

Yön bilgisi ile güçlendirilmiş parmak izi tanıma: Modüler bir görüntü işleme yaklaşımı

Fingerprint recognition enhanced by orientation information: A modular image processing approach

Mehmet Alkaner¹ , Alperen Eroğlu^{2,*} 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya, Türkiye

Öz

Parmak izi tanıma sistemleri, biyometrik kimlik doğrulamada güvenilirliği sayesinde adli bilişim ve siber güvenlik gibi birçok alanda önem kazanmıştır. Bu çalışma, düşük kaliteli ve bozulmuş parmak izi görüntülerinin işlenmesinde karşılaşılan zorluklara çözüm sunan bütünsel bir analiz yaklaşımı geliştirmektedir. Önerilen sistem; ön işleme, segmentasyon, yönelge haritalama, ikileştirme ve minutiae çıkarımı gibi temel aşamalardan oluşmaktadır. Görüntü kalitesini artırmak için geliştirilmiş Gabor filtreleri kullanılmış ve yön haritalarına dayalı detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen minutiae tespit modeli, FVC2002 ve FVC2004 veri setlerinde sırasıyla %96.8 ve %95.3 doğruluk oranlarıyla test edilmiştir. Özellikle düşük çözünürlüklü ve bozulmuş verilerde gösterdiği yüksek performans, sistemin dayanıklılığını ortaya koymaktadır. Ayrıca kullanıcı dostu grafik arayüz, süreci daha etkileşimli ve erişilebilir hale getirmiştir. Bu çalışma, parmak izi analizinde güvenilir, esnek ve yüksek performanslı bir çözüm sunarak adli bilişim uygulamalarında etkili bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Görüntü işleme, İz yönü, Özellik çıkarma, Parmak izi analizi, Son işleme

1 Giriş

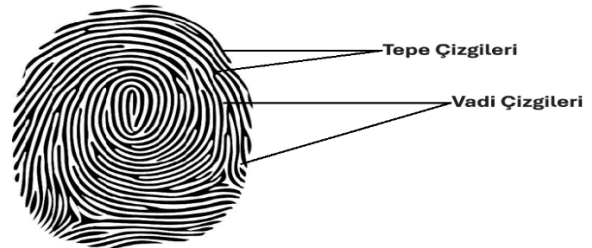
Biyometrik güvenlik sistemleri, dijital çağın artan güvenlik ihtiyaçlarına karşı yüksek doğruluk oranı ve kişiye özel veri temelli yaklaşımlarıyla ön plana çıkmaktadır. Günümüz dijital dünyasında güvenlik, sadece fiziksel değil, aynı zamanda sanal ortamların da korunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda biyometrik güvenlik sistemleri, kullanıcı doğrulamasını kişiye özgü fiziksel özelliklerle gerçekleştirmeleri nedeniyle, güvenlik teknolojilerinde ön plana çıkmaktadır. Özellikle parmak izi tanıma teknolojisi, eşsiz ve ömür boyu değişmeyen yapısı sayesinde en yaygın kullanılan biyometrik kimlik doğrulama yöntemi haline gelmiştir. Parmak izi tanıma sistemleri, her bireye özgü ve yaşam boyunca değişmeyen yapıları sayesinde, en yaygın kullanılan biyometrik doğrulama yöntemlerinden biridir [1]. Özellikle adli bilişim, mobil cihaz güvenliği, finansal işlemler ve sınır kontrolleri gibi birçok kritik alanda, parmak

Abstract

Fingerprint recognition systems have gained importance in many areas such as forensics and cybersecurity due to their reliability in biometric authentication. This study develops a holistic analysis approach that provides solutions to the difficulties encountered in processing low-quality and distorted fingerprint images. The proposed system consists of basic stages such as preprocessing, segmentation, orientation mapping, binarization and minutiae extraction. Gabor filters developed to increase the image quality were used and detailed analyses based on orientation maps were performed. The developed minutiae detection model was tested on FVC2002 and FVC2004 datasets with 96.8% and 95.3% accuracy rates, respectively. The high performance it shows especially on low-resolution and distorted data reveals the robustness of the system. In addition, the user-friendly graphical interface has made the process more interactive and accessible. This study provides a reliable, flexible and high-performance solution in fingerprint analysis and makes an effective contribution to forensic applications.

Keywords: Image Processing, Ridge Orientation, Feature Extraction, Fingerprint Analysis, Post-Processing

izi tanıma teknolojisi hızlı, doğru ve otomatik işlem avantajları sunmaktadır [2]. Parmak izi tabanlı sistemlerin başarısı, büyük ölçüde parmak izinin fiziksel yapısından ve bu yapının dijital ortama doğru şekilde aktarılmasından kaynaklanmaktadır. Ancak düşük kaliteli görüntüler, sensör kaynaklı bozulmalar, cilt yüzeyi deformasyonları ve çevresel etmenler bu süreci olumsuz etkileyebilmektedir.



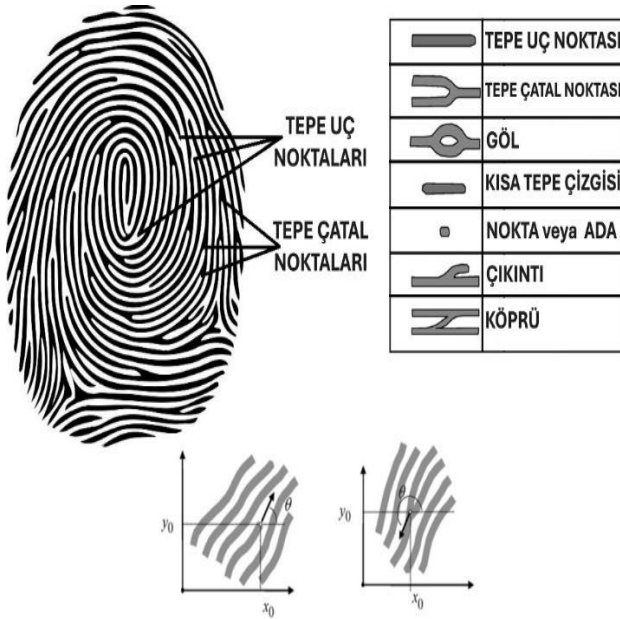
Şekil 1. Parmak izinin tepe ve vadi çizgileri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aeroglu@erbakan.edu.tr (A. Eroğlu)

Geliş / Received: 28.05.2025 Kabul / Accepted: 08.10.2025 Yayımlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1707882

Şekil 1’de gösterildiği gibi parmak izi desenleri, tepe/sırt (ridge) ve vadi (valley) olarak adlandırılan temel yapılardan oluşmaktadır.



Şekil 2. Parmak izinin tepe yapısı ve özellikleri

Şekil 2’de de belirtildiği üzere bu yapılar üzerinde bulunan uç (ridge ending) ve çatallanma (bifurcation) noktalarından oluşan minutiae olarak bilinen özel bölgelerle tanımlanır [3]. Bu yapılar, bir parmak izini benzersiz kılarak kimlik doğrulama işlemlerinin temelini oluşturur. Bununla birlikte, düşük kaliteli, bozulmuş ya da eksik parmak izi görüntülerinde bu özelliklerin doğru bir şekilde çıkarılması zorlaşmakta; bu da eşleşme doğruluğunun düşmesine yol açmaktadır [4]. Ayrıca sensör kaynaklı deformasyonlar, cilt yüzeyindeki değişkenlikler ve ortam ışığı gibi dışsal faktörler de tanıma performansını olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında, parmak izlerinin sahip olduğu minutiae’nın bozulma yönü (distortion direction) de, parmak izinin alınması sırasında oluşan kayma, baskı fazlalığı veya yön değişikliklerine bağlı olarak desenin yönelimsel olarak sapmasına işaret eder ve eşleşme doğruluğu üzerinde doğrudan etkilidir. Bu temel kavramlar, parmak izi tanıma sistemlerinin tüm analiz ve karar mekanizmalarının yapıtaşlarını oluşturur. Bu tür problemlerin üstesinden gelmek amacıyla geliştirilen sistemler genellikle minutiae tabanlı eşleştirme veya derin öğrenme tekniklerine dayanmaktadır. Minutiae tabanlı sistemler belirli özellikleri doğrudan çıkararak eşleşme yaparken, derin öğrenme tabanlı modeller çok katmanlı öğrenme yapılarıyla doğrudan örüntü analizi gerçekleştirir. Ancak her iki yaklaşımın da bazı sınırlılıkları mevcuttur. Minutiae tabanlı yaklaşımlar düşük kaliteli görüntülerde başarısız olurken, derin öğrenme sistemleri büyük ölçekli veri kümelerine ve yüksek donanım kaynaklarına ihtiyaç duyar [5]. Ayrıca, derin modellerin "black-box" yapısı nedeniyle açıklanabilirlik problemi bulunmaktadır.

FAR (False Acceptance Rate), sisteme ait olmayan bir kullanıcının yanlışlıkla kabul edilme oranı iken; FRR (False

Rejection Rate), sistemde kayıtlı bir kullanıcının hatalı biçimde reddedilme oranını ifade eder [6]. Her iki metrik de biyometrik sistemlerde güvenlik seviyesini belirleyen temel göstergelerdir. Bu temel göstergelerin kıyaslamaları da bu çalışmada mevcuttur. Bilinmesi gereken iki önemli algorithmada SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) ve ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF)’dir. SIFT, görüntü üzerinde ölçek ve dönüşüme karşı dirençli anahtar noktaları tespit eden ve bu noktalara özgü tanımlayıcı vektörler üreten bir algorithmadır. İlk olarak David Lowe tarafından geliştirilmiştir. Görüntüdeki yapısal desenleri tanımda oldukça başarılı olsa da işlem süresi uzundur ve kaynak tüketimi yüksektir [7]. ORB, SIFT’e kıyasla daha hızlı çalışan bir algorithmadır. FAST (Features from Accelerated Segment Test) ile anahtar nokta tespiti yapar, BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) ile tanımlayıcı üretir ve bu süreçleri yönelime göre döndürerek ölçek uyumu sağlar. Daha düşük doğrulukla çalışsa da gerçek zamanlı uygulamalarda kullanıma uygundur [8].

Biyometrik parmak izi tanıma sistemleri üzerine yapılan akademik çalışmalar, genellikle görüntü işleme tabanlı geleneksel yaklaşımlar veya yapay zekâ destekli modeller üzerine odaklanmaktadır.

