen yaklaşım, akciğer BT görüntülerindeki hem lokal patolojik bulguları hem de global anatomik bağlamı yakalayabilmek için hibrit bir KSA-Transformer mimarisi üzerine kuruludur.

Şekil 3. Önerilen sistemin çalışma prensibini gösteren şematik blok diyagramı



Model iki paralel bileşenden oluşur:

- **Konvolüsyonel Bileşen:** Bu dalda MobileNetV3-Small tabanlı bir özellik çıkarıcı kullanılmıştır. MobileNetV3, düşük parametre sayısı ve hızlı çıkarım avantajı nedeniyle özellikle sınırlı hesaplama kaynaklarında gerçek zamanlı uygulamalara uygun bir mimaridir. KSA dalı görüntüden çok ölçekli özellik haritaları üretir ve adaptif ortalama örnekleme ile sabit boyutlu bir özellik vektörüne dönüştürülür. Bu vektör, lezyon benzeri lokal yapıların temsilde etkilidir.

- **Transformer Bileşen:** Görüntü, belirli bir patch boyutu (16×16) ile parçalara ayrılarak gömülür. Ardından sınıf tokeni ve konumsal gömme eklenerek Transformer bloklarına aktarılır. Transformer katmanlarında çok başlı self-attention mekanizması, görüntüdeki farklı bölgeler arasındaki uzun menzilli bağımlılıkları modelleyerek global bağlamı yakalar. Bu dalın çıktısı olarak sınıf tokeni temsili elde edilir.

KSA'dan gelen özellik vektörü ile Transformer sınıf tokeni vektörü birleştirilerek tam bağlantılı katmanlara aktarılır. Böylece model, hem KSA'nın sunduğu lokal ayırt edici ipuçlarını hem de Transformer'ın sağladığı global bağlamsal bilgiyi aynı anda kullanarak sınıf tahmini üretir. Sınıflandırıcı bölümde doğrusal

katmanlar, GELU aktivasyonu ve dropout düzenlenileştirmesi yer almaktadır.

Mimarinin yorumlanabilirliğini artırmak için KSA dalına Grad-CAM ve Faster Score-CAM, Transformer dalına ise self-attention ağırlıklarından türetilen Attention Rollout yöntemi entegre edilmiştir. Bu sayede modelin karar verirken hangi bölgeleri kullandığı hem lokal hem global ölçekte görselleştirilebilmektedir (Selvaraju et al., 2017).

3.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

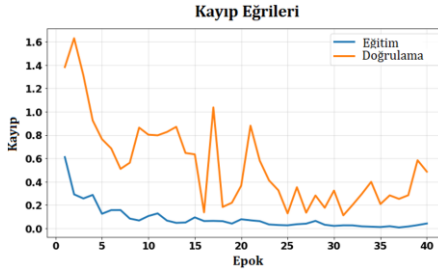
Bu bölümde önerilen hibrit KSA-Transformer modelinin eğitim süreci, doğrulama davranışı ve test kümesi üzerindeki sınıflandırma performansı ayrıntılı biçimde incelenmekte; elde edilen bulgular hem nicel metrikler hem de sınıf bazlı ve açıklanabilirlik temelli analizler üzerinden tartışılmaktadır.

Model, eğitim sürecinde AdamW optimizasyon algoritması kullanılarak eğitilmiş; eğitim boyunca doğrulama kümesi üzerindeki performans izlenerek en iyi model seçimi gerçekleştirilmiştir. Tıbbi sınıflandırma problemlerinde yalnızca doğruluk metriğine dayanılması, özellikle azınlık sınıfların performansının göz ardı edilmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada en iyi modelin belirlenmesinde doğruluk, kayıp eğrileri ile birlikte makro-F1 eğrisi esas alınmıştır. Makro-F1, her sınıfa eşit ağırlık tanıdığı için özellikle iyi huylu gibi örnek sayısı sınırlı sınıfların performansını daha adil biçimde temsil etmektedir.

Şekil 4, önerilen hibrit KSA-Transformer modeline ait eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri göstermektedir. Eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri incelendiğinde, modelin ilk epoklardan itibaren hızlı bir yakınsama sergilediği görülmektedir. Eğitim kaybı kısa sürede belirgin biçimde düşerek düşük seviyelerde kararlı hâle gelirken, doğrulama kaybı genel olarak azalma eğilimi göstermiştir. Bununla birlikte doğrulama kaybında bazı epoklarda ani

yükselmeler gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar; veri setinin görece sınırlı büyüklüğü, sınıflar arasındaki dengesizlik ve özellikle iyi huylu sınıfa ait örnek sayısının azlığı ile ilişkilendirilebilir. Buna rağmen doğrulama kaybının uzun vadeli eğilimi, modelin ciddi bir aşırı ezberleme problemine düşmediğini ve genelleme yeteneğini büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir.

Şekil 4. Önerilen hibrit KSA–Transformer modeline ait eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri

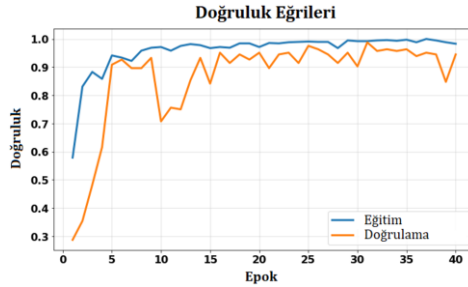


Şekil 5’te verilen doğruluk eğrileri, modelin eğitim verisini etkili biçimde öğrendiğini ve doğrulama verisine bu bilgiyi büyük ölçüde aktarabildiğini ortaya koymaktadır. Eğitim doğruluğu kısa sürede yüksek seviyelere ulaşmış, doğrulama doğruluğu ise birkaç epok sonrasında eğitim doğruluğuna yakın değerlerde stabilize olmuştur. Ancak ilk denemelerde test doğruluğunun yaklaşık %90 seviyelerinde olmasına rağmen, iyi huylu sınıf için duyarlılık değerinin Tablo 1’de görüldüğü gibi düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin bazı iyi huylu örnekleri normal sınıfına kaydırabildiğini, dolayısıyla sınıf dengesizliğinin model davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir.

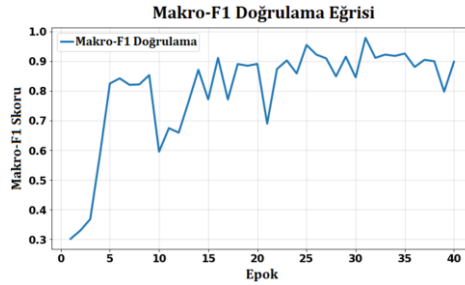
Bu sorun, eğitim aşamasında dengeli örnekleme ve sınıf ağırlıklı kayıp fonksiyonu kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Söz konusu stratejiler, modelin azınlık sınıflara ait örnekleri daha fazla dikkate almasını sağlayarak öğrenme sürecini dengelemeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşımın etkisi, doğrulama makro-F1 eğrisinde açık biçimde gözlemlenmektedir. Makro-F1 değerinin

eğitim süreci ilerledikçe hızlı bir artış göstermesi ve yüksek seviyelerde kararlı hâle gelmesi, modelin yalnızca çoğunluk sınıfları değil, tüm sınıfları kapsayan dengeli bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5. Önerilen hibrit KSA–Transformer modeline ait eğitim ve doğrulama doğruluk eğrileri



Şekil 6. Doğrulama macro-F1 skorunun epoklara göre değişimini

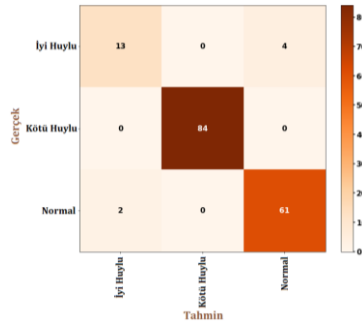


Tablo 1. Sınıflandırma raporunun özeti

Sınıf / Metrik	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru	Örnek Sayısı
İyi Huylu	0.87	0.76	0.81	17
Kötü Huylu	1.00	1.00	1.00	84
Normal	0.94	0.97	0.95	63
Doğruluk	–	–	0.96	164
Makro Ortalama	0.94	0.91	0.92	164
Ağırlıklı Ortalama	0.96	0.96	0.96	164

Şekil 7, test kümesi üzerinde elde edilen karışıklık matrisini sunmakta ve modelin sınıf bazlı sınıflandırma performansını görsel olarak ortaya koymaktadır. Test kümesi üzerinde elde edilen karışıklık matrisi, modelin sınıf bazlı davranışını daha ayrıntılı biçimde analiz etmeye olanak tanımaktadır. Sonuçlara göre kötü huylu sınıfa ait tüm örneklerin doğru biçimde sınıflandırıldığı görülmektedir. Klinik açıdan son derece kritik olan bu durum, modelin kötü huylu vakaları atlama riskinin düşük olduğunu göstermektedir. İyi huylu sınıf örneklerinin büyük çoğunluğu doğru sınıflandırılmış; sınırlı sayıda örnek normal sınıfa yönlendirilmiştir. Dikkat çekici bir şekilde, iyi huylu örneklerin hiçbirinin kötü huylu sınıfa yanlış atanmadığı görülmektedir. Benzer biçimde normal sınıfa ait örneklerde de yüksek doğruluk elde edilmiş, yalnızca az sayıda örnek benign sınıfa kaymıştır. Bu sınırlı karışmalar, benign ve normal örneklerin BT görüntülerinde benzer doku örüntülerine sahip olabilmesiyle açıklanabilir.

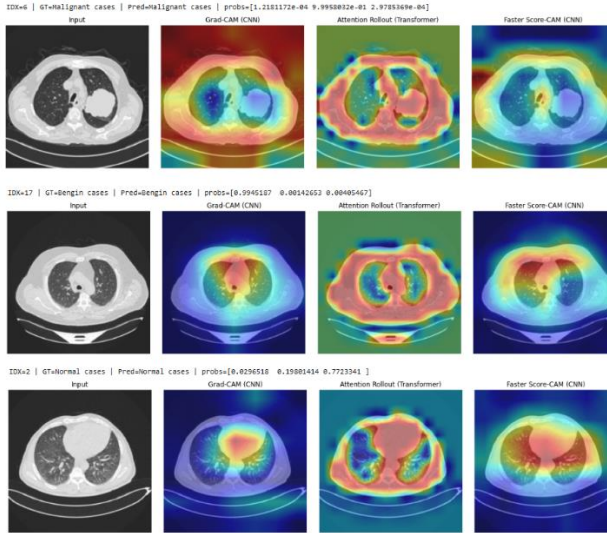
Şekil 7. Test kümesi üzerinde elde edilen karışıklık matrisi



Şekil 8, kötü huylu, iyi huylu ve normal sınıflara ait örnekler için Grad-CAM, Attention Rollout ve Faster Score-CAM tabanlı açıklanabilirlik haritalarını göstermektedir. Deneysel değerlendirme yalnızca nicel metriklerle sınırlı tutulmamış; modelin karar

mekanizmasını daha iyi anlamak amacıyla Grad-CAM, Attention Rollout ve Faster Score-CAM tabanlı açıklanabilirlik analizleri de gerçekleştirilmiştir. Açıklanabilirlik sonuçları incelendiğinde, kötü huylu örneklerde KSA tabanlı yöntemlerin (Grad-CAM ve Faster Score-CAM) daha lokal ve lezyon-odaklı bölgeleri vurguladığı, buna karşılık Transformer tabanlı Attention Rollout yaklaşımının global anatomik bağlamı daha güçlü biçimde yansıttığı gözlemlenmiştir. Bu iki açıklama türünün birlikte kullanılması, modelin karar mekanizmasının hem klinik açıdan anlamlı lokal patolojik ipuçlarına hem de bütüncül yapısal örüntülere dayandığını desteklemektedir.

Şekil 8. Kötü huylu, iyi huylu ve normal sınıflara ait örnekler için Grad-CAM, Attention Rollout ve Faster Score-CAM tabanlı açıklanabilirlik haritaları



Genel olarak elde edilen sonuçlar, önerilen hibrit KSA-Transformer mimarisinin akciğer BT görüntülerinde yüksek doğruluk, sınıflar arası dengeli performans ve klinik açıdan güvenli bir hata profili sunduğunu göstermektedir. Nicel performans metrikleri ile açıklanabilirlik analizlerinin birlikte değerlendirilmesi,

modelin yalnızca başarılı sonuçlar üretmekle kalmayıp, bu sonuçların nedenlerini de anlaşılır biçimde ortaya koyabildiğini göstermektedir.

Sonuç

YZ, günümüzde kanser tespitinde radyoloji uzmanlarının yerine geçecek bir araç olmaktan ziyade onların yeteneklerini artıran güçlü bir asistan olarak konumlanmaktadır. Literatüre bakıldığında bu çalışmadaki deneysel sonuçlar incelendiğinde KSA ve Transformer tabanlı hibrit yaklaşımların, tanısal doğruluğu artırma potansiyeline sahip olduğu aşıkardır. Böylece bu çalışmayla çoklu modalite analizi yapan modellerin geliştirilmesi, kişiselleştirilmiş onkolojinin kapılarını gelecekte aralayacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

Aburass, S., Dorgham, O., Al Shaqsi, J., Abu Rumman, M., & Al-Kadi, O. (2025). Vision transformers in medical imaging: A comprehensive review of advancements and applications across multiple diseases. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*, 38(6), 3928-3971. doi:10.1007/s10278-025-01481-y

Alqhatani, A., S., A., P. S., P., T. R., M., Khan, S. B., & Almusharraf, A. (2025). A novel approach using AI-vision transformer for CT scan analysis for lung cancer detection. *Journal of Visualized Experiments*, (225), e69302. doi:10.3791/69302

Alyasriy, H., & AL-Huseiny, M. (2023). The IQ-OTH/NCCD lung cancer dataset (Version 4) [Data set]. Mendeley Data. doi:10.17632/bhmdr45bh2.4

Ardila, D., Kiraly, A. P., Bharadwaj, S., Choi, B., Reicher, J. J., Peng, L., ... & Shetty, S. (2019). End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed

tomography. *Nature Medicine*, 25, 954–961. doi:10.1038/s41591-019-0447-x

Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., & Jemal, A. (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 68(6), 394-424. doi:10.3322/caac.21609

Codella, N., Rotman, N., Gutman, D., Helba, B., Halpern, A., & Smith, J. (2018). Skin lesion analysis toward melanoma detection: A challenge at the 2017 International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). In 2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (pp. 168-172). IEEE.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., ... & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. In *International Conference on Learning Representations*.

Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115–118.

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 770-778).

Isensee, F., Jaeger, P. F., Kohl, S. A. A., Petersen, J., & Maier-Hein, K. H. (2021). nnU-Net: A self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. *Nature Methods*, 18, 203–211. doi:10.1038/s41592-020-01008-z

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. doi:10.1038/nature14539

Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & Sanchez, C. I. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60-88. doi:10.1016/j.media.2017.07.005

McKinney, S. M., Sieniek, M., Godbole, V., Godwin, J., Antropova, N., Ashrafiyan, H., ... & Shetty, S. (2020). International evaluation of an AI system for breast cancer screening. *Nature*, 577, 89-94. doi:10.1038/s41586-019-1799-6

Meylem, H., & Cicek, G. (2025). Vision transformer ve Swin modelleri kullanılarak gelişmiş mamografi tabanlı meme kanseri sınıflandırması DDSM veri seti üzerine bir çalışma. *Gazi Üniversitesi Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 18(4), 319-333. doi:10.17671/gazibtd.1689000

Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 618-626).

Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(1), 60. doi:10.1186/s40537-019-0197-0

Tan, M., & Le, Q. (2019). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 6105-6114).

Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25, 44-56. doi:10.1038/s41591-018-0300-7

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

Wang, Y., Deng, Y., Zheng, Y., Chattopadhyay, P., & Wang, L. (2025). Vision transformers for image classification: A comparative survey. *Technologies*, 13(1), 32. doi:10.3390/technologies13010032

Yıldız, G., & Yakut, Ö. (2023). Derin öğrenme modelleri kullanılarak tıbbi görüntülerde tanısal karar verme. *Euroasia Matematik, Mühendislik, Doğa ve Tıp Bilimleri Dergisi*, 10(28), 130–142. doi:10.5281/zenodo.8237726

BÖLÜM 3

MOBİL ROBOTLAR İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI İZLEME SİSTEMİ TASARIMI

SEYİT AHMET KARIŞ ¹
MUSTAFA ENGİN ²

Giriş

Otonom mobil robotlar endüstriyel ortamlarda üretim hattından başlayan ve ürünün depoya ulaşmasını sağlayan tedarik zincirinin her safhasında sürekli olarak kullanılmaya başlamıştır (Khan et al., 2022). Bu tip ortamlarda robotlar sadece statik ortamlarda güvenli bir şekilde hareket etmesi yeterli olmamakla birlikte, insan robot etkileşimi esnek otomasyon gibi alanlarla birlikte dinamik ortamlarda nesneleri ve insanları algılayarak takip edebilmesi ve bu bilgiyi gerçek zamanlı navigasyon sistemine entegre edebilmesi gerekmektedir (Rubio et al., 2019).

Klasik mobil robot navigasyon yaklaşımları çoğunlukla statik veya yarı-statik ortam varsayımı altında geliştirilmiştir (Kirci

¹ Mekatronik Müh., Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0001-94 73-240X

² Doçent Dr., Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Orcid:0000-0001-7247-4545

& Atali, 2023). Ancak günümüzde endüstriyel ortamlarda insanlar, forkliftler ve diğer mobil robotlar gibi hareketli unsurlar insan-robot etkileşimi ile sürekli olarak haritayı dinamik yapmaktadır. Bu durum yalnızca haritalama yapılarak oluşturulan navigasyon sistemlerinin dinamik ortamlarda yetersiz olmasına ve robotların hareketlerinde hatalar meydana gelmesine neden olmaktadır (Algabri & Choi, 2020). Böylelikle, nesne algılama ve takip kabiliyetlerinin dinamik ortamlarda navigasyon sistemi ile birlikte ele alındığı tümsel yaklaşımlar önem taşımaktadır (Kulaç et al., 2023).

Mobil robotlar Izgara düzeninde yapılandırılmış depolarda klasik tablo pekiştirmeli öğrenme algoritması kullandığında daha kısa optimal gidiş yolları belirlerken engellere çok yakın olması bir risk olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan ESARSA (Expected State-Action-Reward-State-Action) algoritması ise, ekstra hesaplama süresinde daha hızlı ve daha istikrarlı bir sonuç vermektedir (Xu et al., 2024). Birçok çalışmada, pekiştirmeli öğrenme ve diğer alternatif algoritmaları birlikte kullanılarak depo ortamlarında yol uzunluğu, güvenlik marjları, yakınsama hızı ve birçok robota ölçeklenebilirlik çözümlere ulaşmanın mümkün olduğu belirtilmiştir (Fatima et al., 2022; Khan et al., 2022; Lee & Jeong, 2021; Rubio et al., 2019; Xu et al., 2024). Zhao ve arkadaşları YOLO varyantlarının uçtan uca pipeline olarak güvenilir bir şekilde tarımda ürün toplama robotlarında hedeflerini gerçek zamanlı olarak algılama ve hassas kavrama işlemlerinde kullanılabileceğini göstermişlerdir (Zhao et al., 2024). Benzer algoritmalar endüstride veya lojistik depolarındada başarılı şekilde kullanılabilir (Kirci & Atali, 2023; Macenski et al., 2022)

Diğer bir çalışmada Singh ve arkadaşları, çilek seralarında işgücü eksikliğini gidermek ve hasat süreçlerini optimize etmek için derin öğrenme tabanlı bir robotik çözüm geliştirmişlerdir. Önerilen sistem sayesinde çilek seralarında çilek hasadı için 7/24 kesintisiz operasyonel verimlilik sağlanması hedeflenmektedir. Yüksek

özünürlüklü görüntü özellikleri oluşturarak ilek algılama doğruluğunu artırmak için süper çözünürlük özelliklerine sahip YOLOv9-GLEAN derin öğrenme modeli oluşturulmuştur. Önerilen modelin diğ er mevcut modellerden daha iyi performans gösterdiğini ve 0,996 hassasiyet ve 0,991 geri ağıırma oranı elde edildiğı paylaşılmıştır (Singh et al., 2025).

Bu çalışmada diferansiyel sürüş sistemi ile hareket eden bir otonom mobil robotun dinamik ortamlar için geliştirilen nesne takip ve otonom navigasyon sisteminin mimarisi sunulmaktadır.Önerilen çalışmada kamera tabanlı algılama ile takip edilen nesnenin konumu ve yönelimi tespit edilip, 2D LiDAR tabanlı haritalama, Odometri ve IMU ile konum kestirimi yapılarak robotun çevreye göre pozisyon bilgileri hesaplamakta ve elde edilen bilgiler navigasyon katmanında birleştirilerek robota hareket mesajları gönderilmektedir.

şekil-1’de robotun Solidworks tasarımı ve katmanları gösterilmiştir. Robotun parçalarını ve katmanlarını tanıyalım;

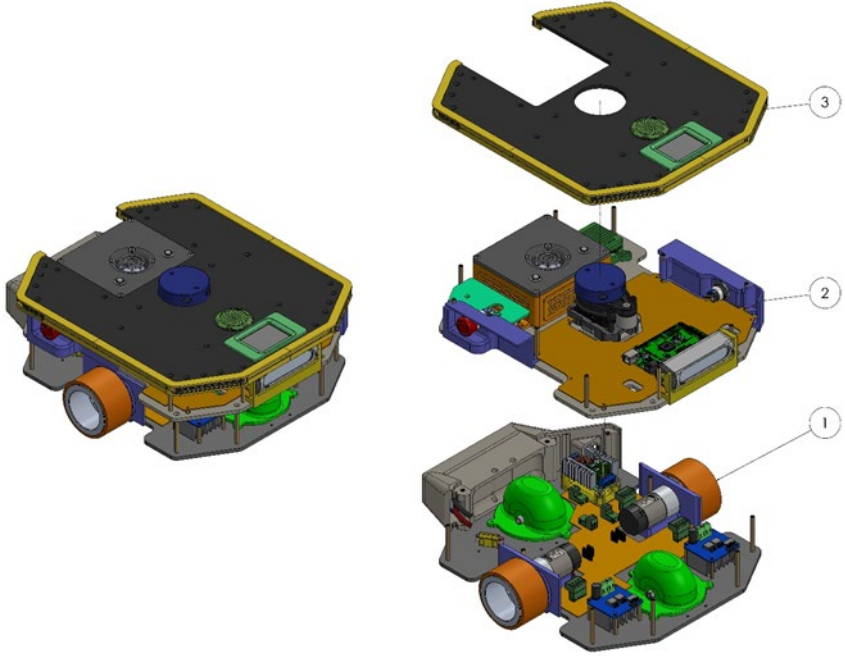
1. Alt kat: Bu katmanda robotun hareketini sağlayan aktüatörler, sürücüler ve bütün robota güç sağlayan batarya ile regülatör tertibatı bulunmaktadır.
2. Orta kat: Bu katmanda robotun çevresel farkındalığını sağlayan sensörler ve hesaplamaları yapan ana bilgisayarın bulunduğu kısımdır.
3. Üst kat: Robotun aksamını kapatan ve bazı çıkış birimlerini içeren kısımdır.

şekil-2’de robotun parçaları ve patlatma modeli verilmiştir. Robotun parçalarını sırasıyla tanıyalım.

1. Alt ana plaka: Bu plaka robotun aktüatörleri, güç ünitesini ve robotun geri kalanını taşıyan kısımdır. Pleksiglas plakadan CNC ile kesilerek imal edilmiştir

ve parçaların üstüne sağlam bir şekilde bağlanabilmesi için içerisine somun gömülmüştür. Plakanın üst kata bağlanabilmesi için pirinç aralayıcılar kullanılmıştır.

Şekil 1: Robot Tasarımı ve Katmanları.