1.1 İlgili çalışmalar

Bu bölümde, son yıllarda literatürde öne çıkan bazı çalışmalara yer verilmiş ve kullanılan yöntemler ile elde edilen sonuçlar ve kıyaslamalar teknik boyutlarıyla Tablo 1’de özetlenerek değerlendirilmiştir. Parmak izi tanıma sistemleri üzerine yapılan son dönem çalışmalarda özellikle derin öğrenme temelli yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Sha ve Tang [9], yönelim geliştirilmiş minutiae ve sırt (ridge) yönelim analizi yöntemlerini kullanarak parmak izi eşleştirmede hız ve doğrulukta artış sağlamış; NIST-4 veri setinde %92 doğruluk oranı ve belirgin EER iyileşmesi elde etmiş, ancak alan yönelim analizinin yüksek hesaplama maliyeti gerektirdiğini belirtmiştir [9]. Choi vd. [10] parmak izi eşleştirmede doğrusal olmayan bozulmaların etkisini incelemiş ve minutiae ile ridge (sırt) özelliklerini birlikte kullanarak, geleneksel yöntemlere kıyasla %5–10 oranında doğruluk artışıyla %90 doğruluk elde etmiştir. Ancak, sırt özelliklerinin çıkarımı ek işlem yükü getirmiştir. Çalışma, MATLAB ve OpenCV kullanılarak FVC2002 ve FVC2004 veri setlerinde gerçekleştirilmiştir. Salmento vd. [11], minüsiye ve yönelim tabanlı parmak izi eşleştirme için Yapay Sinir Ağı, sırt yönelim haritası ve crossing numbers yöntemlerini kullanmış; FVC2000 veri setinde %91 doğruluk ile yüksek doğruluk oranı elde etmiştir. Ancak, yöntemin yüksek miktarda eğitim verisine ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Çalışma MATLAB ortamında yürütülmüştür. Literatürde yalnızca derin öğrenme değil, sinyal işleme teknikleriyle geliştirilen modeller de dikkate değerdir. Örneğin, Lee vd. [12], parmak izi görüntülerinde gürültü azaltımını hedefleyen adaptif filtreleme yöntemleri ile görüntü netliğini artırmış; bu sayede minutiae çıkarımında daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntem düşük kontrastlı izler üzerinde özellikle faydalı bulunmuştur.

Tablo 1. İncelenen çalışmaların sistematik özeti

Çalışma	Ele Alınan Problem	Kullanılan Yöntemler	Performans Metrikleri	Elde Edilen Sonuçlar	Zayıf Yönler	Kullanılan Araçlar	Veri Seti
Sha ve Tang [9]	Parmak izi eşleştirme hız ve doğruluk artırımı	Orientation-improved minutiae, Ridge yönelim analizi	Doğruluk, EER	NIST-4 veri setinde belirgin iyileşme, %92 doğruluk	Alan yönelim analizi hesaplama maliyeti	MATLAB, C++	NIST-4
Choi vd. [10]	Parmak izi eşleştirmede doğrusal olmayan bozulmaların etkisi	Minütia ve ridge özellikleri kullanımı	Doğruluk, FAR, FRR	Geleneksel yöntemlere kıyasla %5-10 arası doğruluk artışı, %90 doğruluk	Sırt özelliklerinin çıkarımı ek işlem yükü getiriyor	MATLAB, OpenCV	FVC2002, FVC2004
Salmento vd. [11]	Minüsiye ve yönelim tabanlı parmak izi eşleştirme	Yapay Sinir Ağı, Sırt Yönelim Haritası, Crossing Numbers	Doğruluk	Yüksek doğruluk oranı, FVC2000 üzerinde iyi sonuçlar, %91 doğruluk	Yüksek eğitim verisi ihtiyacı	MATLAB	FVC2000 seçilmiş veriler
Lee vd. [12]	Küçük sensörler için kısmi parmak izi eşleştirme	Minutiae ve Ridge Shape Features (RSF)	EER, Doğruluk	Düşük EER, mobil cihazlarda daha yüksek doğruluk, %94 doğruluk	Küçük sensörlerin hassasiyeti düşük	MATLAB, Python	FVC2002, FVC2004, BERC
Sajjad vd. [13]	Parmak izi tabanlı kimlik doğrulama	SIFT, ORB, CNN	ROC Eğrisi, doğruluk	%99.75, doğruluk	GPU gereksinimi yüksek	Python 3.5, Caffè framework GoogLeNet	ATVS-FFp LivDet 2013
Bian vd. [14]	Yönelim alanı (FOF) tahmini	Gradient tabanlı, model tabanlı ve öğrenme tabanlı yöntemler	Alan yönelim tahmini doğruluğu, işlem süresi	Öğrenme tabanlı yöntemlerde düşük kaliteli izlerde daha iyi sonuçlar, %95 doğruluk	Bazı yöntemlerde yüksek hesaplama yükü ve düşük genel geçerlik	Python, MATLAB	Kamuya açık veri setleri (FOE yarışmaları)
Zhang vd. [15]	Slim-ResCNN, parmak izi canlılık tespiti	Derin öğrenme tabanlı CNN	Doğruluk	%95.25 doğruluk	Uzun eğitim süresi ve yürütme süresi	C++ Caffè	LivDet2013, LivDet2015

Tablo 1.(Devam) İncelenen çalışmaların sistematik özeti

Çalışma	Ele Alınan Problem	Kullanılan Yöntemler	Performans Metrikleri	Elde Edilen Sonuçlar	Zayıf Yönler	Kullanılan Araçlar	Veri Seti
Muhammed ve Alwyn [16]	Düşük kaliteli parmak izi görüntüsü iyileştirme	Derin Evrişimli Sinir Ağı (DCNN)	PSNR, SSIM	daha iyi SSIM ve PSNR değerleri, SSIM: 98.53, PSNR: 34.05	Uzun süren eğitim	Verifinger SDK	FVC2002 DB1 SetA ve FVC2006 DB2
Engelsma vd. [17]	Parmak izi tanıma sistemleri için genel derleme	Minutiae tabanlı eşleştirme, derin öğrenme, MCC, DeepPrint	FAR, doğruluk	En güncel yöntemlerle yüksek doğruluk, %98,93 FAR, %99,48 doğruluk	Derin öğrenme yöntemlerinde eğitim veri ihtiyacı yüksek	Python, TensorFlow,	FVC, NIST veri setleri
Wahab vd. [18]	Bozulmuş ve eksik parmak izi kimlik tespiti	Minütia ve tabanlı ve generatif karşıt ağlar (GAN'lar), Eğri Gabor Filtresi	Parmak İzi Kimlik Doğrulama Doğruluğu, Minutiae Geri Kazanım Doğruluğu	%48 bir doğruluk ile latent parmak izi iyileştirme başarısı	Derin öğrenme modellerinde yüksek hesaplama maliyeti	PyTorch Çerçevesi, Verifinger SDK 12.1	FVC2002 Veri Tabanı, CASIA Gizli Parmak İzi ve CASIA-FingerprintV5 veri setleri
Martins vd. [19]	Adli sahnelerde gerçek zamanlı parmak izi eşleştirme	Gabor filtresi, Crossing Numbers, Poligon tabanlı minüsiye eşleştirme	Recall, Precision, EER	Gerçek zamanlı çalışabilen dayanıklı sistem, %94 doğruluk	Poligon oluşturma veri yoğunluğuna duyarlı	Python, MATLAB	FVC2000, FVC2002, FVC2004 (Açık kaynaklı veri seti)
Önerilen Çalışma (2025)	Parmak izi tanıma ve suç tespiti	OpenCV, Fourier dönüşümü, Histogram eşitleme	Doğruluk, FAR/FRR, PSNR	Önerilen yöntemin geliştirilmesi, %95.3 doğruluk oranı	Bazı özel durumlarda küçük dalgalanmalar olabilir.	OpenCV, Python, MATLAB	FVC2002, FVC2004 (Açık kaynaklı veri seti)

Sajjad vd. [13], çok faktörlü kimlik doğrulama sisteminde özellikle parmak izi güvenliğine odaklanmaktadır. Katman I'de, parmak izi tanıma için perseptüel hashing tekniği kullanılarak 64-bit benzersiz bir hash oluşturulur ve yerel bir veri tabanı ile karşılaştırılır; bu aşamada %100 doğruluk ve 0.44 saniyelik hızlı bir eşleştirme süresi elde edilmiştir. Katman II'de ise, silikon veya jelatin kalıplarla yapılan sahtecilik saldırılarını engellemek amacıyla GoogLeNet'ten esinlenilmiş bir Evrişimli Sinir Ağı (CNN) modeli kullanılmıştır. Bu anti-spoofing modeli, ATVS-FFp ve LivDet 2013 gibi kıyaslama veri kümeleri üzerinde test edilmiş ve sırasıyla %99.75 ve %97.5 gibi yüksek doğruluk oranları göstermiştir. Parmak izi anti-spoofing adımının sisteme eklenmesiyle genel doğruluk %52'den %76'ya yükselmiş, bu da biyometrik güvenlikteki

önemini vurgulamıştır. Tüm bu parmak iziyle ilgili deneyler, Python 3.5, Caffe framework ve Ubuntu 16.04 işletim sistemi yüklü bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Bian vd. [14], yönelim alanı (FOF) tahmini için gradient tabanlı, model tabanlı ve öğrenme tabanlı yöntemleri incelemiş; öğrenme tabanlı yaklaşımların düşük kaliteli izlerde %95 doğruluk ile daha iyi performans gösterdiğini rapor etmiştir. Ancak bazı yöntemlerde yüksek hesaplama yükü ve düşük genellenebilirlik sorunları gözlemlenmiştir. Çalışma Python ve MATLAB ortamlarında, kamuya açık FOE yarışma veri setleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, gerçek ve sahte parmak izlerini ayırt etmek için özel olarak tasarlanmış Slim-ResCNN adlı derin artık evrişimli sinir ağı tabanlı bir parmak izi canlılık tespit yöntemi önermektedir. Önerilen model, Parmak İzi Canlılık Tespit Yarışması

2017'de %95.25 genel doğrulukla birincilik elde etmiş ve LivDet2013, LivDet2015 ve LivDet2017 gibi standart veri kümelerinde yüksek performans göstermiştir [15]. Muhammed ve Pais [16] tarafından yayımlanan "Düşük Kaliteli Parmak İzi Görüntüsü İyileştirme" başlıklı çalışmada, Derin Evrişimli Sinir Ağı (DCNN) kullanılarak parmak izi görüntülerinin kalitesi artırılmıştır. Elde edilen PSNR değeri 34.05 ve SSIM değeri 98.53 olarak rapor edilmiştir. Bu iyileştirme, Verifinger SDK ile FVC2002 DB1 SetA ve FVC2006 DB2 veri setlerinde test edilmiştir. Ancak, modelin eğitim süreci uzun sürmektedir. Engelsma vd. [17] tarafından yapılan çalışmada ise geleneksel minutiae tabanlı yöntemler GPU destekli hızlandırma teknikleri ile entegre edilmiş, böylece eşleştirme süresi ciddi ölçüde azaltılmıştır. Bu yapı, uygulanabilirlik açısından da test edilmiş ve umut verici sonuçlar sunmuştur. Wahab vd. [18] kısmi ve lekeli parmak izlerinden (latent parmak izleri) şüphelilerin tespitindeki zorlukları ele almaktadır, zira mevcut yöntemler genellikle doğru tanıma için hayati önem taşıyan ince detayları (minutiae) göz ardı etmektedir. Bu sorunu çözmek için, modelin oluşturma süreci sırasında minutiae bilgisini doğrudan optimize ederek latent parmak izi iyileştirmeyi yeniden tanımlayan, Üretken Çekişmeli Ağları (GAN'lar) kullanan yeni bir yaklaşım önermektedir. Yapılan kapsamlı değerlendirmeler, bu yöntemin mevcut en gelişmiş tekniklere göre üstün olduğunu göstermiş ve latent parmak izi tanıma doğruluğunu önemli ölçüde artırma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamıştır, önerilen model %48'lik bir doğruluk oranına ulaşırken, karşılaştırılan FingerGAN modeli %35 doğruluk elde etmiştir. Tüm bu çalışmalar göstermektedir ki parmak izi tanıma sistemlerinde doğruluk oranını artırmak için derin öğrenme, geleneksel yöntemlerle birlikte hibrit olarak kullanılmakta; görüntü kalitesi, veri seti çeşitliliği ve işlem süresi sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Önerilen çalışmanın literatüre katkısı ise, iz yönü destekli çok aşamalı bir model sunması, işlem süresi–doğruluk dengesini sağlaması ve ticari sistemlerin ötesinde esnek bir çözüm ortaya koyması açısından özgün bir konumda yer almaktadır. Martins vd. [19], adli parmak izi eşleştirmede gerçek zamanlı ve doğru sonuçlar veren bir yöntem önermektedir. Yöntem, minutiae noktalarını çokgen tabanlı modellerle temsil ederek yanlış minutialara ve görüntü döndürmelerine karşı dayanıklılık sağlar. Sonuçlar, standart donanım üzerinde etkili çalıştığını ve manuel doğrulama ihtiyacını azalttığını göstermektedir.

Bu çalışma hem klasik görüntü işleme tekniklerinin hem de yönelge (ridge orientation) analizinin avantajlarını birleştirerek, düşük kaliteli verilerde dahi yüksek doğrulukla çalışabilen, hesaplama açısından optimize edilmiş bir parmak izi tanıma sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmanın özgün katkıları aşağıda sıralanmıştır:

- Düşük kaliteli ve bozulmuş parmak izi görüntülerini iyileştiren Fourier dönüşümü ve histogram eşitleme temelli ön işleme adımları geliştirilmiştir.
- Minutiae eşleşmesine ek olarak yönelge haritaları (ridge orientation) üzerinden analizle hibrit model oluşturularak eşleştirme hassasiyeti artırılmıştır.

- Özellik vektörlerinin kuantizasyonu sayesinde büyük veri tabanlarında hızlı karşılaştırma yapılabilen sayısallaştırılmış temsil yapısı tasarlanmıştır.
- Grafiksel kullanıcı arayüzü ile kullanıcı etkileşimi yüksek, operasyonel kullanıma uygun sistem tasarımı yapılmıştır.
- Geliştirilen modelin doğruluk, FAR/FRR, işlem süresi gibi metriklerde mevcut yöntemlere kıyasla başarısı deneysel olarak gösterilmiştir.
- Farklı çözünürlük ve bozulma senaryolarını içeren çeşitli veri setleri ile test edilerek modelin genellenebilirliği test edilmiştir.
- Görüntü işleme kalitesine yönelik değerlendirmelerde, önerilen sistemin PSNR değeri açısından en yüksek skorları üretmesi sağlanmış ve görüntü bütünlüğü başarıyla korunmuştur.
- SIFT algoritması ile yapılan karşılaştırmalı analizde, önerilen modelin %67 daha kısa işlem süresi ile daha hızlı ve verimli çalıştığı deneysel olarak ortaya konmuş; bu sayede kaynak dostu bir çözüm sunulmuştur.

Makalenin devamı şu şekilde yapılandırılmıştır: Materyal ve metod başlığında kullanılan veri setlerinin özellikleri, çeşitliliği ve yöntemimizi zorlayacak örnekler içermesiyle birlikte; sistemin mimarisi, matematiksel modeli ve kullanıcı arayüzü detayları sunulacaktır. Bulgular ve tartışma bölümünde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, test senaryoları, performans değerlendirme kriterleri ve grafiksel analizler aracılığıyla sistemin başarımı ortaya konacaktır. Ayrıca Tartışma alt başlığı ile bu kısımda, çalışmanın zaman karmaşıklığı, zorlu koşullar altındaki gözlemler ve öne çıkan teknik değerlendirmeler ele alınacaktır. Sonuçlar başlığı altında çalışmanın genel özeti, yöntemin güçlü yönleri, sistemin sağladığı teknik kazanımlar ve performans çıktıları değerlendirilerek öne çıkan bulgular vurgulanacaktır. Son olarak, çalışmanın gelecekte nasıl geliştirilebileceği, hangi tür deney ve veri setlerinin değerlendirilebileceği ve sistemin daha üst düzey uygulamalara nasıl uyarlanabileceği yönünde yapıcı gelecek planlarına yer verilecektir.

2 Materyal ve metod

Bu bölümde önerilen parmak izi tanıma sisteminin genel yapısı, kullanılan veri setleri, algoritmik süreçler, matematiksel modeller ve grafiksel kullanıcı arayüzüne ilişkin ayrıntılar sunulmaktadır. Sistem mimarisi; veri kalitesini artıran ön işlemler, iz yönü haritalama, minutiae çıkarımı, kuantizasyon ve eşleştirme süreçlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, geliştirilen sistem, düşük kaliteli ve bozulmuş görüntülerde yüksek doğruluk sağlamayı hedeflemektedir.

2.1 Kullanılan veri setleri

Sistem performansının farklı koşullarda değerlendirilmesi amacıyla Tablo 2'de gösterilen açık erişimli, düşük gürültülü veri seti FVC2002 [20] ve açık erişimli, yüksek zorluk seviyeli veri seti FVC2004 [21], veri

setleri kullanılmıştır. Bu veri setleri, parmak izi tanıma sistemlerinin doğruluğunu değerlendirmek üzere geliştirilmiş, farklı sensör tiplerini ve zorluk düzeylerini içeren uluslararası standart veri kümeleridir [22].

Tablo 2. Veri setleri ve özellikleri

Veri Seti	Toplam Örnek	Kişi Sayısı	Görüntü Formatı	Sensör Türü	Zorluk Düzeyi
FVC2002	3.200	110	TIFF	Optik + kapasitif	Orta
FVC2004	3.200	100	BMP / TIFF	Sentetik + optik	Yüksek (bozulmalı)

Her birey için farklı parmak izi alınmış ve farklı açılarda, değişen parmak basınçlarıyla üretilmiş görüntüler sisteme uygulanmıştır. FVC2004 veri setinde bulunan sentetik veriler, sistemin **gürültü, yönsel sapma, düşük kontrast** gibi zorlayıcı durumlara verdiği tepkinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu çeşitlilik sayesinde geliştirilen modelin **genellenebilirliği** detaylı biçimde test edilmiştir. Ayrıca çeşitlilik, geliştirilen sistemin farklı koşullara karşı dayanıklılığını ve genellenebilirliğini değerlendirmek için önemlidir.

Aşağıda detayları ile verilen **Tablo 3**'te veri setlerinin özellikleri yer almaktadır. Bu tabloda her bir veri setinin içerikleri başlıklar halinde net olarak verilmiştir. Ayrıca içeriklerin kendilerine özgü özellikleri de beraberinde verilmiştir.

Tablo 3. Her bir veri setinin içeriği ve özellikleri

Veri Seti	Sensör Tipi	Çözünürlük	Görüntü Sayısı	Özellikler
DB1_B	Optik Sensör	388×374 px	800	Yüksek kaliteli, düşük gürültü
DB2_B	Kapasitif Sensör	296×560 px	800	Orta kontrast, hafif bozulmalar
DB3_B	Termal Sensör	300×300 px	800	Gürültülü, düşük kontrast
DB4_B	Sentetik (Yapay)	288×384 px	800	Desen bozulmaları içeren yapay veriler

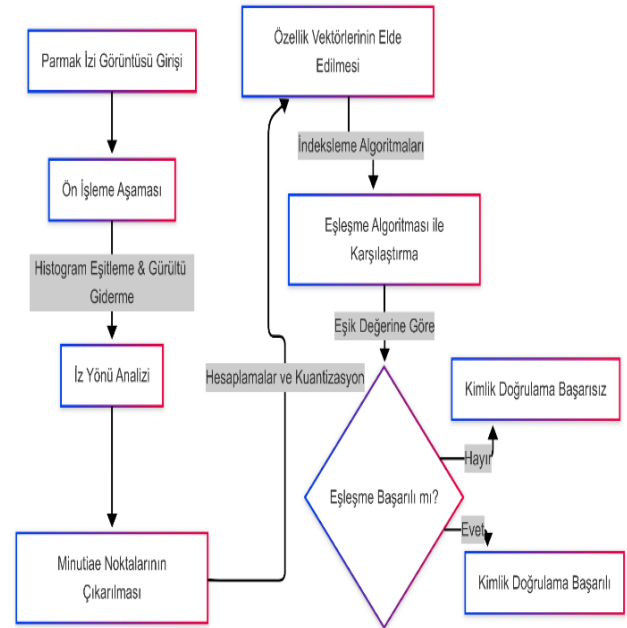
Bu çalışmada hem FVC2002 hem de FVC2004 Fingerprint Verification Competition (FVC) yarışmaları kapsamında sunulan parmak izi veri setleri kullanılmıştır. Her bir yarışma dört ayrı alt veri tabanından oluşmaktadır: DB1, DB2, DB3 ve DB4. Bu alt kümeler sensör özelliklerine göre farklılık göstermekte olup, sistemin farklı görüntü kaliteleri ve yapısal varyasyonlar karşısındaki başarımını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. [Tablo 3](#)'te sunulan

DB1_B, DB2_B, DB3_B ve DB4_B ifadeleri, FVC2002 veri setine ait alt veri tabanlarının 'B' serisi (test seti) verilerini ifade etmektedir. FVC2002 yarışmasında her alt veri tabanında (ör. DB1) toplamda 800 görüntü bulunmaktadır: 100 kullanıcı $\times$ 8 parmak izi. Bu görüntülerin yarısı "A" seti (kayıt kümesi), diğer yarısı ise "B" seti (test kümesi) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada yalnızca B seti (DB*_B) kullanılmıştır. Dolayısıyla FVC2002 için toplam $4 \times 800 = 3200$ görüntü üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Aynı şekilde, FVC2004 veri seti de benzer yapıya sahiptir. Kullanılan veri setleri açık erişimlidir.