2. Regülatör: Bataryadan gelen 14.8V'ı 12V'ta düşürmektedir. Bu voltaj, motorları ve ana bilgisayarı beslemek için kullanılmıştır.
3. Aktüatörler: Robotun hareket kabiliyetinin temelini oluşturan bu kısım, Pololu 37mm dişli kutulu ve enkoderli motor, 74mm çaplı JS7444 kauçuk kaplama tekerlek ve 3D yazıcıdan imal edilmiş PLA motor

This diagram shows the exploded view of a robot chassis assembly. The components are numbered as follows:

- 1: Main chassis plate (grey, octagonal shape with two large circular cutouts).
- 2: Motor (blue and yellow).
- 3: Motor mount (blue and orange).
- 4: Gearbox (blue and black).
- 5: Sensor module (grey, rectangular).
- 6: Chassis cover (grey, rectangular).
- 7: Sensor module (grey, rectangular).
- 8: Sensor module (grey, rectangular).
- 9: Chassis cover (grey, rectangular).

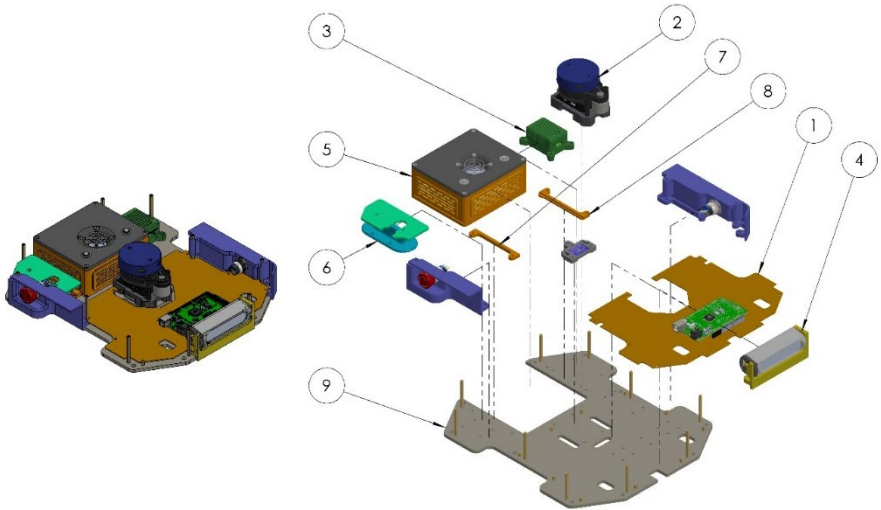
The diagram illustrates the assembly process, showing how the motor, gearbox, and sensor modules are mounted onto the chassis plate and covered by the chassis cover.

- 42--

Muhafaza, bataryayı dış etkenlerden korumakta ve bataryanın robota takılıp çıkarılmasını kolaylaştırmak için robotun arka tarafına konumlandırılmıştır. İçinde bulunan Li-Po batarya, robotun bütün enerji ihtiyacını karşılayan nihai güç ünitesidir.

8. Güç düğmesi ve muhafazası: Robotun ana gücünü açıp kapatan butonu ihtiva eden tertibattır.
9. Mekanum tekerlek: Burada bulunan mekanum tekerlek, bir çeşit sarhoş tekerlek işlevi görmesi için robotta kullanılmıştır. Kullanılmasının sebebi, geleneksel sarhoş tekerleklere göre robotun hareketine muhalefet neredeyse hiç göstermemesidir.
10. 50mm Aralayıcı: Aralayıcı, katı üst plakaya mekanik olarak bağlayan mekanik elemanlar olarak kullanılmışlardır.

Şekil-3. Robot Elektronik parçaları.



Şekil-3'te robotun elektronik devre elamanları ve robot üzerinde yerleştirildiği yerle gösterilmiştir. Elektronik parçaları ve görevleri tanıyalım;

11. Arduino mikrodenetleyici kartı ve genişleme kartı:
Bu genişleme kartı, arduinoyu motor sürücülere ve enkoderlere bağlayan karttır. Aynı zamanda ana bilgisayara bağlantı imkanı vermektedir.
12. X2 LIDAR: Robotun haritalama ve gerçek zamanlı engel algılama işlevini gerçekleştiren sensördür. Robotun tepesine ve gövdenin ortasına yerleştirilmiştir. Böylece daha rahat çalışması hedeflenmiştir.
13. 12V-5V dönüştürücü: Robotta 5V ihtiyacı olan komponentlere uygun voltajı sağlamak için kullanılmıştır.
14. İntel Realsense derinlik kamerası: Robotun görüntü işleme ve 3D tarama işlevini gerçekleştirebilmesi için ön tarafına açısıX1 ayarlanabilir bir aparat ile yerleştirilmiştir. Aparat eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir.
15. Nvidia Orin Nano Yapay Zeka Bilgisayarı: Robotun görece karmaşık hesaplamalarının yapıldığı parçasıdır. Kolay kullanım için güç ve reset tuşları ile donatılmıştır ve gerektiğinde kamera ve GPIO konnektörlerine erişim sağlamak için çıkarılabilir kapakları olan bir kutuya sahiptir. Ayrıca kutuda soğutmayı engellemek için hava giriş-çıkış kanalları bulunmaktadır. Kutunun amacı bilgisayarı fiziksel etmenlerden korumaktır.

16. Kablo sarma makarası: Fazlalık kabloların sarılmak suretiyle robot içinde az yer kaplamaları amaçlanmıştır.
17. Bilgisayar kutusu rayı: Bilgisayar kutusunun rahatça robota sökölüp takılmasını sağlayan kısımdır.
18. Bilgisayar kutusu rayı: Bilgisayar kutusunun rahatça robota sökölüp takılmasını sağlayan kısımdır.
19. Orta kat plaka montaj: Bu kısım bilgisayar ve sensörleri üstünde barındırır ve robotun alt kısmına bağlar. Metal aralayıcılar ile robotun en üstünde bulunan üst kata bağlanır. Plaka Pleksiglastan CNC ile kesilerek imal edilmiştir.

Sistem Mimarisi

Bu çalışma ile geliştirilen otonom mobil robot sistemi hedef nesneyi algılama, karar verme ve hareket kontrolü kısımlarıyla ve dinamik harita üzerinde navigasyon kısmıyla birlikte çok katmanlı bir mimari üzerine inşa edilmiştir. Sistem tasarımında gerçek zamanlı çalışabilirlik, bileşenler arası bağımsızlık ve farklı sensörlerden elde edilen verilerin senkronize biçimde işlenebilmesi temel hedefler olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda yazılım Robot Operating System 2 (ROS 2) tabanlı olarak yapılandırılmıştır.

Genel mimari algılama katmanı, karar verme ve planlama katmanı ile kontrol katmanından olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır. Algılama katmanında LiDAR, Odometri, Kamera ve IMU'dan gelen veriler ile robotun çevresel farkındalığı sağlanmıştır. Kamera birimi robotun görüntü düzlemindeki konumunu sağlarken ayrıca derinlik ölçüm kabiliyetiyle hedef nesneyle robotun arasındaki mesafeyi de belirler. LiDAR sensörünün verileri ile haritanın oluşturulur çevresel engeller algılanır ve lokalizasyon yapılır. IMU verileri ile robotun lineer ve açısal hızları

hesaplanmakta, ani yön değişimleri ve açısai hareketlerin daha doğru şekilde algılanmasına katkı sağlamaktadır. Navigasyon modunda, LiDAR tabanlı harita bilgisi, lokalizasyon, odometri ve IMU destekli yönelim verileri kullanılarak güvenli bir hareket planı üretilmektedir. Sistem, takip ve navigasyon işlevlerini birbirinden tamamen ayırmak yerine, sensör füzyonu ile elde edilen tüm çevresel algıya dayanarak bu iki süreci koşullara bağlı olarak birlikte çalışacak şekilde tasarlanmaktadır.

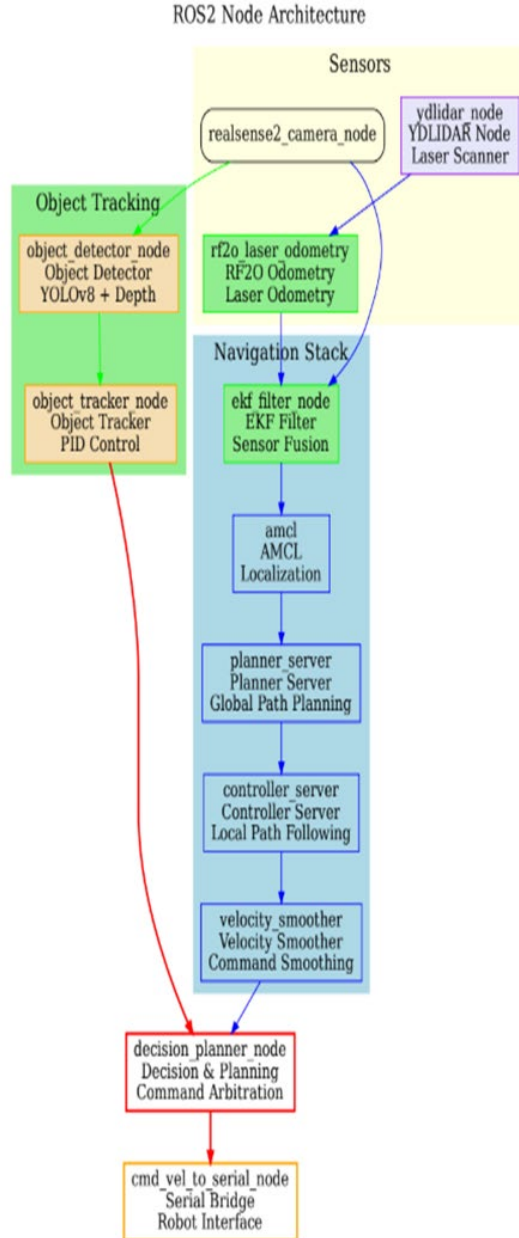
Karar verme ve planlama katmanında, algılama birimlerinden gelen bilgiler birleştirilerek robotun anlık davranışı belirlenmektedir. Nesne takip modunda, hedef nesnenin konumu ve yönelimi dikkate alınarak robotun lineer ve açısai hızları hesaplanmakta; navigasyon modunda ise oluşturulan harita ve anlık konum bilgisi kullanılarak güvenli hareket planı üretilmektedir. Sistem, takip ve navigasyon işlevlerini birbirinden tamamen ayırmak yerine, bu iki süreci koşullara bağlı olarak birlikte çalışacak şekilde tasarlanmaktadır.

Kontrol katmanı, Karar verme ve Planlama katmanında üretilen hareket komutlarını doğrudan sürüş sistemine ileten yapıyı içermektedir. Bu katmanda üretilen hız komutları, diferansiyel sürüş kinematiğine uygun olarak motor kontrol birimlerine(Arduino Mega) aktarılmaktadır. Böylece algılama ve planlama katmanlarında alınan kararların fiziksel robot hareketine güvenilir ve gecikmesiz biçimde yansıtılması sağlanmaktadır.

Algılama ve Nesne Takip Sistemi

Bu bölümde, mobil robotun çevresindeki dinamik nesneleri algılaması ve belirlenen bir hedefi gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi için geliştirilen algılama ve takip yapısı açıklanmaktadır. Sistem, kamera tabanlı nesne tespiti ile elde edilen bilgilerin, takip ve kontrol mantıkları aracılığıyla robot hareketine dönüştürüldüğü pratik bir yaklaşım üzerine kurulmuştur.

Şekil-4. ROS2 Node Mimarisi.



Nesne Tespiti

Nesne tespiti için, gerçek zamanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan YOLOv8 algoritması tercih edilmiştir (**Jocher et al., 2023**). Mobil robot üzerinde çalışılacağı için, hesaplama yükünü sınırlamak amacıyla YOLOv8n (nano) modeli kullanılmıştır. Algılama sürecinde kamera görüntüleri üzerinde nesne tespiti yapılmakta ve güven skoru 0.6 değerinin altında kalan tespitler değerlendirme dışı kalmaktadır .

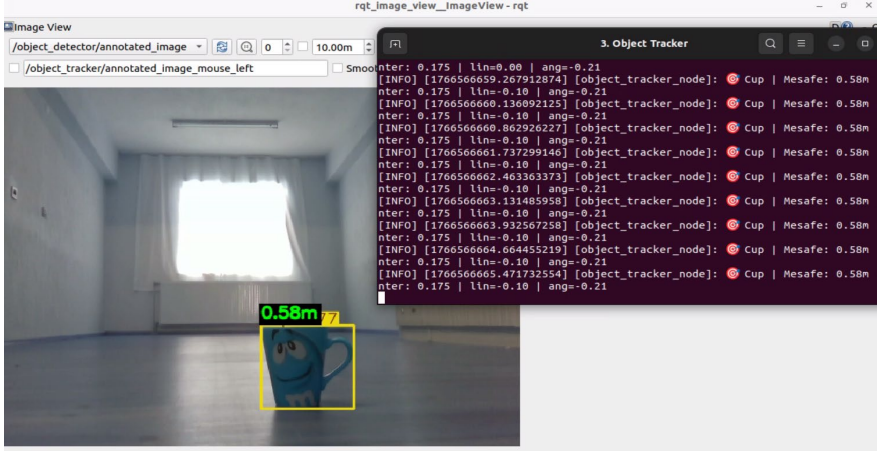
Gerçek zamanlı çalışmayı desteklemek amacıyla, nesne tespiti ana kontrol döngüsünden bağımsız bir iş parçasığında yürütülmektedir. Görüntü kareleri kuyruk tabanlı bir yapı üzerinden işlenerek gecikmeler azaltılmıştır. Ayrıca Intel RealSense kamerasından elde edilen derinlik verileri kullanılarak, tespit edilen nesnelerin robota olan yaklaşık mesafeleri hesaplanmaktadır. Bu sayede algılama yalnızca görüntü düzlemine bağlı kalmamaktadır (Intel® RealSense™ Technology, n.d.).

Nesne Takibi

Nesne takibi süreci, algılama biriminden elde edilen konumsal bilgilerin robotun hız komutlarına dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada takip işlemi, gerçek zamanlı uygulamalara uygunluğu nedeniyle PID kontrol yaklaşımı kullanılarak tasarlanmıştır.

Açısal kontrol, hedef nesnenin görüntü merkezine göre konumuna dayanmaktadır. Bounding box merkezinin görüntü merkezine olan yatay sapması açısal hata olarak değerlendirilmekte ve robot bu hata doğrultusunda yönlendirilmektedir. Mesafe kontrolü ise robot ile hedef nesne arasındaki uzaklığın yaklaşık 0.5 m civarında tutulmasını hedeflemektedir. Lineer hız üretiminde karekök tabanlı bir ölçekleme kullanılarak daha yumuşak ve kararlı bir takip davranışı elde edilmiştir.

Şekil-5. Nesne Takibi



Takip sırasında kararlılığı artırmak için bazı basit fakat etkili filtreleme adımları uygulanmıştır. Güven skoru 0.6'nın altında kalan tespitler ile görüntü alanının %2'sinden küçük bounding box'a sahip nesneler takip sürecine dâhil edilmemektedir. Geliştirilen takip yapısı, navigasyon sistemiyle birlikte çalışacak şekilde sınırlandırılarak robotun güvenli hareket etmesi sağlanmıştır.

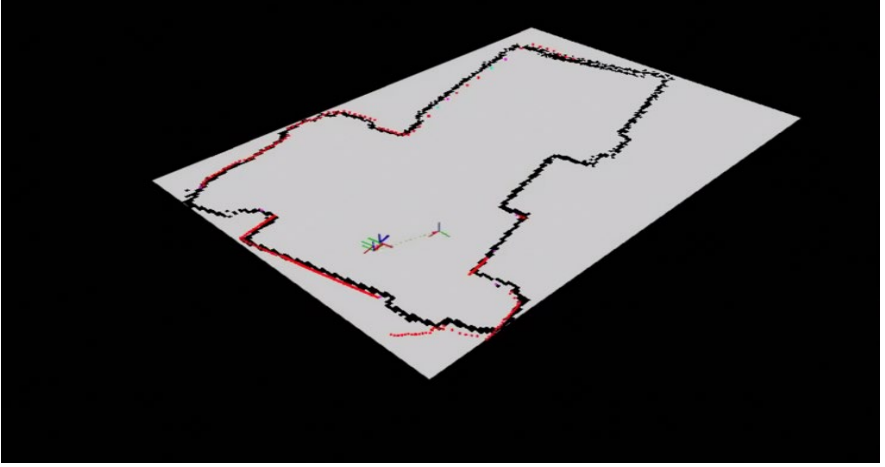
Lokalizasyon ve Navigasyon Sistemi

Bu bölümde, mobil robotun konum kestirimi ve otonom navigasyon yetenekleri, sistemde kullanılan temel algoritmalar doğrultusunda ele alınmaktadır. Lokalizasyon ve navigasyon altyapısı, sensör füzyonu ile desteklenen konum kestirimi ve çok katmanlı planlama-kontrol yapısı üzerine kurulmuştur.

RF2O lazer odometrisi, ardışık 2B LiDAR taramalarından düzlemsel hareket kestirimi yapan, range-flow tabanlı hızlı bir yöntemdir (Jaimez et al., 2016). Düşük hesaplama maliyeti sayesinde gerçek zamanlı çalışmaya uygun bir çözüm sunmaktadır. Elde edilen odometri bilgileri, robotun kısa süreli hareketinin kestiriminde kullanılmaktadır.

Bu bilgiler, Extended Kalman Filter (EKF) tabanlı bir sensör füzyon yapısı ile IMU ölçümleriyle birleştirilmiştir. EKF yapısı, lazer odometrisi ile elde edilen konumsal bilgiler ile IMU'dan alınan açısal hız ve ivme ölçümlerini birlikte değerlendirerek daha kararlı bir odometri çıktısı üretmektedir.

Şekil 6: Robot Haritası ve Lokalizasyon



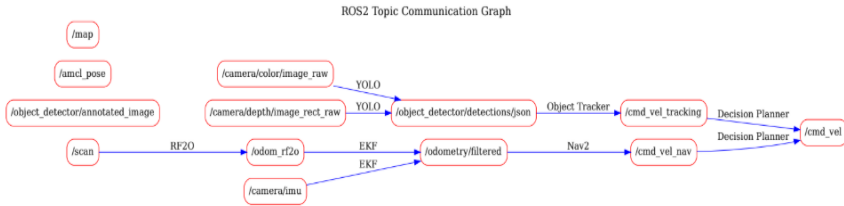
Harita tabanlı küresel lokalizasyon için ise Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) yöntemi kullanılmıştır. Parçacık filtre tabanlı bu yaklaşım, lazer taramalarını mevcut harita ile karşılaştırarak robotun küresel konumunu kestirmektedir. AMCL, EKF tarafından üretilen filtrelenmiş odometri bilgisini hareket modeli olarak kullanmaktadır.

Tabloda-1'de listelenen ROS komutları, algılama, lokalizasyon, navigasyon ve karar verme katmanları arasındaki veri akışını temsil etmektedir. LiDAR, kamera ve IMU sensörlerinden elde edilen ham veriler, RF2O, EKF ve AMCL gibi algoritmalar aracılığıyla işlenerek robotun konum ve yönelim bilgisi üretilmektedir.

Tablo-1. ROS2 komut Listesi

Topic	Kaynak	İçerik
/scan	LiDAR	Lazer tarama verisi
/odom_rf2o	RF2O	2B lazer tabanlı odometri
/camera/imu	IMU	Açısal hız ve ivme
/odometry/filtered	EKF	Füzyonlanmış odometri
/map	Map Server	Ortam haritası
/amcl_pose	AMCL	Harita tabanlı konum
/camera/color/image_raw	RGB Kamera	Renkli görüntü
/camera/depth/image_rect_raw	Derinlik Kamera	Derinlik görüntüsü
/object_detector/detections/json	YOLO	Nesne tespit çıktıları
/object_detector/annotated_image	YOLO	İşaretlenmiş görüntü
/cmd_vel_tracking	Object Tracker	Takip hız komutları
/cmd_vel_nav	Nav2	Navigasyon hız komutları
/cmd_vel	Karar Verici	Nihai hız komutu

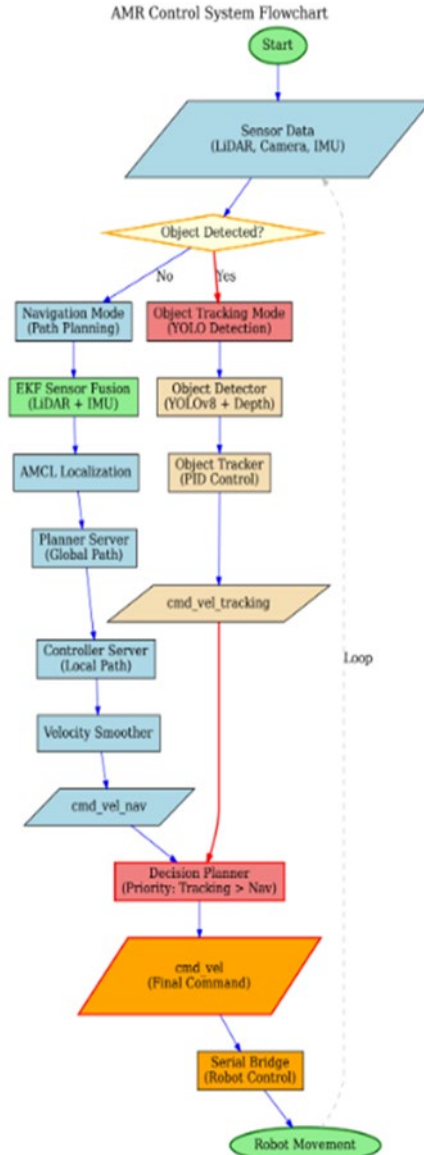
Şekil-7. ROS2 Topic Yapısı.



Nesne algılama ve takip süreçlerinde YOLO tabanlı tespit çıktıları ve takip hız komutları oluşturulmakta, navigasyon katmanından gelen hız komutları ile birlikte Decision Planner

tarafından değerlendirilerek robota uygulanacak nihai /cmd_vel komutu üretilmektedir.

Şekil-8. Programın Akış Diyagramı.



Bu akış diyagramı, otonom mobil robotun algılama, karar verme ve hareket üretme sürecini özetlemektedir. Sistem LiDAR, kamera ve IMU sensörlerinden alınan verilerle başlamakta ve ortamda bir hedef nesne algılanıp algılanmadığına göre iki farklı çalışma moduna ayrılmaktadır. Nesne algılandığında, YOLOv8 tabanlı nesne tespiti ve PID kontrollü takip mekanizması devreye girmekte, nesne algılanmadığında ise robot EKF destekli lokalizasyon ve AMCL tabanlı navigasyon yapısı ile planlanan yolu takip etmektedir. Her iki moddan üretilen hız komutları, Decision Planner tarafından öncelik kurallarına göre birleştirilerek robota uygulanmakta ve sistem döngüsel olarak çalışmaya devam etmektedir.

Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, nesne takibi ve otonom navigasyon yeteneklerini bir arada sunan bir otonom mobil robot sistemi geliştirilmiştir. Kamera, LiDAR ve IMU sensörlerinden elde edilen veriler, YOLOv8 tabanlı nesne algılama, RF2O lazer odometrisi, EKF sensör füzyonu ve AMCL harita tabanlı lokalizasyon yöntemleri ile işlenerek kararlı bir konum kestirimi ve hareket kontrolü sağlanmıştır. Nesne takibi ve navigasyon modlarından üretilen hız komutları, Decision Planner yapısı üzerinden birleştirilerek robotun dinamik ortamlarda güvenli ve esnek biçimde hareket etmesi mümkün kılınmıştır. Gerçekleştirilen deneyler, geliştirilen sistemin gerçek zamanlı çalışmaya uygun olduğunu ve hedeflenen görevleri başarıyla yerine getirebildiğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, nesne takibi performansının artırılması amacıyla daha gelişmiş derin öğrenme tabanlı takip algoritmalarının sisteme entegre edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca çoklu hedef takibi, insan-robot etkileşimi senaryoları ve daha karmaşık dinamik ortamlarda testler gerçekleştirilerek sistemin ölçeklenebilirliğinin artırılması hedeflenmektedir. Donanımsal

açından ise farklı sensör konfigürasyonlarının ve daha hassas lokalizasyon yöntemlerinin sisteme eklenmesi, çalışmanın önemli geliştirme alanları arasında yer almaktadır.