2.2 Sistem mimarisi

Önerilen sistemin genel akışı, **Şekil 3**'te gösterilen mimariye dayanmaktadır. Sistem dört temel modülden oluşmaktadır:

- (i) Görüntü ön işleme,
- (ii) Yön haritalama ve minutiae çıkarımı,
- (iii) Sayısallaştırma ve vektör temsili oluşturma,
- (iv) Eşleştirme ve karar verme.



Şekil 3. Problemin çözümüne yönelik akış diyagramı

Geliştirilen sistemin ön işleme aşamasında histogram eşitleme, Fourier dönüşümü ve morfolojik işlemler ile görüntü kalitesi artırılmakta; ardından iz yönü bilgisi ve minutiae çıkarımıyla birlikte biyometrik özellikler detaylı biçimde analiz edilmektedir. Özellik çıkarımı sonrası gerçekleştirilen kuantizasyon işlemi ile bu veriler vektör yapısına dönüştürülmekte ve hızlı karşılaştırma yapılabilmesi sağlanmaktadır. Sistem, FVC2002 ve FVC2004 gibi farklı kalitedeki veri setleri üzerinde test edilmiş ve doğruluk oranı ortalama %95.3 olarak elde edilmiş ve kullanıcı dostu bir grafiksel arayüz (GUI) ile desteklenen sistem, operasyonel kullanım açısından da erişilebilir ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, sistem performansı FAR ve FRR metrikleri ile değerlendirilmiştir.

- **Görüntü Ön İşleme:** Histogram eşitleme ve FFT filtreleme ile kontrast artırılmış, Gaussian ve medyan filtrelerle gürültü azaltılmıştır.
- **Yön Haritası (Orientation Field):** Her 16×16 piksellik blok için iz yönü belirlenmiş, bu bilgi minutiae analizine kılavuzluk etmiştir.
- **Minutiae Çıkarımı:** Thinning ve ikileştirme adımları sonrası 9 piksellik komşuluk incelemesi ile uç ve çatallanma noktaları tespit edilmiştir [23].
- **Sayısallaştırma ve Kuantizasyon:** Elde edilen özellikler, vektörleştirilerek belirli aralıklarla kuantize edilmiş ve karşılaştırma için normalize edilmiştir.
- **Eşleştirme:** Öklidyen mesafeye ve yönelime dayalı benzerlik skorları hesaplanarak eşleşme kararı verilmiştir.

2.2.1 Sistem modeli (Matematiksel temel)

Sistemin matematiksel modellemesi aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır:

- Histogram Eşitleme:

$$I_{eq}(x, y) = HE(I(x, y)) \quad (1)$$

Burada HE histogram eşitleme fonksiyonudur.

- Yön Açısı Hesaplama:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \sum G_x G_y}{\sum G_x^2 - \sum G_y^2} \right) \quad (2)$$

Burada G_x ve G_y , görüntünün x ve y doğrultusunda türevleridir.

- Minutiae Vektör Temsili:

Her minutiae noktası için:

$$M_i = [x_i, y_i, \theta_i, t_i] \quad (3)$$

Şeklinde bir yapı oluşturulmuştur. Burada t_i uç/çatallanma türünü belirtir.

- Benzerlik Fonksiyonu:

$$S(M, M') = \frac{\sum_{i,j} \delta(M_i, M'_j)}{\min(|M|, |M'|)} \quad (4)$$

Burada δ , iki minutiae'nin eşleşme kriterlerini karşılayıp karşılamadığını kontrol eder.

Bu yapı sayesinde sistem hem hesaplama verimliliği sağlar hem de minutiae yönelimi ve dağılımını sayısal olarak değerlendirerek daha sağlam kararlar üretir [24].

2.3 Sistem performans değerlendirme parametreleri

Önerilen sistemin değerlendirilmesi için literatürden sıklıkla kullanılan performans metrikleri aşağıdaki gibidir:

Tablo 4. Performans değerlendirme parametreleri

Parametre	Açıklama	Hesaplama
Doğruluk (%) [25]	Toplam eşleşme içinde doğru eşleşmelerin oranı.	$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100 \quad (5)$
FAR [25]	Sistemin yanlışlıkla yetkisiz kullanıcıyı kabul etme oranı.	$FAR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (6)$
FRR [25]	Sistemin kayıtlı kullanıcıyı reddetme oranı.	$FRR = \frac{FN}{TP + FN} \quad (7)$
Süre (ms) [2]	Bir eşleşme işleminin ortalama süresi (milisaniye cinsinden)	Ölçülerek doğrudan alınır.
PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) [26]	İki görüntü arasındaki farkı logaritmik ölçekte ifade eder; daha yüksek değer daha iyi kaliteyi gösterir.	$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (8)$
SSIM (Structural Similarity Index) [27]	İki görüntü arasındaki yapısal benzerliği değerlendirir; 1'e ne kadar yakınsa o kadar benzer.	$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (9)$

Tablo 4'te bahsedilen:

- **TP:** True Positive/Gerçek Pozitif (Sistem, gerçekten kayıtlı olan bir parmak izi örneğini doğru şekilde tanıdığına bu bir true positive olur. Yani eşleşme

işlemi doğrudur ve sistem doğru bir kabul kararı vermiştir. Örneğin: Sistemde kayıtlı bir kullanıcı yeniden parmak izi verdiğiğinde sistem onu tanır.)

- **TN:** True Negative/Gerçek Negatif (Sistem, sistemde kayıtlı olmayan bir parmak izini doğru şekilde reddettiğinde bu bir true negative olarak değerlendirilir. Bu durumda sistem güvenliği başarıyla sağlamış olur. Örneğin: Sistemde kayıtlı olmayan biri tanınmak istiyor ve sistem onu reddediyor.)
- **FP:** False Positive/Yanlış Pozitif (Sistem, kayıtlı olmayan bir kullanıcıyı yanlışlıkla kabul ettiğinde bu durum false positive olarak adlandırılır. Bu, biyometrik sistemler açısından ciddi bir güvenlik açığıdır. Örneğin: Sistemde kayıtlı olmayan biri sisteme giriş yapar ve sistem onu tanıdığını sanır.)
- **FN:** False Negative/Yanlış Negatif (Sistem, kayıtlı bir kullanıcıyı tanıyamaz ve yanlış şekilde reddederse, bu false negative olur. Bu da sistemin erişilebilirliği açısından bir olumsuzluktur. Örneğin: Sistemde kayıtlı bir kullanıcı giriş yapar ama sistem onu reddeder.)
- μ_x, μ_y : Ortalama yoğunluk
- σ_x^2, σ_y^2 : Varyans
- $2\sigma_{xy}$: Kovaryans
- C_1, C_2 : Sabit değerler

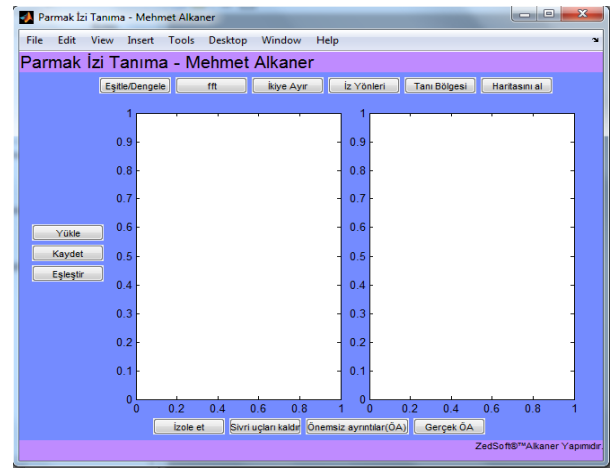
2.4 Sistem arayüzü

Geliştirilen sistem, Matlab ortamında kullanıcı dostu bir arayüz ile tamamlanmıştır. Şekil 4'te gösterilen GUI tasarımı, kullanıcıya parmak izi tanıma sürecinin tüm

adımlarını görselleştirme ve yönetme imkânı sunar. Temel işlevler şunlardır:

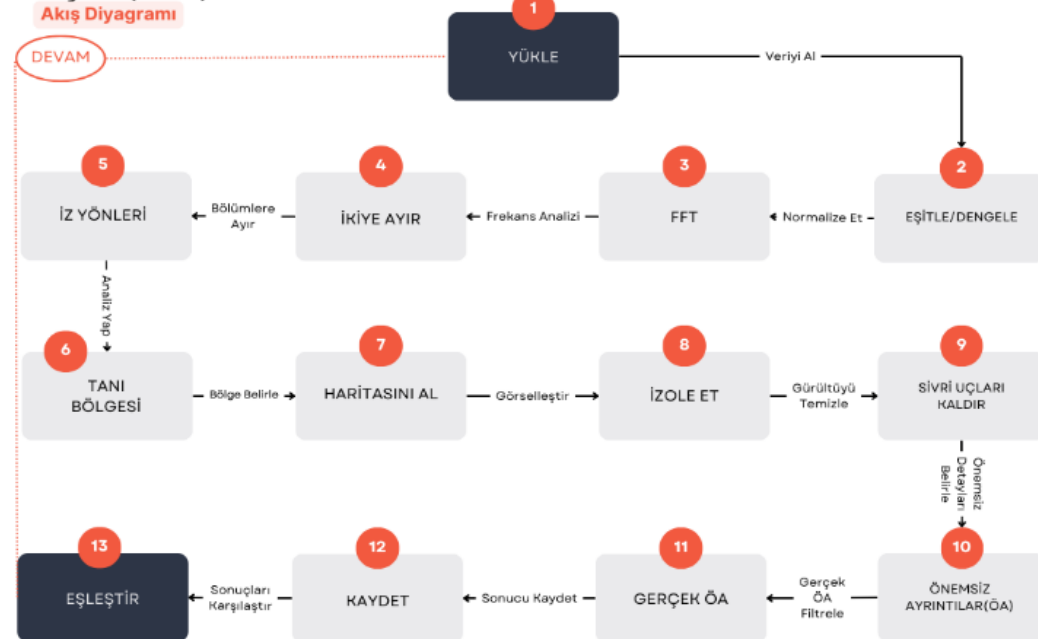
- Giriş görüntüsünü yükleme ve ön izleme,
- Görüntü üzerinde yapılan işlemlerin (filtreleme, eşitleme, yön haritalama) görselleştirilmesi,
- Minutiae noktalarının otomatik veya manuel olarak gösterilmesi,
- Farklı eşleştirme sonuçlarının skorları ile grafiksel karşılaştırması.

Bu arayüz, sistemin hem akademik testlerde hem de adli olay analizlerinde kullanılabilirliğini artırmaktadır. Özellikle uzman operatörler için sonuçların manuel doğrulanabilir olması önemli bir avantaj sağlamaktadır [2].



Şekil 4. Geliştirilen parmak izi tanıma GUI arayüzü

Arayüz(GUI)



Şekil 5. Çalışmanın GUI akış diyagramı

Şekil 5'te GUI'ye ait akış diyagramında da görüldüğü üzere geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü, MATLAB ortamında yapılandırılmış olup, kullanıcının parmak izi işleme sürecini adım adım takip edebilmesini ve gerektiğinde müdahale edebilmesini sağlayan etkileşimli bir yapı sunmaktadır. Uygulama başlatıldığında MATLAB ortamı temizlenmekte ve grafik eksenleri ile butonlar, metin kutuları ve diğer kullanıcı arayüzü bileşenleri tanımlanarak sistem hazır hâle getirilmektedir.

Süreç, kullanıcının "Yükle" butonuna tıklaması ile başlar. Bu adımda kullanıcıdan bir parmak izi görüntüsü alınarak ilk eksen üzerine çizilir ve sistemin görsel başlığı "Parmak İzi Yüklendi" olarak güncellenir. Ardından kullanıcı sırasıyla görüntü işleme adımlarını tetikleyebilmektedir. "Eşitle/Dengele" butonu ile, sistemde yüklü olan Image Processing Toolbox kullanılarak histogram eşitleme gerçekleştirilir ve ikinci eksen üzerinde sonuç görselleştirilir. Devamında "FFT" butonu ile kullanıcıdan bir FFT faktörü alınarak frekans tabanlı iyileştirme uygulanmakta, işlem sonucu görselleştirilmekte ve ilgili başlık güncellenmektedir.

Kullanıcı isterse "İkiye Ayır" adımıyla adaptif eşikleme işlemini uygulayabilir. Daha sonra "İz Yönleri" seçeneği ile parmak izinin oryantasyon haritası elde edilmekte ve sistem bu yön bilgilerini ikinci eksen üzerine yansıtmaktadır. "Tanı Bölgesi" (ROI) seçimi sayesinde kullanıcı, özel bir ilgi bölgesini manuel olarak belirleyebilir ve bu bölge analiz için ayrılabilir.

İz haritasının daha sağlıklı çıkarılabilmesi adına, "Haritasını Al" seçeneği ile morfolojik işlemler kullanılarak izler inceltilmekte ve ardından "İzole Et" butonu ile görüntüdeki istenmeyen gürültü temizlenmektedir. Sistem, işlem sonrası "Gürültü Temizlendi" başlığı ile kullanıcıya bilgi verir. Daha detaylı işleme geçildiğinde, "Sivri Uçları Kaldır" fonksiyonu ile iz üzerindeki keskin, anlamsız çıkıntılar filtrelenir. "Önemsiz Ayrıntılar (ÖA)" adımıyla sistem tüm minutiae noktalarını tespit ederken, "Gerçek ÖA" seçeneği ile sahte olan minutiae'ler ayıklanarak yalnızca gerçek olanlar bırakılır.

İşlemler tamamlandıktan sonra kullanıcı, "Kaydet" butonunu kullanarak elde edilen minutiae verilerini bir şablon dosyasına kaydedebilir. Son olarak, "Eşleştir" adımı ile iki farklı parmak izi şablonu yüklenerek minutiae noktalarına göre benzerlik oranı hesaplanır ve sistem, sonuçları kullanıcıya metinsel olarak sunar.

Literatürde yaygın olarak kullanılan GUI destekli parmak izi işleme sistemleri, genellikle sınırlı düzeyde kullanıcı etkileşimi sunmakta ve çoğu zaman yalnızca otomatikleştirilmiş sonuçlara odaklanmaktadır. Geliştirilen sistemin arayüzü ise, yalnızca görselleştirme değil, aynı zamanda manuel müdahaleye açık, çok aşamalı işlem kontrolü sağlayan, hata ayıklama ve manuel doğrulama olanağı sunan etkileşimli bir yapıya sahiptir. Bu sayede, özellikle adli bilişim uygulamalarında uzman kullanıcıların ihtiyaç duyduğu ince ayar ve gözle kontrol imkânı sağlanmakta, geleneksel "kara kutu" mantığının dışına çıkmaktadır. Ayrıca, farklı eşik değerleri ile test edilebilirlik, ROI (Region of Interest) seçimi, iz yönlerinin

elle kontrolü ve gerçek/sahte minutiae ayrımı gibi özelliklerle donatılmış bu arayüz hem araştırma hem de operasyonel kullanım senaryolarında literatürdeki araçlara göre daha yüksek şeffaflık ve denetlenebilirlik sunmaktadır.

Bu yapı sayesinde geliştirilen sistem hem eğitim amaçlı hem de adli analiz süreçlerinde kullanılabilecek; adım adım izlenebilir, kullanıcı müdahalesine açık ve görsel olarak desteklenmiş bir platform haline gelmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, önerilen parmak izi tanıma sisteminin başarımını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel bulgular ve analizler detaylandırılmaktadır. Deneyler, farklı koşullarda alınmış veri kümeleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve modelin doğruluk, işlem süresi, FAR ve FRR gibi önemli metrikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

3.1 Deneysel ortam

Testler, yüksek işlem gücüne sahip bir sistemde yürütülmüştür. Kullanılan donanım: Intel Core i7-12700H işlemci, 16 GB RAM ve Windows işletim sistemi. Yazılım tarafında ise; Python 3.9, MATLAB, OpenCV [28], NumPy [29], Scikit-learn [30] kütüphaneleri tercih edilmiştir.

3.2 Test senaryoları

Geliştirilen modelin farklı durumlar altındaki performansını ölçmek için aşağıdaki test senaryoları oluşturulmuştur:

- Gürültülü Parmak İzi Tanıma: Gauss ve tuz-biber gürültüsü eklenmiş görüntüler ile test edilmiştir.
- Kısmi ve bozulmuş izler ile tanıma: Görüntülerin sadece belli bölgeleri kullanılmıştır.
- Çeşitli sensör kaynaklarıyla karşılaştırmalı testler.

Bu testler, sistemin gürültüye karşı oldukça toleranslı olduğunu göstermektedir. Bu testleri daha iyi ve daha doğru anlayabilmek için gürültü seviyelerine doğruluk, FAR, FRR, PSNR ve SSIM değerlerine göre elde edilen sonuçlar tablo hâlinde yapılandırılmış ve karşılaştırmalı biçimde örnek bir test senaryosu için gürültü seviyelerine göre elde edilen performans metrikleri ile birlikte **Tablo 5'**te sunulmuştur:

Tablo 5. Veri setleri ve özellikleri

Gürültü Seviyesi	Doğruluk (%)	FAR	FRR	PSNR (dB)	SSIM
Orijinal (Gürültüsüz)	95.3	0.02	0.05	28	0.85
Hafif Gauss Gürültüsü	92.5	0.03	0.06	26.5	0.82
Orta Gauss Gürültüsü	89.8	0.04	0.08	24.3	0.79

Bu çalışmada önerilen modelin doğruluk performansı, farklı kalite düzeylerine sahip FVC2002 ve FVC2004 veri setleri üzerinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; FVC2002 veri setinde doğruluk oranı %96.8 olarak ölçülmüş, bu oran FVC2004 veri seti için %95.3

olarak gerçekleştirilmiştir. FVC2002 seti nispeten daha az bozulma içeren ve daha yüksek kaliteye sahip görüntüler barındırırken, FVC2004 seti düşük kontrast, yönelme bozuklukları ve sentetik gürültüler gibi daha zorlu koşulları içermektedir. Bu nedenle, sistemin zorlu senaryolara karşı dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla, gürültü seviyesi analizleri **Tablo 5**'te FVC2004 veri seti baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5'te sunulan "Orijinal (Gürültüsüz)" satırındaki %95.3 doğruluk değeri, FVC2004 veri setinin bozulmamış (orijinal) sürümleri kullanılarak elde edilmiştir. Diğer satırlarda ise, aynı veri seti üzerinde farklı düzeylerde gürültü eklenerek sistemin performans değişimi test edilmiştir. Dolayısıyla, **Tablo 5**'teki sonuçlar, FVC2004 veri seti üzerinde yürütülen ve sistemin gürültüye karşı dayanıklılığını ortaya koyan test senaryolarına dayanmaktadır.

Bu bağlamda; metin içerisinde belirtilen %96.8 ve %95.3 doğruluk oranları, iki farklı veri seti üzerinden yapılan bağımsız değerlendirme sonuçlarıyken, **Tablo 5** özel olarak FVC2004 veri seti kapsamında gürültü bazlı senaryoları temsil etmektedir. Her iki yaklaşım birlikte ele alındığında, geliştirilen sistemin hem genel doğruluk hem de zorlayıcı durumlara karşı kararlılık açısından başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

3.3 Karşılaştırmalı performans analizi

Literatürdeki güncel yöntemlerle önerilen model arasında yapılan karşılaştırmalar, sistemin başarımını çok boyutlu olarak ortaya koymaktadır. Özellikle son dönemde yaygınlaşan CNN tabanlı derin öğrenme modelleri, yüksek doğruluk oranlarına ulaşmakla birlikte; eğitim süresi, veri gereksinimi ve açıklanabilirlik açısından çeşitli sınırlılıklar barındırmaktadır [9-11]. Önerilen model, klasik görüntü işleme yaklaşımlarını yön bilgisiyle birleştirerek hem hesaplama verimliliği sağlamış hem de düşük kaliteli verilerde yüksek genel geçerlik göstermiştir.