KAYNAKÇA

Algabri, R., & Choi, M. T. (2020). Deep-Learning-Based Indoor Human Following of Mobile Robot Using Color Feature. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(9), 2699. <https://doi.org/10.3390/S20092699>

Fatima, Z., Tanveer, M. H., Waseemullah, Zardari, S., Naz, L. F., Khadim, H., Ahmed, N., & Tahir, M. (2022). Production Plant and Warehouse Automation with IoT and Industry 5.0. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/APP12042053>

Intel® RealSense™ Technology. (n.d.). Retrieved December 24, 2025, from <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-overview.html>

Khan, M. G., Ul Huda, N., & Uz Zaman, U. K. (2022). Smart Warehouse Management System: Architecture, Real-Time Implementation and Prototype Design. *Machines*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/MACHINES10020150>

Kirci, S., & Atali, G. (2023). EuroPallet Detection with RGB-D Camera Based on Deep Learning. *The European Journal of Research and Development*, 3(4), 55–65. <https://doi.org/10.56038/EJRND.V3I4.341>

Kulaç, N., Engin, M., Kulaç, N., & Engin, M. (2023). Developing a Machine Learning Algorithm for Service Robots in Industrial Applications. *Machines* 2023, Vol. 11, 11(4). <https://doi.org/10.3390/MACHINES11040421>

Lee, H., & Jeong, J. (2021). Mobile robot path optimization technique based on reinforcement learning algorithm in warehouse

environment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/APP11031209>

Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., & Woodall, W. (2022). Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*, 7(66).
<https://doi.org/10.1126/SCIROBOTICS.ABM6074>;ISSUE:ISSUE: DOI

Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2).
<https://doi.org/10.1177/1729881419839596>

Singh, R., Seneviratne, L., & Hussain, I. (2025). A Deep Learning-Based Approach to Strawberry Grasping Using a Telescopic-Link Differential Drive Mobile Robot in ROS-Gazebo for Greenhouse Digital Twin Environments. *IEEE Access*, 13, 361–381.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3520233>

Xu, G., Yue, Q., & Liu, X. (2024). Real-time multi-object detection model for cracks and deformations based on deep learning. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102578.
<https://doi.org/10.1016/J.AEI.2024.102578>

Zhao, H., Tang, Z., Li, Z., Dong, Y., Si, Y., Lu, M., & Panoutsos, G. (2024). Real-Time Object Detection and Robotic Manipulation for Agriculture Using a YOLO-Based Learning Approach. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*.
<https://doi.org/10.1109/ICIT58233.2024.10540740>

Ğ

BÖLÜM 4

YÜKSEK FREKANS UYGULAMALARINDA KLASİK ANALOG SÜZGEÇ YAPILARININ SINIRLARI VE ELLİPTİK SÜZGEÇLERİN SAĞLADIĞI AVANTAJLAR

1. FADİLE ŞEN¹

Giriş

Yüksek frekans (High Frequency–HF) bant aralığında (3–30 MHz) çalışan analog uygulamalarda süzgeç tasarımı, yalnızca istenmeyen frekans bileşenlerinin bastırılmasına odaklanan bir problem olarak değil; verimlilik, seçicilik, kararlılık ve gerçekleştirilebilirlik gibi birden fazla mühendislik kısıtının eş zamanlı olarak ele alınmasını gerektiren çok boyutlu bir tasarım süreci olarak değerlendirilmektedir. Özellikle dar geçiş bandı ve yüksek bastırma gereksinimlerinin ön plana çıktığı yüksek frekanslı sistemlerde, klasik analog süzgeç yaklaşımlarının sunduğu çözümler çoğu zaman yeterli esnekliği ve istenen performans düzeyini sağlayamamaktadır.

¹ Öğr. Gör. Dr., Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslekyüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Şanlıurfa/Türkiye,
Orcid: 0000-0001-5007-5471

Yüksek frekans bant aralığında kullanılan analog süzgeç devreleri; alçak-geçiren, yüksek-geçiren, bant-geçiren, bant-durduran ve tüm-geçiren gibi klasik süzgeç yapılarını kapsamakta olup, tarihsel olarak Butterworth ve Chebyshev süzgeç yaklaşımlarından başlayarak elliptic süzgeç yapılarına doğru bir gelişim göstermektedir. Elliptic süzgeçler, geçiş ve durdurma bantlarında kontrollü dalgalanma kullanarak sağladıkları yüksek seçicilik sayesinde, yüksek frekanslı analog sistemlerde yaygın biçimde tercih edilen yapılar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, tam sayı-mertebeli elliptic süzgeçlerin sunduğu ayarlanabilirlik düzeyi, belirli uygulama gereksinimleri karşısında sınırlı kalabilmektedir. Bu noktada kesir-mertebeli yaklaşım, süzgeç tasarımına sürekli ayarlanabilirlik, daha esnek bir yapı ve ince çözünürlüklü kontrol olanakları kazandırarak önemli bir alternatif sunmaktadır. Kesir-mertebeli elliptic süzgeçler, yüksek seçicilik ile tasarım esnekliği arasında daha dengeli bir yapı sağlamaları nedeniyle, yüksek frekanslı analog süzgeç tasarımında doğal bir evrimsel adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu kitap bölümünde, belirli bir süzgeç tasarımının ayrıntılarına odaklanılmaktan ziyade; yüksek frekanslı analog sistemlerde süzgeç seçimine yön veren temel mühendislik yaklaşımları kavramsal düzeyde ele alınmakta ve kesir-mertebeli elliptic süzgeç yaklaşımlarının artan önemi bütüncül bir perspektifle ortaya konulmaktadır.

1. Yüksek Frekans Uygulamalarında Analog Süzgeç Tasarımına Evrimsel Bir Bakış

Analog süzgeçler, giriş sinyalinde yer alan belirli frekans bileşenlerini seçici olarak öne çıkarmak ya da istenmeyen frekans bileşenlerini bastırmak amacıyla kullanılan temel sinyal işleme araçlarından biri olmuştur. Elektrik ve elektronik mühendisliğinde sinyal işleme zincirinin temel yapı taşlarından biri olan analog

süzgeçler; haberleşme sistemlerinden ölçme ve algılama uygulamalarına, radar ve RF ön-uç devrelerinden yüksek hızlı veri dönüştürücü arabirimlerine kadar geniş bir uygulama alanında, analog süzgeçlerin sistem performansı üzerindeki belirleyici rolü uzun yıllardır bilinmektedir (Van Valkenburg, 1982).

Ancak çalışma frekansının artmasıyla birlikte analog süzgeç tasarımı, yalnızca matematiksel olarak tasarlanmanın yanı sıra fiziksel (gerçeklenebilirlik, parazitik etkiler, gürültü, doğrusal olmama ve kararlılık gibi) olarakda çok sayıda mühendislik kısıtının birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir problem hâline gelmektedir (Sedra & Smith, 2015).

Özellikle yüksek frekans yani daha kısa dalga boylu bantların, süzgeçlerin geçiş bandı davranışı ve durdurma bandındaki zayıflatma yetenekleri, sistemin spektral verimliliğini ve girişimlere karşı dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Daha yüksek durdurma bandı bastırma seviyeleri talep eden yüksek frekanslı analog sistemler, klasik analog süzgeç yapıları ile talep edilen gereksinimleri belirli ölçüde karşılayabilse de, artan frekans ve performans beklentileri karşısında bu yapıların sınırları daha belirgin hâle gelmektedir (Zverev, 1967).

Analog süzgeç tasarımının tarihsel gelişimi incelendiğinde, mühendislik gereksinimlerine paralel olarak bir evrim sürecinin yaşandığı görülmektedir. Butterworth süzgeçlerin düzgün genlik cevabını merkeze alan yaklaşımı, Chebyshev süzgeçlerle birlikte yerini daha yüksek seçicilik arayışına bırakmış; bu arayış elliptic süzgeçlerin geliştirilmesiyle önemli bir dönüm noktasına ulaşmıştır. Elliptic süzgeçler, hem geçiş bandında hem de durdurma bandında kontrollü dalgalanma kullanarak en keskin geçiş bandını sağlayabilen yapılar olarak literatürde özel bir konuma sahiptir (Zverev, 1967; Williams & Taylor, 2006).

Bununla birlikte, yüksek frekanslı uygulamalarda yalnızca klasik elliptic yaklaşımlar da her zaman yeterli esnekliği sunamamaktadır. Özellikle geçiş bandı eğiminin ve bastırma karakteristiklerinin daha ince çözünürlükle ayarlanması ihtiyacı, tamsayı-mertebeli süzgeçlerin sunduğu kesikli kontrol mekanizmasını yetersiz kılmaktadır. Bu noktada özellikle son yıllarda artan bir ilgi alanına sahip olan kesir-mertebeli (fractional-order) yaklaşım, analog süzgeç tasarımıyla yeni bir serbestlik derecesi sunarak, frekans cevabının daha hassas biçimde şekillendirilmesine olanak tanımaktadır (Radwan D. Kubanek; Shah ve ark., 2010; Kubanek ve ark., 2018:8; Soni & Gupta, 2018; ; Soni & Gupta, 2021).

Bu kitap bölümünde, yüksek frekans uygulamalarında analog süzgeç tasarımının geçirdiği bu evrimsel süreç; klasik süzgeç yapılarından elliptic süzgeçlere ve nihayetinde kesir-mertebeli elliptic yaklaşımlara uzanan bir çerçevede ele alınmaktadır. Amaç, belirli bir tasarımın ayrıntılarını sunmaktan ziyade, yüksek frekanslı pratik uygulamalarda süzgeç seçiminin hangi mühendislik gerekçeleriyle bu noktaya evrildiğini kavramsal düzeyde ortaya koymaktır.

2. Yüksek Frekans Uygulamalarında Analog Süzgeçlerden Beklenen Temel Performans Gereksinimleri

Yüksek frekans bant aralığında çalışan analog süzgeçlerden beklenen performans kriteri, yalnızca istenmeyen frekans bileşenlerini bastırmak değil; aynı zamanda sınırlı spektrum kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak ve sistemin genel sinyal bütünlüğünü korumaktır (Razavi, 2012).

Yüksek frekans bant aralığında çalışan süzgeç devrelerinin tasarımında önemli kriterlerden biri geçiş bandı genişliğidir. Dar bir geçiş bandı, bitişik frekans bantları arasındaki girişimi azaltarak spektral verimliliği artırmakta; ancak bu durum çoğu zaman daha

yüksek süzgeç mertebesine, akabinde süzgeç devresinde artan aktif ve pasif eleman sayısına yani artan devre karmaşıklığına neden olmaktadır. Yüksek frekanslı devrelerde parazitik kapasitans ve endüktansların etkisi düşünüldüğünde, mertebe artışı tasarım açısından önemli zorluklar doğurabilmektedir (Pozar, 2011). Yüksek frekans bant aralığında çalışan süzgeç devrelerinin tasarımında önemli kriterlerden bir diğeri ise durdurma bandı performansdır. Durdurma bandında sağlanan zayıflatma seviyesi de yüksek frekanslı sistemlerde belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle radyo frekans (RF) ön-uç devrelerinde ve haberleşme alıcılarında, güçlü bitişik kanal sinyallerinin bastırılması, alıcı hassasiyetini ve dinamik aralığı doğrudan etkilemektedir (Razavi, 2012). Yüksek frekans bant aralığında çalışan süzgeç devrelerinin tasarımında önemi göz ardı edilmeycek kriterler, faz davranışı ve grup gecikmesi gibi zaman alanına ilişkin parametrelerdir. Özellikle dar bantlı ve yüksek hızlı sistemlerde faz bozulmaları, işaret bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyerek sistem performansında ciddi kayıplara yol açabilmektedir. Bu durum, analog süzgeç tasarımında yalnızca genlik cevabına odaklanan yaklaşımların yetersiz kalmasına neden olmaktadır (Williams & Taylor, 2006).

Yüksek frekans uygulamalarında bahsedilen önemli süzgeç kriterleri, süzgeç tasarımında; en basit veya en düzgün çözümün her zaman en uygun çözüm olmadığı gerçeğini ortaya koymaktadır. Aksine, belirli uygulama gereksinimleri doğrultusunda seçicilik, mertebe, faz davranışı ve gerçekleştirilebilirlik arasında dengeli bir tasarım yaklaşımı benimsenmesi gerekmektedir. Bu denge arayışı, klasik Butterworth ve Chebyshev süzgeç yapılarından elliptic ve kesir-mertebeli elliptic yaklaşımlara doğru yönelimin temel mühendislik gerekçesini oluşturmaktadır (Zverev, 1967; Shah ve ark., 2019).

3. Klasik Analog Süzgeç Yapılarının Yüksek Frekans Uygulamalarındaki Sınırları

Yüksek frekans bant aralığında çalışan analog süzgeç devrelerine yönelik gereksinimlerin artması, klasik analog süzgeç yapılarının yapısal ve performans temelli sınırlarını daha belirgin hâle getirmiştir. Butterworth, Chebyshev ve Bessel gibi geleneksel süzgeç topolojileri, uzun yıllar boyunca farklı mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılmış olsa da, bu yapıların tasarım felsefesi büyük ölçüde düşük ve orta frekans bantlarının gereksinimlerine göre şekillenmiştir. Çalışma frekansının yükselmesiyle birlikte, bu süzgeçlerin sunduğu geçiş bandı eğimi, seçicilik ve bastırma düzeyi gibi performans ölçütleri, yüksek frekanslı sistemlerin hassas spektral gereksinimlerini karşılamakta çoğu zaman yetersiz kalmaktadır (Van Valkenburg, 1982; Zverev, 1967).

Klasik analog süzgeçlerin en temel sınırlamalarından biri, geçiş bandı eğiminin doğrudan süzgeç mertebesiyle ilişkili olmasıdır. Yani yüksek frekans uygulamalarında dar bir geçiş bandı ve yüksek bastırma gereksinimi ortaya çıktığında, istenen frekans cevabını elde edebilmek için süzgeç mertebesinin artırılması kaçınılmaz hâle gelmektedir. Ancak mertebe artışı yalnızca teorik frekans cevabını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda devrede kullanılan aktif ve pasif eleman sayısını artırarak devre karmaşıklığını yükseltmektedir. Bu durum, parazitik kapasitans ve endüktansların etkisini arttırmakla beraber yüksek frekanslı analog devrelerde kararlılık problemleri ve istenmeyen salınımlar gibi pratik tasarım zorluklarını beraberinde getirmektedir (Pozar, 2011; Sedra & Smith, 2015).

Klasik süzgeç yapılarından Butterworth süzgeçler, geçiş bandında dalgalanma içermeyen yumuşak bir eğimle elde edilen düzgün genlik cevapları sayesinde analog süzgeç tasarımında yaygın

olarak kullanılmaktadır. Bu özellik, genlik doğruluğunun kritik olduğu uygulamalarda önemli bir avantaj sunmaktadır. Ancak yüksek frekanslı sistemlerde dar geçiş bandı ve yüksek seçicilik gereksinimi söz konusu olduğunda, Butterworth süzgeçlerin yeterli bastırma sağlayabilmesi için süzgeç mertebesinin ciddi biçimde artırılması gerekmektedir (Zverev, 1967; Williams & Taylor, 2006). Artan mertebe ile birlikte devre eleman sayısının yükselmesi, parazitik etkilerin baskın hâle gelmesine ve yüksek frekanslı tasarımlarda güvenilirliğin azalmasına neden olmaktadır (Sedra & Smith, 2015). Bu nedenle Butterworth süzgeçler, yüksek frekans uygulamalarında genellikle yalnızca başlangıç düzeyinde bir referans yapı olarak değerlendirilmekte; yüksek seçicilik gerektiren pratik sistemlerde sınırlı bir çözüm sunmaktadır.

Klasik süzgeç yapılarından bir diğeri olan Chebyshev süzgeçler, Butterworth yapılarına kıyasla daha keskin bir geçiş bandı eğimi sağlayarak seçicilik açısından belirgin bir avantaj sunmaktadır. Bu yapıların temel tasarım yaklaşımı, geçiş bandında veya durdurma bandında kontrollü genlik dalgalanmaları oluşturarak daha hızlı bir genlik düşüşü elde edilmesine dayanmaktadır (Antoniou, 2006). Yüksek frekans uygulamalarında ise Chebyshev süzgeçler, daha düşük mertebelerde daha yüksek bastırma seviyelerine ulaşabilmeleri nedeniyle teorik olarak cazip bir alternatif olmasına rağmen genlik dalgalanmaları sistemde bozulmalar meydana getirmektedir. Özellikle analog ön-uç devreleri ve hassas sinyal işleme uygulamalarında, bu dalgalanmalar istenmeyen genlik hatalarına ve performans kayıplarına yol açabilmektedir (Razavi, 2012). Bununla birlikte, Chebyshev süzgeçlerde de geçiş bandı ve durdurma bandı karakteristikleri büyük ölçüde önceden tanımlanmış bir tasarım çerçevesi içerisinde şekillendirilmektedir. Tasarımcı, süzgeç tipi ve mertebe belirlendikten sonra frekans cevabı üzerinde yapabileceği ince ayar olanakları açısından sınırlı kalmaktadır. Bu durum, yüksek frekanslı

uygulamalarda karşılaşılan dar toleranslı ve hassas spektral gereksinimlere uyum sağlamayı zorlaştırmaktadır (Williams & Taylor, 2006).

Sonuç olarak, klasik analog süzgeç yapıları düşük ve orta frekans bantlarında başarılı çözümler sunmalarına rağmen, yüksek frekans uygulamalarında artan seçicilik, bastırma ve tasarım esnekliği gereksinimleri karşısında yapısal sınırlamalar sergilemektedir. Mertebe artışına dayalı tasarım yaklaşımı, yüksek frekanslı devrelerde parazitik etkiler ve kararlılık sorunlarını kaçınılmaz hâle getirirken, frekans cevabı üzerinde esnek ayarlama imkânlarının sınırlı olması bu yapıların kullanım alanını daraltmaktadır (Van Valkenburg, 1982; Pozar, 2011). Bu nedenlerle, yüksek frekanslı analog sistemlerde klasik süzgeç yaklaşımlarının ötesine geçen alternatif tasarım yöntemlerine ve yeni süzgeç yapılarına olan ihtiyaç giderek daha belirgin hâle gelmektedir.

4. Elliptic Süzgeçler: Yüksek Frekanslı Uygulamalarda Bir Kırılma Noktası

Önceki bölümde ele alınan klasik analog süzgeç yapılarının yüksek frekans uygulamalarındaki yapısal ve performans temelli sınırlamaları, dar geçiş bandı ve yüksek bastırma gereksinimlerinin aynı anda karşılanabildiği alternatif süzgeç yaklaşımlarına olan ihtiyacı açık biçimde ortaya koymuştur. Bu bağlamda elliptic (Cauer) süzgeçler, analog süzgeç tasarımında yüksek seçicilik gerektiren uygulamalar için geliştirilen en etkili çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Elliptic süzgeçler, hem geçiş bandında hem de durdurma bandında kontrollü genlik dalgalanmalarına izin vererek, belirli bir süzgeç mertebesi için mümkün olan en dar geçiş bandını sağlayabilmeleridir. Bu yapı, klasik Butterworth ve Chebyshev süzgeçlerle karşılaştırıldığında, aynı bastırma seviyesinin daha düşük mertebelerle elde edilmesine olanak tanımaktadır (Zverev,

1967). Bu önemli avantajı sayesinde süzgece hem teorik kazanım sağlar hemde fiziksek olarak; devre karmaşıklığının azalmasını, parazitik etkilerin sınırlandırılmasını ve entegrasyon açısından daha elverişli çözümler sunulmasını sağlamaktadır (Li, 2022).

Yüksek frekans bant aralığında çalışan elliptic süzgeçlerin sağladığı bir diğer önemli avantaj, geçiş bandındaki keskin eğim sayesinde bitişik bant girişimlerinin etkin biçimde bastırılabilmesidir. Bu özellik, özellikle dar bantlı spektral yapıların söz konusu olduğu haberleşme ve RF ön-uç sistemlerinde büyük önem taşımaktadır. Elliptic süzgeçlerin durdurma bandında izin verilen dalgalanmalar ise bastırma karakteristiğinin daha agresif biçimde şekillendirilmesine imkân tanımakta; böylece yüksek frekanslı ortamlarda sıklıkla karşılaşılan istenmeyen girişim bileşenlerine karşı etkili bir çözüm sunmaktadır (Pozar, 2011).

Yüksek seçicilik avantajına rağmen klasik tamsayı-mertebeli elliptic süzgeçlerin yüksek frekans uygulamalarında belirli bir esneklik sınırına ulaştığı görülmektedir. Bu yapılarda süzgeç mertebesinin yalnızca tamsayı değerler alabilmesi, frekans cevabının şekillendirilmesini kesikli bir tasarım sürecine indirmektedir; istenen geçiş bandı eğimi veya bastırma seviyesine ulaşmak çoğu zaman gereğinden fazla mertebe artışı zorunlu kılmaktadır. Yüksek frekans bantlarında bu durum, parazitik etkilerin belirginleşmesine, gürültü seviyesinin artmasına ve kararlılık problemlerine yol açarak pratik gerçekleştirilebilirliği sınırlandırmaktadır. Ayrıca klasik elliptic süzgeçlerde geçiş ve durdurma bandı dalgalanmalarının konum ve yoğunluğunun sınırlı ölçüde ayarlanabilmesi, uygulamaya özgü spektral gereksinimlere uyumu zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerle, süzgeç mertebesinin sürekli bir tasarım parametresi olarak ele alınmasına olanak tanıyan kesir-mertebeli yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Tamsayı-mertebeli elliptic süzgeçler, kesir-merebeli olarak tasarlandığında, yüksek frekanslı analog sistemlerde daha ince çözünürlüklü ayarlanabilirlik ve daha

dengeli performans sunan doğal bir tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır (Kubanek ve ark., 2018:8; Soni & Gupta, 2018; ; Soni & Gupta, 2021).

5. Kesir-Mertebeli Elliptic Süzgeçler: Yüksek Frekansta Artan Tasarım Esnekliği

Önceki bölümde tartışıldığı üzere, klasik tamsayı-mertebeli elliptic süzgeçler yüksek frekans uygulamalarında önemli seçicilik avantajları sunmakla birlikte, süzgeç mertebesinin yalnızca kesikli değerler alabilmesi nedeniyle tasarım esnekliği açısından belirli sınırlamalar sergilemektedir. Bu durum, özellikle dar geçiş bandı ve uygulamaya özgü bastırma gereksinimlerinin söz konusu olduğu yüksek frekanslı analog sistemlerde, frekans cevabının daha ince çözünürlükle ayarlanabildiği alternatif süzgeç yaklaşımlarına olan ihtiyacı ön plana çıkarmaktadır.

Bu bağlamda kesir-mertebeli (fractional-order) süzgeç yaklaşımı, klasik analog süzgeç tasarımında süzgeç mertebesinin tamsayı değerlerle sınırlandırılmasını ortadan kaldırarak, mertebeyi sürekli bir tasarım parametresi hâline getiren güçlü bir paradigma olarak öne çıkmaktadır. Kesir-mertebeli sistemlerde frekans cevabı, tamsayı-mertebeli yapılara kıyasla daha ince çözünürlükle ve daha esnek bir biçimde şekillendirilebilmekte; bu durum geçiş bandı eğimi ve bastırma karakteristiklerinin daha hassas kontrol edilmesine olanak tanımaktadır (Radwan ve ark., 2008:40).