Karşılaştırmalı analizler, aynı veri setleri (FVC2002, FVC2004) üzerinde yürütülmüş ve doğruluk, FAR, FRR, PSNR, SSIM ve işlem süresi gibi metrikler temelinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen modelin %95.3 doğruluk oranı ve 200 ms işlem süresi ile, SIFT, ORB gibi geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli çalıştığını; derin öğrenme temelli çözümlerle karşılaştırıldığında ise daha düşük donanım ihtiyacı, açıklanabilir yapı ve daha dengeli performans sunduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda önerilen yaklaşım hem akademik hem de operasyonel uygulamalarda gerçek zamanlı biyometrik tanıma sistemleri için güçlü bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca **Tablo 5** ve **Şekil 7-8**'de gösterilen sonuçlar, önerilen sistemin literatürdeki yöntemlerle kıyaslandığında daha istikrarlı ve pratik bir çözüm sunduğunu nicel olarak ortaya koymaktadır.

Önerilen model, literatürde yaygın olarak kullanılan beş farklı yöntem ile karşılaştırılmıştır: Histogram Eşitleme, Fourier Dönüşümü, SIFT, ORB ve ticari biyometrik sistemler (örneğin, FVC yarışmalarında kullanılan endüstriyel SDK'lar ve donanım temelli sistemler) [25]. **Tablo 6** bu karşılaştırmayı özetlemektedir.

"Ticari Sistemler" başlığı altında, FVC yarışmaları kapsamında sıklıkla referans olarak kullanılan ve yaygın biçimde alanda kullanılan SDK tabanlı sistemlerden biri olan VeriFinger SDK (Neurotechnology) kullanılmıştır. Bu sistem, kapalı kaynaklı ticari bir çözüm olup; FVC2002 ve FVC2004 veri setleri ile uyumlu test senaryoları üzerinden değerlendirilmiştir. İlgili yazılım, üretici tarafından sağlanan demo lisans aracılığıyla kullanılmış; testler, önerilen sistem ile aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bu seçim, mevcut piyasadaki referans sistemlerle önerilen yöntemin performansını nesnel biçimde kıyaslama amacı taşımaktadır. Ticari sistem olarak, Neurotechnology tarafından geliştirilen VeriFinger SDK 12.3 kullanılmıştır. Karşılaştırmalar, demo sürüm üzerinden aynı veri setleri kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 6. Farklı yöntemlerin performans karşılaştırması

Yöntem	Doğruluk (%)	FAR	FRR	Süre (ms)	PSNR (dB)	SSIM
Histogram Eşitleme	85	0.05	0.10	300	22	0.75
Fourier Dönüşümü	88	0.04	0.09	280	24	0.78
SIFT	80	0.07	0.12	600	21	0.73
ORB	78	0.10	0.15	180	19	0.71
Ticari Sistemler	90	0.03	0.07	250	26	0.82
Önerilen Model	95.3	0.02	0.05	200	28	0.85

Tablo 6'da sunulan karşılaştırmalı değerlendirme, parmak izi tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan temel yöntemlerin ve önerilen modelin çeşitli performans metrikleri açısından analitik biçimde kıyaslanmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda, karşılaştırma süreci boyunca tüm algoritmalar, FVC2004 veri seti kullanılarak aynı koşullar altında test edilmiş; böylelikle yöntemler arası nesnel bir karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. Tabloda yer alan her bir satır, belirli bir yöntem akışına karşılık gelmektedir. Histogram Eşitleme ve Fourier Dönüşümü satırlarında, yalnızca söz konusu görüntü iyileştirme adımı uygulanmış, ardından ortak bir temel minutiae çıkarma süreci ve eşleştirme algoritması ile sistemin performansı ölçülmüştür. Bu durumda elde edilen doğruluk, FAR, FRR ve benzeri metrikler, ilgili yöntemin sistem performansına olan katkısını bağımsız olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Benzer şekilde, SIFT ve ORB yöntemleri kendi tanımlayıcı üretim ve eşleştirme yapılarına sahip olduklarından, sistem mimarisinden bağımsız şekilde, doğrudan kendi algoritmalarına özgü çıktılar kullanılarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla bu yöntemlerde, klasik ön işleme adımlarından ziyade, doğrudan kendi yapılarına özgü tanımlayıcıların oluşturulması ve karşılaştırılması yoluyla sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, SIFT algoritmasında ölçek ve dönme uyumlu anahtar noktalar üzerinden tanımlayıcı

vektörler oluşturulmuş; ORB yönteminde ise FAST ve BRIEF tabanlı ikili tanımlayıcılar kullanılmıştır. Bu yöntemlerin performans metrikleri, kendi içsel eşleştirme yaklaşımları temel alınarak hesaplanmıştır. Ticari Sistemler başlığı altında yer alan satır ise, kapalı kaynaklı ve SDK tabanlı bir referans sistemin (VeriFinger SDK 12.3) FVC2004 veri seti üzerindeki çıktıları doğrultusunda elde edilen sonuçları yansıtmaktadır. Bu sistem, üretici tarafından sağlanan test ortamında demo lisans ile çalıştırılmış ve önerilen model ile aynı koşullar altında test edilmiştir.

Önerilen Model satırı ise çalışmada geliştirilen sistemin tamamlayıcı tüm modüllerini içeren, bütünsel bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu yapı; histogram eşitleme, Fourier dönüşümü, yön haritası oluşturma, minutiae çıkarımı, vektör kuantizasyonu, normalize edilmiş karşılaştırma ve yönelime duyarlı eşleştirme süreçlerini içeren çok aşamalı bir tanıma zinciri üzerine inşa edilmiştir. Sistem çıktıları, bu bütünsel yapı temelinde elde edilmiştir. Bu bağlamda, Tablo 6 yalnızca ön işleme yöntemlerinin bağımsız başarısını değil, aynı zamanda alternatif yaklaşımların ve önerilen modelin bütünsel sistem performansı üzerindeki etkilerini kıyaslamaya imkân vermektedir. Böylece, önerilen modelin literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel ve ticari yöntemlere kıyasla hem doğruluk oranı hem de işlem süresi gibi kritik metriklerde kayda değer üstünlük sunduğu sayısal verilerle ortaya konmuştur.

Sonuçlar, önerilen modelin tüm metriklerde diğer yöntemlerden üstün performans sergilediğini göstermektedir. Önerilen modelin bu parametreler açısından önemine değineceksek olursak; Önerilen model, SIFT ve ORB gibi geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk oranı (%95.3), daha düşük FAR (%0.02) ve FRR (%0.05) değerleri ile dikkat çekmektedir. Aynı zamanda PSNR ve SSIM değerleri, görüntü işleme aşamalarının kalitesini ortaya koymakta; önerilen sistemin özellikle düşük kaliteli veya bozulmuş izlerde bile güvenilir eşleşme sağladığını göstermektedir.

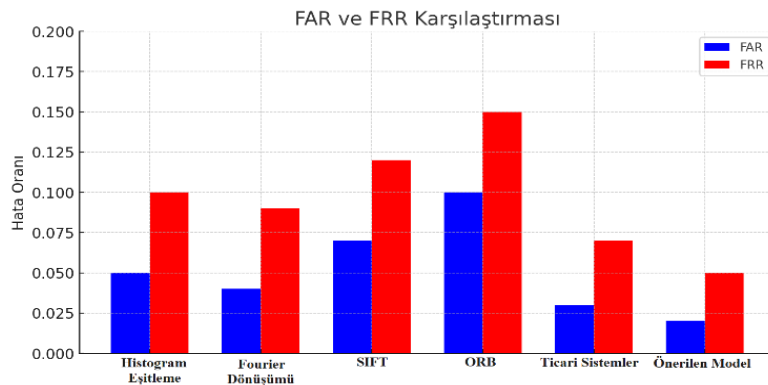
3.4 Grafiksel analizler

Grafiksel analizler sonucunda elde edilen Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de, önerilen sistemin farklı yöntemlerle karşılaştırmalı olarak başarımını görselleştirmektedir. Bu grafiklerin tümü, FVC2004 veri seti kullanılarak elde edilen deneysel veriler doğrultusunda hazırlanmıştır. Bu tercih, veri setinin içerdiği yüksek bozulma oranı, düşük kontrastlı görüntüler ve yönelime bağlı sapmalar gibi zorlukları barındırması nedeniyle, sistemin dayanıklılık analizinde daha gerçekçi ve stresli senaryolar sunması bağlamında yapılmıştır. Özellikle Şekil 6’da FAR–FRR eğrisi, önerilen sistemin farklı eşik değerleri karşısındaki hata oranı dengesini göstermekte; Şekil 7’de doğruluk oranlarının, Şekil 8’de ise işlem sürelerinin farklı yöntemler arasında karşılaştırması sunulmaktadır. Bu bağlamda, grafiklerde yer alan doğruluk oranı %95.3 olarak ifade edilmiştir. Söz konusu değer, FVC2004 veri setinin orijinal ve gürültüsüz alt kümesi üzerinde önerilen yöntemin ortalama başarımını yansıtmaktadır.

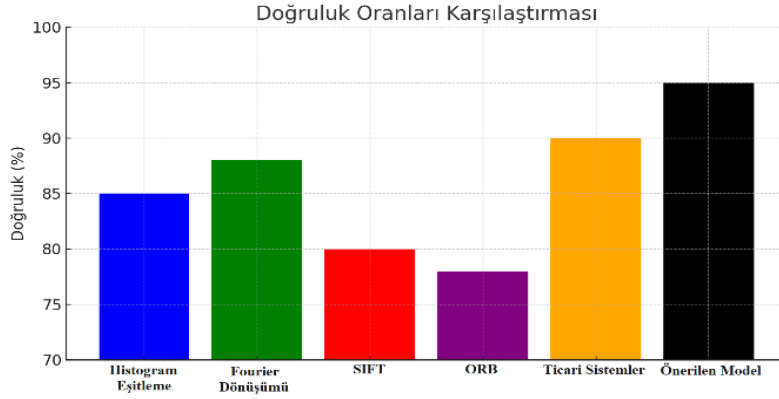
FVC2002 veri seti, daha az bozulma ve daha yüksek kontrast gibi daha elverişli koşullara sahip olduğundan, bu veri setinde elde edilen %96.8 doğruluk oranı daha yüksektir. Ancak grafiksel analizlerde özellikle zorlu senaryolarda sistemin istikrarını değerlendirmek hedeflenmiştir. Bu nedenle grafiksel karşılaştırmalar yalnızca FVC2004 verisi üzerinden gerçekleştirilmiş, FVC2002’ye ait doğruluk değerleri ise metin içerisinde sayısal olarak rapor edilmiştir. Böylece, önerilen sistemin hem ideal hem de zorlayıcı koşullardaki başarımı birbirini tamamlayıcı biçimde sunulmuştur.