Elliptic süzgeçlerin sunduğu yüksek seçicilik özelliği, kesir-mertebeli yaklaşım ile birleştirildiğinde, yüksek frekanslı analog sistemler için son derece etkili bir tasarım çerçevesi ortaya çıkmaktadır. Kesir-mertebeli elliptic süzgeçler, sisteme sağladığı extra serbest mertebesi sayesinde gereğinden fazla mertebe artışına ihtiyaç duymadan, geçiş bandı ve durdurma bandı davranışlarının daha dengeli bir biçimde ayarlanabilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede, klasik tamsayı-mertebeli elliptic yapılarda karşılaşılan aşırı

karmaşıklık ve hassas ayar problemleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Shah ve ark., 2019:38; Sen & Kircay, 2025:9; Tsirimokou, 2017:92).

Yüksek frekans uygulamalarında bu yaklaşımın en dikkat çekici avantajlarından biri, daha düşük etkin merteye ile istenen seçiciliğin sağlanabilmesidir. Etkin mertebenin düşürülmesi, devre eleman sayısının azalmasına, parazitik etkilerin sınırlandırılmasına ve güç tüketimi ile fiziksel alan gereksinimlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikler, özellikle modern haberleşme ve RF ön-üç sistemlerinde, kesir-mertebeli elliptic süzgeçleri pratik ve gerçekleştirilebilir çözümler hâline getirmektedir. Ayrıca, kesir-mertebeli elliptic süzgeçler mühendislik açısından yalnızca seçicilik ve bastırma performansı ile değil, aynı zamanda tolerans ve parametre belirsizlikleri karşısındaki davranışlarıyla da önem kazanmaktadır. Frekans cevabının daha yumuşak ve kontrollü biçimde ayarlanabilmesi, eleman toleranslarının sistem performansı üzerindeki etkisini azaltmaya yardımcı olmakta; bu durum yüksek frekanslı analog devrelerde güvenilirlik ve üretilebilirlik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Tsirimokou, 2017:92; Shah ve ark., 2019:38).

Sonuç olarak, kesir-mertebeli elliptic süzgeçler yüksek frekanslı analog süzgeç tasarımında yalnızca alternatif bir yaklaşım olarak değil; klasik tamsayı-mertebeli yapıların sunduğu tasarım esnekliğini genişleten tamamlayıcı bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Artan seçicilik, ince ayarlanabilirlik ve gerçekleştirilebilirlik gereksinimleri dikkate alındığında, kesir-mertebeli elliptic süzgeçlerin yüksek frekanslı analog sistemlerde tasarımcıya daha dengeli ve uyarlanabilir çözümler sunan etkili bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

6. Tartışma: Yüksek Frekanslı Analog Süzgeç Tasarımına Mühendislik Perspektifi

Önceki bölümlerde ele alınan klasik, elliptic ve kesir-mertebeli elliptic süzgeç yaklaşımları birlikte değerlendirildiğinde, yüksek frekanslı analog süzgeç tasarımının doğrusal bir daha yüksek mertebe ve daha iyi performans probleminden çok, çok kriterli bir mühendislik denge problemi olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle yüksek frekans uygulamalarında tasarımcı, seçicilik, geçiş bandı genişliği, faz davranışı, devre karmaşıklığı, toleranslara duyarlılık ve güç tüketimi gibi birbiriyle çelişebilen hedefleri aynı anda gözetmek zorundadır.

Klasik Butterworth ve Chebyshev süzgeçler, tasarımın erken aşamalarında kavramsal sadelik ve öngörülebilir davranış sunmaları bakımından hâlâ önemli bir referans noktasıdır. Ancak bu yapıların sunduğu seçicilik düzeyi, yüksek frekanslı pratik uygulamalarda çoğu zaman yetersiz kalmakta; istenen performans seviyesine ulaşabilmek için mertebenin artırılması gerekmektedir. Bu durum, özellikle analog entegre devre ortamında, aktif ve pasif elaman sayısının artmasına bu durumda parazitik etkilerin baskın hâle gelmesine ve tasarım güvenilirliğinin azalmasına yol açabilmektedir. Elliptic süzgeçler ise bu noktada aynı mertebede daha keskin geçiş bandı sağlayabilmeleri, yüksek frekanslı uygulamalarda seçicilik, mertebe verimliliği açısından belirgin bir avantaj sunmaktadır. Bu nedenle elliptic yaklaşımlar, dar bant seçimi ve bitişik bant girişimlerinin bastırılması gereken sistemlerde doğal bir tercih hâline gelmiştir. Bununla birlikte, klasik tamsayı-mertebeli elliptic süzgeçlerin sunduğu ayarlanabilirliğin sınırlı olması, belirli uygulama gereksinimlerinde hâlâ bir tasarım boşluğu bırakmaktadır. Bu boşluk, tamsayı-mertebeli elliptic süzgeçleri kesir-mertebeli olarak tasarlanmaya itmektedir. Kesir-mertebeli yaklaşım, süzgeç mertebesini sürekli bir tasarım parametresi hâline getirerek, geçiş bandı eğimi ve bastırma karakteristikleri üzerinde ince çözünürlüklü

bir kontrol imkânı sunmaktadır. Bu özellik, yüksek frekanslı analog sistemlerde gereğinden fazla karmaşıklık oluşturmada performansın hassas biçimde ayarlanabilmesine olanak tanımaktadır.

Mühendislik bakış açısından değerlendirildiğinde, kesir-mertebeli elliptic süzgeçler yalnızca teorik olarak daha esnek yapılar değil; aynı zamanda toleranslar, gürültü ve doğrusal olmayanlık gibi pratik etkiler karşısında daha dengeli çözümler sunabilen yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle kesir-mertebeli elliptic süzgeç yapılarının, yüksek frekanslı analog süzgeç tasarımında alternatif olmaktan ziyade, artan performans beklentilerinin doğal bir sonucu olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

7. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu kitap bölümünde, yüksek frekans uygulamalarında analog süzgeç tasarımının klasik tamsayı-mertebeli yapılardan elliptic ve kesir-mertebeli elliptic yaklaşımlara uzanan gelişimi bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır. İnceleme, yüksek frekanslı süzgeç tasarımının yalnızca ideal frekans cevabına değil; seçicilik, ayarlanabilirlik, gerçekleştirilebilirlik ve devre karmaşıklığı gibi mühendislik kısıtlarının birlikte değerlendirilmesine dayandığını göstermektedir.

Klasik süzgeç yapıları belirli uygulamalarda geçerliliğini sağlamasına rağmen dar geçiş bandı ve yüksek bastırma gereksinimleri karşısında sınırlı kalmaktadır. Elliptic süzgeçler bu sınırlamaları yüksek seçicilikleriyle önemli ölçüde azaltırken, tamsayı-mertebeli yapıların doğası ince ayarlanabilirlik açısından kısıtlar getirmektedir. Kesir-mertebeli elliptic süzgeçler ise bu yaklaşımların güçlü yönlerini bir araya getirerek, yüksek frekanslı analog tasarımlar için daha esnek ve dengeli çözümler sunmaktadır.

Gelecek çalışmaların, kesir-mertebeli elliptic süzgeçlerin farklı aktif devre mimarileriyle entegrasyonu, düşük güç ve düşük gerilimli uygulamalara uyarlanması ve yüksek frekans koşullarındaki deneysel doğrulanmasına odaklanması beklenmektedir. Ayrıca toleranslar, gürültü ve doğrusal olmayanlık gibi gerçek devre etkilerinin performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi, bu yaklaşımın pratik uygulanabilirliğini daha da güçlendirecektir.

Sonuç olarak, kesir-mertebeli elliptic süzgeçler, yüksek frekanslı analog sistemlerde artan seçicilik ve ayarlanabilirlik gereksinimleri karşısında, süzgeç tasarımına yönelik güçlü ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Kaynakça

Antoniou, A. (2006). *Digital signal processing: Signals, systems, and filters*. McGraw-Hill.

Kubanek, D., Freeborn, T. J., Koton, J., & Dvorak, J. (2018). Validation of fractional-order lowpass elliptic responses of $(1 + \alpha)$ -order analog filters. *Applied Sciences*, 8(12), Article 2603.

Li, Y. (2022). Implementation for seventh-order low-pass Cauer filter in current-mode circuits using second-generation current-controlled conveyors. *Romanian Review of Scientific and Technical – Electrical Engineering*, 67(2), 45–52.

Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Radwan, A. G., Soliman, A. M., & Elwakil, A. S. (2008). On the stability of linear systems with fractional-order elements. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(5), 2317–2328.

Radwan, A. G., Soliman, A. M., & Elwakil, A. S. (2008). First-order filters generalized to the fractional domain. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 36(8), 887–898.

Razavi, B. (2012). *RF microelectronics* (2nd ed.). Prentice Hall.

Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). *Microelectronic circuits* (7th ed.). Oxford University Press.

Sen, F., & Kircay, A. (2025). Realization of fractional-order current-mode multifunction filter based on MCFOA for low-frequency applications. *Fractal and Fractional*, 9(6), 377. <https://doi.org/10.3390/fractalfract9060377>

Shah, N. A., Jain, S., & Gupta, M. (2019). Design and analysis of fractional-order elliptic filters. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 38(7), 3145–3163.

Soni, A., & Gupta, M. (2018). Analysis of fractional-order low-pass elliptic filters. In *Proceedings of the 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)* (pp. 1–6). IEEE.

Soni, A., & Gupta, M. (2021). Fractional-order elliptic filter implemented using optimization technique. In R. K. Sharma & M. Gupta (Eds.), *Advances in signal processing and communication* (pp. 143–158). Springer.

Tsirimokou, G. (2017). Fractional-order circuits: Design, analysis and applications. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 92(3), 513–528.

Van Valkenburg, M. E. (1982). *Analog filter design*. Holt, Rinehart and Winston.

Williams, A. B., & Taylor, F. J. (2006). *Electronic filter design handbook* (4th ed.). McGraw-Hill.

Zverev, A. I. (1967). *Handbook of filter synthesis*. John Wiley & Sons.

BÖLÜM 5

Modern FPGA'lerin Donanım Kaynaklarının İncelenmesi

Bahadır ÖZKILBAÇ¹

Giriş

Sahada programlanabilir kapı dizileri (Field Programmable Gate Arrays – FPGA), esneklik, yüksek paralellik ve tekrar programlanabilme gibi çeşitli avantajlarından dolayı elli yıldan fazladır akademik araştırmaların ve endüstriyel uygulamaların önemli bir parçasıdır. FPGA'ler üretildikten sonra herhangi bir fonksiyona sahip değildir. Bu yönüyle mikro denetleyici ve genel amaçlı işlemcilerden ayrılmaktadırlar. Herhangi bir elektronik sistem için ihtiyaç duyulan fonksiyon, FPGA'de donanımsal olarak tasarlanabilmektedir.

İlk nesil FPGA'ler temel olarak yapılandırılabilir mantık blokları ve basit ara bağlantı kaynakları sahipken günümüzde geliştirilen modern FPGA mimarileri çok daha karmaşık ve çok yönlü donanım bileşenlerini bünyesinde barındırmaktadır. Dijital sinyal işleme (DSP) blokları, yüksek kapasiteli blok RAM'ler, gelişmiş giriş/çıkış yapıları ve gömülü işlemci çekirdekleri,

¹* Arş. Gör. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1687-0700

FPGA'leri yalnızca bir mantık matrisinden bir hesaplama platformuna dönüştürmüştür. Ayrıca analog-sayısal dönüştürücüler, sayısal-analog dönüştürücüler, faz kilitlemeli çevrimler ve analog hesaplama motorları gibi karma sinyal bileşenlerinin FPGA içerisine entegre edilmesi bu aygıtların gerçek dünya sinyalleriyle etkileşimini kolaylaştırmıştır.

Modern FPGA'lerin sahip olduğu donanımsal çeşitlilik, uygulamaya özgü ve yüksek performanslı sistemlerin tek bir çip üzerinde gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır. FPGA'lerin yeniden programlanabilme avantajından dolayı dijital devrelerin prototipleme süreci hızlanır, pazara çıkış süresi kısılır ve sistem güncellemeleri donanım değişikliğine gerek kalmadan kolayca yapılabilir. Sahip olduğu bu avantajlardan dolayı FPGA'ler, günümüzde endüstride yaygın şekilde kullanılmaktadırlar.

Son yıllarda AMD, Intel, Microchip, Lattice ve Gowin gibi önde gelen üretici firmalar tarafından geliştirilen FPGA ve çip üzerinde sistem (System on the Chip-SoC) cihazları, güç tüketimi, hız, alan verimliliği açısından optimize edilmiş geniş bir ürün yelpazesi sunmaktadır. Bu çeşitlilik sayesinde tasarımcılar esnek ve ölçeklenebilir dijital devreler geliştirme imkânına sahip olmaktadır. FPGA ile işlemci çekirdeklerinin aynı çip üzerinde birleştirilmesi yazılım ve donanım bileşenlerinin birlikte tasarlanmasına olanak sağlayarak sistem performansını ve enerji verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Bu çalışmada, modern FPGA teknolojisinin donanımsal kaynakları ele alınmaktadır. FPGA üretici firmalar tarafından sunulan mimari yaklaşımlar, analog ve karma sinyal bileşenleri, kayan noktalı aritmetik destekleri, gömülü işlemciler, donanım tabanlı bellek denetleyicileri ve uygulamaya özgü yeniden yapılandırılabilir yapılar detaylı olarak incelenmektedir. Modern FPGA'lerin yalnızca dijital mantık temelli bir platform değil, aynı

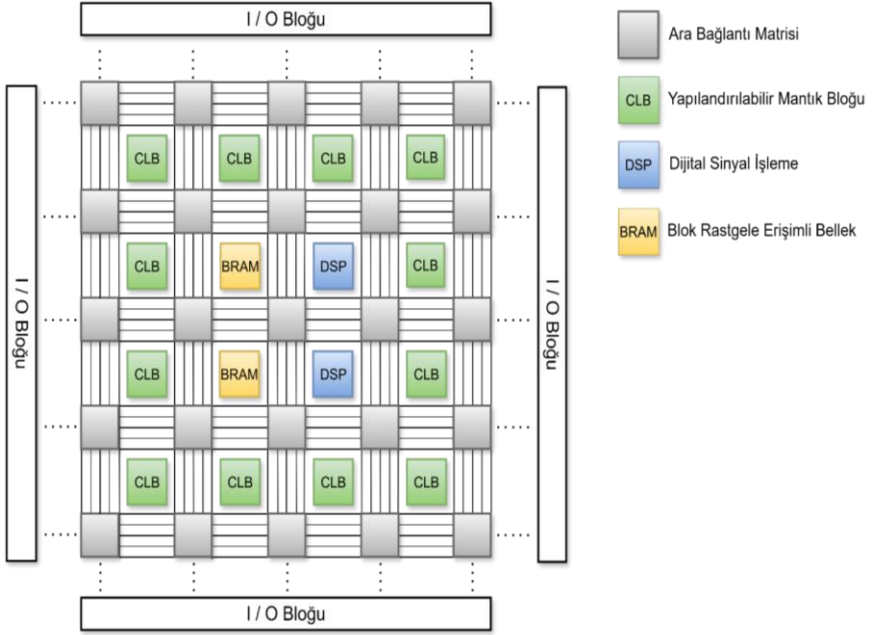
zamanda çok disiplinli ve uygulama odaklı bir hesaplama altyapısı sunduğunu ortaya koymak amaçlanmıştır.

1. Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA)

FPGA'ler üretimden sonra herhangi bir fonksiyona sahip değildir (Murgai vd., 1995; López vd., 2020). Piyasada herhangi bir ürün ya da tasarımda kullanılabilmeleri için öncelikle yapılandırılmaları gerekmektedir. Bir mikro denetleyici üretimden sonra bazı işlemleri gerçekleştirecek fonksiyonlara sahiptir. Mikro denetleyiciler herhangi bir ürün ya da tasarımda kullanılmak istediğinde gerekli yazılım ile programlanır (Kravchenko vd., 2020; Rafiquzzaman 2025). Ancak FPGA'lerde durum temel olarak farklıdır. Herhangi bir fonksiyonun gerçekleştirilmesi için öncelikle o fonksiyonun FPGA içerisinde tasarlanması gerekmektedir. Örneğin FPGA içerisinde bir çarpma işlemi gerçekleştirilmesi isteniyorsa çarpma işleminin FPGA içerisinde tanımlanması gerekmektedir. Tasarımcılar, bir dijital devre için ihtiyaç duyulan tüm işlevleri yeterli kapasiteye sahip bir FPGA içerisinde donanımsak olarak tanımlayabilmektedirler.

Günümüzde FPGA'lerde genel olarak dijital sinyal işleme (DSP) blokları da bulunmaktadır. Böylelikle toplama ve çarpma gibi aritmetik işlemler DSP bloklarından kullanılabilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü üzere günümüzde temel bir FPGA, yapılandırılabilir mantık blokları (CLB), DSP, blok rastgele erişimli bellek (BRAM), ara bağlantı matrisinden, programlanabilir ara bağlantılardan ve giriş/çıkış pinlerinden oluşmaktadır (Amagasaki vd., 2018; Abideen vd., 2025).

Şekil 1 Genel Bir FPGA Mimarisi



FPGA'ler paralel işlem yapabilme, yüksek hız, tekrar programlanabilme ve hızlı prototipleme gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikleri sayesinde gerçek zamanlı düşük gecikme gerektiren uygulamalar ve yüksek hesaplama yoğunluklu algoritmalar için yaygın şekilde kullanılırlar. Özellikle boru hattı yapılarının FPGA'de donanım seviyesinde tanımlanabilmesi, kritik döngü sürelerinin azaltılmasını ve deterministik zamanlamanın sağlanmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca donanımsal olarak özelleştirilebilir mimarileri, tasarımcıların yalnızca ihtiyaç duydukları fonksiyonları devreye ekleyerek alan, güç ve performans arasında optimize edilmiş çözümler üretmelerine olanak tanımaktadır. Bu özelleştirilebilirlik, farklı uygulamalar için ölçeklendirilebilir mimarilerin oluşturulmasını da sağlamaktadır. Yeniden programlanabilir olmaları ise hem dijital devrelerin prototipleme sürecini hızlandırır hem de sistemlerin piyasada

yeniden tasarlanmasını mümkün kılar. Gerçekleştirilen tasarımın donanım güncellemesi yazılım benzeri bir esneklikle uygulanabilmektedir. Bu avatajlar sayesinde FPGA'ler endüstride görüntü işleme, haberleşme, kriptografi, radar sistemleri, motor kontrolü ve gömülü yapay zekâ gibi pek çok kritik alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Rodríguez vd., 2015; Saday, 2022).

FPGA'ler günümüzde endüstriyel uygulamaların çok geniş bir yelpazesinde tercih edilen dijital uygulama platformlarından biri hâline gelmiş olup bu aygıtlara yönelik genişletmeler ve iyileştirmeler sürmeye devam etmektedir. Yüksek hız ve esneklik, herhangi bir sistem ya da algoritmanın doğasında bulunan paralelliğin FPGA'de kullanılabilmesi, pazara çıkış süresi, iyi maliyet-performans dengesi, geniş gömülü kaynak kapasitesi ve özel amaçlı fikrî mülkiyet (IP) çekirdeklerinin mevcut olması, FPGA'leri birçok endüstriyel uygulamada tercih edilen platform hâline getirmektedir. Bu çalışma, FPGA teknolojisindeki donanımsal olarak son gelişmeleri gözden geçirmektedir. Bu kapsamda günümüz FPGA'leri içerisinde donanımsal olarak yer alan analog, DSP, gömülü işlemci, bellek ve uygulamaya özgü bileşenler detaylı olarak ele alınmıştır.

2. FPGA Üretici Firmalar

Günümüzde FPGA ekosistemi yüksek performanslı ve düşük kaynak tüketimli dijital devre tasarımları için geniş bir üretici yelpazesi tarafından geliştirilmektedir. Piyasanın hakimi olan AMD ve Intel, veri merkezi hızlandırıcılarından gömülü yapay zekâ uygulamalarına kadar uzanan çeşitli alanlarda kullanılan, yüksek performanslı FPGA'ler piyasaya sunmaktadır. AMD, Spartan, Artix, Kintex, Virtex ve Zynq gibi geniş ürün aileleriyle düşük güçten ultra yüksek performansa kadar ölçeklendirilebilir FPGA mimarilerine sahiptir (AMD, 2025). Intel ise Cyclone, Arria, Stratix ve Agilex aileleriyle hem enerji verimli hem de yüksek bant genişlikli

hesaplama gereksinimleri için optimize edilmiş çözümler geliştirmektedir (Intel, 2025). Bunlara ek olarak Microchip, flash tabanlı güvenli FPGA mimarisiyle savunma ve uzay uygulamalarında kritik öneme sahip PolarFire, SmartFusion2 ve IGLOO2 gibi aileleri sunarken Lattice Semiconductor düşük güç tüketimi ve küçük form faktörüyle öne çıkan iCE40, ECP5 ve MachXO serileriyle IoT ve görüntü işleme alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Microchip, 2025; Lattice, 2025). Son yıllarda hızla büyüyen Gowin Semiconductor ise uygun maliyetli GW1N ve GW2A tabanlı çözümleriyle özellikle eğitim, Ar-Ge ve gömülü sistem pazarında önemli bir alternatif hâline gelmiştir (Gowin, 2025). Ayrıca Achronix ve QuickLogic gibi üreticiler, yüksek hızlı veri yolları veya ultra düşük güç gerektiren uygulamalar için özelleştirilmiş FPGA çözümleri sunarak ekosistemi çeşitlendirmektedir (Achronix, 2025; QuickLogic, 2025). Tablo 1’de FPGA üretici firmalar ve bu firmalara ait modeller yer almaktadır.

Tablo 1 FPGA Üretici Firmalar ve FPGA Modelleri

Üretici Firma	FPGA Modeli
AMD	Spartan, Artix, Kintex, Virtex, Zynq-7000, Zynq UltraScale+, Versal ACAP
Intel	Cyclone, Arria, Stratix, Agilex
Microchip	IGLOO2, SmartFusion, SmartFusion2, ProASIC3, PolarFire, PolarFire SoC
Lattice Semiconductor	iCE40, MachXO/MachXO2/MachXO3, ECP5, Avant
Growin Semiconductor	GW1N (LittleBee), GW2A (Arora), GW5A, RISC-V SoC FPGA
Achronix	Speedster7t, Speedcore eFPGA
QuickLogic	EOS S3, QuickFeather, ArcticLink, eFPGA IP

3. Modern FPGA’lerin Donanım Kaynakları

FPGA’lerin donanım kaynakları, üretici firmaya ya da aynı firmanın farklı cihazlarına göre büyük farklılıklar göstermektedir. Ancak genel olarak günümüzde FPGA’lerin çoğunda yapılandırılabilir mantık blokları, dijital sinyal işleme blokları, blok RAM’ler, giriş/çıkış blokları bulunmaktadır. Güncel üretim teknolojileri, günümüz FPGA’lerine çok daha gelişmiş özelliklerin entegre edilmesine imkân tanımaktadır. Bazı FPGA’ler 50 milyon üzerinde mantık kapısı içerebilmekte ve 500 MHz’in üzerinde çalışma frekanslarına ulaşabilmektedir. Aslında FPGA’lerin en büyük dezavantajlarından biri, mikro denetleyicilere göre daha yüksek güç tüketimine sahip olmalarıdır. Ancak birden fazla cihazın kullanılmasını gerektiren karmaşık uygulamalarda, FPGA’lerin güç tüketimi, aynı işlemi gerçekleştirmek için gereken mikro denetleyicilerin güç tüketimiyle karşılaştırılabilir düzeyde olmaktadır. Bu bölümde FPGA’leri donanım kaynakları, analog, kayan noktalı işleme bloğu, gömülü işlemci, bellek ve uygulamaya özgü bileşenler olmak üzere beş kategoride ele alınmaktadır.

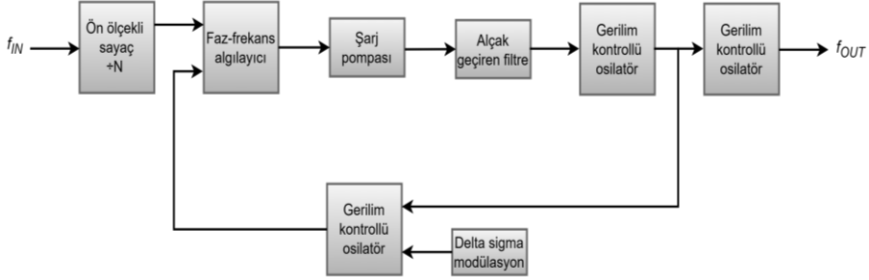
3.1. Analog Kaynaklar

Eskiden üretilen FPGA’lerde analog-sayısal dönüştürücü (ADC) ve sayısal-analog dönüştürücü (DAC) gibi analog kaynaklar bulunmamaktaydı. Ancak günümüzde üretilen FPGA’lerde çeşitli analog kaynaklar bulunmaktadır. Günümüz FPGA’lerinde bulunan analog kaynaklar bu bölümde açıklanmaktadır.

3.1.1. Kesirli faz kilitlemeli çevrimler (fPLLs)

Altera firmasının kesirli PLL’leri, kesirli frekans sentezinin gerçekleşmesine olanak tanımaktadır. Şekil 2’deki fPLL’in blok diyagramdan da görüldüğü üzere bu özellik delta sigma modülatörü kullanılarak gerçekleştirilir (Altera Corporation, 2015).

Şekil 2. Kesirli Faz Kilitlemeli Çevrimin Blok Diyagramı



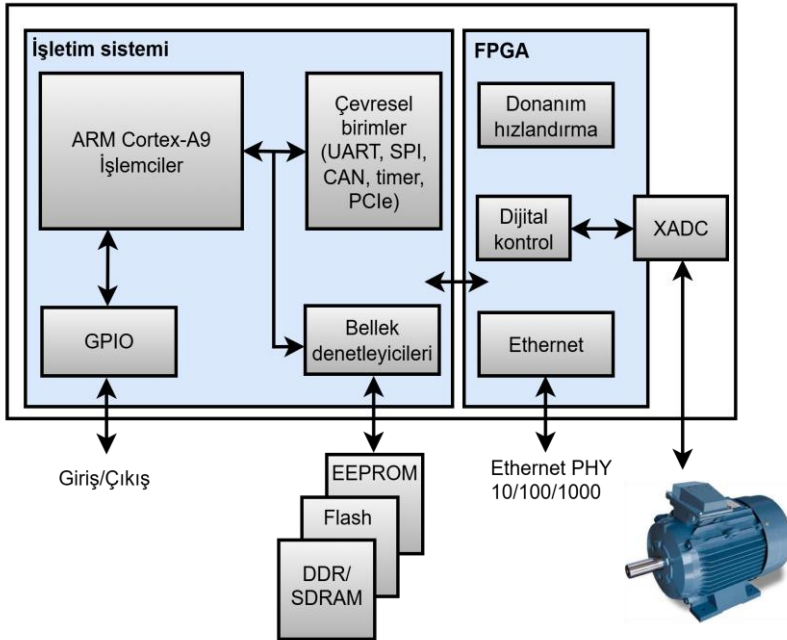
Delta sigma modülatörü ve buna bağlı olarak çalışan bölücüler sayesinde, PLL'in bölme katsayısı her bir saat çevriminde dinamik olarak değiştirilebilmektedir. Geleneksel PLL'lerde bölme katsayısı sabit bir tam sayıyken fPLL'de modülatör bölme değerini 10, 11, 10, 11... gibi ardışık çevrimlerde değiştirerek, 10.5 gibi kesirli bir ortalama bölme değeri oluşturur. Böylece PLL, normalde mümkün olmayan kesirli frekans üretimini gerçekleştirebilir. Delta sigma modülatörü harici sinyallerle kontrol edilebilecek esnek yapıdadır. Ayrıca delta sigma yapısının gürültü şekillendirme özelliği sayesinde, bölme işleminden kaynaklanan hata yüksek frekanslara taşınır ve çalışma bandında daha düşük jitter elde edilir. Bu yapı sayesinde, sayısal haberleşme sistemlerinde kullanılan referans osilatörlerin performansı iyileştirilebilmektedir.

3.1.2. Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC)

ADM 7 serisi analog karışık sinyal (AMS) teknolojisi, XADC bloğu üzerinden yüksek kaliteli analog-sayısal dönüştürme ve özelleştirilebilir sinyal şartlandırmaya sahiptir. XADC bloğu ise içerisinde iki adet 12 bit, 1 Msps hızında çalışan ADC bulundurmaktadır. Bu ADC'ler, yüksek örnekleme hızı sayesinde motor kontrolü, güç elektroniği, sensör arayüzleri ve gerçek zamanlı izleme gibi hızlı tepki gerektiren uygulamalarda güvenilir veri elde edilmesini sağlamaktadırlar. ADC'lerin girişinde yer alan iki adet örnekle ve tut yükselteci, analog sinyalin örnekleme anında kararlı

tutulmasına yardımcı olur. Diferansiyel örnekleme desteği, harici sensörlerin gürültülü ortamlarda daha doğru ölçülmesini sağlamaktadır. XADC'nin önemli bileşenlerinden biri de çoklayıcıdır. Bu çoklayıcı, harici analog girişler, dahili FPGA gerilim hatları, referans gerilimleri ve sıcaklık sensörü gibi toplam 17 farklı giriş kaynağına erişim olanağı sunmaktadır. XADC bloğu aynı zamanda içerisinde güç kaynağı ve sıcaklık sensörleri de bulundurmaktadır. XADC'nin sunduğu özellikler, motor kontrolü gibi hassas geri besleme gerektiren sistemlerde oldukça değerlidir. XADC bloğunun motor kontrol uygulamasına ait bir örnek Şekil 3'te verilmiştir (AMD, 2025).

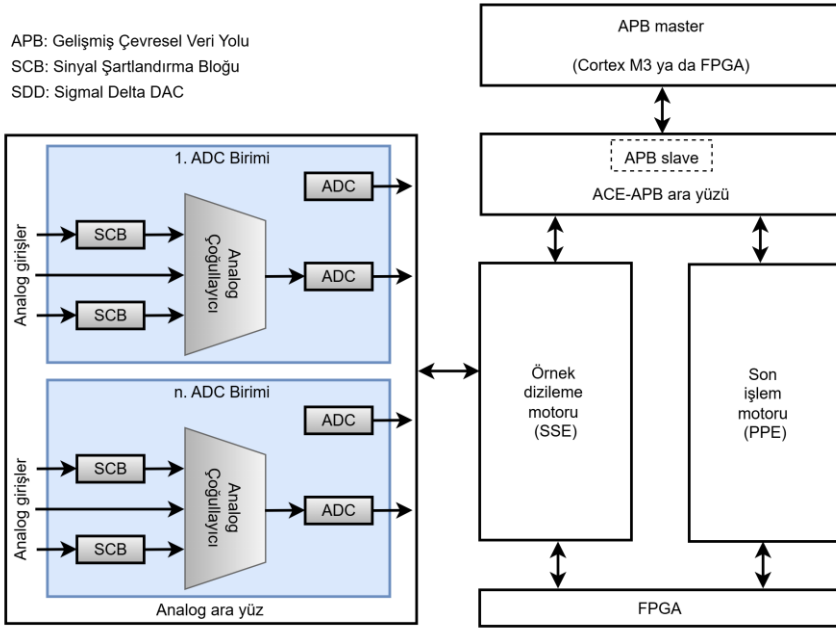
Şekil 3 XADC Bloğu ile Motor Kontrol Uygulaması Blok Diyagramı



3.1.3. Analog Hesaplama Motoru (ACE)

Microsemi SmartFusion FPGA'lerinde analog hesaplama motoru (ACE) adı verilen bir blok bulunmaktadır. Bu blok, örnekle ve tut birimleri ile birlikte çalışan üç adet 12 bit, 600 kpsps ADC'yi ve üç adet 24 bit DAC'ı kontrol edebilir. Şekil 4'ten gösterildiği gibi ACE, örnek dizileme motoru (SSE) ve son işlem motoru (PPE) olmak üzere iki fonksiyonel bloktan oluşmaktadır (Microschip, 2025).

Şekil 4 ACE Bloğu



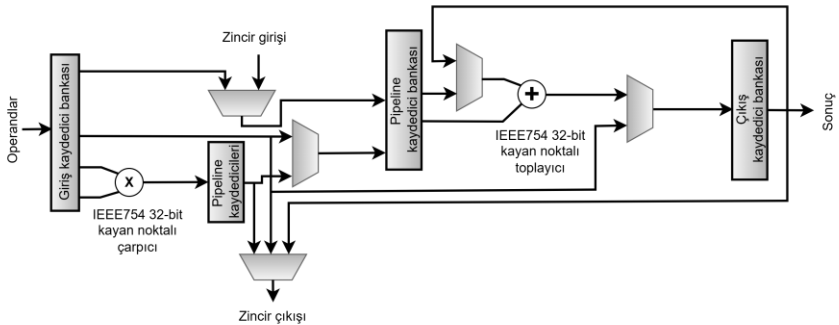
SSE, ADC çözünürlüğünün ve örnekleme periyodunun yapılandırılmasına ve harici bir başlatma sinyalinin kullanılmasını, PPE ise giriş sinyallerine çeşitli filtrelerin veya doğrusal dönüşümlerin uygulanmasını sağlamaktadır. Analog ara yüzde yer alan sinyal şartlandırma blokları (SCB) ve analog çoklayıcılar (MUX), ADC birimlerine iletilen sinyallerin hem elektriksel bütünlüğünü korur hem de farklı kaynaklardan gelen sinyallerin

seçilmesine yardımcı olur. ACE'nin gelişmiş çevresel veri yolu (APB) üzerinden hem Cortex-M3 işlemci çekirdeği hem de FPGA tarafından erişilebilir olması, analog veri işleme sürecinin hem yazılım hem donanım tabanlı olarak kontrol edilmesini sağlamaktadır.

3.2. Kayan Noktalı Sayı Aritmetiği

Geçmiş yıllarda üretilen FPGA'lerin kaynakları, kayan nokta işlemlerinin gerçekleştirilmesi için yeterli değildi. Bu yüzden birçok tasarım sabit nokta aritmetiği kullanmaktaydı. Kayan nokta aritmetiğinde kesir normalizasyonu işlemi çok fazla kaynak tüketmekte ve hızı düşürmektedir. Ayrıca sayıların üst değerleriyle işlem yapmak gerektiğinden işlem birimlerinin karmaşıklığı fazladır. Sabit noktalı sayı gösterimi bu konuda kayan noktalı sayı gösterimine göre üstündür. Ancak sabit noktalı sayıların ise doğruluğu ve dinamik sayı aralığı bazı uygulamalar için yetersiz kalmaktadır. Yüksek doğruluk istenen uygulamalarda kayan noktalı sayı gösterimine ihtiyaç duyulmaktadır (Özkılbaç, 2021). Günümüz FPGA'lerinde hem 32 hem de 64 bit IEEE754 kayan noktalı sayı gösterimini destekleyen DSP blokları bulunmaktadır. Örnek olarak Intel firmasına ait Arria 10 FPGA içerisinde bulunan DSP bloğu verilmiştir (Intel, 2022).

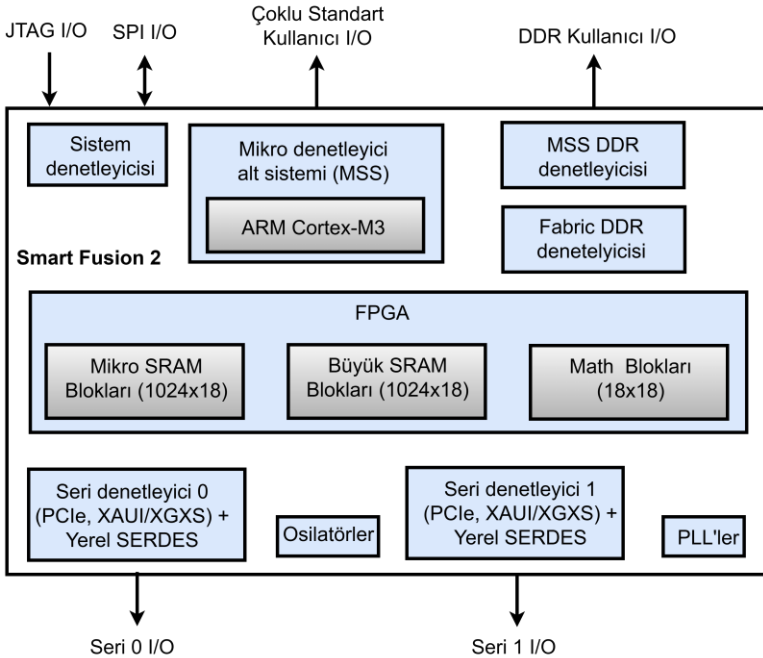
Şekil 5 Intel Arria 10 FPGA DSP Bloğu



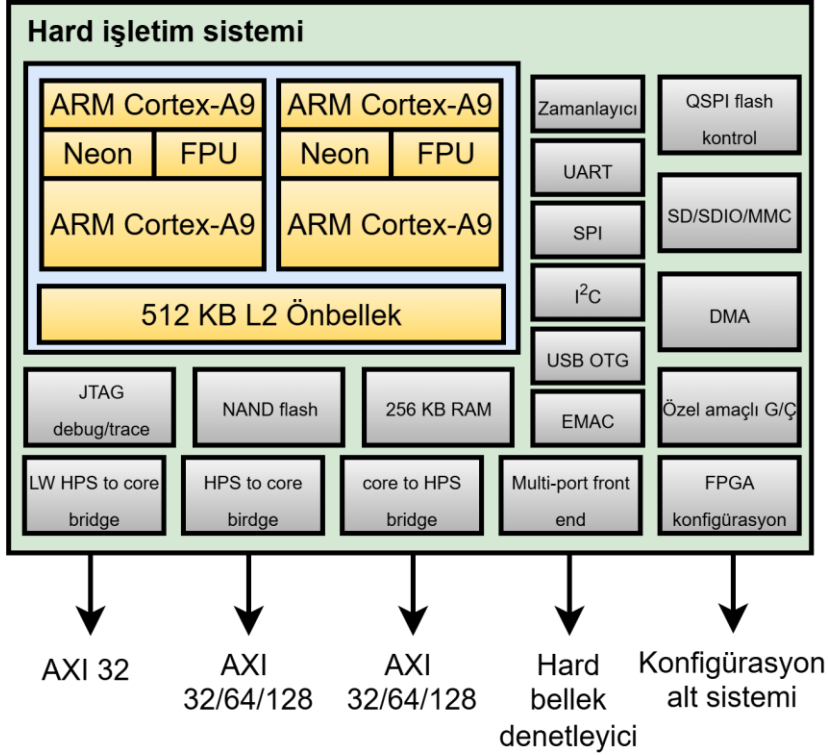
3.3. Gömülü İşlemciler

Son yıllarda FPGA tabanlı çip üzerinde sistem (SoC) teknolojisi büyük gelişme göstermiştir. Üretici firmalar ister soft işlemciler ister gömülü işlemciler olsun, işlemcilerin donanım çevre birimleri ve dağıtık mantıkla en verimli şekilde bağlanmasını sağlayan sahada programlanabilir çip üzerinde sistem (FPSoC) mimarileri geliştirmişlerdir. Intel, AMD ve Microchip farklı ARM işlemcilerinin donanım tabanlı uygulamalarını içeren FPSoC'lere sahiptir. Microchip SmartFusion cihazları Şekil 6'da gösterildiği üzere bir Cortex-M3 işlemcisi içerirken (Microchip, 2015), Intel'in Arria 10, Arria V, Cyclone V FPSoC'leri ve AMD'nin Zynq-7000 FPSoC'i çift çekirdekli Cortex-A9 işlemcileri içermektedir. Intel firmasının Arria 10 çipi Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 6 Microsemi Smart Fusion 2 SoC Çipi Mimarisi



Şekil 7 Intel Arria 10 SoC Çipi Mimarisi



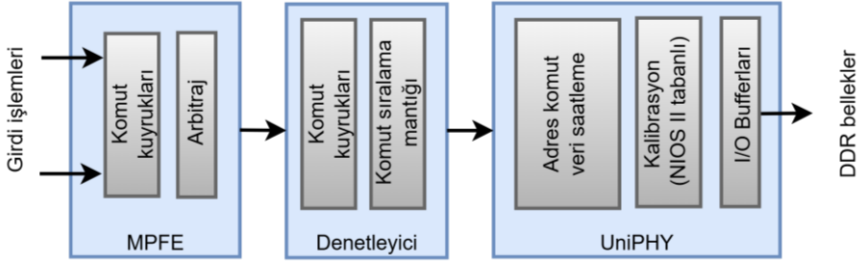
Çift çekirdekli işlemci mimarisi, gerçek zamanlı uygulamalar için tercih edilmektedir. Bu işlemcilerde işletim sistemi ve ana program çekirdeklerden birinde çalıştırılırken, diğer çekirdek zaman açısından kritik işlemler için görev yapmaktadır. FPSoC’lerde işlemci ile FPGA birbirinden bağımsız olarak beslenmektedir. Güç tüketiminin azaltılması istenildiğinde kullanılmayan kısım kapatılır.

3.4 Donanım Tabanlı Bellek Denetleyicileri

Intel’in Arria V ve Arria 10 FPGA’leri, harici DDR/DDR2/DDR3/DDR4 belleklerine erişimi kontrol etmek için özel olarak tasarlanmış donanım bileşenleri içermektedir. Örnek

olarak Şekil 8’de Arria 10 FPGA’in donanım tabanlı bellek denetleyicisi verilmiştir.

Şekil 8 Intel Arria 10 Donanım Tabanlı Bellek Denetleyicisi



AMD’nin Spartan-6 ve Virtex-6 aileleri de DDR3 bellekler ile erişim sağlayan donanım tabanlı bellek denetleyicilerine sahiptir. Bu denetleyiciler Ultrascale ailesinde DDR4 bellek desteğini sunacak şekilde geliştirilmiştir.

Microsemi firmasının cihazlarında ise mikro denetleyici alt sistemi (MSS) ve Fabric olmak üzere iki çeşit DDR/DDR2/DDR3 bellek erişimli donanım tabanlı bellek denetleyicisi bulunmaktadır. MSS denetleyicisi, belleğin ARM Cortex-M3 çekirdeğinden erişilebilmesini sağlarken, Fabric denetleyicisi ise belleğe FPGA içinde gerçekleştirilen mantık birimlerinden erişilmesine olanak tanımaktadır. Genel olarak donanım tabanlı bellek denetleyicileri, soft bellekler ile kıyaslandığında daha düşük gecikme ve daha yüksek erişim frekansına sahiptir.

3.5 Uygulamaya Özgü Cihazlar

Günümüzde bazı FPGA üretici firmalar geniş uygulama alanlarına hitap etmek yerine, belirli kullanım alanı için optimize edilmiş uygulamaya özgü yeniden yapılandırılabilir cihazlar geliştirmeye yönelmiştir. Bu tür firmaların cihazları endüstriyel sistemlerde yaygın olarak kullanılmasa da gelecekte nelerin olabileceğine dair fikirler vermektedir. Örneğin Tabula’nın geliştirdiği Spacetime mimarisi, FPGA’lerin GHz seviyelerinde

yeniden yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu da aynı donanım kaynaklarının tek bir saat çevriminde birden fazla görevde kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Böylece çok daha karmaşık sistemler, normalde ihtiyaç duyulacak donanım kaynaklarının çok daha azıyla inşa edilebilmektedir.

Spacetime mimarisinde tasarlanacak sistem, daha küçük alt bileşenlere ayrılır ve bu alt bileşenler ana saat çevriminin yalnızca belirli anlarında FPGA üzerinde fiziksel olarak yer almaktadır. Böylece daha kısa bağlantı yolları ve daha düşük gecikme süreleri sağlayarak nihayetinde daha yüksek çalışma frekansları elde edilir. Tabula'nın Stylus aracı ise bu karmaşık yapının tasarım sürecine yansımaları minimize eder. Yerleştirme ve zamanlama gibi zorlayıcı adımları arka planda otomatik olarak gerçekleştirir. Ancak gömülü donanım kaynaklarının henüz sınırlı olması, bu mimarinin kullanım alanlarını şimdilik yüksek hızlı iletişim sistemleriyle sınırlandırmaktadır.

Bu çalışmada modern FPGA teknolojisinin donanım bileşenleri, üretici firmalar tarafından sunulan mimari farklılıklar ve güncel tasarım eğilimleri kapsamlı biçimde ele alınmıştır. FPGA'lerin yalnızca yapılandırılabilir mantık blokları ile sınırlı olmayan, aksine analog alt sistemlerden gelişmiş DSP bloklarına, gömülü işlemci birimlerinden yüksek hızlı bellek denetleyicilerine kadar genişleyen çok yönlü bir hesaplama platformuna dönüştüğü açıkça gösterilmiştir. Özellikle AMD, Intel ve Microchip gibi üretici firmaların piyasaya sunduğu farklı FPGA modelleri, güç tüketimi, hız, alan verimliliği ve uygulama hedefi gibi tasarım parametrelerine göre optimize edilmiş seçenekler sunarak FPGA ekosisteminin çeşitliliğini artırmaktadır. Bu çeşitlilik, araştırmacılara ve mühendislere hem gömülü sistemler hem de yüksek performanslı hesaplama uygulamaları için daha geniş bir tasarım alanı sağlamaktadır.

Günümüz FPGA'lerinin en önemli avantajlarından biri, önceki nesillerde bulunmayan çok sayıda analog ve karma sinyal işleme bileşeninin artık standart olarak sunulmasıdır. XADC, ACE, fPLL gibi alt sistemler, FPGA'lerin yalnızca dijital birimlerle değil, gerçek dünya sinyalleriyle doğrudan işlem yapabilmesini sağlamaktadır. Böylece motor kontrolü, güç elektroniği, sensör tabanlı izleme, endüstriyel otomasyon ve gömülü ölçüm sistemleri gibi uygulamalarda FPGA'lerin kullanım alanını genişlemiştir. Ayrıca DSP bloklarında IEEE754 uyumlu kayan nokta işleme birimlerinin yer alması, bilimsel hesaplamalardan görüntü işleme algoritmalarına kadar birçok alanda FPGA tabanlı hızlandırıcıların doğruluk ve performans açısından optimum tasarımlar geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Son yıllarda FPGA mimarilerinde görülen bir diğer önemli özellik ise SoC tabanlı FPGA'lerin yaygınlaşmasıdır. Aynı çip üzerinde bir işlemci ve FPGA'in bir arada bulunması sayesinde hem yazılım hem donanım bileşenlerinin tek bir platformdan yönetilebilmektedir. Böylece zaman açısından kritik uygulamalarda düşük gecikme, daha yüksek bant genişliği ve daha iyi enerji verimliliği elde edilmektedir. Aynı zamanda donanım tabanlı DDR denetleyicilerinin gelişimi, yüksek performanslı veri akışı gerektiren uygulamalarda FPGA'leri daha verimli kullanılabilmektedir.