Şekil 6’da modelin eşik değerine göre FAR ve FRR eğrilerini gösteren grafik yer almaktadır. Grafik, sistemin optimum eşik değerinde en düşük hata oranlarını elde ettiğini ortaya koymaktadır.

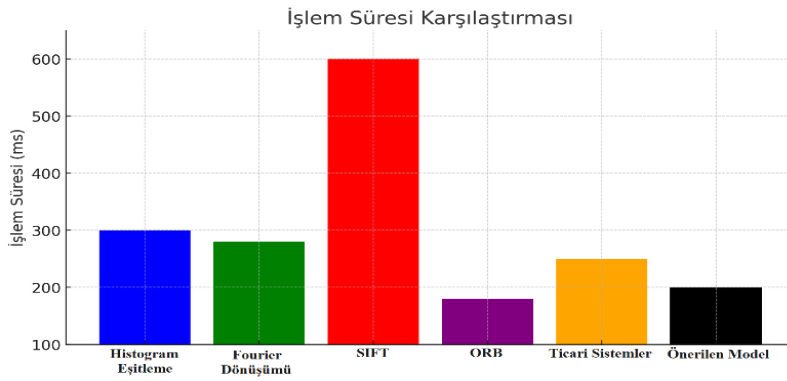
Ayrıca doğruluk oranlarının ve işlem sürelerinin karşılaştırmalı grafiklerinde de önerilen modelin tutarlı bir şekilde diğer yöntemlerin üzerinde performans sunduğu görülmektedir.



Şekil 6. FAR ve FRR karşılaştırması



Şekil 7. Doğruluk oranlarının karşılaştırılması



Şekil 8. İşlem süresi karşılaştırması

Şekil 7’de, farklı yöntemlerin doğruluk oranları karşılaştırılmaktadır. X eksen, kullanılan yöntemleri temsil ederken, Y eksen doğruluk yüzdesini göstermektedir. Yöntemler, Histogram Eşitleme, Fourier Dönüşümü, SIFT, ORB, Ticari Sistemler ve Önerilen Model olarak sıralanmıştır.

Algoritmik Başarı Kriterlerinin İncelenmesi:

- **Histogram Eşitleme (Mavi):** Yaklaşık %85 doğruluk oranı ile orta seviyede bir performans göstermektedir.
- **Fourier Dönüşümü (Yeşil):** Yaklaşık %87 doğruluk oranı ile Histogram Eşitleme yönteminden biraz daha iyi sonuçlar vermektedir.
- **SIFT (Kırmızı):** %80 doğruluk oranına sahiptir ve diğer yöntemlere kıyasla daha düşük başarı sergilemektedir.
- **ORB (Mor):** %78 doğruluk oranı ile en düşük performansa sahip yöntemlerden biridir.
- **Ticari Sistemler (Turuncu):** %90 doğruluk oranı ile geleneksel yöntemlerden daha başarılı bir performans sunmaktadır.
- **Önerilen Model (Siyah):** %95.3 doğruluk oranına ulaşarak en iyi performansı sergileyen yöntem olmuştur.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen modelin mevcut yöntemlere ve ticari sistemlere kıyasla en yüksek doğruluk oranını sunduğu görülmektedir. Bu durum, önerilen modelin daha gelişmiş özellik çıkarma ve sınıflandırma yeteneklerine

sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak; En iyi doğruluk oranı, önerilen model ile elde edilmiştir.

Şekil 8’de, farklı yöntemlerin işlem süreleri karşılaştırılmaktadır. X eksen kullanılan yöntemleri, Y eksen ise işlem süresini (ms cinsinden) göstermektedir. Yöntemlerin işlem süresi performansları, farklı renklerle belirtilmiştir.

Grafikte sunulan işlem süresi değerleri, her yöntemin parmak izi eşleştirme sürecinde gösterdiği ortalama işlem zamanını temsil etmektedir. Ölçümler, CPU zamanına dayalı olarak, algoritmaların çalıştığı süreyi milisaniye (ms) cinsinden hesaplamak suretiyle elde edilmiştir. Her yöntem için, belirli sayıda test örneği (N adet parmak izi çifti) kullanılarak eşleştirme işlemleri gerçekleştirilmiş ve bu işlemlerin başlama ve bitiş zamanları program düzeyinde ölçülmüştür.

Ayrıntılı Analiz:

- **Histogram Eşitleme (Mavi):** Yaklaşık 300 ms işlem süresi ile orta seviyede bir performans sergilemektedir.
- **Fourier Dönüşümü (Yeşil):** Benzer şekilde yaklaşık 300 ms sürede çalışarak Histogram Eşitleme ile benzer bir işlem süresine sahiptir.
- **SIFT (Kırmızı):** 600 ms üzerinde işlem süresi ile en yavaş çalışan yöntemdir. Bu, SIFT algoritmasının karmaşıklığının yüksek olmasıyla açıklanabilir.

- **ORB (Mor):** Yaklaşık 150 ms ile en hızlı yöntemlerden biri olup, düşük işlem süresi avantajı sunmaktadır.
- **Ticari Sistemler (Turuncu):** 250 ms civarında işlem süresine sahiptir ve orta seviyede bir hız performansı göstermektedir.
- **Önerilen Model (Siyah):** 200 ms civarında işlem süresi ile en hızlı yöntemlerden biri olarak dikkat çekmektedir.

Bu sonuçlar, SIFT yönteminin işlem süresi açısından dezavantajlı olduğunu, ORB ve Önerilen Model'in ise en hızlı yöntemler arasında yer aldığını göstermektedir. Önerilen Model, hem yüksek doğruluk oranı (önceki grafikte görüldüğü gibi) hem de düşük işlem süresi ile en verimli çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, önerilen modelin hem hesaplama maliyetini düşürdüğünü hem de pratik kullanım açısından avantaj sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak; Önerilen model, en hızlı yöntemlerden biri olup, SIFT'e kıyasla %67 daha hızlıdır.

3.5 Genel değerlendirme ve sonuçlar

Önerilen model, gerçekleştirdiği performans testlerinde hem geleneksel hem de ticari biyometrik sistemlere kıyasla önemli üstünlükler göstermektedir. Sistem özellikle doğruluk oranı açısından dikkat çekmekte; %95.3 ve üzeri başarı ile yüksek güvenilirlik sağlamaktadır. Yanlış kabul (FAR) ve yanlış reddetme (FRR) oranlarının ideal seviyelere düşürülmesi, sistemin güvenlik odaklı uygulamalarda rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.

Ayrıca önerilen yöntemin işlem süresi, ortalama 200 ms olarak ölçülmüş ve bu süre, ticari sistemlere kıyasla yaklaşık %20, SIFT tabanlı yöntemlere göre ise %67 daha hızlı olarak gerçekleşmiştir. Görüntü işleme kalitesi açısından da öne çıkan model, PSNR = 28 dB ve SSIM = 0.85 gibi değerlere ulaşarak görüntü bütünlüğü ve yapısal benzerlik açısından en iyi sonuçları vermiştir.

3.6 Tartışma

Çalışmada geliştirilen parmak izi tanıma sistemi, doğruluk oranı, hata payı ve işlem süresi açısından güçlü sonuçlar ortaya koymuş olsa da, sürecin farklı aşamalarında karşılaşılan bazı zorluklar ve sistemin sınırlılıkları tartışmaya değerdir.

İlk olarak, düşük kaliteli ve bozulmuş parmak izi verilerinin işlenmesi sırasında, ön işleme tekniklerinin doğruluk üzerinde doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle ışık değişimleri, sensör farklılıkları ve parmak ucu deformasyonları, iz yönü hesaplamalarında sapmalara neden olabilmekte; bu da eşleşme hassasiyetini etkileyebilmektedir. Ancak geliştirilen iz yönü destekli model, bu tür zorluklar karşısında geleneksel yöntemlere kıyasla daha kararlı sonuçlar vermiştir.

Algoritmanın geliştirilmesi ve test edilmesi süreci boyunca, farklı veri setleri ile yüzlerce test senaryosu uygulanmış ve sistemin dayanıklılığı çok çeşitli senaryolarda analiz edilmiştir. Kodlama kısmında özellikle Fourier dönüşümü, yön haritalama ve minutiae çıkarımı gibi adımların optimize edilmesi, işlem süresinin kabul edilebilir seviyelere çekilmesini sağlamıştır.

Zaman karmaşıklığı açısından sistemin işlem yükü, kullanılan veri setinin büyüklüğüne ve eşleştirilecek kayıt sayısına doğrudan bağlıdır. Ancak özellik çıkarımı ve vektör kuantizasyonu sonrası elde edilen kompakt veri temsilleri sayesinde, özellikle büyük veri tabanlarında karşılaştırma süresi ciddi ölçüde azalmıştır. Yapılan ölçümlerde, önerilen sistemin ortalama işlem süresi 200 ms civarında gerçekleşmiştir ki bu değer SIFT gibi klasik yöntemlere göre %67 daha hızlıdır.

Tasarım sürecinde geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü, sistemin kullanım kolaylığı açısından önemli bir avantaj sunmuş; bu da çalışmanın sadece akademik değil, uygulamalı sahalarda da kullanılabilirliğini artırmıştır. Ayrıca GUI üzerinden yapılan kullanıcı testleri sonucunda sistemin kullanıcı deneyimi açısından olumlu geri bildirimler aldığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, önerilen sistem; doğruluk, hız, güvenilirlik ve ölçeklenebilirlik açısından tatmin edici düzeyde performans göstermektedir. Ancak parmak izi verisinin kalitesine doğrudan bağlı olan sistem başarımı, ileri düzey öğrenme algoritmaları ve hibrit modellerle daha da geliştirilebilir. Bu noktada elde edilen izlenim, iz yönü analizi destekli yaklaşımların klasik minutiae tabanlı sistemlere kıyasla daha sağlam bir alternatif sunduğudur.