Modern FPGA'ler yalnızca programlanabilir bir mantık matrisi sunmaktan çok daha fazlasını ifade eden karmaşık, yüksek performanslı, düşük gecikmeli ve uygulama odaklı yeniden yapılandırılabilir sistemler hâline gelmiştir. Analog alt sistemlerden DSP bloklarına, gömülü işlemcilerden bellek denetleyicilerine kadar genişleyen bu ekosistem, FPGA'leri hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanılan bir teknoloji hâline getirmektedir. Gelecek yıllarda, daha fazla analog entegrasyon, yapay zekâ hızlandırıcılarının FPGA'ye gömülmesi ve adaptif hesaplama platformlarının yaygınlaşması ile FPGA'lerin çok

daha kritik roller üstleneceği ön gör÷lmektedir. Bu yüzden FPGA teknolojisinin sunduğu donanımsal çeşitlilik ve esneklik, modern elektronik tasarımın en güçlü yapı taşlarından biri olmaya devam edecektir.

Kaynakça

Abideen, Z. U., & Pagliarini, S. (2025). Emergence of Reconfigurable Logic. In Reconfigurable Obfuscation Techniques for the IC Supply Chain: Using FPGA-Like Schemes for Protection of Intellectual Property (pp. 25-41). Cham: Springer Nature Switzerland.

Achronix. (2025). FPGA and embedded FPGA (eFPGA) products. Achronix Semiconductor.
<https://www.achronix.com/products>.

Altera Corporation. (2015). Arria 10 Core Fabric and General Purpose I/Os Handbook. https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/hb/arria-10/a10_handbook.pdf.

Amagasaki, M., & Shibata, Y. (2018). FPGA structure. In Principles and Structures of FPGAs (pp. 47-86). Singapore: Springer Singapore.

AMD. (2025). Industrial solutions.
<https://www.amd.com/en/solutions/industrial.html>.

AMD. (2025). Adaptive SoC and FPGA portfolio.
<https://www.amd.com/en/products/adaptive-socs-and-fpgas>.

Boutros, A., & Betz, V. (2024). Field-programmable gate array architecture. In Handbook of computer architecture (pp. 417-463). Singapore: Springer Nature Singapore.

Chattopadhyay, S. (2025). Microcontrollers and Applications. KHANNA PUBLISHING HOUSE.

Chéour, R., Khriji, S., El Houssaini, D., Baklouti, M., Abid, M., & Kanoun, O. (2019). Recent trends of FPGA used for low-power wireless sensor network. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 34(10), 28-38.

Gowin Semiconductor. (2025). FPGA product families. Gowin Semiconductor. <https://www.gowinsemi.com/en/product/>.

Howard, N. J., Tyrrell, A. M., & Allinson, N. M. (2002). The yield enhancement of field-programmable gate arrays. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2(1), 115-123.

Idris, M. R., Irdayanti, M. N., & Ramlee, M. (2023). A review of microcontroller design in future industrial revolution. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2750, No. 1, p. 050031). AIP Publishing LLC.

Intel. (2022). Intel® Arria® 10 Device Datasheet https://cdrdv2-public.intel.com/666844/a10_datasheet-683771-666844.pdf.

Intel. (2025). Arria 10 SoC HPS. <https://www.altera.com/products/soc/portfolio/arria10-soc/arria10-soc-hps.html>.

Intel. (2025). FPGA and programmable devices: Product portfolio. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga.html>

Kravchenko, Y., Bondarenko, V., Tyshchenko, M., Herasymenko, K., Trush, O., & Starkova, O. (2020, October). An expert system for testing of microcontroller systems designers. In *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 791-796). IEEE.

Lattice Semiconductor. (2025). Products overview. Lattice Semiconductor. <https://www.latticesemi.com/Products>.

López, A., Pérez, D., DasMahapatra, P., & Capmany, J. (2020). Auto-routing algorithm for field-programmable photonic gate arrays. *Optics Express*, 28(1), 737-752.

Microchip Corporation. (2015). SmartFusion2 System-on-Chip FPGAs Product Brief. <http://www.microsemi.com/products/fpga-soc/soc-fpga/sf2docs#ds>.

Microchip Technology. (2025). Microsemi products. Microchip. <https://www.microchip.com/en-us/about/corporate-overview/acquisitions/microsemi#ds>.

Microchip. (2025). FPGA & SoC FPGA product families. Microchip Technology. <https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds>

Mohan, P. (2022). Soft Embedded FPGA Fabrics: Top-down Physical Design & Applications (Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University).

Murgai, R., Brayton, R. K., & Sangiovanni-Vincentelli, A. (1995). Logic synthesis for field-programmable gate arrays. Springer Science & Business Media.

Negi, A., Raj, S., Thapa, S., & Indu, S. (2021). Field programmable gate array (FPGA) based IoT for smart city applications. In *Data-Driven Mining, Learning and Analytics for Secured Smart Cities: Trends and Advances* (pp. 135-158). Cham: Springer International Publishing.

QuickLogic. (2025). Products. QuickLogic Corporation. <https://www.quicklogic.com/products/>.

Özkılbaç, B., & Karacalı, T. (2021). Implementation and Design of 32 Bit Floating-Point ALU on a Hybrid FPGA-ARM Platform. *Journal of Brilliant Engineering*, 2, 26-28.

Rafiquzzaman, M. (2025). *Microcontroller Theory and Applications with the PIC18F*. John Wiley & Sons.

Rodríguez, J. J., Valdes, M. D., & Moure, M. J. (2015). Advanced features and industrial applications of FPGAs—A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(4), 853-864.

Rose, J., El Gamal, A., & Sangiovanni-Vincentelli, A. (2002). Architecture of field-programmable gate arrays. *Proceedings of the IEEE*, 81(7), 1013-1029.

Saday, A. (2022). A review of FPGA-based applications and FPGA usage in the industrial area. *Innovations and Technologies in Engineering*, 171.

Sadraey, M. H. (2022). Microcontroller. In *Unmanned Aircraft Design: A Review of Fundamentals* (pp. 123-137). Cham: Springer International Publishing.

Seng, K. P., Lee, P. J., & Ang, L. M. (2021). Embedded intelligence on FPGA: Survey, applications and challenges. *Electronics*, 10(8), 895.

Taraate, V. (2021). FPGA architecture and design flow. In *Digital Logic Design Using Verilog: Coding and RTL Synthesis* (pp. 367-383). Singapore: Springer Singapore.

Trimberger, S. M. (Ed.). (2012). *Field-programmable gate array technology*. Springer Science & Business Media.

BÖLÜM 6

PYTHON PROGRAMLAMA DİLİ VE KAREKOD TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK ENVANTER KONTROL PROGRAMI GELİŞTİRİLMESİ

1. BEKİR SAMİ TEZEKİCİ¹
2. MUSTAFA ONUR TÜFEKCİ²

Giriş

Endüstri 4.0 ve Web 4.0'ın getirdiği dijital dönüşüm, işletmelerin bilgi ve iletişim teknolojileri altyapılarını yeniden şekillendirmiştir. Bu dönüşüm, özellikle envanter yönetimi ve kontrolü süreçlerinde otomasyonun ve yenilikçi teknolojilerin kullanımını zorunlu kılmıştır. Modern envanter kontrol sistemlerinde, Python programlama dili ve karekod (QR kod) teknolojisi gibi araçların entegrasyonu, süreçlerin hızlandırılması, doğruluğun artırılması ve insan hatasının azaltılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, Python programlama dili ve karekod teknolojisi kullanılarak envanter kontrol programı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-0941-1829

² Arş. Gör., Bursa Teknik Üniversitesi, Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi, Orcid: 0009-0009-0757-7826

geliştirilmesinin gerekliliği, avantajları ve mevcut literatürdeki uygulama örnekleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

Günümüzde envanter yönetimi, tedarik zinciri süreçlerinin en önemli bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle üretim ve dağıtım süreçlerinde, stok seviyelerinin doğru bir şekilde izlenmesi, malzeme akışının optimize edilmesi ve müşteri taleplerine hızlı yanıt verilmesi gerekmektedir. Manuel envanter takibi hem zaman alıcı hem de hata yapmaya açık bir süreçtir. Bu nedenle, otomasyon tabanlı çözümler, işletmelerin rekabet gücünü artırmak ve operasyonel verimliliği sağlamak için vazgeçilmez hale gelmiştir.

Yakın zamana kadar envanterlerdeki takip süreçleri manuel olarak kâğıt kullanımına dayalı kayıt işlemleri ile işletilmekteydi. Bernard Silver isimli araştırmacı barkod teknolojisini 1948 yılında hayata geçirmiştir (Sri Krishna Kumar & ark., 2015). Envanter yönetiminde yapılan hatalar, stok fazlalığı veya eksikliği gibi sorunlara yol açarak şirketlerin operasyonel maliyetlerini artırmaktadır. Dijitalleşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte, otomasyon çözümleri envanter yönetiminde daha etkin bir kullanım alanı bulmuştur. Bu bağlamda, karekod teknolojisi, ürünlerin hızlı ve doğru bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak hata oranlarını minimize etmekte ve süreçleri hızlandırmaktadır.

Karekod teknolojisi, iki boyutlu veri depolama yapısı sayesinde geniş bir bilgi kapasitesine sahiptir ve yüksek hızlı veri okuma yeteneği ile işletmelere önemli avantajlar sunmaktadır. Günümüzde, birçok sektör envanter takibini daha etkin hale getirmek için bu teknolojiden yararlanmaktadır. Özellikle büyük ölçekli üretim tesisleri, depolama alanları ve perakende sektöründe karekodlar, ürünleri hızlı bir şekilde takip etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultuda literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Rusya'da Eğitim-Öğretim faaliyetlerini yürüten Volgograd Üniversitesinde eğitim sistemine yenilik kazandırıp,

iyileştirmek amacıyla karekod teknolojisinden faydalanılan bir uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulama, Volgograd Üniversitesinde öğrenimine devam eden öğrencilerin etkileşimli öğrenme kullanarak artırılmış gerçeklik teknolojisi destekli oyunlara erişim imkanının sağlanmasında kullanılmıştır. Literatürde yer alan bir başka çalışma akıllı fabrikalarda kullanılan teknik ekipmanların (matkap, multimetre ve tornavida seti) personeller tarafından teslim alınıp teslim yerine geri bırakılması sırasında Android tabanlı mobil uygulamada ekipmanlar üzerindeki QR kod etiketlerinin taratılarak veri tabanına hangi ekipmanı hangi kullanıcının teslim aldığını kaydettiği envanter takibi sistemidir (Gurkan & Palandoken, 2021).

Karekod teknolojisi ise, envanter yönetiminde veri toplama ve izleme süreçlerini hızlandıran, hata oranını azaltan ve süreçleri merkezi olmayan bir yapıya taşıyan yenilikçi bir araçtır. Karekodlar, ürünlerin veya stokların hızlı bir şekilde tanımlanmasını ve izlenmesini sağlar. Özellikle büyük ölçekli depo ve üretim alanlarında, karekodların kullanımı sayesinde stok giriş-çıkış işlemleri kolaylaşmakta, envanterdeki hareketlerin anlık olarak takip edilmesi mümkün olmaktadır. Karekod tabanlı sistemlerin, envanter yönetiminde manuel veri girişine kıyasla daha hızlı ve hatasız sonuçlar verdiği, yapılan uygulama örneklerinde açıkça ortaya konmuştur (Kar & ark., 2022). Bu sistemlerde, kullanıcılar mobil uygulamalar aracılığıyla karekodları okutarak stok hareketlerini kaydedebilmekte ve tüm işlemler merkezi bir veritabanında saklanmaktadır. Böylece, envanterdeki değişiklikler anlık olarak izlenebilmekte ve raporlanabilmektedir.

Bu Konuda Yapılan alışmalar

Literatürde, Python ve karekod teknolojisinin bir arada kullanıldığı çeşitli uygulama örnekleri bulunmaktadır. Örneğin, havalimanı envanter yönetiminde, her ekipmana ait karekodun mobil uygulama ile okutulması ve bakım kayıtlarının anında

güncellenmesi sağlanmıştır (Sinha & Sonawane, 2021). Akıllı fabrikalarda ise, Android tabanlı mobil uygulamalar ve veri tabanı kullanılarak envanterin uçtan uca izlenmesi ve yönetilmesi gerçekleştirilmiştir (Gurkan & Palandoken, 2021). Bu uygulamalarda, Python'ın veri işleme ve otomasyon yetenekleri, karekod teknolojisinin hızlı ve hatasız veri aktarımı ile birleştirilmiştir.

Akyüz ve Karabulut'un otomotiv sektöründe gerçekleştirdiği karşılaştırmalı çalışmada, Python programı ile dijitalleştirilen süreçlerin, tekrarlayan ve katma değeri olmayan işlerin ortadan kaldırılmasında etkili olduğu ve verimliliği artırdığı gösterilmiştir (Akyüz & Karabulut, 2024).

Sağlık sektöründe, envanter yönetiminin dijitalleşmesi ve otomasyonu, ürünlerin zamanında ve doğru şekilde teslim edilmesini sağlamaktadır. Engy Rashed ve Mostafa Eissa'nın çalışmasında, sağlık sektöründe kullanılan hammaddelerin envanter yönetimi için istatistiksel süreç kontrolü (SPC) analizleri kullanılmıştır. Python ile geliştirilen otomasyon ağı, SPC yazılımı ile entegre edilerek, malzeme risk ağırlığı (MRW) gibi özgün indeksler oluşturulmuş ve hammaddelerin önceliklendirilmesi sağlanmıştır. Çalışmada, Python'un veri analizi ve otomasyon yetenekleri sayesinde, envanterdeki değişimlerin objektif olarak ölçülebildiği ve karar verme süreçlerinin iyileştirildiği belirtilmiştir. Bu yaklaşım, Python'un istatistiksel analiz ve otomasyon kabiliyetlerinin, envanter yönetiminde dijitalleşmeye katkı sağladığını göstermektedir (Rashed & Eissa, 2020). Burada, Python'un veri analizi ve otomasyon avantajları ile envanter yönetiminde karar destek süreçlerinin güçlendirildiği vurgulanmıştır.

Ayrıca, Python ve karekod teknolojisinin eğitim, güvenlik ve personel takibi gibi farklı alanlarda da kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, QR kod tabanlı yoklama sistemlerinde, öğrenci bilgilerinin Python ile işlenmesi ve yoklama kayıtlarının otomatik olarak

oluşturulması sağlanmıştır (Jadhav & ark., 2023). İnşaat sektöründe ise, çalışanların ve ekipmanların takibi için QR kod teknolojisi kullanılarak, güvenlik ve mevzuata uygunluk sağlanmıştır (Rusli & ark., 2024).

Envanter Yönetimi Sürecinde Karekod Kullanımı

QR kod teknolojisinin envanter yönetiminde sağladığı avantajlar, sadece hız ve doğrulukla sınırlı değildir. Aynı zamanda, tedarik zinciri boyunca ürünlerin izlenebilirliğini ve şeffaflığını artırmaktadır. QR kod sistemleri, envanter hareketlerinin merkezi olmayan, güvenli ve değiştirilemez bir şekilde kaydedilmesini sağlamaktadır. Bu tür sistemlerde, tedarik zincirinin tüm paydaşları, ürünlerin hareketlerini ve kökenini şeffaf bir şekilde izleyebilmektedir. Envanter yönetimi uygulamalarında, QR kodlar aracılığıyla ürünlerin tüm hareketleri kayıt altına alınmakta ve bu kayıtlar saklanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle ürünlerin kökeninin ve hareketlerinin doğrulanması gereken sektörlerde büyük bir güven sağlamaktadır (Lakshmi & ark., 2021).

Mobil tabanlı envanter yönetim sistemleri, QR kod teknolojisinin pratikteki uygulamalarına iyi bir örnek teşkil etmektedir. Örneğin, oklu organizasyonlarda güvenli ve kullanıcı dostu bir envanter yönetimi sağlamak amacıyla geliştirilen mobil uygulamalarda, kullanıcılar iki aşamalı kimlik doğrulama ile sisteme giriş yapmakta ve QR kodlar aracılığıyla stok hareketlerini kaydetmektedir. Bu tür sistemler, çalışanların tüm faaliyetlerinin kaydını tutmakta ve hata oranını minimuma indirmektedir (Kar & ark., 2022). Ayrıca, Android tabanlı mobil uygulamalar ve bulut tabanlı veritabanı çözümleri (örneğin Firebase) ile entegre edilen QR kod sistemleri, akıllı fabrikalarda envanter takibini kolaylaştırmakta ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Bu uygulamalarda, QR kodlar aracılığıyla ürünlerin veya hammaddelerin hareketleri anlık olarak kaydedilmekte ve tüm veriler merkezi bir bulut veritabanında

saklanmaktadır. Böylece, envanterdeki değişiklikler anında izlenebilmekte ve raporlanabilmektedir (Gurkan & Palandoken, 2021).

Envanter yönetiminde otomasyonun sağladığı bir diğer önemli avantaj, insan kaynaklı hataların ve veri tutarsızlıklarının önüne geçilmesidir. Özellikle büyük ölçekli depo ve üretim tesislerinde, manuel veri girişleri sırasında yapılan hatalar, stok seviyelerinin yanlış izlenmesine ve operasyonel aksaklıklara yol açabilmektedir. QR kod tabanlı otomasyon sistemleri, bu tür hataları minimize etmekte ve süreçlerin daha güvenilir bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, QR kodların kullanımı sayesinde, envanterdeki ürünlerin veya hammaddelerin geçmiş hareketleri kolaylıkla izlenebilmekte ve geriye dönük analizler yapılabilmektedir (Jadhav & ark., 2023). Bu durum, özellikle denetim ve raporlama süreçlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır.

Envanter Yönetiminin Dijital Hale Getirilmesi

Envanter yönetimi süreçlerinde Python programlama dilinin kullanımı, sistemlerin esnekliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmaktadır. Python'un zengin kütüphane ekosistemi sayesinde, QR kod oluşturma, okuma ve veri tabanı işlemleri gibi temel işlevler kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Örneğin, Python'un OpenCV ve benzeri kütüphaneleri kullanılarak, QR kodların otomatik olarak algılanması ve işlenmesi mümkündür. Bu tür uygulamalar, özellikle depo otomasyonu ve envanter takibi süreçlerinde insan müdahalesini minimuma indirmekte ve süreçlerin hızını artırmaktadır (Lakshmi & ark., 2021). Ayrıca, Python'un veri işleme ve analiz yetenekleri sayesinde, envanter hareketleri üzerinde çeşitli analizler yapılabilmekte ve stok optimizasyonu sağlanabilmektedir.

Günümüzde, endüstriyel otomasyon ve nesnelerin interneti teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, envanter yönetimi süreçlerinde gerçek zamanlı veri toplama ve izleme imkanları artmıştır. Özellikle endüstriyel nesnelerin interneti tabanlı sistemlerde, envanterdeki ürünlerin hareketleri sensörler ve otomasyon sistemleri aracılığıyla anlık olarak izlenebilmekte ve bu veriler Python tabanlı yazılımlar aracılığıyla analiz edilebilmektedir. Bu tür sistemlerde, envanterdeki durum ve stok seviyeleri görsel olarak izlenebilmekte, otomatik sipariş tetikleme ve üretim hızı kontrolü gibi işlevler gerçekleştirilebilmektedir (Raffik & ark., 2021). Python'un bu tür otomasyon sistemlerinde entegrasyonu, veri toplama, analiz ve raporlama süreçlerinin bütünsel bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır.

Envanter yönetiminde QR kod teknolojisinin bir diğer önemli uygulama alanı, çalışanların ve ekipmanların izlenmesi ve güvenlik süreçlerinin yönetilmesidir. Özellikle inşaat sektöründe, çalışanların kişisel koruyucu ekipmanlarının (örneğin baretlerin) takibi ve çalışan bilgilerinin doğrulanması amacıyla QR kod tabanlı izleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde, çalışanların ve ekipmanların bilgileri QR kodlar aracılığıyla kaydedilmekte ve merkezi bir veritabanında saklanmaktadır. Böylece, iş güvenliği ve yasal gerekliliklerin takibi kolaylaşmakta, çalışanların ve ekipmanların güncel durumu anlık olarak izlenebilmektedir (Rusli, Aziz & Nawi, 2024). Bu tür uygulamalar, envanter yönetimi süreçlerinin sadece ürün ve malzeme takibiyle sınırlı olmadığını, aynı zamanda insan ve ekipman yönetimini de kapsadığını göstermektedir.

Envanter yönetimi süreçlerinde Python ve QR kod teknolojisinin entegrasyonu, sadece operasyonel verimlilik ve doğruluk açısından değil, aynı zamanda süreçlerin şeffaflığı ve

izlenebilirliği açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle tedarik zinciri boyunca ürünlerin hareketlerinin izlenmesi, tedarikçi performansının değerlendirilmesi ve süreçler arası koordinasyonun sağlanması açısından QR kod tabanlı sistemler kritik bir rol oynamaktadır. Barkod ve QR kod teknolojisinin ERP (Kurumsal Kaynak Planlama) sistemlerine entegrasyonu, üretim süreçlerinin daha şeffaf ve izlenebilir hale gelmesini sağlamakta ve bununla beraber hata oranlarındaki artışı azaltmayı hedeflemiş ve farklı süreçler arası koordinasyonu iyileştirmiştir (ztrk & Koyuncu, 2024). Yapılan bu tür uygulamalar, envanter yönetimi ve tedarik zinciri süreçlerinde dijital dönüşümün somut bir göstergesi olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, Python programlama dili ve karekod teknolojisinin envanter kontrol programlarında kullanımı, işletmelerin dijitalleşme sürecinde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Python'un otomasyon, veri işleme ve entegrasyon yetenekleri ile QR kod teknolojisinin hızlı, güvenilir ve şeffaf veri toplama imkânı sunması, envanter yönetimi süreçlerinde yeni bir standart oluşturmaktadır. Literatürdeki uygulama örnekleri, bu teknolojilerin birlikte kullanılmasıyla elde edilen operasyonel avantajları ve süreç iyileştirmelerini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Python ve QR kod teknolojisinin entegrasyonu, geleceğin akıllı envanter yönetimi sistemlerinin temelini oluşturmaktadır.

Sistem Tasarımı

Envanter kontrol programı geliştirilirken, sistemin temel bileşenleri olarak Python tabanlı yazılım altyapısı, karekod üretimi ve okuma modülleri, merkezi veya dağıtık veri tabanı yapısı ve kullanıcı arayüzü belirlenmiştir. Python programlama dili, açık kaynaklı olması, geniş kütüphane desteği ve hızlı prototipleme imkânı sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Python'ın özellikle veri

işleme, otomasyon ve görsel arayüz geliştirme konularında sağladığı avantajlar, envanter yönetimi uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Wu & ark., 2022). Python’ın nesne yönelimli yapısı ve açık, tutarlı sözdizimi, kodun anlaşılabilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Wu & ark., 2022). Ayrıca, Python’ın Jupyter Notebook ve script programları aracılığıyla etkileşimli ve görsel analizler yapılabilmesi, sistemin kullanıcı dostu olmasına katkı sağlamaktadır (Guo & ark., 2025).

Karekod teknolojisi ise, envanterdeki her bir ürünün benzersiz şekilde tanımlanmasını ve hızlı bir şekilde izlenmesini sağlayan bir araç olarak sistemin merkezinde yer almaktadır. Karekodlar, ürün bilgilerini makine tarafından okunabilir bir biçimde saklayarak, envanter hareketlerinin otomatik ve hatasız bir şekilde kaydedilmesini sağlar (Sinha & Sonawane, 2021). Karekodun mobil uygulamalarla entegrasyonu, sahada yapılan işlemlerin anlık olarak sisteme aktarılmasına olanak tanır (Gurkan & Palandoken, 2021). Böylece, envanterdeki ürünlerin giriş-çıkış işlemleri, bakım ve servis kayıtları gibi bilgiler gerçek zamanlı olarak güncellenebilir (Sinha & Sonawane, 2021).

Karekod Üretimi

Karekod teknolojisi, geleneksel barkod sistemlerine kıyasla daha fazla veri depolama kapasitesine sahip olup, hızlı ve doğru veri aktarımı sağlar. Karekodlar, siyah ve beyaz modüllerden oluşan iki boyutlu barkod türleridir. Üniversitelerde derse giren öğrencilerin derslere katılım takibi yapılırken bu takip işleminin daha kısa sürede yapılması hedefleyen ve bunun için karekod teknolojisini kullanan bir sistemin geliştirilmesi Hendry ve ark. tarafından yapılmıştır (Hendry & Rahman, 2017). Karekod, bilginin hızlı ve kolay iletildiği bir uygulamadır. Türkçeye karekod olarak çevrilen bu uygulama Türk Dil Kurumu tarafından “Bilişim, yayıncılık, eğitim vb. alanlarda verilerin gizlendiği kare veya dikdörtgen biçiminde simge”

olarak tanımlanmaktadır. Genellikle ürün kimliklendirme, envanter yönetimi ve lojistik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Karekodlar, 360° açı ile okunabilme özelliği ile, 7089 sayısal veri, 4296 alfa numerik veri şifreleyebilirler (Liao & Lee, 2010). Dört çeşit veriyi şifreleyip depolayabilmek karekodlarda mümkündür. Bunlar 7089 numerik karakter, 4296 alfanumerik karakter, 2953 byte/ikili karakter ve 1817 kanji karakter verileridir (Kouninef, Merad & Djelti, 2015). Geleneksel barkod sistemlerinden farklı olarak, karekodlar daha fazla bilgi saklama kapasitesine sahiptir ve hata toleransı yüksektir. Bu özellikleri sayesinde, envanter yönetimi süreçlerinde daha güvenilir veri kayıtları tutulabilmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen programda kullanılacak karekodların oluşturulmasında çevrimiçi ve çevrimiçi olmayan birçok karekod oluşturucu alternatifi bulunmaktadır. Karekod kullanımının en önemli avantajı basit bir teknolojiye sahip olmasından kaynaklanan kullanım kolaylığıdır. Karekodlar dijital ortamda çok kolay bir şekilde oluşturulmakta, kâğıt veya plastik etiketler gibi herhangi bir yüzeye yazdırılmakta ve yazıcı dışında özellikli ekipman gerektirmemektedir (Uzun, 2016). Bu çalışmada karekod oluşturulurken Excel uygulamasına eklenti olarak kurulabilen QR4Office uygulaması kullanılmıştır. QR4Office uygulaması ile oluşturulan örnek karekod görseli Şekil 1’de gösterilmiştir. Karekod içerisine işlenen bilgi örnek olması açısından Huawei markasına ait ATR4517R1 seri numaralı antene ait olan HUAWEI/Anten/ATR4517R1 metnidir.

Şekil 1. Envanter takibi yapılacak ekipmana ait örnek olarak oluşturulan Marka/Model/Seri Numara bilgilerini içeren karekod görseli (HUAWEI/Anten/ATR4517R1)



Karekod Okunması

Python, karekod teknolojisinin uygulanmasını kolaylaştıran güçlü kütüphanelere sahiptir. OpenCV, görüntü işleme ve analiz süreçlerinde sıkça kullanılan bir araç olup, karekod taraması yapabilmek için çeşitli işlevler sunar. Pyzbar kütüphanesi ise, karekodların hızlı bir şekilde okunmasını ve içeriğinin çıkarılmasını sağlayarak Python tabanlı envanter yönetim sistemlerinde kritik bir rol oynar. Karekodlar, geometrik yüzeye sayısal, sözel veya görsel verileri belirli algoritmalar kullanarak şifreleyebilir ve karekodların okutulup çözümlendiği araçlarda bu veriler gösterilebilir (Youan, Chao & Chunling, 2011). İçerisinde bilgi şifrelenmiş olan karekod geometrik görselinin %30'u bile zarar görse çözümleme süreci bu durumdan etkilenmez (Lezhebokov, Kravchenko & Bova, 2014). Pandas kütüphanesi ile veriler düzenlenebilir, filtrelenebilir ve analiz edilebilir. Bunun yanı sıra, OpenPyXL gibi kütüphanelerle tarama sonucu elde edilen veriler Excel formatına aktarılabilir.

Bir karekod tarama uygulaması geliştirmek için temel adımlar şunlardır:

1. Görüntü dosyasının okunması ve işlenmesi (OpenCV kullanılarak)
2. Pyzbar kütüphanesi ile karekodların algılanması ve çözülmesi
3. Tarama sonucu elde edilen verilerin analiz edilmesi ve depolanması (Pandas kütüphanesi kullanılarak)
4. OpenPyXL ile elde edilen verilerin Excel veya CSV formatına aktarılması
5. Mevcut envanter listesi ile karşılaştırma yapılarak eksik veya fazla ürünlerin tespit edilmesi.

Bu süreçler sayesinde, manuel veri girişi gereksinimi ortadan kaldırılarak envanter yönetiminin doğruluğu artırılmaktadır.

Python'un sunduğu veri işleme kütüphaneleri ile karekod verileri kolayca analiz edilebilir ve saklanabilir. Bu sistem, işletmelerin envanter takibini daha hızlı ve güvenilir hale getirmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, bu süreçte hata oranlarını azaltarak şirketlerin maliyetlerini düşürmesine katkı sağlamaktadır.

Karekodun okunması için, Python'ın “opencv” ve “pyzbar” gibi kütüphaneleri kullanılarak kamera veya mobil cihaz üzerinden hızlı ve güvenilir bir okuma işlemi gerçekleştirilir (Lakshmi & ark., 2021). OpenCV, görüntü işleme konusunda sunduğu esneklik sayesinde, farklı açılardan veya düşük ışık koşullarında bile karekodun doğru şekilde okunmasını sağlar (Lakshmi & ark., 2021).

Karekodun farklı açılardan veya zorlu ortamlarda okunabilmesi için gelişmiş görüntü işleme teknikleri kullanılabilir. Python'ın OpenCV kütüphanesi, perspektif bozulmalarını düzelterek karekodun doğru şekilde algılanmasını sağlar (Yoon & ark., 2021). Özellikle, drone gibi mobil platformlarda karekodun uzaktan ve farklı açılardan okunması gerektiğinde, görüntü işleme algoritmaları ile karekodun bölgesi tespit edilir, şekil düzeltme yapılır ve ardından karekod çözülerek ürün veya konum bilgisi elde edilir (Yoon & ark., 2021). Bu yöntem, büyük depolarda veya açık alanlarda envanterin otomatik olarak izlenmesini mümkün kılar.

Karekodun okutulmasıyla birlikte, Python uygulaması ilgili ürüne ait bilgileri veri tabanından çekerek kullanıcıya sunar. Ayrıca, kullanıcı yeni bir işlem (ör. bakım, transfer) gerçekleştirdiğinde, bu bilgi anında veri tabanına kaydedilir ve ürünün geçmişine eklenir (Sinha & Sonawane, 2021). Bu yapı, envanterdeki her bir ürünün yaşam döngüsünün eksiksiz bir şekilde izlenmesini sağlar.

Programın Geliştirilmesi

Yazılım geliştirme sürecinde Python programlama dilinin tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında açık kaynaklı olması, geniş kütüphane desteği, hızlı prototipleme imkânı ve kolay

öğrenilebilirliği yer almaktadır. Python'un özellikle veri işleme, otomasyon ve görselleştirme alanlarında sağladığı avantajlar, envanter kontrol programının esnek ve ölçeklenebilir bir yapıda geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Python'un açık kaynaklı yapısı sayesinde, lisans maliyetlerinden tasarruf sağlanmakta ve yazılımın akademik ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılabilmesi mümkün olmaktadır (Ponnapalli & ark., 2021).

Bir envanter kontrol sisteminin etkin bir şekilde çalışması için doğru veri toplama, işleme ve analiz süreçleri büyük önem taşımaktadır. Python, bu süreçleri kolaylaştırmak için çeşitli kütüphaneler sunmaktadır. Envanter kontrol sürecinde Python'un kullanımı aşağıdaki temel bileşenlere dayanır:

- Veri Toplama: Karekod tarayıcı veya kamera kullanılarak karekodların okunması sağlanır. OpenCV ve Pyzbar kütüphaneleri ile karekodlar taranır ve içeriği elde edilir.
- Veri İşleme: Pandas kütüphanesi ile taranan veriler işlenerek düzenlenir ve gereksiz bilgiler filtrelenir.
- Veri Analizi ve Kontrolü: OpenPyXL ve Pandas kullanılarak envanter bilgileri Excel formatına kaydedilir.

Mevcut envanter verileriyle karşılaştırma yapılarak eksik veya fazla ürünler belirlenir. Bu sistem sayesinde, manuel envanter yönetimine kıyasla daha hızlı ve güvenilir bir süreç sağlanmaktadır. Python'un esnek yapısı sayesinde sistem, farklı sektörlerdeki ihtiyaçlara göre kolayca özelleştirilebilir.

Ayrıca, Tkinter kullanılarak kullanıcı dostu bir arayüz geliştirilebilir. Kullanıcılar, arayüz üzerinden karekod taramalarını başlatabilir, taranan verileri görüntüleyebilir ve rapor oluşturabilirler. Bu bilgiler ışığında Python ortamında uygulama

geliştirilmiş olup kod açıklamaları ve görseller ile geliştirilen uygulama adım adım aşağıda detaylandırılmıştır.

- Kullanılan Python Kütüphaneleri: Uygulamada Tkinter, PIL, Pyzbar, Pandas ve OpenCV kütüphaneleri kullanılmıştır.
- Uygulamada yapılan üç temel işlem olan “QR Kodları Tara”, “Rapor Oluştur”, “Envanter Kontrolü” işlemlerinin her biri için üç ayrı fonksiyon tanımlanmıştır.
- Tkinter ile üç ayrı fonksiyonu kullanıcıya hitap edecek şekilde görsel ve bilgilendirici detaylarla arayüz tasarlanmıştır.

Şekil 2. Envanter Kontrol Programı arayüzü

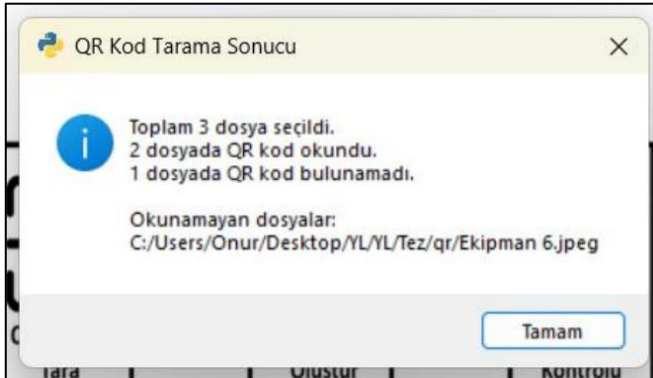


Sıradaki bölümde üç temel işlem olan QR kodları Tara, Rapor Oluştur ve Envanter Kontrolü işlemleri için oluşturulan fonksiyonların detaylandırması yapılmıştır.

QR Kodları Tara Fonksiyonu

Bu fonksiyon, karekod görüntülerini toplayan kamera, drone gibi görüntüleyiciler tarafından toplanan karekodları okur ve her ekipman için gerekli bilgileri çıkarır. Karekodlar, envanter kontrolü yapılacak ekipmanların Marka/Model/Seri Numara bilgilerini içerir. Karekod tarama işlemi için pyzbar kütüphanesi kullanılmıştır. Bu fonksiyon, karekodu çözerek metin bilgilerini (Marka/Model/Seri Numara) çıkartır ve bir liste halinde döndürür. Kullanıcı tarafından QR Kodları Tara butonuna basıldığında görüntüsü alınan karekodları seçmesi için “Görüntü dosyalarını seçin” isimli yeni bir pencere açılır ve kullanıcıdan taratmak istediği karekodları seçmesi beklenir. Seçim yapıp Aç butonuna tıklandığında Python arka planda pyzbar kütüphanesi ile karekod çözümlemesi yapar. Kullanıcının seçmiş olduğu görseller arasında karekod olmayan, karekod hasarlı veya görüntü nitelikleri (renk, parlaklık, yansıma) bakımından okunamayan görseller olabilir. Yüklenen tüm görseller için karekod okunan görüntü sayısı ve karekod okunmayan görüntü sayısını ayrı ayrı yazdırır. Okunmayan karekod dosyalarının isimlerini de ayrıca yazdırır. Karekod okunan görsellerin içerisindeki bilgileri liste halinde döndürür ve uygulamanın arayüzünde kaç adet karekod tarandığını yazdırır.

Şekil 3. QR Kod Taraması sonucu bilgi mesajı



Rapor Oluştur Fonksiyonu

Bu fonksiyon, bir önceki fonksiyon olan QR Kodları Tara fonksiyonu tarafından döndürülen liste halindeki ekipmana ait Marka/Model/Seri Numara bilgilerini Excel dosyasına kaydeder. Rapor oluştur butonuna tıklayan kullanıcıya içerisinde tarama işlemi yapılan ekipman bilgilerinin olduğu Excel dosyasını hangi konuma ve hangi isimle kaydedileceğinin sorulduğu “Raporu kaydet” penceresi açılır. Kullanıcı dosyanın kaydedileceği konumu ve kayıt isminin girişini tamamlayıp Kaydet butonuna basar ve uygulamanın arayüzünde “Rapor başarıyla kaydedildi” mesajını yazdırır.

Envanter Kontrolü Fonksiyonu

Bu fonksiyon, envanterdeki her bir ekipmanın doğruluğunu kontrol eder. Eğer karekodlardan elde edilen verilerle mevcut envanterdeki bilgiler uyuşuyorsa, ekipman doğru kabul edilir. Aksi takdirde, eksik ya da hatalı ekipmanlar kullanıcıya bildirilir. Mevcut envanter bilgileri, daha önce kaydedilmiş Excel dosyasına dayanır. Karekodlar ile elde edilen bilgileri, bu mevcut envanterle karşılaştırmak için pandas kütüphanesi kullanılır ve bu işlemde veri çerçeveleri (dataframe) ile hızlıca karşılaştırma yapılabilir. Bu fonksiyon, karekodlardan elde edilen her ekipman bilgisini mevcut envanterle karşılaştırarak eksik veya uyumsuz olanları raporlar. Eksik bilgileri liste halinde döndürür. Envanter Kontrolü butonuna tıklayan kullanıcıya, uygulamada açılan “Karşılaştırılacak Excel dosyasını seçin” penceresi ile olması gereken mevcut envanter bilgilerinin yer aldığı Excel dosyasını seçmesi istenir. Dosya seçimini yapan kullanıcı Aç butonunu tıklayarak uygulamaya ekler.

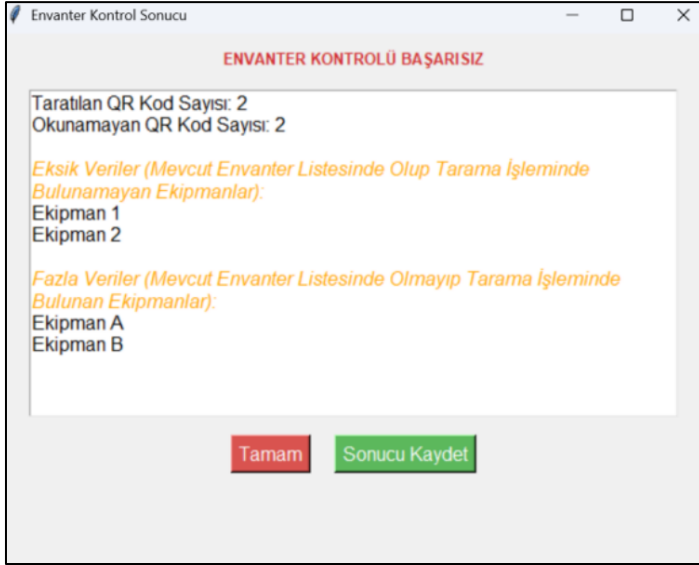
Son durumda uygulamanın belleğinde iki adet Excel dosyası mevcut olmuş olur. Bu Excel dosyalarından biri karekodların taratılması sonucu uygulamanın kendi oluşturduğu Excel dosyasıdır. Diğeri ise olması gereken mevcut envanterin bilgilerinin olduğu ve kullanıcının son adımda seçtiği Excel dosyasıdır. Bu aşamada

uygulama iki Excel dosyasını dataframe'ler olarak isin() fonksiyonu ile mukayese eder. isin() fonksiyonunun döndürdüğü True yada False bilgisine göre envanter kontrolünün başarılı veya başarısız sonucuna ulaşılır. True bilgisi dönmesi durumunda taranan karekodlardan elde edilen Excel'deki bilgiler ile olması gereken mevcut envanterin olduğu Excel'deki bilgiler birbirinin aynısıdır. Envanter birbiri ile uyumludur. Uygulama arayüzüne "Envanter Kontrolü Başarılı" bilgi mesajı yazdırılır. False bilgisi dönmesi durumunda ise hangi bilgilerin eksik veya fazla olduğu if not operatörü ile tespit edilir. Uygulama arayüzüne "Envanter Kontrolü Başarısız" bilgi mesajı ile, "Eksik Veriler (Mevcut Envanter Listesinde Olup Tarama İşleminde Bulunamayan Ekipmanlar)" ve "Fazla Veriler (Mevcut Envanter Listesinde Olmayıp Tarama İşleminde Bulunan Ekipmanlar)" bilgi mesajları detaylı şekilde yazdırılır. Açılan bu pencerede Sonucu Kaydet butonu ile Eksik ve Fazla Verilerin bilgisi Excel dosyasına kaydedilir. Tamam butonu ile de uygulama ana ekranına dönülür.

Şekil 4. Envanter Kontrol Programı sonucunun Başarılı olduğunu gösteren arayüz



Şekil 5. Envanter Kontrol Programı sonucunun Başarısız olduğunu gösteren arayüz



Elde Edilen Çıktılar

Python ile geliştirilen envanter kontrol sistemleri, hata oranlarını minimize ederek işletmelere zaman ve maliyet avantajı sağlar. Karekod teknolojisi ile entegre edilen bu sistemler, manuel veri girişini ortadan kaldırarak kullanıcıların hızlı ve güvenilir bir şekilde envanter takibi yapmasına yardımcı olur. Python'un geniş kütüphane desteği sayesinde sistemlerin ölçeklenebilirliği ve esnekliği artırılır. Ayrıca, otomatik raporlama ve veri analizi özellikleri ile işletmelerin envanter süreçlerini daha verimli hale getirmelerine olanak tanır. Bu çalışmada ele alınan Python tabanlı karekod çözümleri, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerine katkı sağlayarak envanter yönetiminde yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Yapılan uygulamalar, işletmelerin stok yönetiminde hata oranlarını düşürerek verimliliği artırmalarına olanak sağlamaktadır.

Python'ın otomasyon yetenekleri, envanter kontrol programının farklı sistemlerle entegrasyonunu kolaylaştırır. Örneğin, envanterdeki stok miktarı belirlenen herhangi bir eşik değerinin altında olduğunda, sistem kendisi tedarik siparişi oluşturabilir veya ilgili personele bildirim gönderebilir (Raffik & ark., 2021). Nesnelerin interneti entegrasyonu ile, envanterdeki fiziksel sensörlerden alınan veriler doğrudan Python uygulamasına aktarılabilir ve stok takibi otomatikleştirilebilir (Raffik & ark., 2021).

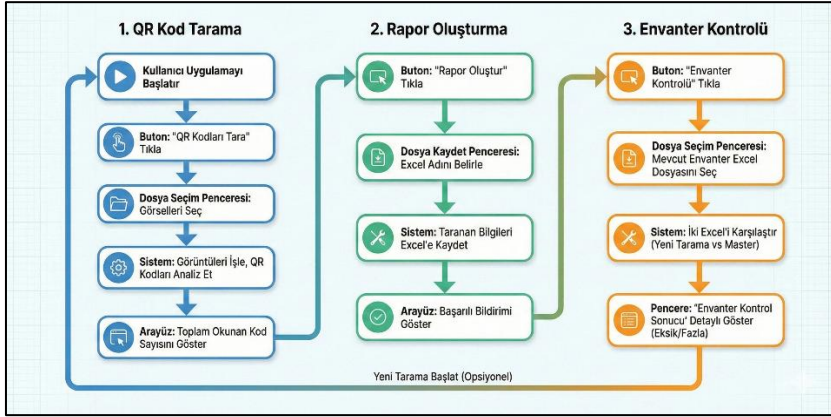
Envanter kontrol programında güvenlik önemli bir unsurdur. Kullanıcıların sisteme erişimi, kimlik doğrulama ve yetkilendirme mekanizmaları ile sınırlandırılır. Özellikle, iki aşamalı kimlik doğrulama gibi güvenlik önlemleri, sisteme yalnızca yetkili kişilerin erişmesini sağlar (Kar & ark., 2022). Kullanıcıların gerçekleştirdiği tüm işlemler kaydedilerek, sistemde tam bir izlenebilirlik sağlanır ve olası hatalı veya yetkisiz işlemler kolayca tespit edilebilir (Kar & ark., 2022).

Karekod teknolojisinin envanter yönetimine entegrasyonu, tedarik zinciri süresince ürünlerin kesintiye uğramadan izlenmesine imkan sağlar (Öztürk & Koyuncu, 2024). Python tabanlı uygulama, ürünlerin giriş-çıkış tarihleri, bakım ve servis kayıtları gibi bilgileri detaylı olarak raporlayabilir. Bu raporlar, stok seviyelerinin optimizasyonu, tedarikçi performansının izlenmesi ve süreçler arası koordinasyonun iyileştirilmesi için kullanılır (Öztürk & Koyuncu, 2024). Ayrıca, sistemin kurumsal kaynak planlama sistemleriyle entegrasyonu, üretim süreçlerinin daha şeffaf ve izlenebilir hale gelmesini sağlar (Öztürk & Koyuncu, 2024).

Bu çalışmada, Python programlama dili ve karekod teknolojisinin envanter kontrol süreçlerindeki rolü incelenmiştir. Python programlama dili kullanılarak karekod tabanlı envanter kontrol sisteminin nasıl geliştirilebileceğinin gösterildiği sistem, manuel veri girişinin sahip olduğu hatalı veri girişi ihtimalini,

verileri temin ederken ki yüksek iş sağlığı ve güvenliği risklerini ortadan kaldırmak için ve envanter kontrol sürecini hızlandırmak için alternatif yöntem olmuştur. Geliştirilen program üç temel işleme sahip olup, bunlar; QR Kodları Tara, Rapor Oluştur ve Envanter Kontrolü işlemleridir. Kullanıcıya hitap edecek şekilde kolay, hızlı ve sade arayüz tasarımı yapılmış olup, yapılan her bir işlemde kullanıcıya açıklayıcı şekilde detaylı bilgilendirme arayüzleri oluşturulmuştur. Python'un sunduğu geniş kütüphane desteği sayesinde, envanter yönetimi süreçlerinde daha hızlı ve güvenilir bir yaklaşım benimsenebilmektedir. Çalışmanın sonucunda, karekodların kullanımının envanter takibini kolaylaştırması, veri teminini daha güvenilir hale getirmesi ve operasyonel süreçlerde zaman tasarrufu sağlaması hedeflenmiştir. Özellikle OpenCV ve Pyzbar gibi kütüphanelerin kullanımı, karekodların taranmasına olanak tanırken Pandas ve OpenPyXL gibi kütüphaneleri ise veri organizasyonunu ve analizini sağlamıştır. Uygulanan yöntem sayesinde envanter kontrol süreçlerinde insan hatalarının önemli ölçüde azaltıldığı ve envanter kayıtlarının dijital ortamda güvenli bir şekilde tutulabileceği görülmüştür. Böylece, işletmelerin envanter süreçlerinde verimliliği artıracabilecekleri ve kaynaklarını daha etkin kullanabilecekleri bir sistem ortaya konmuştur. Bu çalışma, karekod tabanlı envanter yönetim sistemlerinin geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu ve farklı sektörlerde başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir. Geliştirilen uygulamanın çalışma adımları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6. Geliştirilen Envanter Kontrol Programının Nasıl Çalıştığını Gösteren Akış Diyagramı



Çalışmanın Farklı Alanlara Uygulanması

Python ve karekod tabanlı envanter kontrol programları, modüler yapıları sayesinde farklı sektörler ve ihtiyaçlara kolayca uyarlanabilir. Sistem, yeni özelliklerin eklenmesine ve mevcut süreçlerin otomatikleştirilmesine olanak tanır. Python'ın geniş kütüphane ekosistemi ve açık kaynak topluluğu, sistemin sürekli olarak güncellenmesini ve iyileştirilmesini destekler (Wu & ark., 2022). Karekod teknolojisinin yaygınlaşması ve mobil cihazların artan kullanımı, bu tür sistemlerin saha uygulamalarında etkinliğini artırmaktadır (Gurkan & Palandoken, 2021).