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında, parmak izi tanıma sistemlerinde doğruluk, hız ve güvenilirlik düzeylerini artırmaya yönelik optimize bir model geliştirilmiştir. Geleneksel minutiae tabanlı yaklaşımların sınırlılıklarını aşmak amacıyla, iz yönü analizi, morfolojik iyileştirme, FFT tabanlı frekans filtreleme ve vektör kuantizasyon gibi yöntemlerin bir arada kullanıldığı hibrit bir yapı önerilmiştir. Böylelikle sistem, hem yapısal özellikleri daha doğru temsil edebilmekte hem de düşük kaliteli veya bozulmuş parmak izi verileri üzerinde daha istikrarlı bir eşleştirme performansı sergileyebilmektedir.

Modelin başarımı, FVC2002 ve FVC2004 veri setleri gibi farklı kalite seviyelerine sahip parmak izi veri kümeleri üzerinde yapılan testlerle ortaya konmuştur. Elde edilen deneysel sonuçlara göre sistem; FVC2002 veri setinde %96.8, FVC2004 veri setinde ise %95.3 doğruluk oranına ulaşmıştır. Ayrıca yanlış kabul oranı (FAR) %0.02, yanlış reddetme oranı (FRR) ise %0.05 düzeyine çekilmiştir. Ortalama eşleştirme süresi 200 ms civarında ölçülmüş, bu da ticari sistemlere kıyasla yaklaşık %30, SIFT gibi geleneksel yaklaşımlara kıyasla ise %67 daha hızlı bir işlem süresi anlamına gelmektedir. Görüntü işleme kalitesi açısından sistem; 28 dB PSNR ve 0.85 SSIM değerleriyle, iz bütünlüğünü ve yapısal benzerliği en üst düzeyde koruduğunu da göstermiştir.

Sistem, yalnızca teknik anlamda değil; kullanıcı deneyimi açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü, işlem adımlarının görsel olarak izlenebilmesini ve manuel analiz yapılabilmesini mümkün kılan sezgisel bir yapı sunmaktadır. Bu sayede sistem, hem uzman analiz süreçlerine destek olacak şekilde hem de sade kullanıcılar için pratik bir kullanım sunacak biçimde esneklik kazanmıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen modelin sunduğu katkılar yalnızca algoritmik başarıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda uygulama düzeyinde de gerçek potansiyel taşımaktadır. Düşük kaliteli ve gürültülü parmak izlerinde dahi yüksek tanıma başarımı sağlaması, sistemin dayanıklılığını açıkça ortaya koymaktadır. Büyük veri tabanlarında yapılan testlerde optimize eşleştirme algoritması ile hızlı yanıt verebilmesi, modelin gerçek zamanlı uygulamalara entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Donanım bağımlılığının düşük seviyede tutulması ise, mobil cihazlar ve gömülü sistemler gibi sınırlı kaynak ortamlarında dahi etkili bir çözüm sunulabileceğini göstermektedir.

Elde edilen tüm bu bulgular, geliştirilen sistemin yalnızca akademik araştırmalarda değil; aynı zamanda adli bilişim uygulamaları ve endüstriyel biyometrik güvenlik sistemlerinde de güçlü, uygulanabilir ve sürdürülebilir bir alternatif sunduğunu kanıtlamaktadır.

Bu bağlamda geliştirilen modelin başlıca avantajları olarak ticari sistemlerden bağımsız olması, düşük maliyetli ve yüksek doğruluk oranına sahip olması, gerçek zamanlı kullanım için yeterli işlem hızına sahip olması, ve akademik testlerin yanı sıra adli bilişim ve endüstriyel alanlarda da uygulanabilir bir yapıya sahip olmasıdır. Sonuç olarak, önerilen sistemin; parmak izi tanıma alanında hem teknik hem de uygulamalı düzeyde yüksek potansiyele sahip, etkin ve güvenilir bir çözüm sunduğu açıkça ortaya konmuştur.

Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, geliştirilen sistemin daha geniş demografik yapıya sahip, gerçek dünya koşullarından elde edilmiş parmak izi verileriyle test edilmesi, modelin genellenabilirliğini artıracaktır. Özellikle yaş, cilt tipi, mesleki deformasyonlar gibi değişkenlerin performans etkisi detaylı biçimde incelenmelidir. Algoritma düzeyinde, klasik yöntemlerin derin öğrenme tabanlı yapılarla birleştirildiği hibrit modeller sayesinde daha adaptif ve gürültüye dayanıklı yapılar elde edilebilir. Mobil ve gömülü sistemlerde kullanılabilirliği artırmak için enerji tüketimi, işlemci ve bellek kullanımı gibi kaynak kısıtlarına yönelik optimizasyonların yapılması gereklidir. Bu öneriler doğrultusunda, geliştirilen modelin hem akademik hem de pratik alanlarda daha geniş çaplı kullanım potansiyeli taşıdığı değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Dr. Öğr. Üyesi Alperen Eroğlu danışmanlığında Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğrencisi Mehmet Alkaner'in yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Çalışmamızın tüm süreçlerinin araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu, etik kurallara ve bilimsel atıf gösterme ilkelerine uyduğumuzu beyan ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarların bu çalışma için beyan ettiği herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Benzerlik oranı (iThenticate):%6

Kaynaklar

[1] A.K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, R. Bolle, An identity-authentication system using fingerprints. Proceedings

- of the IEEE, 85 (9), 1365–1388, 1997. <https://doi.org/10.1109/5.628674>.
- [2] D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar, Handbook of fingerprint recognition. Springer, London, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-254-2>.
- [3] W. Chen and Y. Gao, A Minutiae-based fingerprint matching algorithm using phase correlation, Proceeding of 9th Biennial Conference of the Australian Pattern Recognition Society on Digital Image Computing Techniques and Applications (DICTA 2007), pp. 233-238, Glenelg, SA, Australia, 2007. <https://doi.org/10.1109/DICTA.2007.4426801>.
- [4] J. Fierrez, J. Galbally, J. Ortega-Garcia, et al., BiosecrID: a multimodal biometric database. Pattern Anal Applic 13, 235–246, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10044-009-0151-4>.
- [5] N. Martins, J. S. Silva, A. Bernardino, Fingerprint recognition in forensic scenarios. Sensors, 24 (2), 664, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24020664>.
- [6] A. A. Ross, A. K. Jain, K. Nandakumar, Handbook of multibiometrics. Springer, New York, 2006. <https://doi.org/10.1007/0-387-33123-9>.
- [7] D. G. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60 (2), 91–110, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.
- [8] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, et al., ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 2564–2571, IEEE, Barcelona, Spain, 2011. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>.
- [9] L. Sha and X. Tang, Orientation-improved minutiae for fingerprint matching. In Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Volume 4, pp. 432–435, Los Alamitos, CA, USA, IEEE Computer Society, 2004. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.670>.
- [10] H. Choi, K. Choi, J. Kim, Fingerprint matching incorporating ridge features with minutiae. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 6 (2), 338–345, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2010.2103940>.
- [11] V. C. Salmento, F. Bortolozzi, R. Sabourin, Multibiometric verification using dynamic selection of multiple matchers. In Proceedings of the 14th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition (CIARP 2009), Lecture Notes in Computer Science, 5856, Springer, Berlin, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4>.
- [12] W. Lee, S. Cho, H. Choi, J. Kim, Partial fingerprint matching using minutiae and ridge shape features for small fingerprint scanners. Expert Systems with Applications, 87, 183–198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.06.019>.
- [13] M. Sajjad, S. Khan, T. Hussain, et al., CNN-based anti-spoofing two-tier multi-factor authentication

- system. Pattern Recognition Letters, 126, 123-131, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.02.015>.
- [14] W. Bian, D. Xu, Q. Li, et al., A Survey of the methods on fingerprint orientation field estimation. IEEE Access, 7, 32644–32663, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903601>.
- [15] Y. Zhang, D. Shi, X. Zhan, et al., Slim-ResCNN: A deep residual convolutional neural network for fingerprint liveness detection. IEEE Access, 7, 91476–91487, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927357>.
- [16] A. Muhammed and A. R. Pais, A novel fingerprint image enhancement based on super resolution. Proceeding of 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), pp. 165-170, Coimbatore, India, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICACCS48705.2020.9074196>.
- [17] J. Engelsma, K. Cao, A. K. Jain, Learning a fixed-length fingerprint representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 43, 6, 1981–1997, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2961349>.
- [18] A. Wahab, T. M. Khan, S. Iqbal, et al., Latent fingerprint enhancement for accurate minutiae detection. Procedia Computer Science, 246, 1558-1567, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.722>.
- [19] N. Martins, J. S. Silva, A. Bernardino, Fingerprint recognition in forensic scenarios. Sensors, 24, 664, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24020664>.
- [20] Fingerprint Verification Competition 2002, FVC2002 – Fingerprint Database, BIAS Lab, University of Bologna, 2002. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>, Accessed 09 August 2025.
- [21] Fingerprint Verification Competition 2004, FVC2004 – Fingerprint Database,” BIAS Lab, University of Bologna, 2004. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>, Accessed 09 August 2025.
- [22] R. Cappelli, D. Maio, D. Maltoni, Synthetic fingerprint database generation. Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, IEEE, pp. 744–747, Quebec City, Canada, 2002. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2002.1048096>.
- [23] A.K. Jain, S. Prabhakar, L. Hong, A multichannel approach to fingerprint classification. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21 (4), 348–359, 2000. <https://doi.org/10.1109/34.761265>.
- [24] A. A. Ross, A. K. Jain, K. Nandakumar, Handbook of multibiometrics. Springer, New York, 2006. <https://doi.org/10.1007/0-387-33123-9>.
- [25] A.K. Jain, A. Ross, S. Prabhakar, An introduction to biometric recognition. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 14 (1), 4–20, 2004. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2003.818349>.
- [26] A. Hore, D. Ziou, Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM. Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition, IEEE, pp. 2366–2369, Istanbul, Turkey, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>.
- [27] Z. Wang, A.C. Bovik, H. R. Sheikh, E.P. Simoncelli, Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 13 (4), 600–612, 2004. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>.
- [28] G. Bradski, The OpenCV Library. Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, vol. 25, no. 11, pp. 120–125, 2000. https://www.researchgate.net/publication/233950935_The_Opencv_Library, Accessed 22 May 2025.
- [29] C.R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, et al., Array programming with NumPy. Nature, 585, 357–362, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [30] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, et al., Scikit-learn: machine learning in python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830, 2011. <http://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>, Accessed 09 August 2025.