Python ve karekod teknolojilerinin entegrasyonu ile geliştirilen yeni nesil envanter kontrol sistemleri, sahip oldukları modüler mimari sayesinde yalnızca standart depo yönetiminde değil, sağlık sektöründen perakendeye kadar geniş bir yelpazede sektörel ihtiyaçlara hızla uyum sağlayabilen esnek çözümler sunmaktadır. Bu sistemlerin temel gücü, Python'ın zengin kütüphane ekosistemi ve aktif açık kaynak topluluğundan beslenmesinde yatar; bu yapı, sisteme görüntü işleme algoritmalarından veri analitiği araçlarına kadar pek çok yeni özelliğin kolayca entegre edilmesine ve

operasyonel süreçlerin uçtan uca otomatikleştirilmesine olanak tanır (Wu & ark., 2022). Yazılımsal esnekliğin yanı sıra, karekod teknolojisinin evrensel bir standart haline gelmesi ve yüksek çözünürlüklü kameraya sahip mobil cihazların yaygınlaşması, bu sistemlerin uygulanabilirliğini statik ortamlardan dinamik saha operasyonlarına taşımıştır. Maliyet etkinliği yüksek olan bu mobil çözümler, anlık veri girişi ve hata oranlarının minimizasyonu ile saha uygulamalarındaki operasyonel verimliliği belirgin şekilde artırmaktadır (Gurkan & Palandoken, 2021).

Envanter yönetimi süreçlerinde Python ve karekod teknolojisinin entegrasyonu, sadece teknik uygulamalarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda sürdürülebilirlik, maliyet optimizasyonu ve müşteri memnuniyeti gibi stratejik hedeflere de katkı sağlamaktadır. Özellikle e-ticaret alanında yapılan çalışmalarda, stok kontrol modellerinin optimizasyonu ile toplam maliyetlerde önemli azalmalar sağlandığı gösterilmiştir. Emin Başar Baylan ve Ekin Fırat Kaplan'ın çalışmasında, karekod stok kontrol modeli ile yapılan optimizasyon sonucunda, belirlenen ürünün toplam maliyetinde %16,58'lik bir azalma elde edilmiştir. Çalışmada, önerilen stok kontrol yönteminin geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli olduğu ve işletmeye kâr ve avantajlar sağlayabileceği belirtilmiştir (Baylan & Kaplan, 2024). Bu tür modellerin Python ile kolayca uygulanabilir olması, envanter kontrol programlarının esnekliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak, yazılımın geliştirilebilirliği ile donanımın erişilebilirliğinin bu sentezi, modern envanter yönetiminde sürdürülebilir, ölçeklenebilir ve güvenilir bir kontrol mekanizması oluşturmaktadır.

Kaynakça

Akyüz, Y., & Karabulut, N. (2024). A Comparison of RPA Tool and Python Programming Language for A Bom Digitalization Project in Automobile Industry. *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*.

Baylan, E. B., & Kaplan, E. F. (2024). E-Ticaret ile Satılan Ürünler için Stok Kontrol Modeli Oluşturulması ve Uygulama. *Lojistik Dergisi*.

Guo, J., Yan, Y., Fu, Y., & Hu, Z. (2025). Research on Visual Teaching Based on Python Technology Application. *Eai Springer Innovations in Communication and Computing*.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-85225-1_19

Gurkan, C. & Palandoken, M. (2021). Android Tabanlı QR Kod Teknolojisi ile Desteklenen Envanter Takip Sisteminin Geliştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28, 1229-1232.
<https://doi.org/10.31590/ejosat.1014193>

Hendry, R. & Rahman, M. (2017). Smart Attendance System Applying QR Code. *Cpfd.Cnki.Com.Cn*.
<https://doi.org/10.1109/MECO49872.2020.9134225>

Jadhav, P. P., Patil, Y. D., Shah, S. P., Mane, A. A., & Barphe, S. S. (2023). ScanIn: QR Code based Attendance System using Python. *2023 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA)*.
<https://doi.org/10.1109/icscna58489.2023.10370666>

Kar, S., Bhimrajka, S., Kumar, A., & Mukherjee, S. (2022). Mobile based Inventory Management System with QR code. *2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*.
<https://doi.org/10.1109/conecct55679.2022.9865739>

Kouninef, B., Merad, G., & Djelti, M. (2015). The use of QR codes and mobile technology in the blended learning approach. *In e-Learning (econf), 2015 Fifth International Conference on*, 135-143. <http://doi.org/10.1109/ECONF.2015.90>

Öztürk, E., & Koyuncu, M. C. (2024). Tedarik Zinciri Yönetimi Kapsamında Sevkiyat Sürecinin Barkod Teknolojisi ile Entegrasyonu. *International Anatolia Academic Online Journal Social Sciences Journal*. <https://doi.org/dergipark.org.tr/tr/pub/iaaoj/issue/85849/1469626>

Lakshmi, G. V., Gogulamudi, S., Nagaeswari, B., & Reehana, S. (2021). BlockChain Based Inventory Management by QR Code Using Open CV. *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. <https://doi.org/10.1109/iccci50826.2021.9402666>

Lezhebokov, A. A., Kravchenko, Y. A., & Bova, V. V. (2014). Support system for QR-code-based educational processes. *In Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2014 IEEE 8th International Conference on*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICAICT.2014.7036011>

Liao, K.-C., & Lee, W.-H. (2010). A novel user authentication scheme based on QR-Code. *Journal of Networks*, 5 (8), 937-941. <http://doi.org/10.4304/jnw.5.8.937-941>

Ponnapalli, V. A. S., Manish, A. V. S., Ramu, P., Sudhiksha, S., & Greeshma, M. (2021). Array Factor Code Development of Fractal Array Antenna using Python: A Mini-Study on Free and Open Source Software for Antennas. *2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT)*. <https://doi.org/10.1109/rteict52294.2021.9573911>

Raffik, R., Rakesh, D., Venkatesh, M., & Samvasan, P. (2021). Supply Chain Control and Inventory Tracking System using Industrial Automation Tools and IIoT. *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*. <https://doi.org/10.1109/icaeca52838.2021.9675774>

Rashed, E., & Eissa, M. (2020). Inventory Digital Management Using Statistical Process Control Analysis in Healthcare Industry. *Journal of Business in The Digital Age*. <https://doi.org/10.46238/jobda.688641>

Rusli, N. W., Aziz, H. A., & Nawi, N. E. M. (2024). Framework of Safety Helmet Compliance Detection and Employee Tracking by Using Quick Response (QR Code) Technology. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6890-9_33

Sinha, A., & Sonawane, D. (2021). A Qr Code Technology For Centralized Inventory Management System. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2021.v06i06.018>

Sri Krishna Kumar, S., Chandni, G., Meenal, A. L., Kalaimohan, T. S., Senthil Kumar, R., & Sugavanam, K. R. (2015). BLE enhanced decentralised work time sheet and real time monitoring using smart id card. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10 (18), 8080–8084. <https://www.researchgate.net/publication/351006064>

Uzun, V. (2016). QR-Code Based Hospital Systems for Healthcare in Turkey. *40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, 71-76. <https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2016.173>

Wu, Z., Liu, J., & Shi, S. (2022). Research on Programming of 3D Simulation System under the Control of Computer Python Language. *2022 IEEE 5th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*. <https://doi.org/10.1109/iciscae55891.2022.9927507>

Yoon, B., Kim, H., Youn, G., & Rhee, J. (2021). 3D position estimation of drone and object based on QR code segmentation model for inventory management automation. *2021 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. <https://doi.org/10.1109/ssrr53300.2021.9597865>

Youan, X., Chao, Y., & Chunling, L. (2011). A new method of QR code accumulation encoding in mobile education. *In Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on*, 42-45. <https://doi.org/10.1109/CECNET.2011.5768525>

BÖLÜM 7

GAZ SENSÖRLERİ: TEMELLER, TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR

Yunus AKALTUN¹

Giriş

Gaz sensörleri, çevrede bulunan gazların türünü, konsantrasyonunu ve bazı durumlarda gazların kimyasal özelliklerini algılayabilen kritik cihazlardır. Günümüzde endüstriyel güvenlik, çevresel izleme, tıbbi tanı ve tedavi süreçleri, otomotiv teknolojileri, enerji sistemleri ve akıllı şehir uygulamaları gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Özellikle yanıcı, patlayıcı veya toksik gazların tespit edilmesi, hem insan sağlığı hem de operasyonel güvenlik açısından büyük önem taşır. Bu sensörler; metal oksit yarı iletkenler, elektrokimyasal hücreler, katalitik elemanlar, optik sistemler ve piezoelektrik kristaller gibi farklı fiziksel veya kimyasal prensiplere dayanan çeşitli teknolojik yaklaşımlarla tasarlanabilir.

Bu bölümde gaz sensörlerinin temel çalışma prensipleri açıklanmakta; sensörlerin sınıflandırılması, algılama mekanizmaları, kullanılan fonksiyonel malzemeler, üretim yöntemleri ve performans parametreleri detaylı şekilde ele alınmaktadır. Ayrıca modern gaz algılama sistemlerinin sensör füzyonu, yapay zekâ tabanlı veri analizi, IoT entegrasyonu ve enerji verimliliği gibi gelişmiş özellikleri de tartışılmaktadır. Böylece okuyucuya hem klasik hem de yeni nesil gaz sensörü teknolojileri hakkında kapsamlı bir perspektif sunulmaktadır.

Gaz Sensörlerinin Temel Kavramları

Gaz Algılama Mekanizması

Gaz sensörleri, hedef gaz ile sensör yüzeyi arasındaki fiziksel veya kimyasal etkileşim sonucu elektriksel, optik veya akustik bir sinyal üretir. Bu sinyal gazın türü ve miktarına bağlı olarak değişir [1-3].

Ölçülen Temel Parametreler

- **Duyarlılık (Sensitivity):** Sensörün gaz konsantrasyonundaki değişime verdiği tepki.
- **Seçicilik (Selectivity):** Sensörün belirli bir gaza karşı diğerlerine göre daha fazla tepki verme yeteneği.
- **Tepki Süresi (Response Time):** Hedef gazla karşılaşıldığında sinyalin kararlı bir seviyeye ulaşma süresi.
- **Geri Dönüş Süresi (Recovery Time):** Gaz ortamdan uzaklaştırıldıktan sonra sensörün ilk durumuna dönme süresi.
- **Doğruluk ve Tekrarlanabilirlik:** Ölçümlerin güvenilirliğini belirler.

¹ Prof. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9534-9106

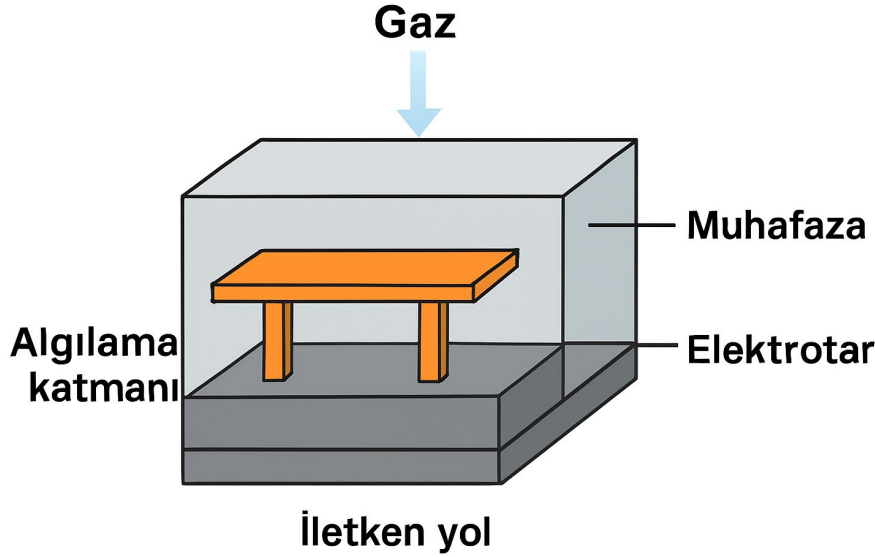
Gaz Sensörlerinin Sınıflandırılması

Gaz sensörleri çalışma prensiplerine göre çeşitli kategorilere ayrılır.

Yarıiletken Metal Oksit Sensörler (MOS)

Bu sensörler, SnO_2 , ZnO , WO_3 , TiO_2 gibi metal oksitlerin yüzey reaksiyonlarına dayanır. Gaz molekülleri yüzeye adsorbe olduğunda iletkenlik değişir.

Şekil 1. Yarıiletken Metal Oksit Sensörün İç Yapısı



Yukarıdaki şekilde, tipik bir Metal Oksit Yarı İletken (MOS) gaz sensörünün iç mimarisini katmanlı bir yapıyla göstermektedir. Sensörün içinde gazla etkileşime giren aktif tabakalar, ısıtıcı bir yapı ve elektrotlar bulunur.

Aşağıda içerideki her bir bileşenin görevi açıklanmaktadır:

1. Koruyucu Dış Kılıf (Protective Case)

- Sensörü dış ortam koşullarından (darbe, nem, toz) korur.
- Gazın iç tabakalara ulaşmasına izin veren mikro delikler içerir.
- Genellikle paslanmaz çelik veya seramik kullanılır.

2. Gaz Giriş Bölgesi (Gas Exposure Area)

- Ortamda bulunan hedef gazın sensöre ulaştığı bölgedir.
- Bu bölümde gaz, algılama malzemesiyle temas eder.

3. Altın Algılama Elektrotları (Au Sensing Electrodes)

- MOS algılama tabakasının altında yer alır.
- Gazla etkileşim sonucu oluşan direnç değişimini elektrik sinyaline dönüştürür.
- Altın tercih edilir çünkü:
 - Kimyasal olarak inerttir,
 - Yüksek iletkenliğe sahiptir,

- Oksitlenmez.

4. SnO₂ Algılama Tabakası (SnO₂ Sensing Layer)

- Sensörün **gazı algılayan aktif malzeme** katmanıdır.
- Kalınlığı genellikle birkaç mikrometredir.
- Bu katman hedef gazlarla reaksiyona girerek elektriksel direncini değiştirir.
 - Örneğin CO, H₂, LPG gibi indirgen gazlar direnci düşürür.
 - NO₂ gibi oksitleyici gazlar direnci artırır.

5. Seramik Altlık (Ceramic Substrate)

- Sensörün mekanik taşıyıcısıdır.
- Elektriksel olarak yalıtıcıdır.
- Isıya dayanıklı olduğundan 200–400 °C gibi sıcaklıklarda çalışmaya uygundur.

6. Isıtıcı Eleman (Heater Element)

- SnO₂ gibi MOS tabanlı sensörler çalışmak için belirli bir sıcaklığa ihtiyaç duyar.
- Bu eleman genellikle platinden (Pt) yapılır.
- Tipik çalışma sıcaklığı: **200–350 °C**.
- Görevi:
 - Gaz reaksiyonlarını aktive etmek,
 - Yüzeyi temiz tutmak,
 - Sensörün yanıt süresini ve duyarlılığını artırmak.

7. Metal Bağlantı Hatları (Metal Interconnects)

- Elektrotları sensörün dış bacaklarına bağlar.
- Bu hatlar aracılığıyla sensör ölçüm devresine bağlanır.
- **Avantajlar:** Uygun maliyet, yüksek duyarlılık.
- **Dezavantajlar:** Yüksek çalışma sıcaklığı (200–400 °C), düşük seçicilik.

Elektrokimyasal Sensörler

Anot, katot ve elektrolit yapılarıyla çalışırlar. Gaz, elektrot yüzeyinde kimyasal reaksiyon oluşturarak akım üretir [4].

- **Avantajlar:** Yüksek seçicilik, düşük güç tüketimi.
- **Dezavantajlar:** Ömür sınırlıdır, belirli gazlarla sınırlı çalışma.

Optik Gaz Sensörleri

Infrared (IR), UV, lazer spektroskopisi veya optik absorpsiyon temelli çalışır [5].

- **Avantajlar:** Yüksek doğruluk, uzun ömür, zehirlenme problemi yok.

- **Dezavantajlar:** Maliyet ve karmaşık yapı.

Katalitik Yanma Sensörleri

Yanıcı gazları tespit ederler. Gazın katalizör üzerindeki kısmi yanması sonucu ısı oluşur; sensör çıkışı bu ısı farkına dayanır [6].

- **Avantajlar:** Patlayıcı gaz algılamada etkilidir.
- **Dezavantajlar:** Zehirlenme riski, hassas bakım gereksinimi.

Akustik Dalga Sensörleri (SAW/BAW)

Gazla etkileşim, yüzey akustik dalga hızında değişim oluşturur [7].

- **Avantajlar:** Yüksek seçicilik, düşük güç.
- **Dezavantajlar:** Çevresel faktörlere duyarlılık.

Nanoteknoloji Tabanlı Sensörler

Karbon nanotüpler, grafen, MOF'lar (Metal-Organic Frameworks) gibi yeni nesil malzemeler kullanılır [8].

- **Özellikler:** Yüksek yüzey alanı, düşük sıcaklıkta çalışma, üstün hassasiyet.

Gaz Sensörlerinde Kullanılan Malzemeler

Metal Oksit Yarıiletkenler

SnO_2 , ZnO , TiO_2 , WO_3 gibi n-tipi; NiO , CuO gibi p-tipi oksitler [9].

- Doping (Pd, Pt, Au vb.) ile seçicilik artırılabilir.

Polimer Tabanlı Malzemeler

İletken polimerler (PANI, PEDOT). Düşük sıcaklıkta çalışırlar [10].

- Avantaj: Esnek sensör üretimine uygun.

Karbon Tabanlı Malzemeler

Grafen, CNT'ler yüksek yüzey alanları sayesinde düşük konsantrasyonlarda bile gazlara duyarlıdır.

MOF ve Zeolit Malzemeler

Gözenekli yapılar sayesinde gaz ayırımı ve seçicilikte avantaj sağlarlar [11].

Sensör Tasarımı ve Üretim Teknikleri

İnce Film Üretim Teknikleri

- Sol-gel
- SILAR
- Sputter
- CVD ve ALD

Mikro ve Nanoyapıların Rolü

Nanopartiküller, nanotel yapıları ve gözenekli filmler gazın adsorpsiyon kapasitesini artırarak performansı geliştirir.

Entegrasyon ve Paketleme Teknolojileri

Taşınabilir uygulamalar için MEMS tabanlı sensörler günümüzde yaygındır.

Performans İyileştirme Stratejileri

Doping ve Yüzey Modifikasyonu

Katalitik metaller ile yüzeye aktif bölgeler eklenebilir.

Sıcaklık Kontrolü

Optimum çalışma sıcaklığı ile duyarlılık artırılır.

Işık Destekli Sensörler

UV veya görünür ışıkla aktivasyon, düşük sıcaklıkta çalışma sağlar.

Çoklu Sensör Sistemleri

Farklı sensörlerden oluşan "elektronik burun" sistemleri daha yüksek seçicilik sunar.

Gaz Sensörlerinin Uygulama Alanları

Endüstriyel Güvenlik

Yanıcı gaz sızıntılarının tespiti.

Çevresel İzleme

NO_x, SO₂, CO₂ gibi kirleticilerin izlenmesi.

Sağlık ve Tıp

Nefes analizinde hastalık teşhisi (örn. asetona dayalı diyabet izleme).

Akıllı Ev ve IoT Sistemleri

Hava kalitesi ölçümü.

Otomotiv Uygulamaları

Egzoz gazı izleme ve kabin içi hava kalitesi kontrolü.

Gelecek Perspektifleri

Yeni nesil sensörlerde düşük güç tüketimi, yüksek seçicilik, oda sıcaklığında çalışma ve IoT ile entegrasyon ön plana çıkmaktadır. Yapay zeka destekli sensör sistemleri gelecekte gaz algılama teknolojisini önemli ölçüde geliştirecektir.

Aşağıdaki tablo farklı sensör teknolojilerinin performans özelliklerini karşılaştırmaktadır.

Tablo 1. Gaz sensör teknolojilerinin genel karşılaştırması

Sensör Türü	Duyarlılık	Seçicilik	Çalışma Sıcaklığı	Maliyet	Tipik Uygulamalar
MOS (Metal Oksit)	Yüksek	Orta	200–400 °C	Düşük	Endüstri, IoT
Elektrokimyasal	Orta	Yüksek	Oda sıcaklığı	Orta	Hava kalitesi, tıp
IR / Optik Sensörler	Çok yüksek	Yüksek	Oda sıcaklığı	Yüksek	Çevresel izleme
Katalitik Yanma	Orta	Düşük	400 °C	Düşük	Yanıcı gazlar
Akustik Dalga (SAW/BAW)	Yüksek	Yüksek	Oda sıcaklığı	Orta	Endüstri, IoT
Nanomalzeme Tabanlı Sensörler	Çok yüksek	Yüksek	Oda sıcaklığı	Orta	Yeni nesil cihazlar

Sonuç

Gaz sensörleri, modern endüstri, çevre izleme, sağlık teknolojileri ve akıllı sistemlerde kritik bir bileşen olarak görev yapmaktadır. Endüstriyel tesislerde güvenliğin sağlanması, kentsel hava kalitesinin izlenmesi, hastalıkların nefes analizi yoluyla teşhisi ve araç içi emisyon kontrolü gibi pek çok alanda hayati öneme sahiptir. Son yıllarda gelişen malzeme teknolojileri, özellikle nanoyapıların, 2D malzemelerin ve hibrit fonksiyonel bileşiklerin kullanılması sayesinde sensörlerin duyarlılığı, seçiciliği ve enerji verimliliği önemli ölçüde artırılmıştır. Bu gelişmeler, daha hızlı yanıt veren, daha az enerji tüketen ve daha düşük konsantrasyonlardaki gazları algılayabilen yeni nesil sensörlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu bölümde gaz sensörlerinin temelleri, çalışma prensipleri, malzemeleri ve uygulama alanları ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Kaynakça

1. Yamazoe, N. & Shimanoe, K. (2009). *Theory of power laws for semiconductor gas sensors*. Sensors and Actuators B.
2. R. Jaaniso & O. K. Tan (Eds.) (2013). *Semiconductor Gas Sensors*. Woodhead Publishing.
3. G. Korotcenkov (Ed.) (2020). *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Selection, and Uses*. Springer.
4. S. S. Pandey & R. K. Gupta (2021). *Recent Advances in Gas Sensing Technology*. Elsevier.
5. C. N. R. Rao & A. Govindaraj (2015). *Nanotubes and Nanowires for Gas Sensing*. Royal Society of Chemistry.
6. N. Barsan & U. Weimar (2020). *Gas Sensors Based on Semiconducting Metal Oxide Nanostructures*. Elsevier.
7. Mirzaei, A., et al. (2018). Metal oxide-based gas sensors: A review. *Ceramics International*.
8. Potyrailo, R. (2016). Toward passive wireless gas sensors. *Sensors and Actuators B*.
9. Eranna, G., Joshi, B. C., Runthala, D. P., Gupta, R. P. (2004). Oxide materials for development of integrated gas sensors—A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*.
10. Comini, E. (2016). Metal oxide nanowire chemical sensors: innovation and quality of life. *Materials Today*.
11. Zhang, J., Liu, X., Neri, G., Pinna, N. (2016). Nanostructured materials for room-temperature gas sensors. *Advanced Materials*.

